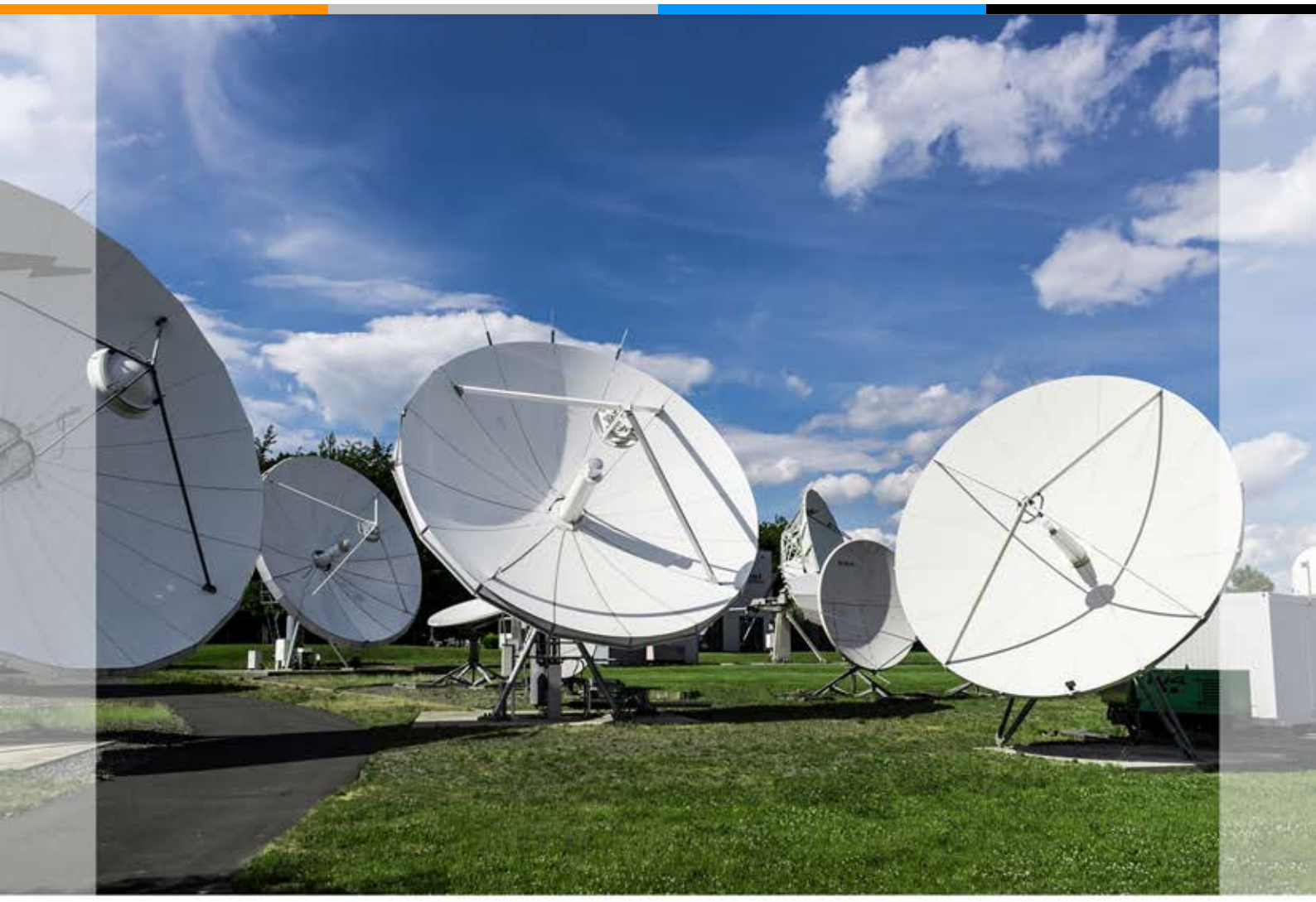


RLNC*2019

16–18 апреля 2019 г.

Сборник трудов
XXV Международной научно-технической конференции
«Радиолокация, навигация, связь»,
посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова.

Том 6

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физический факультет

АО «КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ

Сборник трудов
XXV Международной научно-технической конференции
(г. Воронеж, 16–18 апреля 2019 г.)

Т о м 6

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2019

УДК 621.37
ББК 32
Р15

Радиолокация, навигация, связь : сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции (г. Воронеж, 16–18 апреля 2019 г.) : в 6 т. / Воронежский государственный университет ; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2019.
ISBN 978-5-9273-2774-4

Т. 6. – 2019. – 463 с.
ISBN 978-5-9273-2780-5

В сборник вошли материалы XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2019), посвященной 160-летию со дня рождения А. С. Попова. Основной целью конференции является организация взаимодействия научных и научно-технических коллективов для обмена опытом и новыми творческими успехами в области передачи и обработки информации, радиолокации, навигации, современных электронных систем и др. Достижение этой цели способствует внедрению перспективных разработок, имеющих практическое значение для дальнейшего развития промышленности, экономики и научно-технического потенциала России, а также развитию творческого потенциала талантливой молодежи, привлечению ее к решению наиболее актуальных производственных, технических и научных задач.

УДК 621.37
ББК 32

© Воронежский государственный университет, 2019
© АО «Концерн «Созвездие», 2019
© Оформление. Издательский дом ВГУ, 2019

ISBN 978-5-9273-2780-5 (т. 6)
ISBN 978-5-9273-2774-4

СОДЕРЖАНИЕ

Том 1

Пленарные доклады

ВОЛНОВОДНЫЕ БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА – НОВЫЙ ТИП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Д. В. Пономарев, А. В. Скрипаль, Д. А. Усанов. 1

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И МАТЕРИАЛЫ В ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКЕ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
А. С. Багдасарян, Ю. В. Гуляев.....12

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ
К. В. Андреев, А. А. Воронин, Д. Ю. Карасев, А. Н. Леухин, А. А. Петухов. 26

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ
В. И. Борисов. 35

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБЩЕСТВА В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИОРИТЕТОВ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РОССИИ
А. А. Зацаринный.....43

Секция 1. Общие проблемы передачи и обработки информации. Цифровая обработка сигналов.

МЕТОД ЗАЩИТЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В СЕТЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
А. В. Бесков, М. Л. Вотинов, А. Ю. Живодерников, Ю. В. Ковайкин.....53

АНАЛИЗ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В СЕТЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
М. А. Гудков, О. С. Лаута, С. М. Одоевский. 58

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ
В. Д. Ле, В. И. Парфенов. 63

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СХЕМ ЗАХВАТА СИГНАЛОВ С ППРЧ
В. Е. Прохоров. 71

АНАЛИЗ СВЯЗНОСТИ АБОНЕНТОВ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСЕТИ С РОКАДНЫМИ СВЯЗЯМИ ВНУТРИ И МЕЖДУ БАЗОВЫМИ СЕГМЕНТАМИ
А. А. Коробков, И. В. Реджепов, В. Е. Тоискин. 86

АНАЛИЗ СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ
А. А. Курило, О. М. Лепешкин, А. С. Шуравин. 90

ВЕРБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦЕЛЕВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ АТАКИ
Д. А. Иванов, М. А. Коцыняк, А. Ю. Талденко. 94

ВОЗДЕЙСТВИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА НА ПРИЕМНИК С ВХОДНЫМ ПОЛОСОВЫМ ФИЛЬТРОМ
И. Н. Маснев, Г. С. Нахмансон. 99

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ И АТАК
Т. В. Арутюнян, Д. А. Кошелев. 106

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОБЛАЧНЫХ И ТУМАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ
Д. А. Кошелев, Т. В. Тимченко. 114

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ С ИНТЕРФЕЙСОМ 100GB ETHERNET
А. А. Гармаш, Е. А. Гузняева, Н. И. Каргин, В. А. Клоков, Е. Б. Рослый. 124

ЗОНДИРОВАНИЕ КАНАЛА И АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ СИГНАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО КВ КАНАЛУ
В. В. Егоров, М. Л. Маслаков. 136

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕКОДЕРА ПО АЛГОРИТМУ С ПРОВОКАЦИЕЙ СТЕРТОГО ЭЛЕМЕНТА
М. А. Дамдам. 142

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГМЕНТА СЕТИ ОПЕРАТИВНОЙ СВЯЗИ ФИКСИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИИ
А. А. Гладких, С. Д. Данилов, Р. В. Климов. 147

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ КВАНТОВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ
Т. М. Печень, Я. В. Поздняков, А. В. Сугако. 152

ИТЕРАТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОДОВЫХ КОМБИНАЦИЙ БЛОКОВЫХ КОДОВ
А. С. Аль-Месри. 160

К ВОПРОСУ О КВАЛИМЕТРИЧЕСКОМ ОЦЕНИВАНИИ ХАОТИЧЕСКИ ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
И. В. Дементьев, В. Ф. Свердел, Д. Ю. Чаркин. 166

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ КВАЗИИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ДЕКОДЕРОМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ В КАНАЛЕ СВЯЗИ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
Е. К. Карпухина, С. М. Наместников, Н. Ю. Чилихин. 177

КОРРЕЛОГРАММНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКОННОГО СГЛАЖИВАНИЯ И БИНАРНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО КВАНТОВАНИЯ ПО УРОВНЮ НЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ
А. В. Машков, В. Н. Якимов. 183

ЛЕКСИКОГРАФИЧЕСКАЯ КОГНИТИВНАЯ КАРТА ДЕКОДЕРА С НАВИГАЦИЕЙ
А. В. Борщевский, А. А. Гладких, Н. А. Пчелин. 192

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ БИНАРНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОСНОВАННЫЙ НА АЛГОРИТМЕ ФАКТОРИЗАЦИИ МНОГОЧЛЕНОВ В GF(2)
В. И. Безродный, А. Н. Леухин. 199

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДСИСТЕМ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
И. Н. Малышева, Ю. А. Плахотнюк. 205

МЕТОДИКА ПРОВЕРКИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НА НАЛИЧИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА
Т. Ю. Алмаев, О. М. Лепешкин. 210

МЕТОДЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЧАСТОТ СИГНАЛА С ППРЧ
Е. В. Григорьев. 217

МИНИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ РЕСУРСОВ ПЛИС ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МОЩНЫХ ПОМЕХ
А. Г. Студеникин. 230

МОДЕЛИРОВАНИЕ АППАРАТНОГО ОКРУЖЕНИЯ РАДИОКАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ
И. Н. Малышева, Ю. А. Плахотнюк, В. Ф. Свердел. 239

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦЕЛЕВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК НА КИБЕРФИЗИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ
Т. В. Белякова, О. С. Лаута, Е. А. Хохлачева. 247

МОДЕЛЬ СИГНАЛОВ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ
И. А. Пилипенко, О. А. Сафарьян, И. А. Сахаров.....252

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕСТРУКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ЛВС
А. В. Бесков, М. Л. Вотинов, А. В. Дидиченко, Д. Г. Дубовой, Ю. В. Ковайкин, А. В. Уйманов. 257

О СТРУКТУРЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ШУМОВ
А. Г. Ильин, В. С. Юнусова. 263

ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛА НЕИЗВЕСТНОЙ ФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ
Ю. Э. Корчагин, А. О. Липатов, М. А. Смолина.....270

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ ЧАСТОТ РЛС С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ
А. А. Веселков, В. П. Лихачев, В. В. Семенов. 278

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ РЕАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
М. А. Евсеев. 284

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРА ШПС ДЛЯ РАДИОКАНАЛОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУКТУРНЫХ И СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПОМЕХ
А. В. Сезин.....290

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРЕТО
А. В. Бусыгин, А. К. Кочешков, С. М. Одоевский. 295

ОТ ПРОТОКОЛА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ ДИФФИ-ХЕЛЛМАНА К ПОЛНОСТЬЮ ХЕШИРОВАННОМУ ПРОТОКОЛУ МЕНЕЗИСА-КЬЮ-ВАНСТОУНА
Б. Н. Воронков. 303

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОМ ПРИЕМНИКЕ
А. А. Веселков, В. П. Лихачев, Н. Ч. Нхан. 309

ОЦЕНКА ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ СИГНАЛА ПО СЖАТЫМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ COMPRESSIVE SENSING
Д. Ю. Голованов, В. И. Парфенов. 315

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ УЗЛА СВЯЗИ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ДЕСТРУКТИВНЫХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПОЛНЕНИЯ РЕГЛАМЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ
М. О. Лепешкин, Р. К. Шостак, А. С. Шуравин. 326

ОЦЕНКА СВОЕВРЕМЕННОСТИ ДОСТАВКИ ЦЕЛЕВЫХ СООБЩЕНИЙ В ВИРТУАЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСЕТИ
Е. А. Киселева, М. А. Лягин, В. Е. Тоискин. 331

ОЧИСТКА ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОЙ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ
И. С. Киреев, М. Г. Уланский. 337

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СЦЕН НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДОМИНАНТНОЙ ИНФОРМАЦИИ
А. И. Бобровский, А. В. Морозов, А. К. Цыцулин. 342

ПЕРЕСТАНОВОЧНОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ НЕДВОИЧНЫХ КОДОВ В СИСТЕМЕ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ
Д. В. Ганин, Г. М. Тамразян. 350

ПИРАМИДАЛЬНАЯ ФОРМА ПОСТРОЕНИЯ МНОГОСКОРОСТНОГО АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА
А. Ю. Линович. 356

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА СИГНАЛА СВОБОДНОГО ОТ ГАРМОНИК ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ С ЧИСЛОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
И. Е. Кащенко. 368

ПОВЫШЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В КАНАЛАХ С ЗАМИРАНИЯМИ
Л. И. Аверина, А. Ю. Лафицкий, Ю. Н. Прибытков. 375

ПОГРАНИЧНЫЕ АНОМАЛИИ В ЗАДАЧАХ ПРИЕМА СИГНАЛОВ
А. В. Зюльков. 382

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ
И. Н. Малышева, Ю. А. Плахотнюк, В. В. Погожев, В. А. Середа. 386

ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНОЙ МЕТАФОРЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМ «РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ
А. А. Гладких, А. В. Меновщиков. 393

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕСТАНОВОЧНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ НЕДВОИЧНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ КОДОВ ДЛЯ ЗАШУМЛЕНИЯ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
С. В. Шахтанов. 398

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИЙНОГО ПОДХОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ С ТИПОВЫМИ ПРОТОКОЛАМИ НА БАЗЕ КОНЕЧНЫХ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ
А. А. Коробков, М. А. Лягин, В. Е. Тоискин. 407

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА
А. В. Веденеев..... 414

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИОРИТЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАЗНОРОДНОГО ТРАФИКА В СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Л. В. Воробьёв, В. Н. Обердерфер..... 423

Том 2

Секция 1. Общие проблемы передачи и обработки информации. Цифровая обработка сигналов.

ПРОХОЖДЕНИЕ В СЕТИ СВЯЗИ ПОТОКОВОГО ТРАФИКА С ДВУМЯ И БОЛЕЕ ОПЕРАТОРАМИ, ИМЕЮЩЕГО ПРИОРИТЕТНЫЙ КЛАСС
А. А. Сенокососов, Е. Н. Чапурин, Д. А. Чепрасов. 1

РАБОТА ДЕКОДЕРА НА ОСНОВЕ ЛЕКСИКОГРАФИЧЕСКОГО ПОДХОДА
Б. А. Саид..... 6

РАЗРАБОТКА ПРАВИЛ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ПКМЦ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ПРОЦЕСС ДОСТАВКИ МНОГОПАКЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ В ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОСЕТИ
Е. А. Киселева, М. А. Лягин, В. Е. Тоискин. 10

РАНГОВЫЙ КРИТЕРИЙ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА ЛЧМ-ИОНОЗОНДА
А. Е. Недопекин. 17

РАСЧЕТ ЖИВУЧЕСТИ УЗЛА СВЯЗИ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Г. В. Бурло..... 24

РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ВРЕМЕННОГО УПЛОТНЕНИЯ СИГНАЛОВ
Г. В. Никонова, А. С. Фатеева. 31

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ЭФФЕКТИВНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ
Т. В. Белякова, Э. А. Бударин, И. В. Карасев. 40

СОВМЕСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ПОЛОЖЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО МАКСИМУМА РЕАЛИЗАЦИИ СТАЦИОНАРНОГО ГАУССОВСКОГО СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА
А. В. Зюльков. 45

СОКРАЩЕНИЕ ПАМЯТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ЛОГАРИФМОВ НАД ПОЛЯМИ ГАЛУА GF(P^2M)
В. В. Квашенников. 51

СПОСОБ ПЕРЕЗАПИСИ БИНАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
В. Е. Крехов, Е. В. Крехов, И. В. Крехов. 57

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ШИФРКЛЮЧЕЙ ДЛЯ СКЗИ СЕТЕЙ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
А. В. Бесков. 69

СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ЦАР
Н. А. Кунаева, В. И. Парфенов. 74

СРАВНЕНИЕ СОЗВЕЗДИЙ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ ВИДОВ ЛИНЕЙНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПО ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ НА СИМВОЛ И НА БИТ
Ю. В. Алышев, М. Б. Мещерякова, Б. И. Николаев. 86

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ПОРЯДКОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ГЛУБОКИХ ИНС
А. Б. Муравник. 96

УЯЗВИМЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА
А. В. Веденеев. 102

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦЕЛЕВОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ АТАКИ
Т. В. Белякова, М. А. Гудков, Н. В. Сидоров. 108

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАДИОСИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНЫМИ ФОРМОЙ ОГИБАЮЩЕЙ, АМПЛИТУДОЙ И НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ
К. С. Калашников, Ю. Э. Корчагин, М. В. Трифонов. 112

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЦЕНОК ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА, ИСКАЖЕННОГО МОДУЛИРУЮЩЕЙ ПОМЕХОЙ, ПРИ СОВМЕСТНОМ РАЗЛИЧЕНИИ – ОЦЕНИВАНИИ СИГНАЛОВ ПО ВРЕМЕНИ ПРИХОДА
А. В. Захаров, В. К. Маршаков..... 123

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖИТЕЛЯ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ АДДИТИВНОГО БЕЛОГО ГАУССОВСКОГО ШУМА
В. И. Костылев, Ю. С. Левицкая. 138

Секция 2. Распознавание и обработка изображений.

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО СОВМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТА С ЭТАЛОНОМ
Д. Ю. Дронов, С. А. Карпов, Е. А. Самойлин, К. Е. Скугоров. 150

АППРОКСИМАЦИЯ ПОЛИГОНОВ РАСПОЗНАВАЕМОГО ОБРАЗА ПОЛИНОМИАЛЬНЫМИ СПЛАЙНАМИ
Л. П. Коротких, А. В. Лубенцов. 157

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ПО ЗАШУМЛЕННЫМ И СМАЗАННЫМ СНИМКАМ МЕТОДОМ ГИСТОГРАММНОГО АНАЛИЗА
А. А. Васильченко, Г. А. Коптелов, Д. В. Савкин. 163

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МНОГОПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЕРЕНОСА ГРАДИЕНТОВ И ЦВЕТОВОГО СИНТЕЗА
В. С. Конов, В. В. Шипко. 172

О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ОЦЕНКИ АНИЗОТРОПИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
О. А. Машарова, Ю. С. Радченко. 181

ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕСТНИЧНОГО СПОСОБА ШИФРОВАНИЯ ПРИ СКРЫТИИ ИНФОРМАЦИИ В ИЗОБРАЖЕНИИ
А. В. Бесков, М. Л. Вотинов, Ю. В. Ковайкин, А. В. Уйманов. 190

ПРОЦЕДУРА ИТЕРАЦИОННОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ
И. Ю. Давыдов, Д. В. Климов, Р. В. Климов, Н. В. Маркеева..... 198

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЯ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ПРИЗНАКАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МАТРИЦ РАССЕЯНИЯ
И. В. Зимин, А. А. Копылов, Е. Г. Паринов. 202

Секция 3. Системы связи и передачи дискретных сообщений. Мобильная связь. Спутниковые системы связи и передачи информации.

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ СХЕМ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА
Д. В. Мокринский, А. А. Парфентьев, В. А. Цимбал. 212

ВЫРАВНИВАНИЕ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СИГНАЛУ И ПОМЕХЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ МАНИПУЛЯЦИИ
Е. О. Хабаров. 218

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ СВЯЗИ В ДЕКАМЕТРОВОЙ РАДИОЛИНИИ С ДИФФУЗНОЙ МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ ОТ ВЫБОРА РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ
Д. П. Киселев, В. П. Пашинцев, М. А. Сенокосов, А. Д. Скорик. 227

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИЩЕННОСТИ МОБИЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ
И. Я. Львович, Я. Е. Львович, Ю. П. Преображенский, А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров. 239

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАДИОКАНАЛАХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
Д. С. Махов, О. А. Финько. 245

МЕТОД БЫСТРОЙ ПЕРЕДАЧИ МНОГОРАЗРЯДНОГО ЦИФРОВОГО ВИДЕО С НАНО БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
Е. П. Петров, Е. Д. Ржаникова, Н. Л. Харина. 258

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЕЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ СТРУКТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ
Ю. А. Тамм. 267

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ЯДРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ РАЗВИТИЯ
Ю. А. Тамм. 271

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА МЕЖДУ АБОНЕНТАМИ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
С. Е. Потапов. 275

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
В. И. Курносов, А. В. Шестаков. 281

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ШАБЛОНОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗМЕЩЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЦЕНТРА ПОДВИЖНОГО УЗЛА СВЯЗИ НА МЕСТНОСТИ
С. В. Козлов, К. Г. Чупраков. 293

МЕТОДИКА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СКРЫТНОСТИ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ
В. П. Пашинцев, В. А. Цимбал, А. Ф. Чипига. 305

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСУ С ДИСКРЕТНЫМ ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ И ВЕРОЯТНОСТНЫМ КАНАЛОМ СВЯЗИ С БПЛА
А. А. Журавлев, М. Н. Ивлиев, С. В. Куцов, С. Ю. Панов. 312

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦЕЛЕВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК НА КИБЕРФИЗИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ
Т. В. Белякова, О. С. Лаута, Е. А. Хохлачева. 320

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ
Ю. С. Ионенков. 325

О ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ С МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ В МНОГОЛУЧЕВОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ
Ч. Т. До, Г. В. Куликов, З. В. Нгуен. 334

ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНО ЗАВИСИМЫХ СИГНАЛОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПЕРЕНАСЫЩЕННЫХ СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ
Д. Л. Бураченко, Е. В. Лебеда, Н. В. Савищенко, А. К. Скворцов. 342

ОРГАНИЧЕСКИ НАДЁЖНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ
А. В. Мержвинский, Б. М. Попов. 351

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО УЧАСТКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ПРИ ЕЕ СТРУКТУРНОМ РАСШИРЕНИИ
Н. Ф. Бух-Винер, Ю. А. Тамм. 357

ОЦЕНКА КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕДСКАЗАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ARIMA
А. Ю. Савинков. 361

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ
А. Н. Гнездилов, А. С. Щеголеватых. 367

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В КАНАЛЕ СВЯЗИ С ЗАМИРАНИЯМИ, ОПИСЫВАЕМЫМИ ДВУХЛУЧЕВОЙ МОДЕЛЬЮ
Д. Л. Бураченко, Е. В. Лебеда, Н. В. Савищенко, А. К. Скворцов. 382

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СВЯЗНОСТИ РАДИАЛЬНО-УЗЛОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ С РОКАДНЫМИ И ПЕРЕКРЕСТНЫМИ СВЯЗЯМИ
К. И. Гвозд, И. В. Реджепов. 393

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА БОУЗА-ЧОУДХУРИ-ХОКВИНГЕМА
И. С. Киреев, М. Г. Уланский. 402

СИСТЕМА OFDM-QPSK ДЛЯ КАНАЛА С ПАМЯТЬЮ
В. Г. Карташевский, Е. С. Семенов. 413

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ
А. Н. Асосков, И. И. Малышев, А. И. Мордовин. 423

Том 3

Секция 3. Системы связи и передачи дискретных сообщений. Мобильная связь. Спутниковые системы связи и передачи информации.

ФАЗОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ В ОДНОЧАСТОТНОЙ И ДВУХЧАСТОТНОЙ АППАРАТУРЕ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО СИГНАЛАМ ГНСС
А. В. Гребенников, К. А. Куличков, Н. С. Куличкова. 1

ЦИФРОВАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА ПРИ ДВУХПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ С УЧЕТОМ КВАДРАТУРНОГО ДИСБАЛАНСА
Л. И. Аверина, О. В. Бугров. 7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ ГИПОТЕЗЫ О БЛОКАХ
А. В. Борисенков, Д. В. Суханов. 15

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТРОПОСФЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ
Л. И. Аверина, А. С. Малев, Д. Ю. Чаркин, Е. В. Аверина. 19

Секция 4. Тепловые, лазерно-оптические системы наблюдения и связи.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА В ПАССИВНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРСОНАЛЬНОГО ДОСМОТРА
А. В. Журавлев. 28

ПАССИВНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ БЛИЖНЕГО ЗОНДИРОВАНИЯ
С. М. Гудков, В. К. Клочко, Х. К. Нгуен. 41

СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ ТРОИЧНОЙ ЛОГИКИ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО RGB ДИОДА
А. М. Бобрешов, Е. В. Золотухин, А. Г. Кошелев. 51

Секция 5. Радиолокация. Радиолокационные системы с синтезированной апертурой (РСА). Авиационно-космические радиоэлектронные системы.

АВТОФОКУСИРОВКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ СУРРОГАТНЫХ КВАДРАТИЧНЫХ ФУНКЦИЙ КАЧЕСТВА
А. А. Монаков.....68

АДАПТИВНАЯ ПОСЛЕДЕТЕКТОРНАЯ МЕЖДУПЕРИОДНАЯ ОБРАБОТКА В СЛЕДЯЩЕЙ АМПЛИТУДНОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РЛС
Н. А. Файзулин, И. Е. Чухломин. 82

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В ОБЗОРНЫХ РЛС С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ПРИЕМНЫМИ СИСТЕМАМИ
Х. Т. Ву, С. В. Козлов. 102

БОРТОВАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СИСТЕМА БЕЗОПАСНОЙ ПОСАДКИ ВЕРТОЛЁТА
А. П. Климова, А. А. Комаров. 116

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСТРЕБИТЕЛЯ F-22 RAPTOR
Д. В. Амбросов, В. А. Кузнецов. 126

ЗАГОРИЗОНТНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ В МЕТРОВОМ (УКВ) ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН
В. А. Алебастров, В. А. Борсоев, В. В. Борсоева, Э. И. Шустов.....138

КОМБИНИРОВАНИЕ КООРДИНАТ В ПРОСТРАНСТВЕ ИЗМЕРЕНИЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НА УКВ РЛС
Б. И. Всеволод, И. П. Назаренко, С. М. Савельев, А. И. Стучилин, Э. И. Шустов, А. В. Щербинко. 141

КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМИНАЛА ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ KU- ДИАПАЗОНА
М. А. Донских, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, И. В. Попов, К. С. Сафонов. 153

МАКЕТ МАЛОГАБАРИТНОЙ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ РЛС С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ НА МУЛЬТИКОПТЕРЕ
А. В. Дмитриев, Д. С. Жарков, А. С. Половинкина, И. М. Ярцев. 164

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ РЕШЕТОК КОМПЕНСАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ В РАСКРЫВ КРУГЛОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПРОХОДНОГО ТИПА
Р. В. Калашников, А. М. Лаврентьев. 181

МЕТОДИКА ВЫБОРА ТИПА ВЕСОВОЙ ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ПОРОГА ДЛЯ ЗОНДИРУЮЩЕГО КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО СИГНАЛА С ЛЧМ ПРИ ЗАДАННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОЙ ТРЕВОГИ
С. А. Зайцев, А. М. Лаврентьев. 191

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АФАР
В. И. Гриднев..... 201

МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ПОСАДКИ ВОЕННОГО АЭРОДРОМА
Е. С. Перевозов. 210

НАКОПЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ОТ ЦЕЛЕЙ В ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ПРИ ЛОКАЦИИ «НА ПРОСВЕТ»
В. А. Гребенник, А. И. Назаров, И. В. Перцев, А. Б. Силантьев, Д. Д. Узденов. 216

О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ ИОНОСФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ВОССОЗДАНИИ ЗГ РЛС ЭШЕЛОНА СПРН
А. О. Щирый. 226

ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ СО СЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ
В. С. Костенников, Г. С. Нахмансон, А. О. Шмойлов. 235

ОБРАБОТКА СИГНАЛА В РАДИОЛОКАТОРЕ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОЛОТНА
К. Н. Чугай. 240

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАТОРА НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МЕТОДЕ ЗОНДИРОВАНИЯ
Р. А. Воробьев, Д. А. Черепанов. 245

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВАХ С КОНИЧЕСКИМ СКАНИРОВАНИЕМ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ
Х. Т. Ву, С. В. Козлов, А. Н. Мороз. 253

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ПЕЛЕНГОВ В УГЛОМЕРНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИИ
Ю. Г. Булычев, А. Г. Кондрашов, А. А. Мозоль. 261

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ
Д. С. Акиньшин, Г. С. Нахмансон. 273

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕЖОБЗОРНОГО НАКОПЛЕНИЯ ПРИНЯТЫХ СИГНАЛОВ
В. А. Белокуров. 279

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ СО СЛУЧАЙНОЙ ВОБУЛЯЦИЕЙ ПЕРИОДА ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ
В. В. Родионов. 284

ПОСТРОЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ НА БОРТУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА
Е. П. Петров, Н. Л. Харина. 294

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «АИСТ-2Д» ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО БИСТАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В Р-ДИАПАЗОНЕ
О. В. Горячкин, Д. В. Лучин, И. В. Маслов. 305

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РНС
С. Ю. Сысуев, А. А. Филиппов. 311

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОБЪЕКТОВ
К. В. Татаренков. 318

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА В КАЧЕСТВЕ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕЙ СХЕМЫ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
Л. А. Овчаренко, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, И. В. Попов, Ф. С. Сафонов... 323

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ БОРТОВОЙ ПЕЛЕНГАТОРНОЙ АНТЕННЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОПЕЛЕНГОВАНИЯ РАДИООРИЕНТИРОВ
А. Д. Виноградов, Л. А. Минин, Е. Ю. Морозов, С. Н. Ушаков..... 337

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В ОБЗОРНЫХ РЛС С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ПРИЕМНЫМИ СИСТЕМАМИ
Х. Т. Ву, С. В. Козлов. 345

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАДРА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
М. Ю. Нестеров..... 356

ТРЕБОВАНИЯ К БОРТОВОМУ КОМПЛЕКСУ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ЧАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РАДИОЛОКАТОРОМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ
Е. Г. Спиридонов, А. В. Унковский. 361

ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ МНОГООБЗОРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ХАФА
А. В. Голубев, Ж. С. Олим, А. Б. Силантьев, К. А. Фернанду. 367

ФУНКЦИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ВДОЛЬ ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД, В УРАВНЕНИИ ДАЛЬНОСТИ РАДИОЛОКАТОРА
А. А. Бархоткин, А. И. Кошелев, А. М. Парменов..... 376

Секция 6. Навигация. Позиционирование. Морская локация и навигация. Гидроакустика. Системы наведения.

АДАПТАЦИЯ КАДРОВОЙ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМАХ ОРБИТАЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
А. И. Бобровский, Д. Л. Горшанов, А. В. Девяткин, А. В. Морозов, В. А. Павлов, А. К. Цыцулин. 390

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОС СИГНАЛОВ
А. В. Алышев, П. Д. Коратаев, В. А. Миронов, В. В. Неровный. 395

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИТЕРАЦИОННОГО АЛГОРИТМА НЬЮТОНА-РАФСОНА В ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТОМЕТРИИ
А. А. Ануфриев, В. В. Севидов, П. М. Чиркин, В. А. Шипунов. 403

ДИНАМИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КООРДИНАТ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
К. К. Васильев, Л. Ю. Королев. 412

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ
П. Д. Коратаев, В. В. Неровный, А. В. Савин. 419

ИНФОРМАЦИОННО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
В. В. Барановский, М. В. Барановский. 424

Том 4

Секция 6. Навигация. Позиционирование. Морская локация и навигация. Гидроакустика. Системы наведения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ В ПОМЕЩЕНИИ ПО СИГНАЛАМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
Д. В. Царегородцев, А. А. Чугунов. 1

КОМБИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ ДАЛЬНОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ
А. А. Монаков..... 8

МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ БОРТОВОЙ ПЕЛЕНГАТОРНОЙ АНТЕННЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОПЕЛЕНГОВАНИЯ РЕПЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
А. Д. Виноградов, А. Ю. Востров, И. С. Дмитриев.....17

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МЕТОДОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ НАВИГАЦИОННО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ ВОЕННОЙ АВИАЦИИ
А. В. Коровин.....33

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМ ПРИВОДОМ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ
В. В. Кузнецов. 37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ВОЗДУШНОГО СУДНА В ПОЛУАКТИВНОЙ СИСТЕМЕ МУЛЬТИЛАТЕРАЦИИ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ПРИЕМНЫХ ПОЗИЦИЙ ПО ЗАПРОСНОМУ СИГНАЛУ
Н. С. Волков, В. В. Кирюшкин, А. М. Медведев. 46

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ ЗА СЧЁТ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
А. Ю. Былдин, В. Н. Жураковский. 55

ПОСТРОЕНИЕ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ЦЕЛИ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ
А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. В. Киселев, М. Ю. Селин, Г. К. Усков. 60

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ НАВЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.
Л. П. Вечканов, А. С. Гуторов, А. Е. Кукин, А. Н. Пифтанкин, М. Н. Суетин. 65

ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ МАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ В НАВИГАЦИОННУЮ СИСТЕМУ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МАЛОГО КЛАССА
Д. Д. Ишутин, Д. А. Ишутин, Д. В. Степанов. 81

ПРОЯВЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ИНТЕРФЕРОГРАММАХ ПРИНИМАЕМЫХ СИГНАЛОВ В МЕЛКОМ МОРЕ
Е. С. Казначеева, В. М. Кузькин, Г. А. Ляхов, С. А. Переселков, Д. Ю. Просовецкий. 87

РЕАЛИЗАЦИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ЗВУКА В ОТСУТСТВИЕ ИНФОРМАЦИИ О ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ВОЛНОВОДА
Е. С. Казначеева, Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, Г. А. Ляхов, С. А. Переселков. 97

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ ДО НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДВУМЯ РАЗНЕСЕННЫМИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПРИЕМНИКАМИ
А. В. Коровин, Д. И. Савин. 107

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВЕДЕНИЯ НА ДВИЖУЩУЮСЯ ЦЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЕДИНЕННОГО ПРИНЦИПА МАКСИМУМА
Ю. О. Жуков, А. А. Костоглотов, А. А. Кузнецов, С. В. Лазаренко. 113

СРЫВ В СИСТЕМЕ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ФАЗОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГНСС ПРИ РАБОТЕ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
Н. Д. Голомазов, В. А. Миронов, В. В. Неровный, В. В. Цитиридис. 118

ТОЧНОСТЬ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГНСС В ЗОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ЛНС
Н. Д. Голомазов, В. А. Миронов, В. В. Неровный, В. В. Цитиридис. 126

Секция 7. Сверхширокополосные радиоэлектронные системы. Теория фракталов.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ
Д. В. Костин, В. Д. Лукьянчиков, М. И. Паршин, А. А. Чаплыгин. 134

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ВИДА ГЛАДКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ФОРМЫ ИМПУЛЬСА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА
С. Ю. Иванов, А. А. Смирнова. 144

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ВО ФРАКТАЛЬНОЙ СРЕДЕ
А. В. Костин. 154

ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ ХАОС В СВЯЗАННЫХ ВЧ-ГЕНЕРАТОРАХ
С. П. Кузнецов, Е. П. Селезнев, Н. В. Станкевич. 158

КВАЗИПРАВДОПОДОБНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ФАЗЫ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО КВАЗИРАДИОСИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ
М. С. Войнаровская, Ю. Э. Корчагин, К. Д. Титов. 165

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОСВЯЗИ
С. Н. Разиньков, О. Э. Разинькова. 175

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИЕМА ПАЧКИ СШП ИМПУЛЬСОВ
А. В. Андриянов. 185

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ
Т. В. Попова, П. А. Трифонов. 191

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫСОКОТОЧНОГО МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА НА ОСНОВЕ МНОГОПОЗИЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИХОДА
Т. В. Попова, П. А. Трифонов. 204

ТЕКСТУРЫ, ФРАКТАЛЫ, ДРОБНЫЕ ОПЕРАТОРЫ И МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ В РАДИОФИЗИКЕ И РАДИОЛОКАЦИИ: 40 ЛЕТ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК
А. А. Потапов. 214

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ХАОС В НЕАВТОНОМНОМ ОСЦИЛЛЯТОРЕ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ
Д. А. Крылосова, Е. П. Селезнев, Н. В. Станкевич. 243

Секция 8. Электродинамика, распространение радиоволн, антенны. Цифровые антенные решетки и технология MIMO.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
А. С. Артюх, Н. В. Поваренкин, Н. К. Третьяков. 247

АНТЕННА МОБИЛЬНОГО КОНТРОЛЬНОГО УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО МОНИТОРИНГА ПОДКОНТРОЛЬНЫХ ЛИЦ
О. А. Андреева..... 260

БИКОНИЧЕСКАЯ АНТЕННА С НЕОДНОРОДНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ДЛЯ СИСТЕМ РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ
А. М. Бобрешов, Е. А. Маркова, К. В. Смусева, Г. К. Усков. 267

ВАРИАНТ ПОДАВИТЕЛЯ SIC LATTICE REDUCTION ДЛЯ СХЕМЫ V-BLAST MIMO
Е. В. Гончаров. 272

ВЛИЯНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ
Н. О. Левенков, Ж. В. Шапошникова. 279

ВЫЧИСЛЕНИЕ МНОЖИТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НАД ИМПЕДАНСНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СЕГМЕНТОМ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ
В. В. Ахияров. 287

ДИФРАКЦИЯ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ НА ИМПЕДАНСНОМ И ПОЛУПРОЗРАЧНОМ ЭКРАНЕ ПРИ Е-ПОЛЯРИЗАЦИИ ПАДАЮЩЕГО ПОЛЯ
В. В. Ахияров. 295

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНАРНЫХ МЕТАСТРУКТУР С КИРАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ
В. М. Баннов, Д. С. Клюев, А. М. Нещерет, О. В. Осипов. 305

МЕТОД КОНСТРУКТИВНОГО СИНТЕЗА ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ
С. В. Землянский, Д. С. Махов, С. Е. Мищенко, В. В. Шацкий..... 315

МЕТОД СИНТЕЗА РАЗРЕЖЕННОЙ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АФАР С ЗАДАННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
В. В. Задорожный, Л. И. Стрельченко, С. А. Стрельченко. 330

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ ЛЕПЕСТКОВ В ПЛОСКОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ С НЕЭКВИДИСТАНТНЫМ РАЗМЕЩЕНИЕМ ФАЗОВЫХ ЦЕНТРОВ ГРУПП ПОДРЕШЕТОК
В. В. Задорожный, С. Е. Мищенко. 340

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ОБЪЕКТАХ В ВИДЕ УСЕЧЁННЫХ КОНУСОВ
А. А. Афонин, В. А. Тимофеев. 350

НАКЛОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В СЕНТЯБРЕ 2017 Г.
Ф. И. Выборнов, А. В. Першин, В. П. Урядов. 361

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ КОНСТРУКТИВНОГО СИНТЕЗА АКТИВНЫХ ФАЗИРОВАННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК
А. А. Безуглов, Д. Ю. Елисеев, А. В. Литвинов, С. Е. Мищенко, В. В. Шацкий. 369

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СИГНАЛА ЧЕРЕЗ МАГНИТОАКТИВНЫЕ СРЕДЫ
А. Д. Кононов, А. А. Кононов, В. К. Маршаков. 381

ОГРАНИЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ ИЗЛУЧЕНИЯ В АНТЕННЕ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ
А. А. Волков, П. А. Трифонов. 393

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АНТЕНН
И. Н. Медведев. 400

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ АНТЕННЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАДИОСТАНЦИЙ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
И. Ю. Хлопушин, А. А. Цветнов. 404

ОЦЕНКА МЕТОДА РАСЧЁТА ИПХ ДЛЯ АНАЛИЗА ИМПУЛЬСНОГО ПОЛЯ КРУГЛОЙ ПЛОСКОЙ АПЕРТУРЫ
А. М. Бобрешов, Н. И. Кащеев, В. Е. Копытин, Н. А. Лысенко, С. П. Скулкин, Н. С. Скулкина, Г. К. Усков. 409

ОЦЕНКА НАВОДИМОГО В НАГРУЗКЕ ВИБРАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРИЕМЕ ВИДЕОИМПУЛЬСОВ
А. П. Алимов, Р. В. Антипенский, А. А. Волков. 417

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПЕЛЕНГАЦИИ ПО АЗИМУТУ ИЛИ УГЛУ МЕСТА ПЛОСКИМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМЫ
Ю. Б. Нечаев, И. В. Пешков. 423

Том 5

Секция 8. Электродинамика, распространение радиоволн, антенны. Цифровые антенные решетки и технология MIMO.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ СО СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ
И. А. Кирпичева, А. В. Останков..... 1

ПЕЛЕНГАЦИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА НА ФОНЕ МОЩНОЙ ПОМЕХИ В МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНСАМБЛЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
С. В. Козлов, К. В. Ле. 8

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ ПРИМЕНИМЫХ ЧАСТОТ МОДОВ 1F2 И 2F2 В ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЕ
KH. PH. Kieu, GI. MI. Nguyen, HU. HO. Nguyen, А. А. Амелин. 15

ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАПОЛНЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ
А. М. Бобрешов, Н. С. Сбитнев, К. В. Смусева, Г. К. Усков. 24

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВИВАЛЬДИ ПРИ ПОДПОВЕРХНОСТНОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ МАТЕРИАЛЬНЫХ СРЕД И ОБЪЕКТОВ
Е. Л. Шошин. 31

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФРОНТА СВЕРХЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА
Е. Н. Злыднев, В. И. Тамбовцев, В. К. Усачев. 39

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, ПОКРЫТОЙ СЛОЕМ ЛЬДА
В. В. Ахияров..... 48

СИНТЕЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ
А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, М. П. Ряполов, Е. А. Сбродов, К. В. Смусева, Г. К. Усков. 54

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛУЧОМ АКТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
А. С. Артюх, Н. В. Поваренкин. 61

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ОШИБОК ПЕЛЕНГА, ВОЗНИКАЮЩИХ В СИСТЕМЕ АНТЕННА-ОБТЕКАТЕЛЬ, ДЛЯ РАДАРОВ С ФАР НА БАЗЕ КОМПАКТНОГО ПОЛИГОНА.
А. Е. Дорофеев, И. Е. Макушкин. 74

ТОНКОПРОВОЛОЧНЫЕ ИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ С ЗЕРКАЛЬНО-ПОВОРОТНОЙ СИММЕТРИЕЙ
Д. А. Куприянов, А. Г. Майоров, С. В. Морозов, Д. П. Табаков. 82

УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ Е-ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТ НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ ДИЭЛЕКТРИКА
Я. М. Кузнецов, Д. Н. Панин. 89

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕНН С ПОДЛОЖКАМИ НА ОСНОВЕ БИАНИЗОТРОПНЫХ КИРАЛЬНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ
Д. С. Клюев, А. М. Нещерет, О. В. Осипов, Ю. В. Соколова.....98

ШИРОКОПОЛОСНАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ АНТЕННА
А. М. Бобрешов, Д. П. Кондратьев, С. Е. Нескородов, Г. К. Усков.....104

ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА П-ВОЛНОВОДЕ
Г. Ф. Заргано, В. В. Земляков, А. О. Пелевин.....109

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОДНОПОЗИЦИОННОГО МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В КВ ДИАПАЗОНЕ
Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, Е. Г. Чайка. 116

Секция 9. Помехи. Электромагнитная совместимость. Радио- и оптоэлектронная разведка и подавление.

АЗИМУТАЛЬНОЕ ПЕЛЕНГОВАНИЕ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭКВИДИСТАНТНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ
Е. С. Артемова, М. П. Сличенко. 134

АЛГОРИТМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ФИЛЬТРАЦИИ КООРДИНАТ МАНЕВРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОСИСТЕМОЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО ЧАСТОТНО-УГЛОМЕРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ
Э. А. Кирсанов, С. А. Колесников. 145

ВЕРОЯТНОСТЬ ОШИБОЧНОГО ПРИЕМА БИТА В КАНАЛЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ДВОИЧНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ НА ФОНЕ ХАОТИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПОМЕХИ С ПОСТОЯННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ И СЛУЧАЙНОЙ ФАЗОЙ РАДИОИМПУЛЬСА
В. В. Михалёв, А. В. Петров..... 155

ДЕВИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ СОБЫТИЙ В СЕТИ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ
А. С. Дубонос, С. И. Кузнецов, А. А. Куренков, Д. Н. Михайлец. 163

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ НАВОДОК В ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ЛИНИИ ВБЛИЗИ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
А. В. Усков. 167

ОБНАРУЖЕНИЕ И ПЕЛЕНГОВАНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
М. Л. Артемов, О. В. Афанасьев, О. А. Машарова. 172

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СТАНДАРТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ IEEE 802.11N
О. Н. Завалишина, А. О. Липатов, К. Д. Титов. 183

ПОСТРОЕНИЕ МЕАНДР-ФИЛЬТРОВ ПОДСИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ СРЕДСТВ РАДИОМОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ СУБДИСКРЕТИЗАЦИИ СИГНАЛОВ
П. А. Глинка, С. В. Козлов. 194

ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА КОНТЕЙНЕРНЫХ СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕНИЯ ГРУППОВОЙ ЗАЩИТЫ КОРАБЕЛЬНОГО ВЕРТОЛЕТА
С. А. Мочалов, Д. Н. Швыряев. 199

УЛЬТРАЗВУК В ОФИСНОЙ СВЯЗИ: СЛУЖЕБНЫЕ КАНАЛЫ И ПОДАВЛЕНИЕ ДИКТОФОНОВ
Г. Д. Асяев, В. Н. Багаев, Б. Б. Саидов. 207

Секция 10. Радиотехнические устройства. Автоматизированные измерительные комплексы. Электроника. Техника СВЧ.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА ИХ СИГНАЛОВ
Г. А. Газарбекьян, А. А. Строцев, М. В. Шаповалов. 212

АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА КАСКАДНО-ВКЛЮЧЁННЫХ СОГЛАСУЮЩИХ СМЕШАННЫХ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКОВ ДЛЯ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НА АКТИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ
А. А. Головков, В. А. Головков. 225

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ MIMO СИСТЕМЫ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ КАНАЛОВ ПРИЕМНОГО ТРАКТА
М. В. Грачев, Ю. Н. Паршин. 242

АНОДНЫЕ АЛЮМООКСИДНЫЕ СТРУКТУРЫ СО ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ АЛЮМИНИЕВЫХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ СВЧ-ПРИМЕНЕНИЙ
Д. Л. Шиманович. 249

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЧАСТОТНО-ФАЗОВОГО ДЕТЕКТОРА НА СПЕКТР ПОМЕХ В СИСТЕМЕ АВТОПОДСТРОЙКИ С ДРОБНЫМ ДЕЛИТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ
А. В. Леньшин, М. В. Матуразов, Т. В. Матуразова, С. А. Попов, Е. В. Шаталов. ... 254

ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ТРАНКИНГОВОЙ РАДИОСВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩИХ МАТРИЦ
С. А. Литвинов, А. А. Парамонов, С. И. Струков. 265

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА РАДИОЗВУКА
И. Л. Железняк, В. И. Тамбовцев, С. Ю. Федосеев. 276

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ
А. Ф. Васильев, В. Д. Захарченко. 280

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ
А. М. Бобрешов, И. С. Коровченко, А. В. Олейников, К. А. Прохоров. 285

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДИОДА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА ПРИ ЕГО ИМПУЛЬСНОЙ НАКАЧКЕ
А. М. Бобрешов, А. Ю. Горяинова, А. С. Жабин, В. А. Степкин, Г. К. Усков. 291

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС «УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ РАДИОСИСТЕМА»
О. В. Бойко, Д. В. Журавлев, М. А. Сиваш. 297

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИФУРКАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИСН
А. А. Вороной, А. А. Кузьменко, Д. Л. Мясников. 302

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАЕКТОРИЙ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАДИОМОНИТОРИНГА
А. В. Богословский, М. И. Крутов, А. В. Усков. 311

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО И РАЗНОСТНО-ДОПЛЕРОВСКОГО СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВИЖНЫМ И ОДИНОЧНЫМ СРЕДСТВОМ РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
С. В. Клинков, И. В. Коликов, В. В. Уткин. 319

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ
А. А. Головков, В. А. Головков. 326

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ ШУМОВ СИНТЕЗАТОРА С ДРОБНЫМ ДЕЛЕНИЕМ ЧАСТОТЫ В СИСТЕМЕ АВТОПОДСТРОЙКИ
А. Н. Голубинский, А. В. Леньшин, М. В. Матуразов, В. Н. Тихомиров..... 337

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСТАТИЧЕСКОЙ ПО ФАЗЕ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТ
А. В. Леньшин, М. В. Матуразов, Т. В. Матуразова, Е. В. Шаталов..... 347

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИОПЕРЕДАТЧИКА СИГНАЛОВ ПОДВИЖНЫХ УСТРОЙСТВ
М. Ю. Петровский, Т. М. Печень, Я. В. Трофимик..... 357

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В РАДИОЛИНИИ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА
В. М. Артюшенко, В. И. Воловач..... 364

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРА ШУМОВ ПОМЕХ ДРОБНОСТИ В НЕПРЕРЫВНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ
А. В. Леньшин, М. В. Матуразов, Т. В. Матуразова, Е. В. Шаталов..... 372

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ РЕЗОНАТОРА-ТЕРМОСТАТА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ УСТАНОВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРЕЦИЗИОННОГО КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА
В. И. Карагусов. 380

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И. М. Косачев, К. Н. Чугай. 387

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ ДЛЯ ВАРИАНТОВ ВКЛЮЧЕНИЯ СОГЛАСУЮЩИХ СМЕШАННЫХ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКОВ МЕЖДУ ИСТОЧНИКОМ СИГНАЛА И НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТЬЮ
А. А. Головков, В. А. Головков. 393

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИНТЕЗАТОРАХ С БЫСТРОЙ НАСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ
А. Н. Голубинский, А. В. Леньшин, М. В. Матуразов, В. Н. Тихомиров. 413

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ АФАР
Н. А. Кушнерев, М. В. Родин. 422

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОДУЛИРОВАННОГО РАДИОСИГНАЛА В АКТИВНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ
И. Л. Железняк, В. И. Тамбовцев, С. Ю. Федосеев. 433

Том 6

Секция 10. Радиотехнические устройства. Автоматизированные измерительные комплексы. Электроника. Техника СВЧ.

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СПЕКТРА СИГНАЛА В АКТИВНОМ НЕЛИНЕЙНОМ ЭЛЕМЕНТЕ С КУБИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ
Б. Б. Саидов, И. С. Следнев, В. И. Тамбовцев. 1

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА
А. М. Бобрешов, А. С. Жабин, А. А. Жидков, Г. К. Усков. 7

ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТУРА
Н. Д. Бирюк, А. Ю. Кривцов, О. С. Хорпяков. 14

РАДИОСТАНЦИЯ СВЧ ДИАПАЗОНА
О. В. Бойко, А. В. Володько, В. А. Мальцев, М. А. Сиваш. 25

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ АВИАЦИОННЫХ ПОЛИГОНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ
А. Р. Бестугин, И. А. Киршина, В. П. Рачков, А. Д. Филин. 30

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНЫХ СООСНЫХ КОАКСИАЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ВОЛНОВОДОВ НЕСТАНДАРТНОГО СЕЧЕНИЯ
Б. М. Кац, В. П. Мещанов, К. А. Саяпин. 40

РАСЧЕТ ПАРАЗИТНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ФАЗЫ ИСТОЧНИКА СИГНАЛОВ ИЗ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ФАЗОВОГО ШУМА
А. В. Чадин.....45

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНАРНОГО ЭЛЕМЕНТА ТОПОЛОГИИ МИКРОПОЛОСКОВОГО УСТРОЙСТВА ПО ЗАДАННОЙ ЕМКОСТИ В СХЕМЕ ЗАМЕЩЕНИЯ
В. А. Мельник, А. В. Останков, Н. Н. Щетинин.....50

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
К. А. Бедин, А. А. Васильченко, Д. В. Савкин.....56

СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УОЛША
А. Н. Асосков, Ю. В. Левченко, И. И. Малышев, И. Н. Малышева, А. И. Мордовин, Ю. А. Плахотнюк.....62

СЛОЖЕНИЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ПОМОЩЬЮ СУММАТОРА КОНСТРУКЦИИ УИЛКИНСОНА
А. М. Бобрешов, А. Е. Елфимов, А. С. Жабин, Г. К. Усков. 69

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СТАНЦИЙ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА
А. В. Войнов, Н. Н. Плотников. 74

ТЕХНИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И МОНИТОРИНГА РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ
А. С. Багдасарян, В. И. Николаев. 79

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ Х-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ НИТРИДГАЛЛИЕВОГО ТРАНЗИСТОРА
Н. И. Каргин, Ю. А. Порохонько, А. В. Слепенков, С. А. Шостаченко..... 90

ЧИСЛЕННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СФЕРЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ НА СВЧ
К. М. Зейде. 94

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ AL-AL2O3-NI-CU-СТРУКТУР ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ-ЛИНИЙ
Д. Л. Шиманович. 101

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОЛИНИИ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА
В. М. Артюшенко, В. И. Воловач..... 106

Секция 11. Радиотехнический мониторинг Земли.

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ
О. В. Горячкин..... 115

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ
Е. Л. Шошин. 124

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
С. В. Литвинов, Д. С. Мудрик..... 134

Секция 12. Интеллектуальные системы управления и связи. Когнитивное радио.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ
И. Н. Малышева, Ю. А. Плахотнюк, В. В. Погожев, В. А. Середа. 145

АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ
С. К. Киселев, Е. И. Степнова..... 150

АЛГОРИТМ ВЫБОРА АРХИТЕКТУРЫ ПОЛНОСВЯЗНОЙ СЕТИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
А. Н. Голубинский, А. А. Толстых..... 156

АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ СВЯЗИ
А. В. Бусыгин, А. Ю. Живодерников, Ю. В. Ковайкин, П. В. Лебедев. 164

АРХИТЕКТУРА СЕТИ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ
А. В. Бесков, М. А. Коцыняк, О. С. Лаута, А. В. Мамай, И. Р. Муртазин..... 173

БЛОКЧЕЙНЫ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ И ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОНСЕНСУСА
А. А. Грушо, А. А. Зацаринный, Е. Е. Тимонина..... 183

ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНАЯ ГИПЕРСИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АГРЕГИРОВАННАЯ НЕЙРОМОРФНАЯ РАДИОПЛАТФОРМА - КАК БУДУЩЕЕ РАДИОСВЯЗИ
С. В. Карамов..... 192

ИНВЕРСНО-ПРЯМОЙ НЕЙРОКОНТРОЛЛЕР ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОГА РЕШАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ИСТОЧНИКА ИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ
А. Н. Голубинский, Н. М. Рябков. 198

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ СТРУКТУРЫ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
В. В. Алексеев.....205

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ РЕГИОНА
В. Г. Бурлов, М. О. Лепешкин..... 216

КЛАССИФИКАЦИЯ УРОВНЯ ФОРМИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
А. Н. Голубинский, М. Н. Данильченко, К. В. Пядухова, Н. М. Рябков. 222

КОМПОЗИЦИОННАЯ ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Д. В. Котов, А. А. Молявко..... 230

КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГРАДИЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ ИХ СОСТОЯНИЙ
И. А. Елфимов, М. П. Ляхненко, К. В. Цыганков, А. А. Чурсина.....236

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
А. М. Межуев, Д. Л. Стуров. 242

МЕТОДИКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЛИС АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РАДИОКОНТРОЛЯ
М. И. Спажакин, А. Б. Токарев..... 248

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДСИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИАЦИОННОЙ СЕТЬЮ СВЯЗИ
М. И. Бабкова, К. А. Смирнов. 256

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ РЕСУРСА В РЕЖИМЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА
К. В. Пядухова, Н. Н. Толстых. 270

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ СВЯЗИ
А. В. Боговик, О. А. Кривов. 283

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
А. В. Боговик, О. А. Кривов. 289

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СИНТЕЗА И КООРДИНАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
М. В. Павловский. 304

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНФЛИКТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
М. П. Иванкин, В. В. Сафронов, В. Ф. Свердел, Н. Н. Толстых. 315

МОДЕЛЬ ГРУППОВОЙ АТАКИ АВТОНОМНЫМИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ
А. В. Мефедов. 321

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ
А. Ф. Латыпова. 327

ОБОБЩЁННАЯ ОРТОГОНАЛИЗАЦИЯ ГРАМА-ШМИДТА И ПОДАВЛЕНИЕ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ В СЕТЯХ КОГНИТИВНОГО РАДИО
С. В. Карамов, А. В. Харин. 335

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ОБЛИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ СИСТЕМ СВЯЗИ
В. С. Артамонов, А. В. Винниченко. 341

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ
В. С. Артамонов, А. Н. Буренин, В. А. Васильев. 352

ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМИ СЕТЯМИ
В. С. Артамонов, А. Н. Буренин. 365

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КЛАСТЕРНОЙ MESH-СЕТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC
М. В. Богатырев, А. А. Ерыгин, С. А. Житенев, А. М. Сепкин. 375

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ОПЕРАТИВНОСТЬ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТРАКТОВ УПРАВЛЕНИЯ
Ф. П. Астапенко, М. В. Богатырев, А. А. Ерыгин, С. А. Житенев, В. П. Пустовит. .. 382

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАССАЖИРОВ НА БАЗЕ АЛГОРИТМА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ КОГНИТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
А. К. Волков, А. К. Волков, А. А. Гладких. 388

ПОДХОДЫ К МАШИННОМУ ОБУЧЕНИЮ В КОГНИТИВНОМ РАДИО
Е. А. Балашова, С. В. Карамов..... 394

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МПЧ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЕВРОАЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ
Ф. И. Выборнов, А. В. Першин, В. П. Урядов. 403

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМАМИ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА
В. Г. Бурлов, М. О. Лепешкин..... 414

СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА
М. П. Иванкин, В. В. Сафронов, В. Ф. Свердел, Н. Н. Толстых..... 420

СПОСОБ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ СЕТЕЙ СВЯЗИ
А. Н. Кривоногов, Л. Ю. Лобанова, С. Е. Потапов, А. А. Потапова, М. В. Сагиров, В. В. Храмогин. 425

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СПЕКТРА СИГНАЛА В АКТИВНОМ НЕЛИНЕЙНОМ ЭЛЕМЕНТЕ С КУБИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Б.Б. Саидов[1, 2], И.С. Следнев[2], В.И. Тамбовцев[2]

[1]Таджикский технический университет имени М.С. Осими. Душанбе, Таджикистан
[2]Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Во многих физических процессах наблюдается перенос спектра модулированного сигнала в низкочастотную область. Рассмотрим преобразование спектра тока при подаче модулированного напряжения на активный нелинейный элементе с кубической характеристикой. В представленных примерах процесс преобразования никак не связан с детектированием сигнала.

Ключевые слова: нелинейный элемент (НЭ), амплитудная модуляция (АМ), кубическая характеристика.

TRANSFORMATIONS OF THE SIGNAL SPECTRUM IN AN ACTIVE NONLINEAR ELEMENT WITH CUBIC CHARACTERISTICS

B.B. Saidov[1, 2], I.S. Slednev[2], V.I. Tambovtsev[2]

[1]Tajik technical University name M. S. Osimi. Dushanbe, Tajikistan
[2]South Ural State University. Chelyabinsk, Russia

Abstract. In many physical processes the spectrum of the modulated signal is transferred to the low-frequency region. Consider the transformation of the current spectrum when a modulated voltage is applied to a nonlinear active element with a cubic characteristic. In the examples considered, the conversion process is in no way associated with signal detection.

Keywords: nonlinear element (NE), amplitude modulation (AM), cubic characteristic.

1. Введение

Во многих физических процессах наблюдается перенос спектра модулированного сигнала в низкочастотную область, например, в явлениях возникновении радиозвука [1] и возникновении слышимого биения при взаимодействии сигналов двух ультразвуковых источников [2]. Спектр выходного сигнала нелинейным образом связан со спектром входного [3]. В общем случае анализ процесса преобразования спектра весьма сложная задача, что связано с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений. При этом в принятой форме не применим принцип суперпозиции, так как параметры выходного сигнала получаются различными, если действует совокупность источников или каждый по отдельности, а результат определяется суммированием. Однако исследование и анализ можно осуществить сравнительно простыми методами, если нелинейный элемент (НЭ) отвечает условиям безынерционности. Физически безынерционность нелинейного элемента означает появления отклика в виде *временной функции тока i(t)* вслед за изменением входного воздействия в виде *временной функции напряжения u(t)*. Если говорить строго, то безынерционных нелинейных элементов практически не существует. Все нелинейные элементы – диоды, транзисторы, аналоговые и цифровые микросхемы обладают инерционными свойствами. Вместе с тем, современные полупроводниковые приборы

достаточно совершенны по своим частотным параметрам и их удается идеализировать с точки зрения их безынерционности.

Чтобы осуществить эффективную передачу сигналов в какой-либо среде, необходимо перенести спектр этих сигналов из низкочастотной области в область достаточно высоких частот. Данная процедура в технике связи получила название модуляции. Частота ω для физического переносчика информации выбирается с учетом особенностей распространения колебаний в линиях связи или в среде при радиосвязи. Но в любом случае частота ω значительно больше наивысшей частоты Ω первичного сигнала, осуществляющего модуляцию. В этих условиях параметры модулированного колебания изменяется медленно по сравнению со скоростью изменения несущего колебания. В одном периоде модулирующего сигнала $T_F = 1/F = 2\pi/\Omega$ обычно укладываются сотни, тысячи и более периодов высокочастотного колебания. Поэтому за время нескольких периодов последнего $T_f = 1/f = 2\pi/\omega$ происходит лишь незначительное изменения параметров модулирующего сигнала [4].

2. Преобразование спектра для немодулированного сигнала

В анализе спектрального преобразования при воздействии гармоническим напряжением применяется, например, степенная аппроксимация в виде полинома с тригонометрическими функциями [3]:

$$i(t) = b_0 + b_1 U_m \cos\omega t + b_2 U_m^2 \cos^2\omega t + b_3 U_m^3 \cos^3\omega t + \cdots + b_n U_m^n \cos^n\omega t, \quad (1)$$

где U_m *[В]* – амплитуда напряжения; b_0 *[А]* – постоянная составляющая тока; b_1 *[Ом$^{-1}$]*, b_2 *[Ом$^{-2}$]*… – размерные коэффициенты. При использовании косинусов все начальные фазы нулевые [4].

В работе ограничимся полиномом третьей степени:

$$i(t) = b_0 + b_1 U_m \cos\omega t + b_2 U_m^2 \cos^2\omega t + b_3 U_m^3 \cos^3\omega t, \quad (2)$$

где $u(t) = U_m \cos\omega t$ – действующее напряжение на НЭ.

Пример 1. В безразмерной форме задаётся: $\boldsymbol{b_0 = 0,\ b_1 = 1,\ b_2 = 0,\ \ b_3 = 1, U_m = 1.}$ Определить ток.

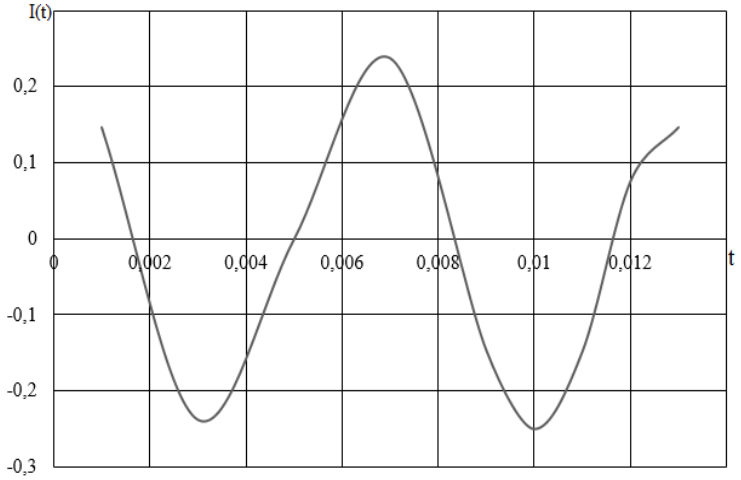


Рис. 1. Функция тока от времени для примера 1.

Решение. Если $b_2 = 0$, то применяя формулу понижения степеней $cos^3\omega t = \frac{cos\,3\omega t + 3\,cos\,\omega t}{4}$, из (2) получаем выражение для тока:

$$i(t) = \left(\frac{3b_3U_m^3}{4} + b_1U_m\right)\cos\omega t + \frac{b_3U_m^3}{4}\cos 3\omega t. \quad (3)$$

Результат представлен на рис. 1.

3. Преобразование спектра для амплитудно-модулированного сигнала

Всякое модулированное колебание несинусоидальное и имеет сложный спектр. Рассмотрим амплитудно-модулированный сигнал в простейшем случае, когда модулирующая функция представляет синусоидальный характер. Действующее на НЭ напряжение:

$$\boldsymbol{u(t) = \left(U\cos\omega_0 t + \frac{m}{2}U(\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t)\right),} \quad (4)$$

где U – амплитуда, m– глубина модуляции, ω_0 – несущая частота, Ω – частота модуляции.

Применяем по аналогии подстановку $u(t)$ в (2). Анализ справедливости этой формальной подстановки в работе не обсуждается, но в области НЧ не вызывает сомнений. Итак, получаем:

$$i(t) = b_1\left(U\cos\omega_0 t + \frac{m}{2}U(\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t)\right) + b_2\left(\mathrm{U}\cos\omega_0 t + \frac{m}{2}\mathrm{U}(\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t)\right)^2 + b_3\left(\mathrm{U}\cos\omega_0 t + \frac{m}{2}\mathrm{U}(\cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t)\right)^3 \quad (5)$$

Далее используем следующие формулы понижения степеней:

$$\cos^2\omega t = \frac{\cos 2\omega t + 1}{2}, \quad (6)$$

$$\cos^3\omega t = \frac{\cos 3\omega t + 3\cos\omega t}{4}. \quad (7)$$

Для тока $i(t)$ в результате подстановки получаем:

$$i(t) = \frac{1}{2}b_2U^2 + \frac{m^2}{4}b_2U^2 + mb_2U^2\cos\Omega t + \frac{m^2}{4}b_2U^2\cos 2\Omega t + \left(\frac{m}{2}b_1U + \frac{9m}{8}b_3U^3 + \frac{9m^3}{32}b_3U^3\right)\cos(\omega_0 - \Omega)t + \left(b_1U + \frac{3}{4}b_3U^3 + \frac{9m^2}{8}b_3U^3\right)\cos\omega_0 t + \left(\frac{m}{2}b_1U + \frac{9m}{8}b_3U^3 + \frac{9m^3}{32}b_3U^3\right)\cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{9m^2}{16}b_3U^3\cos(\omega_0 - 2\Omega)t \ldots \quad (8)$$

Здесь и ниже интерес представляют низкочастотные компоненты спектра.

Пример 2. Дано в безразмерной форме: $\boldsymbol{m = 1,\ b_0 = 0,\ b_1 = 1,\ b_2 = 1,\ b_3 = 1,\ U = 1.}$ Определить ток низкой частоты.

Решение. Из (6) получаем ток НЧ:

$$\text{НЧ: } i(t) = \frac{1}{2}b_2U^2 + \frac{m^2}{4}b_2U^2 + mb_2U^2\cos\Omega t + \frac{m^2}{4}b_2\text{и}U^2\cos 2\Omega t. \quad (9)$$



Рис. 2. Спектр сигнала при амплитудной модуляции для примера 2.

Присутствует постоянная составляющая и первых две гармоники. На рис. 2 и рис. 3 представлены результаты в виде развёртки сигнала и его спектра.

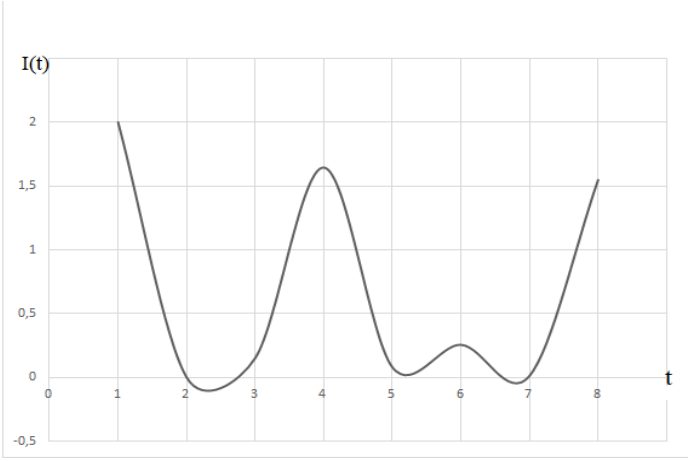


Рис. 3. Зависимость функции тока от времени для примера 2.

Пример 3. В безразмерной форме задаётся: $\boldsymbol{m = 1, b_0 = 0,\ b_1 = 1,\ b_2 = 0, b_3 = 1, U = 1.}$ Определить ток низкой частоты.

Решение. Если $b_2 = 0$, то из (7) получается отсутствие НЧ-тока и постоянной составляющей.

4. Преобразование спектра для биений

Биения образуются в результате сложения двух гармонических колебаний близких частот. Биения относятся к амплитудной модуляции, но без несущей частоты. Рассмотрим сложение двух высокочастотных колебаний:

$$u = u_1 + u_2 = U_1 \cos(\omega - \Omega)t + U_2 \cos(\omega + \Omega)t, \qquad (10)$$

где разностная частота $\Delta\omega = 2\Omega$.

Для анализа спектрального преобразования *Биений* запишем аппроксимирующий степенной полином с тригонометрическими функциями косинусов в форме:

$$\boldsymbol{i(t) = b_1(U_1 cos(\omega - \Omega)t + U_2 cos(\omega + \Omega)t) + b_2(U_1 cos(\omega - \Omega)t + U_2 cos(\omega + \Omega)t)^2 + b_3(U_1 cos(\omega - \Omega)t + U_2 cos(\omega + \Omega)t)^3} \qquad (11)$$

Используем для преобразования приведённые выше формулы понижения степеней (6) и (7). Получаем:

$$i(t) = \frac{1}{2}b_2U_1^2 + \frac{1}{2}b_2U_2^2 + b_2U_1U_2\cos 2\Omega t + \left(b_1U_1 + \frac{3}{4}b_3U_1^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right)\cos(\omega - \Omega)t + \left(b_1U_2 + \frac{3}{4}b_3U_2^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right)\cos(\omega + \Omega)t + b_2U_1U_2\cos 2\omega t + \frac{1}{2}b_2U_1^2\cos 2(\omega - \Omega)t + \frac{1}{2}b_2U_2^2\cos 2(\omega + \Omega)t + \cdots \quad (12)$$

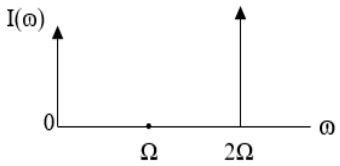


Рис. 4. НЧ спектр для биений: присутствует постоянная составляющая и частота *2*Ω.. На рис. 4 и рис. 5 представлены результаты в виде развёртки сигнала и его спектра.

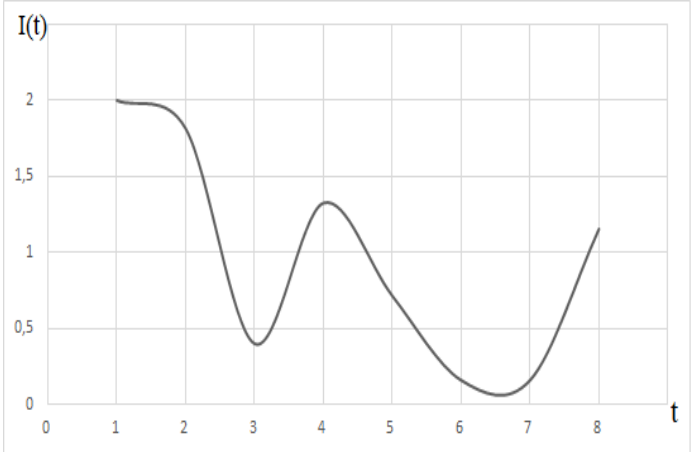


Рис. 5. Зависимость НЧ тока от времени для биений.

Если в полином (12) подставим $b_2 = 0$, то получаем для тока:

$$\mathbf{i(t)} = \left(b_1U_2 + \frac{3}{4}b_3U_2^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right)\cos(\omega - \Omega)t + \left(b_1U_2 + \frac{3}{4}b_3U_2^3 + \frac{3}{2}b_3U_1U_2\right)\cos(\omega + \Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2\cos(\omega - 3\Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2\cos(\omega + 3\Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2\cos(3\omega - \Omega)t + \frac{3}{4}b_3U_1U_2\cos(3\omega + \Omega)t + \frac{1}{4}b_3U_1^3\cos 3(\omega - \Omega)t + \frac{1}{4}b_3U_1^3\cos 3(\omega + \Omega)t \quad .(13)$$

В этом полиноме нет низких частот и нет постаянной составляющей.

5. Заключение

Рассмотрено преобразование для спектра тока при подаче модулированного напряжения на активный нелинейный элементе с кубической характеристикой. Преобразование модулированного сигнала в низкочастотную область наблюдаются тогда, когда $b_2>0$. В рассмотренных примерах процесс преобразования никак не связан с амплитудным детектированием сигнала. Анализ справедливости приведённой подстановки для АМ-сигналов выходит за рамки публикуемой работы.

Литература

1. Тамбовцев В.И., Железняк И.Л., Копыркин А.А. Микроволновый звуковой эффект преобразования модулированного радиосигнала/ Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018г. Том 21, №3. Стр.110 – 117 с.

2. Асяев Г.Д., Багаев В.Н., Саидов Б.Б. Ультразвук в офисной связи: служебные каналы и подавление диктофонов/ В сборнике трудов конференции RLNC*2019 г.
3. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов. – Москва: Радио и связь, 1982 – 280 с.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – Москва: Радио, 1977 – 608 с.

REFERENCES

1. Tambovtsev V.I., Zheleznyak I.L., Kopyrkina A.A. - Microwave sound effect of modulated radio signal conversion .: Journal - Physics of wave processes and radio engineering systems. 2018, Vol. 21, №3. Page. 110 - 117 s.
2. Asiaev G.D., Bagaev, V.N., Saidov, B.B. Ultrasound in office communication: the service channel and the suppression of the recorders/ In the conference proceedings RLNC*2019.
3. Andreev V.S. – The theory of nonlinear electrical circuits: A textbook for universities. Moscow: Radio and communications, 1982 – 280 p.
4. Gonorovsky I.S. Radio circuits and signals. Moscow: Radio, 1977 – 608 p.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА

А. М. Бобрешов[1], А. С. Жабин[1], А. А. Жидков[1], Г. К. Усков[1]

[1] ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет (ФГБОУ ВО ВГУ), Воронеж, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования метода уменьшения длительности сверхкороткого импульсного сигнала с помощью нелинейной линий передачи. В результате эксперимента удалось уменьшить длительность формируемого сигнала с 550 пс до 475 пс.

Ключевые слова: нелинейная линия передач, сверхширокополосные сигналы, субнаносекундный импульс, генератор сверхкоротких импульсов.

APPLICATION OF NONLINEAR TRANSMISSION LINE FOR ULTRA-SHORT PULSE DURATION REDUCTION

A. M. Bobreshov[1], A. S. Zhabin[1], A. A. Zhidkov[1], G. K. Uskov[1]

[1]Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia

Abstract. The results of the experimental research of the nonlinear transmission lines application for the ultra-short pulse duration reduction have been presented. The duration of the generated pulse signal was reduced from 550 ps to 475 ps.

Keywords: nonlinear transmission line, ultra-wideband signals, subnanosecond pulse, ultrashort pulse generator.

1. Введение

Импульсная сверхширокополосная радиолокация используется для решения самых различных задач, таких как измерение пульса и дыхания человека [1], обнаружение скрытого под одеждой оружия [2] и определение диэлектрической проницаемости вещества [3]. Разрешающая способность радиолокационной системы определяется шириной полосы частот используемого сигнала, согласно выражению [4]:

$$\Delta_R = \frac{c}{2BW}, \qquad (1)$$

где c – скорость света, BW - ширина полосы частот сигнала. Одним из путей расширения спектра импульсного сигнала является уменьшение его длительности. Для решения этой задачи могут быть использованы нелинейные линии передач, (НЛП) (nonlinear transmission line, NLTL) [5, 6]. В качестве нелинейного элемента в НЛП зачастую используется варикап. Длительность переходных процессов, связанных с перераспределением электронов и дырок в полупроводниковой структуре варикапа, соизмерима с длительностью генерируемого СКИ. Поскольку изменение величины нелинейной емкости связано с динамикой носителей заряда, возникает вопрос о применимости НЛП для сокращения длительности импульсов субнаносекундной длительности.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию применения нелинейной линии передачи для уменьшения длительности субнаносекундных

видеоимпульсов. К выходу генератора сверхкоротких импульсов (СКИ) была подключена нелинейная линия передачи, что позволило понизить длительность выходного сигнала на 14%, с 550 *пс* до 475 *пс*. Также стоит отметить, что использование НЛП для формирования СКИ позволило уменьшить уровень звона выходного сигнала.

2. Нелинейная линия передач

Нелинейная линия передач представляет собой соединение *LC* цепочек, где индуктивность или емкость являются нелинейными элементами. Нелинейность обусловлена свойствами электронных компонентов, тогда как отрицательная дисперсия может возникать из-за структурной периодичности линии. В данной работе исследуется линия, состоящая из шунтирующей емкости, зависящей от напряжения, и последовательного элемента, который является коротким участком микрополосковой линии. Структура такой линии передачи изображена на рисунке 1.

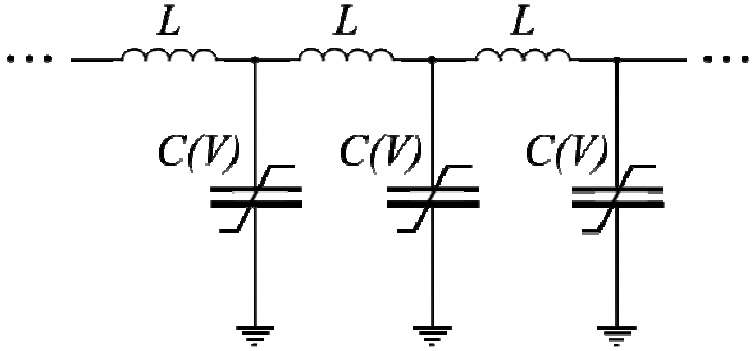


Рис. 1. Нелинейная линия передач

Вольт-фарадная характеристика нелинейной емкости представлена на рисунке 2. При малых напряжениях смещения значение емкости *C* близко к значению C_0 - емкости при напряжении смещения. С ростом обратного смещения емкость убывает по закону:

$$C(V) = \frac{C_0}{(1 + \frac{V}{V_j})^M} \qquad (2)$$

где V_j – встроенный потенциал, *M* - показатель, характеризующий величину градиента концентрации легирующей примеси в *p-n*-переходе.

Из рисунка 2 видно, что результирующая выходная емкость увеличивается при малом обратном напряжении смещения, что приводит к уменьшению наклона переднего и заднего фронтов у основания импульса. Пиковое значение напряжения генерируемого сигнала уменьшает результирующую емкость таким образом, что она не оказывает существенного влияния на форму выходного сигнала.

Скорость распространения сигнала в нелинейной линии передачи определяется соотношением:

$$\upsilon = \frac{1}{L \cdot C(V)}, \qquad (3)$$

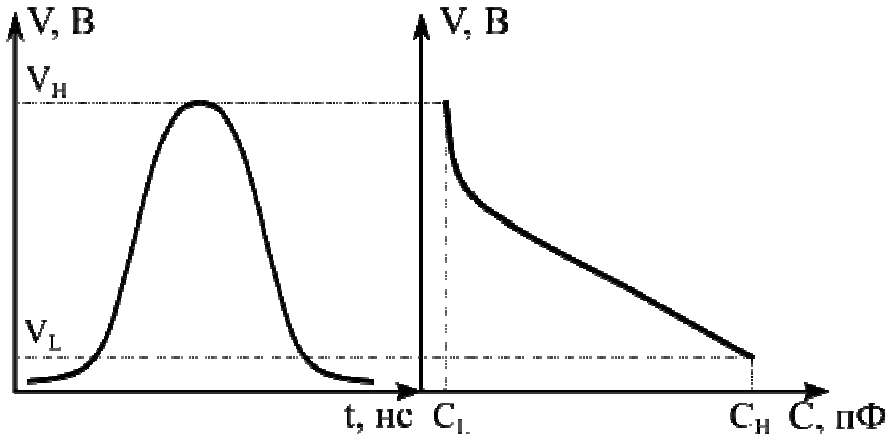


Рис. 2. Сверхкороткий импульс (слева) и вольт-фарадная характеристика (справа).

следовательно скорость зависит от величины напряжения смещения нелинейной емкости. Нарастание импульса приводит к уменьшению *C(V)* и возрастанию *υ*. В связи с этим имеет место сжатие сигнала во временной области. Таким образом, зависимость скорости распространения сигнала в НЛП от его величины лежит в основе предлагаемого способа уменьшения длительности формируемого СКИ.

3. Генерация сверхкороткого импульсного сигнала

Схема генератора сверхкоротких импульсов [7] представлена на рисунке 3. Рабочий цикл генератора состоит из трех стадий. Первая стадия начинается, когда запускающий импульс открывает транзистор *VT* и диод VD_1 смещается в прямом направлении. При этом в полупроводниковой структуре диода происходит накопление носителей заряда. Начало второй стадии работы генератора соответствует закрытию транзистора *VT*. Диод VD_1 смещается в обратном направлении, и имеет место экстракция носителей заряда из его активной области. Третья стадия рабочего цикла генератора начинается, когда весь накопленный заряд покидает активную область диода VD_1. Высокое обратное сопротивление диода VD_1 стремительно восстанавливается, и ток, текущий через индуктивность *L*, переключается в цепь нагрузки с формированием на ней импульса субнаносекундной длительности.

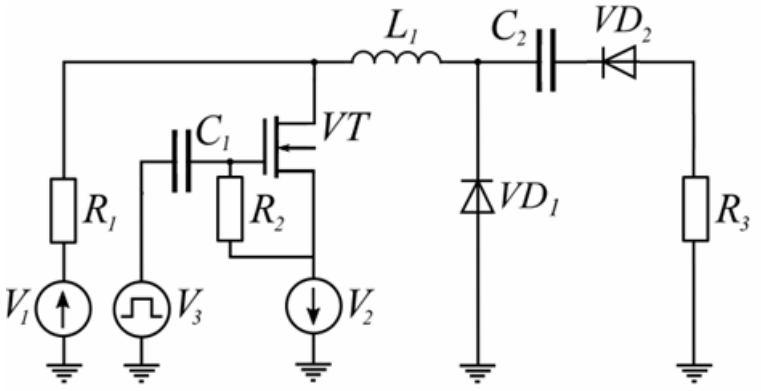


Рис. 3. Схема генератора сверхкоротких импульсов

Нормальным является режим работы варикапа, когда рабочая точка находится на отрицательной ветви вольт-фарадной характеристики. Во время второй стадии работы генератора выходная емкость C_2 перезаряжается и напряжение на нагрузке становится отрицательным. В этом случае варикапы смещаются в прямом направлении. Во избежание этого было предложено установить диод Шоттки VD_2 в цепь нагрузки. Таким образом, были обеспечены условия, при которых в течение всего рабочего цикла генератора к варикапам прикладывается только отрицательное напряжение смещения.

4. Постановка эксперимента

На рисунке 4 представлена блок-схема эксперимента. Генератор импульсов Agilent 81104A формировал сигнал запуска для генератора СКИ. Источником сверхкороткого импульсного сигнала выступал генератор на основе диода с накоплением заряда. Амплитуда и длительность формируемых импульсов составляла 34 *В* и 550 *пс*, соответственно. Осциллограммы сверхкоротких импульсов без использования нелинейной линии передачи и с её подключением к выходу генератора СКИ представлены на рисунке 5. Выходной сигнал генератора СКИ поступал на вход нелинейной линии передачи, состоящей из линейной индуктивности и нелинейной емкости. Выход НЛП был подключен к стробоскопическому осциллографу DCA-X86100D с полосой пропускания 20 ГГц.

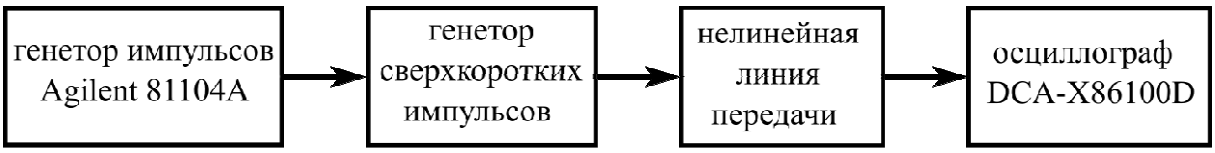


Рис. 4. Блок-схема эксперимента

В данной работе рассматривались нелинейные линии передачи, состоящие из одного, двух и трех *LC*-звеньев. В качестве нелинейной емкости использовался варикап BB833. Роль линейных индуктивностей выполняли микрополосковые линии шириной 1,15 мм и длинами 5, 10 и 15 мм, выполненные на материале FR-4 толщиной 1 мм. Ширина полосков рассчитывалась для согласования с 50-омным входом осциллографа и выходом генератора.

5. Результаты эксперимента

Параметры формируемого импульсного сигнала на выходе однозвенной нелинейной линии передачи с длинной полоска 5, 10 и 15 мм представлены в таблице 1. С увеличение длины полоска наблюдается небольшое уменьшение амплитуды, связанное с затуханием сигнала в материале подложки микрополоска. Длительность регистрируемого импульсного сигнала определялась по уровню 0,5 от амплитуды. При увеличении длины полоска до 15 мм наблюдалось уменьшение длительности с 548 пс до 503 пс.

Параметры формируемого импульсного сигнала с использованием одно-, двух- и трехзвенной нелинейной линии передачи представлены в таблице 2. Применение трехзвенной НЛП позволило уменьшить длительность СКИ до 475 пс. При этом длительность фронтов увеличилась. Объясняется это тем, что при малых напряжениях смещения, т.е. у основания импульса, результирующая выходная емкость достигала значений 25 пФ. Таким образом, наклон переднего фронта и спада импульса уменьшался, а их длительность увеличивалась. Длительность фронтов формируемого сигнала измерялась по уровню 10% и 90% от значения амплитуды.

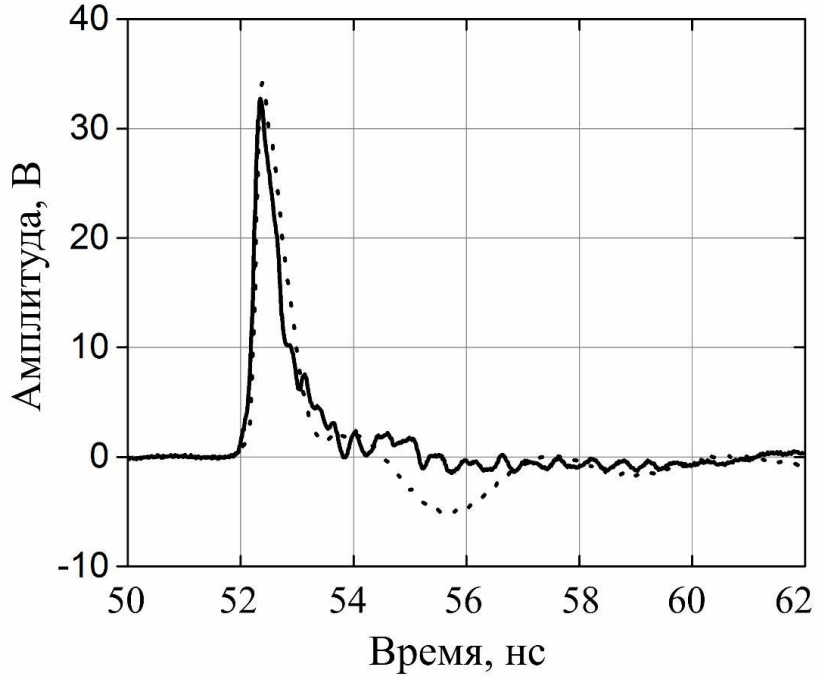


Рис. 5. Осциллограмма выходного сигнала с без использования нелинейной линии передачи и с её подключением к выходу генератора СКИ

Таблица 1. Параметры формируемого сигнала на выходе однозвенной НЛП с длинной полозка 5, 10 и 15 мм.

Длинна полоска, мм	Амплитуда, В	Длительность импульса, пс
Без НЛП	34.275	548.148
5	34.247	540.740
10	34.219	533.333
15	32.069	503.704

Стоит заметить, что амплитуда СКИ практически не менялась (менее 1,5 *В*) при подключении нелинейной линии передач к выходу генератора. Емкость варикапа при его смещении до -34 *В* составляла менее 1 *пФ*, что пренебрежимо мало в сравнении с выходной емкостью генератора СКИ. Стоит отметить, что применение НЛП для сжатия сверхкоротких импульсов позволило уменьшить уровень и повысить частоту побочных колебаний после генерации импульса. Как видно из осциллограмм на рисунке 5, после

формирования СКИ на выходе генератора присутствуют высокочастотные колебания, с которыми можно бороться при помощи режекторного фильтра.

Таблица 2. Параметры формируемого сигнала на выходе одно-, двух- и трехзвенной НЛП.

Число звеньев НЛП	Параметры формируемого сигнала			
	Амплитуда, В	Длительность импульса, пс	Длительность переднего фронта, пс	Длительность спада импульса, пс
Без НЛП	34.275	548.148	207.408	859.259
1	32.184	503.704	266.666	992.593
2	33.709	488.889	237.037	933.334
3	32.749	474.074	266.667	1140.741

6. Заключение

Применение нелинейной линии передач является перспективным направлением для уменьшения длительности субнаносекундных видеоимпульсов. В результате экспериментального исследования удалось уменьшить длительность импульсного сигнала с 550 пс до 475 пс. Потери в амплитуде сигнала при этом составили менее 5% от максимума.

7. Благодарности

Работа выполнена в рамках грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-6872.2018.9).

Литература

1. I. Seflek, Y.E. Acar, E. Yaldiz. “An Overview of Developments in Bio-Radar Applications.” // 2018 CIEA International Conference on Innivative Engineering Applications, 20-22 Sep. 2018, C. 479–484.
2. A. D. Pitcher, J. J. McCombe, E. A. Eveleigh, N. K. Nikolova. “Compact Transmitter for Pulsed-Radar Detection of On-Body Concealed Weapons.” // 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS, 10-15 June 2018, C. 919–922.
3. Y. Ahajjam, O. Aghzout, J. M. Catala-Civera, F. Penaranda-Foix, A. Driouach. An Advanced Electrical Properties Measurement Approach with a Designed Bi-Static Ultra-Wideband Impulse Radar Sensor. // Progress In Electromagnetics Research, 2018, T. 75. - C. 167-178.
4. D. Oloumi, J.W. Ting, K. Rambabu. Design of Pulse Characteristics for Near-Field UWB-SAR Imaging. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, T. 64, №. 8, 2016.
5. M. S. Nikoo, S. M. A. Hashemi, F. Farzaneh, Theory of Terminated Nonlinear Transmission Lines. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, T 66, № 1. 2018.
6. K. G. Lyon, F. Yu, E. Ch. Kan, A UWB-IR Transmitter Using Frequency Conversion in Nonlinear Transmission Lines With 16 pJ/pulse Energy Consumption. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, T 58, № 12. 2010.
7. А.М. Бобрешов, В.А. Степкин, Ю.И. Китаев, Г.К. Усков. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2011. - Т14. №3. - С. 103.

REFERENCES

1. I. Seflek, Y.E. Acar, E. Yaldiz. “An Overview of Developments in Bio-Radar Applications.” // 2018 CIEA International Conference on Innivative Engineering Applications, 20-22 Sep. 2018, C. 479–484.
2. A. D. Pitcher, J. J. McCombe, E. A. Eveleigh, N. K. Nikolova. “Compact Transmitter for Pulsed-Radar Detection of On-Body Concealed Weapons.” // 2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS, 10-15 June 2018, C. 919–922.
3. Y. Ahajjam, O. Aghzout, J. M. Catala-Civera, F. Penaranda-Foix, A. Driouach. An Advanced Electrical Properties Measurement Approach with a Designed Bi-Static Ultra-Wideband Impulse Radar Sensor. // Progress In Electromagnetics Research, 2018, T. 75. - C. 167-178.
4. D. Oloumi, J.W. Ting, K. Rambabu. Design of Pulse Characteristics for Near-Field UWB-SAR Imaging. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, T. 64, №. 8, 2016.
5. M. S. Nikoo, S. M. A. Hashemi, F. Farzaneh, Theory of Terminated Nonlinear Transmission Lines. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, T 66, № 1. 2018.
6. K. G. Lyon, F. Yu, E. Ch. Kan, A UWB-IR Transmitter Using Frequency Conversion in Nonlinear Transmission Lines With 16 pJ/pulse Energy Consumption. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, T 58, № 12. 2010.
7. A.M. Bobreshov, Y.I. Kitaev, V.A. Stepkin, G.K. Uskov. Ultra-short pulse generation // Physics of wave processes and radiotechnical systems. - 2011. - T14. №3. - C. 103.

ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТУРА

Н. Д. Бирюк[1], А. Ю. Кривцов[2], О.С.Хорпяков[3]

[1]ВГУ, Воронеж, Российская Федерация
[2]Концерн «Сорзвездие», Воронеж, Российская Федерация
[3]МИКТ, Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. При анализе нелинейных систем большое методологическое значение имеет принцип линейного включения. Он утверждает, что любое решение произвольного нелинейного дифференциального уравнения можно точно реализовать как решение специально подобранного линейного дифференциального уравнения. Этот принцип повышает значимость анализа линейных систем общего вида. В статье рассмотрена задача устойчивости параметрического контура общего вида. Приведен общий метод анализа. Получены критерии устойчивости и неустойчивости этого контура.

Ключевые слова: линейные системы, нелинейные системы, принцип линейного включения, параметрический контур, проблема устойчивости, критерии устойчивости и неустойчивости.

STABILITY PROBLEM OF TIME VARYING CIRCUIT

N.D. Birjuk[1], A.Yu. Krivtsov[2], O.S. Khorpyakov[3]

[1] Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation
[2] JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation
[3] IICT, Voronezh, Russian Federation

Abstract. The principle of linear introduction is of great importance for the analysis of nonlinear systems. It asserts that any solution of arbitrary nonlinear differential equation may be exactly repeated as solution of specially selecting linear differential equation. This principle raises importance of analysis of linear system of general type. In this article it is considered problem of stability time varying circuit of general type. It is received criteria of stability and instability of this circuit.

Keywords: linear systems, nonlinear systems, principle of linear introduction, time varying circuit, problem of stability, criteria of stability or instability.

1. Введение

Общепризнано, что общая теория нелинейных систем не удовлетворяет практическим потребителям. Она развивается по принципу рассмотрения частных случаев, но частными случаями нельзя исчерпать общую проблему. Долгое время считалось, что в случае нелинейных систем нет общего объединяющего принципа, аналогичного принципу суперпозиции для линейных систем. В действительности, такой принцип был сформулирован в 60-ых годах прошлого века в математической монографии [1]. Это принцип линейного включения, утверждающий, что любое решение произвольного нелинейного уравнения может быть точно реализовано в специально подобранном линейном уравнении.

Нам не удалось найти упоминание об этом принципе в публикациях по естествознанию и технике.

В радиотехнических дисциплинах широко применяются нелинейные системы, поэтому принцип линейного включения должен быть рабочим инструментом каждого радиоинженера. Для этого нужно рассмотреть линейные радиоцепи как можно более общего вида, в первую очередь линейные радиоцепи с периодически изменяющимися во времени параметрами (параметрические радиоцепи). Удобным объектом для этого является параметрический контур общего вида. Особого внимания заслуживает проблема устойчивости по Ляпунову параметрического контура. Согласно теории устойчивости Ляпунова, задача об устойчивости возникает применительно к конкретному решению нелинейного дифференциального уравнения. Решение считается устойчивым, если малые изменения начальных условий приводят к малым изменениям решения во всей области его существования. Из этого следует, что неустойчивые решения нереализуемы, поскольку на практике всегда найдутся причины малых изменений начальных условий.

Для линейных дифференциальных уравнений доказано, что если какое-нибудь решение в них устойчиво (неустойчиво), то и все решения устойчивы (неустойчивы). Таким образом, задача об устойчивости линейного дифференциального уравнения охватывает не только его конкретных решений, но и всё уравнение. Кроме того, в линейных уравнениях задача об устойчивости совпадает с задачей об ограничении всех решений. Применительно к параметрическому контуру это означает, что в случае устойчивости свободные процессы ограничены при любых начальных условиях, а в случае неустойчивости найдутся начальные условия такие, при которых свободные процессы с возрастанием времени стремятся к бесконечности.

При анализе устойчивости параметрического контура оказывается весьма полезной специальная задача Ляпунова об устойчивости линейного дифференциального уравнения второго порядка с периодическими коэффициентами. В общедоступных публикациях по радиотехнической тематике она не применялась.

2. Математические модели параметрического контура общего вида

Под параметрическим контуром общего вида здесь понимается контур, схема которого представлена на рис. 1.

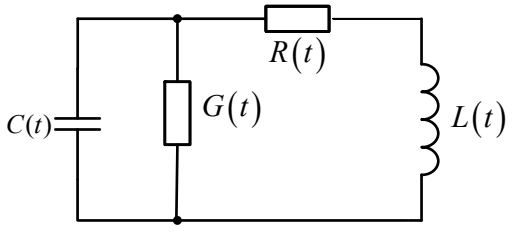


Рис. 1. Схема параметрического контура общего вид

Все его элементы положительны, непрерывны и изменяются во времени по любым периодическим функциям с общим периодом. Можно представить сколько угодно математических моделей такого контура в зависимости от того, какие две функции процесса выбраны в качестве определяющих. Практика показывает, что самая простая

модель получается, если в качестве определяющих функций выбран заряд конденсатора $q(t)$ и магнитное потокосцепление $\phi = L(t)i_L(t)$, где $i_L(t)$ - ток в индуктивности. В таком случае первый и второй законы Кирхгофа приводят к дифференциальной системе.

$$\left.\begin{aligned} \frac{d_q}{d_t} &= -\frac{G}{C}q - \frac{1}{l}\phi \\ \frac{d_\phi}{d_t} &= \frac{1}{C}q - \frac{R}{L}\phi \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

Признаком линейности является независимость функций времени $C(t)$, $L(t)$, $G(t)$, $R(t)$ от протекающих токов. Это – одна из математических моделей.

Можно получить другую модель в виде одного дифференциального уравнения второго порядке относительно q и ϕ. В первом случае из первого уравнения (1) нужно выразить ϕ, затем его подставить во второе уравнение. Во втором случае из второго уравнения (1) выражается q и подставляется в первое уравнение. В результате будем иметь:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} + \frac{d}{dt}\ln L\right)\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}\left(1 + RG + LG\frac{d}{dt}\ln\frac{LG}{C}\right)q = 0 \tag{2}$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \left(\frac{G}{C} + \frac{R}{L} + \frac{d}{dt}\ln C\right)\frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{CL}\left(1 + GR + CR\frac{d}{dt}\ln\frac{CR}{L}\right)\phi = 0 \tag{3}$$

Период изменения во времени всех элементов контура обозначен через T. Если убрать первые производные, то получим каноничный вид дифференциальных уравнений второго порядка [2]. Рассмотрим подробнее такое приведение.

Уравнение (2) и (3) являются уравнениями типа

$$\frac{d^2q}{dt^2} + a_1(t)\frac{dq}{dt} + a_2(t)q = 0$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + b_1(t)\frac{d\phi}{dt} + b_2(t)\phi = 0$$

где $a_1(t+T) = a_1(t)$, $a_2(t+T) = a_2(t)$, $b_1(t+T) = b_1(t)$, $b_2(t+T) = b_2(t)$.

К первому уравнению применяем замену переменной

$$q = x\exp\left(-\frac{1}{2}\int a_1 dt\right)$$

ко второму – аналогично

$$\phi = y\exp\left(-\frac{1}{2}\int b_1 dt\right)$$

Тогда вместо (2) и (3) получим:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + p(t)x = 0,\ p(t+T) = p(t) \tag{4}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + q(t)y = 0,\ q(t+T) = q(t) \tag{5}$$

Здесь $p = a_2 - \frac{1}{4}a_1^2 - \frac{1}{2}\frac{da_1}{dt}, q = b_2 - \frac{1}{4}b_1^2 - \frac{1}{2}\frac{db_1}{dt}$

Задаче об устойчивости уравнений такого типа академик Ляпунов посвятил 6 лет напряженного труда (1896-1902 г) и опубликовал на эту тему 5 статей [3]. Поскольку в радиотехнике эта важная задача не рассматривалась, рассмотрим вкратце подход и результаты Ляпунова.

3. Задача Ляпунова

Дано дифференциальное уравнение второго порядка в каноничной форме:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + p(t)x = 0,\ p(t+T) = p(t), \tag{6}$$

где функция $p(t)$ - непрерывная периодическая с периодом T. Требуется определить его устойчивость: в случае устойчивости все его решения в бесконечном интервале времени $[t_0, \infty)$, t_0 - любое, остаются конечными; в случае неустойчивости найдутся решения, стремящиеся к бесконечности при безграничном возрастании времени. Доказано, что в случае $p(t) \le 0$ уравнение (6) неустойчивое; в случае:

$$p(t) \ge 0, \tag{7}$$

оно может быть как устойчивым, так и неустойчивым; дать полный анализ случая знакопеременности функции $p(t)$ не удалось. Позже [4] был предложен метод анализа этого случая, но он оказался очень громоздким для практического применения. Ляпунов рассматривал случай (7) как основной. Предложено два метода решения задачи. В обоих случаях вычисляется константа Ляпунова A, решающий вопрос об устойчивости. Первый метод связан с прямым вычислением этой константы, второй – с косвенным приближенным вычислением.

В первом случае требуется найти фундаментальную систему решений дифференциального уравнения (6), состоящую из двух решений $x_1(t)$, $x_2(t)$ с начальными условиями (можно положить $t_0 = 0$)

$$x_1(0) = 1, \quad \frac{dx_1(0)}{dt} = 0; \qquad x_2(0) = 0, \quad \frac{dx_2(0)}{dt} = 1, \tag{8}$$

Если эти решения известны, то находятся два числа

$$x_1(T),\ \frac{d}{dt}x_2(T), \tag{9}$$

по которым легко вычисляется константа Ляпунова

$$A = \frac{1}{2}\left[x_1(T) + \frac{d}{dt}x_2(T)\right]. \tag{10}$$

Если $A < 1$, то уравнение (6) устойчиво, при $A > 1$ - неустойчиво. Случай $A = 1$ по Ляпунову считается неинтересным, так как не может быть обнаружен приближенными вычислениями. Этот метод является методически простым, но требует нахождения фундаментальной системы решений уравнения (6) – задача очень не простая.

Чтобы обойти эту сложность, Ляпунов разработал другой метод косвенного вычисления константы A. Это константа представляется в виде суммы бесконечного числового знакопеременного ряда, доказана его абсолютная сходимость и дан способ, как в некоторых случаях по конечному числу первых членов определить устойчивость или неустойчивость уравнения (6). Здесь возникает другая трудность, формулы для вычисления членов ряда оказались громоздкими, причем громоздкость быстро возрастала с повышением порядка членов. Ляпунов ограничился вычислением только первых трёх членов. Этот метод имеет большое теоретическое значение, но для решения практических задач мало приспособлен.

В настоящее время для радиотехнических задач надо отдать предпочтение методу прямого вычисления константы Ляпунова, так как он представляет собой стандартную задачу компьютерных вычислений. Покажем его реализацию на примере решения $x_1(t)$, так как другое решение $x_2(t)$ находится по аналогии. Разбиваем интервал $[0,T]$ на любое число n равных или неравных подынтервалов: $[0,t_1],[t_1,t_2],\ldots,[t_{n-1},t_n=T]$.

В каждом подынтервале функцию $p(t)$ считаем постоянной, равной любому её значению в этом подынтервале. По известным начальным условиям находим решение и его производную в первом подынтервале уравнения (6) с постоянными коэффициентом. Соответствующие значения при $t=t_1$ являются начальными значениями для второго подынтервала $[t_1,t_2]$ и т. д, решение и его производная доводится до $t=T$: $x_1(T)$, $\frac{dx_1(T)}{dt}$.Точно так же находятся числа $x_2(T)$, $\frac{d}{dt}x_2(T)$.По этим данным вычисляется константа Ляпунова. Сходимость процесса доказана [5]. Чем больше n и мельче подынтервалы, тем точнее находятся решения. Применения компьютера позволяет разбить интервал $[0,T]$ на ограниченное число подынтервалов (1000 и более) и получить практические точную константу Ляпунова A.

Как следствие косвенного вычисления константы A, Ляпунов получил легко проверяемый критерий (достаточное условие) устойчивости уравнения (6):

$$T\int_0^T p(t)dt \le 4, \tag{11}$$

который попытался сравнить с другим критерием устойчивости академика Н.Е Жуковского

$$\frac{T}{\pi}a \le E\left(\frac{T}{\pi}\right)b+1 \tag{12}$$

где $E(N)$ - наибольшее целое число, не превосходящее N, например $E(\pi)=3$, $E(e)=2$, $E(\sqrt{2})=1$. Здесь a^2 – точный верхний предел функции $p(t)$, b^2 – её точный нижний предел. Оба эти критерия могут быть полезными для радиоэлектронных задач.

Сравнение Ляпунова этих критериев не привело к определённому результату. Оно показало, что задача сравнения двух критериев по эффективности в тех случаях, когда

область применимости одного не является частью области применимости другого, очень сложна и не всегда разрешима.

4. Частные случаи параметрического контура

С позиции принципа линейного включения контур должен быть как можно более общим. С точки зрения практического применения это не обязательно. В частных случаях уравнения контура (2) и (3) упрощаются. Элементы контура разделяются на энергоёмкие (индуктивность и ёмкость) и неэнергоёмкие (активное сопротивление и проводимость). Изменения во времени положительных неэнергоёмких элементов не приводит к неустойчивости. Поэтому при анализе устойчивости контура их можно заменить эквивалентными (обычно средними) значениями и считать постоянными. При $R = const$, $G = const$ в формулах (2), (3) упростятся следующие слагаемые:

$$LG\frac{d}{dt}\ln\frac{LG}{C} = LG\frac{d}{dt}\ln\frac{L}{C}, \qquad CR\frac{d}{dt}\ln\frac{CR}{L} = CR\frac{d}{dt}\ln\frac{C}{L}$$

В радиотехнике обычно применяют контуры с малыми тепловыми потерями (высокой добротности). В таких случаях тепловые потери можно сосредоточить в одном месте, т.е положить либо $G(t) \equiv 0$, либо $R(t) \equiv 0$.

В этом случае вместо (2) и (3) получим:

при $G(t) \equiv 0$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{d}{dt}\ln L\right)\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}q = 0, \tag{13}$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \left(\frac{R}{L} + \frac{d}{dt}\ln C\right)\frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{CL}\left(1 + CR\frac{d}{dt}\ln\frac{CR}{C}\right)q = 0,$$

имеем последовательный колебательный контур;

при $R(t) \equiv 0$

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \left(\frac{G}{C} + \frac{d}{dt}\ln L\right)\frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}\left(1 + LG\frac{d}{dt}\ln\frac{LG}{L}\right)q = 0, \tag{14}$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \left(\frac{G}{C} + \frac{d}{dt}\ln C\right)\frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{CL}\phi = 0,$$

имеем параллельный колебательный контур.

Уравнения в (13), (14) различны по сложности, но эквивалентны по устойчивости, поэтому целесообразно исследовать на устойчивость более простое из них. Такими уравнениями являются первое уравнение в (13) и второе в (14). Приведем их к канонической форме. Первое уравнение в (13) заменой переменной

$$x = q\sqrt{L}\exp\left(-\frac{1}{2}\int\frac{R}{L}dt\right) \tag{15}$$

приводится к виду:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f(t)x = 0, \tag{16}$$

где

$$f(t)=\frac{1}{LC}-\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L}+\frac{d}{dt}\ln L\right)^2-\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left(\frac{R}{L}+\frac{d}{dt}\ln L\right), \tag{17}$$

Аналогично, второе уравнение в (14) заменой переменной

$$y=\phi\sqrt{C}\exp\left(-\frac{1}{2}\int\frac{G}{C}dt\right) \tag{18}$$

приводится к каноничному виду

$$\frac{d^2y}{dt^2}+q(t)y=0, \tag{19}$$

где

$$q(t)=\frac{1}{LC}-\left(\frac{G}{C}+\frac{d}{dt}\ln C\right)^2-\frac{1}{2}\frac{d}{dt}\left(\frac{G}{C}+\frac{d}{dt}\ln C\right) \tag{20}$$

Задача об устойчивости уравнений (16) и (19) приводится к задаче Ляпунова. Формулы (15) и (18) проясняют, как при переходе уравнений (16) в (13) и (18) в (14) последнее по сравнению с первыми имеют тенденцию к стабилизации за счет резистивных элементов $R(t)$ и $G(t)$.

В монографии [6] доказана вторым методом Ляпунова устойчивости параметрического контура общего вида в случае

$$\rho(t)=\sqrt{\frac{L(t)}{C(t)}}=const, \tag{21}$$

то есть при синхронном изменений во времени индуктивности и ёмкости

$$L(t)=kC(t).$$

Здесь $\rho(t)$ – характеристическое сопротивление контура, k – положительное число. Формула (21) представляет собой критерий устойчивости параметрического контура общего вида.

Докажем справедливость равенства (21), привлекая физические соображения и приведем новый критерий неустойчивости.

Положим $G(t)\equiv 0$, $R(t)\equiv 0$. Тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dq}{dt}&=-\frac{1}{L}\phi\\ \frac{d\phi}{dt}&=\frac{1}{C}q\end{aligned}\right\} \tag{22}$$

В случае $\rho(t)=const$, когда $L=kC$, k – положительное число, получим

$$\left.\begin{aligned}\frac{dq}{dt}&=-\frac{1}{kC}\phi\\ \frac{d\phi}{dt}&=\frac{1}{C}q\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

Проведём ряд преобразований:

$$\left.\begin{aligned} -\frac{k}{\phi}\frac{dq}{dt} &= \frac{1}{C} \\ \frac{1}{q}\frac{d\phi}{dt} &= \frac{1}{C} \end{aligned}\right\} \rightarrow -\frac{k}{\phi}\frac{dq}{dt} = \frac{1}{q}\frac{d\phi}{dt} \rightarrow -kq\frac{dq}{dt} = \phi\frac{d\phi}{dt} \rightarrow -k\int qdq = \int \phi d\phi \rightarrow -kq^2 = \phi^2 - const$$

$$kq^2 + \phi^2 = const \tag{24}$$

Из формулы (24) следует, что $q(t)$ и $\phi(t)$ при $t \to \infty$ не могут стремиться ни к нулю, ни к бесконечности. Следовательно, контур устойчив неасимптотически.

5. Критерий неасимптотической устойчивости.

Контур (рис.1) без тепловых потерь: $G(t) \equiv 0$, $R(t) \equiv 0$, – удовлетворяет дифференциальной системе (22). В случае $\rho(t) = \sqrt{\dfrac{L(t)}{C(t)}} = const$ он неасимптотически устойчив.

Положительные резистивные элементы $G(t)$, $R(t)$, как бы они не изменялись во времени, стабилизируют контур. Поэтому справедлив

6. Критерий асимптотической устойчивости

Контур (рис.1) с тепловыми потерями удовлетворяет дифференциальной системе (1). В случае $\rho(t) = const$ он асимптотически устойчив.

Рассмотрим случай

$$\omega_0(t) = \frac{1}{\sqrt{L(t)C(t)}} = const \text{ или } L(t) = \frac{k}{C(t)},$$

где k – положительное число. Здесь $\omega_0(t)$ – аналог собственной частоты обычного колебательного контура.

Тогда вместо (22) получим

$$\left.\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= -\frac{C}{K}\phi \\ \frac{d\phi}{dt} &= \frac{1}{C}q \end{aligned}\right\} \tag{25}$$

Преобразуем эту систему:

$$\left.\begin{aligned} -\frac{K}{\phi}\frac{dq}{dt} &= C \\ \frac{1}{q}\frac{d\phi}{dt} &= \frac{1}{C} \end{aligned}\right\}$$

перемножаем левые и правые части

$$-k\frac{\dot{q}}{q}*\frac{\dot{\phi}}{\phi}=1, \tag{26}$$

где $\dot{q}=\frac{dq}{dt}$, $\dot{\phi}=\frac{dq}{dt}$.

Для решения этого дифференциального уравнения введём обозначения

$$-k=\frac{\dot{q}}{q}=a(t),\frac{\dot{\phi}}{\phi}=\frac{1}{a(t)}, \tag{27}$$

где $a(t)$ – некоторая функция времени, которая является непрерывной и не равной ни нулю, ни бесконечности, т.е не может быть знакопеременной, она может быть либо $a(t)>0$, либо $a(t)<0$ при всех t.

Интегрируем уравнение (27)

$$-k\ln q=\int a(t)dt+\ln C_1, \qquad \ln\phi=\int\frac{dt}{a(t)}+\ln C_2 ,$$

где $\ln C_1$, $\ln C_2$ – константы интегрирования. Преобразуем эти выражения:

$$\ln\left(C_1q^k\right)=-\int a(t)dt, \quad \ln\left(C_2\phi\right)=\int\frac{dt}{a(t)}.$$

Потенцируем эти равенства

$$C_1q^k = e^{-\int a(t)dt}, \quad C_2\phi = e^{\int\frac{dt}{a(t)}}.$$

Если $a(t)>0$, то $\lim\limits_{t\to\infty}q(t)=0$, $\lim\limits_{t\to\infty}\phi(t)=\infty$, если $a(t)<0$, то $\lim\limits_{t\to\infty}q(t)=\infty$, $\lim\limits_{t\to\infty}\phi(t)=0$.

Таким образом, среди решений дифференциальной системы (22) при $\omega_0(t)=const$ есть такие, которые с возрастанием времени убывают до нуля, но есть и другие, которые возрастают до бесконечности, а это – призрак неустойчивости.

7. Критерий неустойчивости дифференциальной системы (22)

При $\omega_0(t)=\frac{1}{\sqrt{L(t)*C(t)}}=const$, что равнозначно $L(t)=\frac{k}{C(t)}$, где k – положительное число, дифференциальная система (22) неустойчива.

В данном случае перейти от дифференциальной системы (22) к дифференциальной системе (1) с сохранением неустойчивости, где учитываются тепловые потери, в общем случае невозможно. Резистивные элементы стабилизируют систему. Поэтому при неустойчивости системы (22) система (1) может быть как устойчивой, так и неустойчивой. Можно лишь утверждать, что при совместном стремлении к нулю $G(t)\to 0$, $R(t)\to 0$ система (1) изменяется в сторону неустойчивости и при очень малых резистивных элементах становится неустойчивой. Если принять во внимание, что в радиотехнике применяются высокодобротные колебательные контуры, что

равнозначно малым тепловым потерям в случае параметрических контуров, тогда во многих случаях можно ожидать, что неустойчивость дифференциальной системы (22) влечёт за собой неустойчивость дифференциальной системы (1).

8. Заключение

При анализе нелинейных систем принцип линейного включения имеет непреходящее методологическое значение. Он повышает значимость анализа линейных систем общего вида. В радиоэлектронике принцип линейного включения не применяется и даже не упоминается. Это – упущение.

В случае параметрических систем задача об устойчивости имеет несравненно большее значение, чем в случае систем с постоянными параметрами. Она может быть решена, опираясь на теорию устойчивости Ляпунова. В радиоэлектронике эта теория не применяется надлежащим образом.

В данной публикации трудности анализа параметрических систем рассмотрены на примере параметрического контура общего вида. Особое внимание уделено проблеме устойчивости, для её решения привлечён специальный метод задачи от устойчивости Ляпунова, который в радиотехнике ранее не применялся.

Доказано более простым способом чем раньше, устойчивость параметрического контура общего вида в случае неизменности его характеристического сопротивления. Приведен новый критерий неустойчивости параметрического контура при отсутствии тепловых потерь и сформулированы соображения об обобщении этого критерия на параметрический контур общего вида.

Литература

1. Былов В.Ф. Теория показателей Ляпунова и её приложения к вопросам устойчивости / В.Ф Былов, Р.Э. Виноград, Д.М. Гробман, В.В. Немыцкий. – М.: Наука, 1966. – 576с.
2. Зайцев В.Ф, Справочник по линейным обыкновенным дифференциальным уравнениям / В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин. – М.: Факториал, 1997. – 303с.
3. Академик А.М Ляпунов, Собрание сочинений. Т.2. – Изд. АНСССР, - Москва-Ленинград, 1950. – 472с.
4. Якубович В.А. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения / В.А. Якубович, В.М. Старжинский. – М.: Наука, 1972. – 718 с.
5. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости / Б.П. Демидович. – М.: Наука, 1967. – 472 с.
6. Бирюк Н.Д. Основы теории параметрических радиоцепей / Н.Д. Бирюк, В.В. Юргелас. – Воронеж: Издательство-полиграфический центр ВГУ, 2012. – 345с.

References

1. Bylov B.F. Teoriya pokazatelej Lyapunova i eyo prilozheniya k voprosam ustojchivosti / B.F. Bylov, R.EH. Vinogrid, D.M. Grobman, V.V. Nem'shchkij. – M.: Nauka, 1966,- 576 s.
2. Zaitsev V. F, Handbook of linear ordinary differential equations / V. F. Zaitsev, A. D. Polyanin. - Moscow: Factorial, 1997. - 303s.
3. Akademik A.M. Lyapunov, Sobranie sochinenij T.2.- M.-L.: Izd. AN SSSR, 1956.- 472 s.
4. YAkubovich V.A. Linejnye differencial'nye uravneniya s periodicheskimi koehfficientami i ih prilozheniya / V.A. YAkubovich, V.M. Starzhinskij – M.: Nauka, 1972,- 718 s.
5. Demidovich B.P. Lekcii po matematicheskoj teorii ustojchivosti / B.P. Demidovich.- M.: Nauka, 1967.- 472 s.

6. Birjuk N.D., Yurgelas V.V. Theoretical basis of time varying circuits [Birjuk N.D., Yurgelas V.V. Osnovy teorii parametricheskih radiotsepey]. – Voronezh: Publishing and Polygraphic Center VSU, 2012. – 345 s.

РАДИОСТАНЦИЯ СВЧ ДИАПАЗОНА

А. В. Володько, М. А. Сиваш, О. В. Бойко, В. А. Мальцев

Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), Воронеж, РФ

Аннотация. В данной работе описана радиостанция сверхвысокочастотного диапазона. Приведены структурная схема установки и принцип работы. Установка относится к технике связи в СВЧ диапазоне и может быть использована в носимых радиорелейных переговорных станциях, а именно, в бытовых и служебных условиях для скрытной передачи информации, в аппаратуре охраны, сигнализации и дистанционного управления. Опыт эксплуатации установки студентами во время проведения лабораторных занятий показал высокую учебную эффективность экспериментов.

Ключевые слова: учебное оборудование, связь, СВЧ, приемопередатчик.

RADIO UHF BAND

A. V. Volodko, M. A. Sivash, O. V. Boyko, V. A. Maltsev

Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia Federation

Abstract. The radio station in the microwave range is described in report. The block diagram of the installation in the mode and the principle of operation are given. The installation refers to the communication technology in the microwave range and can be used in wearable radio relay communication stations, namely, in domestic and service conditions for covert transmission of information, in the equipment of protection, alarm and remote control. The experience of operation of the installation by students during laboratory sessions showed its high educational efficiency of experiments.

Keywords: training equipment, communications, microwave, transceiver.

1. Введение

Актуальной проблемой современного высшего образования является отсутствие современного лабораторного оборудования. Приобретение нового экспериментального радиолокационного оборудования затруднительна в первую очередь из-за его высокой стоимости. Таким образом, разработка нового лабораторного оборудования, обладающего высокой учебной ценностью и низкой себестоимостью, является важной и актуальной задачей.

Теоретические и практические аспекты радиорелейной связи и распространение СВЧ волн изучаются дисциплиной «Радиолокационные системы и комплексы». Оборудование, а именно специальные лабораторные стенды, на данный момент устарели, при этом подобные учебные стенды в России не выпускают. Поиск в сети интернет показал, что требуемая лабораторная установка имеет прототипы, но прямых аналогов не имеет. В связи с этим фактом было принято решение провести разработку стенда для исследования работы приемной и передающей аппаратуры в СВЧ диапазоне.

2. Описание лабораторной установки

Установка разработана студентами специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» в рамках дипломного проектирования

Приемная и передающая СВЧ часть приемопередатчика выполнена на базе конвертера спутникового телевидения GI – 211. В приемном тракте конвертер используется в типовой схеме включения, а в передающем тракте конвертер был подвергнут глубокой модернизации, что позволило реализовать на его основе передатчик с частотой около 10,7 ГГц и мощностью не более 1 мВт. Передаваемый СВЧ сигнал модулируется по амплитуде сигналом поднесущей частоты с центральной частотой около 100 кГц. Для передачи речевых сообщений применен метод частотной модуляции поднесущей частоты. Приемопередатчик выполнен по трансиверной схеме: каналы приема и передачи имеют общий блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), включающий в себя генератор, управляемый напряжением (ГУН), фазовый дискриминатор (ФД) и фильтр низкой частоты (ФНЧ). Структурная схема лабораторной установки показана на рис. 1.

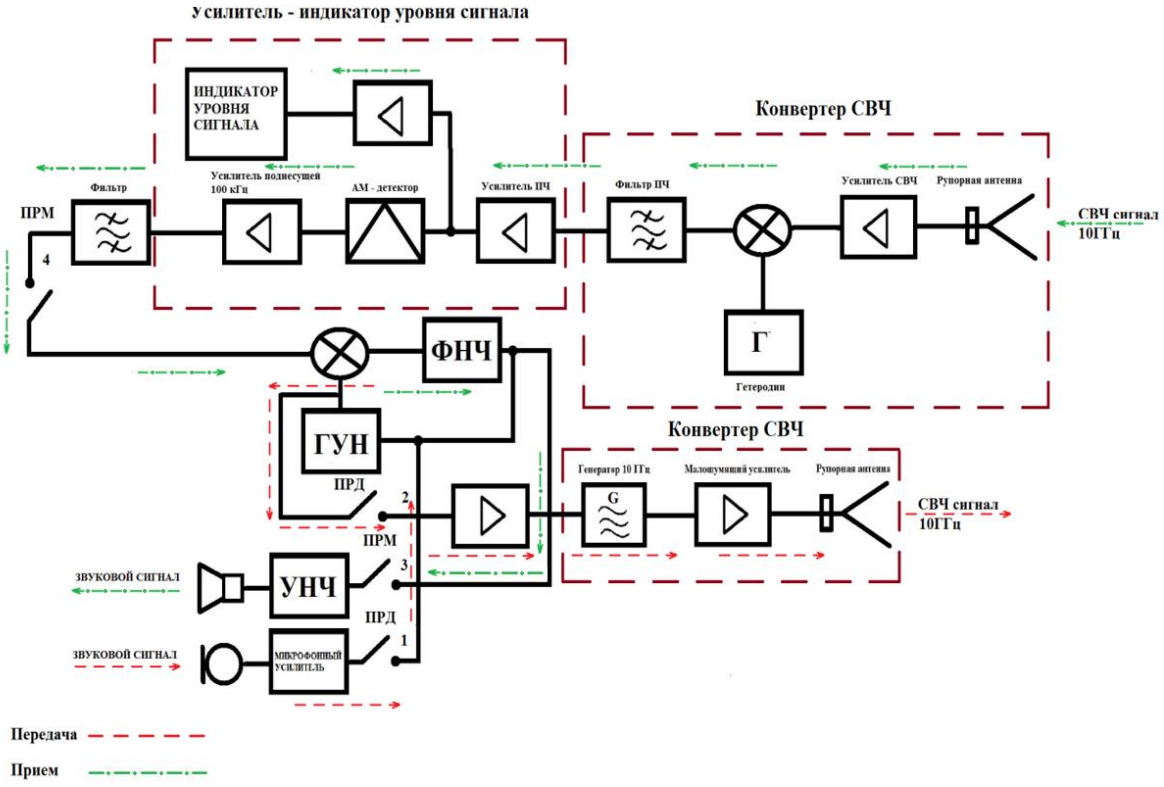


Рис. 1. Структурная схема лабораторной установки.

С целью импортозамещения, система ФАПЧ реализована на отечественной аналого-цифровой микросхеме К561ГГ1.

Функционирование лабораторной установки в режиме приема обеспечивается следующими блоками: конвертера СВЧ GI – 211, фильтр поднесущей частоты; усилитель поднесушей частоты; система ФАПЧ, фильтр низких частот, усилитель низких частот, громкоговоритель.

В режиме «приема» сигнал частотой 10.7 ГГц поступает на приемную рупорную антенну конусного типа, за которой установлен усилитель СВЧ, далее сигнал в смесителе перемножается с частотой гетеродина и поступает в фильтр ПЧ, в результате на выходе конвертера формируется сигнал промежуточной частоты около 1 ГГц. Далее происходит ее усиление и детектирование, после чего сигнал поступает на радиочастотный фильтр поднесущей частоты (100 кГц), к выходу которого подключен усилитель поднесущей частоты. В режиме приема электронные ключи (3) и (4) находятся в замкнутом состоянии, а ключи (1) и (2) – в разомкнутом. С выхода усилителя поднесущей частоты, через электронный ключ (4) сигнал подается на вход системы ФАПЧ, выполняющей роль синхронного детектора частотной модуляции, далее демодулированный сигнал звуковой частоты, через фильтр ФНЧ и электронный ключ (3) поступает на вход усилителя низкой частоты, нагрузкой которого служит громкоговоритель.

Работа СВЧ радиостанции в режиме «передача» обеспечивается следующими блоками: микрофон улавливает звуковые колебания абонента, желающего передать свою речь, и преобразует их в электрический сигнал, который далее усиливается микрофонным усилителем. В режиме «передача» электронные ключи (1) и (2) находятся в замкнутом состоянии, а ключи (3) и (4) в разомкнутом. С выхода микрофонного усилителя сигнал поступает на генератор, управляемый напряжением (ГУН) системы ФАПЧ, где генерируется сигнал поднесущей и осуществляется ее частотная модуляция по закону звукового сигнала, с выхода ГУН сигнал, близкий по форме к меандру, через электронный ключ (2) поступает на вход усилителя-формирователя поднесущей частоты, и далее на управляющий вход мощного ключевого каскада, нагрузкой которого служит переделанный в передатчик СВЧ спутниковый конвертер. Излучение формируется передающей рупорной антенной конусного типа в сигнал частотой порядка 10,7 ГГц с горизонтальной поляризацией.

3. Лабораторные исследования

Внешний вид лабораторной установки представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки.

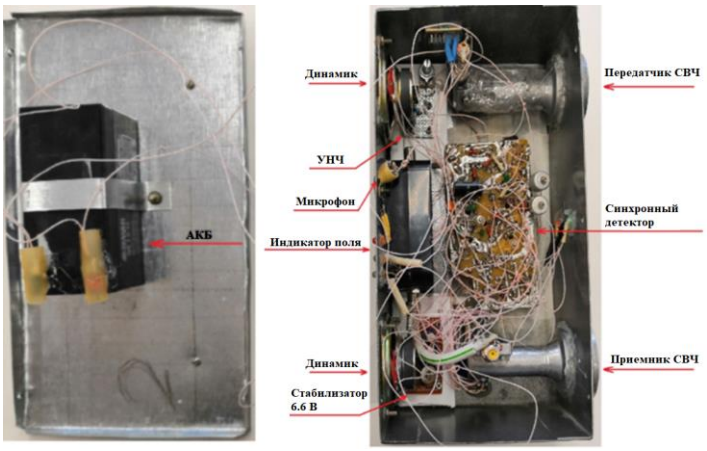
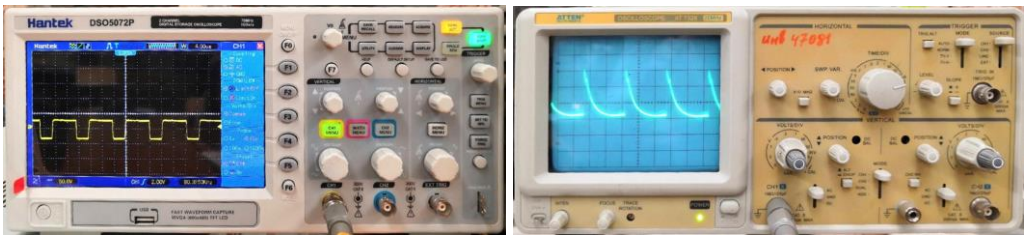


Рис. 3. Размещение элементов внутри лабораторной установки.

Лабораторная установка потребляет постоянное напряжение 12 В и ток не более 150 мА, габаритные размеры 250 × 200 × 100 мм, масса изделия не более 1 кг.

При передаче меандра с одной станции на другую, на передающей части с помощью цифрового осциллографа был зафиксирован сигнал, а приемной части был принят сигнал с сильным дифференцированием, что удовлетворяет требованиям, так как информация заключается в изменении частоты. Полученные данные представлены на рисунке 4.



а) б)

Рис. 4. Меандр на передающей части (а) и сигнал на приемной части (б).

По окончании настройки были проведены натурные испытания для оценки возможности связи между двумя корреспондентами на различных расстояниях и условиях видимости (рис. 5).



Рис. 5. Связь по отраженному от стены сигналу и связь сквозь кустарник.

Проведенные исследования в пределах лаборатории показали, что сигнал очень чувствительный к перемещению людей и предметов по лаборатории и проявляется ярко

выраженная интерференция сигнала. Однако динамический диапазон разработанной системы связи оказался вполне достаточным для обеспечения надежной связи.

Была установлена возможность связи по рассеиванию стены на расстояние до 8 метров, субъективно качество связи «хорошее».

Проведена связь через кирпичную стену толщиной 45 см на расстоянии 3 м, субъективно качество связи «хорошее», но при этом наблюдались небольшие шумы.

На улице была проведена связь сквозь растительность (кусты) на расстоянии до 50 метров, субъективно качество установленной связи было отличным.

Далее были проведены испытания на расстоянии прямой видимости. Так, на дистанциях от 50 до 200 метров субъективно качество связи «отличное», на расстояниях 250-450 метров качество связи хорошее, а максимальное расстояние при котором качество связи было удовлетворительно составило 800 метров.

4. Заключение

Разработанная лабораторная установка внедрена в учебный процесс специальности «Радиоэлектронные системы и комплексы» и показала свою высокую эффективность при изучении студентами особенностей распространения радиоволн диапазона СВЧ.

Литература

1. Горбатый В. И. Любительские УКВ радиокомплексы / В. И. Горбатый. – М.: Радио и связь, 1985. – 72 с.
2. Марков Г. Т. Антенны: учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
3. Генераторы и усилители СВЧ / М. В. Агапов, В. М. Аникин, Ю. В. Анисимов и др. ; под ред. И.В. Лебедева. – М.: Радиотехника, 2005. – 352 с.
4. Поляков В. Т. Радиовещательные ЧМ приемники с фазовой автоподстройкой / В. Т. Поляков. – М.: Радио и связь, 1983. – 96 с.

References

1. Humpback V. I. Amateur radio VHF / VI Humpback. - Moscow: Radio and communication, 1985. - 72 p.
2. Markov G. T. Antenna: a textbook for students of radio engineering specialties of universities / G. T. Markov and D. M. Sazonov. - 2nd ed., pererab. I DOP. - M.: Energia, 1975. - 528 p.
3. Generators and amplifiers, microwave / M. V. Agapov, V. M. Anikin, Y. V. Anisimov and others ; under edition of I. V. Lebedev. - Moscow: Radio Engineering, 2005. - 352 p.
4. Polyakov V. T. broadcasting FM receivers with phase-locked / V. T. Polyakov. - Moscow: Radio and communication, 1983. - 96 p.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ АВИАЦИОННЫХ ПОЛИГОНОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

А.Р. Бестугин[1], А.Д. Филин[1], В. И.А. Киршина[1], В.П. Рачков[2],

[1] Государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП) Санкт-Петербург, Россия
[2] 4 Государственный центр подготовки авиационного персонала и войсковых испытаний Министерства обороны Российской Федерации (4 ГЦПАП и ВИ МО РФ) Липецк, Россия

Аннотация. В статье представлено перспективное направление развития системы подготовки летных экипажей и специалистов управления авиацией на основе внедрения автоматизированного комплекса летно-тактической подготовки. Дана краткая характеристика наземных измерительных комплексов авиационных полигонов государственной авиации.

Ключевые слова. Электронный полигон, летно-тактическая подготовка, автоматизированный комплекс, линия передачи данных, безопасность полетов.

DEVELOPMENT OF THE CONTROL SYSTEM AND MEASURING COMPLEXES OF AVIATION POLYGONS OF THE STATE AVIATION

A.R. Bestugin [1], A.D. Filin[1], I.A. Kirshina[1], V.P. Rachkov[2]

[1] State University of Aerospace Instrumentation (SUAI) St. Petersburg, Russia
[2] 4 State Center for Aviation Personnel Training and Military Tests of the Ministry of Defense of the Russian Federation (4 SCAPT and MT MD RF) Lipetsk, Russia

Abstract. The article presents a promising direction for the development of a training system for flight crews and aviation control specialists based on the introduction of an automated flight tactical training complex. A brief description of the ground-based measuring complexes of aviation grounds of state aviation is given.

Keywords. Electronic test site, flight tactical training, automated complex, data transmission line, flight safety.

1. Введение

Ход и исход локальных войн и военных конфликтов прошлого и начала нынешнего века наглядно продемонстрировал тот факт, что Военно-воздушные Силы (ВВС) превратились из категории основных средств ведения военных действий в главную, решающую силу. При этом центр тяжести вооружённой борьбы всё больше переносится в воздушно-космическую сферу [1,2].

Анализ возможностей самолётов нового поколения (Су-30СМ, Су-34, Су-35), поступающих на вооружение авиационных частей Воздушно-космических сил (ВКС), наглядно демонстрирует тенденцию повышения их летно-технических характеристик, возможностей бортовых прицельно-навигационных систем, комплексов радиоэлектронной борьбы, расширение области применения и номенклатуры авиационных средств поражения (АСП) и вариантов их смешанной боевой загрузки. Это далеко не полный перечень показателей, характеризующих эти самолёты, как современные авиационные боевые комплексы (АБК).

Вместе с тем, АБК – это только инструмент в руках у человека для достижения поставленной цели, так как поставленные боевые задачи выполняет не самолёт, а лётчик. Поэтому, в условия реальных боевых действий, успех авиации в решении поставленных задач зависит не только от качества вооружения и степени оснащённости им авиационных частей, но и от когнитивного потенциала лётного состава, уровня его тактической выучки и натренированности мгновенно оценивать обстановку и грамотно вести боевые действия. На первый план выходит также способности расчётов командных пунктов (КП) управлять боевыми действиями в условиях огневого, радиоэлектронного и манёвренного противодействия. То есть, одним из основных показателей эффективности выполнения задач выступает способность экипажей к действиям в сложных динамичных условиях и их готовность реализовать все боевые возможности, заложенные в современных АБК. В связи с этим, сегодня основным условием подготовки летных экипажей и специалистов управления авиацией (СУА) должна быть отработка задач лётно-тактической подготовки (ЛТП) в условиях, приближенных к реальным боевым [3].

Такие условия необходимо создавать на авиационных полигонах государственной авиации, которые должны обеспечивать [4]:

- проведение летно-тактических учений (ЛТУ) с применением различных АСП;
- совершенствование тактической и огневой подготовки авиационных экипажей, подразделений, частей и соединений в условиях, максимально приближенных к боевым, освоения новых, наиболее эффективных способов и приемов боевых действий;
- отработку способов и приемов преодоления противовоздушной обороны (ПВО) противника, а также боевого применения в условиях радиоэлектронных помех;
- обучение и совершенствование навыков боевого применения различных видов авиационного вооружения;
- проведение войсковых испытаний новых образцов вооружения, прицельно-навигационных комплексов, АСП, комплексов радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и полигонного оборудования.

2. Развитие авиационных полигонов государственной авиации

Вместе с тем, стремительное развитие авиации породило огромное противоречие между возможностями современных АБК и условиями проведения ЛТП (ЛТУ) частей ВВС, которые создаются на авиационных полигонах государственной авиации. Анализ этих условий свидетельствует о том, что по мере совершенствования авиационной техники и средств поражения прогрессивно возрастает и стоимость процесса обучения личного состава, который в настоящее время является дорогим и недостаточно эффективным. Как показывает опыт, на существующих авиационных полигонах для создания условий, соответствующих оперативно-тактической обстановке (ОТО), определенной замыслом проводимых ЛТУ, требуются значительные материальные затраты [3].

Кроме того, существующая система объективного контроля (ОК), которая включает бортовые средства регистрации полётных данных и наземные устройства

обработки, не позволяет объективно в реальном масштабе времени (РМВ) оценивать результаты действий экипажей и групповые действия. Основные причины [5]:

- конструктивно все средства регистрации предназначены для контроля состояния только данного авиационного комплекса;

- регистрируемая бортовыми устройствами информация на всех типах самолётов не синхронизирована, из-за чего исключается возможность одновременного её анализа с различных носителей;

- бортовые устройства регистрации, как и регистрируемые перечни параметров не унифицированы по типам самолётов, что затрудняет возможность автоматизации обработки информации с группы самолётов.

Отсутствие линии передачи данных «борт-земля» исключает обработку данных ОК в РМВ (обработка и оценка результатов осуществляется после посадки самолета).

Поиск путей расширения функциональных возможностей авиационных полигонов государственной авиации осуществлялся при исследовании особенностей ЛТП в условиях функционирования системы «экипаж - самолет - среда обучения».

С учетом зарубежного опыта также можно констатировать, что данная проблема может быть успешно решена только в случае качественного преобразования инфраструктуры авиационных полигонов государственной авиации, путём внедрения в них принципиально новых инновационно-когнитивных технологий и создания автоматизированных комплексов ЛТП.

В целях решения указанной проблемы, по результатам анализа различных идей и мероприятий, направленных на повышения эффективности системы ЛТП, представляет интерес концепция преобразования инфраструктуры авиационных полигонов государственной авиации, позволяющая реализовать принципиально новый подход к организации ЛТП авиационных частей ВКС и последовательное совершенствование методик их обучения, обеспечивающее существенное повышение профессиональной подготовки экипажей и специалистов управления авиацией.

Концепция предполагает разработку автоматизированного комплекса ЛТП – «электронного полигона», приближающего условия подготовки и выполнение задач ЛТП к реальным боевым действиям с огневым, радиоэлектронным и маневренным противодействием в РМВ. «Электронный полигон» представляет собой новое направление в совершенствовании системы ЛТП подготовки ВВС и новый инструмент объективной оценки результатов учебно-боевых действий (УБД), как отдельных экипажей (групп), так и подразделений и частей в целом [6].

Инновационной основной концепции является объединение в рамках единого комплекса реальных, имитируемых и моделируемых объектов с целью создания ОТО и условий обучения, максимально приближающих УБД, при выполнении задач ЛТП, к реальным боевым. Это достигается моделированием и имитацией функционирования объектов ОТО, применения АСП, с обеспечением высокого уровня достоверности контроля результатов практических действий экипажей, подразделений и частей противоборствующих сторон в РМВ (рисунок 1).

Новизна технических решений состоит в информационном объединении в РМВ всех элементов (наземных, воздушных, реальных, имитируемых, моделируемых) и создаваемой информационной базы комплекса ЛТП - «электронного полигона» в единую систему, в разработке технических решений и алгоритмов программного обеспечения (ПО), обеспечивающих новые принципы обработки и передачи циркулирующей информации, получения, формирования и представления результирующей информации на автоматизированных рабочих местах (АРМ) группы руководства учением (ГРУ) в РМВ.

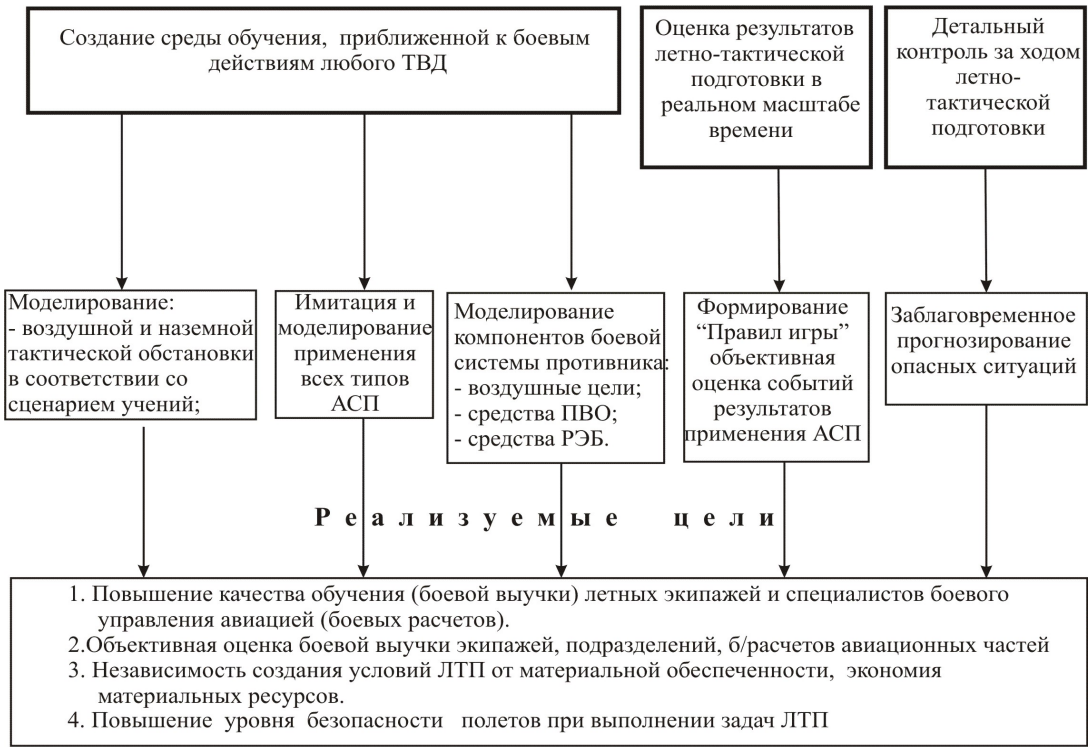


Рис. 1. Функции и цели создания комплекса ЛТП - «электронного полигона».

При этом ПО должно обеспечивать синхронизацию информационной базы, моделей и функционирование всех элементов комплекса в едином информационном пространстве на этапах планирования летно-тактических учений, управления, контроля и оценки всей совокупности задач и процессов, при выполнении задач ЛТП (ЛТУ) [3].

Особенностью перспективного комплекса ЛТП на основе «электронного полигона» является возможность создания любой ОТО независимо от материального обеспечения, а также получение объективной оценки результатов выполнения учебно-боевых задач экипажами, группами тактического назначения (ГТН) с учётом действий взаимодействующих и обеспечивающих сил и средств, мероприятий противодействия обусловленного «противника» в РМВ. Для этого в структуре «электронного полигона» предусмотрено наличие моделирующего комплекса и линии передачи данных «борт-земля». Кроме того, использование «электронного полигона» повышает безопасность полётов при выполнении задач ЛТП. Последнее обеспечивается специальными программами прогнозирования и представления информации ГРУ о возможности

возникновения потенциально-конфликтной ситуации (ПКС) с отображением на индивидуальных и групповых средствах контроля всей текущей информации в РМВ: наземных и воздушных объектов ОТО, результатов применения АСП, противодействия средств ПВО, РЭБ и др.[7].

Основой решения этих задач является точная координатометрия всех объектов «электронного полигона», которая обеспечивается использованием спутниковой навигационной системы (СНС). Повышение точности определения координат АБК осуществляется за счёт использования контрольно-корректирующей станции СН-3022, которая, при работе в дифференциальном режиме, обеспечивает среднеквадратическую погрешность определения текущих значений навигационных параметров не превышающих: координат самолёта 1-5м; высоты 2-7м; скорости 0,1 м/с, при дискретности их выдачи с частотой 1Гц [8].

Для реализации указанной концепции, проверки концептуальных и технических решений организации и проведения ЛТП (ЛТУ) с обеспечением приближения условий УБД к реальным действиям и получения объективной оценки результатов в РМВ, предполагается что структура «электронного полигона» должна включать следующие компоненты (рисунок 2):

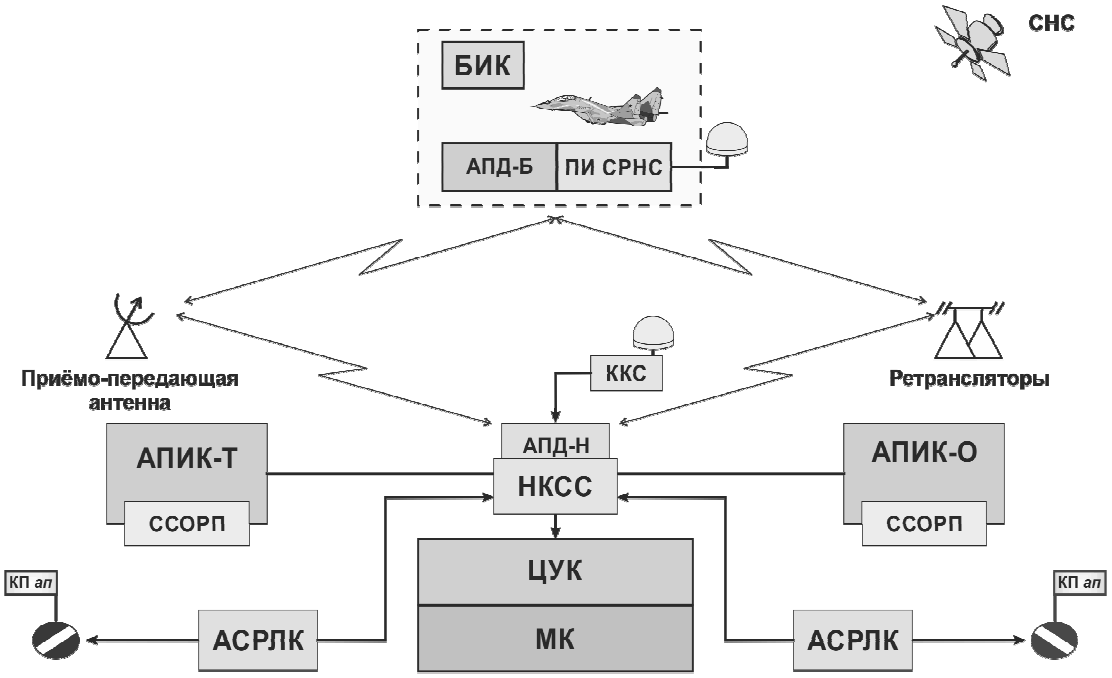


Рис. 2. Структура автоматизированного комплекса ЛТП - «электронный полигон».

Центр управления и контроля (ЦУК) с автоматизированными рабочими местами (АРМ) группы руководства учением (ГРУ), экраном коллективного пользования (ЭКП) и моделирующим комплексом (МК) в составе ЦУК должен обеспечивать:

- получение и ввод в базу данных характеристик АБК, АСП, сценариев ЛТП (ЛТУ), геодезической информации района полетов, решение прикладных задач, поиск оптимальных решений на выполнение задач ЛТП и др.);

- сбор, обработку, отображение реальной и имитируемой (моделируемой) информации, решение прикладных расчетных задач в объеме функциональных обязанностей, контроль действий и автоматизированную оценку результатов выполнения задач ЛТП экипажей, ГТН, авиационных подразделений и частей, ведение радиосвязи по линии «земля-борт», постановку вводных и обмен информацией с командными пунктами авиационных частей государственной авиации;

МК в составе ЦУК с пакетом прикладных программ, наземной аппаратурой передачи данных (АПД-Н) обеспечивает: ввод и моделирование сценариев ЛТУ, автоматизированное формирование заданной ОТО любого района действий авиации, отображение текущей и моделируемой радиолокационной информации на бортовых и наземных средствах индикации, расчет пограничных условий опасных ситуаций в ходе учебно-боевых действий и выдачу сигналов их предупреждения на индикаторы ГРУ, моделирование применения управляемых и неуправляемых АСП, противодействия средств ПВО и РЭБ, полетов ЛА, в соответствии с их пилотажно-навигационными характеристиками, формирование форматов оценки результатов ЛТУ (ЛТП).

Автоматизированный полигонный измерительный комплекс огневого полигона (АПИК-О) предназначен для регистрации результатов применения реальных АСП на огневом полигоне. Обеспечивает регистрацию, измерение, автоматическую обработку и отображение результатов реальных применений АСП на АРМ огневого полигона, передачу их в ЦУК в РМВ. Система сбора и определения результатов применения (ССОРП) АПИК-О включает:

- систему регистрации прямых попаданий (СРПП) – обеспечивает регистрацию и передачу в ЦУК данных о попадании в цель при стрельбе из пушечного вооружения в РМВ;
- телевизионную измерительную систему (ТВИС) – обеспечивает регистрацию и передачу в ЦУК точек разрывов при применении реальных АСП.

Автоматизированный полигонный измерительный комплекс тактического полигона (АПИК-Т) обеспечивает получение результатов условного «боевого» применения при моделировании и имитации применения АСП на всей территории авиационного полигона. Регистрация, обработка результатов и передача их в ЦУК производится системой регистрации лазерного пятна (СРЛП) в РМВ.

Бортовой информационный комплекс (БИК) с бортовой аппаратурой передачи данных (АПД-Б) – дополнительное оборудование, устанавливаемое на самолетах. Обеспечивает сбор и обработку пилотажно-навигационной и прицельной информации с бортовых систем АК, передачу ее в ЦУК (МК) в РМВ, прием сигналов внешней моделируемой тактической, целевой и помеховой обстановки из ЦУКа, в соответствии со сценарием УБД, и передачу их в бортовые системы АК для отображения на штатных бортовых индикаторах признаков функционирования ОТО, имитации применения АСП всех разрешенных вариантов боевой зарядки АСП.

Предусматривается, что наземное и бортовое оборудование «электронного полигона» должно быть адаптировано к самолетам поколения 4++ (Су-30, Су-34, Су-35), использующие цифровые информационные системы.

Предусматривается два основных режима работы перспективного автоматизированного комплекса ЛТП:

- моделирования летно-тактических учений - для ввода сценария летно-тактического учения, предварительного выбора и оценки оптимального варианта решения на выполнение поставленной задачи, обеспечения проведение командно-штабных учений (КШУ).

- учебно–боевых действий (УБД - основной режим), для обучения и проверки уровня профессиональной подготовки экипажей, групп тактического назначения и СУА авиационных частей ВКС. Режим УБД должен обеспечивать контроль, регистрацию, анализ и оценку действий экипажей и специалистов управления авиацией при отработке учебно-боевых задач по воздушным и наземным целям в условиях выполнения реальных полетов (одиночно или в группе) с моделированием действий (противодействия) авиации, средств ПВО и РЭБ обозначенного противника в РМВ (рисунок 3).

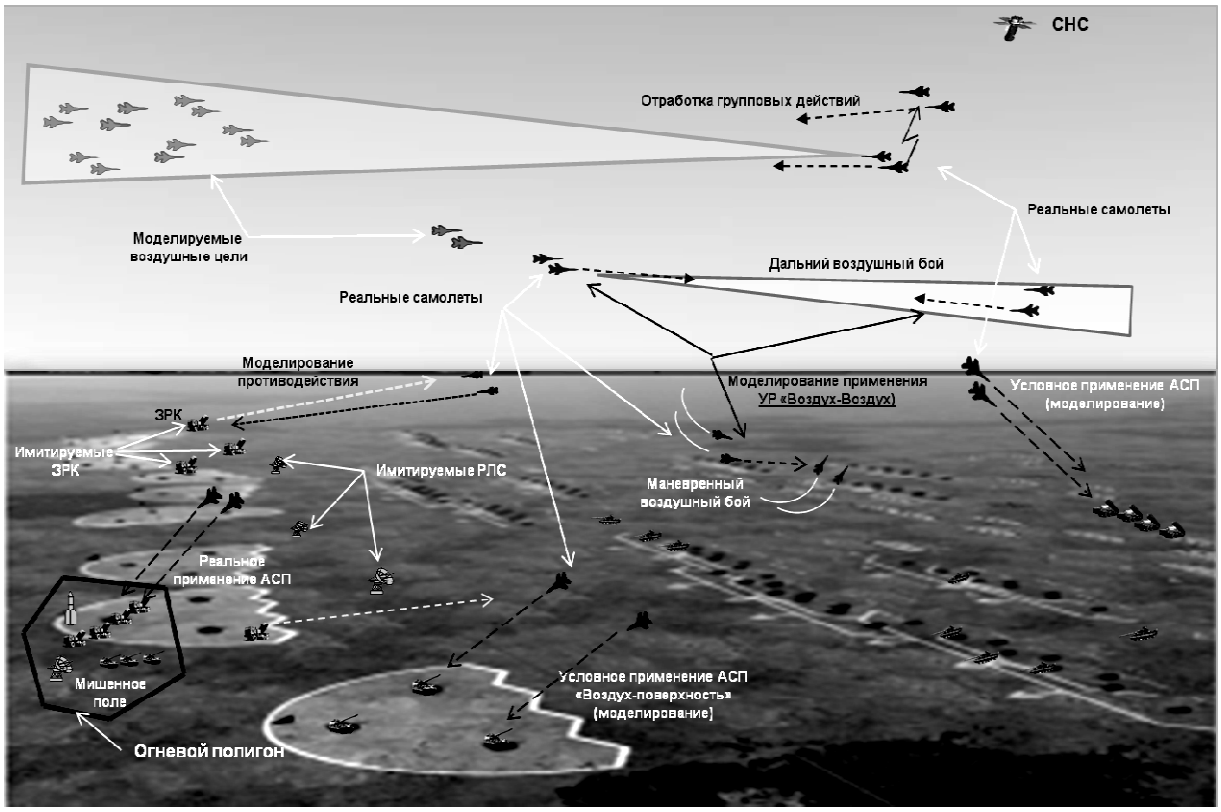


Рис. 3. Контролируемые действия экипажей в режиме УБД

Кроме того, режим должен обеспечивать проведение и оценку результатов летных экспериментов, испытаний новой авиационной техники, вооружения и решение исследовательских задач.

Эффективность работы «электронного полигона» во многом зависит от надежности и пропускной способности линий связи и характеристик аэронавигационных систем. Поэтому важной задачей синтеза «электронного полигона»

является построение канала аппаратуры передачи (приема) данных между МК и БИК, обеспечивающего передачу информации с борта (на борт) АК, а также наземных линий связи с обеспечением необходимой и достаточной достоверности и надежности передаваемой информации. Канал передачи данных (АПД-Н, АПД-Б) должен обеспечивать возможность информационного обмена между ЛА и МК в РМВ в пределах всей площади контроля «электронного полигона» не менее 150 х 300 км, и диапазона высот 50 ÷ 25000 м.

Информация, передаваемая с борта ЛА, может состоять из постоянно передаваемых параметров и разовых команд.

Постоянно передаваемые параметры - текущие координаты самолета, параметры режима полета (курс, скорость, высота, крен, тангаж, перегрузка, и т.д.) используются для контроля и оценки навигации, а также обеспечения работы алгоритма автоматического определения возможности возникновения ПКС и заблаговременного формирования команд сигнализации о её возникновении на автоматизированных рабочих местах ГРУ. Эти параметры передаются с частотой не менее 1-10 Гц.

Разовые команды (сигналы) передаются с борта самолета в РМВ по мере их формирования. К таким командам относятся сигналы органов управления прицельно-навигационных комплексов, которые используются для контроля действий экипажа при выполнении задач с применением АСП, а также для определения момента начала моделирования траектории полета АСП при их условном применении.

Информация, передаваемая на борт ЛА содержит результаты моделирования: воздушной обстановки (отметки ЛА), применения моделируемых АСП «воздух-воздух» (при положительном результате о наведении воздушная моделируемая цель пропадает с экрана бортового прицела), признаков функционирования наземных и воздушных объектов ОТО, радиолокационных средств обозначенного противника (наземных, бортовых РЛС), средств огневого и радиоэлектронного противодействия и др.

Отображение этой информации на бортовых индикаторах обеспечивает восприятие экипажем реальной «боевой» обстановки в соответствии со сценарием ЛТУ.

Наземные каналы связи должны обеспечивать:

- передачу в РМВ на штатные наземные средства управления ЛА КП авиационных частей моделируемой воздушной и помеховой обстановки (отметки воздушных целей в зоне видимости РЛС с учетом углов закрытия местности), в соответствии с ОТО сценария учений;

- передачу в МК результатов реального и условного применения АСП по наземным целям (количество попаданий, координаты лазерного пятна).

В процессе выполнения задач ЛТП воздушная и наземная информация по линиям связи собирается в МК, где обрабатывается и отображается в ЦУКе на АРМ ГРУ в виде специализированных форматов: воздушная обстановка, кабинная информация с показаниями приборов и индикацией бортовых прицельных комплексов, результаты применения АСП по воздушным целям, по наземным целям на АПИК-О(Т), наблюдение из любой выбранной точки пространства, оценки экипажей (ГТН) и др.

Особенностью функционирования канала АПД являются специфические требования к динамическому диапазону приемной аппаратуры и конструктивной реализации антенных узлов, обеспечивающих передачу данных между ЛА и ЦУК, как на больших высотах и удалениях, так и на малых высотах, независимо от пространственного положения ЛА.

Исключение влияния корпуса ЛА на диаграмму направленности бортовой антенны и улучшение вероятностных характеристик приема может обеспечиваться установкой двух комплектов АПД с расположением антенно-фидерных узлов в разных частях ЛА. Такое построение и расположение антенн на фюзеляже самолета должно формировать сферическую диаграмму направленности, которая позволит вести информационный обмен в условиях динамичного противоракетного и противоистребительного маневрирования.

Вероятность достоверного приема информационных сообщений линии передачи данных (ЛПД) для обеспечения её надежного функционирования должна быть не менее 0,98, при этом для обеспечения целостного функционирования «электронного полигона» вероятность ошибки допустима на уровне не хуже 10^{-5}, что является достижимым результатом при взаимном расположении объектов в зоне больших высот и удалений вплоть до предельных расстояний 300-400 км. Однако важное значение в организации ЛТП имеет обеспечение возможности отработки задач экипажами и ГТН выполняющими полеты на предельно малых высотах (50-70 м) на удалениях от ЦУК более 100 км.

Достижение заданных вероятностных характеристик работы в требуемой зоне функционирования ЛПД может быть обеспечено совокупностью технических решений, которые затрагивают ряд методов организации и построения ЛПД, а также методы реализации узлов аппаратуры передачи данных. К ним относятся:

- установка наземной антенны и аппаратуры передачи данных на большую (возможную в условиях аэродрома) высоту;
- установка бортовых антенн ЛПД в верхней и нижней частях фюзеляжа;
- использование ретранслятора на антенной мачте, в разрешенном месте на полигоне, с возможностью ретрансляции данных в ЦУК по оптоволоконному кабелю;
- использование одного ЛА в качестве ретранслятора информации;
- применение методов цифровой обработки с целью компенсации влияния помех;
- использование специального метода кодирования данных с возможностью поиска и исправления ошибок в информационных сообщениях.

3. Заключение

Таким образом, представленное обоснование концепции современной системы ЛТП – «электронного полигона» позволяет определить конструктивные параметры и характеристики измерительных комплексов и систем связи, возможность последовательного внедрения их в инфраструктуру авиационных полигонов государственной авиации в целях повышения достоверности контроля действий

экипажей, ГТН и СУА при выполнении задач ЛТП, что значительно повысит эффективность практической подготовки летного и командного состава ВВС РФ.

Литература

1. Кураленко С.В. Тенденции изменения характера вооруженной борьбы в военных конфликтах первой половины XXI века. //Военная мысль, 2012, №11, стр. 40-46.
2. Криницкий Ю.В. Воздушно-космическая сфера, как главный театр военных действий. // Военная мысль, 2013, № 8, с.68-78.
3. Филин А.Д., Бестугин А.Р., Рачков В.П., Шатраков Ю.Г. Инновационно-когнетивная концепция развития обучающих средств в авиации.//Вестник воздушно-космической обороны, Вып.1(13), 2017, с.23-28.
4. Приказ Министра обороны РФ от 25.10.2001 N 431 «Об утверждении Федеральных авиационных правил по организации полигонной службы в государственной авиации» М.: МО РФ, 2002, - 160с.
5. Филин А.Д., Рачков В.П., Шатраков Ю.Г. Виртуальные авиационные электронные полигоны – состояние и тенденции развития. //Вестник воздушно-космической обороны. М.:- 2018. - №4. - с. 109-122.
6. Бестугин А.Р., Володягин А.В., Филин А.Д. Шатраков Ю.Г. Электронные полигоны для организации тактической подготовки летного и командного состава ВВС РФ.//Вестник воздушно-космической обороны, Вып. 2, 2014 г., с.16-23.
7. Бестугин А.Р., Рачков В.П., Шатраков Ю.Г. Развитие системы подготовки летных экипажей и специалистов боевого управления авиационных частей. // «Научный вестник Военно-космической обороны». М.: ГСКБ ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей», №1, 2013. - с. 12.
8. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS, NAVSTAR и ГЛОНАС .- М.: Телеком, 2005. - 272 с.

References

1. Kuralenko S.V. Trends in the nature of armed struggle in military conflicts of the first half of the XXI century // Military Thought, 2012, No. 11, p. 40-46.
2. Krinitsky Yu.V. Aerospace as the main theater of operations. // Military Thought, 2013, No. 8, p. 68-78.
3. Filin A.D., Bestugin A.R., Rachkov V.P., Shatrakov Yu.G. Innovative-cognitive concept of development of training tools in aviation. // Bulletin of aerospace defense. Issue 1 (13), 2017, P.23-28.
4. Order of the Minister of Defense of the Russian Federation of 25.10.2001 N 431 "On approval of the Federal Aviation Regulations on the organization of the landfill service in state aviation". Moscow: Ministry of Defense of the Russian Federation, 2002, - 160s.
5. Filin A. A., Rachkov V. P., Y. G. Shatrakov Virtual aviation e-landfills – status and development trends //Bulletin of aerospace defense. Issue 4, 2018. - №4. - p. 109-122.
6. Bestugin A.R., Volodyagin A.V., Filin A.D. Shatrakov Yu.G. Electronic training grounds for the organization of tactical training of flight and command personnel of the Air Force of the Russian Federation.// Bulletin of aerospace defense. Issue 2, 2014, p.16-23.
7. Bestugin A.R., Rachkov V.P., Shatrakov Yu.G. The development of a training system for flight crews and specialists of the combat control of aviation units // "Scientific Bulletin of Military Space Defense." M .: GSKB JSC Concern PVO Almaz-Antey, №1, 2013. - p. 12.
8. Yazenkov V. S. Fundamentals of satellite navigation. System GPS NAVSTAR and GLONASS .- Moscow: Telecom, 2005. - 272 p.

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНЫХ СООСНЫХ КОАКСИАЛЬНО-ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ВОЛНОВОДОВ НЕСТАНДАРТНОГО СЕЧЕНИЯ

Б.М.Кац[1], В.П.Мещанов[1], К.А.Саяпин[2]

[1]ООО НПП «Ника-СВЧ», Саратов, Российская Федерация
[2]Саратовский государственный университет им.Н.Г. Чернышевского, Саратов, Российская Федерация

Аннотация. Предложена конструкция соосных ступенчатых коаксиально-волноводных переходов для волноводных каналов нестандартного сечения (уменьшенной высоты). Высокий уровень согласования обеспечивается за счет согласующей полости и ступенчатого трансформатора сопротивлений на основе П-волновода. Компактность конструкции достигается посредством использования отрезков П-волновода, длина которых значительно меньше четверти длины волны.

Ключевые слова: коаксиально-волноводный переход; П-волновод; волноводы нестандартных сечений.

DEVELOPMENT OF COMPACT END-LAUNCHED COAXIAL-TO-WAVEGUIDE TRANSITIONS FOR NON-STANDARD CROSS-SECTION WAVEGUIDES

B. M. Kats[1], V.P. Meschanov[1], K.A. Sayapin[2]

[1]NIKA-Microwave, Ltd., Saratov, Russian Federation
[2] Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

Abstract. Proposed design of end-launched coaxial-to-waveguide transitions for waveguide of (уменьшенной высоты) non-standard cross-section. A high level of matching is provided by the matching cavity and a step transformer of impedance based on single-ridged waveguide.

Keywords: coaxial-to-waveguide transitions; single-ridged waveguide; non-standard cross-section waveguides.

1. Введение

Коаксиально-волноводные переходы (КВП) широко используются в приемо-передающей и измерительной аппаратуре СВЧ-диапазона [1]. Среди многообразия конструкций КВП (рис. 1) представляют интерес переходы индуктивного типа (рис. 1, в, г), в которых внутренний проводник коаксиального соединителя находится в гальваническом контакте с волноводом. Преимуществом КВП такого типа является то, что их коаксиальные соединители могут быть изготовлены без использования твердых диэлектриков. Это позволяет повысить устойчивость при работе устройства на высоких уровнях мощности.

Все множество конструкций КВП можно разделить на две категории в зависимости от взаимного расположения коаксиального и волноводного каналов: уголковые (каналы расположены под прямым углом, рис 1, а-в) и соосные (каналы расположены на одной оси, рис. 1, г).

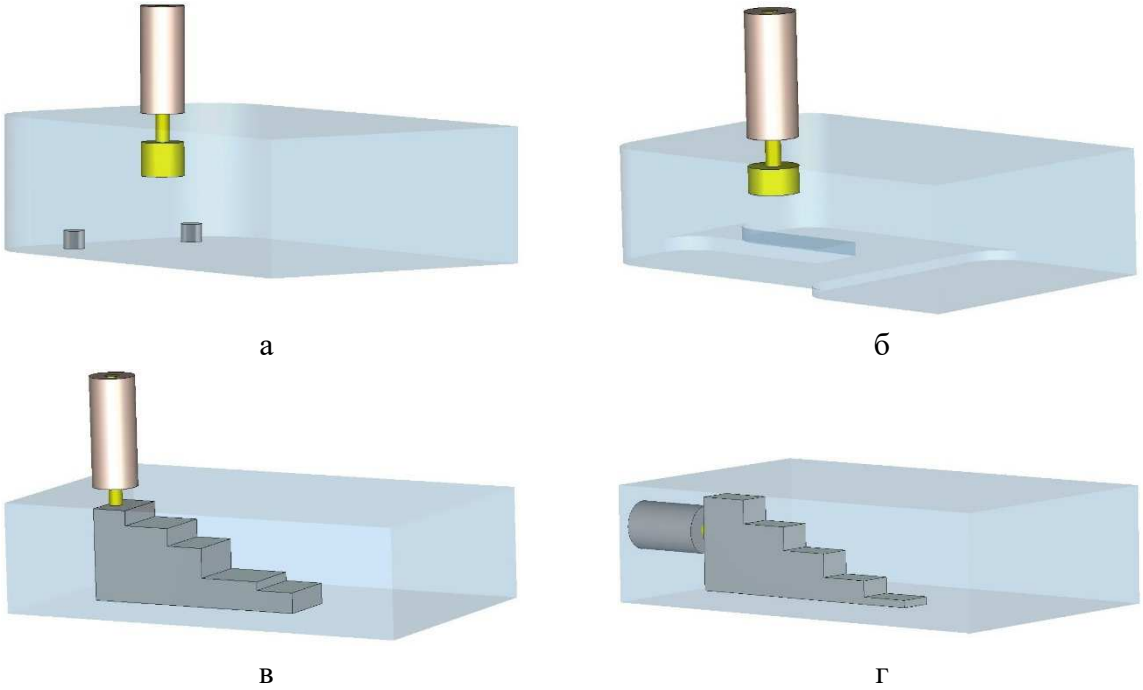


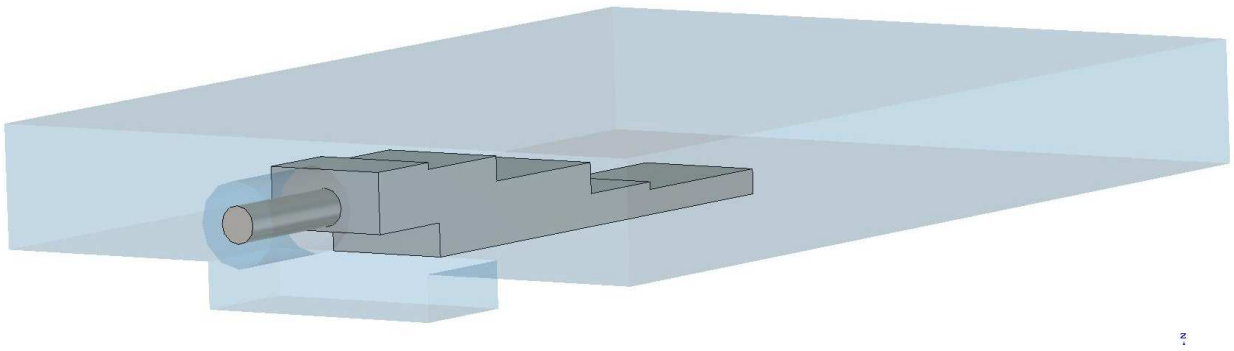
Рис. 1. Типы коаксиально-волноводных переходов: с емкостной (а, б) и индуктивной (в, г) связью.

К широкополосным относятся соосные коаксиально-волноводные переходы (рис. 1, г) с согласующим трансформатором сопротивлений в виде четвертьволновых отрезков П-волновода с различными размерами выступов [3, 4]. В качестве трансформатора типа волны используется полость, образованная зазором между короткозамыкающей стенкой, через которую осуществляется ввод центрального проводника коаксиальной линии, и первым отрезком П-волновода. Обычно величина зазора крайне мала, что вызывает технологически трудности реализации и высокую чувствительности к допускам. Кроме того, для обеспечения приемлемого согласования в широком диапазоне частот (более 25%) требуется значительное число (n>3) отрезков П-волновода, что приводит к значительной длине КВП.

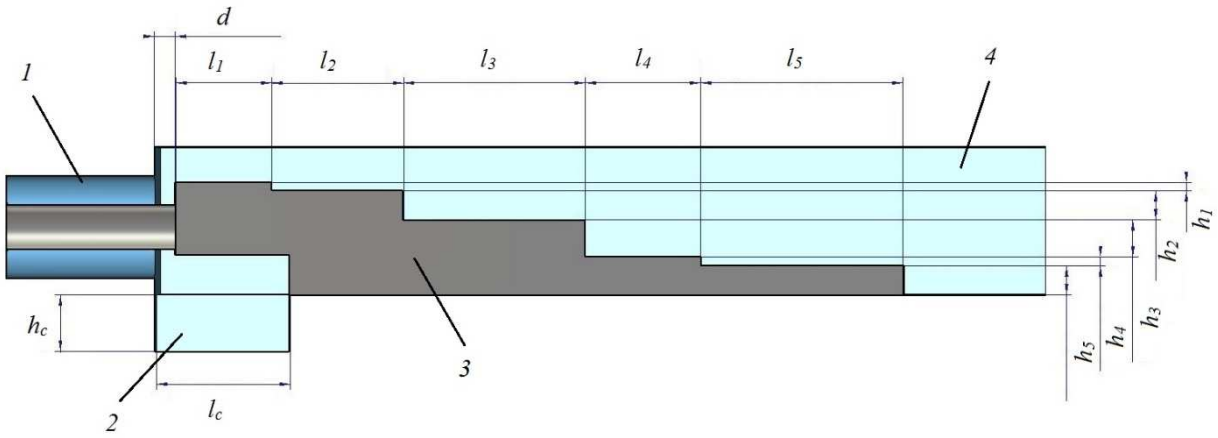
Практический интерес представляет исследование КВП для волноводных каналов уменьшенной высоты ($a>4b$, где a и b - широкая и узкая стенки соответственно), применяемых в трактах СВЧ бортовой РЭА с уменьшенными массой и габаритами [2]. В данной работе предлагается конструкция коаксиально-волноводного перехода для волноводов уменьшенной высоты, отличительной чертой которой является использование согласующей структуры на основе соединения отрезков П-волновода с различными длинами и дополнительной согласующей полости, сечение которой отличается от сечения прямоугольного волноводного канала.

2. Конструкция и результаты моделирования

Общий вид модели КВП с волноводного канала сечением 61х10 мм на коаксиальную воздушную линию сечением 7/3,04 мм приведен на рисунке 2.



а



б

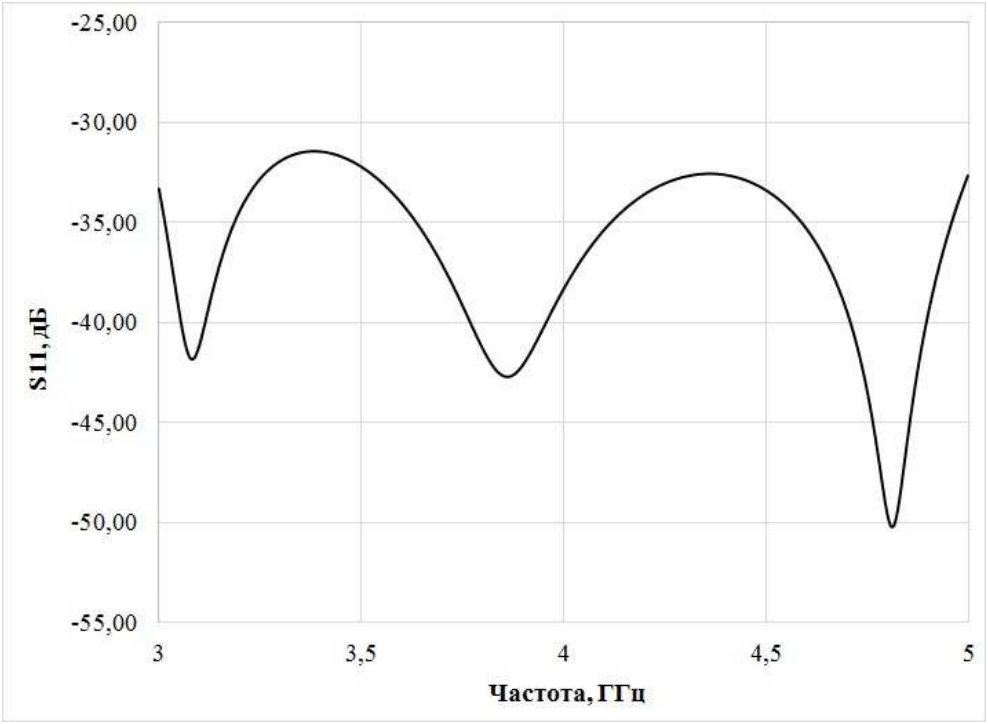
Рис. 2. Общий вид коаксиально-волноводного перехода (а) и вид в продольном разрезе (б): 1 - коаксиальная линия передачи с воздушным заполнением, 2 - согласующая полость, 3 - согласующая пятиступенчатая секция из отрезков П-волновода различной длины, 4 - отрезок регулярного прямоугольного волновода.

Трансформатор типа волны образован зазором между короткозамыкающей стенкой и продольным выступом первого отрезка П-волновода и прямоугольной полостью, смещенной вниз относительно оси волновода.

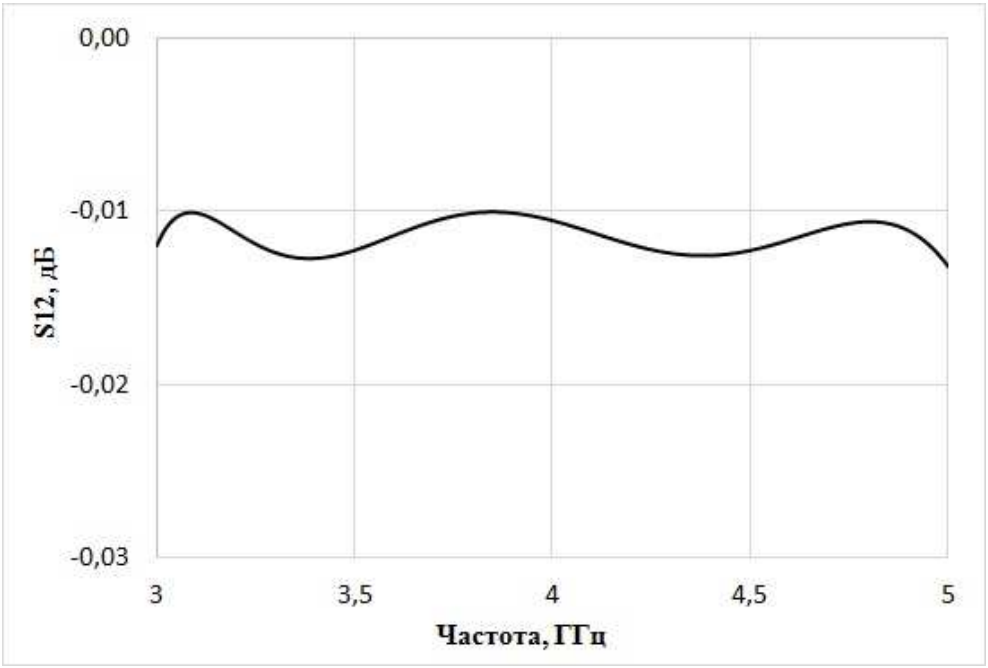
При решении задачи параметрического синтеза использовались симплексный метод оптимизации (метод Нелдера-Мида) и метод доверительных областей, реализованные в современном пакете электродинамического моделирования. Вектор варьируемых параметров включал в себя размер согласующей полости l_c и h_c, длины l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 и размеры h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, w выступов отрезков П-волновода, причем ширина w выступов одинакова для всех отрезков. В качестве начальных приближений использовались данные, полученные с использованием материалов, приведенных в [2]. По такой методике были разработаны КВП для двух волноводных каналов различного сечения. Результаты синтеза приведены в таблице 1. Оптимальные значения длин отрезков П-волновода близки к λg/8, где λg – длина волны на центральной частоте рабочего диапазона. Электрические параметры КВП 61х10, полученные в результате электродинамического моделирования, приведены на рисунке 3.

Таблица 1. Электрические параметры коаксиально-волноводных переходов

Сечение волноводного канала	Тип коаксиального соединителя	Рабочий диапазон частот, ГГц	Обратные потери, дБ	Прямые потери, дБ
61x10	Тип III	3,0…5,0	31	0,02
72x10	Тип III	2,5…4,0	30	0,02



а



б

Рис. 3. Частотные характеристики КВП 61x10: обратные потери (а), прямые потери (б).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что КВП представленной конструкции позволяют обеспечить приемлемое согласование коаксиальной линии передачи и волновода уменьшенной высоты в широком диапазоне частот (равном рабочей полосе соответствующего волновода). Использование в согласующей структуре отрезков П-волновода длиной, близкой к $\lambda g/8$, позволяет не менее чем в 1,5 раза уменьшить длину элемента согласования КВП по сравнению с конструкциями, базирующимися на четвертьволновых отрезках волноводов.

3. Заключение

Предложена конструкция компактного соосного коаксиально-волноводного перехода, реализованного в виде ступенчатого трансформатора на основе П-волновода, длина ступеней которого значительно меньше четверти длины волны, с согласующим зазором и смещенной относительно оси волновода полостью. Коаксиально-волноводный переход такой топологи позволяет обеспечить требуемое согласование волноводов нестандартного сечения (уменьшенной высоты) с коаксиальной линией передачи в широком диапазоне частот.

Литература

1. Мейнке Х., Гундлах Ф.В. Радиотехнический справочник. Т. 1. М.: Гос. энергетическое изд-во, 1960. – 250 с.
2. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Советское радио, 1967. – 652 с.
3. Cano J.L., Mediavilla A. Octave bandwidth in-line rectangular waveguide-to-coaxial transition using oversized mode conversion // Electronics Letters. 2017. Vol. 53, No. 20. - PP. 1370–1371.
4. Durga M., Tomar S., Singh S., Suthar L. Millimeter wave in-line coaxial-to-rectangular waveguide transition // IEEE Applied Electromagnetics Conference. 2011. - PP. 200-203.

References

1. Meinke H. and Gundlach F. V. Radio-Engineering Handbook. Vol. 1. Gos. Énerget. Izd., Moscow, 1960. – 250 p.
2. Feldstein, A. L., Yavich, L. R. and Smirnov, V. P. Handbook on waveguide technology elements. Moskow, Russia: Sovetskoe Radio Publ, 1967. – 652 p.
3. Cano J.L., Mediavilla A. Octave bandwidth in-line rectangular waveguide-to-coaxial transition using oversized mode conversion // Electronics Letters. 2017. Vol. 53, No. 20. - PP. 1370–1371.
4. Durga M., Tomar S., Singh S., Suthar L. Millimeter wave in-line coaxial-to-rectangular waveguide transition // IEEE Applied Electromagnetics Conference. 2011. - PP. 200-203.

РАСЧЕТ ПАРАЗИТНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ЧАСТОТЫ И ФАЗЫ ИСТОЧНИКА СИГНАЛОВ ИЗ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ФАЗОВОГО ШУМА

А. В. Чадин

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, Мытищи, Россия

Аннотация. Рассмотрены результаты расчетов паразитного отклонения частоты и фазы источника сигналов из измеренной спектральной плотности мощности фазового шума, выраженной через показательную функцию с постоянным показателем в пределах линейного участка.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности фазового шума; паразитное отклонение частоты; паразитное отклонение фазы; девиация частоты.

THE CALCULATION OF THE PARASITIC FREQUENCY DEVIATION AND PHASE OF SOURCE SIGNALS FROM THE POWER SPECTRAL DENSITY OF PHASE NOISE

A. V. Chadin

FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Mytishchi, Russia

Abstract. The results of calculations of the parasitic deviation of the frequency and phase of the signal source from the measured spectral power density of the phase noise, expressed in terms of an exponential function with a constant value within the linear region, are considered.

Keywords: spectral power density of phase noise; parasitic frequency deviation; parasitic phase deviation; frequency deviation.

1. Введение

Современные высокотехнологичные радиотехнические средства, системы и комплексы все шире внедряются для решения задач связи, навигации, радиолокации и т.п. в различных областях человеческой деятельности.

Качество и эффективность применения таких изделий радиотехники по назначению во многом определяется стабильностью характеристик используемых источников сигнала (рисунок 1): частоты, амплитуды, фазы.



Рис 1. Генератор СВЧ сигналов E5720D

2. ПАРАЗИТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ЧАСТОТЫ И ФАЗЫ

Нестабильность частоты (фазы) - степень изменения частоты (фазы) сигнала непрерывно работающего генератора в течение определенного отрезка времени. Нестабильность частоты бывает кратковременной и долговременной.

Для измерений кратковременной нестабильности частоты используются анализаторы источников сигнала и измерители флуктуаций, а также применятся измерительные приборы линейки СК3.

Отечественные измерительные приборы линейки СК3 позволяют измерять паразитное отклонение частоты (ПОЧ) и паразитное отклонение фазы (ПОФ) в определенных фиксированных полосах частот. На практике, как правило, представляет интерес измерение ПОЧ и особенно ПОФ в других полосах частот, соответствующих электрической скорости передачи информации [1].

Уровень ПОЧ – это среднее квадратичное значение суммы спектральных составляющих паразитного отклонения частоты колебания, лежащих в заданной полосе частот:

$$\Delta f = \sqrt{\int_{f_н}^{f_в} S_f(f)\,df}, \tag{1}$$

где $S_f(f)$ – спектральная плотность среднего квадрата $\Delta f(t)$:

$$S_f(f) = \lim_{T\to\infty} \frac{2}{T} \left\langle \left| \int_{-T/2}^{T/2} \Delta f(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 \right\rangle. \tag{2}$$

Уровень ПОФ – это среднее квадратичное значение суммы спектральных составляющих паразитного отклонения фазы колебания (в градусах), лежащих в заданной полосе частот (3):

$$\Delta\varphi = \frac{180}{\pi} \sqrt{\int_{f_н}^{f_в} S_\varphi(f)\,df}, \tag{3}$$

где $S_\varphi(f)$ – спектральная плотность среднего квадрата $\Delta\varphi(t)$, выраженного в радианах:

$$S_\varphi(f) = \lim_{T\to\infty} \frac{2}{T} \left\langle \left| \int_{-T/2}^{T/2} \Delta\varphi(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 \right\rangle. \tag{4}$$

Таким образом, зная распределение спектральной плотности мощности шума $S_ш(f)$ в заданной полосе и относительный уровень дискретных побочных составляющих, можно вычислить ПОЧ и ПОФ без дополнительных измерений, требующих сложной нестандартной измерительной аппаратуры.

ПОФ и ПОЧ в полосе частот от f_1 до f_2 в зависимости от $S_ш(f)$ определяются соотношениями:

$$\Delta f = \sqrt{2\int_{f_1}^{f_2} S_ш(f)\,df}, \tag{5}$$

и

$$\Delta\varphi = \sqrt{2\int_{f_1}^{f_2} S_ш(f) f^2 df}. \quad (6)$$

Для расчета ПОЧ и ПОФ необходимо с помощью анализатора спектра измерить $S_ш$ (f) на необходимых частотах отстройки от несущей.

На каждой частоте отстройки зависимость $S_ш$(f) выражается показательной функцией [2] с постоянным показателем в пределах линейного участка:

$$S_ш(f) = 10^{C_i} f^{\alpha_i}, \text{ где } i=1, 2\ldots n. \quad (7)$$

Коэффициенты α_i и C_i можно найти по формулам (8) и (9) соответственно:

$$\alpha_i = \frac{S_{ш_1} - S_{ш_2}}{10(\lg(f_1) - lg(f_2))}, \quad (8)$$

и

$$C_i = \frac{S_{ш_2} lg(f_1) - S_{ш_1} lg(f_2)}{10(\lg(f_1) - lg(f_2))}. \quad (9)$$

Тогда на отдельных линейных участках ПОФ и ПОЧ вычисляются по формулам (10) и (11) соответственно:

$$\Delta\varphi_i = \begin{cases} \sqrt{2\int_{f_1}^{f_2} 10^{C_i} f^{\alpha_i} df} = \sqrt{2\cdot 10^{C_i} \frac{f_2^{\alpha_i+1} - f_1^{\alpha_i+1}}{\alpha_i+1}}, для\ \alpha_i \neq -1 \\ \sqrt{2\cdot 10^{C_i} \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}, для\ \alpha_i = -1 \end{cases} \quad (10)$$

и

$$\Delta f_i = \begin{cases} \sqrt{2\int_{f_1}^{f_2} 10^{C_i} f^{\alpha_i} f^2 df} = \sqrt{2\cdot 10^{C_i} \frac{f_2^{\alpha_i+3} - f_1^{\alpha_i+3}}{\alpha_i+3}}, для\ \alpha_i \neq -3 \\ \sqrt{2\cdot 10^{C_i} \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}, для\ \alpha_i = -3. \end{cases} \quad (11)$$

Общие ПОЧ и ПОФ рассчитанные [3] в интересующей полосе частот:

$$\Delta f_{эф} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \Delta f_i^2}, \quad (12)$$

и

$$\Delta\varphi_{эф} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \Delta\varphi_i^2}. \quad (13)$$

3. Результаты измерений и вычислений

На рисунке 2 представлена измеренная с помощью анализатора спектра E4440A спектральная плотность мощности фазового шума генератора СВЧ сигналов E5720D.

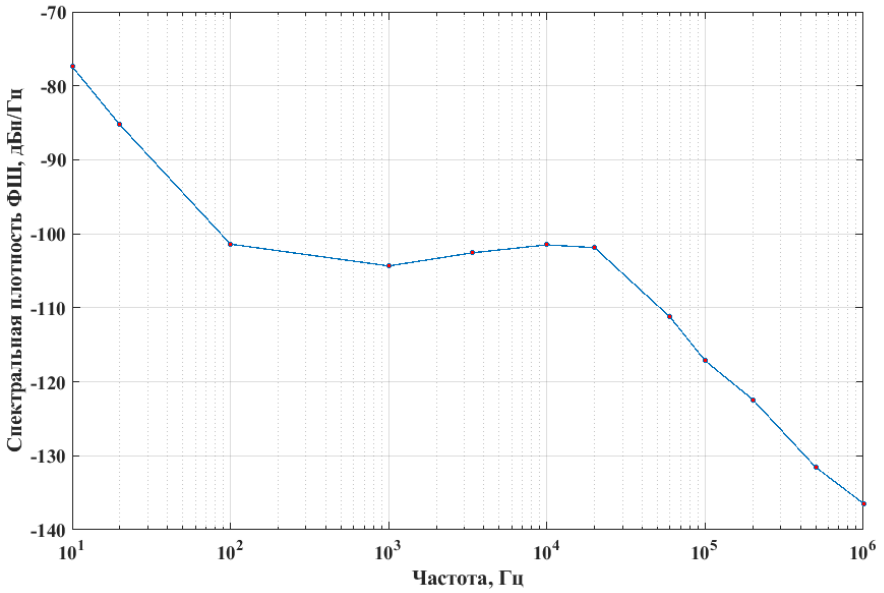


Рис 2. Спектральная плотность мощности фазового шума генератора СВЧ сигналов E5720D

В таблицах 1 и 2 приведены результаты измерений спектральной плотности мощности фазового шума, ПОЧ и ПОФ генератора СВЧ сигналов E5720D.

Таблица 1. Результаты измерений СПМ ФШ анализатором E4440A

Частота отстройки, Гц	10	100	1000	3400	10000	20000	60000	100000	200000
СПМ ФШ, дБн/Гц	-77,41	-101,4	-104,34	-102,56	-101,49	-101,87	-111,25	-117,16	-122,4

Частота отстройки, Гц	10	100	1000	3400	10000	20000
СПМ ФШ, дБн/Гц	-77,41	-101,4	-104,34	-102,56	-101,49	-101,87

Таблица 2. Результаты измерений ПОЧ и ПОФ анализатором E4440A

Полоса частот измерений	ПОЧ, Гц	ПОФ, рад
20 Гц - 3,4 кГц	1,3	0,0006
20 Гц – 20 кГц	19,17	0,0015
20 Гц - 60 кГц	54,2	0,0021
20 Гц - 200 кГц	98,29	0,0022

По приведенным выше выражениям вычислили ПОЧ и ПОФ для генератора СВЧ сигналов в соответствующих полосах измерений. Результаты представлены в таблице 3.

4. Заключение

Из таблицы 3 видно, что в полосе частот от 20 Гц до 200 кГц результаты измерений соответствуют теоретическим расчетам в пределах допустимых значений

расхождений. При этом максимальное значение расхождения экспериментальных данных от теоретических для ПОЧ составляет не более 7,1 %. Таким образом, данная методика позволит рассчитать ПОЧ и ПОФ из измеренной спектральной плотности мощности шума генератора СВЧ сигналов, если отсутствуют необходимые средства измерений.

Литература

1. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
2. Андронов Е.В., Глазов Г.Н. Теоретический аппарат измерений на СВЧ: Т.1. Методы измерений на СВЧ. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. – 804 с.
3. Манассевич В. Перевод с англ./ Под ред. А.С. Галина. Синтезаторы частот (Теория проектирования). М.: Связь, 1979. – 384 с.

References

1. Ryzhkov, A. V., Popov V. N., The frequency synthesizers in the technique of radio. M.: Radio and communication, 1991. – 264 p.
2. Andronov E. V., Glazov, G. N., The theoretical device measurements at microwave frequencies: vol.1. Methods of measurements on microwave. Tomsk: TML-Press, 2010. – 804 p.
3. Manassevich V. Translation from English./ Edited by A. S. Galina., Frequency synthesizers (design Theory). M.: Communication, 1979. - 384 p.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАНАРНОГО ЭЛЕМЕНТА ТОПОЛОГИИ МИКРОПОЛОСКОВОГО УСТРОЙСТВА ПО ЗАДАННОЙ ЕМКОСТИ В СХЕМЕ ЗАМЕЩЕНИЯ

Н. Н. Щетинин[1], А. В. Останков[2], В. А. Мельник[1]

[1]Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний (ВИ ФСИН РФ), Воронеж, Россия
[2]Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), Воронеж, Россия

Аннотация. При разработке и оптимизации микрополосковых устройств нередко применяются схемы замещения, содержащие сосредоточенные реактивные элементы. Переход от сосредоточенных элементов схемы замещения к планарной топологии элемента предполагает наличие однозначных соотношений, связывающих ключевой электрический параметр элемента с геометрией его топологии. В докладе на примере многосекционного встречно-штыревого конденсатора продемонстрирована возможная методика реализации планарного элемента заданной топологии по известной ёмкости. На первом этапе методика предполагает получение многомерного массива данных, иллюстрирующих взаимосвязь электрической величины с геометрическими параметрами топологии, с использованием электромагнитного моделирования планарного элемента в доступной САПР. На втором этапе выполняется одномерная или многомерная интерполяция сплайнами рабочих характеристик элемента, что позволяет рассчитать искомые размеры топологии по заданному ключевому электрическому параметру.

Ключевые слова: схема замещения, микрополосковая топология, сплайн-интерполяция, встречно-штыревой конденсатор.

PLANAR ELEMENT IMPLEMENTATION OF A MICROSTRIP TOPOLOGY ON SPACIFIED CAPACITY IN THE EQUIVALENT CIRCUIT

N. N. Shchetinin[1], A. V. Ostankov[2], V.A. Mel'nik[1]

[1]Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service (VIRFPS), Voronezh, Russia
[2]Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia

Abstract. In the development and optimization of microstrip devices, equivalent circuits that contain lumped reactive elements are often used. The transition from lumped elements of the equivalent circuit to the planar element topology implies the presence of unambiguous relations connecting the key electrical parameter of the element with the geometry of its topology. The report on the example of a multi-section interdigital capacitor has demonstrated a possible method of planar element implementation of a specified topology on known capacity. At the first stage, the method involves obtaining a multidimensional data set, illustrating the relationship of the electrical value with the geometric parameters of the topology, using electromagnetic modeling of a planar element in an available CAD system. At the second stage, one-dimensional or multidimensional interpolation by the splines of the element performance characteristics is performed, which allows to calculate the sought-for dimensions of the topology on a given key electrical parameter.

Keywords: equivalent circuit, microstrip topology, spline-interpolation, interdigital capacitor.

1. Введение

На начальных стадиях разработки многополюсных микрополосковых устройств диапазонов УВЧ и СВЧ для их анализа и оптимизации нередко используют эквивалентные схемы замещения, состоящие, преимущественно, из *L*- и *C*-элементов и их комбинаций в виде Т- и П-образных структур [1-3]. При переходе к эквивалентным аналогам индуктивности и ёмкости в микрополосковом исполнении возникает задача сопоставления планарной топологии полосков с величинами *L* и *C*, полученными путём расчёта или численной оптимизации эквивалентных схем замещения. Известно, что, например, ёмкостные микрополосковые элементы могут быть эффективно реализованы в виде встречно-штыревых планарных конденсаторов [4-6], что во многом связано с их относительно малыми габаритными размерами, особенно в диапазоне УВЧ, и возможностью наращивания для обеспечения необходимой ёмкости. Известные из литературы аналитические соотношения, связывающие геометрические параметры встречно-штыревых конденсаторов с их ёмкостью, являются во многом приближёнными, так как, например, не учитывают зависимость ключевого параметра от частоты.

В настоящее время широкое распространение получили САПР, позволяющие на основе разной степени строгости электродинамического моделирования получать близкие к истинным ключевые параметры планарных элементов. Однако далеко не каждая из них способна осуществлять переход от идеализированного сосредоточенного *L*- и (или) *C*-элемента к планарному элементу заданной топологии.

Цель работы — на примере многосекционного встречно-штыревого конденсатора продемонстрировать возможную методику реализации планарного элемента заданной топологии по известной ёмкости.

2. Разработка и апробация методики

Эффективное изменение ёмкости встречно-штыревого конденсатора возможно за счёт наращивания количества секций. На рис. 1 представлена элементарная секция микрополоскового встречно-штыревого конденсатора, состоящая из пары штырей, связанных между собой по полю. Будем полагать, что такие важные параметры как диэлектрическая проницаемость и толщина подложки известны и характеризуются следующими величинами: $\varepsilon_r = 3{,}38$, $h = 0{,}508$ мм. Геометрические размеры штырей и зазор между ними также заданы и при возможном наращивании ёмкости не меняются. В рассматриваемом случае длина штыря применительно к использованию в диапазоне УВЧ составляет $L = 5$ мм, ширина – $W = 0{,}2$ мм, зазор между штырями – $G = 0{,}2$ мм.

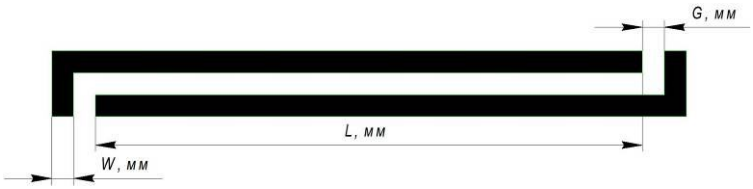


Рис. 1. Составная часть многосекционного встречно-штыревого конденсатора

На рис. 2 изображена однопортовая многосекционная планарная встречно-штыревая структура с десятью секциями, предназначенная для реализации планарного ёмкостного элемента. Будем полагать, что при необходимости наращивания ёмкости количество секций будет варьироваться от одной до десяти. При максимальном количестве штырей, равным двадцати, совокупные габаритные размеры встречно-штыревого конденсатора не превышают 5,8×7,8 мм^2.

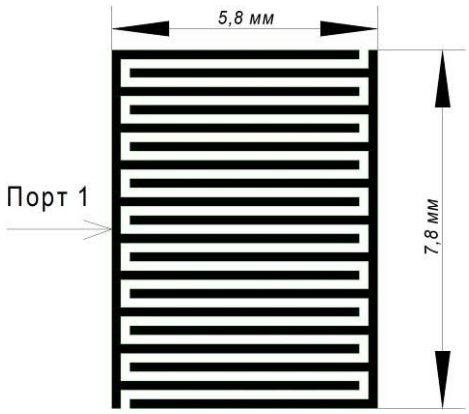


Рис. 2. Топология микрополоскового встречно-штыревого конденсатора

Частотные зависимости ёмкости микрополоскового встречно-штыревого конденсатора для разного количества секций в заданной полосе частот 0,3 - 3,0 ГГц получены на основе строгого электродинамического моделирования методом моментов в САПР Advanced Design System (ADS) [7] в виде двумерного массива данных (рис. 3).

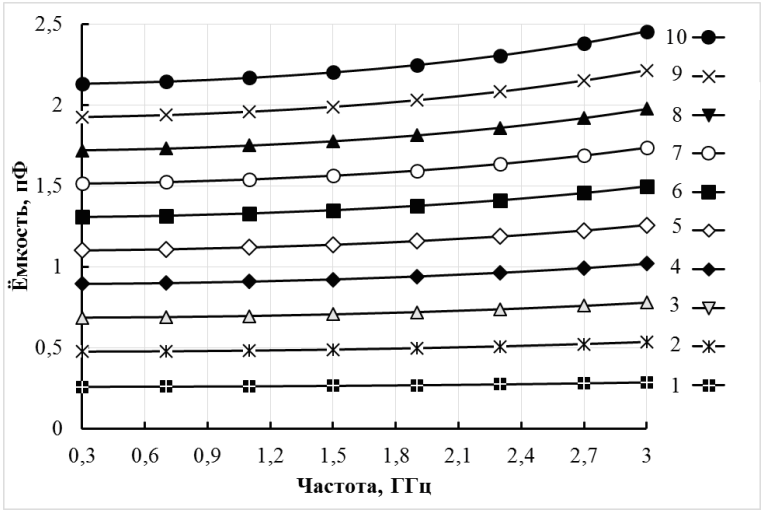


Рис. 3. Частотные зависимости ёмкости микрополоскового встречно-штыревого конденсатора для разного числа секций в диапазоне УВЧ

На рис. 4 полученный массив транспонирован и визуализирован в виде зависимостей ёмкости встречно-штыревого конденсатора от количества секций на разных частотах. Для каждой указанной частоты выполнена интерполяция показанных на рис. 4 монотонных зависимостей линейными функциями вида $y=k\cdot x+b$. Заметим, что в случае сложной зависимости ключевой электрической величины планарного

элемента от его геометрического параметра следует использовать интерполяцию полученной характеристики линейными или кубическими сплайнами. Сплайны практически при любом характере интерполируемых функций обеспечивают сходимость и устойчивость вычислительного алгоритма, тогда как процедура интерполяции в современных математических пакетах предельно упрощена [8]. В рассматриваемом примере использована линейная интерполяция (линейным сплайном с одним фрагментом), уравнения которой для разных частот представлены на рис. 4.

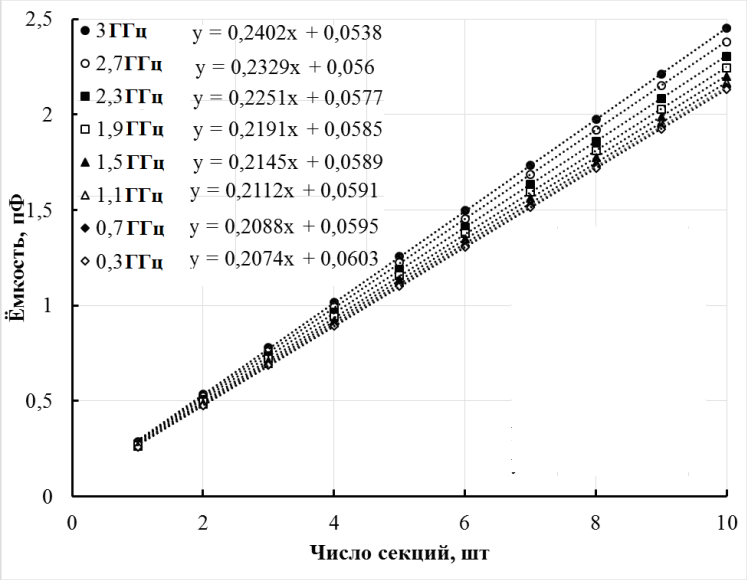


Рис. 4. Зависимости ёмкости встречно-штыревого конденсатора от числа секций на разных частотах и параметры их интерполяции

Полученные таким образом интерполирующие сплайны могут быть использованы для расчёта числа секций микрополоскового встречно-штыревого конденсатора по заданной ёмкости в схеме замещения, подлежащей реализации. Заметим, что поскольку аргумент интерполированной функции (число секций) является дискретным, то реализация заданной ёмкости будет выполнена с погрешностью. Например, на частоте 1,5 ГГц для обеспечения ёмкости 1,5 пФ требуется согласно полученной интерполяции 6,72 элементарных секций. Если взять целое число секций, равное 7, то вносится погрешность в 0,06 пФ (4 %). Если характеристики устройства УВЧ критичны к данной погрешности реализации ёмкости, то для минимизации погрешности имеет смысл дополнительно изменить очередной геометрический параметр, определяющий ёмкость планарного элемента, например, зазор между штырями G. Для заданной частоты и выбранного числа секций конденсатора в системе электромагнитного моделирования следует получить зависимость ёмкости планарного элемента от зазора между штырями, интерполировать её и определить искомый зазор, гарантирующий требуемое значение реализуемой ёмкости.

Покажем, что на основе полученных выше интерполяций зависимостей ёмкости C взятой за основу топологии планарного конденсатора (рис. 2) от числа секций n для разных частот f несложно получить простое аналитическое соотношение, их

связывающее. Для этого интерполируем частотные зависимости полученных коэффициентов интерполяции k и b, однозначно определяющих ёмкость как функцию числа секций: $C(n)=k\cdot n+b$. На рис. 5 представлены указанные частотные зависимости и их интерполяции, выполненные для наглядности квадратичными функциями.

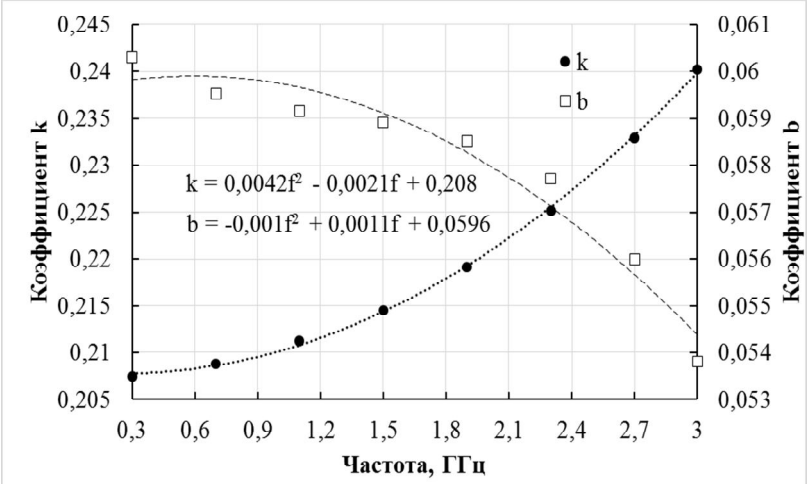


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов функции $C(n)=k\cdot n+b$ и их интерполяции квадратичным полиномом

Согласно полученным и представленным на рис. 5 интерполяциям в рассматриваемой полосе частот ёмкость встречно-штыревого конденсатора может быть определена на основе следующего относительно простого аналитического выражения:

$$C(f,n)=10^{-3}\cdot\left[(4{,}2\cdot n-1)\cdot f^2-(2{,}1\cdot n-1{,}1)\cdot f+208\cdot n+5{,}96\right],\ \text{пФ}, \qquad (1)$$

где f – текущая частота в ГГц, n – количество секций.

Максимальная относительная погрешность при использовании соотношения (1) на частоте 0,3 ГГц для одной секции конденсатора не превышает 3,9 %, в то время как для десяти секций на частоте 3 ГГц относительная погрешность меньше 0,3 %.

Если пролонгировать полученное выражение для числа секций вплоть до двадцати, то несложно убедиться, что относительная погрешность получаемой по формуле ёмкости микрополоскового встречно-штыревого конденсатора отличается от результатов электродинамического моделирования не более чем на 4 %.

Выразив из (1) искомое по заданной ёмкости число секций, получим анонсированную выше рабочую формулу:

$$n=\frac{f^2-1{,}1\cdot f-59{,}6+10^3\cdot C}{4{,}2\cdot f^2-2{,}1\cdot f+208}, \qquad (2)$$

где f – текущая частота в ГГц, C – заданная ёмкость в пФ.

3. Заключение

Описана методика, позволяющая на основе имитационного моделирования предполагаемой к реализации топологии планарного элемента получить многомерный массив данных, сплайн-интерполяция которого, в свою очередь, гарантирует

определение искомых геометрических параметров планарной структуры по заданному значению электрической величины. Проиллюстрированы основные этапы такой методики на примере встречно-штыревой топологии планарного конденсатора при условии исходно заданной ёмкости. Изложенная методика может быть использована при разработке содержащих планарные структуры микрополосковых устройств диапазона УВЧ и СВЧ.

Литература

1. Ball I. Lumped elements for RF and microwave circuits. Norwood: Artech House, 2003. – 488 p.
2. Andrews D. Lumped Element Quadrature Hybrids. Norwood: Artech House, 2006. – 222 p.
3. Останков А.В., Щетинин Н.Н. Микрополосковые направленные ответвители УВЧ и СВЧ диапазонов // Радиостроение, 2017, № 5. – С. 1-37.
4. Alley G.D. Interdigital capacitors and their application to lumped-element microwave integrated circuits // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1970, Vol. MTT-18. – Pp. 1028–1033.
5. Щетинин Н.Н., Останков А.В., Воробьева Е.И. Математическая модель для проектирования микрополоскового направленного ответвителя на квазисосредоточенных элементах // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2014, Т. 10, № 3-1. – С. 66-70.
6. Keshavarz R., Movahhedi M. A compact and wideband coupled-line coupler with high coupling level using shunt periodic stubs // Radioengineering, 2013, Vol. 22, No. 1. – Pp. 323-327.
7. Система автоматизированного проектирования ADS. http//www.keysight.com/ru/pc-1297113/advanced-design-system-ads?pm=DL&nid=-34346.0&cc=RU&lc=rus, 14.02.2019.
8. Дьяконов В.П. Энциклопедия компьютерной алгебры. М.: ДМК Пресс, 2012. – 1263 с.

References

1. Ball, I. Lumped elements for RF and microwave circuits. Norwood: Artech House, 2003. – 488 p.
2. Andrews, D. Lumped Element Quadrature Hybrids. Norwood: Artech House, 2006. – 222 p.
3. Ostankov, A.V., Shchetinin, N.N. UHF and SHF Micro-strip Directional Couplers // Radio Engineering, 2017, No. 5. – Pp. 1-37.
4. Alley, G.D. Interdigital capacitors and their application to lumped-element microwave integrated circuits // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1970, Vol. MTT-18. – Pp. 1028–1033.
5. Shchetinin, N.N., Ostankov, A.V., Vorobjeva, E.I. Mathematical model for the microstrip directional coupler on a quasi-lumped element // The Bulletin of Voronezh State Technical University, 2014, Vol. 10, No. 3-1. – Pp. 66-70.
6. Keshavarz, R., Movahhedi, M. A compact and wideband coupled-line coupler with high coupling level using shunt periodic stubs // Radioengineering, 2013, Vol. 22, No. 1. – Pp. 323-327.
7. ADS 2011 Product Release // Agilent Technologies. URL: http//www.keysight.com/ru/pc-1297113/advanced-design-system-ads?pm=DL&nid=-34346.0&cc=RU&lc=rus, 14.02.2019.
8. Dyakonov, V.P. Encyclopedia of computer algebra. M.: DMK Press, 2012. – 1263 p.

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. А. Васильченко[1], Д. В. Савкин[1], К. А. Бедин[2]

[1]Филиал Военной академии РВСН им. Петра Великого, Серпухов, Российская Федерация
[2]4 ГЦМП МО РФ, Знаменск, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматривает подход к формированию научно-методического аппарата определения суммарной погрешности измерений реконфигурируемой в пространстве оптической измерительной системы на базе БПЛА. Данный научно-методический аппарат может быть использован для определения минимального количества измерительных станций для обеспечения требуемого значения суммарной точности измерений местоположения образца испытаний при указанных значениях пеленгов между измерительными станциями и значениях их точности.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; среднеквадратическая круговая погрешность измерений; погрешность определения местоположения, эллипс рассеяния, оптическая измерительная система, внешнетраекторные измерения.

RECONFIGURABLE SPACE OPTICAL MEASURING SYSTEM BASED ON UNMANNED AERIAL VEHICLES

A. A. Vasilchenko[1], D. V. Savkin[1], K. A. Bedin[2]

[1]Branch of Military academy of Rocket Strategic forces of a name Peter the Great, Serpuhov, Russian Federation
[2]4 main Central interspecific range, Znamensk, Russian Federation

Abstract. This article discusses the approach to the formation of scientific and methodological apparatus for determining the total measurement error reconfigurable in space optical measuring system based on unmanned aerial vehicles This scientific and methodical apparatus can be used to determine the minimum number of measuring stations to ensure the required value of the total accuracy of the measurement location of the test sample at the specified values of bearings between the measuring stations and the values of their accuracy.

Keywords: he unmanned aerial vehicle; RMS circular error of measurement; accuracy of measuring the location, of the ellipse of scattering, an optical measurement system, measurement wasnecessary.

1. Введение

Для регистрации воздушных объектов (ВО) в ходе проведения испытаний образцов техники используются оптические средства траекторных измерений (ОСТИ), представляющих собой совокупность функционально и конструктивно взаимосвязанных узлов и механизмов, предназначенных для определения абсолютного и относительного положений в пространстве движущихся объектов и для регистрации явлений, происходящих с этими объектами при их взаимодействии [1]. ОСТИ являются одним из основных элементов измерительного комплекса и могут выполнять свои задачи как автономно, так и совместно с другими средствами траекторных измерений. ОСТИ могут представляться в виде систем или отдельных оптических станций [1-2].

В настоящее время для траекторных измерений используются мобильные оптико-электронные станции, обеспечивающие точность определения местоположения ВО в пределах угловых секунд. Данная съемка ВО производится на больших высотах и в сложных погодных условиях, что затрудняет их поиск оператором, а при отсутствии должного уровня подготовки специалиста испытательного пункта выполняющего съемку траекторной информации становится и вовсе невозможной [2]. В подобных ситуациях выполнение внешнетраекторных измерений возможно с использованием поднятых на различные высоты и распределенных по пространству (территории) оптических измерительных станций, реализованных на базе беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и образующих реконфигурируемую по пространству оптическую измерительную систему. В ходе разработки данной измерительной системы необходимо оценивание точности внешнетраекторных измерений в зависимости от системных параметров и определения минимально необходимого количества измерительных станций для обеспечения требуемого значения суммарной погрешности измерений.

2. Решение задачи

При определении каждой линии положения возникают погрешности, которые приводят к тому, что вычисленное положение объекта отличается от истинного. Если предположить, что объект находится на больших расстояниях от точек наблюдения, и что погрешности определения линий положения много меньше этих расстояний, тогда семейство линий положения, соответствующие различным значениям измеряемых параметров положения около местоположения объекта, можно заменить отрезками параллельных прямых независимо от формы линий положения [4].

Примем, что истинное значение положения средства измерения находится в точке *M* пересечения линий положения *AB* и *CD*, соответствующих истинным значениям измеряемых параметров положения. Прямые *A'B'* и *C'D'* определяют линии положения с учетом погрешностей измерения, *M'* - вычисленное с погрешностями местоположения объекта [5]. На рисунке 1 представлена схема подхода к определению ошибки измерений угловых координат.

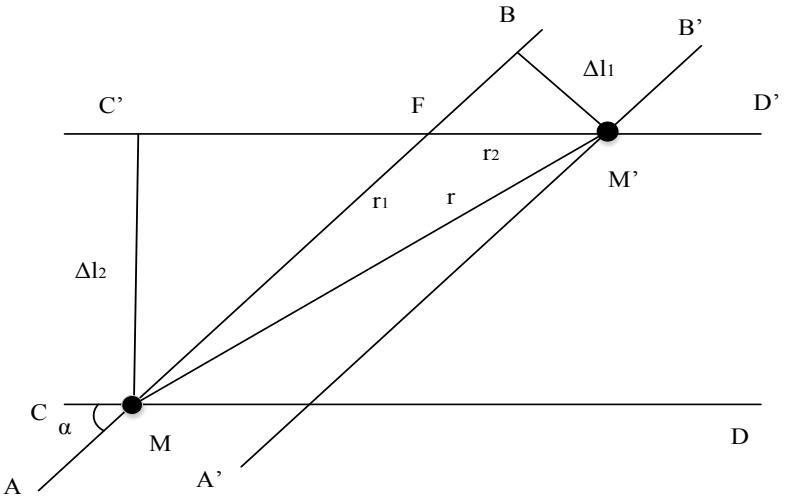


Рис.1. Обобщенный подход к выводу ошибки определения координат

Линии положения *AB* и *CD* пересекаются под углом α, который называется углом засечки. Точки *M* и *M'* смещены относительно друг друга на расстояние *r*, которое называется погрешностью местоопределения. Величины Δl_1 и Δl_2 представляют погрешности определения линий положения *AB* и *CD*. Обозначив $r_1=MF$ и $r_2=M'F$, получим $r_1=\Delta l_1/\sin\alpha$ и $r_2=\Delta l_2/\sin\alpha$. Тогда из треугольника *MM'F* согласно теореме косинусов находим погрешность местоопределения [4]:

$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos\alpha, \tag{1}$$

Используя выражение (1) рассчитать погрешность определения местоположения объекта наблюдения для единичного измерения можно следующим образом [4]:

$$r = \frac{\sqrt{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 + 2\Delta l_1 \Delta l_2 \cos\alpha}}{\sin\alpha}, \tag{2}$$

Ввиду того что погрешности Δl_1 и Δl_2 имеют случайный характер, то и погрешность определения местоположения объекта случайна. При условии $\alpha=const$ получим выражение для среднеквадратической погрешности местоопределения [5]:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{l1}^2 + \sigma_{l2}^2 + 2\sigma_{l1}\sigma_{l2}\cos\alpha\rho}}{\sin\alpha}, \tag{3}$$

где ρ - коэффициент взаимной корреляции погрешностей определения линий положения *AB* и *CD*;

σ_{l1}, σ_{l2} - среднеквадратические погрешности определения местоположения.

При независимых измерениях линий положения *AB* и *CD*, что часто встречается на практике, ρ = 0, тогда выражение для расчета погрешности примет вид [5]:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{l1}^2 + \sigma_{l2}^2}}{\sin\alpha}, \tag{4}$$

Полученные выражения показывают, что среднеквадратическая погрешность определения местоположения объекта σ_r зависит от среднеквадратической погрешности измерений линии положения *AB* и *CD*, а также от угла, под которым пересекаются эти линии и их взаимной корреляционной функции. Достижение максимальной точности при заданных значениях σ_{l1}, σ_{l2} обеспечивается тогда, если линии положения пересекаются под углом 90°. Погрешность *r* определения местоположения не распределена по нормальному закону, даже когда Δl_1 и Δl_2 представляют собой нормальные случайные величины. В данному случае приближенной оценки погрешности определения местоположения не достаточно.

Вероятность нахождения определяемого местоположения в пределах эллипса с параметром ζ равна [3]:

$$P_э = 1 - e^{-\zeta}, \tag{5}$$

откуда

$$\zeta = \sqrt{-\ln(1 - P_э)}, \tag{6}$$

Для получения эллипса необходимо определить его полуоси *a* и *b*, а также угол поворота γ его осей относительно к биссектрисе угла засечки.

Анализ возможных положений эллипса погрешностей позволяет сделать вывод: большая ось всегда лежит в остром угле пересечения линий положения и ближе к той из

них, точность определения которой выше. В случае одинаковой точности определения линий положения большая ось эллипса совпадает с биссектрисой острого угла пересечения линий положения. В случае, когда угол пересечения прямо $\alpha=90^0$, оси эллипса ошибок совпадают с линиями положения. Если $\sigma_{l1}=\sigma_{l2}$, то эллипс погрешностей превращается в окружность, и эллиптическое рассеивание превращается в круговое. Результат математического моделирования эллипса погрешностей реконфигурируемой по пространству оптической измерительной системы на беспилотных летательных аппаратах при проведении внешнетраекторных измерений представлен на рисунке 2.

Для характеристики ошибки местоположения используют расстояние R между центром эллипса рассеяния и засечкой, т.е. выбирают круг с радиусом R_0. Для нахождения вероятности объекта наблюдения в пределах круга определяют по формуле [3]:

$$P_{кр} = \int_0^{R_0} W(r)dr, \tag{7}$$

где W(r)- распределение плотности вероятностей случайной ошибки r.

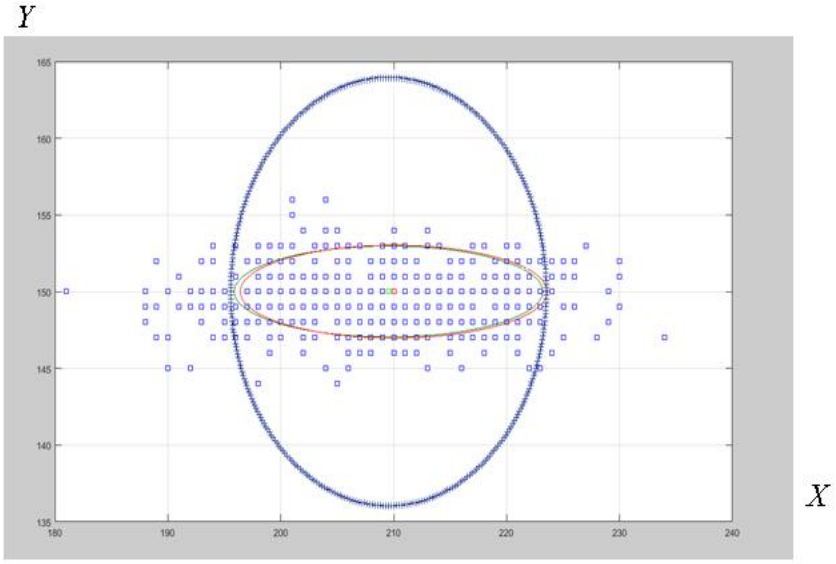


Рис.2. Результат математического моделирования эллипса погрешностей

Площадь круга $S=\pi R_0^2$ ограничивающего область с вероятностью местонахождения засечки $Pкр$, больше площади минимального эллипса S=πab. Однако при углах засечки $30^0<\alpha<150^0$ это отличие площадей не велико, поэтому при решении задач радиус R_0 можно найти по формуле [3]:

$$R_0 = \sqrt{-\ln(1-P_{кр})}\sigma_r, \tag{8}$$

Данный радиус называется среднеквадратической круговой погрешностью местоопределения $R_{ск}$. При количестве линий положения (количества БПЛА, участвующих в испытаниях) более двух, $R_{ск}$ можно найти по формуле [5]:

$$R_{ск} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sigma_{li}^2}}{\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\sin\alpha_{i,j}}{\sigma_{li}\sigma_{lj}}\right)^2}}, \tag{9}$$

где σ_{li},σ_{lj}- ошибки линий положения;

$\alpha_{i,j}$- угол засечки между i-ой и j-ой линиями положения.

Для расчета параметров эллипса погрешностей при использовании более двух оптических средств можно применить [5]:

$$a = \frac{2\lambda}{\sqrt{A + C - \sqrt{(A-C)^2 + 4AB^2}}}, \quad (10)$$

$$b = \frac{2\lambda}{\sqrt{A + C + \sqrt{(A-C)^2 + 4AB^2}}}, \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} arctg\left(\frac{2B}{C-A}\right), \quad (12)$$

$$A = \sum_{i=1}^{n} \frac{\cos^2 \theta_i}{\sigma_{li}^2}, \quad (13)$$

$$B = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{\sigma_{li}^2}, \quad (14)$$

$$C = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sin^2 \theta_i}{\sigma_{li}^2}, \quad (13)$$

где θ- угол от *i-го* средства измерения, а угол γ отсчитывается от направления на север.

В ходе математического моделирования были рассчитаны зависимости среднеквадратической круговой погрешностью местоопределения $R_{ск}$ от количества БПЛА n и значений ошибки линий положения σ_l при различных углах засечки, представленные на рисунках 3-4.

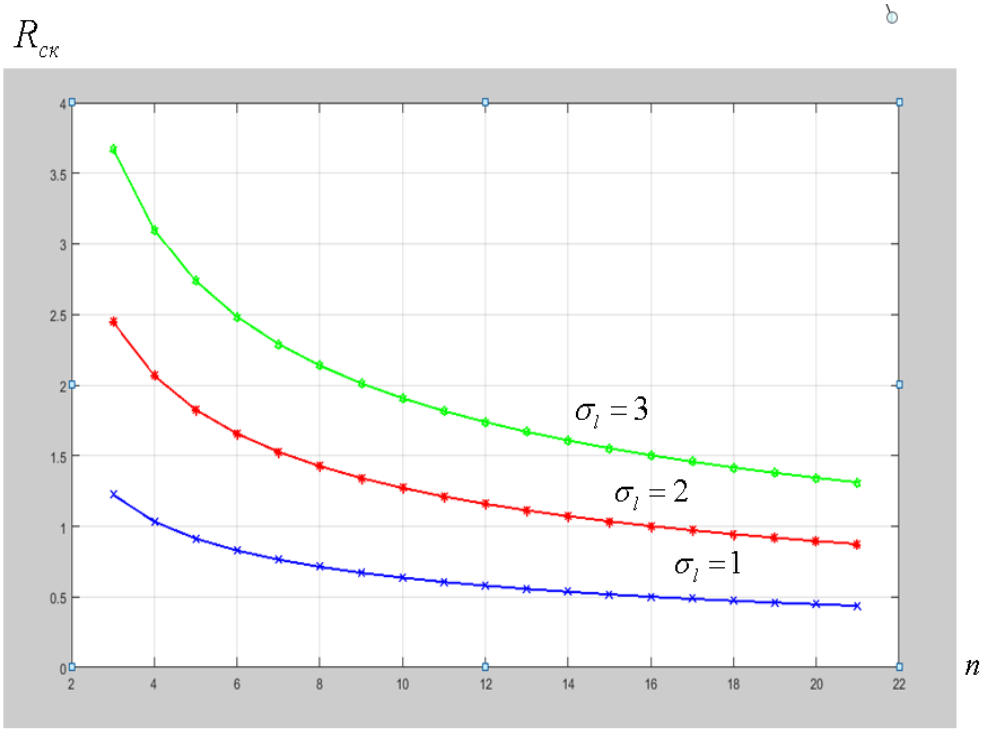


Рис.3. Графики зависимости среднеквадратической круговой погрешностью местоопределения $R_{ск}$ от количества БПЛА n и значений ошибки линий положения σ_l

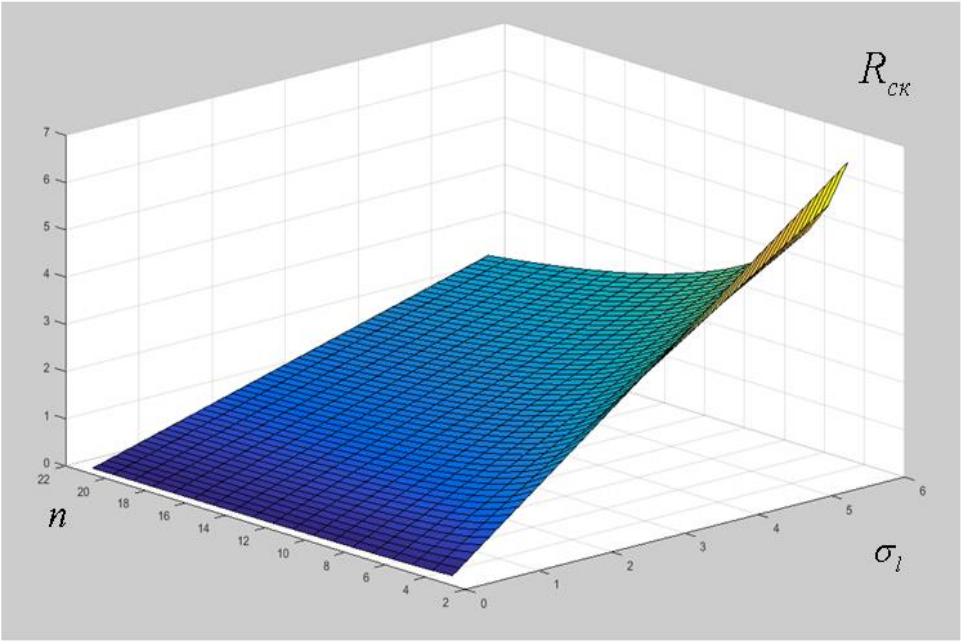


Рис.4. Трехмерный график зависимости среднеквадратической круговой погрешностью местоопределения $R_{ск}$ от количества БПЛА n и значений ошибки линий положения σ_l

3. Заключение

Представленный научно-методический аппарат позволяет выполнить оценивание точности внешнетраекторных измерений в зависимости от системных параметров и определить минимальное необходимое количество измерительных станций для обеспечения требуемого значения суммарной погрешности измерений.

Литература

1. Бабушкин И.А. Полигонные и командно-измерительные комплексы: Учебное пособие. РВИ РВ, 2010 – 385с.
2. Булычев Ю.Г., Васильев В.В. Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний сложных технических комплексов. – М.: Машиностроение – Полет, 2016. – 440 с.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1969. – 366с.
4. Дворников С.В., Волков Р.В. Основы построения и функционирования угломерно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений – Военная академия связи. – Санкт-Петербург, 2008, 105с.
5. Дворников С.В., Саяпин В.Н., Симонов А.Н. Теоретические основы координатометрии источников радиоизлучений – Военная академия связи. – Санкт-Петербург, 2006, 80с.

References

1. Babushkin, I. A., Field, and command-measuring complexes: a Training manual. Rvi RV, 2010-385s.
2. Bulychev Y. G., Vasiliev V. V. Information-measuring software field testing of complex technical systems. - Moscow: Mechanical Engineering-Flight, 2016. - 440 p.
3. Ventzel E. S., Ovcharov L. A. probability Theory. - Moscow: Science, 1969. - 366c.
4. Dvornikov S. V., Volkov p. V. Fundamentals of construction and operation of azimuth-distance measuring systems of coordinatefree emitters – Military Academy of communications. - St. Petersburg, 2008, 105c.
5. Dvornikov S. V., Sayapin, V. N., Simonov A. N. Theoretical foundations of coordinatefree emitters – Military Academy of communications. - St. Petersburg, 2006, 80s.Smith, J. Radiolocation technique. New York: Radio physics, 2002. – 253 p.

СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УОЛША

А.Н. Асосков, Ю.В. Левченко, И.И. Малышев, И.Н. Малышева, А.И. Мордовин, Ю.А. Плахотнюк

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. Рассматриваются аспекты формирования сложного шумоподобного сигнала для систем передачи и приема дискретной информации с кодовым разделением каналов. Предлагается способ, обеспечивающий возможность функционирования системы в случае использования сигналов с большим коэффициентом расширения спектра, и система для его реализации.

Ключевые слова: шумоподобные сигналы; цифровая связь; радиотехнические системы.

RADIO COMMUNICATION SYSTEM ON A BASIS OF WALSH TRANSFORM

A.N. Asoskov, Yu.V. Levchenko, I.I. Malyshev, I.N. Malysheva, A.I. Mordovin, Yu.A. Plahotnuk

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. Aspects of formation PSK-SS signal for transmission and reception systems of the discrete information code-division channels are considered. The method providing possibility of functioning of system in case of usage of signals with the big expansion ratio of a spectrum, and system for its implementation is offered.

Keywords: PSK-SS signal; digital communication; radio communication systems.

1. Введение

Как известно [1-2], существует много вариантов практической реализации систем радиосвязи, использующих фазоманипулируемые шумоподобные сигналы (ФМ ШПС), несомненно, имеющих особенности и собственные преимущества. Некоторые из систем реализованы по многоканальной схеме, включающей несколько каналов обработки информации. Соответственно, требуются аппаратные ресурсы для реализации каналов, как на приемной, так и на передающей стороне системы.

Поскольку величина коэффициента расширения спектра K_s имеет особо важное значение в силу взаимосвязанности K_s и сосредоточенных по спектру помех [2], то для ослабления влияния помех необходимо увеличивать K_s, и, соответственно, базу шумоподобного сигнала B_s. Очевидно, что сложность технической реализации систем радиосвязи для сигналов с большим коэффициентом расширения спектра K_s (или с большими базами B_s) значительно возрастает, так как количество каналов обработки на приемной стороне растет пропорционально N – количеству каналов демодуляторов синфазного и квадратурного каналов. Можно говорить о том, что при $N > 32$ техническая реализация такой системы экономически нецелесообразна, а при $N > 1024$ практически невозможна.

Авторами было найдено техническое решение, позволяющее осуществить приемо-передачу сигналов с большой базой и объемом алфавита на основе адаптации

существующей системы радиосвязи, причем аппаратная часть, реализующая цифровую обработку, может быть основана на элементах исключительно российского производства. Далее предлагается рассмотреть один из вариантов проектирования многоканальной приемопередающей системы, позволяющей реализовать необходимую функциональность.

2. Анализ возможности технической реализации

Рассмотрим математическое представление процессов формирования и обработки сигналов на передающей и принимающей сторонах, дающее основания для подтверждения возможности технической реализации способа обработки сигналов системой, включающей N каналов обработки, причем для сигналов с большой базой и объемом алфавита, который может измеряться в тысячах единиц.

Сигнал, формируемый на передающей стороне, в общем случае можно представить в виде [2]:

$$S_0(t) = a_0 \cdot (-1)^{МП1(t) \oplus ПСП1(t)} \cos 2\pi ft + a_0 \cdot (-1)^{МП2(t) \oplus ПСП2(t)} \sin 2\pi ft \,, \quad (1)$$

где a_0 – амплитуда сигнала; f – несущая (промежуточная) частота; $МП1(t)$, $МП2(t)$ – М-последовательности; $ПСП1(t)$, $ПСП2(t)$ – псевдослучайные последовательности (ПСП).

Входной сигнал усилителя передающей стороны может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} S(t) = a \cdot (-1)^{МП1(t) \oplus ПСП1(t)} \cos(2\pi f_0 t + \varphi) + \\ + a \cdot (-1)^{МП2(t) \oplus ПСП2(t)} \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \end{aligned}, \quad (2)$$

где f_0 – промежуточная частота.

После аналого-цифрового преобразования и децимирования сигналы будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} DI(n) = a \cdot (-1)^{M1(n) \oplus П1(n)} \cos\varphi + a \cdot (-1)^{M2(n) \oplus П2(n)} \sin\varphi \\ DQ(n) = a \cdot (-1)^{M1(n) \oplus П1(n)} \sin\varphi - a \cdot (-1)^{M2(n) \oplus П2(n)} \cos\varphi \end{aligned}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} M1(n) &= МП1(n\tau), \\ M2(n) &= МП2(n\tau), \\ П1(n) &= ПСП1(n\tau), \\ П1(n) &= ПСП1(n\tau), \end{aligned} \quad (4)$$

и τ – длительность периода чиповой частоты.

Далее рассмотрим работу одного из каналов обработки цифровых данных. После умножения сигналы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} DI1(n) &= DI(n)\cdot(-1)^{\Pi 1(n)} = \\ &= a\cdot(-1)^{M1(n)}\cos\varphi + a\cdot(-1)^{M2(n)\oplus\Pi 2(n)\oplus\Pi 1(n)}\sin\varphi, \\ DQ1(n) &= DQ(n)\cdot(-1)^{\Pi 1(n)} = \\ &= a\cdot(-1)^{M1(n)}\sin\varphi - a\cdot(-1)^{M2(n)\oplus\Pi 2(n)\oplus\Pi 1(n)}\cos\varphi, \end{aligned} \qquad (5)$$

Если передаваемые пакеты информации интерпретировать как двоичное представление чисел

$$h = (h_{m-1}, h_{m-2}, ..., h_0),$$

и учесть, что это начальные состояния генератора М-последовательности, то можно говорить о множестве последовательностей *M(h, n)* объемом 2^m, причем

$$M(0, n) = 0,\ M(h, n) = h_{n-1}\ при\ n \le m.$$

Для всех $h \neq 0$ *M(h, n)* представляют собой циклические сдвиги одной и той же М-последовательности, поэтому выполняется правило

$$M(h_1, n) \oplus M(h_2, n) = M(h_3, n), \qquad (6)$$

при $h_1 \neq h_2$.

Правило оптимального различения сигналов с неизвестной фазой несущей частоты включает в себя вычисления следующего вида:

$$\begin{aligned} X(h) &= \sum_{n=1}^{2^m-1} DI1(n)(-1)^{M(h,n)} \\ Y(h) &= \sum_{n=1}^{2^m-1} DQ1(n)(-1)^{M(h,n)}, \\ R(h) &= \sqrt{X^2(h) + Y^2(h)} \end{aligned} \qquad (7)$$

и далее следует определение *h* с максимальным значением *R(h)*.

Непосредственные вычисления *X(h)* и *Y(h)* предполагают использование перестановки данных *DI1(n)* и *DQ1(n)*, а затем – преобразования Уолша. Для определения закона перестановки можно воспользоваться рекуррентными свойствами М-последовательности

$$M(h,n) = \sum_{k=1}^{m} C_k(n)\cdot M(h,k) = \sum_{k=1}^{m} C_k(n)\cdot h_{k-1}. \qquad (8)$$

Далее рассмотрим последовательность чисел *t(n)*, имеющих двоичное представление $\{t_{m-1}(n), t_{m-2}(n), ..., t_0(n)\}$, где $t_k(n) = C_{k+1}(n)$.

Очевидно, что:

$$M(h,n) = \sum_{k=0}^{m-1} t_k(n)\cdot h_k. \qquad (9)$$

Таким образом, в результате перестановки *n→t(n)* образуется последовательность

$$B(h,t) = \sum_{k=0}^{m-1} t_k \cdot h_k, \qquad (10)$$

а это означает, что

$$(-1)^{B(h,t)} = (-1)^{\sum_{k=0}^{m-1} t_k \cdot h_k} = had(h,t), \qquad (11)$$

где $had(h,t)$ – функция Уолша, упорядоченная по Адамару, без нулевого элемента.

Рассмотрим более детально закон перестановки $n \to t(n)$. Задавая М-последовательность уравнением следующего вида

$$M(h,n+m) = \sum_{p=0}^{m-1} M(h,n+p) \cdot d(p) \qquad (12)$$

и подставляя в (8), легко получить выражение:

$$\sum_{k=1}^{m} C_k(n+m) \cdot h_k = \sum_{p=0}^{m-1} d(p) \sum_{k=1}^{m} C_k(n+p) \cdot h_{k-1} =$$

$$= \sum_{k=1}^{m} \left[\sum_{p=0}^{m-1} C_k(n+p) d(p) \right] \cdot h_{k-1} \qquad . \qquad (13)$$

Поскольку (13) выполняется для произвольных h, то

$$C_k(n+m) = \sum_{p=0}^{m-1} C_k(n+p) \cdot d(p), \qquad (14)$$

откуда следует, что все последовательности $C_k(n)$ являются циклическими сдвигами исходной М-последовательности.

Определим начальные состояния М-последовательностей. Поскольку

$$M(h,n) = h_{n-1} \quad \text{при} \quad n \le m, \qquad (15)$$

то

$$C_k(n) = \delta_{n,k} \quad \text{при} \quad n \le m, \qquad (16)$$

где $\delta_{n,k}$ – символ Кронекера.

Для генерации М-последовательности необходим генератор, который без потери общности может быть выполнен по широко известной схеме со встроенными сумматорами. Если задать ему начальное состояние {1, 0, 0, …, 0}, то на выходах его разрядов будут формироваться последовательности $\{C_1(n), C_2(n), \ldots, C_m(n)\}$, соответствующие последовательностям $\{t_0(n), t_1(n), \ldots, t_{m-1}(n)\}$. Таким образом, его можно использовать в качестве формирователя адресов перестановок отсчетов $n \to t(n)$ для схемы.

Возвращаясь к вычислению $X(h)$ и $Y(h)$ (7), можно увидеть, что если обозначить переставленные по закону $n \to t(n)$ последовательности отсчетов $DI1(n)$ и $DQ1(n)$ как $PI1(t)$ и $PQ1(t)$ и доопределить их при $t=0$, приняв $PI1(0) = PQ1(0) = 0$, то

$$X(h)=\sum_{t=0}^{2^m-1} PI1(t)had(h,t)$$
$$Y(h)=\sum_{t=0}^{2^m-1} PQ1(t)had(h,t) \quad , \qquad (17)$$

т.е. вычисление *X(h)* и *Y(h)* сводится к преобразованию Уолша, а номер *h* функций Уолша-Адамара соответствует передаваемому символу информации [3].

Рассмотрим взаимное влияние двух каналов передачи информации. Из (5) и (7) следует

$$X(h)=a\cdot\cos\varphi\cdot R(h,h1)+a\cdot\sin\varphi\cdot Z(h)$$
$$Y(h)=a\cdot\sin\varphi\cdot R(h,h1)-a\cdot\cos\varphi\cdot Z(h) \quad , \qquad (18)$$

где

$$R(h,h1)=\sum_{n=1}^{2^m-1}(-1)^{M(h,n)\oplus M(h1,n)} \quad ,$$

$$Z(h)=\sum_{t=1}^{2^m-1}(-1)^{M(h,n)\oplus M(h2,n)\oplus \Pi1(n)\oplus \Pi2(n)}, \qquad (19)$$
$$M(h1,n)=M1(n),$$
$$M(h2,n)=M2(n),$$

Очевидно, что *R(h, h1)* – функция корреляции М-последовательности, равная 2^{m-1} при *h = h1* и равная «-1» в остальных случаях.

Вторые слагаемые являются взаимными помехами. Для того, чтобы оценить их уровень, можно предположить, что *П(n)* – также М-последовательность, обладающая свойством (6). В этом случае:

$$Z(h)=\sum_{t=1}^{2^m-1}(-1)^{M(h,n)\oplus M(h2,n)\oplus \Pi3(n)} \quad , \qquad (20)$$
$$\Pi3(n)=\Pi1(n)\oplus\Pi2(n),$$

где *П3(n)* – циклически сдвинутая последовательность *П1(n)*.

После преобразования из (20) получаем

$$Z(h2)=\sum_{t=1}^{2^m-1}(-1)^{\Pi3(n)}=-1,$$

$$Z(h\neq h2)=\sum_{t=1}^{2^m-1}(-1)^{M(h3,n)\oplus\Pi3(n)} \quad , \qquad (21)$$

где $M(h3,n)=M(h,n)\oplus M(h2,n).$

В силу квазиортогональности М-последовательностей взаимное влияние двух каналов передачи информации определяется взаимокорреляционными свойствами используемых последовательностей и может быть сделано пренебрежимо малым:

$$|Z(n\neq h2)|<<2^m-1 \, . \qquad (22)$$

3. Пример технической реализации

Способ приема и передачи сигналов для алфавитов большого объема может быть реализован приемопередающим устройством, укрупненная структурно-функциональная схема которого представлена на рис. 1.

Многие системы радиосвязи включают подсистемы формирования и обработки сигналов на промежуточных частотах, причем могут существовать дополнительные блоки частотных преобразований. Поэтому далее будет рассматриваться система, имеющая особенности реализации именно на промежуточных частотах.

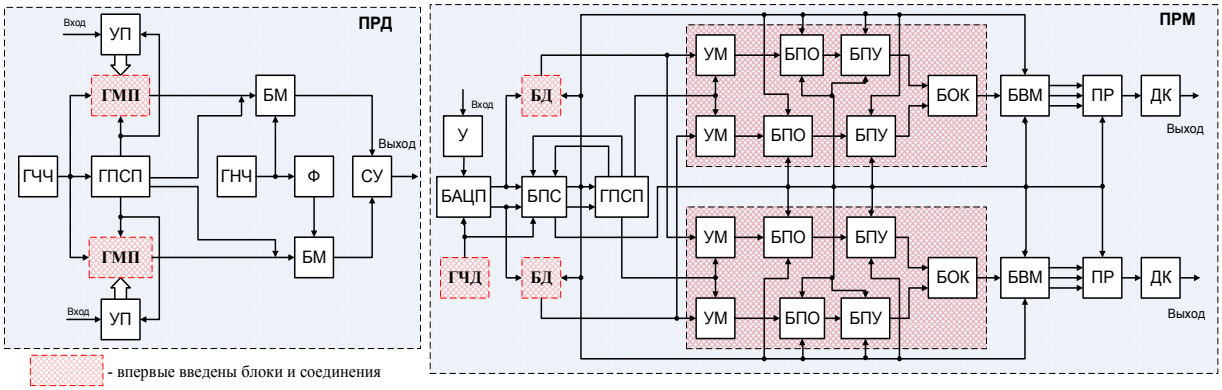


Рис. 1. Укрупненная структурно-функциональная схема приемопередающего устройства, где введены обозначения: БАЦП – блок аналого-цифрового преобразования; БД – блок децимации; БМ – блок модуляторов; БОК – блок объединения квадратур; БПО – блок перестановки отсчетов; БПС – блок поиска и синхронизации по задержке; БПУ – блок преобразования Уолша; ГМП – генератор М-последовательности; ГНЧ – генератор несущей частоты; ГПСП – генератор ПСП; ГЧД – генератор частоты дискретизации; ГЧЧ – генератор чиповой частоты; ДК – декодер; ПР – параллельно-последовательные преобразователи; ПРД – передающая часть; ПРМ – приемная часть; СУ – суммирующий усилитель; У – усилитель; УМ – умножители; УП – устройство последовательно-параллельного преобразования; Ф – фазовращатель.

Основное отличие от известных устройств заключается в том, что передающее устройство дополнено двумя генераторами М-последовательности, включенными в состав синфазного и квадратурного каналов; приемное устройство дополнено генератором частоты дискретизации, блоком децимации, а также идентичными подканалами (содержащими УМ, БПО, БПУ, БОК), включенными в состав синфазного и квадратурного каналов.

Блоки, выполняющие цифровую обработку, могут быть реализованы на базе сигнальных процессоров из серии однокристальных программируемых многопроцессорных "систем на кристалле" на основе IP-ядерной (IP-intellectual property) платформы "Мультикор", которые содержат процессорные RISC-ядра с архитектурой MIPS32, выполняющие функции центрального процессора системы CPU (Central Processing Unit) и высокопроизводительные ядра процессоров-акселераторов для ЦОС с плавающей/фиксированной точкой или аналогичных им по функциональности (например, многоядерный сигнальный микропроцессор 1892ВМ10). Блок формирования фазоманипулированных сигналов может быть реализован на базе микросхемы 1288ХК1 или аналогичных ей по функциональности [4].

4. Заключение

Предложенная приемопередающая система связи предоставляет возможность работы с сигналами, имеющими большой коэффициент расширения спектра (или большую базу). Имитационное моделирование показало, что использование представленной архитектуры требует существенно меньших объемов вычислений и позволяет уменьшить время обработки данных, а свободные вычислительные ресурсы можно использовать для повышения интеллектуальности системы за счет оперативной реконфигурации алгоритмов управления.

Данное решение целесообразно использовать в помехозащищенных системах связи, имеющих в составе программируемые устройства и элементы цифровой обработки (процессоры, ПЛИС, микроконтроллеры), что предоставляет расширенную функциональность и обеспечивает повышение эффективности функционирования.

Литература

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Нахмансон Г.С. // М.: Радио и связь, 2003. 640 с.
3. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 992 с.
4. Малышева И.Н., Плахотнюк Ю.А., Погожев В.В. Управление прямым цифровым синтезом фазоманипулированных сигналов в УКВ диапазоне. // Тезисы XXIV международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 17-19 апреля 2018 г. Т.5. – С.284-288.

References

1. Varakin L.E. Communication system with noise signals. M.: Radio and Communications, 1985. 384 p.
2. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Muhin N.P., Nahmanson G.S. ECM-resistance of communication system with carrier modulation by pseudorandom sequence. M.: Radio and Communications, 2003. 640 p.
3. Ifeachor E.C., Jervis B.W. Digital signal processing. A practical approach. Second edition. M.: Publishing House «Williams», 2004. 992 c.
4. Malysheva I.N., Plahotnuk Yu.A., Pogozhev V.V. Control of direct digital synthesis of signals with phase manipulation in VHF range. Theses of XXIV international scientific and technical conference «the Radiolocation, Navigation, Communication», Voronezh, 17-19 April 2018, Vol. 5. Pp. 284-288.

СЛОЖЕНИЕ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ПОМОЩЬЮ СУММАТОРА КОНСТРУКЦИИ УИЛКИНСОНА

А. М. Бобрешов[1], А. Е. Елфимов[1], Г. К. Усков[1], А. С. Жабин[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»), г. Воронеж, Россия

Аннотация. В работе исследуется возможность увеличения амплитуды сверхкоротких импульсов и формирования биполярного импульса методом сложения сигналов, формируемых несколькими генераторами с использованием кольцевого сумматора конструкции Уилконсона.

Ключевые слова: СШП сигналы, сверхкороткие импульсы, СВЧ, сложение импульсов, биполярный импульс, моноцикл Гаусса.

ADDITION OF ULTRA-SHORT PULSES BY WILKINSON POWER COMBINER

A. M. Bobreshov[1], A. E. Elfinov[1], G. K. Uskov[1], A. S. Zhabin[1]

[1]Voronezh State University (VSU), Voronezh, Russia

Abstract. The possibility of increasing the amplitude of ultra-short pulses and the formation of a bipolar pulse by adding signals from several generators in the Wilkinson ring power combiner has been investigated.

Keywords: UWB signals, ultrashort pulses, microwave, pulse addition, bipolar pulse, Gauss monocycle.

1. Введение

Импульсная радиолокация находит применение в самых различных областях науки и техники, например, в системах связи для IoT (Internet of Things) и локации объектов через преграды [1]. В последнее время для решения различных задач было предложено использовать последовательности сверхкоротких импульсов и сигналы субнаносекундной длительности сложной формы [2]. Для практической реализации результатов данных исследований необходимо формировать такие сигналы. Кроме этого, дальность действия импульсной радиосистемы напрямую зависит от мощности излучаемого сигнала. Исходя из этого, возникает задача повышения амплитуды формируемого импульса.

Одним из путей решения данных задач является использование сумматоров сигналов. Несмотря на кажущуюся простоту, проектирование сумматоров для сверхкоротких импульсов является сложной задачей, так как ширина спектра используемых сигналов имеет порядок нескольких гигагерц. При прямом подключении нескольких генераторов сверхкоротких импульсов (СКИ), реализованных по схеме работы [3], к общей нагрузке имеет место их влияние на работу друг друга [6] и, искажение формируемого импульса. В конечном итоге увеличение амплитуды не происходит, что было показано как экспериментально, так и при помощи моделирования.

В настоящей работе представлен сумматор на основе кольцевой конструкции Уилкинсона [4, 5]. Экспериментально удалось добиться увеличения амплитуды формируемого импульса при помощи сложения СКИ, сформированных несколькими генераторами [1]. Кроме того, подавая на входы сумматора сверхкороткие импульсы положительной и отрицательной полярности с задержкой во временной области относительно друг друга, на выходе был получен биполярный импульсный сигнал.

2. Модель сумматора

Схематичный внешний вид кольцевого сумматора представлен на рисунке 1. Он обладает двумя входами (2 и 3 в обозначениях рисунка 1) и одним выходом (1 в обозначениях рисунка 1). Для развязки между входами устройства используется балластный резистор *R*. Рабочие частоты сумматора определяются геометрическими размерами полосков в кольце и конкретными значениями входных и выходного сопротивлений.

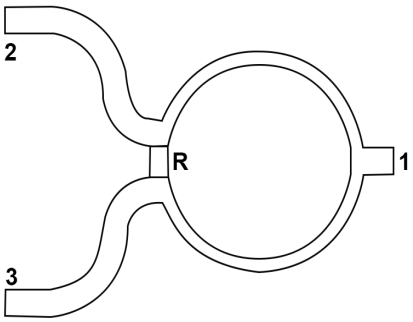


Рис. 1. Кольцевой сумматор

Для расширения полосы сумматора была выполнена оптимизация его геометрических размеров (радиус кольца, ширина и длина полосков). Для импульса с длительность 0,5 нс, спектр по уровню -20 дБ сосредоточен в полосе частот от 0,5 до 5 ГГц. Исходя из этого при оптимизации были определены параметры кольцевого сумматора для которых S_{12} принадлежало от -3 дБ до -4 дБ, S_{23} и S_{22} было меньше -10 дБ в полосе от 0,5 ГГц до 5 ГГц. Рассчитанные S-параметры кольцевого сумматора, представлены на рисунке 2.

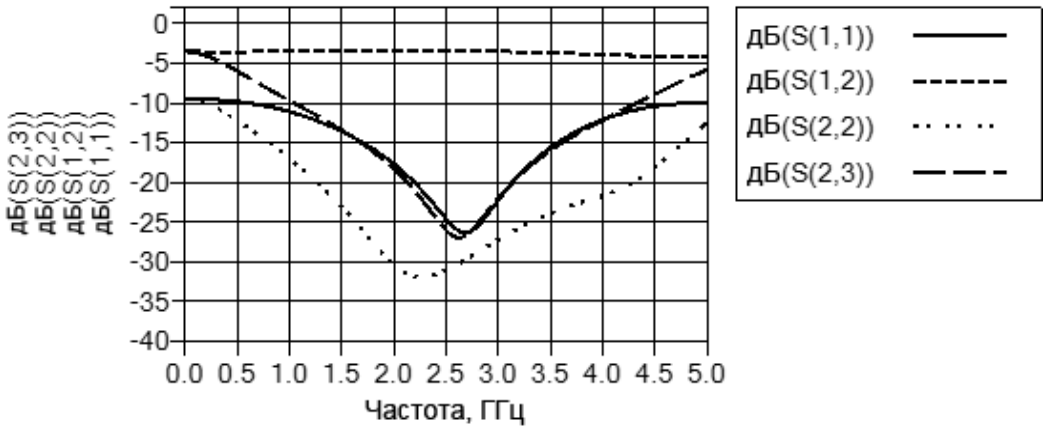


Рис. 2. S-параметры кольцевого сумматора

3. Результаты эксперимента

Для подтверждения результатов моделирования было проведено экспериментальное исследование работы кольцевого сумматора. Печатная плата сумматора изготовлена из материала FR4 толщиной 0,8 мм (рисунок 3). Ширина полосков кольца сумматора составила 0,7 мм при радиусе 5 мм.

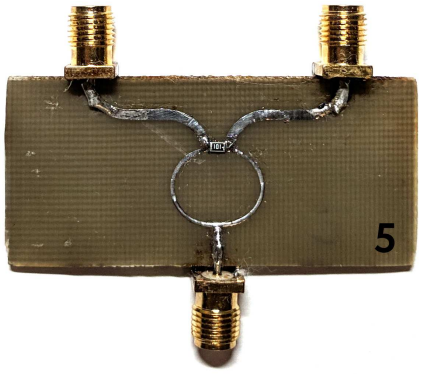


Рис. 3. Реализация сумматора конструкции Уилкоясона на микрополосках.

Входы сумматора подключались к выходам генераторов СКИ [3]. Напряжение на выходе сумматора регистрировалось стробоскопическим осциллографом DCA-X 86100D с входным сопротивлением 50 Ом и полосой пропускания 20 ГГц. Осциллограммы сигналов на входах и выходе сумматора представлены на рисунке 4. Амплитуда импульса, подаваемого с генераторов на оба входа сумматора, равнялась 31,3 В. Длительность регистрируемого импульсного сигнала определялась относительно уровня 0,5 амплитуды и составила 300 пс. В результате, при использовании сумматора удалось увеличить амплитуду формируемого сигнала до 37 В (рисунок 4). При этом форма и длительность импульса остались без изменения. Таким образом, складывая сигналы с выходов двух генераторов возможно сформировать СКИ с амплитудой на 18,2% больше, по сравнению с единичным импульсом. При прямом подключении выходов генераторов к общей нагрузке, длительность СКИ увеличивается и отсутствует рост амплитуды.

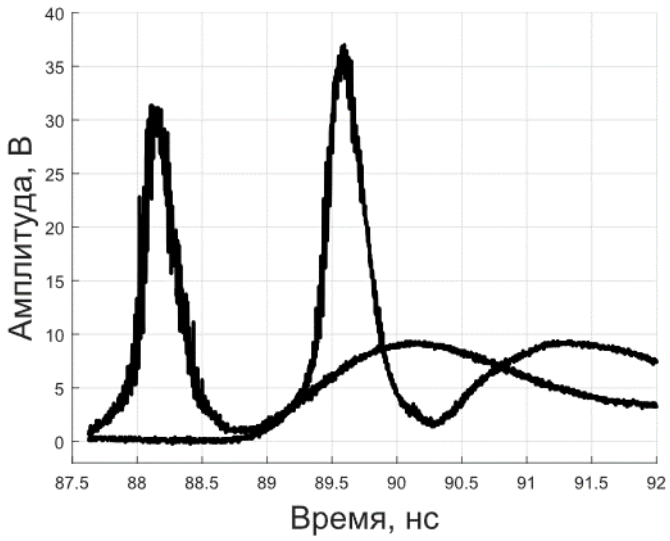


Рис. 4. Осциллограммы импульсного сигнала на входе (справа) и выходе (слева) сумматора.

4. Формирование биполярного импульса

При подключении ко входам сумматора импульсов разной полярности и смещенных во времени относительно друг друга возможно формирование биполярного импульса. Использованные для этого в эксперименте СКИ представлены на рисунке 4. Их амплитуды составляли ±30 В при длительности по полувысоте (как положительного, так и отрицательного) 300 пс. В результате суммирования СКИ различной полярности на выходе формировался биполярный импульс (рисунок 5) размах которого составил 33,1 В.

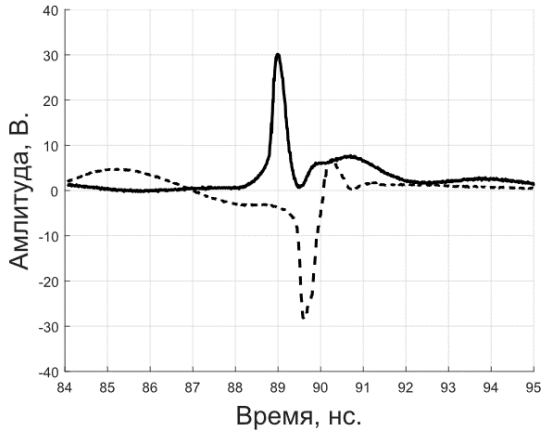


Рис. 4. Импульсы на входе кольцевого сумматора.

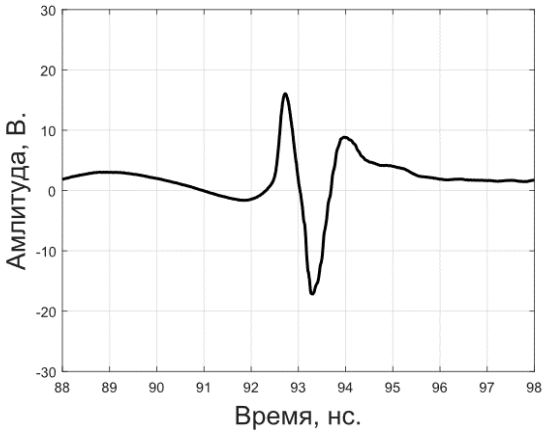


Рис. 5. Биполярный импульс, полученный на выходе сумматора.

5. Заключение

В работе исследована возможность увеличения амплитуды сверхкоротких импульсов и формирования биполярного импульса методом сложения сигналов, формируемых несколькими генераторами. С использованием разработанного кольцевого сумматора конструкции Уилконсона и двух идентичных формирователей СКИ удалось повысить амплитуду формируемого сигнала в 1,18 раза. Длительность и форма импульсов при этом соответствуют сигналу, формируемому одиночным генератором. Также в работе продемонстрирована возможность формирования биполярных импульсов методом суммирования сигналов.

6. Благодарности

Работа выполнена в рамках грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-6872.2018.9).

Литература

1. Дмитриев В. Технология передачи информации с использованием сверхширокополосных сигналов (UWB). Часть 2. / В. Дмитриев // Компоненты и технологии – 2004. – №1. – С. 1-4.

2. Cam Nguyen, Meng Miao, Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers. Springer International Publishing AG, 2017. — 118 p.
3. A. M. Bobreshov, Novel Tunable Ultrashort Pulse Generator With High Amplitude and Low Ringing Level / A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, V. A. Stepkin, G. K. Uskov // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – Nov. 2017. Vol 27. – P. 1013–1015.
4. Молорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. Москва : Советское радио, 1972. – 232 с.
5. Веселов Г. И., Егоров Е. Н., Алехин Ю. Н., Воронина Г. Г., Романюк В. А., Разевиг В. Д., Чаплин А. Ф., Шеремет М. В., Микроэлектронные устройства СВЧ. Москва : Высшая школа, 1988. – 280 с.
6. Protiva P. High power monocycle pulse generator for through-the-wall radar transmitter / Pavel Protiva, Jan Mrkvica, Jan Machác // Asia Pacific Microwave Conference. - 7-10 Dec. 2009.

REFERENCES

1. Dmitriev V. Technology of information transfer using ultra-wideband signals (UWB). Part 2. / V. Dmitriev // Components and technologies - 2004. - №1. - p. 1-4.Ivanov, A. B., Peter, B. V., Estimation of signals parameters against the background noise. M.: Radio, 1986. – 264 p.
2. Cam Nguyen, Meng Miao, Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers. Springer International Publishing AG, 2017. — 118 p.
3. A. M. Bobreshov, Novel Tunable Ultrashort Pulse Generator With High Amplitude and Low Ringing Level / A. M. Bobreshov, A. S. Zhabin, V. A. Stepkin, G. K. Uskov // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – Nov. 2017. Vol 27. – P. 1013–1015.
4. Moloratsky L. G., Yavich L. R. Design and calculation of microwave elements on strip lines. Moscow: Soviet Radio, 1972. - 232 p.
5. Veselov G. I., Egorov E. N., Alekhin Yu. N., Voronina G. G., Romanyuk V. A., Razevig V. D., Chaplin A. F., Sheremet M. V., Microelectronic devices microwave. Moscow: High School, 1988. - 280 p.
6. Protiva P. High power monocycle pulse generator for through-the-wall radar transmitter / Pavel Protiva, Jan Mrkvica, Jan Machác // Asia Pacific Microwave Conference. - 7-10 Dec. 2009.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СТАНЦИЙ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н.Н. Плотников[1], А.В. Войнов[1]

[1]310 военное представительство Министерства обороны Российской Федерации (310 ВП МО РФ), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Предлагается сравнительный анализ отечественных и зарубежных моделей малогабаритных станций тропосферной связи. Перспективы развития.

Ключевые слова: тропосферная связь, станции тропосферной связи, пропускная способность.

COMPARATIVE ANALYSIS AND TRENDS OF DEVELOPMENT OF STATIONARY STATIONS OF TROPOSPHERIC COMMUNICATION OF DOMESTIC AND FOREIGN PRODUCTION

N. N. Plotnikov[1], A. V. Voynov[1]

[1]310 Military representative office of Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. A comparative analysis of domestic and foreign models of tropospheric communication stations. Perspectives of development.

Keywords: tropospheric communication, throughput, tropospheric communication stations.

1. Введение

Системы тропосферной связи появились в 1950-х годах в период интенсивной стратегической конкуренции между странами НАТО и странами, подписавшими Варшавский пакт, до появления спутниковой связи. Такие системы широко использовались США и Советским Союзом, и в меньшей степени союзниками каждой из сторон, для обеспечения каналов связи, как правило, в малонаселенных районах или при формировании линий раннего оповещения. Советские войска развернули обширную сеть радиорелейных станций тропосферной связи через северную Сибирь и Дальний Восток, в то время как США развернули подобную сеть вдоль линий раннего радиолокационного обнаружения на территории Канады, а также через Аляску и Алеутские острова. Впоследствии эти стационарные сети были дополнены мобильными тактическими системами, предназначенными для обеспечения цифровой магистральной связи для элементов маневрирования сухопутных войск.

2. Анализ отечественных и зарубежных стационарных станций тропосферной связи

Первая в мире система связи, использующая тропосферное распространение УКВ появилась на территории Канады, как средство обеспечения надежной связью сети радиолокационных станций. "PinetreeLine" - линия радиолокационных станций, была построена в начале 1950-х годов. Она предназначалась для предотвращения внезапного вторжения Советской авиации. Станции этой линии финансировались и обслуживались

Военно-Воздушными Силами США. Станции " PinetreeLine " располагались на территории Канады на правах аренды.

В конце 1953 года, при поддержке Северо-Восточного Воздушного командования (в настоящее время не существует в связи с расформированием) была установлена опытная линия на территории Ньюфаундленда (Канада). Основной задачей испытаний опытной линии была практическая проверка возможности нового способа организации связи работать на УКВ за пределами прямой видимости. Для экспериментальной апробации такой концепции тропосферная связь была установлена без ретрансляторов между Сент-Антони и Гандером на расстояние более 240 километров. Передача велась на частоте 500 МГц при мощности 500 Ватт и на частоте 4 ГГц при мощности 10 Ватт. Высокие результаты были получены на нижней частоте, стоит отметить, что и на частоте 4 ГГц сигнал тоже был четкий. Результаты испытаний опытной линии были очень обнадеживающими, и американскими специалистами было принято решение ввести в эксплуатацию новое оборудование до окончания всех запланированных испытаний. Результаты испытаний носили принципиальный характер в условиях «холодной войны», основным значением которых стало появление надежной связи не подверженной возмущениям в ионосфере. Для увеличения надежности, американскими специалистами были заложены технические требования к новой системе значительно выше, чем полученные при испытаниях результаты.

В 1955 начал формироваться первый радиорелейный дивизион, основной задачей которого была централизованная эксплуатация новой радиорелейной системы как единого целого (вне зависимости от использования отдельных каналов).

При помощи аппаратуры уплотнения связь организовывалась по 36 телефонным каналам (200 - 3400 Гц), спектр которых занимал 12 - 160 КГц и состоял из трёх групп по 12 каналов в каждой. Первая группа 12 - 60 КГц, вторая группа 60 - 108 КГц и третья группа - 108 - 160 КГц. Для каждого телефонного канала существовала возможность уплотнения аппаратурой тонального телеграфирования (12 или 24 канала). Также для связи между станциями использовались три служебных канала (300-2800 Гц). Служебные каналы занимали спектр от 300 до 9500 Гц. [1]

В ходе «гонки» ядерного вооружения возникла острая необходимость в формирования линий раннего обнаружения баллистических ракет с целью своевременного предупреждения ракетного нападения. Так в Англии была сформирована (Fylingdales, NorthYorkMoorsNationalPark) для поддержания связи в которой использовалась Северо-Атлантическая Радио Система NARS (NorthAtlanticRadioSystem). США также имели свою систему раннего обнаружения BMEWS (BallisticMissileEarlyWarningSystem), которая начала функционировать с 1959 года, а осенью 1960 года встала на боевое дежурство. BMEWS состояла из трёх станций, которые дислоцировались на Аляске, в Гренландии (на базе ВВС США) и в Англии. Центр управления, в который поступала информация с этих станций, располагался в штате Колорадо. [2]

Освоение линий тропосферной связи в СССР было продиктовано географическими особенностями, связано с необходимостью обеспечения связью

районов Крайнего Севера и удалённых районов Сибири и началось в 1956 году. Имеющиеся на то время радиорелейные станции прямой видимости не могли обеспечить выполнение этой задачи. В ходе проведения ряда научно-исследовательских работ и натурных экспериментов Научно-исследовательский институт радио (НИИР) предложил решить вопрос организации связи в районах Крайнего Севера и Сибири путём создания линии тропосферной связи с интервалами между станциями порядка 250-300 км. Данная концепция организации связи была поддержана Министерством связи, что дало начало разработке тропосферной системы связи ТР-60 под шифром «Горизонт». В техническом задании на разработку ТР-60 одними из требований к системе были – обеспечение бесперебойной связи между двумя станциями на интервале 200-300 км в рабочем диапазоне частот 700... 1000 МГц. Параллельно с разработкой ТР-60 для испытаний с целью определения полноты и правильности выбранных технических решений началось строительство опытного участка протяженностью 300 км между городами Талдом и Вологда. Для формирования опытного участка были разработаны экспериментальные образцы оборудования «Горизонт». Именно аппаратура ТР-60 по окончанию разработки легла в основу построения системы стратегической тропосферной радиорелейной связи «Север» строительство которой началось в 1962 году, а в 1981 году ею была укомплектована сверхдальняя линия тропосферной связи между СССР и Индией, длина которой составила 700 км. [3]

По результатам испытаний опытного участка конструкторами был сделан вывод, что система связи ТР-60 требует доработки в части уменьшения энергозатрат при её эксплуатации, данное событие стало началом разработки улучшенной аппаратуры «Горизонт-М», испытания которой начались в 1961 году. По завершению испытаний аппаратура стала выпускаться серийно в 1963 году. Аппаратура «Горизонт-М» была 60 канальной и являлась тропосферной радиорелейной линией связи нового поколения. Передача сигналов осуществлялась при помощи частотной модуляции с применением четырёхкратного разнесённого приёма (по частоте и по пространству). К моменту ввода в эксплуатацию аппаратура «Горизонт-М» обладала следующими техническими характеристиками: максимальная длина участка связи составляла 300 км, диапазон рабочих частот от 821...853 МГц и 969...997,6 МГц, число каналов – 60, организация связи осуществлялась по 2-м служебным каналам при наличии 2-х контрольных, мощность передатчика составляла 3 кВт, но на некоторых интервалах использовались передатчики с мощностью до 5 кВт.

Оборудование «Горизонт-М» входило в состав оконечных, промежуточных и узловых станций тропосферной радиорелейной линии «Север». ТРРЛ «Север» состояла из семи тропосферных радиорелейных линий, укомплектованных 46 станциями. Общая протяжённость сети тропосферных линий связи составляла 13325,7 км.

В 1967 году станции ТРРЛ «Север» были переданы под контроль ВС СССР. С целью обеспечения функционирования станций формировались эксплуатационные воинские части. К этому времени тропосферная радиорелейная линия обеспечивала стойкой бесперебойной связью районы Крайнего Севера и удалённые районы Сибири, что территориально составляло 60% площади страны, а максимальное расстояние

между станциями увеличилось до 450 км. Расстояние в 450 км было достигнуто при помощи доработок аппаратуры ТР-60 по результатам эксплуатации. Непрерывное сопровождение аппаратуры «Горизонт-М» разработчиками в ходе эксплуатации, приводило к постоянной её модернизации. Проблема борьбы с интерференционными замираниями была решена путём разработки и внедрения системы «Аккорд». Данная система обеспечивала использование, как разнесённого приёма, так и автокорреляционный приём составных сигналов. А показатели надёжности к 1977 году составляли 99,99%, что является очень высоким результатом. [4]

Помимо США и СССР, станции тропосферной связи, активно использовались и другими странами. Представителем европейской тропосферной системы передачи данных ACE High была французская станция тропосферной связи Пьер-сюр-От. Станция выступала в роли ретранслятора между станциями Lachensu Монт-Ути имела следующие тактико-технические характеристики: дальность передачи составляла 300 км (максимально возможная 450 км), в состав станции входило 4 передатчика мощностью по 10 кВт и 16 приемников. При передаче сигнала осуществлялось пространственное кодирование сигнала и разнесение по частотам. Станция тропосферной связи Пьер-сюр-От была одной из 82 станций, которые использовались в интересах НАТО в составе системы ACE High вплоть до 1988 года, пока систему ACE High не начали поэтапно выводить из эксплуатации. [5]

Своё применение тропосферная связь нашла и в вооружённых силах Японии. Она служит основой для передачи информации в специальной автоматной системе основная задача которой мониторинг воздушной обстановки в интересах ПВО Японии. Станции тропосферной связи обеспечивают связь между радиолокационными постами ПВО, оперативными центрами секторов ПВО и самим центром управления. На вооружении стоят два типа станций тропосферной связи: стационарные J/FRQ-503 и мобильные J/TRQ-502 и -504, функционирующие в диапазоне рабочих частот е в 2,3-2,4 ГГц. Связь осуществляется на расстоянии 150-250 км, со скоростью передачи данных 4,8 кбит/с.[6]

Сравнение средних значений тактико-технических характеристик станций тропосферной связи, которые входили в состав линий GapFiller, NARS, PoleVault, BMEWS, ACE High, «Север» и станции J/FRQ-503. представлено в таблице 1.

Таблица 1. Средние значения технических характеристик станций тропосферной связи в линиях GapFiller, NARS, PoleVault, BMEWS, ACE High, «Север» и станции J/FRQ-503

	GapFiller	NARS	PoleVault	Север	BMEWS	ACE High	J/FRQ-503
Частота (средняя) МГц	900	900	650	850	900	900	2400
Расстояние между станциями без ретранслятора (среднее) Км	96	270	290	300	270	300	200
Излучаемая мощность (средняя) КВт	1	25	10	4	25	10	*

	GapFiller	NARS	PoleVault	Север	BMEWS	ACE High	J/FRQ-503
Размер антенны (средний) м	9	18	18	30	18	18	*
Скорость передачи информации (средняя)	5,6 Кб/сек	9,6 Кб/сек	8,2 Кб/сек	60 ТФ	9,6 Кб/сек	200 ТФ	4,8 Кб/сек

3. Заключение

Следует отметить, что все станции тропосферной связи, входившие в состав линий GapFiller, NARS, PoleVault, BMEWS, ACE High и «Север» были стационарными и исключали возможность их перемещения без демонтажа оборудования, входящего в их состав. Из таблицы видно, что пропускная способность станций была относительно невелика, но позволяла решать стратегические и тактические задачи по предназначению относительно временного промежутка их эксплуатации и специфики решаемых задач.

Литература

1. Trrlsever.org, https://www.trrlsever.org/SEVER/HISTOR/Pole%20Vault/Pole%20Vault.html, 13.02.2019 г.
2. Кукк К.И., "Из истории становления отечественной военной радиорелейной и тропосферной связи (часть 2)*"// Журнал «Электросвязь: история и современность» 2008 г. № 2, 2-6 с.
3. Украинцев Ю. Д., Цветов М. А., История связи и перспективы развития телекоммуникаций: учебное пособие / Ульяновск :УлГТУ, 2009. - 128 с.
4. http://r91353ba.beget.tech/gorizont.html, 13.02.2019 г.
5. Википедия, https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%8C%D0%B5%D1%80-%D1%81%D1%8E%D1%80-%D0%9E%D1%82, 13.02.2019 г.
6. Fact Military, http://factmil.com/publ/strana/japonija/sistema_svjazi_vooruzhjonnykh_sil_japonii_2017/56-1-0-1134, 13.02.2019 г.

References

1. Trrlsever.org, https://www.trrlsever.org/SEVER/HISTOR/Pole%20Vault/Pole%20Vault.html, 13.02.2019.
2. Kukk K.I., "From the history of the development of domestic military radio relay and tropospheric communication (part 2)*"// Journal "Telecommunications: history and modernity", 2008, No/ 2-Pp/2-6/
3. Ukraincev U.D., Cvetov M.A., Communication history and telecommunication development prospects: study guide / Ulyanovsk: UlGTU, 2009. - Pp.128.
4. http://r91353ba.beget.tech/gorizont.html, 13.02.2019.
5. Wikipedia, https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%8C%D0%B5%D1%80-%D1%81%D1%8E%D1%80-%D0%9E%D1%82, 13.02.2019.
6. Fact Military, http://factmil.com/publ/strana/japonija/sistema_svjazi_vooruzhjonnykh_sil_japonii_2017/56-1-0-1134, 13.02.2019.

ТЕХНИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И МОНИТОРИНГА РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. С. Багдасарян[1], В. И. Николаев[2]

[1]Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН
[2]АО «Концерн «Созвездие»

Аннотация. Исследована возможность создания конструктивно-технологических решений радиочастотных меток (РЧМ) на поверхностны акустических волнах с невзаимными СВЧ устройствами. Разработаны технологические основы получения нанокомпозитов на основе решетчатых упаковок микросфер кремнезема для создания невзаимных устройств в составе РЧМ на ПАВ нового поколения. Проведены фундаментальные исследования, позволяющие в значительной степени улучшить характеристики систем радиочастотной идентификации, в т.ч. по дальности считывания на 1-2 порядка, и существенно расширить их функциональность и области применения.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны (ПАВ), радиочастотная идентификация (РЧИ), радиочастотная метка (РЧМ), мониторинг, датчик на ПАВ

THE EQUIPMENT OF SURFACEL ACOUSTIC WAVES IN THE MODERN SYSTEMS OF RADIO-FREQUENCY IDENTIFICATION AND MONITORING OF VARIOUS OBJECTS

A. S. Bagdasaryan[1], V.I. Nikolaev[2]

[1]Kotel'nikov institute of radio engineering and electronics of RAS
[2]JSC “Concern “Sozvezdie”

Abstract. The possibility of creation of constructive technology solutions of SAW tags with non-mutual microwave ovens devices is investigated. Technological bases of receiving nanocomposites on the basis of trellised packings of microspheres of silicon dioxide are developed for creation of non-mutual devices as a part of SAW tags of new generation. The basic researches allowing to improve substantially characteristics of RFID systems including on reading range on 1-2 orders are conducted, and it is essential to expand their functionality and scopes.

Keywords: surface acoustic waves (SAW), radio frequency identification (RFID), tag, monitoring, the sensor on SAW

1. Введение

В последнее время наблюдается устойчивый интерес к технологиям радиочастотной идентификации (РЧИ), среди которых особое внимание обращает на себя стремительно развивающиеся технологии поверхностных акустических волн (ПАВ) и системы РЧИ на их основе [1]. Аналитический обзор и патентные исследования технологии построения радиочастотных меток (РЧМ) на ПАВ и РЧИ-систем на их основе проведенные нами раннее [2], показали, что использование радиокомпонентов на ПАВ позволяют в режиме реального времени получать информацию, необходимую для выбора наилучшего решения логистических задач управления в различных сферах деятельности человека. Для расчета РЧМ, как правило, используется высокоточный метод конечных элементов (МКЭ) [3-5].

Вместе с тем, более широкое использование технологии радиочастотной идентификации сдерживается малым радиусом действия систем РЧИ, нерешенностью проблемы коллизии при нахождении нескольких РЧМ в зоне считывателя, а также сложностью изготовления и отсутствия готовых технологических решений по снижению себестоимости и повышению процента выхода годных РЧМ.

Для решения поставленных задач, в первом приближении, очевиден выбор оптимальных вариантов компонент системы РЧИ: антенн приемопередатчика и РЧМ на ПАВ с учетом ограничений на выходную мощность передатчика, ориентации РЧМ на ПАВ и ограничений на массогабаритные размеры антенн. При этом принципиальным ограничением увеличения дальности считывания являются конструктивно-технологические решения построения РЧМ на ПАВ, широко используемые в настоящее время: кодовая последовательность формируется только за счет отражения ПАВ от статических неоднородностей, в формируемых в процессе их изготовления. Такие РЧМ имеют вносимое затухание ПАВ 50 и более дБ.

В настоящей работе исследуется возможность создания, не имеющих аналогов, конструктивно-технологических решений РЧМ с невзаимными СВЧ устройствами, в которых кодовая последовательность метки формируется за счет приема ПАВ (и преобразования по мере распространения в линии задержки поверхностных акустических волн в электромагнитный сигнал вследствие пьзоэффекта). Разрабатываются технологические основы получения нанокомпозитов на основе решетчатых упаковок микросфер кремнезема для создания невзаимных устройств в составе РЧМ на ПАВ нового поколения [8-17].

Очевидно также, что одним из важнейших условий повышения дальности действия систем РЧИ является увеличение мощности сигнала, опрашивающего пассивную радиочастотную метку. Вместе с тем, в силу конструктивно-технологических особенностей устройств на ПАВ имеется ряд проблем, связанных с ограничением рабочей мощности, в первую очередь, на высоких частотах.

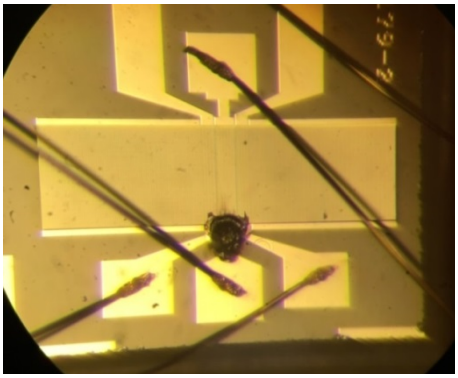


Рис.1. Разрушение структуры ВШП после воздействия радиочастотного сигнала с уровнем мощности 0,2 Вт

Широко используемые конструктивно-технологические решения ПАВ-устройств с малым вносимым затуханием ограничивают допустимый уровень входного РЧ сигнала мощностью 0,1 Вт, что связано с эффектом миграции атомов алюминия между электродами преобразователя при больших уровнях мощности, приводящим к его пробою [6], рисунке 1.

Это обстоятельство носит фундаментальный характер и существенно ограничивает возможности применения устройств на ПАВ в современной радиоэлектронной аппаратуре, более всего в приемопередающих трактах, что, как следствие, подтверждает чрезвычайно высокую актуальность и перспективность работ, направленных на возможность увеличения мощности опросного сигнала [7].

Проведенные фундаментальные исследования [1,6,7,10-39] могут позволить в значительной степени решить сформулированные выше проблемы (улучшить характеристики, в т.ч. по дальности считывания на 1-2 порядка) и существенно расширить функциональность и области применения систем РЧИ.

2. Технологические основы получения нанокомпозитов на основе решетчатых упаковок микросфер кремнезема для невзаимных устройств в составе РЧМ нового поколения

Показаны условия формирования нанокомпозитов на основе опаловых матриц, в межшаровых пустотах которых синтезированы наночастицы магнитоупорядоченных мультиферроидных материалов – фосфатов (LiNiPO4, LiCoPO4) и ванадатов (GdVO4 и DyVO4). Изучены особенности частотных зависимостей действительной и мнимой компонент диэлектрической и магнитной проницаемости в диапазоне 1 МГц – 3 ГГц. Исследования позволили установить взаимосвязь между микроволновыми характеристиками и фазовым составом нанокомпозитов, а также получить данные, необходимые для применения подобных материалов в качестве невзаимных устройств на СВЧ [8]. Рассмотрены особенности получения магнитных нанокомпозитов на основе решетчатой упаковки SiO2 нано размерные (опаловые матрицы) с кластерами мультиферроических материалов (Li-Zn, Bi, Fe ,Dy, Gd и Yb титанаты) в их интерстициальных полостях. Для создания магнитных нанокомпозитов использованы опаловые матрицы с нано размерностью SiO2 ~ 260 Нм в диаметре. Состав нанокомпозитов также изучали с помощью рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Представлены полученные результаты измерения частотных зависимостей диэлектрической проницаемости наноструктур. Петли гистерезиса были рассмотрены для образцов, полученных в диапазоне от 2- 400 K [9]. Рассмотрена связь условий формирования со строением и характеристиками нанокомпозитов на основе опаловых матриц, содержащих в полостях кристаллиты Co, Ni3Fe и Ni2Fe3. Результаты настоящей работы создают предпосылки для разработки управляемых магнитными полями ВЧ-устройств, работа которых основана на использовании микроволнового магнитного резонанса в магнитных нанокомпозитах на основе опаловых матриц [10] .Рассмотрены особенности формирования нанокомпозитов на основе решетчатых упаковок наношаров

SiO_2 (опаловых матриц), содержащих в межшаровых полостях кластеры мультиферроиков (титанатов и манганитов переходных элементов). Для формирования нанокомпозитов использовали образцы опаловых матриц с размерами монодоменных областей >0,1 мм3, диаметр наносфер SiO_2 составлял ~260 нм. Получены нанокомпозиты объемом >1 см3 с заполнением 10…40 % объема полостей кристаллитами мультиферроиков. Изучены состав и строение нанокомпозитов с использованием электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Показана зависимость состава синтезированных веществ от условий их получения. Представлены результаты измерений частотных зависимостей магнитных и диэлектрических характеристик полученных наноструктур. Проведены исследования петель гистерезиса для полученных образцов [11]. Рассмотрены условия формирования 3D-нанокомпозитов на основе плотнейшей упаковки шаров SiO_2 диаметром ~250 нм (опаловых матриц), содержащих в межшаровых пустотах кристаллиты Ni_3Fe, Ni_2Fe_3, Co, Co+Ni и Fe. Показана зависимость состава синтезированных металлов от условий их получения. Проанализировано влияние состава и строения металлов, синтезированных в пустотах опаловых матриц (ОМ), на частотные характеристики диэлектрических и магнитных свойств нанокомпозитов [12].

3. Радиочастотные компоненты на ПАВ с невзаимными СВЧ устройствами.

В настоящем разделе описаны результаты, направленные на поиск, разработку и исследования, не имеющих аналогов, конструктивно-технологических решений РЧМ с невзаимными СВЧ устройствами, в которых кодовая последовательность метки формируется только за счет приема ПАВ (преобразования по мере распространения в линии задержки поверхностных акустических волн в электромагнитный сигнал вследствие пьзоэффекта, см. рис.2 [13].

На рисунке 2 в состав РЧМ на ПАВ включено невзаимное устройство в виде Y-циркулятора, исключающее возможность передачи в антенну многократно регенерируемых импульсных откликов от парциальных ВШП-2. Использование линии задержки на ПАВ позволяет исключить интерференцию отраженных электромагнитных сигналов и организовать последовательную бесколлизионную процедуру опроса. Эти свойства открывают возможность проведения теоретических и экспериментальных исследований рассматриваемой проблемы и практической реализации бесколлизионных методов радиочастотной идентификации (рисунок 3). По известным причинам, связанным с патентованием ряда конкретных конструкций и способов их реализации, мы ограничились только показом способа уменьшения размерности задачи коллизии за счет канализация РМ, см. рисунок 4.

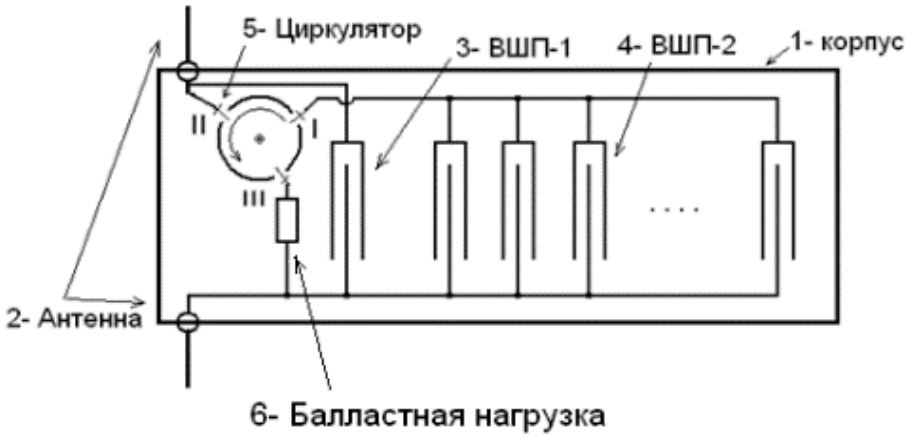


Рис.2. Базовая конструкция РЧМ на ПАВ генераторного типа с Y-циркулятором

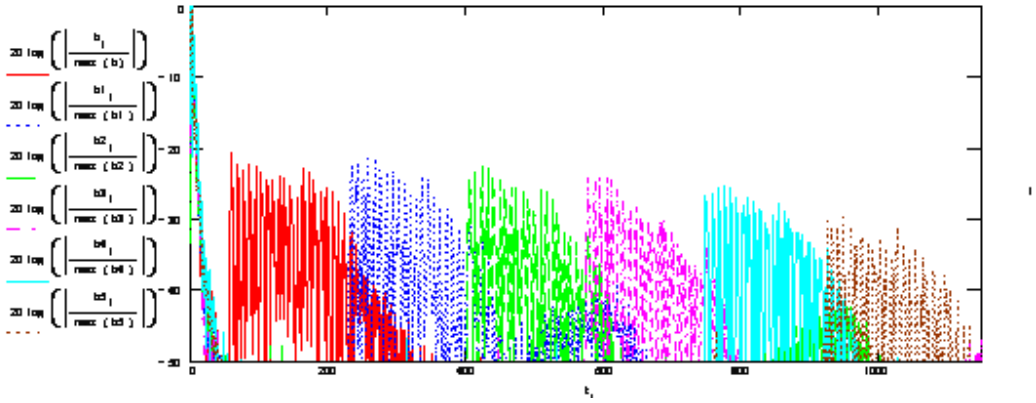


Рис.3. Последовательность отраженных импульсов от 6 последовательно расположенными РЧМ с 20 отражателями ПАВ. По оси X время $t=8t_i$ нс, а по оси Y затухание В=показания на оси +25, дБ. Толщина напыления 1000 ангстрем.

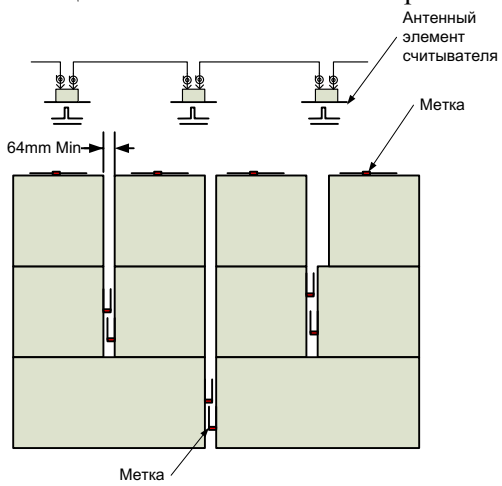


Рис.4. Способ уменьшения размерности задачи коллизии

Таким образом, в качестве основы бесколлизионной системы РЧИ использованы РК на ПАВ. Микроминиатюрные высокостабильные устройства на ПАВ имеют ряд замечательных особенностей: в них сочетаются, как известные преимущества (высокие стабильность, технологичность и воспроизводимость, малые габариты), так и предложенная нами уникальная возможность осуществления последовательной процедуры опроса большой аудитории меток, одновременно находящихся в поле

опрашивающего считывающего устройства [1, 14-18]. В целях повышения точностных характеристик идентификации определена структура запросных сигналов [17].

4. Проектирование РЧМ на ПАВ.

В качестве альтернативы высокоточному, но громоздкому методу конечных элементов (МКЭ) разработана универсальная одномерная модель, обеспечивающая исчерпывающее описание динамики плоских волн в произвольных распределенных системах (РС) - на основе ПАВ - аналитических соотношений с привлечением ключевых феноменологических параметров (КФП), имеющих ясный физический смысл и допускающих экспериментальное определение их величины. Разработана система автоматизированного проектирования (САПР) устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) импедансного и комбинированного типа, предназначенных для обработки радиочастотных сигналов большой мощности. Показано, что представленная САПР обеспечивает замкнутый цикл проектирования от анализа исходных требований к устройству на ПАВ до получения топологических файлов в различных форматах [18].

5. Заключение

Разработаны технологические основы получения магнитных нанокомпозитов на основе решетчатых упаковок микросфер кремнезема для создания метасред, пригодных для использования в СВЧ-технике (невзаимные устройства: аттенюаторы, циркуляторы).

Проведены фундаментальные исследования конструктивно-технологических решений построения радиочастотных компонентов на ПАВ, в том числе с использованием невзаимных устройств, и РЧИ-меток нового поколения на их основе.

Обоснован выбор оптимального варианта технологии проектирования РЧИ-меток.

Увеличена дальность считывания информации с РЧИ-меток.

Расширены функциональные возможности РЧИ-меток на ПАВ нового поколения

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ ((гранты 18-07-00282 А и 18-29-02076 мк).)

Литература

1. Гуляев Ю.В., Сигов А.С., Багдасарян А.С. Поверхностные акустические волны в радиочастотной идентификации Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. — с. 23-30.
2. Бутенко В.В., Багдасарян А.С. Радиочастотные идентификационные метки на поверхностных акустических волнах и системы на их основе. Патентный обзор. Труды научно-исследовательского института радио №2 2014. с.2-16
3. Багдасарян А.С., Свешников Б.В. Ключевые аспекты исследований радиочастотных меток на основе ПАВ: Универсальный алгоритм расчета характеристик радиочастотных меток с произвольной информационной емкостью Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 11. С. 3-9.

4. Свешников Б.В., Багдасарян А.С. Ключевые аспекты исследований радиочастотных меток на основе ПАВ: СИНТЕЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОДОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В АКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 12. С. 3-11.
5. Sveshnikov B.V., Bagdasaryan A.S. GENERALIZED DISCRETE MODEL OF SYSTEMS WITH DISTRIBUTED FEEDBACK BASED ON SURFACE ACOUSTIC WAVES Radiophysics and Quantum Electronics. 2016. Т. 59. № 6. С. 449-460.
6. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С. «Конструктивно-технологические особенности устройств на ПАВ для обработки радиочастотных сигналов высокой мощности: Исследования способов минимизации потерь в резонаторах для условий многослойного напыления» Наукоемкие технологии 2018.т.19.№2. С.46-57.
7. Гуляев Ю.В., Багдасарян С.А., Сигов А.С., Багдасарян А.С. БЕСКОЛЛИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН: ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ОПРОСА Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 750-757
8. Sarychev A.K., Shalaev V.M. Electrodynamics of metamaterials. World scientific and Imperial college press, – 2007. 200 p.
9. Самойлович М.И., Клещева С.М., Белянин А.Ф., Житковский В.Д., Цветков М.Ю. Трехмерные нанокомпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Часть 1 // Микросистемная техника. – 2004, № 6, с. 3–7.
10. Белянин А.Ф., Багдасарян А.С.НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ И МЕТАЛЛОВ Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 781-786
11. Alexey Belyanin, Alexander Bagdasarian, Sergey Bagdasarian, Petr Luchnikov and Natalya Katakhova Magnetic Nanocomposites Based on Opal Matrices / Key Engineering Materials Submitted Vol. 781 pp 149-154 © 2018 Trans Tech Publications, Switzerland DOI 10.4028
12. Белянин А.Ф., Багдасарян А.С. НАНОКОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ И МЕТАЛЛОВ Сборник докладов конференции "Информатика и технологии" 12.04.2018 Московский технологический университет (МИРЭА) С.781-786
13. Белянин А.Ф., Самойлович М.И., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А. ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ С УПРАВЛЯЕМЫМИ МАГНИТНЫМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КАК 3D-РЕШЕТОК НАНОКЛАСТЕРОВ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ (ТИТАНАТОВ И МАНГАНИТОВ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ) НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ Прикладная физика и математика. 2018. № 1. С. 22-39.
14. Белянин А.Ф., Борисов В.В., Багдасарян А.С., Чучева Г.В., Хлопов Б.В. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА 3D-НАНОКОМПОЗИТОВ: ОПАЛОВЫЕ МАТРИЦЫ - МЕТАЛЛЫ Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19. № 6. С. 38-43.
15. Багдасарян С.А. РАДИОЧАСТОТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ С НЕВЗАИМНЫМИ СВЧ УСТРОЙСТВАМИ Материалы Международной научно-технической конференции, 19 – 23 ноября 2018 г. INTERMATIC – 2 0 1 8, часть 3. с/. 526-530
16. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Прапорщиков В.В. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ С ВЫСОКОЙ ВХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 86-94
17. Багдасарян С.А., Багдасарян А.С., Гуляев Ю.В. БЕСКОЛЛИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ

ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 758-766

18. Багдасарян С.А., Багдасарян А.С. БЕСКОЛЛИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН: ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗАПРОСНЫХ СИГНАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИДЕНТИФИКАЦИИ Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 767-775
19. Багдасарян А.С., Гуляев Ю.В., Доберштейн С.А., Синицына Т.В., Багдасарян С.А. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ПАВ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ Техника радиосвязи. 2018. № 2 (37). С. 64-73.
20. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Прапорщиков В.В. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ С ВЫСОКОЙ ВХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19. № 3. С. 4-9.
21. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Николаев В.И. Особенности проектирования устройств на поверхностных акустических волнах волноводного типа // Теория и техника радиосвязи. 2016. № 2. С. 92-104.
22. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Багдасарян С.А. Особенности проектирования сверхминиатюрных радиокомпонентов для систем радиочастотной идентификации на основе акустических волноводов // Сборник научный трудов XXI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России», М. 2016. С. 42-46.
23. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С. «Конструктивно-технологические особенности устройств на ПАВ для обработки радиочастотных сигналов высокой мощности: Исследования способов минимизации потерь в резонаторах для условий многослойного напыления» Наукоемкие технологии 2018.т.19.№2. С.46-57.
24. Синицына Т.В., Бутенко В.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С. «Минимизация искажений характеристик ПАВ-устройств, обусловленных наличием паразитных мод высших порядков» /Электросвязь. 2018 №1. С.68-74
25. Т.В. Синицына, А.В. Луканов, А.С. Багдасарян, А.Т. Гарифулина, А.С. Груздев, С.С. Дорофеева «Минимизация искажений характеристик ПАВ-устройств, обусловленных наличием паразитных элементов конструкции» Теория и техника радиосвязи 2018 №1. С.112-116
26. Бутенко В.В., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Карапетьян Г.Я., Николаева С.О. Акустоэлектронные идентификационные метки в керамике LTCC Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 1. С. 16-23.
27. Багдасарян А., Багдасарян С., Бутенко В., Карапетьян Г. Радиочастотные метки на ПАВ Особенности конструкции и технологии // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2012. № 7 (121). С. 076-082.
28. Багдасарян С.А., Николаева С.О., Подшивалова Г.В., Семенов Р.В. Оценка дальности действия систем радиочастотной идентификации в условиях природных и техногенных катастроф // Теория и техника радиосвязи. 2012. № 4. С. 11-16.
29. Bagdasarian A.S., Bagdasaryan S.A., Dneprovski V.G., Karapetyan G.Y. To issue on development of piezoelectric devices on surface acoustic waves // В книге: Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications 2012. С. 189-238.
30. Сайт ООО «БУТИС». Режим доступа: http://butis-m.ru/ru.
31. Груздев А.С., Багдасарян А.С., Синицына Т.В. ПРЕЦИЗИОННЫЕ КОНТАКТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ НА ПАВ Теория и техника радиосвязи 2018. №4. С.108-116

32. Багдасарян С.А., Багдасарян А.С. БЕСКОЛЛИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 776-780
33. Налимов С.А., Багдасарян С.А., Юрин А.И., Борисов В.В.ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НИТРИДОВ МЕТАЛЛОВ (TIN, ZRN, ALN) НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19. № 4. С. 50-57.
34. Дорофеева С.С., Синицына Т.В., Багдасарян А.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАВ-УСТРОЙСТВ НА ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ ПЛАСТИНАХ В ВИДЕ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ LITAO3/КРЕМНИЙ Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 787-792
35. Гарифулина А.Т., Синицына Т.В., Груздев А.С., Багдасарян А.С. СЛОИСТЫЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ TI/AL И V/AL В ПАВ-ФИЛЬТРАХ С ВЫСОКОЙ ВХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ Российская научно-техническая конференция с международным участием. Сборник докладов «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» Физико-технологического института Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. —с. 793-798
36. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВ НА ПАВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ: ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ В РЕЗОНАТОРАХ ДЛЯ УСЛОВИЙ МНОГОСЛОЙНОГО НАПЫЛЕНИЯ Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19. № 2. С. 46-57.
37. Синицына Т.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Прапорщиков В.В. СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ С ВЫСОКОЙ ВХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ Наукоемкие технологии. 2018. Т. 19. № 3. С. 4-9.
38. Синицына Т.В., Бутенко В.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С. МИНИМИЗАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВ-УСТРОЙСТВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАЛИЧИЕМ ПАРАЗИТНЫХ МОД ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ Электросвязь. 2018. № 4. С. 68-74.
39. Синицына Т.В., Луканов А.В., Багдасарян А.С., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С.МИНИМИЗАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПАВ-УСТРОЙСТВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАЛИЧИЕМ ПАРАЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ Теория и техника радиосвязи. 2018. № 1. С. 112-116.
40. Багдасарян А.С., Синицына Т.В., Гарифулина А.Т., Груздев А.С., Дорофеева С.С. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПО СОСТАВУ И КОЛИЧЕСТВУ СЛОЕВ ЭЛЕКТРОДНЫХ СТРУКТУР НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАВ-ФИЛЬТРОВ Теория и техника радиосвязи. 2018. № 3. С. 101-109.

REFERENCES

1. Gulyaev Yu.V., Sigov A.S., Bagdasaryan A.S. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 23-30 … ….
2. Butenko V.V., Bagdasaryan A. S. Radio-frequency identification tags on surface acoustic waves and systems on their basis. Patent review. Works of radio research institute No. 2 2014. page 2-16.
3. Bagdasaryan A. S., Sveshnikov B.V. The Nonlinear world. 2014. T. 12. No. 11. Page 3-9.

4. Sveshnikov B.V., Bagdasaryan A. S. The Nonlinear world. 2014. T. 12. No. 12. Page 3-11.
5. Sveshnikov B.V., Bagdasaryan A.S. Radiophysics and Quantum Electronics. 2016. T. 59. № 6. C. 449-460.
6. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A. S., Garifulina A.T., Gruzdev A.S., Dorofeyeva S.S. "Constructive and technological features of devices on surfactant for processing of radio-frequency signals of high power: Researches of ways of loss minimization in resonators for conditions of multilayered dusting" High technologies 2018.t.19.№2. Page 46-57.
7. Gulyaev Yu.V., Bagdasaryan S.A., Sigov A.S., Bagdasaryan A.S. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 750-757
8. Sarychev A.K., Shalaev V.M. Electrodynamics of metamaterials. World scientific and Imperial college press, – 2007. 200 p.
9. Samoylovich M.I., Kleshcheva S.M., Belyanin A.F., Zhitkovsky EL, Tsvetkov M.Yu. Three-dimensional nanocomposites on the basis of ordered packings of nanospheres of silicon dioxide. Part 1//Microsystem equipment. – 2004, No. 6, page 3-7.
10. Belyanin A.F., Bagdasaryan A.S. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 781-786
11. Alexey Belyanin, Alexander Bagdasarian, Sergey Bagdasarian, Petr Luchnikov and Natalya Katakhova Magnetic Nanocomposites Based on Opal Matrices / Key Engineering Materials Submitted Vol. 781 pp 149-154 © 2018 Trans Tech Publications, Switzerland DOI 10.4028
12. Belyanin A.F., Samoylovich M.I., Bagdasaryan A. S., Bagdasaryan S.A. Applied physics and mathematics. 2018. No. 1. Page 22-39.
13. Belyanin A.F., Samoylovich M.I., Bagdasaryan A. S., Bagdasaryan S.A. Applied physics and mathematics. 2018. No. 1. Page 22-39.
14. Belyanin A.F., Borisov V.V., Bagdasaryan A. S., Chucheva, Hlopov B.V. High technologies. 2018. T. 19. No. 6. Page 38-43.
15. Bagdasaryan S.A. Materials of the International scientific and technical conference, on November 19 - 23, 2018 INTERMATIC – 2 0 1 8, Part 3. c/. 526-530
16. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A. S., Garifulina A.T., Gruzdev A. S., V. V. Praporshikov. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 86-94
17. Bagdasaryan S.A., Bagdasaryan A.S., Gulyaev Yu.V. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 758-766
18. Bagdasaryan S.A., Bagdasaryan A.S. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 767-775
19. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A. S., Nikolaev V.I. Features of design of devices on superficial acoustic waves of waveguide type//the Theory and the equipment of a radio communication. 2016. No. 2. Page 92-104.
20. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan of Ampere-second., Garifulin A.T., Bagdasaryan S.A. Features of design of the subminiature radio components for the systems of radio-frequency identification on the basis of acoustic wave guides//the Collection scientific works XXI of the International scientific and technical conference "High Technologies in the Industry of Russia", M. 2016. Page 42-46.
21. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A. S., Garifulina A.T., Gruzdev A. S., Dorofeyeva S.S. "Constructive and technological features of devices on surfactant for processing of radio-frequency signals of high power: Researches of ways of loss minimization in resonators for conditions of multilayered dusting" High technologies 2018.t.19.№2. Page 46-57.

22. Sinitsyna T.V., Butenko V.V., Bagdasaryan A. S., Garifulina A.T., Gruzdev A. S., Dorofeyeva S.S. "Minimization of distortions of characteristics of the surfactants devices caused by existence of parasitic fashion of the highest orders" / Telecommunication. 2018 No. 1. Page 68-74
23. T.V. Sinitsyna, A.V. Lukanov, A.S. Bagdasaryan, A.T. Garifulina, A.S. Gruzdev, S.S. Dorofeyeva "Minimization of distortions of characteristics of the surfactants devices caused by existence of parasitic structural elements" the Theory and the equipment of a radio communication 2018 No. 1. Page 112-116
24. Butenko V.V., Bagdasaryan A. S., Bagdasaryan S.A., Karapetyan G.Ya., Nikolaeva S.O. Akustoelektronnye identification tags in ceramics of LTCC Works of Research institute of radio. 2013. No. 1. Page 16-23.
25. Bagdasaryan A., Bagdasaryan S., Butenko V., Karapetyan G. Radio-frequency tags on surfactant of Construction feature and technology//Electronics: Science, technology, business. 2012. No. 7 (121). Page 076-082.
26. Bagdasaryan S.A., Nikolaeva S.O., Podshivalova G. V., Semyonov R.V. Assessment of range of systems of radio-frequency identification in the conditions of natural and technogenic catastrophes//the Theory and the equipment of a radio communication. 2012. No. 4. Page 11-16.
27. Bagdasarian A.S., Bagdasaryan S.A., Dneprovski V.G., Karapetyan G.Y. To issue on development of piezoelectric devices on surface acoustic waves // В книге: Piezoelectrics and Related Materials: Investigations and Applications 2012. С. 189-238.
28. Website: http://butis-m.ru/ru
29. Gruzdev A. S., Bagdasaryan A. S., Sinitsyna T.V. The Theory and the equipment of a radio communication 2018. No. 4. Page 108-116
30. Bagdasaryan S.A., Bagdasaryan A.S. The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 776-780
31. Nalimov S.A., Bagdasaryan S.A., Yurin A.I., Borisov V.V. High technologies. 2018. T. 19. No. 4. Page 50-57.
32. Dorofeyeva S.S., Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A. SThe Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 787-792
33. Garifulina A.T., Sinitsyn T.V., Gruzdev A. S., Bagdasaryan A.S. LAYERED ELECTRODE STRUCTURES of TI/AL And V/AL In PAV-FILTRAH With a HIGH INPUT POWER The Russian scientific and technical conference with the international participation. Collection of reports "Informatics and technologies. Innovative technologies in the industry and informatics" Physicotechnological institute of the Moscow technological university. — M.: MIREA, 2018. — page 793-798
34. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A.S., Garifulina A.T., Gruzdev A.S., Dorofeyeva S.S. Constructive and technological FEATURES of DEVICES ON surfactant FOR PROCESSING of High technologies. 2018. T. 19. No. 2. Page 46-57.
35. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A.S., Garifulina A.T., Gruzdev A.S., V. V. Praporshikov. High technologies. 2018. T. 19. No. 3. Page 4-9.
36. Sinitsyna T.V., Butenko V.V., Bagdasaryan A. S., Garifulina A.T., Gruzdev A. S., Dorofeyeva S.S. Telecommunication. 2018. No. 4. Page 68-74.
37. Sinitsyna T.V., Lukanov A.V., Bagdasaryan A. S., Garifulina A.T., Gruzdev A. S., Dorofeyeva S.S The Theory and the equipment of a radio communication. 2018. No. 1. Page 112-116.
38. Bagdasaryan A. S., Sinitsyn T.V., Garifulina A.T., Gruzdev A.S., Dorofeyeva S.S. The Theory and the equipment of a radio communication. 2018. No. 3. Page 101-109.
39. Bagdasaryan A. S., Gulyaev Yu.V., Doberstein S.A., Sinitsyn T.V., Bagdasaryan S.A. Intelligent DEVICES ON SAW: NEW OPPORTUNITIES The Technician of a radio communication. 2018. No. 2 (37). Page 64-73.
40. Sinitsyna T.V., Bagdasaryan A.S., Garifulina A.T., Gruzdev A.S., Praporshikov V.V. High technologies. 2018. T. 19. No. 3. Page 4-9.

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ НИТРИДГАЛЛИЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

С.А. Шостаченко[1], Ю. А. Порохонько[1], Н. И. Каргин[1], А. В. Слепенков[2]

[1]НИЯУ МИФИ, Москва, Россия
[2]АО «Микро-ВИС», Москва, Россия

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию нитрид галлиевых транзисторов. На основе изготовленных транзисторов был разработан усилитель мощности X-диапазона с выходной мощностью 41 дБм.

Ключевые слова: нитрид галлия; усилитель мощности; СВЧ электроника.

APPROVED BY THE ORGANIZING COMMITTEE REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF REPORTS

S.A. Shostachenko[1], Y. A. Porokhonko[1], N. I. Kargin[1], A. V. Slepenkov[2]

[1]NRNU MEPhI, Moscow, Russia
[2]JSC “Micro-VIS”, Moscow, Russia

Abstract. This paper is devoted to the study of gallium nitride transistors. Based on the manufactured transistors, an X-band power amplifier with an output power of 41 dBm was developed.

Keywords: gallium nitride; power amplifier; RF electronics.

1. Введение

Транзисторные устройства на гетероструктурах на основе сложных полупроводников, содержащих азот, широко применяются, как в оборонной, так и гражданской промышленности. К примеру, в качестве основной составляющей СВЧ монолитных интегральных схем (СВЧ МИС) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов для систем связи, радиолокации, радиоастрономии, радиометрии, и т.д., эти материалы, в особенности GaN, получили также применение в оптоэлектронной промышленности в качестве базы для светодиодных кристаллов.

Широкозонный полупроводниковый материал нитрид галлия (GaN) обладает уникальными физическими свойствами, позволяющими создавать на его основе твердотельные приборы силовой, СВЧ- и оптоэлектроники нового поколения, в том числе стойкие к воздействию радиации. На сегодняшний день доступны коммерческие GaN приборы с напряжениями пробоя 200 В (компания EPC-Co) [1] и 600 В (компания Transphorm) [2], характеристики которых по многим показателям не уступают традиционным кремниевым аналогам. Группой исследователей Института Микроэлектроники IMEC (Бельгия) получены лабораторные образцы GaN транзисторов на подложках кремния с напряжением пробоя более 2 кВ [3].

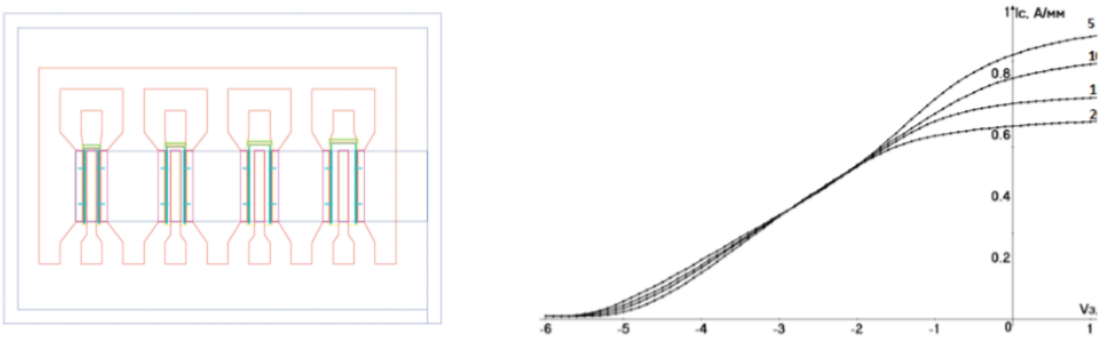
Одним из основных факторов, сдерживающих столь стремительное развитие электронной компонентной базы приборов на основе нитрида галлия, является отсутствие собственных подложек. Наиболее близкими к нитриду галлия по кристаллической структуре являются подложки карбида кремния (SiC). Именно на этом материале сегодня достигнуты максимальные показатели СВЧ приборов на основе GaN.

Однако такие подложки не выпускаются Отечественной промышленностью и до сих пор являются достаточно дорогим и труднодоступным материалом. Основным производителем SiC пластин является Американская компания CREE, что накладывает некоторые ограничения на использование транзисторов GaN на SiC в ряде специальных применений, а также существенно удорожает стоимость готовой продукции.

Альтернативой карбиду кремния является сапфир, применение которого является одним из динамично развивающихся направлений в области твердотельной GaN электроники [4]. Подложки сапфира выпускаются Российскими предприятиями и стоимость этих пластин на порядок ниже цен на пластины карбида кремния, поэтому разработка технологии формирования структур GaN/Al2O3 с низким значением плотности прорастающих дислокаций, влияющих на основные характеристики приборов, имеет важное значение для Отечественной электронной компонентной базы твердотельной электроники.

2. Конструкция транзистора

На основе гетроструктур производства фирмы Cree были сформированы силовые транзисторы, конструкция и топология которых представлена на рисунке 1.



(а) (б)

Рис. 1. – Конструкция (а) и топология (б) силового транзистора на основе гетероструктур AlGaN/GaN/Al2O3.

Для увеличения пробивного напряжения использовалась двухуровневая металлизация «field plate» (рис. 1а). Расстояние между контактами затвора и стока было увеличено до 15 мкм. На рисунке 1б представлена переходная характеристика транзисторов для разного расстояния между затвором и стоком.

3. Усилитель мощности

На основе изготовленного транзистора был спроектирован и изготовлен усилитель мощности. Амплитудно-частотная характеристика представлена на рисунке 2. Выходная мощность полученного усилителя составила 41 дБм.

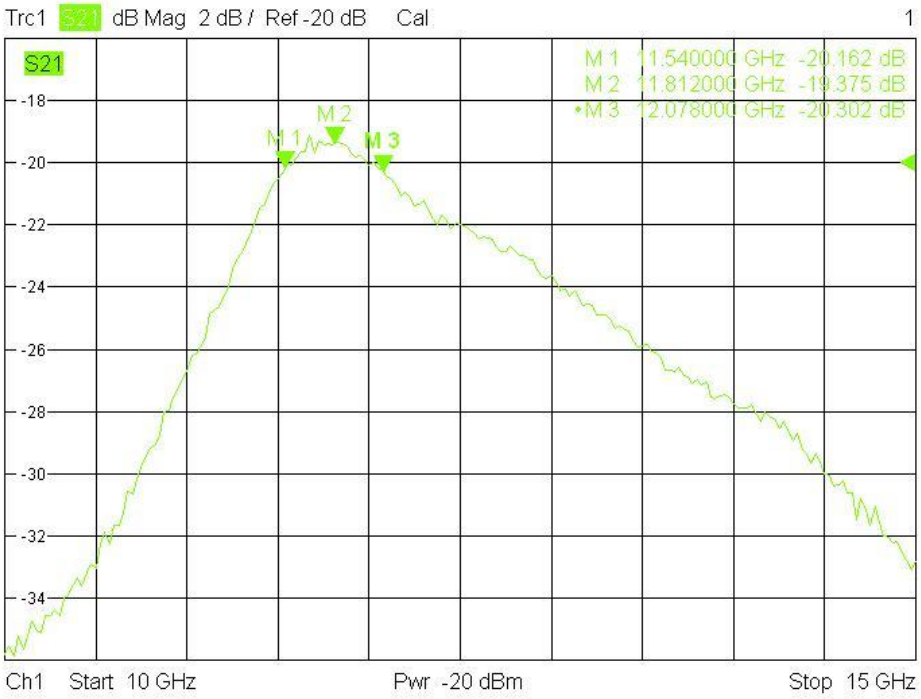


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика усилителя

4. Заключение

В данной работе были проведены разработка и исследования усилителя мощности на основе одного транзисторного нитридгаллиевого кристалла. Выходная мощность в X-диапазоне составила 41 дБм. Полученные результаты позволят создавать усилители с большей выходной мощностью на основе нескольких кристаллов, а также увеличить рабочую частоту за счет уменьшения длины затвора.

Литература

1. Luther B. P., Mohney S. E., Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 57.
2. Kong X., Wei K., Liu G., Liu X., Role of Ti/Al relative thickness in the formation mechanism of Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45 P. 265101.
3. K. D. Vanyukhin and all, Study of structure and surface morphology of two-layer contact Ti/Al metallization. // Modern Electronic Materials (MOEM) 2016, T.2, №2, p.54–59.
4. Shostachenko S. Schottky-to-Ohmic Behavior in Annealed Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au on AlGaN/GaN // Physics Procedia 2015 V. 72. P. 419.

References

1. I Luther B. P., Mohney S. E., Investigation of the mechanism for Ohmic contact formation in Al and Ti/Al contacts to n-type GaN // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 57.

2. Kong X., Wei K., Liu G., Liu X., Role of Ti/Al relative thickness in the formation mechanism of Ti/Al/Ni/Au Ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45 P. 265101.
3. K. D. Vanyukhin and all, Study of structure and surface morphology of two-layer contact Ti/Al metallization. // Modern Electronic Materials (MOEM) 2016, T.2, №2, p.54–59.
4. Shostachenko S. Schottky-to-Ohmic Behavior in Annealed Ti/Si/Ti/Al/Ni/Au on AlGaN/GaN // Physics Procedia 2015 V. 72. P. 419.

ЧИСЛЕННОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СФЕРЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ НА СВЧ

К. М. Зейде[1]

[1]Уральский Федеральный Университет (УрФУ), Екатеринбург, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается алгоритм восстановления электрофизических параметров диэлектрической сферы по экспериментально полученным частотным характеристикам коэффициента отражения в прямоугольном волноводе на СВЧ. Экспериментальная характеристика является маской для оптимизации. Численные характеристики получаются при моделировании системы в САПР электромагнитного моделирования. Описываются процедуры принятия решения в ходе работы алгоритма и указываются принципиальные возможности оптимизации перебора переменных параметров.

Ключевые слова: электрофизические параметры; моделирование; волноводы; СВЧ; оптимизация.

NUMERICAL RECOVERING OF THE SPHERE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS IN A RECTANGULAR WAVEGUIDE ON A MICROWAVE

K. M. Zeyde[1]

[1]Ural Federal University

Abstract. In this paper, we consider an algorithm for recovering the parameters of the dielectric sphere due to experimentally obtained frequency characteristics of the reflection coefficient in a rectangular waveguide on the microwave. Experimental characteristics are the mask for optimization. Numerical data is obtained by modeling the system in the ECAD. Paper describes decision-making procedures during the operation of the algorithm and indicates the principal possibilities for optimizing the search of variable parameters.

Keywords: material parameters; modeling; waveguides; microwave; optimization.

1. Введение

Задача настоящей работы формулируется следующим образом: по экспериментально полученным характеристикам $S_{11}(f)$ для прямоугольного волновода с сечение 23x10 мм, используя оптимальную стратегию, восстановить электрофизические параметры (частотные зависимости реальных и мнимых частей диэлектрической и магнитной проницаемостей) помещенной в волноводе диэлектрической сферы рэлеевского электрического радиуса. Частотный диапазон анализа 8 – 12 ГГц, радиус сферы 2.25 мм. В эксперименте изучались материалы, демонстрирующие количественно и качественно различающиеся между собой электрофизические параметры. Для численного восстановления параметров применяется вычислительное ядро САПР EMPro реализующее решение задачи методом конечных элементов.

Геометрия системы, постановка эксперимента и экспериментальные данные подробно описаны в работе [1]. Верифицированное моделирование неоднородностей в волноводах с использованием САПР Keysight EMPro описано в работе [2].

В данной работе описывает разработанный алгоритм численного восстановления электрофизических параметров материалов по имеющимся функциям $S_{11}(f)$. Экспериментально полученная функция является маской оптимизации.

2. Процесс восстановления

Для разработки алгоритма восстановления в данной работе, для сравнительных значений, используются заранее изученные материалы. Процесс получения сравнительных значений описан в работе [3]. На рис. 1 представлена блок-схема предлагаемого алгоритма восстановления. Дадим необходимые пояснения. Первым решение алгоритма является заключение о том, является ли проводником тело, параметры которого необходимо восстановить. В данном случае, под проводником мы понимаем материал близкий к идеальному электрическому проводнику.

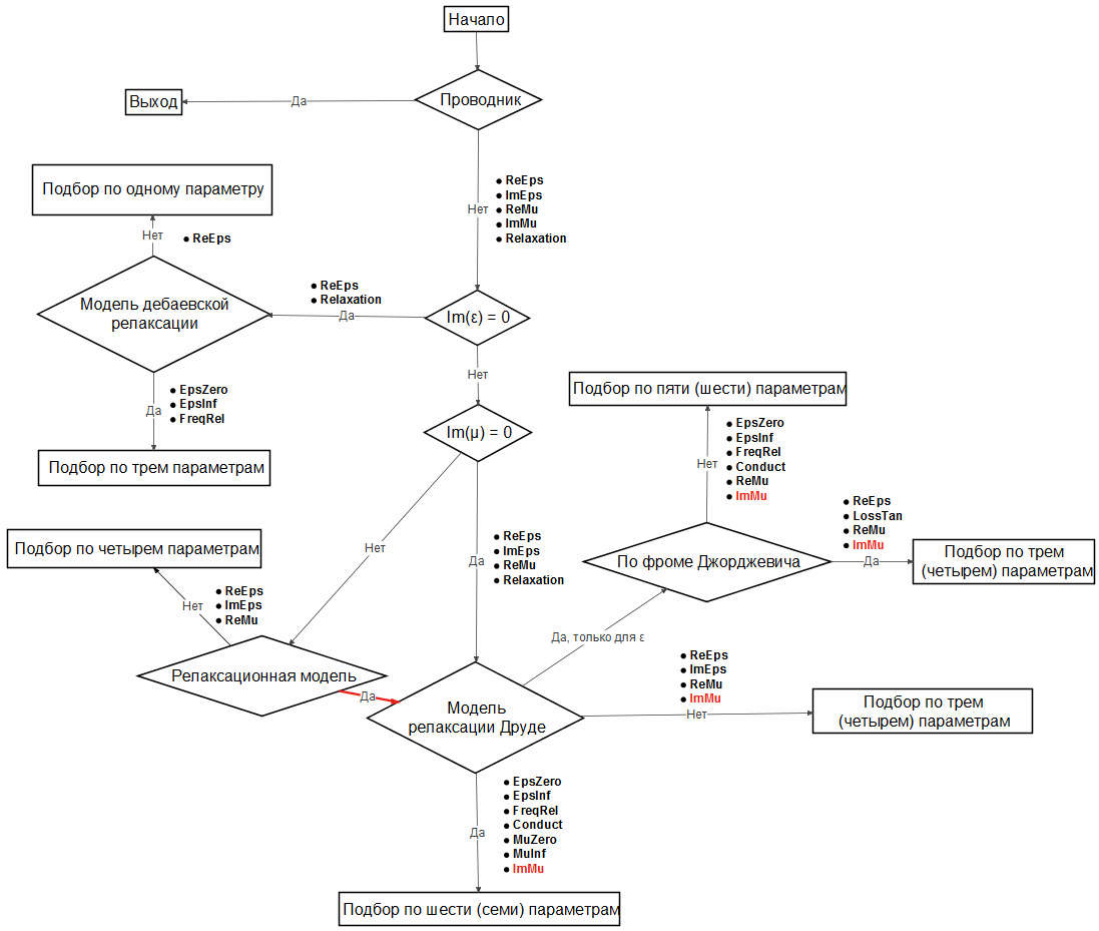


Рис. 1. Алгоритм восстановления параметров

Данное решение выполняется автоматически и не является проблематичным. Исходя их полученных в работе [4] данных, металлическая сфера является наиболее простым типом неоднородности для различения. Более того, для принятие этого решения нет необходимости прибегать к численному восстановлению параметров, т.к. в той же работе было получено экспериментально верифицированное полуаналитическое выражение для частотной зависимости коэффициента отражения металлической сферы

(в случае [4] медной) в прямоугольном волноводе на СВЧ. В силу того, что восстановление параметров проводников не является задачей данной работы, при положительном решении, процедура завершается. В противном случае формируется пул переменных параметров оптимизации. В таблице 1 приведено описание пула переменных. В начале работы алгоритма формируется полный перечень переменных с начальными значениями. По ходу работу алгоритма пул для оптимизации корректируется.

Вторым решение алгоритма является определение $Im(\varepsilon_r)$. Как показывает проведенное сравнение для образцов материалов с потерями и без потерь ([2] и [3]) принятие такого решения, в большинстве случаев осуществляется по анализу маски на особенности функции. Для предлагаемого алгоритма, если $Im(\varepsilon_r) = 0$, то материал считается не магнитным (справедливо для большинства материалов на СВЧ).

Таблица 1. Пул переменных оптимизации

Обозначение в программе	**Физический смысл**
ReEps	Реальная часть относительной диэлектрической проницаемости – $Re(\varepsilon_r)$
ImEps	Мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости – $Im(\varepsilon_r)$
ReMu	Реальная часть относительной диэлектрической проницаемости – $Re(\mu_r)$
ImMu	Мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости – $Im(\mu_r)$
Relaxation	Параметры для описания релаксационных процессов: EpsZero – Относительная диэлектрическая проницаемость на нулевой (минимальной) частоте – ε_0; EpsInf – Относительная диэлектрическая проницаемость на бесконечной (максимальной) частоте – ε_∞; FreqRel – частота релаксации, входящая в анализируемый диапазон частот – f_r; Conduct – проводимость материала – σ; LossTan – тангенс диэлектрических потерь – $tg\delta$; MuZero – Относительная магнитная проницаемость на нулевой (минимальной) частоте – μ_0; MuInf – Относительная магнитная проницаемость на бесконечной (максимальной) частоте – μ_∞;

Полагая, что материал может демонстрировать релаксационные характеристики принятие решение относительно $Im(\varepsilon_r)$, в целом, является эвристическим, и при не достижении маски, в процессе оптимизации, алгоритм может вернуться к этому решению. Тем не менее, с точки зрения оптимальной стратегии восстановления, если

функция $S_{11}(f)$ не демонстрирует индикаторов наличия сильных потерь в материале, работа в этом направлении оправдана.

Решение относительно релаксационных процессов выполняется путем сравнивания имеющихся экспериментально полученных функций $S_{11}(f)$ для композитных материалов. Исследуя достаточно узкий диапазон частот на СВЧ (8 – 12 ГГц), релаксационные процессы обычно устраняют характерную возрастающую динамику функции (см. [2] и [5]).

Рассмотрим для начала наиболее простой алгоритм восстановления, при подборе функции $S_{11}(f)$ по маске, для одного параметры $\mathrm{Re}(\varepsilon_r)$. Оптимизация выполнялась на ПК с характеристиками выше среднего. Моделирование соответствует описанному в [2]. Для экономии времени вычислений использовался итеративный подход к решению СЛАУ с максимальным числом итераций – 200. Критерий остановки – 10^{-4}. Значения параметра варьировались от 1.1 до 7 с шагом 0.35. Получившиеся функции приведены на рис. 2. Очевидно, что при увеличении параметра ReEps, характеристика $S_{11}(f)$ изменяется лишь по уровню, практически полностью сохраняя свою динамику.

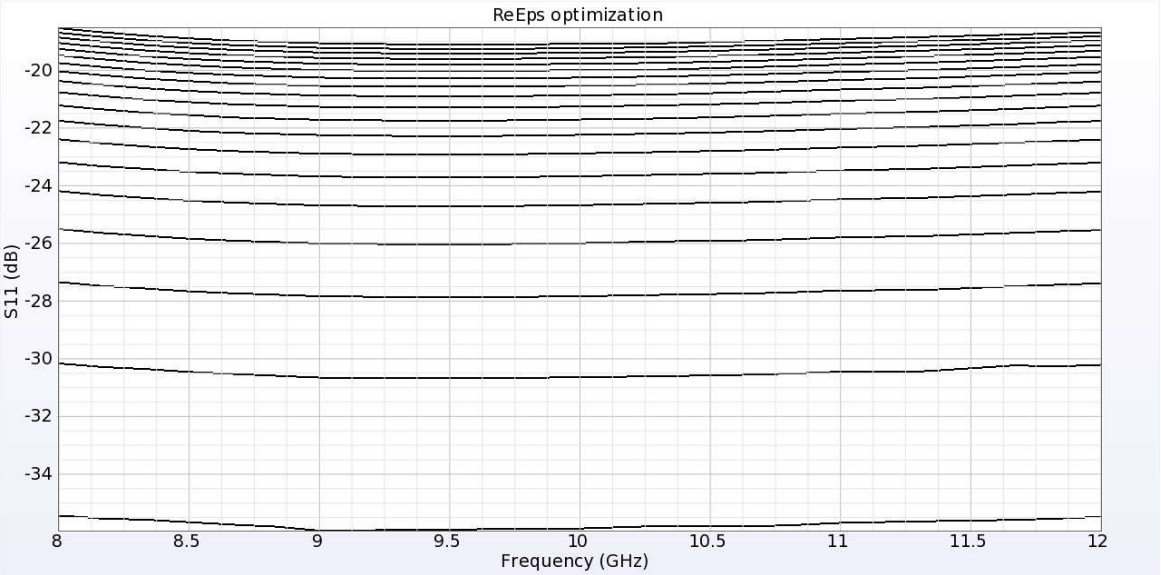


Рис. 2. Результат подбора по одному параметру ReEps

Накладывая на значения рис. 2 маску из экспериментальных данных для сферы из полипропилена (см. [1]), получаем, что наибольшее соответствие численных и экспериментальных функций $S_{11}(f)$ наблюдается для $\varepsilon_r = 2.15$ при экспериментальных значениях 2.14 – 2.25.

Это наиболее простой подбор. Нет особого смысла оптимизировать данную процедуру, хотя, судя по значениям рис. 2 принципиальная возможность оптимизации имеет (переменный шаг в зависимости от значения ReEps). В описанном случае решателем было выполнено 20 итераций, каждая из которых занимала приблизительно 14 минут.

Далее опишем оптимизацию для релаксационной модели по трем параметрам. На рис. 3 и 4 представлены полученные характеристики при вариации одного из

параметров. Стандартный алгоритм перебора в САПР EMPro заключается в последовательном изменении значений переменных с указанным шагом для расчета всех возможных комбинаций. В показанном случае комбинаций переменных оказалось более 700. При одном расчете в 14 минут, полный цикл расчета завершиться спустя более, чем 1 неделю. Полученные данные буду принципиально сложны для обработки. Данный алгоритм вряд ли можно назвать оптимальным. В этой связи предлагается использовать метаэвристические подходы для достижения минимального различия между получаемыми функциями (рис. 3 и 4) и масками оптимизации.

Метаэвристические подходы широко применяются в электродинамике и радиотехнике, см. например [6] и [7]. В случае работы алгоритма [6] максимальное число настраиваемых параметров – 3, как и в рассматриваемом случае.

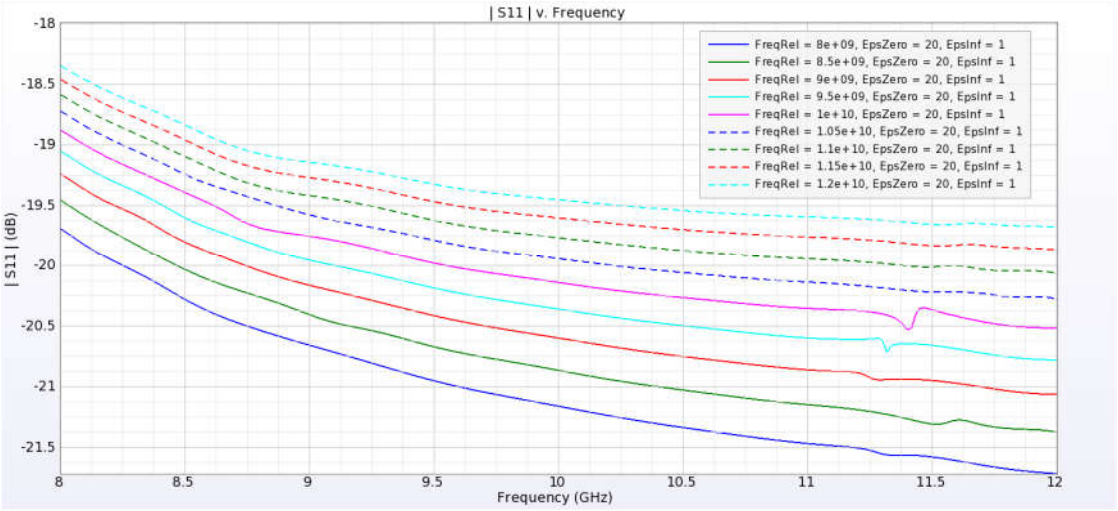


Рис. 3. Вариация параметра FreqRel при фиксированных EpsZero и EpsInf

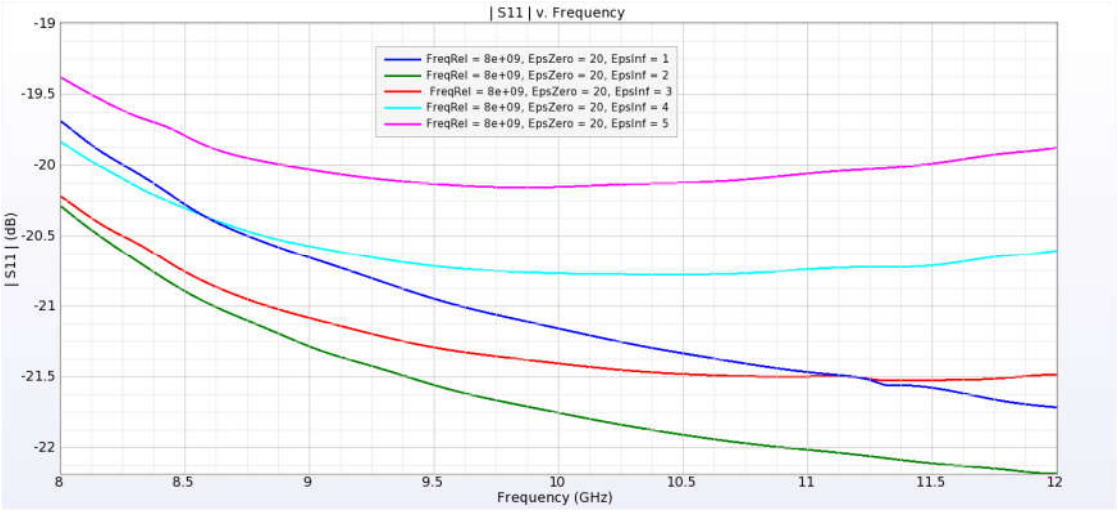


Рис. 4. Вариация параметра EpsInf при фиксированных EpsZero и FreqRel

Не представляется важным описывать дальнейшую работу алгоритма рис. 1. В целом, она аналогична материалу представленному выше. Следует дать лишь ряд пояснений. Аналитическое описание релаксационных процессов и их численная адаптация, применяемая в САПР EMPro, изложено в книге [8]. Описание релаксационных процессов по форме Джоржевича является оптимальным выбором, т.к. в нем используется большое количество априорно известных значений: $f_{\min}$ – минимальная частота характеристики – 8 ГГц, $f_{\max}$ – максимальная частота характеристики – 12 ГГц. Опорная частота f_{ev} для материалов на СВЧ обычно выбирается в промежутке от 9 – 10 ГГц [2]. При неудачном восстановлении параметров материала при произвольном выборе значения f_{ev}, эта величина может быть так же оптимизирована.

На рис. 1 красным цветом выделена траектория, которая является самой требовательной к вычислительным и временным ресурсам. Одновременно с этим необходимость работы алгоритма остается под вопросом на узком диапазоне частот. Как видно из рис. 1, максимальное количество параметров оптимизации – 7. Естественным образом между некоторыми из них есть определенные зависимости, однако для некоторых сложных композитных (или мелкодисперсных) материалов они могут нарушаться (см. эксперимент проведенный в [9]).

3. Заключение

Предложенный в данной работе алгоритм восстановления электрофизических параметров сферы в прямоугольном волноводе подтвердил свою эффективность для простых материалов. Так восстановление диэлектрической проницаемости немагнитного полипропилена, у которого не наблюдаются потери на СВЧ, продемонстрировала точность на уровне натурного эксперимента. Восстановление простых материалов с Дебаевской релаксационной характеристикой по трем (или четырем) переменным параметрам также показало свою эффективность, особенно при применении метаэвристических подходов к поиску значений, наиболее близких к маске. Более сложные переборы значений переменных должны быть оптимизированы и апробированы, с последующей экспериментальной верификацией.

Тестирование части предложенного алгоритма проводилось на сфере только потому, что для сферы имеется полуаналитические выражения для коэффициента отражения в прямоугольном волноводе (работы [1] и [4]). Основной же интерес в развитие такого подхода, заключается в восстановлении электрофизических параметров тел сложной произвольной формы.

Литература

1. Zeyde K. M., Sharov V. V. Discernibility and MDR for the complex dielectric sphere in rectangular waveguide. APEDE Conference Proceedings, Saratov, 2018.
2. Zeyde, K. M. Verified simulation of waveguide inhomogeneities in Keysight EMPro 2017 software. // Ural radio engineering journal, 2018, Vol. 2, No. 4. - pp. 67-76.

3. Зейде К. М., Малкин А. И., Шаров В. В. Особые уточнения к волноводному методу измерения параметров материалов. Сборник трудов конференции ИТТСУ, Екатеринбург, 2017 – С. 107-115.
4. Zeyde K. M. Discernibility of metallic sphere in rectangular waveguide. ACES Conference Proceedings, Florence, 2017.
5. Мустафаева С. Н. Частотная зависимость действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости монокристалла TiInSe2 при релаксационных процессах. // Журнал радиоэлектроники, вып. 7, 2013.
6. Basbug S. A general model for pattern synthesis of linear antenna arrays by metaheuristic algorithms. ACES Conference Proceedings, Florence, 2017.
7. Wei-Chung Weng, Yang F., Elsherbeni A. Z. Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: a novel optimization technique in electromagnetic. // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 55, no. 3, pp. 723-730, 2007.
8. Kunz K. S., Luebbers R. J. The finite difference time domain method for electromagnetic. // CRC Press, 1993.
9. Zeyde K. M., Gudkova S. A., Vinnik D.A. Investigation of Barrium Hexaferrite BaFe12O19 Electro Physical Parameters Using Open-ended Coaxial Probe Method. // Solid State Phenomena, Vol. 265, 2017 – pp. 834-838.

REFERENCES

1. Zeyde K. M., Sharov V. V. Discernibility and MDR for the complex dielectric sphere in rectangular waveguide. APEDE Conference Proceedings, Saratov, 2018.
2. Zeyde, K. M. Verified simulation of waveguide inhomogeneities in Keysight EMPro 2017 software. // Ural radio engineering journal, 2018, Vol. 2, No. 4. - pp. 67-76.
3. Zeyde K. M., Malkin A. I., Sharov V .V. Further refinements to the waveguides materials measurements. ITTSU Conference Proceedings, Ekaterinburg, 2017 – p. 107-115.
4. Zeyde K. M. Discernibility of metallic sphere in rectangular waveguide. ACES Conference Proceedings, Florence, 2017.
5. Mustafaeva S. N. Frequency dependence of real and imaginary parts of complex dielectric permittivity and conductivity of $TlInSe_2$ single crystal at relaxation processes. // Journal of Radio Electronics, no. 7, 2013.
6. Basbug S. A general model for pattern synthesis of linear antenna arrays by metaheuristic algorithms. ACES Conference Proceedings, Florence, 2017.
7. Wei-Chung Weng, Yang F., Elsherbeni A. Z. Linear antenna array synthesis using Taguchi's method: a novel optimization technique in electromagnetic. // IEEE Transactions on antennas and propagation, Vol. 55, no. 3, pp. 723-730, 2007.
8. Kunz K. S., Luebbers R. J. The finite difference time domain method for electromagnetic. // CRC Press, 1993.
9. Zeyde K. M., Gudkova S. A., Vinnik D.A. Investigation of Barrium Hexaferrite BaFe12O19 Electro Physical Parameters Using Open-ended Coaxial Probe Method. // Solid State Phenomena, Vol. 265, 2017 – pp. 834-838.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ Al-Al_2O_3-Ni-Cu-СТРУКТУР ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ-ЛИНИЙ

Д. Л. Шиманович

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), Минск, Беларусь

Аннотация. Разработаны технологические режимы формирования Al-Al_2O_3-Ni-Cu-структур, основанные на химическом осаждении Ni и электрохимическом осаждении Cu толщиной до 30 мкм на широкоформатные Al-основания с односторонним диэлектрическим слоем Al_2O_3, полученным в процессе электрохимического анодирования. Исследованы электрофизические параметры Al-Al_2O_3-Ni-Cu-структур и показана перспективность их использования в качестве микрополосковых линий пассивной части систем СВЧ-диапазона.

Ключевые слова: алюминий; анодирование; алюмооксидная структура; медь; система межсоединений; микрополосковая линия передачи; СВЧ-устройство.

ELECTROCHEMICAL FORMATION OF Al-Al_2O_3-Ni-Cu-STRUCTURES FOR MICROWAVE MICROSTRIP LINES

D. L. Shimanovich

Belarussian state university of informatics and radioelectronics (BSUIR), Minsk, Belarus

Abstract. Based on Ni chemical deposition and up to 30 μm thick Cu electrochemical deposition onto large-size Al bases with Al_2O_3 one-sided dielectric coating obtained by electrochemical anodic process, technological regimes for Al-Al_2O_3-Ni-Cu structures formation were developed. Electrophysical parameters for Al-Al_2O_3-Ni-Cu structures were studied and their promising application for microstrip lines of microwave systems passive part was demonstrated.

Keywords: aluminum; anodizing; alumina structure; copper; interconnection system; microstrip line; microwave device.

1. Введение

Известно, что основой конструкции устройств СВЧ-диапазона является диэлектрическая подложка, которая должна обеспечивать не только размещение пленочных пассивных и навесных активных элементов, но и сама должна служить функциональной частью при распространении СВЧ-энергии, т.к. величины емкостных и индуктивных связей, геометрических размеров микрополосковых линий для минимизации потерь СВЧ-энергии определяются диэлектрической постоянной материала и толщиной подложки. Кроме того, СВЧ-подложка должна обладать высоким качеством обработки поверхности, высокой плоскостностью, механической прочностью, термоустойчивостью при нагревании до высоких температур, высокой теплопроводностью, химической инертностью, температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), по возможности близким к ТКЛР формируемых слоев для совместимости с процессами осаждения пленок для создания микрополосковых СВЧ-линий [1-3]. Использование механически прочных Al-оснований с диэлектрическим слоем Al_2O_3, полученным с одной стороны в результате электрохимического процесса анодирования [4], является весьма перспективным, если

учесть тот фактор, что вторая неокисленная сторона таких оснований служит сплошным металлизированным экраном. Толщина диэлектрического слоя и его структурно-морфологические параметры, которые влияют на величину затухания СВЧ-сигналов, могут контролироваться электрохимическими режимами анодирования [5-6]. Настоящая работа посвящена формированию и исследованию пассивной части СВЧ-схем на основе медной металлизации толщиной до 30 мкм, сформированной с применением химического осаждения Ni и электрохимического осаждения Cu на широкоформатных Al-основаниях с односторонним анодным диэлектрическим слоем Al_2O_3, что может быть использовано в качестве микрополосковых СВЧ-линий.

2. Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Разработанный нами технологический процесс формирования Al-Al_2O_3-Ni-Cu-структур позволил исключить операцию вакуумного напыления токопроводящих пленок в качестве подслоя с использованием дорогостоящего оборудования и основывался на использовании только химических, электрохимических и гальванических методов. Насущной проблематикой при таком подходе является улучшение электрофизических параметров: увеличение электроизоляционной прочности анодного Al_2O_3, исключение возможных коммутационных соединений Cu-проводников с Al-основанием, снижение внутренних напряжений, улучшение термостойкости, теплопроводности и адгезионных свойств Cu в системе Al-Al_2O_3-Ni-Cu.

В качестве подложек использовались Al-основания из сплава АМг-2 размером 100×100 мм толщиной ~1-2 мм с модифицированным пористым анодным слоем Al_2O_3 толщиной ~50-100 мкм, сформированным с одной стороны (вторая сторона маскировалась) методом двухстадийного анодирования в 10 % растворе $H_2C_2O_4$ с добавлением $MgSO_4$ (8,5 г/л) сначала на глубину ~10 мкм в потенциостатическом режиме при U ~20-25 В при температуре ~16-18 ºС (1 стадия), а после этого в том же электролите при той же температуре на заданную толщину Al_2O_3 при резко повышенном U ~60-70 В в течение ~50-100 мин (2 стадия). Далее, после грунтовки пористой структуры Al_2O_3 проводилась сенсибилизация алюмооксидной поверхности в 5% растворе $SnCl_2$, содержащем 5% HCl, в течение ~2 мин при комнатной температуре. После этого подложки подвергались процессу активирования в 1% растворе $PdCl_2$, содержащем 5% HCl, в течение ~1 мин при комнатной температуре. После завершения активирования осуществлялся процесс сплошного химического никелирования в водном растворе, содержащем борную кислоту (15 г/л), молочную кислоту (17 г/л), едкий натр (19 г/л), гипофосфит натрия (20 г/л), сульфат никеля (25 г/л), тиомочевину (0,1 г/л), при температуре процесса ~95 °С. Время осаждения ~10 мин, толщина слоя Ni ~1,5 мкм. Далее проводили термообработку химически осажденного токопроводящего Ni при температуре ~200 ºС в течение ~1 ч. После этого методом электрохимического осаждения наносился сплошной Cu проводящий слой толщиной ~20-30 мкм на всю поверхность алюмооксидных оснований. Состав электролита: сульфат меди (210 г/л), кислота серная концентрированная (75 г/л), спирт этиловый (10 мл/л), уротропин (0,2 г/л). Режимы осаждения Cu: плотность тока ~20 мА/см^2, температура процесса ~20-23

°С, время осаждения ~50-60 мин. Далее проводился процесс фотолитографии с целью формирования пассивной части – рисунка системы межсоединений на основе медной металлизации.

Следует отметить, что при создании пассивной части СВЧ-устройств был отработан метод глубокого локального травления толстослойной Cu с подслоем Ni до диэлектрической Al_2O_3-поверхности оснований по рисунку сформированной фоторезистивной маски с минимальным боковым уходом для сохранения вертикальности стенок создаваемой конфигурации медных токоведущих элементов и качественной межэлементной изоляции. Химическое травление проводилось в водном растворе соляной кислоты (HCl) (25 об. %) и перекиси водорода (H_2O_2) (25 об. %).

Для различных вариантов тестовых образцов были проведены исследования электрофизических параметров пассивной части СВЧ-схем: адгезионных характеристик Cu-металлизации к поверхности алюмооксидных оснований, электрического сопротивления токоведущих Cu-элементов, пробивных напряжений диэлектрического покрытия оснований, теплопроводности и термоустойчивости в системе Al-Al_2O_3-Ni-Cu. При соблюдении оптимальных технологических режимов формирования пассивной части измеренные параметры показали следующие значения: напряжение пробоя изоляции ~3,5-6,0 кВ; теплопроводность ~41-71 Вт/м·К (рисунок 1); термоустойчивость – до 350 °С; степень адгезии Cu ~7,0-8,7 кг/мм^2 (рисунок 2); удельное электрическое сопротивление токопроводящих элементов ~0,04-0,08 Ом·м (рисунок 3).

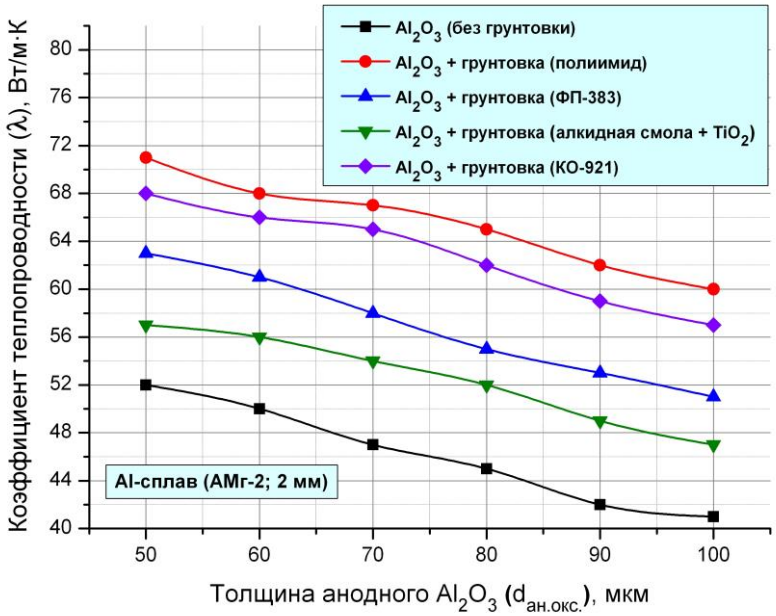


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности от толщины диэлектрического слоя Al_2O_3, грунтованного различными органическими материалами, в системе Al-Al_2O_3-Ni-Cu: толщина Al-сплава ~2 мм; толщина Cu ~20 мкм.

Для увеличения значений пробивных напряжений изоляции применялись следующие технологические приемы: дополнительное плотное анодирование при U

~250 В в 1 % растворе лимонной кислоты после основной стадии пористого анодирования для увеличения толщины пленки Al_2O_3 барьерного типа в донной области пористой структуры анодного оксида; грунтовка (заполнение) каналов пористого анодного слоя Al_2O_3 различными органическими наполнителями.

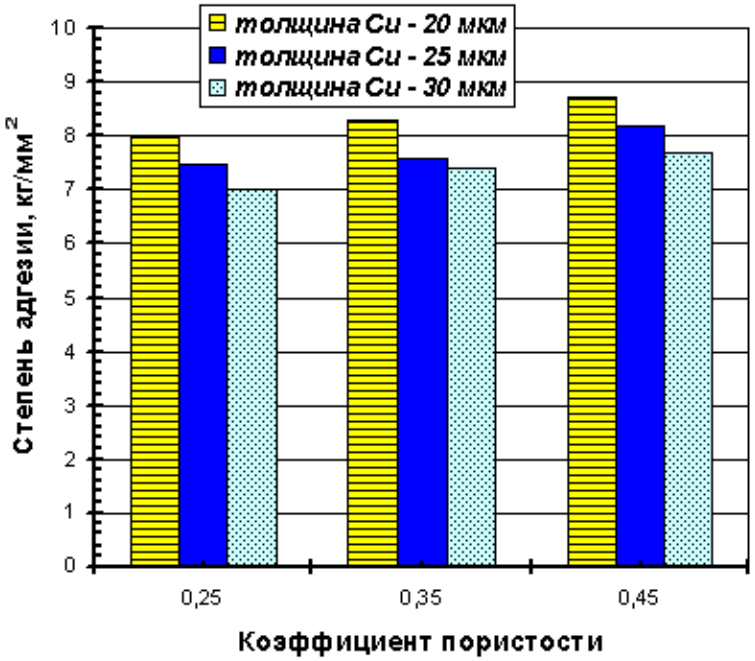


Рис. 2. Сравнительный анализ влияния коэффициента пористости Al_2O_3 на адгезионную прочность пленок Cu: толщина Cu ~20; 25; 30 мкм; толщина Al_2O_3 ~100 мкм.

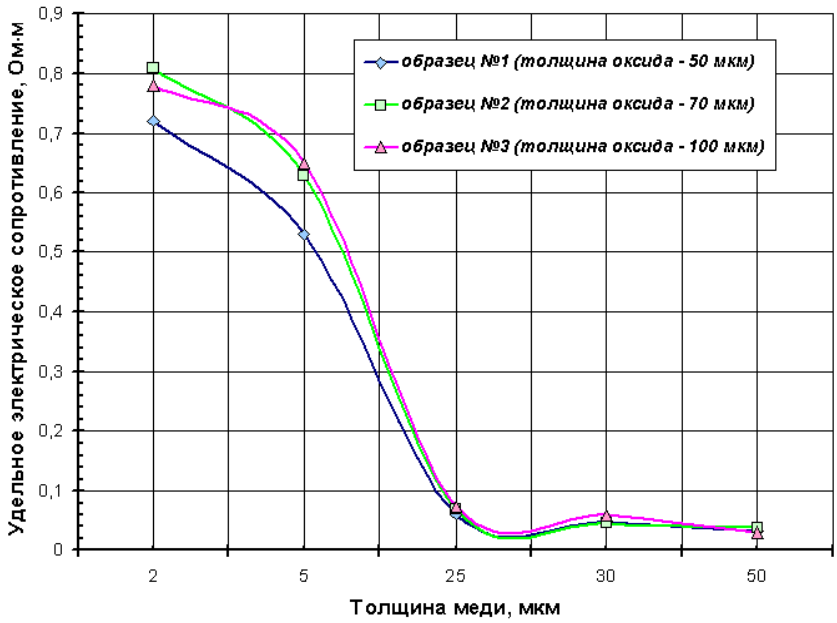


Рис. 3. Влияние толщины элементов медной металлизации в Al-Al_2O_3-Ni-Cu-структурах на ее удельное электрическое сопротивление: толщина Al_2O_3 ~50; 70; 100 мкм; толщина Al-основания ~2 мм.

3. Заключение

1. Разработаны технологические режимы формирования Al-Al_2O_3-Ni-Cu-структур, которые являются перспективными для использования в качестве микрополосковых линий пассивной части систем СВЧ-диапазона.

2. Коммутационные элементы изготовлены на основе Ni-Cu-металлизации, сформированной с применением химического осаждения Ni толщиной ~1,5 мкм и электрохимического осаждения Cu толщиной до 30 мкм на широкоформатных Al-основаниях с односторонним анодным диэлектрическим слоем Al_2O_3 толщиной до 100 мкм, полученным в процессе электрохимического анодирования.

3. Исследованы электрофизические параметры в системе Al-Al_2O_3-Ni-Cu, которые показали следующие значения: напряжение пробоя изоляции ~3,5-6,0 кВ; теплопроводность ~41-71 Вт/м·К; термоустойчивость – до 350 ^oC; степень адгезии меди ~7,0-8,7 кг/мм^2; удельное электрическое сопротивление токопроводящих коммутационных элементов ~0,04-0,08 Ом·м.

Литература

1. Климачев И. И., Иовдальский В. А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера, 2006. - 352 с.
2. Филатов И. Н., Бакрунов О. А., Панасенко П. В. Микроэлектронные СВЧ-устройства. М.: Высшая школа, 1987. - 94 с.
3. Кренделев А. Е. Технологические средства изготовления микрополосковых линий для ГИС КВЧ-диапазона. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2002, № 4. - С. 33-39.
4. Сокол В. А., Шиманович Д. Л., Литвинович Г. В. Технологические приемы формирования Al-Al_2O_3 микроструктур для мощных электромеханических систем. // Доклады БГУИР, 2012, № 8 (70). - С. 44-49.
5. Литвинович Г. В., Шиманович Д. Л. Технологические особенности формирования плат со встроенной системой межсоединений в подложках анодного оксида алюминия. // Доклады БГУИР, 2013, № 3 (73). - С. 39-44.
6. Сокол В. А., Яковцева В. А., Шиманович Д. Л. Особенности применения пористых оксидов алюминия. // Доклады БГУИР, 2012, № 2 (64). - С. 21-27.

References

1. Klimachev, I. I., Iovdal'skii, V. A. SVCh GIS. Osnovy tekhnologii i konstruirovaniya. M.: Tehnosfera, 2006. - 352 p.
2. Filatov, I. N., Bakrunov, O. A., Panasenko, P. V. Mikroelektronnye SVCh ustroistva. M.: Vysshaya shkola, 1987. - 94 p.
3. Krendelev, A. E. Technological methods of the microstrip fabrication for the EHF HICs. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature, 2002, No 4. - Pp. 33-39.
4. Sokol, V. A., Shimanovich, D. L., Litvinovich, G. V. Technological techniques of Al-Al_2O_3 microstructures formation for powerful electromechanical systems. // Doklady BGUIR, 2012, No 8 (70). - Pp. 44-49.
5. Litvinovich, G. V., Shimanovich, D. L. Technological particularities of the circuit board with the built-in interconnection system formation for the anode alumina substrate. // Doklady BGUIR, 2013, No 3 (73).). - Pp. 39-44.
6. Sokol, V. A., Yakovtseva, V. A., Shimanovich, D. L. Application features of porous alumina. // Doklady BGUIR, 2012, No 2 (64). - Pp. 21-27.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАДИОЛИНИИ БЛИЖНЕГО ДЕЙСТВИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. М. Артюшенко[1], В. И. Воловач[2]

[1]Технологический университет (МГОТУ), Королев, Россия
[2]Поволжский государственный университет сервиса (ПВГУС), Тольятти, Россия

Аннотация. Произведен энергетический расчет, заключающийся в определении мощности сигнала на входе приемного устройства в точке приема. Показано, что в этом случае увеличение расстояния между приемником и передатчиком приводит экспоненциальному спаду мощности сигнала на входе приемника. Показано, что при работе дуплексного канала на малых расстояниях его помехоустойчивость определяющим образом зависит от замирания сигналов, возникающих вследствие интерференции прямого и отраженного от подстилающей поверхности электромагнитного поля в приемной апертуре. Приведены выражения, позволяющие определить вероятность ошибки элемента передаваемого сигнала при использовании амплитудной модуляции. Показано, что огибающая сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, носит случайный характер. Рассмотрены две практически важные модели отражений: с доминирующей блестящей точкой и без доминирующей блестящей точки.

Ключевые слова: радиолиния ближнего действия; дуплексный канал; вероятность ошибки; рупорная антенна; замирания сигнала.

ENERGY CALCULATION AND NOISE IMMUNITY OF THE SHORT-RANGE RADIO LINE OF MICROWAVE BAND

V. M. Artyushenko[1], V. I. Volovach[2]

[1]Technological university (MSRTU), Korolev, Russia
[2]Volga region state university of service (VRSUS), Togliatty, Russia

Abstract. The energy calculation consisting in determining the signal power at the input of the receiving device at the receiving point is made. It is shown that in this case the increase in the distance between the receiver and the transmitter leads to an exponential decrease in the signal power at the input of the receiver. It is shown that when the duplex channel is operated at short distances, its noise immunity depends on the fading of signals arising from the interference of the direct and reflected electromagnetic field from the underlying surface in the receiving aperture. Expressions are given to determine the probability of error of the transmitted signal element when using amplitude modulation. It is shown that the envelope of the signal reflected from the underlying surface is random. We consider two practically important models of reflection: with a dominant brilliant point and no dominant brilliant points.

Keywords: short-range radio line; duplex channel; error probability; horn antenna; signal fading.

1. Введение

В настоящее время все технологически развитые страны решают вопросы автоматизированного управления движением различного рода транспортных средств (ТС), например, трамваев, троллейбусов, автобусов, поездов метрополитена и т.п. [1, 2].

Одним из важнейших звеньев в таких системах управления ТС является канал обмена информацией. Исследования показывают, что достаточно эффективным является обмен информацией как в определенных точках маршрутах ТС (остановках, станциях и т.д.), так и при их движении для передачи текущей информации и корректировки программы движения, организуемых в СВЧ диапазоне частот.

Использование СВЧ диапазона обладает целым рядом достоинств как по помехозащищенности, так и по сравнительно простой технической реализации. При этом расстояние между передающим и приемным устройством в таких системах обычно делают минимальным (единицы-десятки метров), что позволяет говорить о работе этих систем в условиях ближнего действия [3].

Информационный СВЧ канал представляет собой радиолинию ближнего действия (РБД), служащую для передачи дискретной информации между ТС (мобильный модуль) и наземным пунктом (стационарный модуль). Вероятность ошибочного приема P_0 задается не более 10^{-6} на десятичный знак. При этом объем информации, передаваемый за 10 секунд, может достигать десятков Мбит.

В состав РБД входят мобильные и стационарные модули устройств передачи, приема и обработки дискретных сигналов [4]. Отметим, что в качестве антенн в РБД должны использоваться антенны с остронаправленной диаграммой направленности (ДН), например, пирамидальные рупорные антенны [5]. Порядок их расчета приведен авторами ранее в [4, 6].

Остановимся более подробно на энергетическом расчете и определении помехоустойчивости дуплексного канала ближнего действия в условиях замираний сигнала.

2. Энергетический расчет

Энергетический расчет заключается в определении мощности сигнала в месте приема $P_{\text{прм}}$ и расчета отношения энергии сигнала $E_{\text{с}}$ к спектральной плотности мощности помехи N_0

$$q^2 = E_c^2 \big/ H_0^2 \ .$$

Рассчитаем мощность сигнала на входе приемника при заданной выходной мощности передатчика по формуле [7]

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \frac{\lambda^2}{16\pi^2 R_0^2} ,$$

где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика, Вт; $G_{\text{пер}}$, $G_{\text{пр}}$ – соответственно, коэффициент усиления по мощности передающей и приемной антенны; $\eta_{\text{пер}}$, $\eta_{\text{пр}}$ – соответственно, коэффициент полезного действия антенно-фидерного тракта передающего и приемного устройства; R_0 – расстояние между точками передачи и приема, м.

На рис. 1 приведена зависимость $P_{\text{прм}} = f\left(R_0\right)$ для случая, когда при остановке ТС оси ДН передающей и приемной антенн совпадают; при этом принималось $P_{\text{пер}} = 5 \times 10^{-3}$ Вт ; $\eta_{\text{пер}} = \eta_{\text{пр}} \approx 1$; $\lambda = 3 \times 10^{-2}$ м .

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением расстояния между приемником и передатчиком мощность сигнала на входе приемника падает по экспоненциальному закону. Так, при R_0 = 10 м величина мощности сигнала составляет $17{,}5\times10^{-7}$ Вт; при R_0 = 50 м мощность уменьшилась до $0{,}7\times10^{-7}$ Вт.

На практике место остановки ТС случайно, и может быть ограничено лишь некоторой зоной $\pm\Delta R = L$. В результате может произойти так, что оси ДН передающей и приемной антенн не совпадут. В этом случае мощность сигнала на входе приемника может быть найдена, исходя из выражения:

$$P_{\text{прм}} = \frac{K}{R_x^2} F(\alpha) F(\beta),$$

где $K = P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \dfrac{\lambda^2}{16\pi^2}$; $R_x = \sqrt{y_0^2 + (x_0 + x)^2}$; x_0, y_0 – координаты точка установки передающей антенны, характеризующейся ДН $F(\alpha)$; x – текущее местоположение антенны, установленное на ТС, характеризующееся ДН $F(\beta)$.

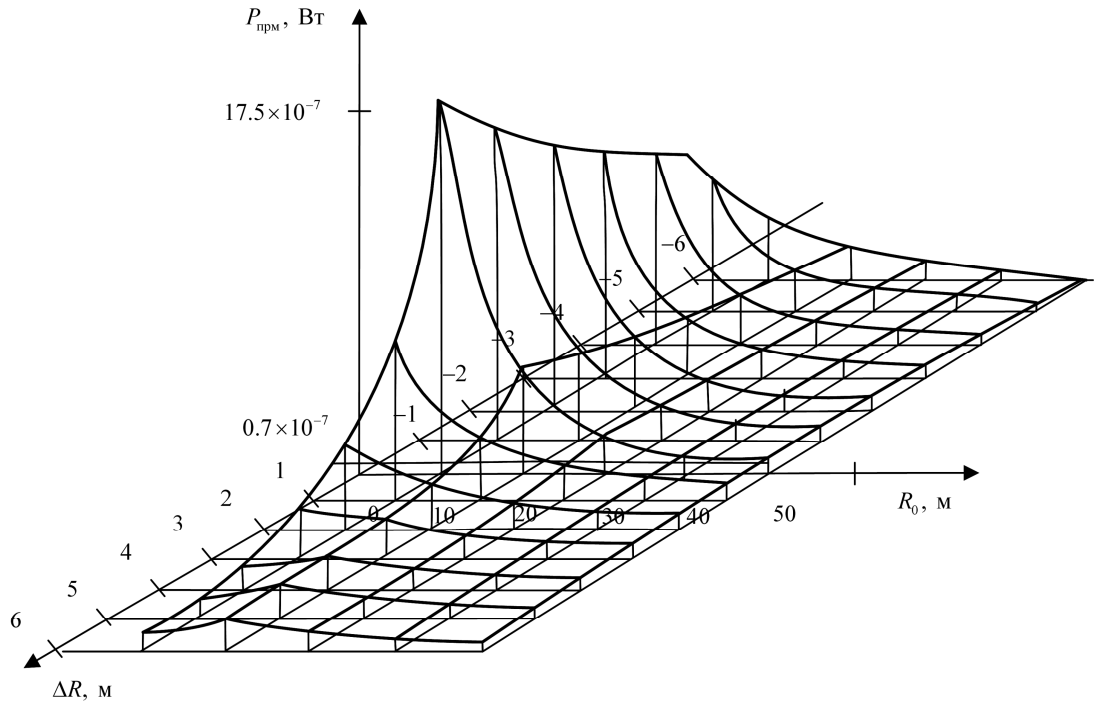


Рис. 1. Зависимость мощность сигнала на входе приемника от расстояний R_0 и ΔR

Зависимость $P_{\text{прм}} = f(R_0; \Delta R)$, когда оси ДН антенн не совпадают, также представлены на рис. 1.

3. Помехоустойчивость дуплексного канала

При работе дуплексного канала на в условиях ближнего действия определяющее воздействие на его помехоустойчивость оказывают замирания сигналов. Они возникают

в результате интерференции прямого $\dot{E}_{\text{пр}}$ и отраженного от подстилающей поверхности $\dot{E}_{\text{отр}}$ электромагнитного поля в приемной апертуре.

Суммарное поле $\dot{E}_{\Sigma}$ при одиночном приеме можно описать соотношением

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_{\text{пр}} + \dot{E}_{\text{отр}} = 0,5\sqrt{30P_1\eta_1G_1}F_{\text{пр}}(\alpha)\exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda}r_1\right\}F_{\text{пр}}(\beta) + \\ + \int_{D(x,y)}\left|\Phi(x,y)\right|\frac{\sqrt{30P_1\eta_1G_1}}{r_2}F_{\text{пр}}(\alpha+\Delta\alpha)F_{\text{пр}}(\beta+\Delta\beta)\exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda}r_2 + i\beta_{\text{ф}}\right\}ds(x,y), \quad (1)$$

где P_1, η_1, G_1 – соответственно, мощность излучения, КПД и коэффициент усиления антенно-фидерного тракта передающей антенны; $F_{\text{пр}}(\alpha)$, $F_{\text{пр}}(\beta)$ – соответственно, характеристики направленности передающей и приемной антенны; α – угол между направлением максимального излучения и направлением на центр приемной апертуры; β – угол между максимумом ДН приемной антенны и направленности на передающую антенну; углы $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ и значения r_1 = AB и r_2 = AC + CB пояснены на рис. 2; $\left|\Phi(x,y)\right|$ – модуль коэффициента отражения, учитывающий уменьшение амплитуды волны при отражении от подстилающей поверхности; $\beta_{\text{ф}}$ – фаза коэффициента отражения, учитывающая изменение фазы при отражении; $C(x, y)$ – текущая точка подстилающей поверхности $D(x, y)$, формирующей отраженную волну.

В амплитудных множителях можно приближенно считать, что $r_1 \approx r_2 \approx r$. В этом случае выражение (1) можно преобразовать к виду:

$$\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_0\left[F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta) + J_1(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)\right] = \dot{E}_0V,$$

где

$$J_1(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta) = \sum_{i=1}^{N}\int_{D(x,y)}F_{\text{пр}}\left(\alpha+\Delta\alpha(x,y)\right)F_{\text{пр}}\left(\beta+\Delta\beta(x,y)\right)\times \\ \times\left|\Phi(x,y)\right|\exp\left\{i\left[k\Delta r(x,y)+\beta_{\text{ф}}(x,y)\right]\right\}ds(x,y);$$

$\dot{E}_0 = \frac{1}{r}\sqrt{30P_1\eta_1G_1}\exp\left\{i\frac{2\pi}{\lambda}r_1\right\}$ – напряженность поля при распространении в свободном пространстве; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\Delta r(x,y)$ – расстояние до текущей точки $C(x, y)$ подстилающей поверхности $D(x, y)$, формирующей отраженную волну.

В [7] показано, что выражение в квадратных скобках представляет собой множитель ослабления, характеризующий интерференцию прямой и отраженной волн.

Для практических приложений наибольший интерес представляет модуль множителя ослабления

$$\left|V\right| = \sqrt{F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta) + \text{Re}\,J_1(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)^2 + \text{Im}J_1(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)^2}.$$

Для вычисления $J_1(.)$ воспользуемся методом стационарной фазы, представив $D(x, y)$ в виде совокупности N участков, в пределах каждого из которых волна может считаться локально плоской.

В этом случае

$$J_1(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)=\sum_{i=1}^{N}\int_{D(x,y)}F_{\text{пр}}\left(\alpha+\Delta\alpha(x,y)\right)F_{\text{пр}}\left(\beta+\Delta\beta(x,y)\right)\times$$

$$\times\left|\Phi(x,y)\right|\exp\left\{i\left[k\Delta r(x,y)+\beta_{\text{ф}}(x,y)\right]\right\}=\sum_{i=1}^{N}F_{\text{пр}}\left(\alpha+\Delta\alpha(x_i,y_i)\right)\times \qquad (2)$$

$$\times F_{\text{пр}}\left(\beta+\Delta\beta(x_i,y_i)\right)\left|\Phi(x_i,y_i)\right|\exp\left\{i\left[k\Delta r(x_i,y_i)+\beta_{\text{ф}}(x_i,y_i)\right]\right\},$$

где (x_i, y_i) – координаты точки стационарной фазы локального участка $D_i(x, y)$.

Нетрудно видеть, что в случае, когда размеры отраженной поверхности $D(x, y)$ значительно меньше расстояний r_1 и r_2, $N = 1$ и множитель ослабления может быть с учетом обозначений преобразован к известному соотношению

$$|V|=\left(F^2(\alpha,\beta)+F(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)^2\left|\Phi(x,y)\right|2F(\alpha,\beta)\times\right.$$
$$\left.\times F(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)\left|\Phi(x,y)\right|\cos\varphi.\right. \qquad (3)$$

Здесь $F^2(\alpha,\beta)=F_{\text{пр}}(\alpha)F_{\text{пр}}(\beta)$; $F(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)=F_{\text{пр}}(\alpha+\Delta\alpha)F_{\text{пр}}(\beta+\Delta\beta)$; φ – фаза сигнала.

Перейдем далее непосредственно к рассмотрению помехоустойчивости дуплексного канала, работающего в условиях ближнего действия.

Вероятность ошибки элемента передаваемого сигнала при использовании амплитудной модуляции и некогерентного приема определяется соотношением [8]:

$$P_{\text{ош}}=\frac{1}{2}\exp\left\{-\frac{q^2}{2}|V|^2\right\}, \qquad (4)$$

где $q^2=P_{\text{с}}T/N_0^2$; $P_{\text{с}}$ – мощность элемента сигнала длительностью T; N_0^2 – спектральная плотность белого нормального шума.

Заметим, что величина q^2 играет роль отношения сигнала к шуму (ОСШ).

Обозначив в (3) $A_0=F^2(\alpha,\beta)$ и $B_0=F^2(\alpha,\Delta\alpha,\beta,\Delta\beta)\left|\Phi(x,y)\right|$, преобразуем (4) к виду

$$P_{\text{ош}}=\frac{1}{2}\exp\left\{-\frac{q^2}{2}\left(A_0^2+B_0^2+2A_0B_0\cos\varphi\right)\right\}.$$

Как правило, относительно распределения фаз делается предположение

$$\varphi\in W(\varphi)=\begin{cases}\dfrac{1}{2\pi}, & \varphi\in[-\pi;\pi];\\ 0, & \varphi\notin[-\pi;\pi],\end{cases}$$

где $W(\varphi)$ – плотность распределения вероятностей (ПРВ) фазы.

С учетом сделанных предположений вероятность ошибки будет

$$P_{\text{ош}}\left(\frac{q}{A_0,B_0}\right)=\int_{-\pi}^{\pi}P_{\text{ош}}\left(\frac{q}{A_0,B_0,\varphi}\right)W(\varphi)=\frac{1}{4\pi}\exp\left\{-\frac{q^2}{2}\left(A_0^2+B_0^2\right)\right\}I_0\left(A_0B_0q^2\right), \qquad (5)$$

где $I_0(.)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Выражение (5) характеризует случайный характер огибающей сигнала, отраженного от подстилающей поверхности.

Так как $D(x, y)$ может рассматриваться как протяженная поверхность, то относительно ПРВ $W(B_0)$ справедливы те же предположения, что и для протяженных объектов.

Интерес представляет две модели отражений:

– с доминирующей блестящей точкой

$$W\left(B_0\right)=\frac{B_0}{\sigma_B^2}\exp\left\{-\frac{B_0^2+a_b^2}{2\sigma_B^2}\right\}I_0\left(B_0a_b\right) \tag{6}$$

где σ_B^2 – дисперсия флуктуаций отраженного от поверхности $D(x, y)$ сигнала; a_b – характеризует амплитуду сигнала, отраженного от доминирующей блестящей точки;

– без доминирующей блестящей точки

$$W\left(B_0\right)=\frac{2m^m B_0^{2m-1}}{\Gamma\left(m\right)\sigma_B^{2m}}\exp\left\{-\frac{mB_0^2}{\sigma_B^2}\right\}, \tag{7}$$

где m – параметр распределения; Γ(.) – гамма-функция.

Соотношение (7), называемое распределением Накагами, является более общим, чем распределение Рэлея. При $m = 1$ выражение (7) переходит в рэлеевский закон, а при $m > 1$ его можно использовать даже для аппроксимации обобщенного рэлеевского закона.

Рассмотрим эти случаи несколько подробнее.

Произведя усреднение (5) по параметру B_0 подчиняющемуся закону распределения (6), получим, что вероятность ошибки в этом случае будет определяться так:

$$P_{\text{ош}}=\frac{1}{4\pi\sigma_B^2}\exp\left\{-\frac{q^2A_0^2}{2}-\frac{a_b^2}{2\sigma_B^2}\right\}\int_0^\infty B_0\exp\left\{-B_0^2\left(\frac{q^2}{2}-\frac{1}{2\sigma_B^2}\right)\right\}I_0\left(\frac{B_0a_b}{\sigma_B^2}\right)I_0\left(A_0B_0q\right)dB_0.$$

Воспользовавшись тем, что интеграл в правой части является табличным [9], запишем $P_{\text{ош}}$ в следующем виде

$$P_{\text{ош}}=\frac{\exp\left\{-Q\right\}}{2\pi\sigma_B^4}I_0\left(\frac{A_0a_b}{\sigma_B^2q}\right), \tag{8}$$

где

$$Q=\frac{\left(q^4A_0^2\sigma_B^4+q^4\sigma_B^2a_b^2+q^2\,2A_0^2\sigma_B^4+2a_b\right)}{2q^4\sigma_B^4}.$$

В случае, когда $\left(a_b^2+A_0^2\right)<<q$ выражение (8) может быть упрощено при $\sigma_B^2=1$

$$P_{\text{ош}}=\frac{\exp\left\{-\dfrac{q^2A_0^2\sigma_B^2+a_b^2}{2\sigma_B^2}\right\}}{2\pi\sigma_B^2q^4}I_0\left(\frac{A_0a_b}{\sigma_B^2q}\right). \tag{9}$$

Зависимости $P_{\text{ош}}=f\left(q^2\right)$ при различных значениях величин A_0, a_b и σ_B^2 представлены на рис. 2.

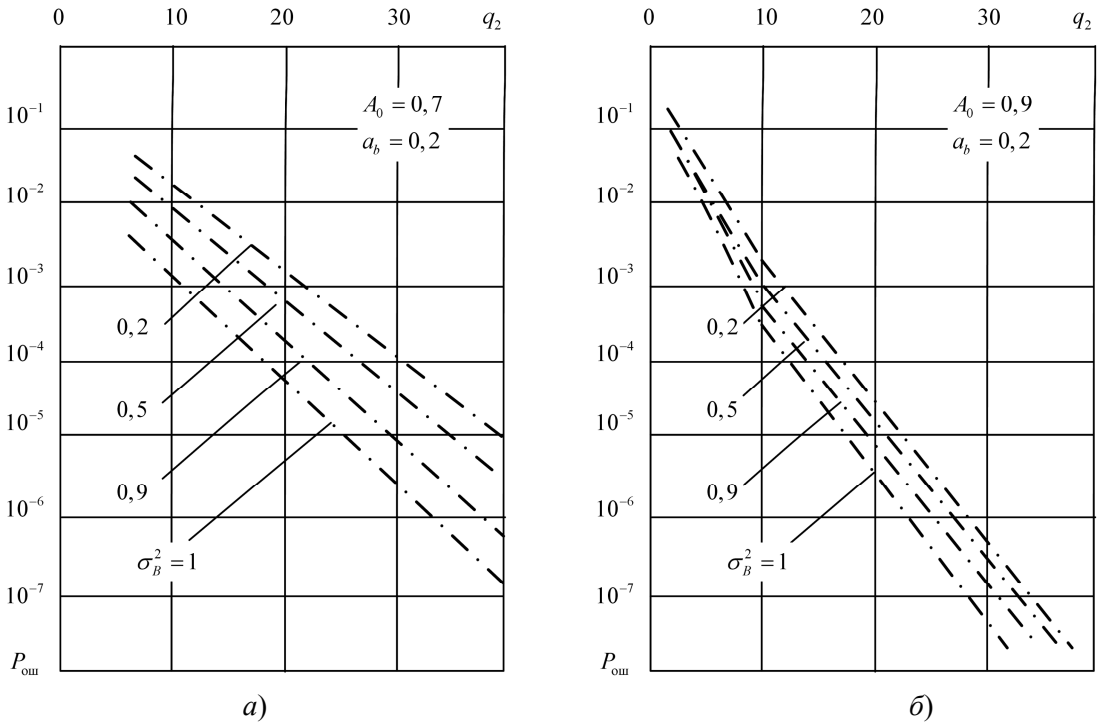


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки от величины ОСШ при различных значениях A_0, равных: *а* – 0,7; *б* – 0,9

Перейдем к рассмотрению случая, когда $W(B_0)$ описывается выражением (7). Тогда, воспользовавшись известным соотношением [9], получим

$$P_{ош} = \frac{m^m \exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2}{2}\right\}}{4\pi\sigma_B^{2m}\chi^m} \; {}_1F_1\left(m, 1, -\frac{A^2 q^4}{4\chi}\right), \qquad (10)$$

где $\chi = \frac{q^2}{2} + \frac{m}{\sigma_B^2}$; ${}_1F_1(\alpha, \beta, \gamma)$ – вырожденная гиперболическая функция.

В случае при m = 1, то есть когда $W(B_0)$ представляет собой рэлеевское распределение, можно получить согласно [6] выражение

$$P_{ош} = \frac{\exp\left\{-\frac{q^2 A_0^2}{2}\left(1 + \frac{q^2}{2\chi}\right)\right\}}{4\pi\sigma_B^2\chi}. \qquad (11)$$

Зависимости $P_{ош} = f(q)$, при различных значениях величин A_0 и σ_B^2, представлены на рис. 3.

4. Заключение

Осуществлен энергетический расчет радиолинии ближнего действия СВЧ диапазона. Показано, что увеличение расстояния между приемником и передатчиком ведет к экспоненциальному спаду мощности сигнала на входе приемника.

При работе дуплексного канала в условиях ближнего действия его помехоустойчивость определяющим образом зависит от замирания сигналов,

возникающих вследствие интерференции прямого и отраженного от подстилающей поверхности электромагнитного поля в приемной апертуре.

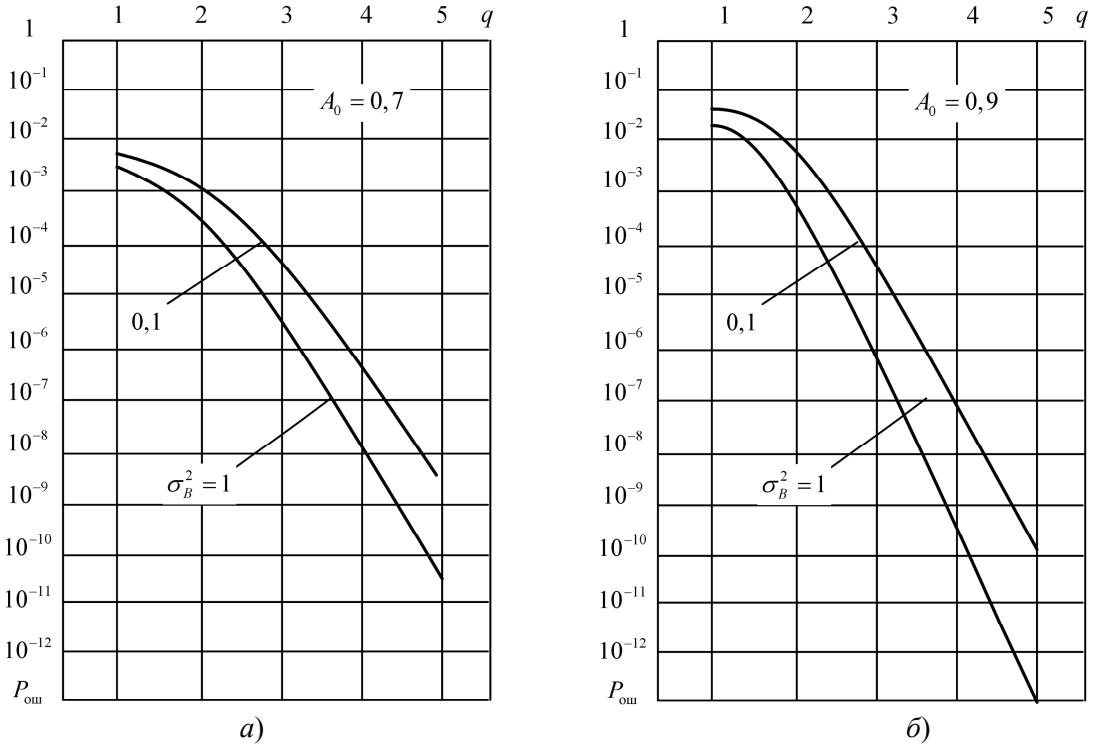


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки от величины ОСШ при различных значениях σ_B^2 для случаев: *а* – $A_0 = 0,7$; *б* – $A_0 = 0,9$

Показано, что огибающая сигнала, отраженного от подстилающей поверхности, носит случайный характер. Результаты моделирования помехоустойчивости показали, что вероятность ошибки в дуплексном канале в условиях замирания СВЧ сигнала может достигать менее $10^{-6}…10^{-8}$ на знак. Рассмотрены две практически важные модели отражений: с доминирующей блестящей точкой и без доминирующей блестящей точки, для каждой из которых найдены выражения для определения вероятности ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гапанович В. А., Грачев А. А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах. М.: Маршрут, 2006. – 544 с.
2. Исаков О. Вопросы совершенствования АСУ железнодорожного транспорта. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 224 с.
3. Воловач В. И. Методы и алгоритмы анализа радиотехнических устройств ближнего действия. М.: Радио и связь, 2013. – 228 с.
4. Артюшенко В. М., Воловач В. И. Организация информационного сверхвысокочастотного канала ближнего действия, устойчивого к замираниям сигнала // Информационно-технологический вестник, 2018, № 1(15). – С. 72-83.
5. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. – 427 с.
6. Артюшенко В. М., Воловач В. И. Передача дискретной информации в радиоканале ближнего действия СВЧ-диапазона // Электромагнитные волны и электронные системы, 2018, Т. 23, № 2. – С. 40-46.

7. Айзенберг Г. З., Ямпольский В. Г., Терешин О. Н. Антенны УКВ; Под ред. Г. З. Айзенберга. В 2 ч. М.: Связь, 1977. – 384 с.
8. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
9. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960. – 360 с.

REFERENCES

1. Gapanovich, V. A., Grachev, A. A. Systems of automation and information technologies of transportation management on the Railways. M.: The Route, 2006. – 544 p.
2. Isakov O. Issues of improvement of the automated control system of railway transport. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 224 p.
3. Volovach V. I. Methods and algorithms for the analysis of radio devices short-range. M.: Radio and communication, 2013. – 228 p.
4. Theoretical bases of radar / A. A. Korostelev, N. F. Klyuev, Yu. A. Melnik, etc.; ed. by V. E. Dulevich. M.: Sov. radio, 1978. – 608 p.
5. Sazonov D. M. Antennas and microwave device. M.: Higher school, 1988. – 427 p.
6. Artyushenko V. M., V. I. Volovach. Transmission of discrete information in the radio channel short-range microwave band // Electromagnetic waves and electronic systems, 2018, Vol. 23, No. 2. – P. 40-46.
7. Artyushenko V. M., Volovach V. I., Ivanov V. V. the Statistical characteristics of durations of the emission envelopes of signals reflected from extended objects // radio engineering, 2015, № 2. – P. 54-61.
8. Artyushenko V. M., Volovach V. I. Study of the spectrum of the Doppler signal reflected from the moving extended object // Successes of modern Radioelectronics, 2015, № 11. – P. 58-66.
9. Artyushenko V. M., Volovach V. I. Estimation of error of measurement of frequency of the signal reflected from the extended object on the background of additive non-Gaussian noise // Radar, navigation, communication. XXII international scientific and technical conference. Vol. 1. Voronezh, 2016. – P. 345-354.

ОПТИМАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

О. В. Горячкин[1]

[1]Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), Самара, Россия

Аннотация. В докладе представлены байесовские алгоритмы формирования многомерных радиолокационных изображений в многопозиционных системах с синтезированной апертурой в условиях априорной неопределенности. Для данной задачи предложен алгоритм MAB, использующий смесь распределений. Показано применение вариационного байесовского подхода к построению алгоритмов синтеза апертуры.

Ключевые слова: многопозиционные радиолокационные системы с синтезированной апертурой; радиотехнический мониторинг; дистанционное зондирование земли; вариационный байесовский подход; максимум апостериорной вероятности.

OPTIMAL SIGNAL PROCESSING IN MULTISTATIC SAR

O. V. Goriachkin[1]

[1]Volga state university of telecommunication and informatics (VSUTI), Samara, Russia

Abstract. The report presents bayesian algorithms for generating multidimensional radar images in multistatic systems with synthesized aperture under conditions of a priori uncertainty. For this problem, an maximum posteriori probability algorithm using a mixture of distributions was proposed. The application of the variational Bayesian approach to the construction of aperture synthesis algorithms is shown.

Keywords: multistatic SAR; radio monitoring; remote sensing earth; variational bayes approach; maximum posteriori probability.

1. Введение

Радиолокационная система (радиолокатор) с синтезированной апертурой (РСА) это радиотехническая система в которой перемещение физической антенны в пространстве используется для увеличения углового разрешения, путем формирования синтетической апертуры в результате когерентной обработки сигналов.

Многопозиционная радиолокационная система с синтезированием апертуры антенны (МПРСА) это радиолокационная система с разнесёнными в пространстве передающими и приёмными позициями, в которой пространственное разрешение целей для последующего извлечения информации осуществляется с использованием метода синтезирования апертуры антенны [1-4].

Признаком МПРСА можно считать одновременное облучение цели сигналами одного или нескольких разнесённых в пространстве передатчиков и приём отражённых сигналов одним или несколькими приёмниками при реализации когерентной обработки всех отражённых сигналов и наличия движущихся позиций для формирования синтезированных апертур.

Простейшей МПРСА можно считать бистатическую РСА (БиРСА), в которой разнесены приёмник и передатчик, при этом движение передатчика и/или приёмника используется для формирования синтезированной апертуры при наблюдении цели на поверхности Земли.

Добавление к БиРСА в пространстве дополнительного приёмника или передатчика позволяет получить тристатическую РСА (ТриРСА) и соответственно три пространственные координаты цели на фоне поверхности Земли за счёт организации интерферометрического наблюдения.

Квадристатическая РСА (КвадриРСА) обеспечивает дополнительные возможности по одновременному измерению компонент векторов скорости и/или положения цели на поверхности Земли.

В целом, мультистатические (многопозиционные) РСА обеспечивают следующие преимущества над обычными (однопозиционными) РСА:

• возможность разрешения целей, определения их координат и скорости в трёхмерном пространстве;

• возможность обеспечения скрытности работы приёмных позиций МПРСА;

• возможность увеличения пространственной разрешающей способности, за счёт когерентного суммирования сигналов в соседних частотных диапазонах и увеличения времени синтеза апертуры;

• возможность компенсации эффектов распространения радиоволн.

В качестве недостатка МПРСА можно упомянуть необходимость обеспечения синхронизации приёмных и передающих элементов по несущим частотам, периоду следования зондирующих импульсов, синхронизации по времени и зоне наблюдения.

На рисунке 1. схематически показана геометрия МПРСА, содержащей несколько радиопередатчиков и приёмников.

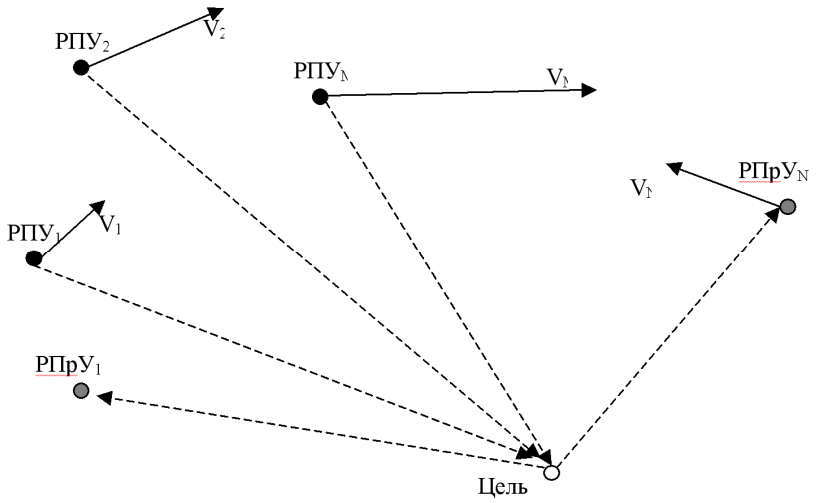


Рис. 1. Геометрия МПРСА, состоящей из M передатчиков и N приёмников

Сигнал *j*-го передатчика, отражённый от цели с координатами *r*, принятый *i*-м приёмником можно записать в виде

$$\dot{s}_{i,j}(t) = \int_D G_{i,j}(t,r)\,\dot{s}_{0j}\left(t-\tau_{i,j}(t,r)\right)\dot{\xi}_{i,j}(r)\,dr + \dot{n}_i(t), \quad (1)$$

где $\dot{\xi}_{i,j}(r)$ – коэффициент переотражения элемента поверхности с координатами r, сигнала j-го передатчика в направлении i-го приёмника, $\dot{n}_i(t)$ – комплексный гауссовский шум i-го канала приёма, D – область переотражения, $G_{i,j}(t,r)$ – вещественная весовая функция, учитывающая влияние диаграмм направленности приёмных и передающих антенн. Координаты различных приёмников и передатчиков могут совпадать, когда выражение (1) описывает различные поляризационные и частотные каналы.

На тот случай, когда сигналы различных передатчиков складываются в одном приёмнике, можно ввести понятие смешивающей матрицы **A**. Т.о. получим следующее выражение

$$\dot{s}_i(t) = \sum_{j=1}^{M} a_{i,j} \int_D G_{i,j}(t,r)\,\dot{s}_{0j}\left(t-\tau_{i,j}(t,r)\right)\dot{\xi}_{i,j}(r)\,dr + \dot{n}_i(t). \quad (2)$$

Если **A** – квадратная единичная матрица, то соответствующие каналы приёма и передачи разнесены во времени, пространстве или частотному диапазону, и мы имеем совокупность бистатических или моностатических РСА.

2. Алгоритм максимума правдоподобия (МП)

Используем далее следующие обозначения $\boldsymbol{\Xi}(r)$ – матрица коэффициентов переотражения $\dot{\xi}_{i,j}(r), i=1,N$, $j=1,M$, $\mathbf{s}(t)$ – вектор сигналов $\dot{s}_i(t), i=1,N$ в приёмниках МППСА. Будем искать алгоритмы оптимального приёма в рамках байесовского подхода. Наиболее робастный к априорной информации алгоритм можно получить, использовав правило максимума правдоподобия (МП)

$$\hat{\boldsymbol{\Xi}}(r) = \arg\max_{\boldsymbol{\Xi}(r)} p\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right). \quad (3)$$

Пусть обратная ковариационная функция шума $B_{n_i}^{-1}(t_1,t_2) = \frac{2}{N_i}\delta(t_1-t_2)$, тогда получим следующее выражение для логарифма функционала правдоподобия

$$l\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) = const - \sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N_i}\int\left|\left(\dot{s}_i(t) - \sum_{j=1}^{M} a_{i,j}\int_D G_{i,j}(t,r)\,\dot{s}_{0j}\left(t-\tau_{i,j}(t,r)\right)\dot{\xi}_{i,j}(r)\,dr\right)\right|^2 dt \quad (4)$$

Введём следующие обозначения

$$\boldsymbol{\Phi}_{i,j_1,j_2}(r_1,r_2) = \int G_{i,j_1}(t,r_1)\,\dot{s}_{0j_1}\left(t-\tau_{i,j_1}(t,r_1)\right)G_{i,j_2}(t,r_2)\,s^*_{0j_2}\left(t-\tau_{i,j_2}(t,r_2)\right)dt, \quad (5)$$

$$K_{i,j}(r) = \int \dot{s}_i(t)\,G_{i,j}(t,r)\,s^*_{0j}\left(t-\tau_{i,j}(t,r)\right)dt. \quad (6)$$

Тогда логарифм функционала правдоподобия можно записать в виде

$$l\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) = const + \sum_{i=1}^{N}\frac{2}{N_i}\sum_{j=1}^{M} a_{i,j}\,\mathrm{Re}\left[\int_D K_{i,j}^{\ *}(r)\,\dot{\xi}_{i,j}(r)dr\right] - \\ -\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N_i}\sum_{j_1=1}^{M}\sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1}a^{*}_{\ i,j_2}\iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1,r_2)\dot{\xi}_{i,j_1}(r_1)\,\xi_{i,j_2}^{\ *}(r_2)\,dr_1dr_2 \tag{7}$$

Пусть $\dot{\xi}_{i,j}(r) = \xi_{Ri,j}(r) + j\xi_{Ii,j}(r)$, тогда

$$l\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right)=\mathrm{const}+\sum_{i=1}^{N}\frac{2}{N_i}\sum_{j=1}^{M} a_{i,j}\mathrm{Re}\left[\int_D K_{i,j}^{*}(r)\xi_{Ri,j}(r)dr\right]+\sum_{i=1}^{N}\frac{2}{N_i}\sum_{j=1}^{M} a_{i,j}\mathrm{Re}\left[\int_D K_{i,j}^{*}(r)\,j\xi_{Ii,j}(r)dr\right]- \\ -\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N_i}\sum_{j_1=1}^{M}\sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1}a^{*}_{\ i,j_2}\iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1,r_2)\xi_{Ri,j_1}(r_1)\,\xi_{Ri,j_2}(r_2)\,dr_1dr_2 - \\ -\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N_i}\sum_{j_1=1}^{M}\sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1}a^{*}_{\ i,j_2}\iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1,r_2)\xi_{Ii,j_1}(r_1)\,\xi_{Ii,j_2}(r_2)\,dr_1dr_2 + \\ + j\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N_i}\sum_{j_1=1}^{M}\sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1}a^{*}_{\ i,j_2}\iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1,r_2)\xi_{Ii,j_1}(r_1)\,\xi_{Ri,j_2}(r_2)\,dr_1dr_2 \\ +j\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N_i}\sum_{j_1=1}^{M}\sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1}a^{*}_{\ i,j_2}\iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1,r_2)\xi_{Ri,j_1}(r_1)\,\xi_{Ii,j_2}(r_2)\,dr_1dr_2. \tag{8}$$

Учтём, что $\Phi_{k,j,l}(r_1,r_2) = \Phi_{k,l,j}(r_2,r_1)$, продифференцируем полученный функционал по $\xi_{Rk,l}(r)$, получим

$$l'\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) = \frac{2}{N_k}a_{k,l}\,\mathrm{Re}\left[\int_D K_{k,l}^{\ *}(r)\,g(r)dr\right] + \\ -\frac{2}{N_k}\sum_{j=1}^{M} a_{k,l}a^{*}_{\ k,j}\iint_D \Phi_{k,l,j}(r_1,r_2)g(r_1)\,\xi_{Rk,j}(r_2)\,dr_1dr_2. \tag{9}$$

Для нахождения решения приравняем полученный дифференциал к нулю и учтём, что равенство должно выполняться для любой функции $g(r)$, тогда

$$\mathrm{Re}\left[\int_D K_{k,l}^{\ *}(r)\,g(r)dr\right] - \iint_D\sum_{j=1}^{M} a^{*}_{\ k,j}\Phi_{k,l,j}(r,r_2)\xi_{Rk,j}(r_2)\,dr_2\,g(r)\,dr = 0,$$

$$\int_D\sum_{j=1}^{M} a_{k,j}\Phi_{k,l,j}(r,r_2)\xi_{Rk,j}(r_2)\,dr_2 = \mathrm{Re}\left[K_{k,l}^{\ *}(r)\right]. \tag{10}$$

Продифференцируем функционал (8) по $\xi_I(r)$, решая полученное уравнение, получим

$$\int_D\sum_{j=1}^{M} a_{k,j}\Phi_{k,l,j}(r,r_2)\xi_{Ik,j}(r_2)\,dr_2 = \mathrm{Im}\left[K_{k,l}^{\ *}(r)\right]. \tag{11}$$

Для комплексного РЛИ решение имеет вид

$$\int_D\sum_{j=1}^{M} a_{k,j}\Phi_{k,l,j}(r,r_2)\dot{\xi}_{k,j}(r_2)\,dr_2 = \dot{K}_{k,l}(r). \tag{12}$$

Последнее уравнение является векторным уравнением Фредгольма I-го рода для вектора неизвестных комплексных РЛИ.

3. Алгоритм максимума апостериорной вероятности (МАВ)

Рассмотрим более эффективный алгоритм – алгоритм максимума апостериорной вероятности (МАВ), который учитывает априорную статистику измеряемого изображения.

$$\hat{\boldsymbol{\Xi}}(r) = \arg\max_{\boldsymbol{\Xi}(r)} p\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) p\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right). \tag{13}$$

Пусть коэффициенты переотражения $\dot{\xi}_{i,j}(r), i = 1, N$, $j = 1, M$, являются реализациями независимых гауссовских комплексных случайных процессов с корреляционными функциями $B_{\xi_{i,j}}(r_1, r_2)$ и нулевыми математическими ожиданиями.

$$l\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) = \text{const} - \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N_i} \int \left| \left(\dot{s}_i(t) - \sum_{j=1}^{M} a_{i,j} \int_D G_{i,j}(t,r)\, \dot{s}_{0j}\left(t - \tau_{i,j}(t,r)\right) \dot{\xi}_{i,j}(r)\, dr \right) \right|^2 dt - \tag{14}$$

$$- \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \int_D \int_D \dot{\xi}_{i,j}(r_1) \dot{\xi}^*_{i,j}(r_2) B^{-1}_{\xi_{i,j}}(r_1, r_2)\, dr_1 dr_2.$$

Тогда

$$\begin{aligned} l\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) &= const + \sum_{i=1}^{N} \frac{2}{N_i} \sum_{j=1}^{M} a_{i,j} \operatorname{Re}\left[\int_D K_{i,j}^{*}(r)\, \xi_{Ri,j}(r) dr \right] + \\ &+ \sum_{i=1}^{N} \frac{2}{N_i} \sum_{j=1}^{M} a_{i,j} \operatorname{Re}\left[\int_D K_{i,j}^{*}(r)\, j\xi_{Ii,j}(r) dr \right] - \\ &- \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N_i} \sum_{j_1=1}^{M} \sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1} a^{*}_{i,j_2} \iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1, r_2) \xi_{Ri,j_1}(r_1) \xi_{Ri,j_2}(r_2)\, dr_1 dr_2 - \\ &- \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{N_i} \sum_{j_1=1}^{M} \sum_{j_2=1}^{M} a_{i,j_1} a^{*}_{i,j_2} \iint_D \Phi_{i,j_1,j_2}(r_1, r_2) \xi_{Ii,j_1}(r_1) \xi_{Ii,j_2}(r_2)\, dr_1 dr_2 - \\ &- \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \int_D \int_D \xi_{Ri,j}(r_1) \xi_{Ri,j}(r_2) B^{-1}_{\xi_{i,j}}(r_1, r_2)\, dr_1 dr_2 - \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} \int_D \int_D \xi_{Ii,j}(r_1) \xi_{Ii,j}(r_2) B^{-1}_{\xi_{i,j}}(r_1, r_2)\, dr_1 dr_2. \end{aligned} \tag{15}$$

Продифференцируем полученный функционал по $\xi_{Rk,l}(r)$, получим

$$\begin{aligned} l'\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r)\right) &= \frac{2}{N_k} a_{k,l} \operatorname{Re}\left[\int_D K_{k,l}^{*}(r)\, g(r) dr \right] + \\ &- \frac{2}{N_k} \sum_{j=1}^{M} a_{k,l} a^{*}_{k,j} \iint_D \Phi_{k,l,j}(r_1, r_2) g(r_1) \xi_{Rk,j}(r_2)\, dr_1 dr_2 - \\ &- 2 \int_D \int_D g(r_1) \xi_{Rk,l}(r_2) B^{-1}_{\xi_{k,l}}(r_1, r_2)\, dr_1 dr_2. \end{aligned} \tag{16}$$

$$\frac{1}{N_k} \int_D \left(\left(\sum_{j=1}^{M} a_{k,j} \Phi_{k,l,j}(r, r_2) \xi_{Rk,j}(r_2) \right) + B^{-1}_{\xi_{k,l}}(r_1, r_2) \xi_{Rk,l}(r_2) \right) dr_2 = \frac{1}{N_k} \operatorname{Re}\left[K_{k,l}^{*}(r) \right]. \tag{17}$$

Окончательно для комплексного РЛИ решение имеет вид

$$\int_D \left(\frac{1}{N_k} \left(\sum_{j=1}^{M} a_{k,j} \Phi_{k,l,j}(r, r_2) \dot{\xi}_{k,j}(r_2) \right) + B^{-1}_{\xi_{k,l}}(r_1, r_2) \dot{\xi}_{k,l}(r_2) \right) dr_2 = \frac{1}{N_k} \dot{K}_{k,l}(r). \tag{18}$$

Пусть $B_{\xi_{i,j}}^{-1}(r_1, r_2) = \frac{1}{Q_{i,j}}\delta(r_1 - r_2)$, тогда получим уравнение Фредгольма 2-го рода

$$\frac{1}{N_k}\int_D \left(\sum_{j=1}^{M} a_{k,j}\Phi_{k,l,j}(r, r_2)\dot{\xi}_{k,j}(r_2) \right) dr_2 + \frac{1}{Q_{k,l}}\dot{\xi}_{k,l}(r) = \frac{1}{N_k}\dot{K}_{k,l}(r). \qquad (19)$$

Наличие априорного распределения мощный ресурс для повышения качества алгоритма восстановления матрицы коэффициентов переотражения. Однако, этот ресурс эффективен только тогда, когда $p(\boldsymbol{\Xi}(r))$ соответствует статистике реальных изображений. На практике существует большая неопределённость при выборе данных распределений.

В этом случае оказываются эффективными подходы, использующие различные методы адаптации по скрытым переменным априорных распределений [13]. Рассмотрим случай, когда априорное распределение может быть задано смесью распределений вида

$$p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\boldsymbol{\Theta}) = \sum_{n=1}^{L}\theta_n p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\theta_n), \ \sum_{n=1}^{L}\theta_n = 1, \qquad (20)$$

параметры которой, будем определять одновременно с оценкой матрицы коэффициентов переотражений. Тогда алгоритм оценивания имеет вид

$$\hat{\boldsymbol{\Xi}}(r) = \arg\max_{\boldsymbol{\Xi}(r)} p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r))\, p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\hat{\boldsymbol{\Theta}}), \qquad (21)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}} = \arg\max_{\boldsymbol{\Theta}} \int p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r)) p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\boldsymbol{\Theta})\, p(\boldsymbol{\Theta})\, d\boldsymbol{\Xi}(r). \qquad (22)$$

Пусть $p(\boldsymbol{\Theta}) = \prod_{n=1}^{L} p(\theta_n)$, тогда подставляя (20) в (22) получим

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}} = \arg\max_{\boldsymbol{\Theta}} \sum_{l=1}^{L}\theta_l \int p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r)) p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\theta_l)\, d\boldsymbol{\Xi}(r) \prod_{n=1}^{L} p(\theta_n). \qquad (23)$$

Для равномерно распределенных параметров распределений оценки (23) легко получить в виде [2]

$$\hat{\theta}_l = -\frac{\int p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r)) p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\theta_l)\, d\boldsymbol{\Xi}(r)}{\int p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r)) \frac{d}{d\theta_l}\left(p(\boldsymbol{\Xi}(r)|\theta_l) \right) d\boldsymbol{\Xi}(r)}. \qquad (24)$$

4. Алгоритм на основе вариационного байесовского подхода

В последние годы в задачах слепой обработки изображений стал доминирующим вариационный байесовский подход [5-7]. Слепое восстановление изображений — это неопределенная нелинейная обратная задача, требующая оценки большего числа неизвестных переменных, чем имеющиеся наблюдаемые данные. Чтобы найти значимые решения, важна не только предварительная информация о неизвестных, но и надежный подход к их оценке.

В задаче восстановления матрицы коэффициентов переотражений можно использовать вариационный байесовский подход, рассматривая в качестве неизвестных случайных

параметров смешивающую матрицу **A**, вектор спектральных плотностей мощности белого шума **N** и параметры априорных распределений $\boldsymbol{\Theta}$.

Пусть апостериорное распределение неизвестных параметров задачи имеет вид

$$p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\middle|\mathbf{s}(t)\right)=\frac{p\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)p\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\middle|\boldsymbol{\Theta}\right)p\left(\boldsymbol{\Theta},\mathbf{A},\mathbf{N}\right)}{p\left(\mathbf{s}(t)\right)}. \qquad (25)$$

Обычно проинтегрировать распределение вида (25) для получения МАВ оценок неизвестных параметров довольно затруднительно. В этой связи оказывается эффективным подобрать к (25) некоторое удобное распределение, решив следующую вариационную задачу [6,7]

$$\hat{q}\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)=\arg\max_{q(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N})}C_{KL}\left(q\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)\middle\|\,p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\middle|\mathbf{s}(t)\right)\right), \qquad (25)$$

где $q\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)=q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})$.

Тогда оценку аппроксимирующего апостериорного распределения для матрицы коэффициентов переотражений найдём следующим образом

$$\begin{aligned}
&C_{KL}\left(q\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)\middle\|\,p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\middle|\mathbf{s}(t)\right)\right)=\\
&=\int q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(\frac{q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})}{p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\middle|\mathbf{s}(t)\right)}\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)\,d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}=\\
&=\int q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)\,d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}-\\
&-\int q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\middle|\mathbf{s}(t)\right)\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)\,d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}=\\
&=\int q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)\ln\left(q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)+\int q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\right)d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}-\\
&-\int q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N},\mathbf{s}(t)\right)\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)\,d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}+const,
\end{aligned} \qquad (26)$$

где $C_{KL}\left(q\middle\|\,p\right)$ – расстояние Кульбака-Лейблера для плотностей соответствующих распределений.

Продифференцируем полученный функционал по $q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)$ и приравняем полученный дифференциал нулю.

$$\begin{aligned}
&\int g\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)\left[\ln\left(q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)\right)+1\right]d\boldsymbol{\Xi}(r)-\\
&-\int g\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N},\mathbf{s}(t)\right)\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)\,d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}=0.
\end{aligned} \qquad (27)$$

Получим

$$\ln\left(q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)\right)+1-\int q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N},\mathbf{s}(t)\right)\right)d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}=0, \qquad (28)$$

и окончательно

$$\hat{q}\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)=c\cdot\exp\left\{\int q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)p\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)\right)d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}\right\}. \qquad (29)$$

Соответственно для других параметров

$$\hat{q}(\mathbf{A})=c\cdot\exp\left\{\int q\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)q(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\ln\left(p\left(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)p\left(\mathbf{s}(t)\middle|\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}\right)\right)d\boldsymbol{\Xi}(r)\,d\boldsymbol{\Theta}d\mathbf{N}\right\}. \qquad (30)$$

$$\hat{q}(\boldsymbol{\Theta})=c\cdot\exp\left\{\int q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Xi}(r))q(\mathbf{N})\ln\left(p(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N})p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N})\right)d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Xi}(r)d\mathbf{N}\right\}. \quad (31)$$

$$\hat{q}(\mathbf{N})=c\cdot\exp\left\{\int q(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q(\boldsymbol{\Xi}(r))\ln\left(p(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N})p(\mathbf{s}(t)|\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N})\right)d\mathbf{A}d\boldsymbol{\Theta}d\boldsymbol{\Xi}(r)\right\}. \quad (32)$$

В соответствии с [6] итерационный процесс оценки искомых распределений организуется следующим образом:

1) Формируются начальные приближения распределений параметров $q^1(\mathbf{A})q^1(\boldsymbol{\Theta})q^1(\mathbf{N})$;

2) Находится k-е приближение оценки аппроксимирующего апостериорного распределения для матрицы коэффициентов переотражений

$$q^k\left(\boldsymbol{\Xi}(r)\right)=\arg\max_{q(\boldsymbol{\Xi}(r))}C_{KL}\left(q(\boldsymbol{\Xi}(r))q^k(\mathbf{A})q^k(\boldsymbol{\Theta})q^k(\mathbf{N})\middle\| p(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}|\mathbf{s}(t))\right); \quad (33)$$

3) Находятся (k+1)-е приближения аппроксимирующих распределений параметров

$$q^{k+1}(\mathbf{A})=\arg\max_{q(\mathbf{A})}C_{KL}\left(q^k(\boldsymbol{\Xi}(r))q(\mathbf{A})q^k(\boldsymbol{\Theta})q^k(\mathbf{N})\middle\| p(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}|\mathbf{s}(t))\right), \quad (34)$$

$$q^{k+1}(\boldsymbol{\Theta})=\arg\max_{q(\boldsymbol{\Theta})}C_{KL}\left(q^k(\boldsymbol{\Xi}(r))q^k(\mathbf{A})q(\boldsymbol{\Theta})q^k(\mathbf{N})\middle\| p(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}|\mathbf{s}(t))\right), \quad (35)$$

$$q^{k+1}(\mathbf{N})=\arg\max_{q(\mathbf{N})}C_{KL}\left(q^k(\boldsymbol{\Xi}(r))q^k(\mathbf{A})q^k(\boldsymbol{\Theta})q(\mathbf{N})\middle\| p(\boldsymbol{\Xi}(r),\mathbf{A},\boldsymbol{\Theta},\mathbf{N}|\mathbf{s}(t))\right). \quad (36)$$

Процесс останавливается после стабилизации относительной погрешности. Соответствующие оценки неизвестных информационных параметров и параметров МПРСА находятся в виде

$$\hat{\boldsymbol{\Xi}}(r)=\arg\max_{\boldsymbol{\Xi}(r)}\hat{q}(\boldsymbol{\Xi}(r)),\ \hat{\mathbf{A}}=\arg\max_{\mathbf{A}}\hat{q}(\mathbf{A}),$$

$$\hat{\boldsymbol{\Theta}}=\arg\max_{\boldsymbol{\Theta}}\hat{q}(\boldsymbol{\Theta}),\ \hat{\mathbf{N}}=\arg\max_{\mathbf{N}}\hat{q}(\mathbf{N}). \quad (37)$$

5. Заключение

В докладе представлены байесовские алгоритмы формирования многомерных радиолокационных изображений в многопозиционных системах с синтезированной апертурой в условиях априорной неопределенности. Для данной задачи предложен алгоритм МАВ, использующий смесь распределений. Показано применение вариационного байесовского подхода к построению алгоритмов синтеза апертуры.

Полученные алгоритмы могут быть использованы для формирования изображений в перспективных радиолокационных системах с синтезированной апертурой высокого разрешения.

Литература

1. Басараб М. А., Волосюк В. К., Горячкин О. В., Зеленский А. А., Кравченко В. Ф., Ксендзук А. В., Кутуза Б. Г., Лукин В. В., Тоцкий А. В., Яковлев В. П. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях. / Под ред. Кравченко В. Ф. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с.

2. Алышев Ю. В., Борисенков А. В., Брайнина И. С., Горячкин О. В. и др. Оптимальные методы обработки сигналов в системах радиотехники и связи. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2018. – 344 с.
3. Волосюк В. К., Кравченко В. Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / под ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.
4. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
5. Горячкин О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М: Радио и связь, 2003.– 230 с.
6. Molina R., Mateos J., Katsaggelos A. K. Blind deconvolution using a variational approach to parameter, image, and blur estimation //IEEE Transactions on Image Processing. – 2006. – V. 15. – №. 12. – P. 3715-3727.
7. Likas A. C., Galatsanos N. P. A variational approach for Bayesian blind image deconvolution //IEEE transactions on signal processing. – 2004. – V. 52. – №. – P. 2222-2233.

REFERENCES

1. Basarab M. A., Volosyuk V. K., Goryachkin O. V., Zelensky A. A., Kravchenko V. F., Ksendzuk A. V., Kutuz B. B., Lukin V. V., Totsky A. V., Yakovlev V. P., Digital signal and image processing in radiophysical applications / Ed. Kravchenko V. F. - Moscow: FIZMATLIT, 2007. – 544 p.
2. Alyshev Yu. V., Borisenkov A. V., Brainina I. S., Goryachkin O. V., et al., Optimal methods of signal processing in radio engineering and communication systems. – Samara: Publishing house of the SamSC of the Russian Academy of Sciences, 2018. – 344 p.
3. Volosyuk V. K., Kravchenko V. F., The Statistical Theory of Radio Engineering Systems of Remote Sensing and Radar / ed. V.F. Kravchenko. - M.: Fizmatlit, 2008. - 704 p.
4. Verba V.S., Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk V.E., Space-based radar systems for space-based surveying / Ed. V. S. Verba. M .: Radio Engineering, 2010. - 680 p.
5. Goryachkin OV., Methods of blind signal processing and their applications in radio engineering and communication systems. - M: Radio and communications, 2003.– 230 p.
6. Molina R., Mateos J., Katsaggelos A. K. Blind deconvolution using a variational approach to parameter, image, and blur estimation //IEEE Transactions on Image Processing. – 2006. – V. 15. – №. 12. – Pp. 3715-3727.
7. Likas A. C., Galatsanos N. P. A variational approach for Bayesian blind image deconvolution // IEEE transactions on signal processing. – 2004. – V. 52. – №. – Pp. 2222-2233.

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Е. Л. Шошин

Сургутский государственный университет ХМАО-Югры, Сургут, РФ

Аннотация. В работе рассматривается применение средств подповерхностного радиолокационного зондирования для решения задач инженерной геологии на территории Тюменской области. Описаны области применения средств георадарного контроля состояния водосточных коллекторов, земляного полотна железнодорожных линий. Рассматриваются возможности радиолокационного метода измерения длины свай, установленных в грунт. Приведены примеры выполненных работ.

Ключевые слова: георадар, радиолокационный профиль, антенный блок.

THE USE OF MEANS OF SUBSURFACE RADAR SOUNDING FOR SOLVING TASKS OF ENGINEERING GEOLOGY IN THE TERRITORY OF THE TYUMEN REGION

E. L. Shoshin

Surgut state University of KHMAO-Yugra, Surgut, Russia

Abstract. The paper discusses the use of subsurface radar sensing to solve problems of engineering Geology in the Tyumen region. Describes the field of application of GPR control status of drainage collectors, subgrade of railway lines. The possibilities of the radar method of measuring the length of piles installed in the ground are considered. Examples of the executed works are given.

Keywords: ground penetrating radar, radar profile, the antenna unit.

1. Введение

Одно из направлений повышения эффективности народно-хозяйственного комплекса Югры связано с внедрением георадарных средств дистанционного неразрушающего контроля различных материальных сред и объектов. В основу работы таких приборов положен принцип сверхширокополосного радиолокационного зондирования GPR (Ground Penetrating Radar) [1], который реализует прохождение сигнала через материальные среды и объекты различной плотности и позволяет строить инженерно-геологические профили до глубины 20–25 метров, обнаруживать разрушения в структуре исследуемого объекта. Практическое использование GPR и регистрирующей аппаратуры заключается в комплексном обследовании [2]:

- сетей инженерных коммуникаций (восстановление схем подземных коммуникаций, определение мест локальных разрушений трубопроводов, определение объёмов утечки из трубопровода, определение уровня грунтовых вод относительно трубопровода, определение зон теплопотерь, мониторинг подповерхностных зон);

-автомобильных дорог и взлётно-посадочных полос (контроль и диагностика асфальтобетонных и других покрытий автомобильных дорого и взлётно-посадочных

полос, определение толщины слоёв дорожного полотна, определение уровня грунтовых вод относительно уровня дорожного полотна, определение мест локальных разрушений);

- материалов фундаментов и строительных конструкций (определение состояния строительных конструкций, определение качества производимых работ по изготовлению заливных бетонных конструкций, определение скрытых трещин и пустот в строительных конструкциях, определение глубины заложения строительных конструкций, определение габаритных размеров, определение зон пучинообразования в земной коре);
- проведении геофизических обследований береговой линии и дна водоёмов при проектировании нефте-газотрубопроводов;
- в речном судоходстве (определение оптимального пути – фарватера - движения судов; диагностика зон распределения затопленного леса и других объектов).

В настоящее время на территории ХМАО-Югры нашли широкое применение отечественные георадары серии «ОКО», георадары «SIR» производства Geophysical Survey Systems Inc. (США). Георадары «ОКО» используют набор сменных сверхширокополосных антенн, который обеспечивает возможность зондирования в диапазоне частот от 50 МГц до 3 ГГц в почвогрунтах различной плотности, электропроводности и диэлектрической проницаемости. Тактико-технические характеристики антенных блоков (АБ) георадаров серии «ОКО» приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики антенных блоков

Антенные блоки	Центральная частота, МГц	Максимальная глубина зондирования, м*	Разрешающая способность по глубине, м
АБД	25–100	30	0,5–2,0
АБ-150	150	12	0,35
АБ-250	250	8	0,25
АБ-400	400	5	0,15
АБ-700	700	3	0,1
АБ-1200	1200	1,5	0,05
АБ-1700	1700	1	0,03
АБД	25–100	30	0,5–2,0

* для грунта с диэлектрической проницаемостью 4 ... 6 и удельным затуханием 1 ... 2 дБ/м (влажный песок, известняк, скальные породы, мерзлый грунт)

2. Диагностика состояния магистральных коллекторов

При проведении таких работ ставятся задачи оценки состояния трубы, околотрубного пространства, обнаружение отложений на стенках коллектора, мест утечек воды, определение координат пораженных участков трубы и др. Рассмотрим диагностику состояния магистральных коллекторов на примере георадарного обследования коллекторов в г. Тюмени по ул. Московский тракт, выполненное с помощью антенных блоков АБ-150, АБ-250 и АБ-700. По результатам поперечного

профилирования до глубины 15 м с точностью ±(8–12) см определялся диаметр и положение труб в плане. На рисунке 1 приведен радиолокационный профиль участка коллектора, где обозначено: 1 – глинисто-илистые отложения на дне коллектора, 2 – почвогрунты, выпадающие в коллектор через трещины, 3 – толщина стенки коллектора, 4 – пустота, 5 – уровень канализационных стоков, 6 - верхний техногенный слой, 7 - обводненная зона, 8 – основной глинистый слой.

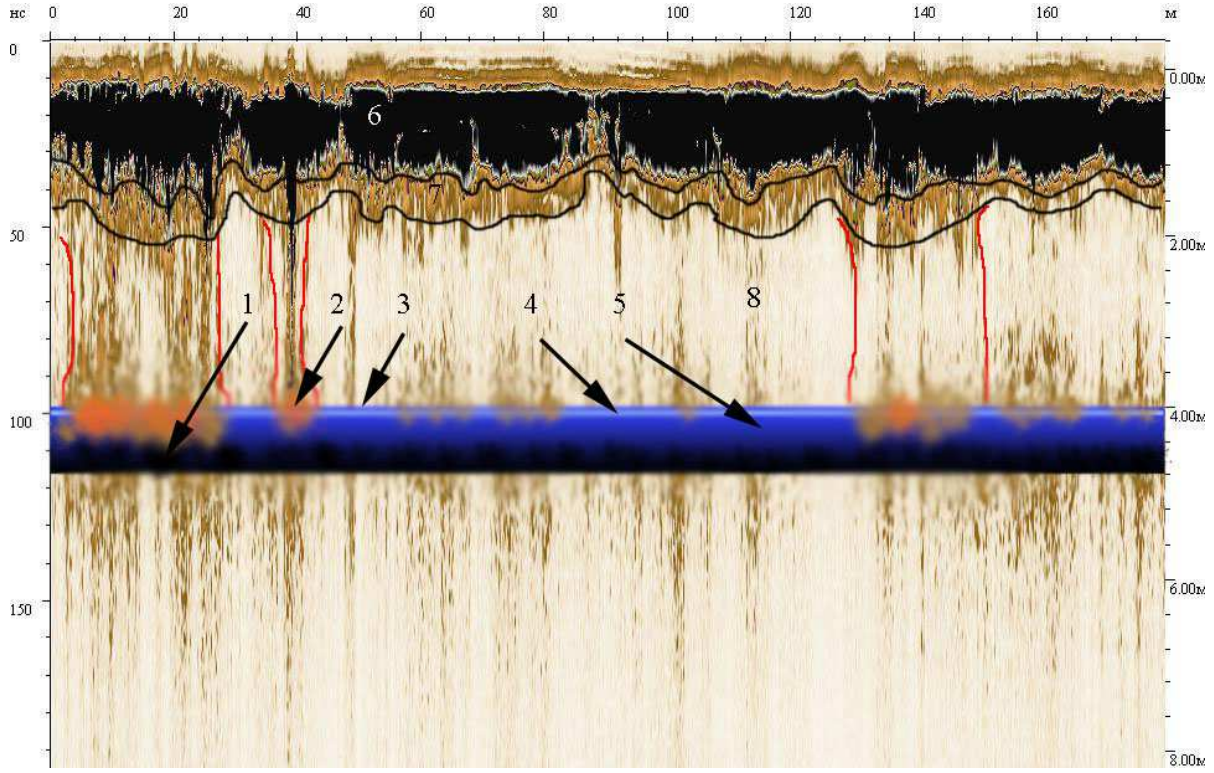


Рис. 1. Радиолокационный профиль участка коллектора

По результатам обследования верхний слой инженерно-геологического профиля следует отнести к техногенному, который включает в себя асфальт, гравийную отсыпку, строительный мусор и почвогрунты. Между верхним слоем и глинистыми грунтами имеет место переходная обводненная зона, обусловленная просачиванием атмосферных осадков. На глубине 4,2 м залегает труба, в местах разрушенных участков которой наблюдается обводнение около трубного пространства, обваливание грунтов в трубу и их смыв.

Состояние околотрубного пространства можно охарактеризовать через отношение коэффициентов передачи сигнала – от георадара до поверхности трубы – для случая ее естественного состояния и для случая разуплотненного состояния под влиянием различных техногенных факторов. Зоны с разрушенным и не поврежденным грунтом выделяются по результатам анализа радарограмм. При этом, в качестве количественных оценок использовались усредненные значения коэффициента передачи среды:

$$K_{гр} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{u^i_{зонд}}{u^i_{тр}}, \qquad (1)$$

где $u^i_{зонд}$ – уровень зондируемого сигнала, $u^i_{тр}$ – уровень отраженного от трубы сигнала, N – число измерений на обследуемом отрезке трассы.

Степень разуплотненности заполняющих околотрубное пространство почвогрунтов определяется как

$$K_{рзп} = \frac{K^{норм}_{гр}}{K^{рзп}_{гр}}, \qquad (2)$$

где $K^{норм}_{гр}$ и $K^{раз}_{гр}$ – значения коэффициентов передачи сигнала на участках грунта с неповрежденным и разуплотненным состоянием соответственно.

Разуплотнение грунтов, окружающих трубопровод, сказывается на его состоянии. Для количественной оценки степени повреждения трубы целесообразно использовать измерения уровней сигналов, отраженных внешней и внутренней стенками трубы с последующим составлением отношения:

$$K_{рзт} = \frac{K^{норм}_{тр}}{K^{рзр}_{тр}}, \qquad (3)$$

где $K^{норм}_{тр}$ и $K^{раз}_{тр}$ – значения коэффициентов передачи сигналов стенками трубы с неповрежденным и разрушенным состоянием соответственно.

Данные измерений состояния стенок трубопровода с различной степенью поврежденности позволяют предложить трехуровневую шкалу повреждений труб, с использованием коэффициента поврежденности:

1. $K_{рзр} = 0{,}6…0{,}9$ – *первая степень*.

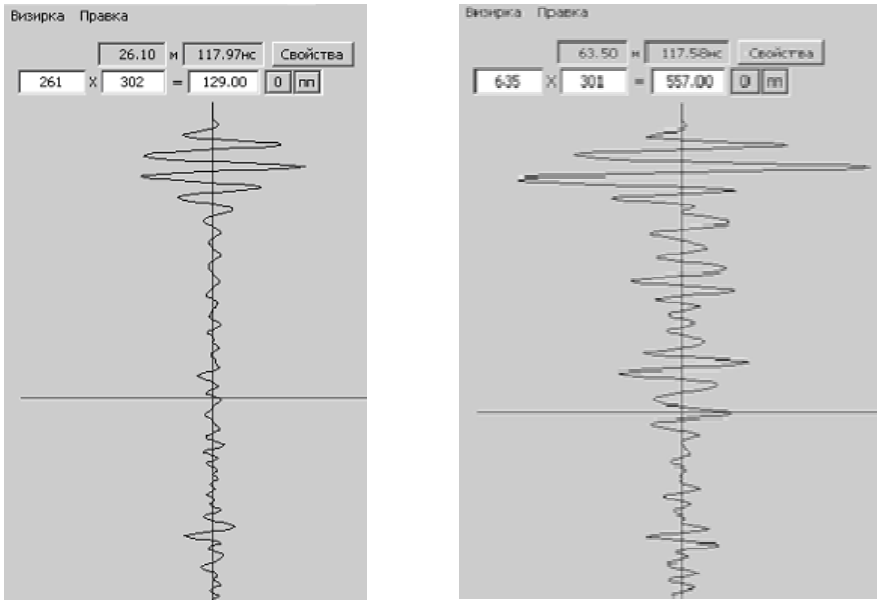
Трубы мало разрушены. В этом случае наблюдаются трещины на поверхности трубы длинной до 300 мм и толщиной не более 5 мм, приводящие к утечке воды, увлажнению внешней стенки трубы и околотрубного пространства. Обвалы стенок и попадание грунта в трубу не допускаются, изменение засорения трубы не наблюдается.

2. $K_{рзр} = 0{,}3…0{,}6$ – *вторая степень*.

Трубы частично разрушены с локальным нарушением стенок и внутренним засорением. Наблюдаются трещины длиной до 700 мм и толщиной не более 30 мм, частичные обвалы стенок не более 50 мм в диаметре и 200 мм в длину, попадание грунта в трубы и частичное вымывание грунта. Наблюдается засорение труб на 30–40% от основного уровня, повышение уровня сточных вод, что приводит к уменьшению пропускной способности, повышению уровня сточных вод в колодцах, повышению уровня грунтовых вод.

3. $K_{рзр} = 0{,}0…0{,}3$ – *третья степень*

Трубы разрушены на отдельных участках с нарушением цельности стенок и обвалом грунта, трубы не пригодны для эксплуатации. Наблюдаются трещины длиной до 1500 мм и более, толщиной более 60 мм, частичные обвалы стенок более 100 мм в диаметре и более 800 мм в длину. На рисунке 2 приведены примеры сигналов, рассеянных трубопроводами с различной степенью поврежденности.



а) б)

Рис. 2. Временная реализация сигналов, отраженных от труб:
а – с первой степенью повреждения, б – с третьей степенью повреждения

Проведенное обследование участков трубопроводов в г. Тюмень по ул. Московский тракт и использованная шкала повреждений позволили определить состояние коллекторов (рисунок 3), выделить разрушенные зоны и классифицировать грунты по степени их разуплотнения. Результаты исследований приведены в таблице 2.

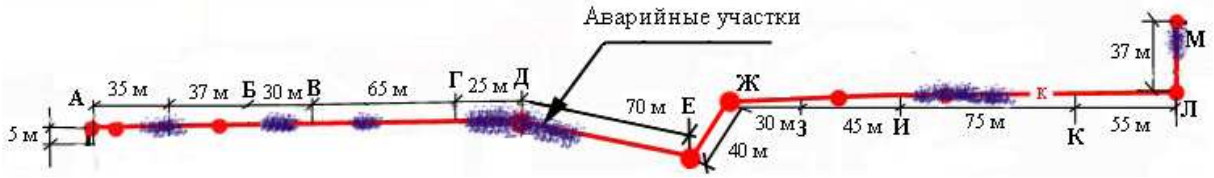


Рис. 3. Магистральный коллектор

Таблица 2. Результаты георадарного обследования коллектора

Наименование профиля	Положение разрушенного участка относительно начала профиля, м	Степень повреждения
Профиль А–Б	30–55	третья
Профиль Б–В	4–20	третья
Профиль В–Г	1–10, 32–42	третья
Профиль Г–Д	10–75	третья
Профиль Д–Е	0–20	первая
Профиль Е–Ж	10–20, 20–30	первая, вторая
Профиль Ж–З	1–7, 25–30	первая, вторая
Профиль И–К	10–50	третья
Профиль К–Л	10–15, 25–30, 42–50	вторая
Профиль Л–М	10–20, 35–40	вторая, третья

3. Диагностика состояния земляного полотна железнодорожных путей

Находящиеся в эксплуатации железные дороги испытывают интенсивное воздействие поездных нагрузок. В сочетании с влиянием множества техногенных, погодно-климатических и геологических факторов это приводит к возникновению в земляном полотне деформаций, в том числе создающих угрозу безопасности движения поездов. Диагностика причин деформаций требует проведения детального исследования инженерно-геологических условий земляного полотна. Проведение такого обследования с достаточной полнотой традиционными геологическими методами связано с бурением в значительном объеме, при этом, увеличиваются временные и материальные затраты. Из-за невозможности размещения буровой техники в непосредственной близости от железнодорожного пути, бурение производится легкими станками или вручную, что не всегда обеспечивает необходимую глубину изучения разреза. Георадарные методы позволяют проводить изыскания в труднодоступных условиях и получать информацию о детальном строении полотна железной дороги, на основе которой становится возможным установить причины деформаций и принять правильное проектное решение по стабилизации земляной насыпи. Использование на железнодорожных путях георадарных методов направлено на решение следующих задач:

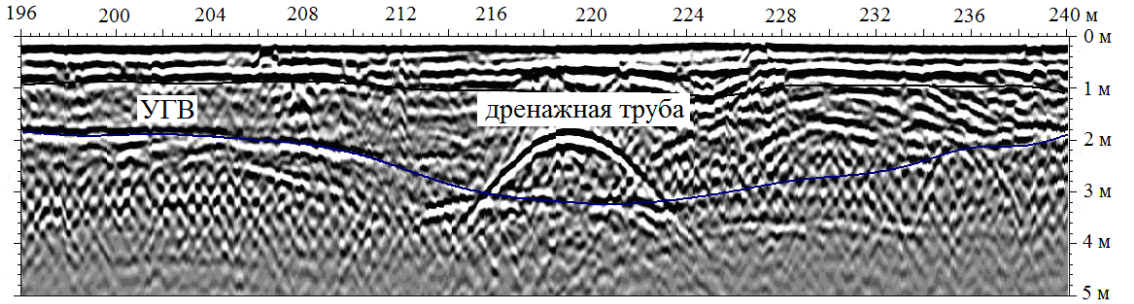
- определение состояния балластной призмы (толщины, степени засоренности, выявление мест застоя воды);
- определение дефектов и деформаций грунтовой среды подбалластной зоны, насыпей и выемок;
- определение состояния заторфованных слабых оснований, осадок насыпей;
- выявление переувлажненных грунтов земляного полотна, определение уровня грунтовых вод в основании насыпи, подбалластной зоне и откосах, паводковых вод при подтоплении насыпей;
- определение границ многолетнемерзлых грунтов и растепленных пород;
- определение состояния дренажных устройств (траншейных, трубчатых, кротовых и др.);
- обнаружение и оконтуривание карстовых образований.

При георадарном обследовании железнодорожных путей целесообразно использование экранированных антенных блоков, которые обеспечивают существенное ослабление сигналов в верхнем полупространстве (над поверхностью грунта), чем достигается ослабление волн-помех. Использование экранированных антенн приводит к существенному упрощению технологии первичной обработки радарограмм.

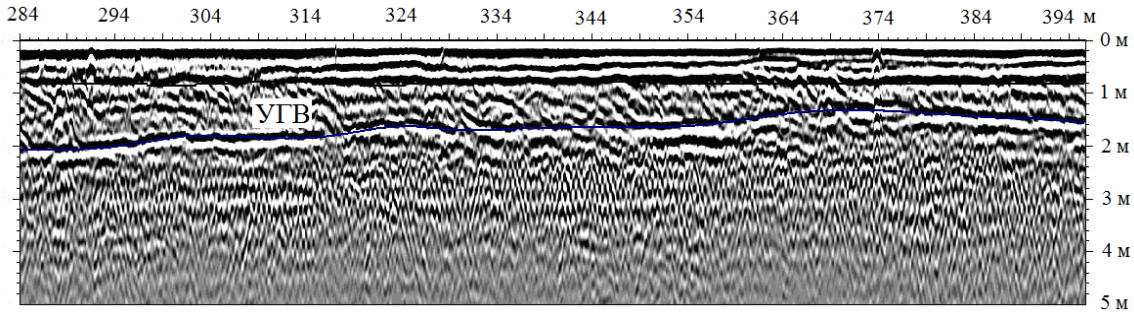
Возникающие при георадиолокационной диагностике помехи условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся помехи, свойственные георадиолокационному методу – сигналы прямого прохождения с антенного блока на вход приемника, минуя диагностируемую среду, и сигналы, отражаемые от поверхности грунта, в случае размещения антенного блока над поверхностью полотна дороги. Ко второй группе относятся помехи, возникающие от рельсошпальной решетки, контактной сети и обустройств железнодорожного пути. Волны-помехи прямого прохождения на вход приемника будут практически отсутствовать в случае

использования рупорных антенн. Подавление помех от рельсошпальной решетки связано с уменьшением угловой расходимости излучения при помощи подбора антенного блока и реализации методики проведения измерений в пространстве между шпалами.

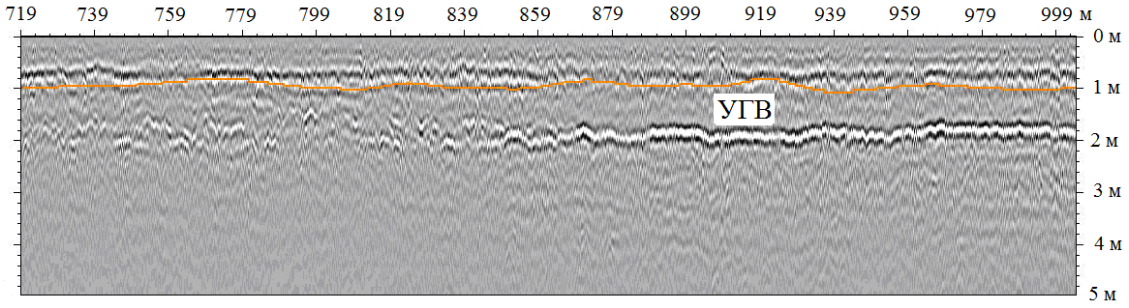
Рассмотрим диагностику состояния земляного полотна на примере обследования железной дороги Сургут-Ульть-Ягун на участке 748 километра, выполненного георадаром серии «ОКО» в диапазоне частот 250 МГц. Целью исследований явился анализ причин склонности выбранного участка железной дороги к деформации полотна. Радарограммы, приведенные на рисунке 4, демонстрируют наличие неоднородных по своему составу увлажненных слоев балластной призмы. На рисунке 4а отчетливо видно, что водоотводная (дренажная) труба диаметром 1 000 мм, заложенная на глубине 1,8 метра относительно полотна железной дороги, замыкает уровень грунтовых вод в месте своего размещения. Рисунок 4б демонстрирует вариации глубины залегания уровня грунтовых вод (УГВ) в полотне железной дороги, которые на исследованном участке протяженностью 110 метров составили 1,3–2,0 метра. Рисунок 4в демонстрирует участок земляного полотна с неоднородным по водонасыщенности составом грунтов, при этом, с 830 по 999 м участка дороги на глубине 1,7–2,0 метра присутствует непрерывный сильно переувлажненный слой, в то время как с 719 по 819 м участка дороги входящие в состав земляного полотна слои слабо насыщены водой.



а)



б)



в)

Рис. 4. Уровень грунтовых вод на 748 километре железной дороги:
а – участок 1, б – участок 2, в – участок 3

Наличие талых, паводковых и грунтовых вод с неравномерным уровнем залегания приводит к появлению влажных и переувлажненных слоев, вносящие неоднородности в структуру земляного полотна. Это в свою очередь в весенне-летний период при оттаивании грунтов и осенне-зимний период при замерзании грунтов приводит к деформациям – пучению и просадкам – железнодорожного полотна при длительной эксплуатации дороги.

4. Измерение длины свай, установленных в грунт

В практической деятельности строителей и проектировщиков часто возникает задача контроля длины установленных свай. Георадарные методы позволяют измерять длину свай, используя следующие схемы измерений (рисунок 5):

1. Первый случай характеризуется доступом к оголовку сваи, при этом, радар устанавливается на открытую торцевую поверхность сваи и затем производится ее зондирование.

2. Во втором случае доступа к торцевой части нет, но к боковой поверхности оголовки сваи доступ может быть обеспечен путем производства шурфов, либо сваи могут быть открыты со стороны подвала, при этом, радар устанавливается около боковой поверхности сваи и затем производится ее зондирование.

3. Третий случай характеризуется отсутствием доступа к свае, при этом, радаром производится зондирование сваи путем установки излучающей антенны с одной стороны от оси сваи, а приемной антенны – с другой.

Во всех случаях длина сваи определяется по измеренному значению времени распространения сигнала в свае и известной скорости распространения электромагнитного сигнала в материале сваи. Ниже приведены результаты георадарного исследования свайного фундамента одноэтажного строения «Техникума бизнеса и права» (г. Нижневартовск, пр. Победы, 14). Исследование свай осуществлялось путем зондирования их с торца и с боковых поверхностей. Для определения длины свай использовался георадар серии «ОКО» с частотой зондирования 700 МГц. На рисунке 6 приведен способ представления обработанной радарограммы с отметкой от заглубленного конца сваи и геометрия сваи.



а) б)

Рис. 5. Измерение длины свай:
а – зондирование с торца, б – зондирование с боковых поверхностей

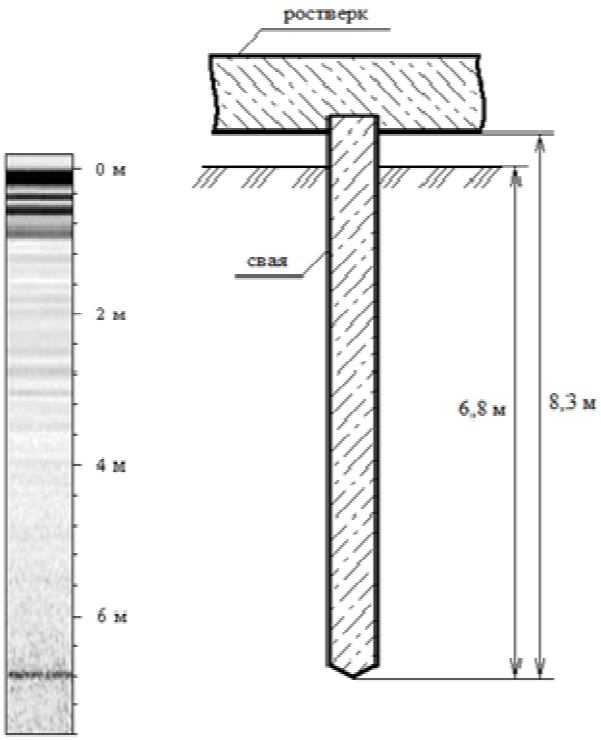


Рис. 6. Радарограмма и геометрия сваи

Приведенные в таблице 3 результаты обследований свидетельствуют, что заглубление (длина) свай в обследованном свайном поле изменялось от 4,8 до 8,6 метров относительно нижнего уровня ростверка. Полученные данные измерений позволили их использовать для оценки несущей способности свайного фундамента.

Оценка глубины залегания фундамента и диагностика его состояния необходимы при проведении реконструкции здания. Методы измерения длины бетонных свай, рассмотренные выше, сохраняют свою работоспособность и в случаях, связанных с определением глубины залегания фундаментов. С учетом того, что площадь,

Таблица 3. Результаты обследования

№	Тип сваи	Длина сваи, м
1	Железобетонная 300×300	7,2
2	Бетонная монолитная д. 800	5,4
3	Железобетонная 300×300	8,2
4	Буронабивная д. 325	6
5	Буронабивная д. 325	5,85
6	Бетонная монолитная д. 800	5,1
7	Железобетонная 300×300	7,4
8	Железобетонная 300×300	8,3
9	Железобетонная 300×300	8,6
10	Буронабивная д. 325	6
11	Железобетонная 300×300	6,8
12	Буронабивная д. 325	5,85
13	Железобетонная 300×300	6,5
14	Буронабивная д. 325	5,55
15	Буронабивная д. 325	5,5
16	Буронабивная д. 325	5,6
17	Буронабивная д. 325	5,8
18	Буронабивная д. 219	4,8
19	Железобетонная 300×300	8
20	Железобетонная 300×300	8,3

занимаемая фундаментами здания, как правило, значительна, а сами фундаменты неоднородны по своему строению, при георадарном обследовании фундаментов следует закладывать профилирование с внутренней и внешней стороны здания.

5. Заключение

Практическое применение средств подповерхностного радиолокационного зондирования эффективно при решении задач инженерной геологии. Георадарные методы диагностики состояния водосточных коллекторов, земляного полотна железнодорожных линий, измерения длины свай, установленных в грунт, демонстрируют возможности неинвазивного контроля материальных сред и объектов, безальтернативного во многих практических случаях.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / под ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005.-416 с.
2. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Издательство МГУ, 2004. – 153 с.

References

1. Issues of subsurface radar. The collective monograph / under the editorship of Y. A. Grineva. M.: Radio Engineering, 2005.-416 p.
2. Vladov, M. L. Introduction to ground penetrating radar: proc. the allowance / M. L. Vladov and A. V. Starovoitov. – Moscow : Publishing house of Moscow state University , 2004. – 153 p.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

С. В. Литвинов[1], Д. С. Мудрик[1]

[1]ОАО «НПК «НИИДАР», Москва, Россия

Аннотация. Исследование ионосферы и изменения ее характеристик в режиме реального времени необходимо для всех радиосредств, работающих в диапазоне коротких волн. Для этой цели в новейшей России воссоздана сеть вертикальных ионозондов, которые также способны осуществлять наклонное зондирование ионосферы. В статье дается обоснование необходимости непрерывного отслеживания параметров ионосферы и приводятся некоторые основные ее характеристики. Демонстрируются результаты экспериментального наклонного зондирования и проводится их анализ. Кратко приводятся основные методы определения характеристик ионосферы. Рассматривается возможность применения этих результатов в целях ионосферного обеспечения радиолокаторов загоризонтного обнаружения.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, наклонное зондирование, ионозонд, радиолокатор, РЛС ЗГО

RESULTS OF THE EARTH'S IONOSPHERE RESEARCH BY A METHOD OF INCLINED SENSING

S.V. Litvinov[1], D.S. Mudrik[1]

[1]JSC «Distant Radiocommunication Scientific Research Institute», Moscow, Russia

Abstract. The study of the ionosphere and changes in its characteristics in real time is necessary for all radio equipment operating in the short wave range. For this purpose, a network of vertical ionosondes has been created in modern Russia, which are also capable of performing oblique sounding of the ionosphere. The article provides a rationale for the need for continuous tracking of the parameters of the ionosphere and some of its main characteristics. The results of experimental oblique sounding are shown and analyzed. The main methods for determining the characteristics of the ionosphere are briefly described. The possibility of using these results for ionospheric support of over-the-horizon radar is being considered.

Keywords: ionosphere, vertical sounding, oblique sounding, ionosonde, over-the-horizon radar.

1. Введение

Мониторинг космической погоды на сегодняшний день является чрезвычайно актуальной темой. Этим уже занимаются 14 стран в рамках Международной службы окружающей космической среды, с российской стороны за это отвечает Институт прикладной геофизики. Одним из направлений деятельности института является изучение и исследование ионосферы, с целью предоставления гелиогеофизической информации потребителям.

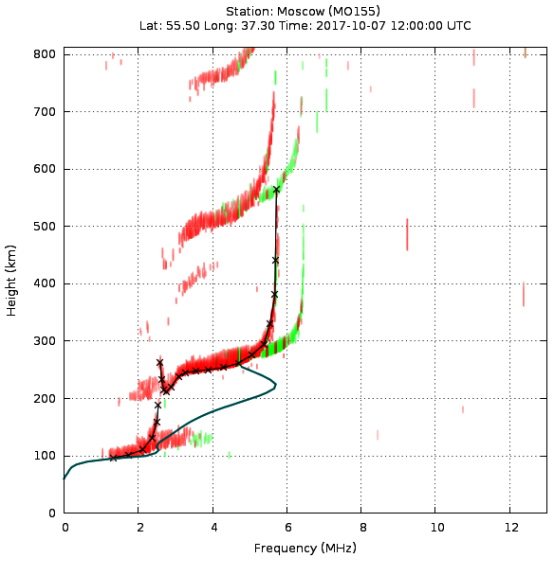
С 2011 года в России активно разворачивается сеть станций вертикального радиозондирования ионосферы, основу которых составляют новейшие ионозонды отечественного производства. На текущий момент развернуто десять таких станций по всей территории страны: от Калининграда до Камчатки. В течение всего срока работы в

круглосуточном режиме ионозонды поставляют каждые 15 минут актуальную информацию о состоянии ионосферы. Проведенная модернизация и последующие опыты показали, что эти ионозонды способны выполнять также наклонное зондирование. Этот результат был достигнут благодаря привязке всех отдельных станций к Системе Единого Времени (СЕВ), а также мощному излучателю (10 кВт), сигнал которого через боковые лепестки диаграммы направленности распространяется и может быть принят на расстоянии до 2000 км.

Следует отметить, что в России на регулярной основе исследование ионосферы методом наклонного зондирования осуществляется ААНИИ (Арктический и антарктический научно-исследовательский институт). Сеть, оснащенная канадскими ионозондами CADI и ЛЧМ-ионозондами отечественного производства, расположена преимущественно на берегу Северного ледовитого океана. Также на территории России размещены несколько дигизондов DPS-4 (производство США), входящие в мировую ионосферную сеть и проводящие только вертикальное зондирование ионосферы. Кроме того, отдельными организациями и инициативными группами проводятся разработки собственных средств зондирования ионосферы, к сожалению, не получившими широкого распространения.

2. Основные параметры ионосферы

Одним из самых распространенных видов представления информации об ионосфере является ионограмма. Это, как правило, график, показывающий зависимость высоты отражающего слоя ионосферы от частоты. Вместе с графиком потребителям предоставляется и другая информация, определяемая во время зондирования. Подробное описание всех параметров, получаемых в процессе зондирования приведено в Руководстве по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям, выпущенным ИПГ. [1] Эти параметры определяются автоматически и, при необходимости, уточняются оператором. Пример типичной ионограммы и предоставляемых характеристик представлен на рисунке 1.



fmin, MHz:	1.20	
foF2, MHz:	5.71	
fxF2, MHz:		
fxI, MHz:	6.45	X
hpF2, km:	264	
MUF(3000)F2, MHz:	19.88	
M(3000)F2:	3.48	
h'F2, km:	248	
h'F, km:	212	
hmF2, km:	222	
foF1, MHz:	3.19	L
MUF(3000)F1, MHz:		L
M(3000)F1:	0.00	
hmF1, km:		
foE, MHz:	2.54	
h'E, km:		A
hmE, km:	109	
foEs, MHz:	2.53	G
fbEs, MHz:	2.29	G
h'Es, km:	109	
Type Spread F:		
Type Es:	c2l2	

Рис. 1. Типичная ионограмма и характеристики ионосферы

На ионограммах почти всегда видны несколько похожих друг на друга следов отражений, так называемых «кратников». Такие отражения получаются, когда импульсы проходят от 2 до 3 раз (а иногда и больше) между станцией и ионосферой. Действующая высота отражений 2-й (3-й) кратности будет в 2 (3) раза больше действующей высоты отражения основного (1-го) отражения. Все числовые характеристики обычно снимаются по отражениям 1-й кратности, т.е. по основному следу. Также на ионограмме присутствует высотный профиль концентрации электронов (Ne(h)-профиль ионосферы).

Основными ионосферными параметрами являются:

1. foF2 – критическая частота О-компоненты, отраженной от самого высокого слоя – F2;
2. hmF2 – минимальная действующая высота слоя F2;
3. M3000F2 – коэффициент, показывающий отношение максимально применимой частоты (МПЧ), отражающейся от слоя F2 при наклонном падении на расстояние скачка, равное 3000 км, к критической частоте foF2.

Эти параметры изменяются в зависимости от времени суток, времени года, а также 11-летнего цикла солнечной активности, поэтому отслеживание их изменений является важной задачей. На рисунках 2, 3, 4 приведены изменения этих параметров в московском регионе в течение 2018 года.

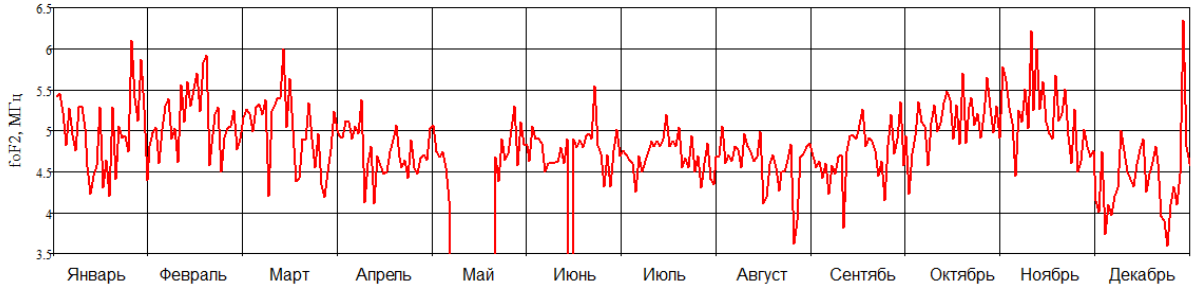


Рис. 2. График изменения параметра foF2 в течение 2018 года над Москвой

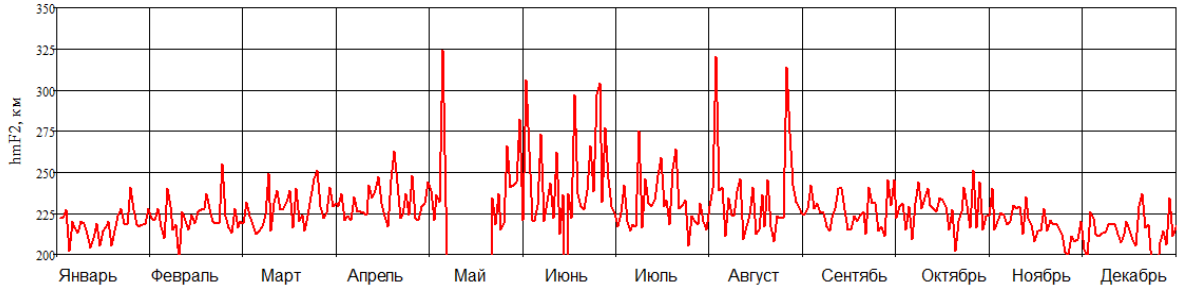


Рис. 3. - График изменения параметра hmF2 в течение 2018 года над Москвой

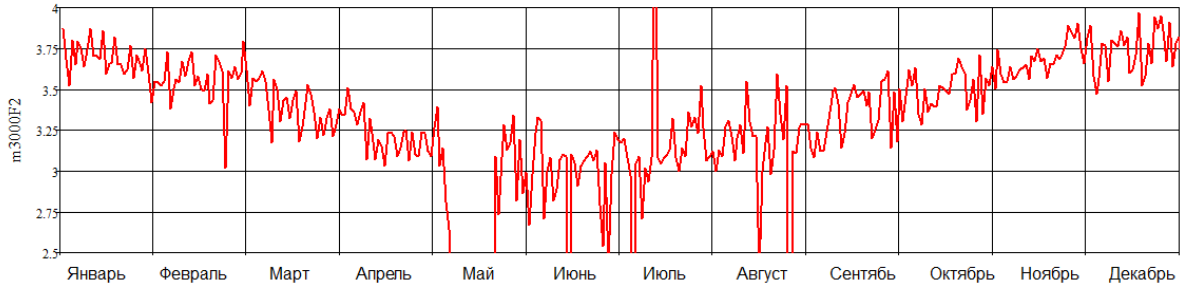


Рис. 4 - График изменения параметра M(3000)F2 в течение 2018 года над Москвой

3. Комплексное зондирование ионосферы

Использование сетевых ионозондов в экспериментальных целях накладывает ограничения на изменение параметров зондирования. Т.е. ни в коем случае нельзя оставить заинтересованных потребителей без актуальной информации. Это означает, что пропуск сеанса зондирования недопустим, станция должна выйти в эфир, а, следовательно, передатчик не отключается. В результате получен совершенно уникальный результат, выраженный в том, что следы наклонного зондирования накладываются на следы вертикального отражения (т.н. комплексное зондирование). [3] Пример комплексного зондирования представлен на рисунке 5.

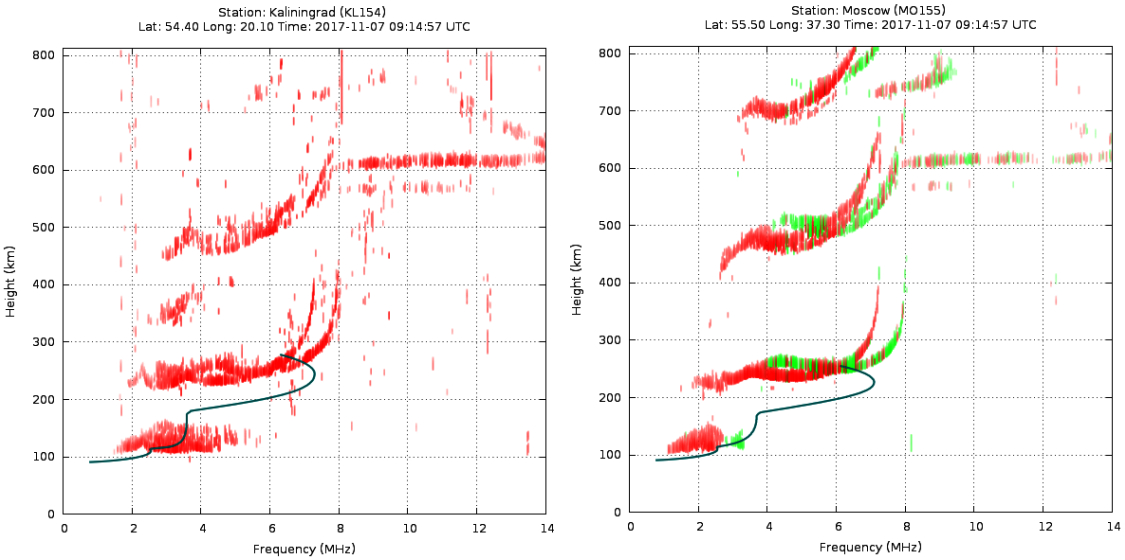


Рис. 5 - Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Калининград (слева, совмещенная линейная антенна) и ст. ИЗМИРАН-Троицк (справа, поляризационный прием) 17 ноября 2017 г 14:57 UTC

На рисунке кроме ионограммы вертикального зондирования присутствуют следы, начинающиеся на частоте ~ 8 МГц и находящиеся на высоте 600 км. Это результаты приема сигнала другого ионозонда, а именно: приёмник ионозонда «Парус-А», расположенного в Москве, регистрирует следы передатчика «Парус-А», расположенного в Калининграде, и наоборот. Расстояние между ионозондами – 1093 км.

Высоты 600 км обуславливается тем, что ионозонд измеряет не высоту напрямую, а задержку возврата сигнала. С учетом угла отражения сигнала от ионосферы (от 140° до 160º) получается реальное расстояние между ионозондами.

4. Результаты эксперимента

Имеющееся количество и географическое расположение ионозондов позволило провести различные эксперименты по наклонному зондированию ионосферы. Всего на данный момент развернуто десять ионозондов: Троицк, Ростов-на-Дону, Электроугли, Подкаменная Тунгуска, Магадан, Калининград, Салехард, Новосибирск, Хабаровск, Петропавловск-Камчатский. Размещенные в разных частях России, такие ионозонды отличным образом объединяются в отдельные сектора: в европейской части, в Сибири и на Дальнем Востоке (Рис. 6).

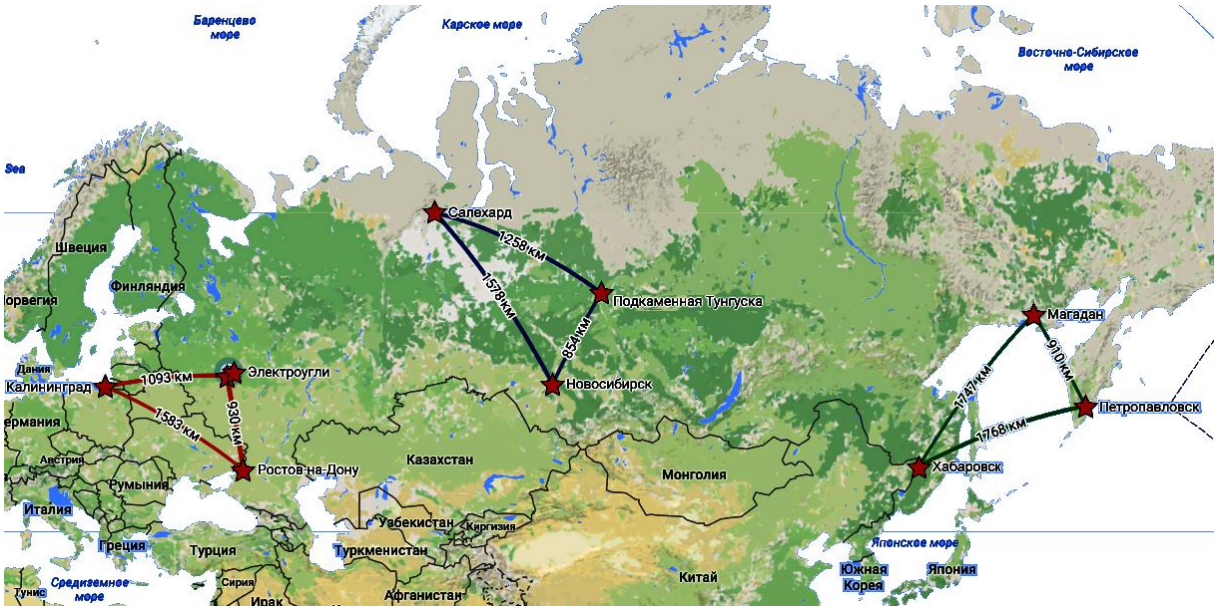


Рис. 6 - Расположение ионозондов «Парус-А» и основные трассы экспериментального наклонного зондирования

В 2017 году протестированы трассы всех секторов, а также трасса Москва-Салехард. [4] В каждом случае наблюдается устойчивый прием сигнала и отображение результатов в виде следов наклонного зондирования (НЗ). На рисунке 7 представлены результаты наклонного зондирований по трассам: (а) – Троицк – Калининград, (б) – Ростов-на-Дону – Электроугли, (в) – Магадан – Петропавловск-Камчатский, (г) – Троицк – Салехард.

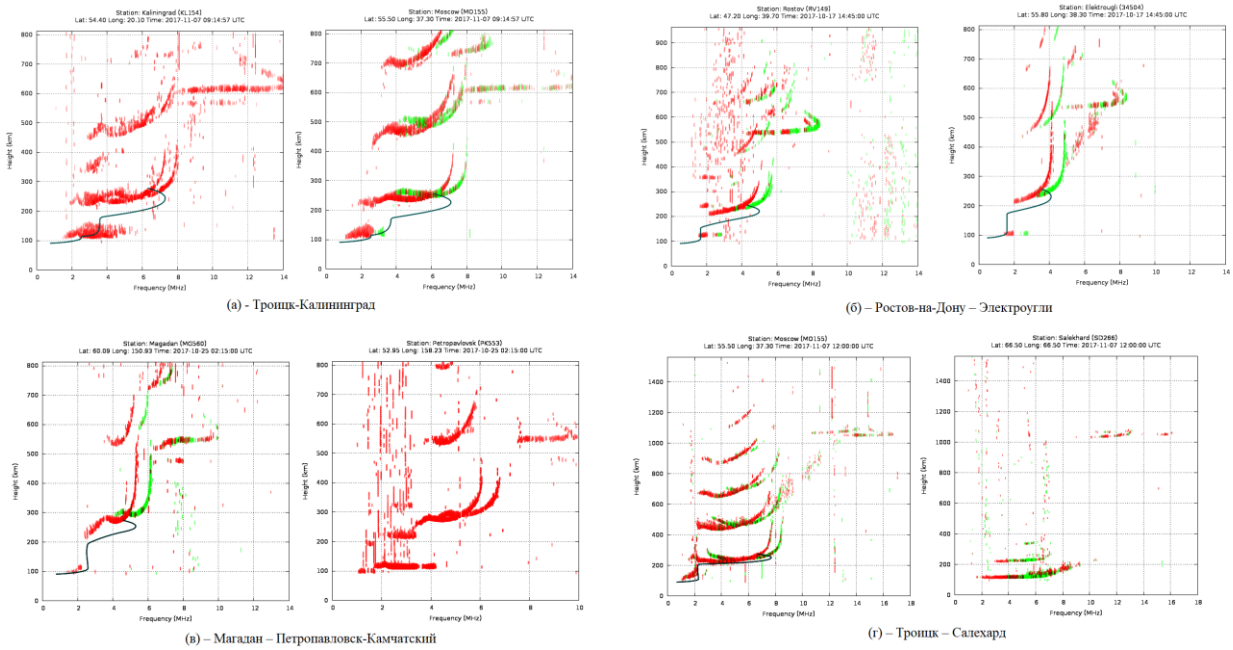


Рис. 7 - Результаты эксперимента по наклонному зондированию ионосферы

В 2018 году эксперименты продолжились в расширенном формате. В частности, проводились опыты по дистанционной поверке одного ионозонда другим, эталонным. А также проводились суточные прогоны на некоторых направлениях, что позволило оценить изменение высотно-частотной характеристики в течение суток.

Именно такой эксперимент проведен на уже проверенной трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский (Рис. 8). [5] Протяженность трассы – 910 км. Отмечено, что со спадом солнечной активности частоты, на которых происходит отражение от ионосферы, уменьшаются. При этом и высота отражающего слоя при НЗ также уменьшалась, что подтверждается результатами вертикального зондирования. Кроме того, в некоторых случаях, когда после захода Солнца вертикальное зондирование практически отсутствовало, следы наклонного зондирования еще некоторое время наблюдались (около двух часов). Активность передатчика на станции Магадан доказывается присутствием следов на ионограмме в Петропавловске-Камчатском.

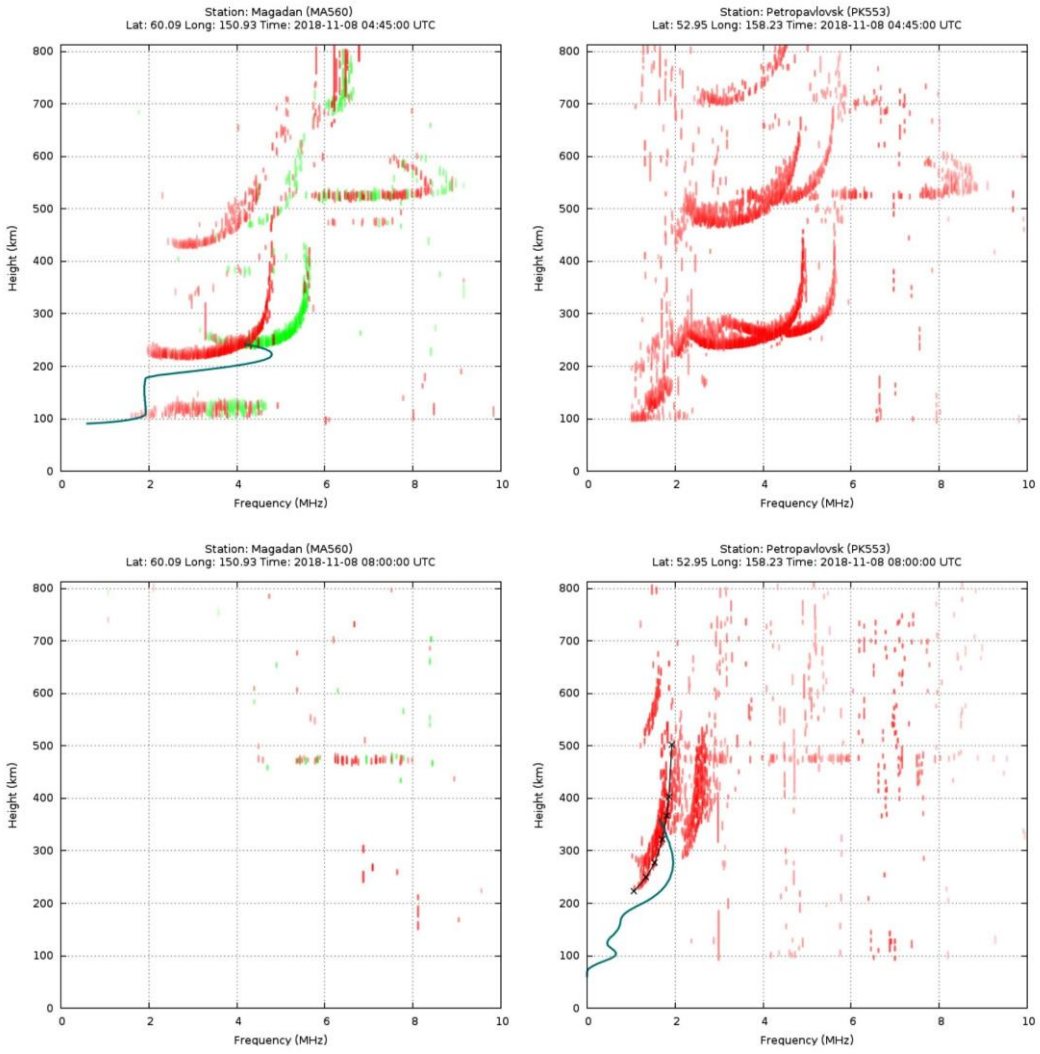


Рис. 8 - Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. Магадан (слева) и ст. Петропавловск-Камчатский (справа) 8.11.2018 г.

Такой же эксперимент проведен на трассе Магадан – Хабаровск (Рис. 9). Протяженность трассы – 1747 км – практически предельная для наклонного зондирования ионозондом такого типа. Также отмечено устойчивое наклонное зондирование в отсутствие вертикального. Однако при этом сигнал проходил только с переотражением от земной поверхности, и также явно видно снижение отражающего слоя.

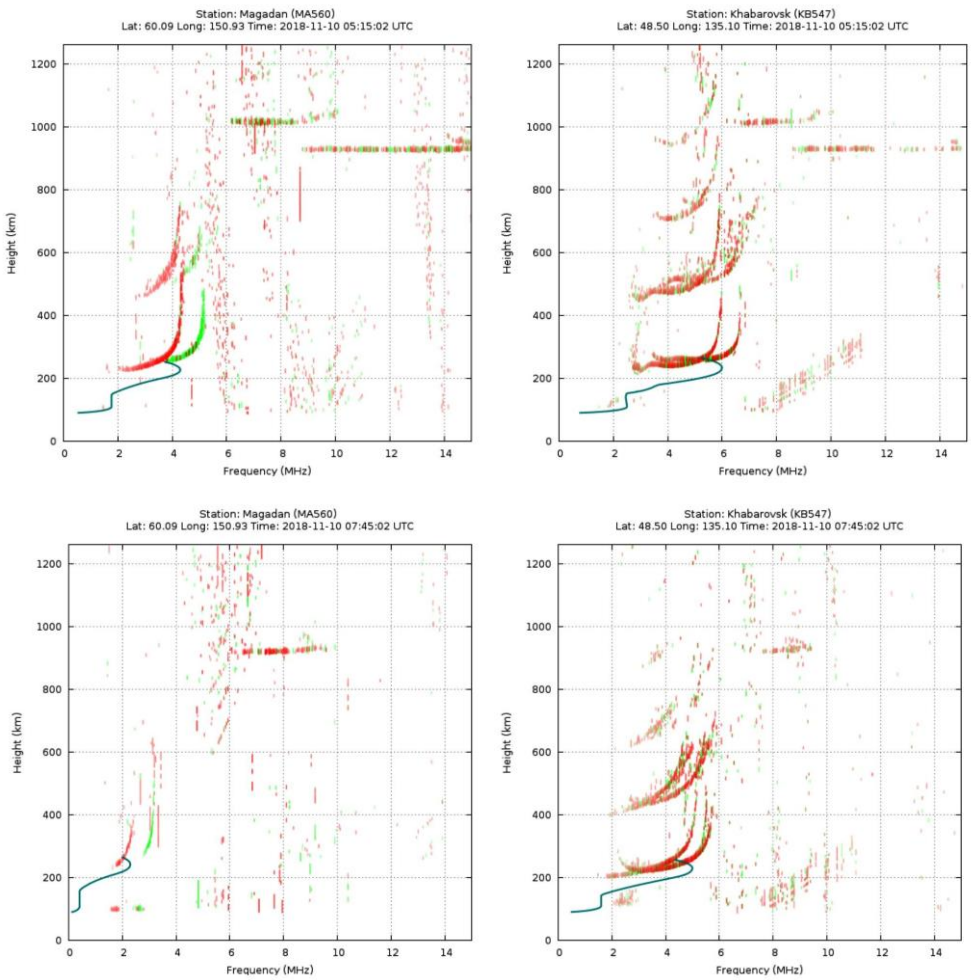


Рис. 9 - Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. Магадан (слева) и ст. Хабаровск (справа) 10 ноября 2018 г.

Также практически на предельной дальности подтвержден взаимный прием сигнала на трассе Москва – Салехард (1972 км.). Сигнал принимается сильно ослабленным, поскольку излучение и прием производятся боковыми лепестками диаграммы направленности. Результаты представлены на рисунке 10.

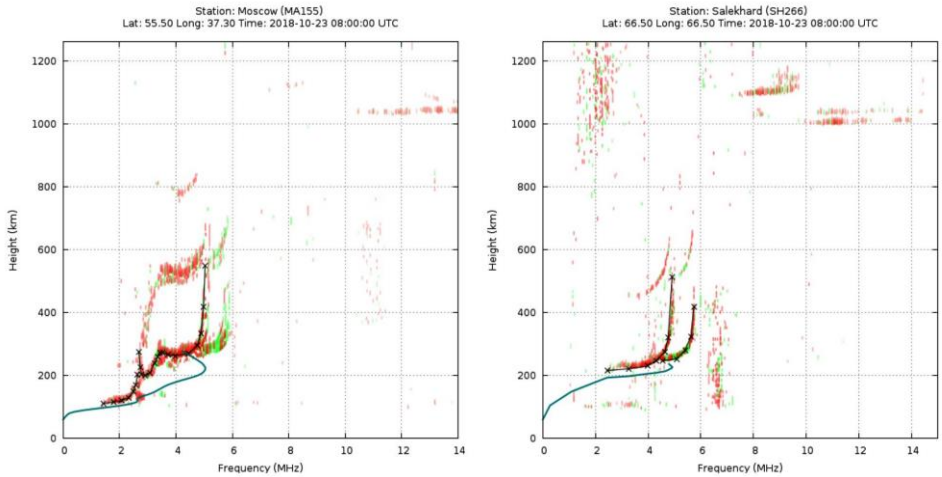


Рис. 10 - Данные комплексного зондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Троицк (слева) и ст. Салехард (справа) 23 октября 2018 г. 08:00 UTC

Любопытный результат достигнут в европейском секторе на трассе Москва – Калининград. К слову, в московском регионе размещены сразу два ионозонда – в Троицке и в районе города Электроугли, на расстоянии 69 километров друг от друга. В итоге на ионограмму в Калининграде наложились следы сразу двух ионозондов (Рис. 11).

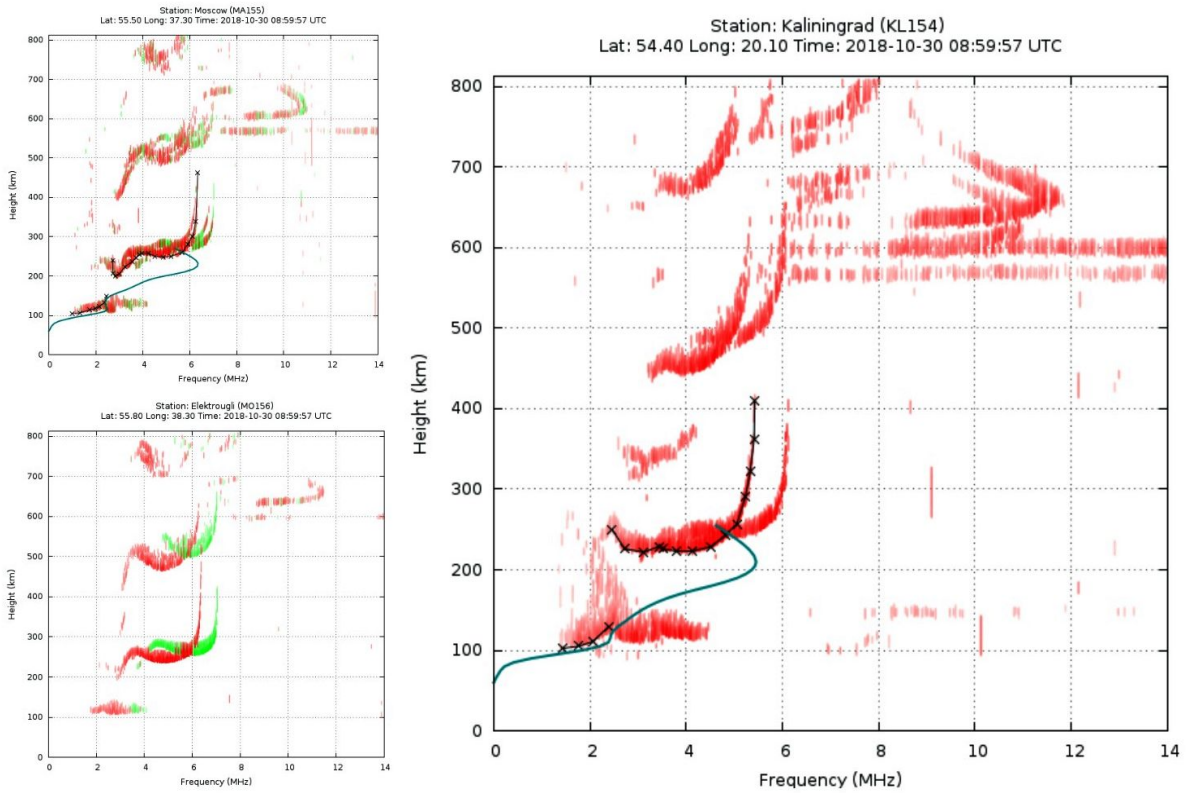


Рис. 11 - Данные комплексного радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН-Калининград (справа, поляризационный прием), ст. ИЗМИРАН-Троицк (слева сверху) и ст. Электроугли (слева снизу) 30 октября 2018 г 08:59 UTC

При этом на ионограмме явно различаются эти следы, в зависимости от высоты. Поскольку ионозонд в Электроуглях хоть и ненамного, но дальше, то и следы НЗ выше, чем следы от Троицка.

Таким образом, новый этап эксперимента подтвердил возможность устойчиво осуществлять комплексное зондирование на сетевых ионозондах «Парус-А». При этом каких-либо существенных доработок не потребовалось.

5. Методы определения параметров ионосферы

В качестве первичной оценки состояния ионосферы возможно использовать статистический метод, например, модель ионосферы IRI-2016 (International Reference of Ionosphere – международная справочная модель ионосферы). [6] Эта система позволяет провести моделирование и узнать параметры ионосферы в конкретном месте и в конкретное время. Она является глобальной медианной моделью ионосферы (т.е. позволяет строить долгосрочные прогнозы в любой точке земного шара). У нее довольно высокая точность долгосрочного прогноза при сравнении с реально полученными данными вертикального зондирования.

Наиболее полную и легко интерпретируемую информацию о состоянии ниже максимума электронной концентрации ионосферы дают средства вертикального радиозондирования ионосферы (ВЗ) [7]. Основным преимуществом метода ВЗ является возможность получения профиля электронной концентрации нижней ионосферы (N(h) – профиля) из непосредственных измерений с использованием модельных представлений только о ненаблюдаемой при ВЗ впадине электронной концентрации между областями E и F. Точность получения N(h)-профиля из данных ВЗ проверена многолетними исследованиями и является в отсутствии прямых ракетных измерений эталонной. Недостатком метода ВЗ, который компенсируется установкой сети станций, является локальность метода, а оперативное представление данных в мировой сети Inthernet позволяет использовать их для решения большинства прикладных задач.

Метод наклонного радиозондирования ионосферы, суть которого состоит в пространственном разносе приемной и передающей систем ионозонда и синхронизации процессов излучения и приема, дает принципиальную возможность прямого экспериментального исследования как прохождения радиоволн на фиксированной дальности, так и возможность оценки состояния ионосферы в области средней точки радиотрассы при односкачковом распространении. Если изменение частоты происходит в достаточно широком диапазоне, то результатом является ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы, которая отражает частотную зависимость группового запаздывания сигналов, прошедших различными путями в ионосфере, в точке приема, т.е. модовую структуру волнового поля.

Некоторой разновидностью метода НЗ можно считать случай совмещения пунктов излучения и приема – возвратно-наклонное радиозондирование ионосферы (ВНЗ). [8] Этот метод нашел широкое применение в РЛС загоризонтного обнаружения. Так, одно из возможных решений задачи согласования параметров РЛС (таких, как рабочая частота) с характеристиками трассы распространения (амплитудно-частотными и дальностно-частотными) заключается во введении в состав РЛС специального тракта определения оптимального поддиапазона рабочих частот. Назначение этого тракта заключается в выборе поддиапазона частот, в котором затухание на трассе распространения минимально, с целью оптимизации работы тракта обнаружения полезного сигнала. Конструктивно данный тракт может представлять собой самостоятельную РЛС, входящую в состав основной РЛС, со своим возбудителем и отдельными приемными устройствами. Как, например, станция ВНЗ «Круг», входившая в ЗГ РЛС «Дуга». Также этот тракт реализуется в режиме работы самой РЛС на тех же аппаратных средствах, что и обнаружение, этот режим осуществляет возвратно-наклонное зондирование и уточняет параметры работы РЛС.

6. Заключение

В результате получаем задачу определения оптимального состава системы ионосферного обеспечения загоризонтной радиолокационной станции. Очевидно, что такая система должна быть оптимальной и по технико-экономической составляющей.

Целесообразно для первоначальной оценки параметров ионосферы использовать известные статистические модели. Т.е. на основе статистических данных, учитывая недавнее сканирование, составляется прогноз состояния ионосферы: высоты слоев, частотная зависимость, электронное распределение. Далее имеет смысл уточнить параметры ионосферы путем периодического сканирования трассы распространения радиоволн возвратно-наклонным зондированием.

Все это не потребует значительных дополнительных затрат, однако и не даст необходимой точности. Применение системы вертикальных ионозондов в корне изменит ситуацию. Поскольку создание такой системы в интересах только одной РЛС экономически нецелесообразно, имеет смысл создания масштабной системы отслеживания параметров ионосферы в интересах всей страны. По данным специалистов Института Прикладной Геофизики для перекрытия потребности в ионосферных данных достаточно 40 ионозондов на Россию. Существующие на данный момент ионозонды на территории нашей страны не объединены в единую сеть, принадлежат различным организациям и не поставляют информацию в единый центр.

Объединенные в единую сеть, пусть и состоящую из различных ионозондов, они смогут осуществлять наклонное зондирование и перекрыть гораздо большую площадь, нежели по отдельности. Ионозонды «Парус-А» показывают возможность устойчиво осуществлять как вертикальное, так и наклонное зондирование ионосферы. Его разработка и производство ведущими российскими специалистами выгодно отличает его от других типов сетевых средств зондирования ионосферы, применяемых на территории нашей страны.

В качестве примера успешной реализации этой системы можно привести систему загоризонтного обнаружения Австралии JORN (Jindalee Operational Radar Network). Кроме трех основных РЛС ЗГО «Jindalee» в систему входят 12 собственных вертикально-наклонных ионозондов, 5 ионозондов Департамента Обороны и 7 приемоответчиков. Все это позволяет контролировать состояние ионосферы в области отражения радиосигналов. И, внося соответствующую поправку, более точно определять координаты воздушных и надводных целей.

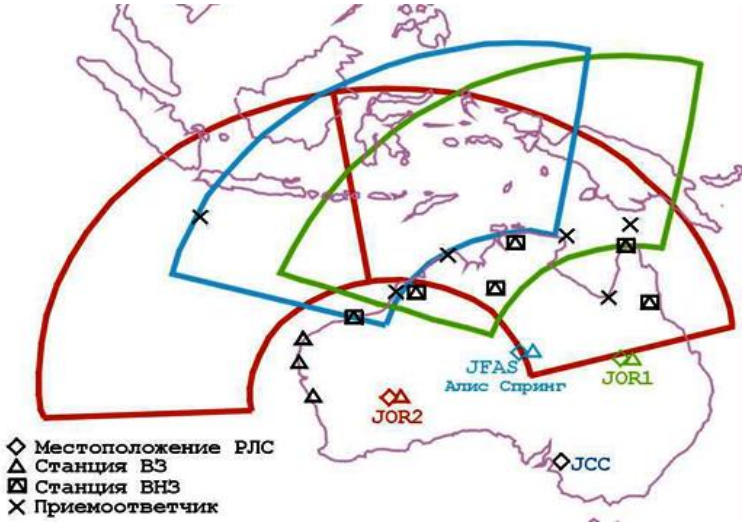


Рис. 11. Расположение РЛС «Jindalee» и ионозондов радиолокационной сети JORN

Литература

1. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям, Москва ФГБУ «ИПГ» 2012, 270 с.
2. Власов Ю.М., Глинкин И.А., Литвинов С.В. Применение наклонного зондирования иононсферы для увеличения точностных характеристик ЗГ РЛС // Вопросы Радиоэлектроники №3 2018 г., С.11-18.
3. Литвинов С.В., Паньшин Е.А. Результаты работ по расширению функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» ионосферной сети ФГБУ «ИПГ // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С 381 - 388.
4. Анохина Н.П., Атряхин В.А., Литвинов С.В., Ребриков А.В. Метод уменьшения ошибок определения координат воздушной цели в загоризонтном радиолокаторе // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны: науч. журн.; ЯВВУ ПВО. – Ярославль, 2018. – № 2. – с. 15-22.
5. Литвинов С.В., Сидоров Р.В. Применение фазированной антенной решетки для наклонного зондирования ионосферы // IV Всероссийская научно-техническая конференция «РТИ Системы ВКО–2016»: труды конференции. – Москва: Изд. МГТУ им Н.Э.Баумана, 2017. С.738-748.
6. Кузьмин А.В., Канаев А.С. Средства вертикального радиозондирования ионосферы // Гелиофизические исследования Выпуск 2, С.72–82, 2012.
7. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов; под ред. С. Ф. Боева ; ОАО «РТИ», ОАО «НПК «НИИДАР». - Москва : Техносфера, 2017. - 491 с.
8. Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н., Власов Ю.М., Кузьмин А.В. Ионозонд «ПАРУС-А»: функциональные возможности и перспективы // Гелиофизические Исследования выпуск 4, 68–74, 2013.

References

1. 1. Guidelines for ionospheric, magnetic and heliogeophysical observations, Moscow, IPG 2012, 270 p.
2. 3. Vlasov Yu.M., Glinkin I.A., Litvinov S.V. The use of oblique sensing of ion-spheres to increase the accuracy characteristics of the CG radar // Questions of Radioelectronics No. 3, 2018, P.11-18.
3. 4. Litvinov S.V., Panshin E.A. The results of the work on expanding the functional capabilities of the Paros-A ionosonde of the ionospheric network of the FSGI “IPG” // Modern problems of remote sensing, radiolocation, propagation and diffraction of waves / Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. –Murom: Izd.-Printing Center MI VlSU, 2018. C 381 - 388.
4. 5. Anokhina N.P., Atryakhin V.A., Litvinov S.V., Rebrikov A.V. The method of reducing errors in determining the coordinates of an airborne target in a trans-horizon radar. Vestnik Yaroslavskogo Higher Military School of Air Defense: Scientific. Journal .; HAMM air defense. - Yaroslavl, 2018. - № 2. - p. 15-22.
5. 6. Litvinov S.V., Sidorov R.V. Application of a phased antenna array for oblique sounding of the ionosphere // IV All-Russian Scientific and Technical Conference “RTI VKO Systems 2016”: proceedings of the conference. - Moscow: Izd. Bauman Moscow State Technical University, 2017. P.738-748.
6. 7. Kuzmin A.V., Kanaev A.S. Means of vertical radio sounding of the ionosphere // Heliophysical studies Issue 2, P.72–82, 2012.
7. 8. Akimov V.F., Kalinin Yu.K. Introduction to the design of ionospheric over-the-horizon radars; by ed. S. F. Boyev; OJSC "RTI", OJSC "NPK" NIIDAR ". - Moscow: Technosphere, 2017. - 491 p.
8. 9. Givishvili G.V., Krasheninnikov I.V., Leshchenko L.N., Vlasov Yu.M., Kuzmin A.V. Ionosonde "PARUS-A": functional capabilities and prospects // Heliophysical Studies Issue 4, 68–74, 2013.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ

И.Н. Малышева, Ю.А. Плахотнюк, В.В. Погожев, В.А. Середа

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается вопрос анализа программного обеспечения микропроцессорных устройств с целью поиска ошибок, уязвимостей, проведения рефакторинга и оптимизации. Описан обзор существующих методов анализа программного обеспечения, а также определены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: встраиваемое программное обеспечение; рефакторинг; оптимизация.

THE AUTOMATED ANALYSIS AND TESTING OF THE SOFTWARE OF MICROPROCESSOR DEVICES

I.N. Malysheva, Yu.A. Plahotnuk, V.V. Pogozhev, V.A. Sereda

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. The question of the analysis of the software of microprocessor devices for the purpose of search of errors, vulnerabilities, carrying out refactoring and optimization is considered. The review of existing methods of the analysis of the software is described, and also the basic directions of the further researches are defined.

Keywords: embedded software; refactoring; optimization.

1. Введение

В составе современных телекоммуникационных устройств и систем имеется один или несколько блоков, управление которыми осуществляется посредством микропроцессоров и микроконтроллеров. Вследствие быстрого роста производительности вычислительной техники часто при разработке программного обеспечения (ПО) микропроцессорных устройств (МУ) используются языки программирования высокого уровня. Это позволяет существенно ускорить разработку ПО, улучшить восприятие кода, но при этом эффективность ПО с позиции производительности или использования памяти существенно снижается. После компиляции ПО может содержать ошибки и уязвимости, выявление которых достаточно проблематично. Таким образом, необходим инструмент, позволяющий независимо от архитектуры вычислительного устройства анализировать и оптимизировать низкоуровневый ассемблерный код.

2. Задача

Анализ ПО вручную является сложным и утомительным занятием, эффективность которого напрямую зависит от опыта и квалификации разработчика. Для данной цели оптимальным решением является автоматизация части процессов, а также передача

определенных функций интеллектуальным системам. Последовательность действий автоматизированного анализа ПО МУ представлена на рис. 1 в виде блок-схемы.

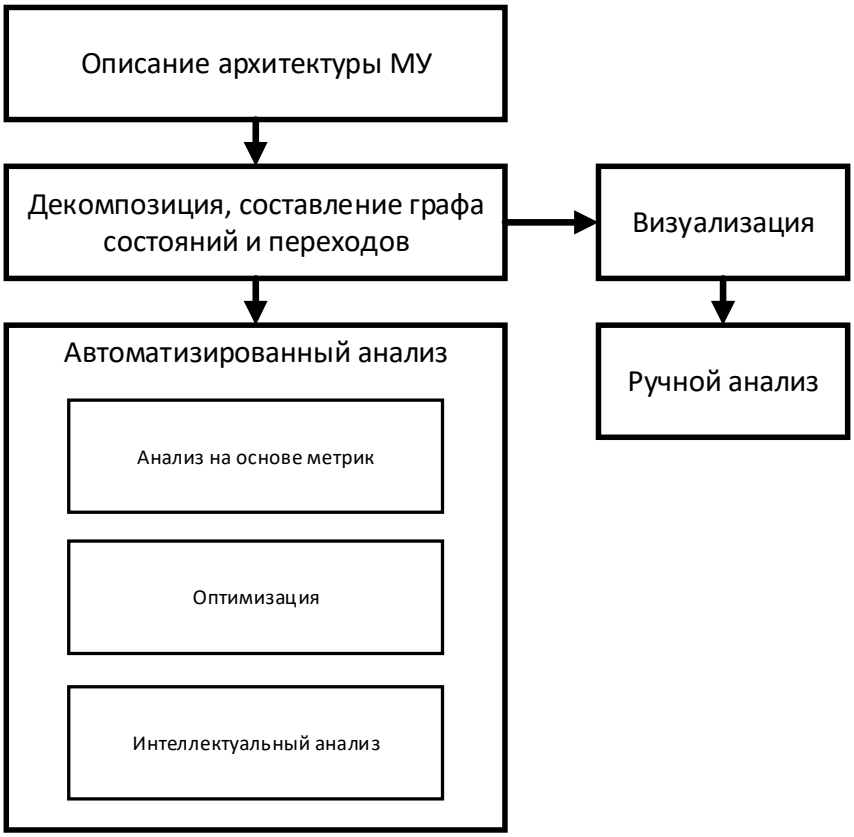


Рис. 1. Последовательность действий при анализе ПО МУ

В связи с этим первой проблемой является преобразование низкоуровневого кода ассемблера (дизассемблера) в соответствующее представление, с помощью которого возможно производить как его ручную обработку, так и обработку на ЭВМ. В данном случае предлагается использовать графы состояний и переходов, описание которых приведено ниже.

Так как существует большое разнообразие архитектур МУ, для того чтобы для каждой из них не создавать собственный инструмент, необходимо разработать универсальный способ описания системы команд и других особенностей МУ.

После представления ПО МУ в виде графа при помощи специальных алгоритмов, в том числе и интеллектуальных (нейросетевые, генетические алгоритмы) производится поиск ошибок, уязвимых частей ПО, осуществляется рефакторинг и оптимизация, а также тестирование.

3. Этапы анализа

Описание архитектуры микропроцессорного устройства

В [1, 2] приведено описание инструмента алгоритмизации машинного кода телекоммуникационных устройств при помощи автоматизированного генерирования метаданных. В данном случае предполагается, что исходный код ПО МУ представлен в

виде ассемблера либо ассемблерного листинга, поэтому задача его преобразования в удобный для обработки формат несколько упрощается.

Так как взаимодействие с ПО МУ осуществляется на низком уровне, то вместе с генерированием метаданных необходимо создать модель описания архитектурных особенностей МУ, таких как регистры, память и система команд. При этом описание должно быть достаточным и независимым для беспроблемного добавления архитектуры новых устройств. В связи с данными требованиями предлагается модель описания архитектуры МУ представить в виде файла с определенной разметкой (например, XML или JSON). На рис. 2 изображен пример одного из вариантов описания архитектуры МУ.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<!DOCTYPE Device>
<Device name ="Мое устройство" description ="Тестовое описание устройства">
 <Register addr="0x100000000" reset="0x0003" length="16" name="register5" group="2"/>
 <Memory addr="0x00000000" length="0x4000" description="Область памяти 1" />
 <Command name="mov">
  <Arg>source</Arg>
  <Arg>rec</Arg>
  ...
 </Command>
 ...
</Device>
```

Рис. 2. Пример описания архитектуры МУ

Данный файл создается один раз для каждого типа МУ и динамически подгружается перед началом анализа.

Представление программы в виде графа состояний и переходов

На данном этапе в ПО на основе вышеупомянутой модели описания архитектуры МУ выделяется некий набор состояний, в которых может находиться МУ. Переходы между состояниями осуществляется посредством выполнения фрагментов кода (процедур). Таким образом, получается аналог конечного автомата [3]. Состояния и переходы образуют граф, представляющий собой полный алгоритм работы программы. Благодаря этому процесс работы ПО можно наглядно визуализировать с целью ручного анализа либо осуществить его автоматизированную обработку при помощи ЭВМ на наличие ошибок, уязвимостей и для проверки качества кода на основе метрик.

Анализ на основе метрик

Целесообразно начать процесс анализа ПО МУ с вычисления метрик, позволяющих получить количественную оценку качества написания ПО. В настоящее время метрики используются в основном для анализа объектно-ориентированных

программ с целью выявления возможности эффективной оптимизации ПО или проведения рефакторинга [4].

Использование объектно-ориентированного программирования для МУ не всегда является приемлемым и эффективным решением, однако некоторые виды метрик могут быть полезны для выявления «узких» мест ПО, созданного с использованием процедурного программирования.

Возможно использование нескольких типов метрик: количественные, метрики сложности потока управления программы, метрики сложности потока управления данными. Первые представляют собой набор статистических данных о программе, таких как число строк кода, среднее число строк для функций и процедур и др. Следующий тип метрик используется для анализа графов управления программы. Данный тип графов отличается от графов состояний и переходов тем, что в нем отсутствуют ветвления и циклы, имеется лишь последовательный код. Последний тип метрик позволяет оценить эффективность использования данных в ПО, выявить неиспользуемые переменные и т.д. Дополнительно применимо к МУ можно ввести еще ряд метрик, позволяющих произвести оценку использования регистров при выполнении процедуры или функции, а также численно характеризующих эффективность обращений к памяти.

После вычисления метрик необходимо произвести оптимизацию и рефакторинг ПО.

Автоматизированная обработка графа состояний и переходов

Так как граф состояний и переходов программы отражает полный алгоритм ее работы, с помощью него можно осуществить тестирование корректности работы ПО с применением нейросетевых технологий. Данный процесс подробно описан в [5].

Если программа работает правильно, имеет смысл осуществить ее оптимизацию. Как показывает практика, зачастую компиляторы довольно плохо распределяют ресурсы, такие как память и регистры. В данном случае также перспективным решением представляется применение технологий искусственного интеллекта, например, генетических алгоритмов.

4. Заключение

Были рассмотрены основные этапы анализа ПО МУ с целью его тестирования, оптимизации, рефакторинга, а также поиска ошибок и уязвимостей. Следующим шагом в направлении данного исследования является более глубокий анализ каждого из этапов для создания специализированного инструмента, позволяющего в полуавтоматическом режиме производить описанные выше действия.

Литература

1. Буйневич М.В., Израилов К.Е. Метод алгоритмизации машинного кода телекоммуникационных устройств / Телекоммуникации. 2012. №2. С. 2.
2. Буйневич М.В., Израилов К.Е. Автоматизированное средство алгоритмизации машинного кода телекоммуникационных устройств. / Телекоммуникации. 2013. №6. С. 2-9.

3. Шалыто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления / СПб.: Наука, 1998. 628 с.
4. Самойликова О.А., Рудакова Г.М. Использование объектно-ориентированных метрик для анализа программного обеспечения / Образовательные ресурсы и технологии. 2014. №1 (4). С. 78-83.

REFERENCES

1. Bujnevich M. V, Izrailov K.E.method of algorithmization of a machine code of telecommunication devices / Telecommunications. 2012. №2. P. 2.
2. Bujnevich M. V, Izrailov K.E.automat means of algorithmization of a machine code of telecommunication devices. / telecommunications. 2013. №6. P. 2-9.
3. Shalyto A.A. Switch-technology. Algorithmization and programming of problems of logic management / SPb.: a science, 1998. 628 pages.
4. Samojlikova O. A, Rudakov G.M.Ispolzovanie of object-oriented metrics for the software analysis / Educational resources and technologies. 2014. №1 (4). P. 78-83.

АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Е. И. Степнова[1], С. К. Киселев[2]

[1]АО «УКБП», Ульяновск, Россия
[2]ФГБОУ ВО «УлГТУ», Ульяновск, Россия

Аннотация. В данной работе рассмотрен способ обработки пилотажно-навигационной информации воздушного судна. Проанализирован алгоритм действий пилотов во время выполнения плана полета. На основе проведенного анализа предложен адаптивный способ обработки пилотажно-навигационной информации на этапе посадки.

Ключевые слова: информация, управление, индикация, адаптация, обработка.

ADAPTIVE TREATMENT OF PILOT-NAVIGATION INFORMATION

E.I. Stepnova[1], S.K. Kiselev[2]

[1]JSC «UIMDB», Ulyanovsk, Russia
[2]FSEI HPE «ULSTU», Ulyanovsk, Russia

Abstract. In this paper, the method for handling aircraft flight information is considered. Analyzed the algorithm of pilots actions during the execution of the flight plan. Based on the analysis performed, an adaptive method for processing pilot-navigation information at the landing stage was proposed.

Keywords: information, management, display, adaptation, processing.

1. Введение

Согласно исследованиям Boeing с 2007 по 2016 год [4] 10% авиационных происшествий происходит во время буксировки и руления, 6% при взлете и наборе высоты, 11% во время крейсерского полета, 3% на этапе снижения, 8% во время предварительного захода на посадку и 24% на этапе приземления и финального захода на посадку. Таким образом, видно, что значительная часть авиационных происшествий происходит на этапе посадки.

Большинство авиационных происшествий происходит в результате не оптимальных действий пилота. Ошибки человека считаются главными или способствующими причиннами большинства авиационных происшествий. Устранить все ошибки пилота невозможно, поскольку ошибки являются нормальной составляющей человеческой деятельности. Система авиации должна не только распознавать и устранять ошибки человека, но также функционально быть максимально приближенной к деятельности пилота, поскольку чтобы принимать правильные решения пилоту жизненно важно быстро отсортировывать, понимать и усваивать поступающие данные.

В статье предлагается способ обработки пилотажно-навигационной информации воздушного судна таким образом, чтобы пилотажная информации была адаптировна под этап посадки воздушного судна, что позволит снизить нагрузку на пилотов, увеличить качества пилотирования и обеспечить безопасность полетов. При этом пилот

должен быть ясно осведомлен о параметрах полета в форме, которая исключала бы перегрузку его информацией.

2. Метод обработки данных

Пилотирование воздушного судна (ВС) представляет собой выполнение следующих основных этапов [2]: стоянка, руление, разбег, взлет, набор высоты, маршрут, посадка, пробег, заруливание. Этапы полета воздушного судна определяются видом решаемой задачи и характером выполняемой экипажем работы.

На каждом этапе существует большое количество факторов влияющих на выполнение пилотирования. На этапе посадки это:

- посадочная масса и центровка;
- температура окружающего воздуха;
- угол наклона глиссады;
- уклон летно-посадочной полосы (ВПП);
- наличие обледенения,
- сдвиг ветра, бокового ветра, болтанки;
- коэффициент сцепления;
- видимость на ВПП.

Пилот получает через зрительный канал до 90% требуемой информации, значительную часть которой предоставляет ему система отображения информации (СОИ) ВС.

Взаимодействие летчика с СОИ складывается из двух основных процессов: процесса получения информации о текущих значениях и динамике полетных параметров (ПП), состоянии технических систем и процесса управления, в ходе которого летчик приводит значения ПП и их динамику в состояние, соответствующее выполняемой пилотажной задаче. Формирование приборного образа полета происходит в результате получения и переработки летчиком информации при зрительном сканировании СОИ - случайном процессе перемещения взгляда летчика по элементам СОИ.

Особенностью процесса сканирования СОИ является дискретность получения летчиком информации с каждого элемента СОИ, которая характеризуется, в первую очередь, средней частотой зрительных обращений пилота к основным элементам СОИ. Летчик снимает показания различных элементов СОИ с различной частотой в зависимости от динамичности визуализируемой ими информации и выполняемой пилотажной задачи, «при этом уменьшение доли внимания к тому или иному прибору часто диктуется отсутствием времени, а не уменьшением потребности в информации» [3].

Динамичность протекающих в системе «летчик-самолет» процессов требует от летчика такой организации его зрительной деятельности, при которой он способен оперативно получить с СОИ необходимую по полетной ситуации информацию, а от разработчиков СОИ - обеспечить летчику объективную возможность получения такой

информации с учетом объективно ограниченных психофизиологических способностей летчика [3].

Проблема надежности восприятия информации пилотом заключается в том, что ее количество практически не ограниченно растет, тогда как возможности пилота весьма ограничены [1].

Относительная зрительная загрузка пилота по параметрической видеоинформации рассчитывается по формуле 1 [3].

$$\lambda = T_{\phi} \sum_{i=1}^{N} f_i + T_n \sum_{n=1}^{K} \overline{f_n}, \quad (1)$$

где: λ - Относительная зрительная загрузка пилота по параметрической видеоинформации;

Tф - среднее время снятия пилотом показания с индицируемого элемента (ИЭ) ПП;

fi - минимально необходимая частота наблюдения i-го ПП (i = 1,..., *Nn);*

Nn – число визуализируемых n-ым прибором ПП;

Tn – средняя продолжительность переноса взгляда пилота с одного прибора на другой;

fn - информативная частота *n*-го прибора.

Поскольку для оценки зрительной загрузки пилота рассматривается один ПП, то *Tn* и *fn* принимаем равным 0. Отсюда следует, что расчет относительной зрительной загрузки пилота по параметрической видеоинформации рассчитывается по формуле 2.

$$\lambda = T_{\phi} \sum_{i=1}^{N} f_i. \quad (2)$$

При $\lambda = 1$ пилот вынужден расходовать все время этапа на зрительный контроль выделенной группы ПП и не имеет резерва времени, что соответствует его максимально допустимой зрительной загрузке. При $\lambda < 1$ зрительная загрузка пилота меньше максимальной допустимой в λ раз и пилот на всем этапе полета обладает резервом времени в $T(1 - \lambda)$ с. При $\lambda > 1$ пилот не может контролировать все N ПП с частотами f_i, и величина λ указывает, во сколько раз его зрительная загрузка при контроле всех ПП с частотами f_i превышает предельно допустимую загрузку.

Адаптация пилотажной информации на этапе посадки производится на логическом уровне путем программной обработки и наложения ограничений на выдачу пилотажно-навигационной информацию по таким параметрам, как наличие/отсутствие «шасси обжато», положение топливного крана, скорость, положение рычага управления двигателем (РУД), высота.

Анализируя руководства по летной эксплуатации ВС и действия пилотов во время выполнения посадки определены параметры, необходимые для выполнения посадки ВС.

Информацию, не отображаемую на основном кадре, выводится в дополнительном кадре, по запросу пилота. Таким образом, пилот всегда может посмотреть дополнительную информацию, необходимую ему для оценки пилотажной ситуации и принятия решения. Также для безопасности полета, для каждого параметра введены

границы, при превышении которых параметры будут сигнализировать пилоту о превышении, или если на данном этапе полета параметр не отображался, то при приближении этого параметра к пороговому значению, шкала будет выведена на индикацию.

3. Моделирование

Расчет адаптивного представления информации рассчитан при нормальных условиях и пилотажная информация отображается в зависимости от этапа посадки. Результаты расчетов зрительной загрузки пилота по параметрической видеоинформации на этапе посадки приведены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1. Результаты расчетов зрительной загрузки пилота по параметрической видеоинформации на этапе посадки

Параметры	f_i					
	до высоты перехода		после высоты перехода		пробег	
	Было	Стало	Было	Стало	Было	Стало
Угол атаки	0,138	0,138	0,138	0,138	0,138	0,138
Приборная скорость	0,147	0,147	0,147	0,147	0,138	0,132
Символ самолета	0,092	0,092	0,092	0,092	0,092	0,092
Авиагоризонт	0,092	0,092	0,092	0,092	0,092	0,092
Крен	0,258	0,172	0,258	0,172	0,258	0,172
Тангаж	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Боковая перегрузка	0,184	-	0,184	-	0,184	-
Команды директорного управления	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	-
Символ безопасности	0,184	-	0,184	-	0,184	-
Режим управления полетом и тягой двигателей	0,122	0,061	0,122	0,061	0,061	0,02
Сигнальная информация	-	-	-	-	-	-
Барометрическая высота	0,154	0,115	0,154	0,115	0,154	-
Вертикальная скорость	0,295	0,295	0,295	0,295	0,295	-
Отклонение от глиссады и курса посадки	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-
Радиовысота	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	-
Высота принятия решения	0,123	0,061	0,123	0,061	0,123	-
Курсовая информация	0,16	0,16	0,16	0,16	0,123	0,074
Воздушная обстановка от СПС	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 1.

Параметры	f_i					
	до высоты перехода		после высоты перехода		пробег	
	Было	Стало	Было	Стало	Было	Стало
Признаки и частоты настройки бортовых радиосредств	-	-	-	-	-	-
Дальность до радиомаяков DME	0,092	0,092	0,092	0,092	0,092	-
Расстояние и время до ППМ-на	0,184	0,184	0,184	0,184	0,184	-
Нормальная перегрузка	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	-
СУММА fi	3,19	2,576	3,19	2,576	2,978	1,07
Тф	0,35					
Расчет λ по Тф	1,117	0,9	1,117	0,9	1,04	0,4

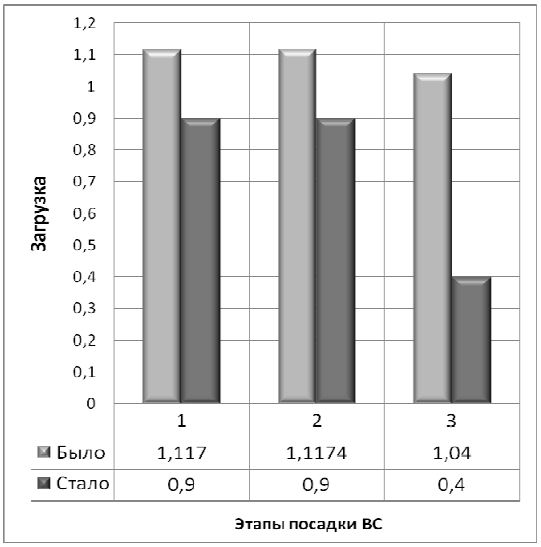


Рис. 2. Результаты расчетов зрительной загрузки пилотов.

4. Заключение

Как видно из результатов проведенного исследования зрительна нагрузка членов экипажа на этапе посадки при применении адаптивного способа обработки пилотажно-навигационной информации значительно снизилась. Поскольку этап посадки является самым сложным, то при адаптивном способе обработки пилотажно-навигационной информации у пилота появляется резерв времени для оценки пилотажной обстановки и принятия решения, что в свою очередь ведет к увеличению качества пилотирования и обеспечению безопасности полета, при этом исключается возможность дизинформации и чрезмерного расслабления пилотов.

Литература

1. Авиационные проблемы и системы: Учебное пособие/Г.И. Клюев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин; под ред. В.А. Мишина. – Ульяновск: УлГТУ, 2000.-343 с.
2. Динамика полета и пилотирование самолета Ту-154: Учеб. пособие.— М.: Воздушный транспорт, 1994.— 192 с.
3. Столяров Н.А., Кузнецов И.Б. Эргономические основы совершенствования отображения приборной информации//Научный вестник МГТУ ГА. – 2013 г. - № 192. – С. 96-101.
4. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959-2016, Boeing. – 2016.

References

1. Aviation problems and systems: Tutorial / G.I. Klyuev, N.N. Makarov, V.M. Soldatkin; by ed. V.A. Mishina - Ulyanovsk: ULSTU, 2000.-343 p.
2. Flight dynamics and piloting of the Tu-154: Textbook. allowance.— M .: Air transport, 1994.-192 p.
3. Stolyarov N.A., Kuznetsov I.B. Ergonomic bases for improving the display of instrument information // Scientific Bulletin of MSTU GA. - 2013 – No.192. - Pp. 96-101.
4. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959-2016, Boeing. - 2016.

АЛГОРИТМ ВЫБОРА АРХИТЕКТУРЫ ПОЛНОСВЯЗНОЙ СЕТИ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А. А. Толстых[1], А. Н. Голубинский[2]

[1]Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации» (Воронежский Институт МВД России), Воронеж, Россия

[2] Акционерное общество «Концерн «Созвездие» (АО "Концерн "Созвездие"), Воронеж, Россия

Аннотация. Предложен формальный алгоритм построения полносвязной части нейросетевого классификатора.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, искусственные нейронные сети, классификация телевизионных изображений.

ALGORITHM FOR THE SELECTION OF ARCHITECTURE OF A FULLY-CONNECTED NETWORK IN THE PROBLEMS OF IMAGE RECOGNITION ON THE BASIS OF CONVOLUTION NEURAL NETWORKS

A. A. Tolstykh[1], A. N. Golubinskiy[2]

[1]Federal State Public Educational Establishment of Higher Training «Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation» (Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia), Voronezh, Russia.

[2]Joint Stock Company "Concern "Sozvezdie" (JSC "Concern "Sozvezdie"), Voronezh, Russia.

Abstract. A formal algorithm for constructing a fully connected part of a neural network classifier is proposed.

Keywords: convolutional neural networks, artificial neural networks, television image classification.

1. Введение

В настоящее время решение задачи классификации объектов на основе изображений представляют практический интерес в различных областях техники. Например, с помощью классификаторов объектов на телевизионных изображениях решаются задачи биометрического разграничения контроля доступа [1], автоматического анализа данных получаемых с радаров [2]. На сегодняшний день наиболее перспективными классификаторами изображений являются сверточные нейронные сети. Однако, не существует формального алгоритма построения наиболее эффективной архитектуры подобных классификаторов, а лишь свод эмпирических правил, некоторые из которых плохо формализованы (например, понятие «элегантности») [3]. Целью работы является проведение разработка формального алгоритма выбора квазиоптимальной архитектуры полносвязной части сверточного нейроклассификатора.

2. Обзор подходов к выбору архитектуры полносвязной части нейроклассификатора

Для построения эффективного нейросетевого классификатора необходимо подобрать соответствующие гиперпараметры модели сверточной нейронной сети (СНС). Под гиперпараметрами понимаются свободные параметры модели, такие как количество слоев, количество нейронов в слое, функции активации и т.д. Существуют различные методы определения гиперпараметров СНС. В литературе описаны следующие подходы к подбору гиперпараметров:

1. Поиск по матрице [4]. Суть данного метода заключается в создании матрицы из значений гиперпараметров, на каждой итерации происходит обучение СНС с данными гиперпараметрами и оценка ее эффективности по заданному критерию. Эффективность данного метода достаточно низкая (слепой полный перебор). Вычислительная сложность – высокая (приблизительно – время обучения одной СНС умноженное на количество значений матрицы).

2. Пошаговое изменение архитектуры [4]. Выбирается начальная архитектура СНС и границы изменений в ней. На каждой итерации происходит переобучение СНС с данной архитектурой и ее эффективности по заданному критерию. Эффективность данного метода достаточно низкая (слепой полный перебор). Вычислительная сложность – высокая (приблизительно – время обучения одной СНС умноженное на количество значений матрицы).

3. Случайный поиск [5]. Создается матрица из значений гиперпараметров, на каждой итерации случайно выбирается значения из данной матрицы и происходит обучение СНС с последующей оценкой ее эффективности по заданному критерию. Эффективность данного метода – средняя (сильно зависит от начальных условий). Вычислительная сложность – средняя (приблизительно – время обучения одной СНС умноженное на количество итераций случайного поиска).

4. Метод, основанный на использовании Гауссовского процесса с ожидаемым улучшением [6]. Каждому гиперпараметру ставиться в соответствие гауссовское распределение, затем происходят итерации поиска по заданным распределениям. Эффективность метода – средняя (вычисляются направления в пространстве гиперпараметров). Вычислительная сложность – средняя (приблизительно – время обучения одной СНС умноженное на количество итераций метода).

5. Метод, основанный на использовании древовидных оценочных функций Парзена [5]. Начальный этап алгоритма повторяет метод гауссовского процесса с ожидаемым улучшением. Затем строится дерево решений и происходит поиск по нему. Эффективность метода – высокая (вычисляются направления в пространстве гиперпараметров). Вычислительная сложность – средняя (использование поиска по дереву значительно сокращает поиск).

6. Выбор гиперпараметров с помощью нейронной сети [7]. Данный метод реализуется следующим образом, специализированная сеть – учитель (*critic*) производит оценку данных и выбранной архитектуры, затем вносит соответствующие изменения. Эффективность метода – в настоящее время ведутся исследования применимости

данного метода. Вычислительная сложность – низкая (одна итерация работы сети-учителя).

Для каждого из методов необходимо определить пространство гиперпараметров и базовою модель (*baseline*). В качестве базовой модели использовалась модель, приведенная на рис. 1.

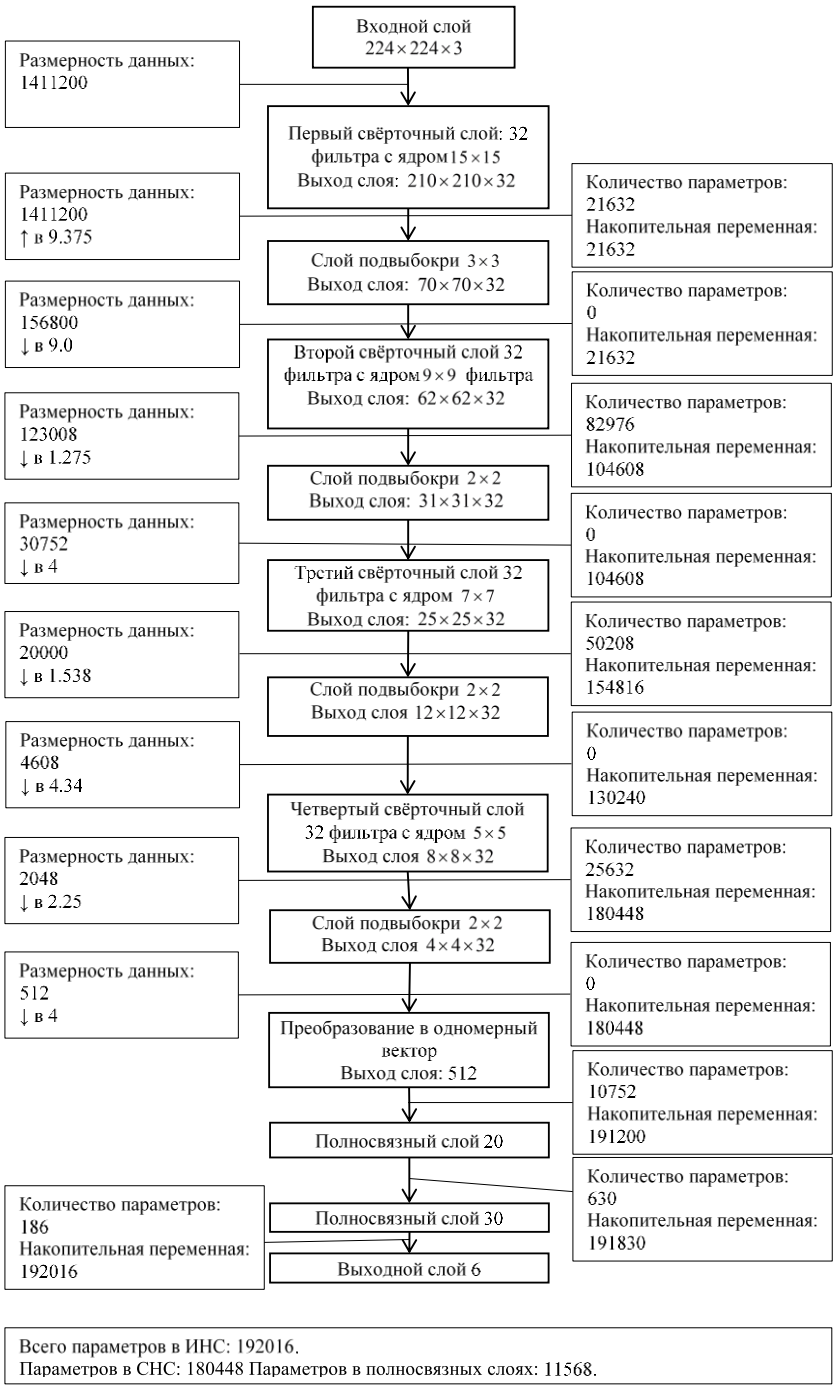


Рис. 1. Базовая архитектура СНС.

Далее был проведен поиск, основанный на пошаговом изменение параметров, используя в качестве критерия отбора ошибку обучения СНС на замкнутом наборе данных обучающей выборки, в качестве набора обучающих данных использовались

изображений военной техники и военнослужащих общим объемом 120 изображений (6 классов по 20 изображений в каждом).

3. Алгоритм построения полносвязной части сверточного нейроклассификатора

Предложен следующий алгоритм выявления неиспользуемых нейронов в полносвязном слое:

1. Осуществляется разделение архитектуры искусственной нейронной сети на параметризатор (сверточная часть нейронной сети) и классификатор (полносвязная часть нейронной сети). Так как проводится анализ полносвязной структуры нейронной сети, для упрощения вычислений полносвязная сеть получает вектор, сформированный последним плоским слоем сверточной части. Таким образом, для вычислений требуется на несколько порядков меньше вычислительных мощностей (нет необходимости производить все вычисления в СНС). Данный шаг технически реализуется как создание псевдо-обучающей выборки $t_i \in T'$ (i – количество объектов в обучающей выборке; t_i – объект из псевдо-обучающей выборки; T' – псевдо-обучающая выборка), которая состоит из 120 векторов, размерностью $t_i \propto [512 \times 1]$, соответствующих набору вторичных параметров, выделенных с помощью параметризатора для каждого объекта обучающей выборки.

2. Для каждого слоя F_a, $a \in [0,2]$ полносвязной сети (слои считаются от входа к выходу) вычисляются отклики нейронов f_a^i на каждый входной вектор из обучающей выборки. Полученные данные сохраняются в отдельные массивы O_a^i, точность вычисления соответствует стандарту float32 (32 битному представлению числа с плавающей точкой).

3. Нейроны, активация которых равна нулю p_a^i записываются в отдельный массив P_a.

4. Производится проверка, существуют ли такой набор нейронов, что $d_a = \sum_{i=0}^{I} p_a^i \in P_a \Big|_{p_a^i=0}$ *для всех* $t_i \in T'$. Если количество таких нейронов в каком-либо слое a больше нуля, то на следующей итерации поиска гиперпараметров, слой a будет содержать на d_a меньше нейронов.

5. В массивах O_a^i происходит поиск нейронов, удовлетворяющих условию $c_a^j = \sum_{i=0}^{I} \frac{p_a^i}{\frac{1}{I}\sum_{j=0}^{I} p_a^i} < 10^{-6}$ *для всех* $t_i \in T'$. Значение ограничения 10^{-6} было выбрано в результате проведения серии экспериментов.

6. Оценивается отклик выходного слоя полносвязной сети, вычисляется ошибка распознавания и количество выходных нейронов k_i, которые при корректной классификации демонстрируют отклик более 0.9.

7. Если на шаге 6 ошибка классификации равна нулю и все выходные нейроны проходят проверку, то на следующей итерации поиска гиперпараметров, слой *a* будет содержать на $\sum_{j=0}^{J} c_a$ меньше нейронов.

Таким образом, предложен алгоритм, позволяющий формализовать подбор гиперпараметров полносвязной части СНС. На рисунках 2 – 4 приведены графики обучения полносвязной части при выборе гиперпараметров.

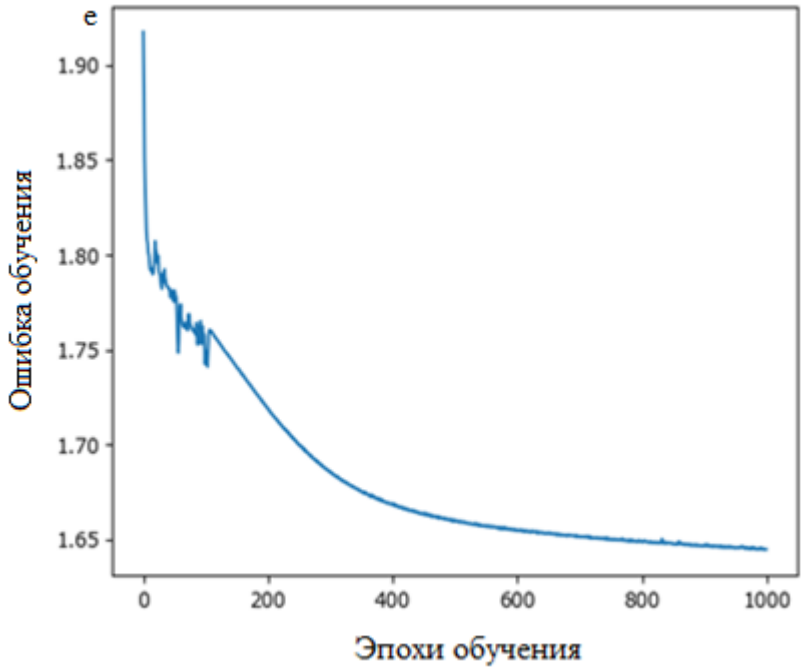


Рис. 2. Кривая обучения для базовой архитектуры сети.

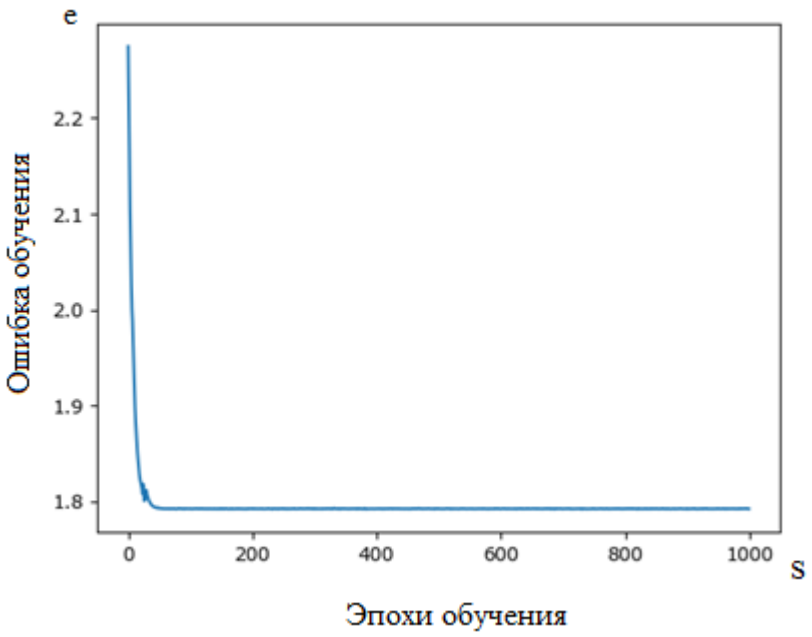


Рис. 3. Кривая обучения для архитектуры с эффектом «паралича сети»

На рисунке 3, приведена архитектура сети, на которой наблюдается эффект «паралича сети». В процессе обучения сети, значения весов могут в результате коррекции стать очень большими величинами. Это может привести к тому, что все или большинство нейронов будут выдавать на выходе сети большие значения, где производная функции активации от них будет очень мала. Так как посылаемая обратно в процессе обучения ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически замереть. Данная архитектура является не эффективной, так как сеть нельзя эффективно обучить.

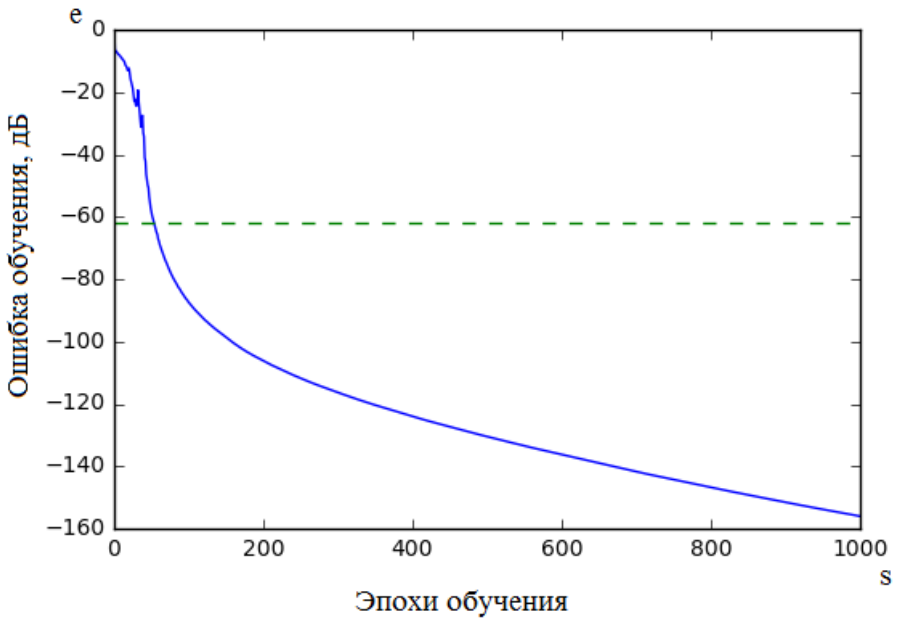


Рис. 4. Кривая обучения для найденной квазиоптимальной архитектуры сети

Архитектура СНС, представленная на рисунке 4, является наиболее эффективной и подходящей, в виду того, что за малое количество эпох, мы получаем полностью обученную сеть. Данная сеть обучилась за 50 эпох. Критерием останова являлся порог ошибки обучения (представленный на графике пунктиром), определяемый как $1/(4 \bullet Q \bullet p)$, где Q – количество объектов в обучающей выборке; p – количество классов нейроклассификатора.

Проанализировав рисунки 2 – 4, можно сделать вывод, что была подобрана квазиэффективная архитектура сети, которая позволила за 50 эпох обучить СНС на замкнутой обучающей выборке. Данная сеть обеспечивает нулевую ошибку классификации. Архитектуры, кривые обучения которых приведены на рис. 2 и 3 являются не эффективными, ввиду медленной сходимости и наличия эффекта «паралича сети». Архитектура квазиоптимальной полносвязной нейронной сети представлена на рис. 5.



Рис. 5. Архитектура найденной квазиоптимальной полносвязанной сети

Сверточная часть подбиралась поиском по матрице, количество протестированных образцов параметризатора составило 16 моделей.

4. Заключение

В работе предложен формальный алгоритм выбора архитектуры полносвязной части нейроклассификатора объектов на изображениях. При использовании данного алгоритма удалось снизить общее количество настраиваемых параметров полносвязной нейронной сети уменьшив их количество в 1,5 раза, при этом сохраняя нулевую ошибку на замкнутых данных. Подобное снижение количества параметров прямо влияет как на скорость обучения СНС, так и на время работы нейроклассификатора. Преимуществами предложенного подхода является возможность его автоматизации и введение количественных оценок эффективности полносвязной части нейроклассификатора.

Литература

1. Ma L. Resting State EEG-based biometrics for individual identification using convolutional neural networks / Ma L., Minett J. W., Blu T., Wang W. S-Y. // 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015, Vol. 3 – pp. 6-15.
2. Jun W. Study on deep learning in radar / Jun W., Tong Z., Peng L., Shaoming W. // JOURNAL OF RADARS, 2018, №7(4). – pp. 395-411.
3. Ranzato M.A. What is the best multi-stage architecture for object recognition? / Ranzato M. A., Jarrett K., Kavukcuoglu K., LeCu Y. // IEEE Computer Society. 2009. – pp. 2146-2153.
4. Matuszyk P. A Comparative Study on Hyperparameter Optimization for Recommender Systems / Matuszyk P., Castillo R. T., Kottke D., Spiliopoulou M. // Workshop on Recommender Systems and Big Data Analytics (RS-BDA'16). 2016. С. 13-21.
5. Bergstra J. Random Search for Hyper-Parameter Optimization / Bergstra J., Yoshua B. // Journal of Machine Learning Research (JMLR), 2012. – С. 281-305.
6. Snoek J., Larochelle H., Adams R.P. [1206.2944] Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms 2012. URL: https://arxiv.org/abs/1206.2944 (дата обращения: 10.01.2019).
7. Xu C. An Actor-Critic Algorithm For Learning Rate / Xu C., Qin T., Wang G., Liu T.Y. // 5th International Conference on Learning Representations (ICLR 2017). 2017. – pp. 1-12.

References

1. Ma L. Resting State EEG-based biometrics for individual identification using convolutional neural networks / Ma L., Minett J. W., Blu T., Wang W. S-Y. // 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015, Vol. 3 – pp. 6-15.

2. Jun W. Study on deep learning in radar / Jun W., Tong Z., Peng L., Shaoming W. // JOURNAL OF RADARS, 2018, №7(4). – pp. 395-411.
3. Ranzato M.A. What is the best multi-stage architecture for object recognition? / Ranzato M. A., Jarrett K., Kavukcuoglu K., LeCu Y. // IEEE Computer Society. 2009. – pp. 2146-2153.
4. Matuszyk P. A Comparative Study on Hyperparameter Optimization for Recommender Systems / Matuszyk P., Castillo R. T., Kottke D., Spiliopoulou M. // Workshop on Recommender Systems and Big Data Analytics (RS-BDA'16). 2016. C. 13-21.
5. Bergstra J. Random Search for Hyper-Parameter Optimization / Bergstra J., Yoshua B. // Journal of Machine Learning Research (JMLR), 2012. – C. 281-305.
6. Snoek J., Larochelle H., Adams R.P. [1206.2944] Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms 2012. URL: https://arxiv.org/abs/1206.2944 (дата обращения: 10.01.2019).
7. Xu C. An Actor-Critic Algorithm For Learning Rate / Xu C., Qin T., Wang G., Liu T.Y. // 5th International Conference on Learning Representations (ICLR 2017). 2017. – pp. 1-12.

АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ СВЯЗИ

А. В. Бусыгин[1], Ю. В. Ковайкин[1], А. Ю. Живодерников[1], П.В. Лебедев[1]

[1]Военная академия связи им. С. М. Будённого (ВАС), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается анализ аспектов построения систем управления сетью, моделей взаимодействия управляющей и управляемой систем, способы управления криптомаршрутизаторами построенными по двухсегментной архитектуре.

Ключевые слова: сеть передачи данных, система управления, технологический трафик, модель взаимодействия менеджер-агент.

ANALYSIS OF COMMUNICATION NETWORK MANAGEMENT SYSTEMS

A.V. Busygin[1], Y. V. Kovaykin[1], A. Y. Givodernikov[1], P. V. Lebedev[1]

[1]Military Academy of Telecommunications named after. S.M. Budyonny

Abstract. The article discusses the analysis aspects of building network management system, the model of interaction between the controlling and controlled systems, methods for managing the cryptographic routers, which are built along a two-segment architecture.

Keywords: data network; control system; technological traffic; manager-agent interaction model.

1. Введение

Возрастающие потребности должностных лиц МО РФ в оперативном предоставлении разнообразных услуг (речь, видео, передача данных и т.д.) высокого качества, предъявляют все возрастающие требования к устойчивому функционированию сетей передачи данных (СПД) МО РФ, а также к системе управления сетью. Продолжающиеся подключения к СПД МО РФ новых стационарных, а также постоянно перемещающихся полевых узлов связи и мобильных комплектов защищенной связи возлагают высокие требования к системе удаленного мониторинга и управления сетью, в разы возрастает циркуляция технологической информации, необходимой для решения задачи надежного функционирования СПД МО РФ.

2. Основные понятия системы управления

В сложных системах, к которым относятся современные телекоммуникационные сети, поддержание нужных режимов функционирования отдельных элементов и системы в целом обеспечивается управлением. Под управлением понимается процесс такого целенаправленного воздействия на систему (или объект), в результате которого система переходит в требуемое состояние. Систему, на которую осуществляется целенаправленное воздействие, в теории управления называют объектом управления (ОУ) [1].

Управление осуществляется с помощью системы управления (рисунок 1). Она состоит из управляющего устройства (УУ), которое иногда называется управляющей

системой, а также прямых и обратных каналов для передачи управляющей информации объектам управления и сбора информации о состоянии управляемой системы и среды.

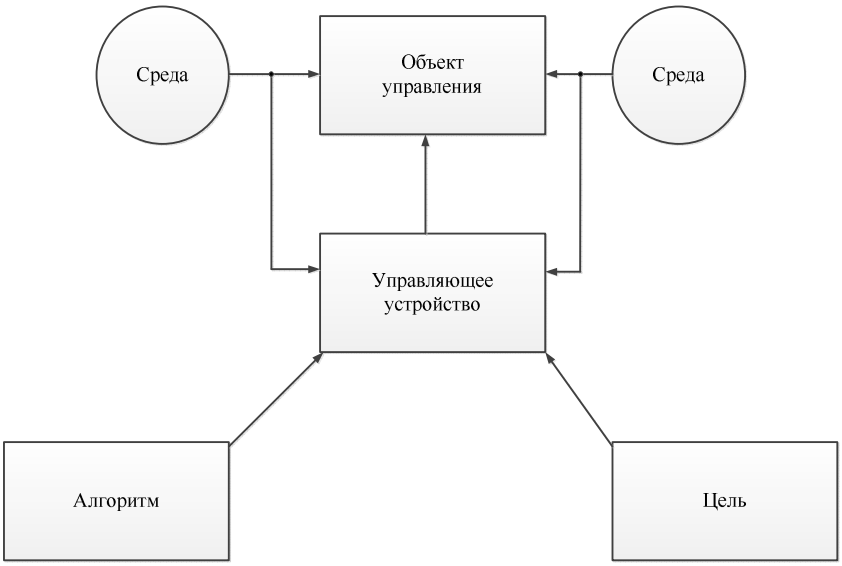


Рис. 1. Схема системы управления.

Для целенаправленного функционирования системы управления ей необходимо задать цель, т. е. то, к чему следует стремиться в процессе управления, а также определить алгоритм управления, позволяющий оптимальным образом добиться этой цели.

Управляющее устройство должно содержать все необходимые алгоритмы обработки информации и средства их реализации (в том числе исполнительные механизмы), объединенные для достижения заданных целей управления.

Любой процесс управления включает следующие этапы [2]:

– получение информации о поведении объекта управления и внешней среде;

– анализ информации о технологических параметрах, которые необходимы для настройки;

– выработку управляющего решения и осуществление управляющих воздействий.

Для исполнения указанных выше функций управляющее устройство должно состоять из совокупности вычислительных (программно-аппаратных) средств и оперативного состава, работающего с приложениями в контуре управления. Такие системы управления относят к классу автоматизированных систем управления.

Применительно к узлу связи комплексного оснащения (УСКО) можно отметить следующие особенности:

– все устройства сети объекта поддерживают технологию Fast Ethernet (FE), что делает сеть более дешевой и удобной;

– все настройки осуществляются через сервер технологического управления (СТУ) с АРМа администратора СТУ.

Общая схема управления справедлива и для систем управления телекоммуникационными сетями с учетом специфических особенностей сетей как

объектов управления. Поскольку телекоммуникационная сеть предназначена для обслуживания пользователей услугами связи, основная цель управления заключается в поддержании характеристик сети, гарантирующих обслуживание и предоставление пользователям запрашиваемых телекоммуникационных услуг с требуемым качеством.

Другая особенность телекоммуникационных сетей как объектов управления заключается в их большой пространственной разнесенности и разветвленности, а также наличии в сетях многочисленных программно-аппаратных средств (коммутаторы, маршрутизаторы, мультиплексоры, серверы, системы передачи, приемопередающие устройства, компьютеры и др.), удаленных друг от друга на расстоянии десятков и сотен километров и соединенных между собой различными каналами связи. За последние годы архитектура телекоммуникационных сетей стала значительно более сложной и многоплановой. В настоящее время создаются сети связи, основанные на самых современных сетевых и информационных технологиях. Однако наряду с внедрением в сети перспективных программно-аппаратных средств и новых технологий на сетях продолжает использоваться устаревшее оборудование, включая аналоговые системы передачи, координатные коммутаторы и др., а также старые технологии построения сетей. Телекоммуникационные сети за счет этих факторов становятся неоднородными как по архитектуре, так и по использованию технических и программных средств. Появляется необходимость построения неоднородных составных сетей, состоящих из сетей (подсетей), имеющих разные технологии оборудования и программное обеспечение. Такая интеграция разнородных сетей резко усложняет управление сетями такого класса. Решение задачи объединения и обеспечения функционирования телекоммуникационных сетей, построенных на различных технологиях, неразрывно связано с созданием эффективной системы управления.

Следует отметить, что на современном этапе развития информатизации и автоматизации создание даже больших однородных телекоммуникационных сетей не позволяет в полной мере использовать возможности многоуровневых автоматизированных систем управления и обработки данных. Особенно это касается сферы военного управления, в которой требуется обеспечить максимально оперативную автоматическую обработку и передачу информации через все уровни управления (от стратегического звена до тактических звеньев). Для решения таких сложных и крупномасштабных задач недостаточно применения однородных сетей, требуется применение совокупности сетей, имеющих разную архитектуру и построенных на различных сетевых и информационных технологиях. При этом межсетевое взаимодействие и задачи управления составной гетерогенной (неоднородной) сетью решаются организацией совместной транспортной службы.

С точки зрения организации взаимодействия компьютеров, сети делят на одноранговые и с выделенным сервером (иерархические) [3].

Все компьютеры одноранговой сети равноправны. Любой пользователь сети может получить доступ к данным, хранящимся на любом компьютере. Достоинствами одноранговых сетей являются их проста в установке и эксплуатации и то, что

операционные системы обладают всеми необходимыми функциями, позволяющими строить одноранговую сеть.

Однако в условиях одноранговых сетей затруднено решение вопросов защиты информации. Поэтому такой способ организации сети используется для сетей с небольшим количеством компьютеров и там, где вопрос защиты данных не является принципиальным.

В иерархической сети при установке сети заранее выделяются один или несколько компьютеров, управляющих обменом данных по сети и распределением ресурсов. Такой компьютер называют сервером.

Любой компьютер, имеющий доступ к услугам сервера называют клиентом сети или рабочей станцией. Сервер в иерархических сетях - это постоянное хранилище разделяемых ресурсов. Сам сервер может быть клиентом только сервера более высокого уровня иерархии. Поэтому иерархические сети иногда называются сетями с выделенным сервером.

Иерархическая модель сети является наиболее предпочтительной, так как позволяет создать наиболее устойчивую структуру сети и более рационально распределить ресурсы. Также достоинством иерархической сети является более высокий уровень защиты данных.

К недостаткам иерархической сети, по сравнению с одноранговыми сетями, относятся:

- необходимость дополнительной ОС для сервера;
- более высокая сложность установки и модернизации сети;
- необходимость выделения отдельного компьютера в качестве сервера

Многоуровневый иерархический подход является весьма полезным для построения любой крупной интегрированной системы управления сетями связи. В принципе, это стандартный подход, который применяется для построения больших систем управления любого типа, позволяющий объединить системы управления отдельными объектами организации в единую интегрированную систему управления.

3. Модель взаимодействия менеджер–агент

Управление сетями связи – это прикладной информационный процесс. Однако подлежащая управлению среда является распределенной, поэтому управление сетью – распределенный процесс, что влечет необходимость обмена информацией между различными процедурами управления. Распределенная природа телекоммуникационных сетей обусловливает необходимость применения соответствующих архитектур систем управления сетями. За основу таких архитектур, наиболее часто используемых в системах управления телекоммуникациями, берется модель взаимодействия менеджер – агент (рисунок 2). На базе этой модели могут быть построены большие распределенные системы управления сетями практически любой сложности с неограниченным количеством менеджеров и агентов разных типов.

Агенты – это прикладные программы, установленные или загружаемые в управляемые сетевые устройства (управляемые физические ресурсы), собирающие

информацию об их состоянии и осуществляющие непосредственное управление ими. Для получения требуемых данных об объекте и выдачи на него управляющих воздействий агенты встраиваются в физические ресурсы в определенные точки, в которых предусматриваются способы взаимодействия агентов с узлами сетевых устройств. Агенты могут иметь специальные датчики для получения необходимой информации или использовать интерфейсы, существующие в сетевых элементах. Кроме того, агенты могут работать на отдельном компьютере, связанным с управляемыми элементами по каким-либо интерфейсам. Агенты могут создаваться с достаточно высоким уровнем интеллекта, который позволяет самостоятельно выполнять ряд операций в аварийных ситуациях, построение различных временных зависимостей, производить фильтрацию сообщений и т.п.

За работой агента следит управляющая программа (управляющее приложение), называемая менеджером. Менеджер вырабатывает и направляет агенту команды на выполнение операций управления и получает от агента (агентов) информацию о выполнении команд и поведении управляемых ресурсов.

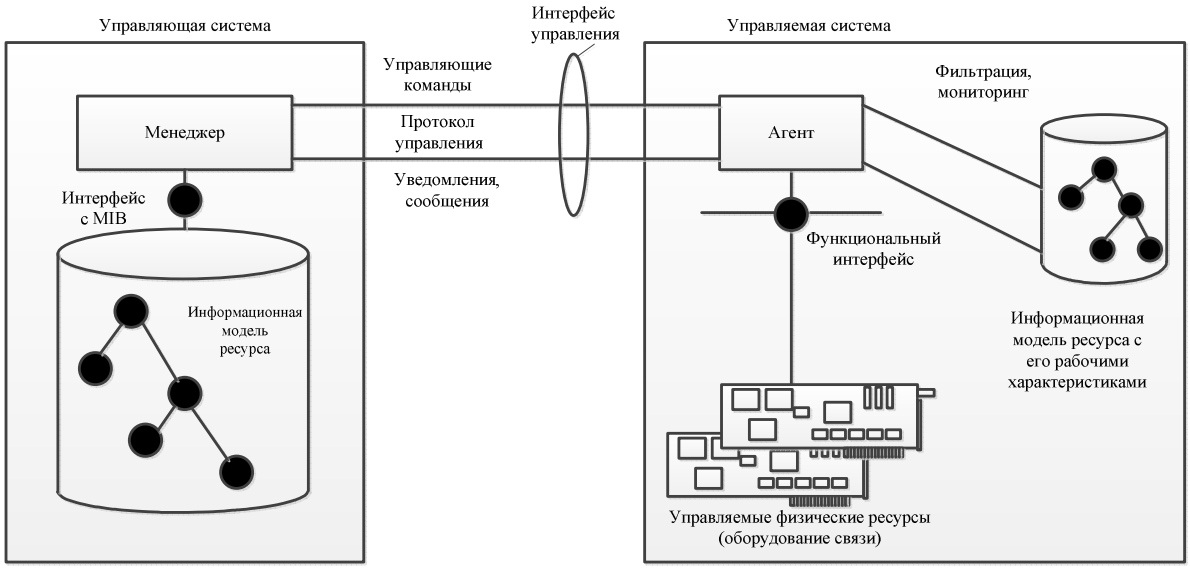


Рис. 2. Модель взаимодействия менеджер-агент.

Для контроля и управления реальным физическим ресурсом (сетевыми устройствами и оборудованием) необходимы только определенные его характеристики и параметры, поэтому в архитектуре менеджер – агент должна быть создана модель ресурса, отражающая только выбранные характеристики, параметры и связи между ними. В этом случае менеджер получает от агента только те данные, которые описываются моделью ресурса. Например, модель маршрутизатора обычно включает такие характеристики, как количество портов, их тип, таблицу маршрутизации, количество кадров и пакетов протоколов канального, сетевого и транспортного уровней, прошедших через соответствующие порты. На основе обработки информации, представленной агентом менеджеру, последний принимает решение по управлению физическим ресурсом.

Агенты хранят собранную информацию об управляемом ресурсе в своих информационных базах управления (Management Information Base – MIB), иногда называемых базами управляющей информации. В MIB хранятся атрибуты управляемых объектов, описания классов, которые соответствует элементам сети. MIB является абстрактным описанием характеристик управляемых ресурсов, т. е. оборудования и систем связи, и позволяет хранить описание операций управления, которые можно осуществлять над управляемыми объектами. Структура MIB обычно строится в виде иерархически организованного дерева управляющей информации (Management Information Tree – MIT). На верхних уровнях MIT расположены наиболее важные атрибуты, которые более детально характеризуются атрибутами нижних уровнем MIT. Каждая переменная имеет идентификатор (object identifier – OID). Он является фактически ее именем. Для упрощения классификации в качестве OID используется последовательность целых десятичных чисел, разделенных точками. Для облегчения понимания численному представлению ставится в соответствие символьное. Например: 1.3.6.1.2 – переменная из базы MIB, соответствующее символьное представление: iso.org.dod.internet.mgmt. В качестве примера на рисунке 3 рассмотрим фрагмент структуры OID.

Для каждой переменной, кроме имени, в базе содержится набор ее описаний. SNMP (Simple Network Management Protocol) - агент с помощью описанных в базе переменных получает доступ к реальным управляемым параметрам устройства.

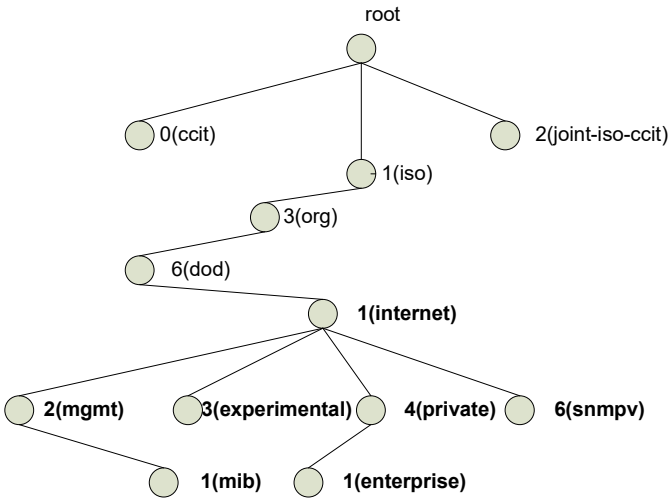


Рис. 3. Фрагмент структуры OID.

По сути дела, база управляющей информации MIB представляет собой модель управляемого ресурса, причем менеджер и агент должны располагать одной и той же моделью управляемого ресурса, иначе они не смогут понять друг друга. В использовании модели управляемого ресурса агентом и менеджером имеется существенное различие. Если агент наполняет модель управляемого ресурса текущими значениями характеристик данного ресурса, то менеджер использует модель для

определения того, чем характеризуется ресурс, какие характеристики менеджер может запросить у агента и какими параметрами он может управлять.

Агент фильтрует поток данных в сторону менеджера, тем самым избавляя модель менеджера от незначительных ошибок и искажений и увеличивая ее точность. Взаимодействие менеджера с агентами осуществляется по стандартному протоколу, тип которого зависит от технологии системы управления сетями.

Следует также отметить, что менеджер может работать с несколькими агентами и модель менеджера может включать модели нескольких ресурсов; поэтому менеджер обычно выполняется на отдельном компьютере.

Выше говорилось, что архитектура менеджер – агент позволяет строить достаточно сложные в структурном отношении распределенные системы управления сетями. Для МО РФ определена общая иерархическая структура телекоммуникационной сети нового облика [4], изображенная на рисунке 4.

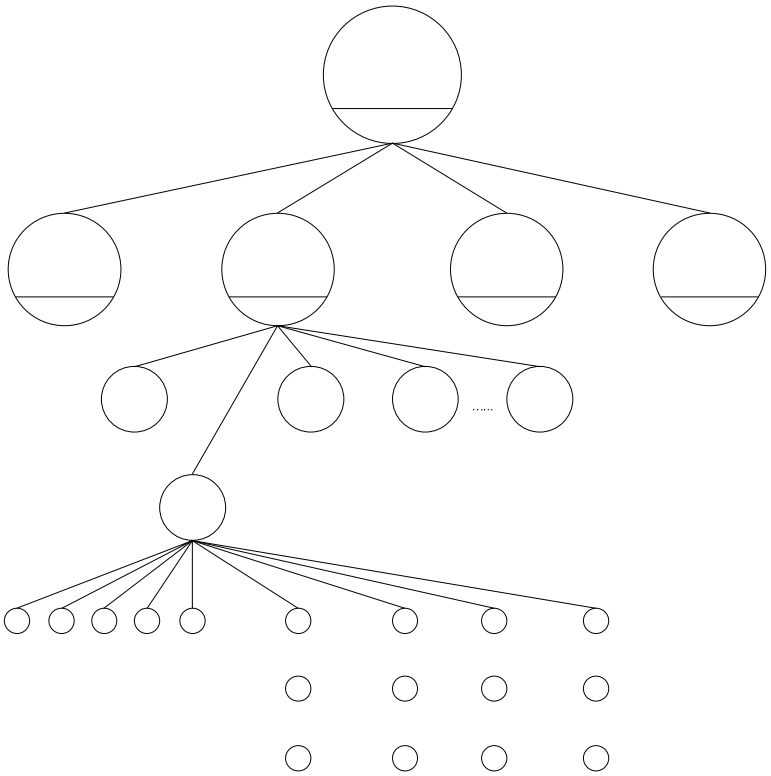


Рис. 4. Общая структура телекоммуникационной сети МО РФ.

Наиболее эффективной является иерархическая структура взаимосвязей между менеджерами, при которой каждый менеджер нижнего уровня выполняет также функции агента для менеджера вышестоящего уровня (рисунок 5). Такой агент работает с гораздо более укрупненной моделью своей части сети, в которой собирается информация, необходимая менеджеру следующего уровня для решения задач управления этого уровня. При этой схеме взаимосвязи между менеджерами

сокращаются объемы информации, циркулирующей между уровнями системы управления, что и приводит к гораздо более эффективной системе управления.

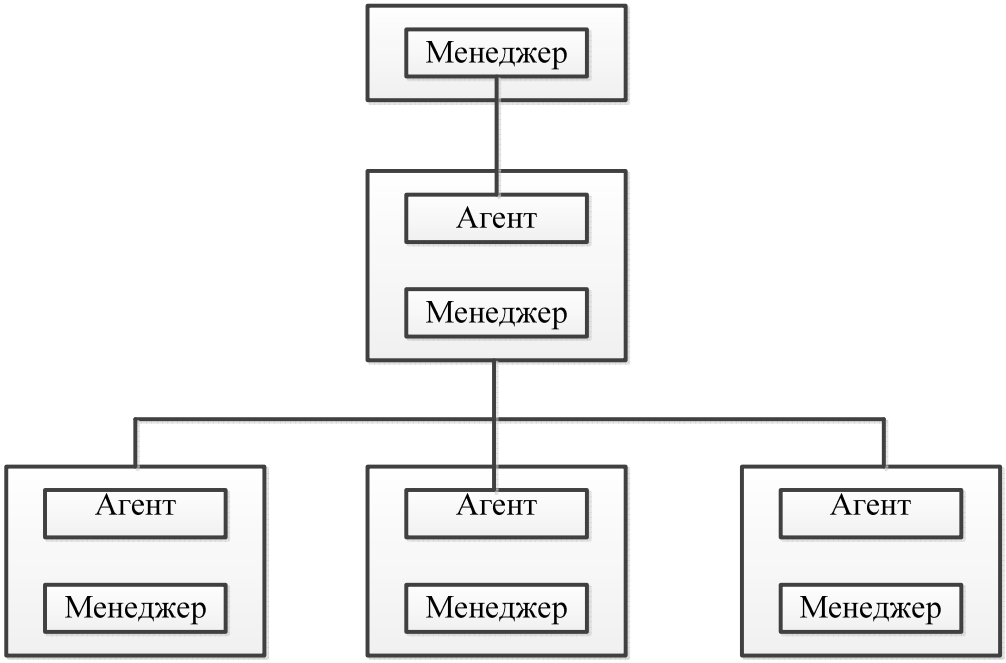


Рис. 5. Иерархическая схема управления с архитектурой менеджер-агент.

Распределенная система управления сетью дополняется рабочими станциями операторов. Рабочие станции организуют связь с менеджерами людей-операторов и администратора сети, тем самым включая их в контур управления сетью. С помощью графических интерфейсов операторы могут контролировать функционирование своих подконтрольных зон сети, выдавать команды менеджерам по управлению сетью и ее элементами, принимать непосредственное участие в выполнении тех операций и функций, которые не могут быть выполнены без участия человека.

4. Заключение

В настоящее время практически вся управляющая информация необходимая для настройки телекоммуникационного оборудования передается из центра мониторинга и управления сетью в открытом виде с использованием общепринятых протоколов, что создает предпосылки к воздействию на нее противника (перехват, модификация и т.п.), и тем самым к нарушению устойчивого функционирования СПД МО РФ.

Дальнейшее, более глубокое проведенных исследований в этой области позволит внести существенный вклад в развитие безопасности функционирования систем управления сетью.

Литература

1. Бесков А.В., Ковайкин Ю.В., Лебедев П.В. Совершенствование системы управления сети передачи данных путем защиты конфигурационного трафика // Сборник трудов XVI Всероссийская научная конференция «нейрокомпьютеры и их применение» – Москва, 2018. – С. 112-113

2. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Учебник для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – С.943
3. Бесков А.В., Ковайкин Ю.В., Бречко А.А. Обеспечение безопасности конфиденциальной информации при эксплуатации объектов информации // Современные информационные технологии Теория и практика // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции – Череповец, 2017. – С. 142-146
4. Бесков А.В., Ковайкин Ю.В., Кривошей О.И, Кирьянов А.С., Лебедев П.В. Направления развития системы связи ТЗУ с использованием средств криптографической защиты информации // Вопросы оборонной техники – Инв.№ 410, 2018 – С. 18-21

REFERENCES

1. Beskov A.V., Kovaykin Y.V., Lebedev P.V. Improving the data network management system by protecting configuration traffic // Collection of works XVI all-Russian scientific conference “Neurocomputers and their applications” – Moscow, 2018. – Pp. 112-113
2. . Olifer V.G., Olifer N.A. Computer networks. Principles, technologies, protocols. Textbook for universities. - 4th ed.– SPb.: Piter, 2010. – 943 p.
3. Beskov A.V., Kovaykin Y.V., Brechko A.A. Ensuring the security of confidential information in the operation of information objects // Modern information technology Theory and practice // Materials of the IV all-Russian scientific and practical conference – Cherepovets, 2017. - Pp. 142-146
4. Beskov A.V., Kovaykin Y.V., Krivoshei O.I., Kiryanov A.S., Lebedev P.V. Directions of development of the communication system of TZU using the means of cryptographic protection of information // Defense technology issues – Inv.№ 410, 2018 - Pp. 18-21

АРХИТЕКТУРА СЕТИ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

И. Р. Муртазин, М. А. Коцыняк, А. В. Бесков, О. С. Лаута, А. В. Мамай

Военная академия связи (ВАС), Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается подход к созданию архитектуры сети подвижной радиосвязи на основе эталонной модели взаимодействия открытых систем, который предназначен для организации данных сетей, под конкретные условия эксплуатации. Рассматриваемый подход облегчит построение сетей подвижной радиосвязи на этапе планирования и ввода оборудования в эксплуатацию.

Ключевые слова: сеть подвижной радиосвязи; эталонная модель взаимодействия открытых систем; коммутация; кадр; пакет.

THE ARCHITECTURE OF A MOBILE RADIO NETWORK BASED ON THE REFERENCE MODEL FOR OPEN SYSTEMS INTERCONNECTION

I. R. Murtazin, M.A. Kotsynyak, A.V. Beskov, O.S. Lauta, A. V. Mamai

Military Academy of Communications (MAC), St. Petersburg, Russia

Abstract. The article discusses an approach to creating a mobile radio communications network architecture based on a reference model of open systems interconnection, which is designed to organize these networks for specific operating conditions. This approach will facilitate the construction of mobile radio networks at the planning and commissioning stage.

Keywords: mobile radio network; open systems interconnection reference model; commutation; frame; package.

1. Введение

Архитектуру можно определить, как концепцию связи элементов сложных систем, к числу которых относятся и сети подвижной радиосвязи (СПРС). По своей сути понятие «архитектура» отражает новизну в способе мышления разработчиков программных и аппаратных средств при реализации функций СПРС. Семантика слова «связь» в словосочетании «архитектура связи» более емкая по сравнению с традиционными представлениями. Речь идет не только о связи объекта, т. е. СПРС с пользователем посредством программных и аппаратных средств сети, но и об организации взаимодействия самих программных и аппаратных средств СПРС, обеспечивающих все этапы преобразования информации. С этой точки зрения СПРС представляет собой распределенную информационно-вычислительную среду, реализуемую на практике разнообразными программными и аппаратными средствами.

Сложность и многообразие функций, выполняемых СПРС, привели к необходимости иерархического разделения на группы и создания многоуровневой концепции сети. В соответствии с этой концепцией системы (элементы) СПРС делятся по вертикали на ряд функциональных слоев, называемых уровнями. Каждый уровень состоит из объектов, выполняет определенную логическую функцию и обеспечивает

определенный набор услуг (сервис) для расположенного над ним уровня. Совокупность правил (процедур) взаимодействия объектов одноименных уровней называется протоколом. Правила взаимодействия объектов смежных уровней одной и той же системы определяют межуровневый интерфейс. Границы между уровнями целесообразно устанавливать так, чтобы взаимодействие между уровнями было минимальным (минимум информационных связей), а общее число уровней - сравнительно небольшим. При этом должно выполняться ограничение: изменения, проводимые в пределах одного уровня, не должны требовать перестройки смежных уровней, т. е. следует обеспечивать полную автономность уровней в плане их инвариантности по отношению к смежным уровням. Таким образом, СПРС представляется в виде логически упорядоченных по вертикали подсистем. Подсистемы, расположенные на некотором уровне, образуют N уровень СПРС. Объекты N-уровня взаимодействуют между собой через соединения, создаваемые на (N - 1)-уровне. По этим соединениям передаются массивы информации, называемые блоками. Благодаря этому каждый (N - 1)-уровень обеспечивает услуги объектам N-уровня путем выполнения заданий, связанных с обменом информацией между объектами N-уровня. Каждому объекту в данном случае может предоставляться одно либо несколько соединений с объектами того же уровня (соединения типа «точка - точка» и «точка - многоточка»). Используются три типа соединений: одностороннее (симплекс), поочередное одностороннее (полудуплекс) и двустороннее (дуплекс). Работа каждого соединения, расположенного на (N - 1)-уровне, определяется протоколом этого уровня, которому соответствует набор правил и форматов для обеспечения обмена информацией между взаимосвязанными объектами. Таким образом, вся идеология многоуровневой концепции эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) основывается на передаче информации между объектами различных уровней СПРС, в связи с чем функция обмена информацией оказывается доминирующей и определяющей. Очевидно, что эти общие предположения концепции справедливы и для СПРС.

2. Основная часть.

Международная организация по стандартизации приняла и рекомендовала к широкому использованию семиуровневую иерархию функций комплексирования, обеспечивающих взаимодействие прикладных процессов, распределенных в различных системах. Помимо формирования концепции деления на уровни, в ЭМВОС вводится единая терминология для наименования различных включаемых в нее объектов. Для каждого уровня ЭМВОС задает цель его работы; виды услуг (обслуживания), обеспечиваемые для следующего более высокого уровня; спецификацию функций, выполняемых уровнем. Значение ЭМВОС заключается в том, что она вводит единый перечень понятий и общепринятый способ распределения различных действий в сети на уровни. Однако ЭМВОС не является стандартом протоколов для всех уровней: она только дает рекомендации относительно того, где могут быть разработаны стандарты по протоколам, но сами по себе эти стандарты не попадают в сферу самой модели.

Три нижних уровня (с 1-го по 3-й) определяют в основном процессы распределенного обмена информацией между территориально удаленными объектами, а 4-й уровень соответствует транспортному процессу, определяющему процедуры передачи информации от системы-отправителя к системе-получателю. Хотя ЭМВОС не дает никаких формальных указаний относительно способа и места физической реализации этих уровней, они практически полностью соответствуют в функциональном, логическом и физическом смыслах СПРС. При этом СПРС превращается в информационно-техническую основу территориально распределенной АСУ, базирующейся на ее ресурсах.

Прикладной уровень (7-й уровень ЭМВОС) является основным для ЭМВОС, так как остальные уровни существуют только для обеспечения его работы. Задача прикладного уровня - обеспечение взаимодействия между прикладными процессами пользователей (метасистемы). Среди функций этого обеспечения используются процессы обработки данных, файлов, текстов, речи в цифровой форме, графических изображений, видеосигналов, измерительной информации и т. д. Прикладной уровень основывается на понятии прикладного процесса, под которым подразумевается элемент системы, осуществляющий содержательную обработку информации. В СПРС этот процесс является источником или потребителем информации. Например, к числу прикладных процессов СПРС можно отнести следующие: работу должностного лица на автоматизированном рабочем месте, работу программы, оперирующей с данными, расположенными в удаленной базовой станции, сбор информации о состоянии объекта управления и передачу информации о целенаправленном воздействии на этот объект, общение абонентов по цифровому телефону, видеоконференц связь и т. п.. В соответствии с принятой классификацией прикладные процессы делятся на три категории: 1) административное управление, служащее для координации логических ресурсов, расположенных на всех ее уровнях; управление обработкой информации, включая инициацию и деинициацию прикладных процессов, 2) динамическое распределение ресурсов между процессами, 3) обслуживание процедур восстановления нормальной работы сети после появления сбоев и неисправностей; обработку информации, т. е, непосредственно выполнение тех основных функций, для которых создается СПРС с MESH - топологией.

Представительный уровень (6-й уровень ЭМВОС) предназначен для преобразования информации, связанного с определением ее форматов, кодов и структур, выдаваемых на сеансовый уровень и в сторону прикладного процесса. Кроме того, на прикладном уровне могут быть реализованы такие преобразования информации, как ее сжатие и шифрование. Функции представительного уровня основываются на понятии виртуального устройства (процесса), которое предполагает введение некоторого обобщенного (гипотетического, условного, воображаемого) универсального устройства (процесса), имеющего стандартный набор параметров и функционирующего в соответствии с определенными правилами. Необходимость введения виртуального устройства (процесса) вытекает из чрезвычайно большого многообразия видов и форм представления информации. Имеются три основных типа

виртуальных устройств (процессов): виртуальный терминал, виртуальный файл и виртуальное задание. Функциями представительного уровня являются преобразование информации; управление ее форматами; интерпретация (выявление семантического содержания); соединение прикладных процессов с логическими каналами, представляемыми нижними уровнями ЭМВОС.

Сеансовый уровень (5-й уровень ЭМВОС) обеспечивает соединения, называемые сеансами, непосредственно между конкретной парой прикладных процессов. Сеансовый уровень обеспечивает выполнение двух видов функций: обслуживание сеансов и обслуживание диалоговой формы передачи информации. Сеансом принято называть последовательность (цикл) процедур диалога объектов представительного уровня, осуществляемого через соединения, находящиеся на сеансовом уровне. При установлении сеанса могут быть определены ряд соглашений на этот сеанс, в том числе соглашения о направленности передачи (симплекс, полудуплекс или дуплекс), кодах символов размерах окна управления потоками, методах восстановления после отказов на транспортном уровне и т. д. Для взаимодействующих прикладных процессов, расположенных в одной и той же системе, сеансовый уровень является самым нижним. Поэтому транспортный, сетевой, канальный и физический уровни необходимы только для взаимодействия тех прикладных процессов, которые находятся в различных удаленных друг от друга системах. Это дает основание объединять рассмотрение транспортного уровня с тремя нижними уровнями ЭМВОС при решении проблем управления СПРС. Таким образом, верхние уровни будут учитываться в дальнейшем лишь на модельном уровне в виде воздействий пользовательской, т. е. внешней (по отношению к СПРС) среды, что не противоречит концепции ЭМВОС. Следующие уровни ЭМВОС рассмотрим более подробно, так как они по сути описывают ту среду, которая логически реализует СПРС и практически снимает при разработке системы управления сетью проблемы, связанные с реализацией и увязкой функций управления сетью на каждом из уровней. Именно это позволяет, уделить основное внимание разработке идеологических вопросов управления СПРС, часто оставляя за кадром проблемы реализации, решение которых гарантируется ЭМВОС, но их эффективность зависит в основном от предложенных методов и алгоритмов управления (и в первую очередь от способов решения проблемы адаптивного управления сетью).

Транспортный уровень (4-й уровень ЭМВОС) служит для обеспечения более высокого (сеансового) уровня универсальными услугами (средствами) транспортной службы, не зависящими от специфики и особенностей функционирования СИО. Другими словами, транспортный уровень обеспечивает универсальность процедур удаленного информационного обмена между прикладными процессами различных пользователей СИО. Предоставляемые уровнем транспортные соединения являются прозрачными, т. е. по ним могут передаваться любые используемые коды и осуществляться любые методы организации диалога на сеансовом уровне. Транспортный уровень предусматривает три вида услуг для сеансового уровня: 1) образование необходимых соединений; 2) выдачу справок о работе уровня; 3) передачу циркулярных сообщений всем имеющимся в сети информационным процессам.

Функции транспортного уровня делятся на две группы: управление и передача информации, к которым относятся установление и разъединение транспортных соединений, связывающих информационные процессы; объединение нескольких сеансовых соединений в одно транспортное и преобразование нескольких транспортных в одно сеансовое соединение; управление последовательностью и целостностью блоков, передаваемых через транспортное соединение; установление соответствия между сетевыми адресами и адресами доставки; обнаружение ошибок, их частичное исправление, сообщение об обнаруженных ошибках; восстановление соединения после возникших сбоев и отказов; укрупнение либо разукрупнение передаваемых блоков информации; управление потоками транспортных блоков; установление приоритетов в передаче блоков; выдача подтверждений о принятых блоках; сброс с транспортного соединения блоков при тупиковых ситуациях. Реализующий транспортную службу комплекс аппаратно-программных средств называется транспортной станцией, главными функциями которой являются управление установлением и ликвидацией соединения; управление потоком; буферизация; мультиплексирование. Транспортная служба организует соединения в датаграммном режиме, а также в режиме виртуального соединения. Важнейшей функцией транспортного уровня является управление потоком. Поскольку любая транспортная станция имеет ограниченное буферное пространство, то должен обеспечиваться некоторый способ управления информацией для предотвращения переполнения медленного получателя быстрым отправителем. Управление потоком осуществляется также на сетевом и канальном уровнях, но на транспортном уровне решаются наиболее сложные задачи управления потоком, связанные с динамической организацией буферного пула с учетом специфики рабочей нагрузки (трафика пользователей СПРС).

Теперь, отступая от общепринятых подходов к изложению концепции ЭМВОС, рассмотрим нижние уровни, начиная с 1-го уровня. Такой подход объясняется попыткой следовать системности изложения. Идя сверху, мы выяснили, что требует и что получает пользователь СПРС в плане логических возможностей, обеспечиваемых ЭМВОС. Теперь обратимся к реальным средствам, на которых физически реализуется СПРС, и рассмотрим, какие здесь существуют взаимные требования и как они удовлетворяются. Физический уровень будет рассматриваться так же, как и уровни с 5 го по 7-й по отношению к СПРС, т. е. в качестве внешней среды по отношению к системе.

Физический уровень (1-й уровень ЭМВОС) предназначен для переноса (передачи) потока дискретных (как правило, двоичных) сигналов, т. е. последовательности бит, в виде которой представляется цифровая информация, передаваемая через физическую среду, соединяющую реальные объекты СИО. В качестве такой физической среды при построении СИО обычно используется сеть коммутируемых или выделенных каналов, которая служит для установления физических (электрических, электромагнитных, оптических, акустических и т. п.) соединений. Основными функциями физического уровня являются следующие: установление и разъединение соединений; преобразование сигналов; реализация интерфейса; диагностика неисправностей. Под функцией

преобразования сигналов на физическом уровне обычно понимается преобразование последовательности бит на входе физического аналогового (непрерывного) канала в аналоговые сигналы, согласованные с физическими параметрами линии связи.

Рассмотрев 1-й, 5-й, 6-й и 7-й уровни ЭМВОС, которые в дальнейшем отнесены к внешней среде, прежде, чем переходить к транспортной системе, остановимся более подробно на особенностях процессов коммутации и обмена цифровой информацией в СПРС.

Особенности организации и управления информационным обменом в СПРС связаны с использованием различных технологий транспортировки сообщений. Под технологией транспортировки сообщений понимается последовательность процессов передачи и обработки КИЕд (коммутируемые информационные единицы) и связанных с ними процессов ожидания, определяемых режимом коммутации. В СПРС используются технологии транспортировки сообщений с коммутацией каналов (ТТКК) и коммутацией пакетов (ТТКП). Режимы коммутации отличаются друг от друга алгоритмами установления, поддержания и разъединения соединений (физических или логических).

Необходимость совмещения ТТКК и ТТКП в СПРС объясняется следующими причинами. Потоки сообщений можно разбить на два трафика: синхронный и асинхронный. Для синхронного трафика характерно требование сохранения с заданной точностью временного расположения отдельных элементов сообщения относительно друг друга. Требование изохронности предъявляется к передаче речи, подвижных изображений и некоторых видов телеметрических данных. Для асинхронного трафика необязательно соблюдение изохронности передачи (например, при передаче видео). Для передачи синхронного трафика можно использовать либо жесткое закрепление физических ресурсов за соединением, либо методы передачи синхронной нагрузки. Асинхронный трафик некритичен к ожиданию освобождения занятых физических ресурсов, поэтому естественно требовать для него выделения физического ресурса по мере необходимости в порядке очередности. При использовании ТТКК передаче сообщения предшествует фаза установления прямого физического соединения между двумя абонентами А и Б (А - вызывающий абонент, Б - вызываемый абонент). Во время фазы установления соединения происходит обмен управляющими блоками, которые резервируют в каждом групповом тракте по пути от А к Б необходимое количество стандартных цифровых каналов. В случае отсутствия необходимого количества свободных каналов для организации соединения абоненту А выдается отказ. Закрепление физических ресурсов за соединением является характерной особенностью ТТКК.

Процесс доставки сообщения с использованием ТТКК характеризуется следующими величинами: Туст - временем установления соединения; Ротк - вероятностью отказа в установлении соединения; Тзад - временем задержки при передаче информации по установленному соединению. Причем Туст и Ротк зависят от параметров, используемых в СПРС систем передачи и коммутации, а также от интенсивности входящего потока, а Тзад определяется пропускной способностью установленного соединения.

Преимуществом ТТКК является достаточно малое и стабильное значение Тзад, что делает естественным использование этой технологии для передачи синхронного трафика. К недостаткам этой технологии следует отнести необходимость фазы установления соединения и связанные с ней ненулевую вероятность Ротк и затраты времени Туст, а также малую эффективность использования ресурсов СПРС в случае значительной прерывности потока сообщений, передаваемого по установленному соединению. В ТТКП коммутируемой информационной единицей, которую мы обозначили как КИЕд, является пакет, транспортирующий массив пользовательской информации или управляющей информации ограниченной длины. Основными модификациями ТТКП являются передача датаграмм; передача виртуальных вызовов с последующей передачей пакетов по виртуальным соединениям; передача пакетов по постоянному виртуальному соединению. Эти модификации отличаются форматами протокольных блоков, алгоритмами обработки протокольных блоков в системах коммутации и алгоритмами установления, поддержания и разъединения логических каналов. Эффективность использования той или иной модификации ТТКП оценивается по коэффициенту полезной информации (отношению объема информации в сообщении к объему всей передаваемой в логическом соединении информации за время существования соединения) и по коэффициенту загрузки канала. Основной величиной, характеризующей процесс доставки сообщения с использованием ТТКП, является время задержки пакета Тпак.

Преимуществом ТТКП является высокая эффективность использования КСв для прерывистых входящих потоков сообщений за счет организации большого количества логических каналов в одном физическом соединении. Недостатком данной технологии является большее время задержки по сравнению с ТТКК (Тпак > Тзад) и зависимость Тпак от загрузки СИО. Данная технология преимущественно используется для передачи асинхронного трафика. При передаче синхронного трафика с использованием ТТКП необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению изохронности передачи.

С учетом этих особенностей перейдем к рассмотрению канального уровня СПРС.

Канальный уровень (2-й уровень ЭМВОС) служит для выполнения функций установления, поддержания и разъединения канальных соединений, называемых информационными каналами. Совокупность средств 1-го и 2-го уровней образует некоторую дискретную систему, называемую каналом передачи информации, основными элементами которого являются физический канал, линейные контроллеры при использовании цифровых (импульсных) физических каналов; средства управления каналом, выполняющие основную целевую функцию канального уровня и относящиеся собственно к этому 2-му уровню.

Средства управления каналом передачи информации реализуют в СПРС следующие функции: формирование из передаваемой по дискретному КСв последовательности бит порций информации определенного объема, размещаемых в информационном поле блоков (кадрах), в составе которых они передаются по каналу; кодирование с использованием помехоустойчивого кода порций информации в составе кадра (на передающей стороне) и декодирование их (на приемной стороне) с целью

защиты от помех в линии связи; восстановление исходной последовательности порций информации на приемной стороне (образование упорядоченной последовательности информации, строго соответствующей вводимой от оконечного оборудования последовательности информации на передающей стороне); обеспечение кодонезависимой передачи информации с целью реализации для пользователя возможности произвольного выбора первичного кода представления информации; управление потоком информации на уровне канала передачи информации с целью регулирования скорости передачи кадров, т. е. темпа выдачи их в оконечное оборудование получателя также устранения последствий потерь и дублирования кадров в канале. Совокупность перечисленных функций в целом входит в процедуру управления каналом передачи информации.

Кадр, передаваемый в канале передачи информации, представляет собой совокупность порций информации, полученной средствами управления каналом от оконечного оборудования отправителя, и управляющей информации, которая содержит признаки границ начала и конца кадра, а также служебной информации, необходимой для организации процесса передачи. Важнейшими функциями канального уровня являются обнаружение и исправление ошибок в дискретном канале связи и управления каналом передачи информации. Необходимость обнаружения и исправления ошибок вызвана сравнительно низким качеством канала, используемых особенно в терминальных сетях, а также наличием различного рода помех (случайных или специально организованных). Необходимость использования механизма регулирования информационного потока на уровне канала передачи обусловлена двумя причинами: 1) наличием повторных передач в случае искажения кадров; 2) неспособностью физического уровня различать ситуации, когда получатель не может принимать информацию с той же скоростью, с какой отправитель может ее выдавать, т. е. требуется на стороне отправителя регулировать на канальном уровне темп выдачи информации (кадров) в канал на основе сведений (данных) о способности получателя к приему и обработке информации. Реализация перечисленных функций возлагается на процедуру (алгоритм, протокол) управления потоком, которая представляет собой важнейшую часть общей процедуры управления каналом передачи информации.

Совмещение различных технологий транспортировки сообщений порождает ряд особенностей в архитектуре транспортной системы СПРС. Функции, связанные с объединением различных технологий транспортировки сообщений, логически должны реализовываться непосредственно перед физическим уровнем, так как протокольные форматы и последовательности действий уже на канальном уровне ЭМВОС существенно различны для разных технологий. Следовательно, уровень, аналогичный канальному уровню ЭМВОС, в архитектуре СПРС распадается на два уровня: уровень совмещения и собственно уровень канала. Основными функциями уровня совмещения являются создание протокольных блоков с меткой, указывающей на технологию транспортировки (по метке выбираются соответствующие протоколы на более высоких уровнях); мультиплексирование и организация цикловой синхронизации (формирование

кадра); сегментирование и блокирование интерфейсных блоков канального уровня; управление мультиплексированием.

Функции канального уровня архитектуры СПРС практически совпадают с функциями канального уровня ЭМВОС, перечисленными выше. Особенностью этого уровня в архитектуре СПРС является то, что кадры должны иметь метку, указывающую на технологию транспортировки и служащую для правильного выбора протоколов передачи.

Сетевой уровень (3-й уровень ЭМВОС) служит для выполнения функций обмена сетевыми сервисными блоками при помощи сетевых соединений (датаграммных и виртуальных цепей и прямых каналов). Следует подчеркнуть, что рассмотренные выше процедуры 1-го и 2-го уровней ЭМВОС управляют процессом передачи информации только по одному физическому КСв вне зависимости от того, каким образом организован этот канал (выделенный или временно скоммутированный) между двумя абонентами через сеть с коммутацией каналов. Эти процедуры можно считать локальными, поскольку они относятся к одному из каналов передачи информации, соответствующему некоторому ребру графа, отображающего структуру этой сети. В отличие от них сетевые процедуры, т. е. процедуры 3-го уровня ЭМВОС, реализуются на сети в целом и тесно связаны с ее топологией (структурой, конфигурацией) и процессами, затрагивающими обмен информацией во всех каналах передачи информации и узлах коммутации СПРС. В этом смысле сетевые процедуры можно определить, как распределенные, глобальные. На сетевом уровне должны быть выполнены две главные взаимосвязанные функции: 1) выбор маршрута передачи КИЕд (например, пакета) получателю, 2) создание условий, исключающих перегрузку сети, которая может явиться следствием реализации недостаточно эффективной процедуры маршрутизации. Другими словами, маршрутизация должна сопровождаться ограничением потоков в сети, не допускающим ее перегрузки. Наибольшее распространение в сетях передачи данных (базовых сетях обмена данными) получил метод коммутации пакетов (КП). Кадр, поступающий с канального уровня, освобождается от служебной и управляющей информации, используемой на канальном уровне, и передается на сетевой уровень в виде пакета. При передаче информации с сетевого уровня в канальный информация в составе пакетов упаковывается в кадр, объем которого за счет дополнительной управляющей и служебной информации, включая обрамление (флаги), превышает формат пакета, т. е. избыточность увеличивается. В настоящее время используются два режима реализации метода КП: датаграммный режим и режим виртуального соединения.

3. Заключение.

Вывод: основные функции сетевого, транспортного, сеансового, представительного и прикладного уровней СПРС совпадают с функциями соответствующих уровней ЭМВОС.

Методы совмещения различных технологий транспортировки сообщений, основанные на различных режимах коммутации, разделяются на методы гибридной и

адаптивной коммутации (ГК и АК соответственно). Методы ГК, в свою очередь, разделяются на методы ГК с фиксированным и плавающим порогом. Порогом называется граница в кадре, отделяющая временные интервалы, отведенные для передачи информации с использованием ТТКП, от временных интервалов, отведенных для передачи информации с использованием ТТКК. Временные интервалы, выделяемые для передачи информации с использованием ТТКП, могут отождествляться с одним общим каналом.

Метод адаптивной коммутации обладает некоторыми дополнительными возможностями по сравнению с гибридной коммутацией с плавающим порогом и обеспечивает более высокую эффективность использования ресурсов СПРС за счет заполнения пауз в сообщении, передаваемых с использованием ТТКК. Однако реализация АК приводит к значительному удорожанию коммутационных систем. Путем перемещения в кадре можно оперативно выделять необходимые сетевые ресурсы как для пользователей, использующих ТТКК, так и для пользователей, использующих ТТКП.

Литература

1. Коцыняк М.А., Муртазин И.Р. Кибернетическая устойчивость MESH сетей. // Книга, 2018. Нейрокомпьютеры и их применение XVI Всероссийская научная конференция: тезисы докладов. – С. 102-103.
2. Ковайкин Ю.В., Бесков А.В., Лебедев П.В. Совершенствование системы управления сети передачи данных путем защиты конфигурационного трафика. // Книга, 2018. Нейрокомпьютеры и их применение XVI Всероссийская научная конференция: тезисы докладов. – С. 112-113.
3. Лаута О.С., Нечепуренко А.П., Муртазин И.Р., Суетин А.И. Модели интеллектуальных воздействий. // Сборник, 2017. Информационная безопасность регионов России. – С. 144-145.
4. Иванов Д.А., Коцыняк М.А., Лаута О.С., Муртазин И.Р. Методика кибернетической устойчивости в условиях воздействия таргетированных кибернетических атак. // Сборник научных статей в 4 томах, 2018. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). VII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. – С. 343-346.

References

1. Kotsynyak M.A., Murtazin I. R. Cybernetic stability of MESH networks. // Book, 2018. Neurocomputers and their applications. XVI All-Russian Scientific Conference: Abstracts. - p. 102-103.
2. Kovaikin Yu.V., Beskov A.V., Lebedev P.V. Improving the data network management system by protecting configuration traffic. // Book, 2018. Neurocomputers and their applications. XVI All-Russian Scientific Conference: Abstracts. - p. 112-113.
3. Lauta O.S., Nechepurenko A.P., Murtazin I.R., Suetin A.I. Models of intellectual influences. // Collection, 2017. Information security of Russian regions. - p. 144-145.
4. Ivanov D.A., Kotsynyak M.A., Lauta O.S., Murtazin I.R. Methods of cyber resistance in terms of the impact of targeted cyber-attacks. // Collection of scientific articles in 4 volumes, 2018. Actual problems of information and telecommunications in science and education (APINO 2018). VII International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference. - p. 343-346.

БЛОКЧЕЙНЫ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ НА БАЗЕ СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ И ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОНСЕНСУСА

А. А. Грушо[1], А. А. Зацаринный[1], Е. Е. Тимонина[1]

[1]Институт проблем информатики, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление Российской академии наук (ИПИ ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия

Аннотация. Рассматриваются вопросы реализации одного из базовых инструментов цифровой экономики – блокчейна. Показано, что в рамках программы цифровой экономики технологии распределенных реестров данных (блокчейнов) имеют системообразующий характер и должны создаваться с учетом принципов системного подхода на базе надежной инфраструктуры. Предложено в качестве защищенной инфраструктуры для распределенных реестров данных использовать платформенные, функциональные и сетевые ресурсы системы распределенных ситуационных центров с централизованным консенсусом.

Ключевые слова: блокчейны; цифровая экономика; информационная безопасность; система распределенных ситуационных центров.

BLOCKCHAINS OF DIGITAL ECONOMY ON THE BASIS OF THE SYSTEM OF THE SITUATIONAL CENTERS AND THE CENTRALIZED CONSENSUS

A. A. Grusho[1], A. A. Zatsarinny[1], E. E. Timonina[1]

[1] Institute of Informatics Problems of Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences (IPI FRC CSC RAS), Moscow, Russia

Abstract. Problems of realization of one of basic tools of digital economy – blockchain are considered. It is shown that within the program of digital economy of technology of the distributed ledgers (blockchains) have backbone character and have to be created taking into account the principles of system approach on the basis of reliable infrastructure. It is offered as the protected infrastructure for the distributed ledgers to use platform, functional and network resources of a system of the distributed situational centers with the centralized consensus.

Keywords: blockchains; digital economy; information security; the system of the distributed situational centers.

1. Введение

В России принято решение «запустить масштабную системную программу развития экономики нового технологического поколения – цифровой экономики» [1, 2]. Такие стратегические тренды полностью коррелируют с общемировыми тенденциями в экономике, которые представлены в известной книге Клауса Шваба [3].

В принятой программе цифровой экономики Российской Федерации [4, 5] в качестве сквозных определены цифровые технологии: большие данные, нейротехнологии и искусственный интеллект, технологии распределенного реестра и др.

Особую значимость в этом перечне имеют технологии распределенного реестра данных - «блокчейн» (БЧ) [6, 7]. Это обусловлено двумя основными факторами.

Первый фактор состоит в следующем. Цифровая экономика, по существу, предполагает решение трех взаимосвязанных задач [8]:

1) создание единого подхода к информационным реестрам всех ресурсов в цифровой экономике (материалы, техника, интеллектуальные, человеческие ресурсы, инфраструктурные и другие ресурсы),

2) оперативное наполнение реестров актуальными, достоверными и объективными данными,

3) создание технологий учета всех изменений этих ресурсов.

Представляется, что такой подход к понятию цифровой экономики может обеспечить эффективность управленческих решений на всех уровнях за счет минимизации человеческого фактора и сокращения числа уровней в иерархии системы управления.

При таком подходе БЧ имеет системообразующий характер применительно к другим технологиям, т.к. большинство перечисленных задач при своем решении создают цепочки данных, компоненты которых отражают экономические процессы, например, цепочки поставок, цепочки приобретения ресурсов для выполнения проектов и др. Поэтому основой таких технологий могут стать БЧ.

Второй фактор состоит в том, что БЧ тесно связан с реализацией такого базового направления цифровой экономики как «информационная безопасность».

2. БЧ, КОНСЕНСУСЫ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

БЧ представляет собой защищенную от изменения предыстории базу данных, которая формируется с течением времени. Основа информационной безопасности БЧ состоит в создании криптографическими методами односвязного списка блоков, каждый из которых содержит записи о текущих транзакциях, использующих имеющиеся ресурсы. Эти записи транзакций подписаны цифровыми подписями (digital signatures), что делает изменения в данных трудоемким процессом на любом предшествующем этапе. В самом деле, сохранение односвязности блоков требует сохранения значений хэш-функций, вычисленных от всей информации в каждом блоке. Это в свою очередь требует подделки всех цифровых подписей транзакций в каждом блоке предыстории.

Распределенные реестры отличаются консенсусами. Консенсус определяет взаимное доверие всех участников БЧ.

Большинство специалистов считает, что БЧ технология должна быть децентрализованной. Децентрализация требует, чтобы решения о занесении данных в БЧ было основано на участии всех членов сообщества. Например, решение принимается, если более 50% членов сообщества достигли консенсуса. Отсюда следует, что при децентрализации не существует единой точки управления. Транзакция заносится в БЧ, как только сеть согласилась с ее валидностью.

Вместе с тем, такой децентрализованный подход создает реальные предпосылки для незаконных операций, связанных, например, с торговлей наркотиками, рекламой запрещенных социальных сетей, нелегальной миграцией и другими негативными явлениями. Отсутствие центра управления не позволяет государственным органам

остановить такие транзакции. Кроме того, реализация децентрализованного управления предполагает наличие инфраструктуры связи, устойчивой к сбоям и гарантированно защищенной. Такая инфраструктуры для децентрализованных БЧ является дорогостоящей и поэтому окажется мало доступной для малого и среднего бизнеса. Возможно, что децентрализованные БЧ появятся в будущем, однако они представляются нереальными.

Приведенные выше проблемы имеют принципиальный характер и заставляют рассмотреть подходы, основанные на централизованном БЧ, т.е. использовании для БЧ централизованного консенсуса.

В централизованном БЧ существует единая точка сбора данных, которая может идентифицировать законность проводимых действий, способность делать это на регулярной основе и соответствовать государственным требованиям по обеспечению безопасности хранения и передачи информации о транзакциях.

Поэтому государственные платформы для централизованных БЧ технологий, в которых консенсус основан на доверии к государственным структурам, и который обеспечивает контроль заинтересованных участников, являются реалистичным будущим для развития цифровой экономики в РФ.

БЧ создают новые возможности по поиску, организации, оценке и надежной передаче и учета любых различных видов активов (данных о ресурсах в распределенных реестрах данных). По сути, это новая организационная парадигма для координации любого вида человеческой деятельности. И реализация этой парадигмы должна быть увязана с требованиями защиты информации [9, 10], как содержащей государственную тайну, так и конфиденциальной, особенно в части защиты персональных данных.

Однако новые функциональные и технологические возможности порождают новые вызовы и угрозы в части безопасности. Угрозы безопасности по своей природе и последствиям становятся всё более критичными.

В рассмотренных технологиях актуальны следующие угрозы:

- доступность;
- целостность (искажение, уничтожение);
- кража подписей;
- подделка фрагментов БЧ;
- нарушение консенсуса.

Небезопасная система коммуникаций может неоднозначно отражать транзакции, в частности, задержки платежей за выполненную работу, т.е. невыполнение контрактных обязательств. Нарушение целостности связано с невозможностью проверки всей цепочки БЧ. Кража подписей может породить ложные транзакции. Подделка БЧ связана с большой вычислительной работой. Однако она может быть реализована за счет коллизий хэш-функций и других слабостей криптоалгоритмов и криптопротоколов [11].

Одним из вариантов внедрения БЧ является сопровождение проектов. Для выполнения проектов требуются отслеживания взаимодействий с субподрядчиками, контроль цепочек поставок ресурсов и т.д. Отсюда возникает необходимость различных реализаций БЧ.

При должном обеспечении информационной безопасности реализации «умных контрактов» требуют сопоставления различных цепочек БЧ. Назовем процесс сопоставления клирингом БЧ. Решение этой задачи позволит отслеживать выполнение обязательств всех сторон и выявлять мошеннические схемы. Обеспечение информационной безопасности БЧ требует использования безопасных платформ и безопасной системы телекоммуникаций, то есть системного подхода.

Цифровые технологии глубоко погружаются в процессы деятельности (бизнес-процессы, процессы управления, сервисные процессы), становятся их составной частью. И уже недостаточно предъявлять к ним традиционные требования по защите информации, следует иметь надёжную обрабатывающую и функциональную среду. Её необходимо либо изначально создавать абсолютно надёжной, что практически невозможно ввиду её сложности и природных свойств, либо постоянно поддерживать её штатную работоспособность и надёжность, что требует обеспечения мониторинга функционирования с выявлением аномалий и созданием методов и средств возвращения функционирования в штатное состояние.

Успешное решение этих вопросов возможно только на основе системного подхода, а также принципов обеспечения защиты в информационных системах.

3. Сущность и принципы системного подхода применительно к БЧ

Говоря о системном подходе, следует отметить, что речь идет о выработке неких принципов, общих подходов к решению сложных задач, о попытке взглянуть на создаваемую систему в целом. При этом, чем сложнее система, тем важнее системно подходить к ее созданию [12].

Очевидно, что рассмотрение понятия БЧ необходимо поднять на более высокий, системный, уровень и подсистема защиты информации в БЧ при этом должна создаваться на основе принципов системного подхода. К ним относят принципы системности, комплексности, эффективности, новых задач, развития (открытости), унификации и стандартизации, максимального учета IT-достижений [13].

Сформулируем кратко существо этих принципов применительно к подсистеме защиты информации.

Принцип системности предусматривает декомпозицию системы под условным названием «Цифровая экономика» на составные части в виде структурных и технологических подсистем. Структурные подсистемы определяются базовыми направлениями цифровой экономики, а технологические – сквозными технологиями. Тогда при таком подходе появляется цепочка систем как соотношение: "надсистема (ЦЭ) - система БЧ – подсистема защиты информации (ПЗИ)", в рамках которого может формироваться политика безопасности, включая все ее обязательные атрибуты (модели угроз и нарушителя, специальные технические задания и др.) на основе функциональных требований системы и технологических особенностей БЧ.

Принцип развития предусматривает возможность перспективного развития подсистемы защиты информации на основе новых требований, как в части инфраструктурного изменения системы, так и с учетом функциональных изменений в

БЧ. Заметим, что применительно к подсистеме защиты по опыту создания ряда информационных систем выполнение этого принципа представляет собой крайне сложную задачу, особенно в части изменения функциональности. Однако этот принцип применительно к задачам цифровой экономики имеет принципиальный характер, он позволяет сохранять целостность и актуальность подсистемы защиты информации без нарушения функционирования.

Принцип совместимости предполагает реализацию при создании подсистемы защиты информации таких системотехнических и организационных решений, которые предусматривают возможность взаимодействия БЧ с другими технологическими подсистемами цифровой экономики. Другими словами, если принцип развития обеспечивает масштабирование «по вертикали», то принцип совместимости – «по горизонтали».

Принцип стандартизации (унификации) предусматривает два очень важных аспекта. Первый состоит в том, чтобы при создании подсистемы защиты информации системы в максимально возможной степени применять типовые, унифицированные и стандартизованные компоненты и проектные решений, уже апробированные на практике. Вместе с тем, БЧ являются во многом новыми технологиями и поэтому очень важен второй аспект, который состоит в необходимости стандартизации вновь разрабатываемых технологических и технических решений. Благодаря этому принципу могут быть существенно снижены затраты на создание подсистемы защиты, ее обслуживание и подготовку обслуживающего персонала.

Принцип эффективности заключается в достижении рационального соотношения между затратами на создание подсистемы защиты информации и достижением заданных целевых показателей. Например, необходимо максимально использовать созданную инфраструктуру. Кроме того принцип эффективности должен соблюдаться применительно ко всем стадиям жизненного цикла подсистемы защиты информации (включая разработку, проектирование, ввод в эксплуатацию, непосредственно эксплуатацию, модернизацию и развитие).

Приведенные выше принципы можно отнести к системотехническим. Кроме них часто выделяют организационные принципы системного подхода, особо актуальные для больших систем. Эти принципы подробно рассмотрены в [13, 14].

Таким образом, в концентрированном виде суть системного подхода к созданию защищенной инфраструктуры БЧ заключается в выборе наиболее эффективных организационных и системотехнических решений, включая:

- формирование инфраструктуры БЧ;
- формализованное представление подсистемы защиты информации, включая все ее компоненты (технический, программный, инфраструктурный, организационный);
- обоснование модели угроз и нарушителя в системе технологий распределенных реестров;
- формирование вариантов построения подсистемы защиты информации (включая все перечисленные выше компоненты);

– выбор варианта, обладающего наибольшей эффективностью (по выбранному показателю).

При таком подходе подсистема защиты информации оказывается «глубоко погруженной» в БЧ как подсистему системы Цифровая экономика.

4. Пример формирования БЧ технологии на основе централизованного консенсуса и государственной инфраструктуры

БЧ для проектов малого и среднего бизнеса формируются в Центре, принадлежащем государству. Государство предоставляет БЧ безопасную платформу для формирования блоков и их построения, предоставляет услуги безопасных телекоммуникаций и хранилище для заполненных реестров, резервирование и восстановление. Защита от инсайдерских атак на БЧ обеспечивается сертифицированной криптографией, и атаки на БЧ легко выявляются государственной службой информационной безопасности. Блоки формируются в Центре на защищенных сертифицированных серверах. Обслуживание малого и среднего бизнеса происходит на основе сервисов, предоставляемых Центром. Транзакции участников цифровой экономики фиксируются в БЧ. О занесенной в БЧ транзакции участникам направляется подписанное Центром уведомление, которое является юридическим документом, позволяющим обращаться в судебные органы, а также получать доступ к БЧ, если в них нет элементов коммерческой тайны других организаций.

Если в транзакции участвуют физические или юридические лица, расположенные в других регионах, то Центр должен предоставить доступ вплоть до копирования к БЧ, в котором содержится информация, связанная с участниками из других регионов.

Таким образом, реализуются принципы электронной бухгалтерской книги через взаимодействие государственных Центров, поддерживающих БЧ технологии.

Резервирование БЧ должно удовлетворять следующим требованиям. Резервные копии должны хранить в других Центрах поддержки БЧ технологии, но должны подписываться электронной подписью Центра – создателя БЧ и центра, хранящего резервную копию. Это исключает конфликты и искажения в БЧ.

Для обеспечения документального подтверждения выполненных обязательств субподрядчики заполняют свои БЧ полученными по связи подтверждениями, безопасность которых гарантируется протоколами неотказуемости (nonrepudiation). Рассогласование данных рассматривается арбитражем.

5. Система ситуационных центров как платформа для инфраструктуры и защиты информации в БЧ

Рассмотрим один из важнейших компонентов подсистемы защиты информации – инфраструктурный. Действительно, создание для реализации БЧ отдельной инфраструктуры было бы очевидно не оправдано. В связи с этим, представляется целесообразным и весьма привлекательным использовать в качестве инфраструктурного компонента подсистемы защиты информации БЧ платформу системы распределенных ситуационных центров (СРСЦ). Такая система в настоящее время создается в

соответствии с нормативными документами на уровне Указов Президента РФ и постановлений правительства [15].

СРСЦ должна охватить ситуационные центры (СЦ) высших органов государственной власти, ведомств и министерств, регионов, а также крупных бизнес-структур. Важнейшей особенностью СРСЦ является то, что объединению подлежат разнофункциональные СЦ с различной ведомственной и региональной принадлежностью, которые создавались как составная часть системы управления определенной организационной системы. Еще одна особенность СРСЦ состоит в необходимости обработки разнокатегорийной информации (передача информации из «открытого» контура в «конфиденциальный» и «закрытый», совместное отображение информации разных контуров).

Для решения столь масштабных задач СРСЦ создается как многоуровневая территориально-распределенная система, в которой ситуационные центры интегрируются на основе системообразующих компонентов, которые позволяют обеспечить взаимодействие участников (существующих и создаваемых СЦ). К их числу отнесены:

- центр управления и координации системы, распределенное информационное хранилище данных;
- комплексы информационного взаимодействия;
- защищенная телекоммуникационная сеть;
- комплекс обеспечения информационной безопасности [11], выполняющий функции сбора и обработки информации о состоянии и нарушениях безопасности для выработки решений по информационной безопасности, обмен информацией в части реализации мер по информационной безопасности;
- администрирование средств защиты от НСД;
- организацию проведения регламентных и профилактических работ на СЗИ;
- выявление, предотвращение, отражение и нейтрализацию нарушений безопасности, а также функции удостоверяющего центра, антивирусного центра, центра мониторинга компьютерных атак на ресурсы СРСЦ, а также административно-распорядительные функции по управлению информационной безопасностью.

Представляется, что столь широкая функциональность комплекса обеспечения информационной безопасности наряду с территориально распределенной защищенной телекоммуникационной сетью СРСЦ позволит использовать СЦРС в качестве основы для инфраструктуры БЧ технологий. Для этого достаточно дополнить функционал СЦ системой предоставления облачного сервиса получения данных о транзакциях, предоставление уведомлений о занесения транзакций в БЧ, а также доступа на чтение участников экономической деятельности к БЧ, в которых учтены их транзакции. При этом СЦ имеет возможность получения полной информации об экономической деятельности в контролируемом регионе, и использовать ее для стратегического планирования в регионе.

6. Заключение

Технологии БЧ на основе централизованного консенсуса имеют системообразующий характер в цифровой экономике и требуют обеспечения защиты информации под контролем государства.

На основе принципов системного подхода подсистема распределенных реестров данных может создаваться с использованием инфраструктурных и технологических возможностей государственной платформы распределенных ситуационных центров. Такой подход решает проблему создания инфраструктуры БЧ для малого и среднего бизнеса и, в свою очередь, обеспечивает государственные органы достоверной информацией о финансовой и экономической деятельности в регионе.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-29-03124-мк).

Литература

1. Послание Президента РФ В.В. Путина Федеральному Собранию, 1 декабря 2016 года. http://kremlin.ru/events/president/news/copy/53379.
2. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента РФ №642 от 01.12.2016. http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/uZiATIOJiq5tZsJgqcZLY9YyL8PWTXQb.pdf.
3. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. - 208 с.
4. «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», Указ Президента РФ №204 от 07.05.2018. http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf.
5. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утв. Распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 №1632-р). http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
6. Мелани Свон. Блокчейн: Схема новой экономики /пер. с англ. М.: Олимп–Бизнес, 2017. - 240 с.
7. Лелу Л. Блокчэйн от А до Я. Все о технологии десятилетия. М.: Эксмо, 2018, - 190 с.
8. Зацаринный А. А., Киселев Э. В., Козлов С. В., Колин К. К. Информационное пространство цифровой экономики России. Концептуальные основы и проблемы формирования. /Под общей редакцией А. А. Зацаринного. М.: ФИЦ ИУ РАН, 2018. - 236 с.
9. Grusho A. A., Grusho N. A., Timonina E. E.: Information security architecture synthesis in distributed information computation systems. // J. Automatic Control and Computer Sciences, 2017, Vol. 51, No. 8, - Pp. 799-804.
10. Grusho A., Grusho N., Levykin M., Timonina E.: Analysis of information security of distributed information systems. // 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2017), 2017, Pp. 96-100.
11. Грушо А. А., Применко Э. А., Тимонина Е.Е. Теоретические основы компьютерной безопасности. М.: Академия, 2009. – 272 с.
12. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности. М.: Синтег, 2000. – 528 с.
13. Зацаринный А. А. Основные принципы системного подхода при проектировании, внедрении и развитии современных корпоративных сетей // Системы и средства информатики, 2002, Вып. 12. - С. 58-66.
14. Зацаринный А. А., Колин К. К. Методологические основы системного подхода к созданию информационных систем в условиях глобализации общества // Стратегические приоритеты, 2018, № 1 (17). - С. 38-61.

15. Социогуманитарные аспекты ситуационных центров развития / Под ред. В.Е. Лепского, А.Н. Райкова. М.: Когито-Центр, 2017. – 416 с.

REFERENCES

1. The Missive from President RF Vladimir Putin to the Federal Assembly, (Dec 01, 2016), http://kremlin.ru/events/president/news/copy/53379.
2. The Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation (approved by presidential decree 642, Dec 01, 2016), http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/uZiATIOJiq5tZsJgqcZLY9YyL8PWTXQb.pdf
3. Schwab, K. The fourth industrial revolution. Moscow: Eksmo, 2016.
4. National goals and strategic objectives of development of the Russian Federation until 2024, the decree of the President of the Russian Federation No. 204, (May 07, 2018) http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf.
5. The Program «Digital Economy of the Russian Federation" (approved by Order 1632-p of the Government of the Russian Federation, (Jul 28, 2017), http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
6. Swan, Melanie. Blockchain: Blueprint for a new economy. O'Reilly Media, Inc., 2015.
7. Leloup, Laurent. Blockchain: La révolution de la confiance. Groupe Eyrolles, 2017.
8. Zatsarinny, A. A., Kiselyov, E. V., Kozlov, S. V., Colin, K. K. Information space of digital economy of Russia. Conceptual bases and problems of formation / Zatsarinny, A.A. (eds.), Moscow: FRC CSC RAS, 2018. – 236 p.
9. Grusho, A. A., Grusho, N. A., Timonina, E. E. Information security architecture synthesis in distributed information computation systems // J. Automatic Control and Computer Sciences, 2017, Vol. 51, No. 8. – Pp. 799-804.
10. Grusho, A., Grusho, N., Levykin, M., Timonina E. Analysis of information security of distributed information systems // 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2017), 2017. - Pp. 96-100.
11. Grusho, A. A., Primenko, Ed. A., Timonina, E. E. Theoretical bases of computer security. Moscow: Publishing Center "Academy", 2009. – 272 p.
12. Prangishvili, I.V. System approach and system-wide regularities. Moscow: Sinteg, 2000.
13. Zatsarinny, A. A. The basic principles of system approach at design, introduction and development of modern corporate networks // Systems and means of informatics, 2002, Vol. 12. – Pp. 58-66.
14. Zatsarinny, A. A., Colin, K. K. Methodological bases of system approach to creation of information systems in the conditions of globalization of society // Strategic priorities, 2018, Vol. 17 No. 1, Pp. 38-61.
15. Socio-humanistic aspects of the situational centers of development / Lepsky, V.E., Raykov, A.N. (eds.), Moscow: Kogito-center, 2017.

ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНАЯ ГИПЕРСИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АГРЕГИРОВАННАЯ НЕЙРОМОРФНАЯ РАДИОПЛАТФОРМА - КАК БУДУЩЕЕ РАДИОСВЯЗИ

С. В. Карамов[1]

[1]Целевая поисковая лаборатория прорывных технологий радиосвязи
Фонда перспективных исследований, Воронеж, Россия

Аннотация. Показаны проблемы современных систем и комплексов радиосвязи, принципиальная экстенсивность существующего их развития, обоснована необходимость перехода к их интенсивному развитию и разработке. Предложена универсальная гиперконвергентная радиоплатформа для построения перспективных систем и комплексов радиосвязи.

Ключевые слова: гиперконвергентность; гиперсинергетичность; гиперплатформенность; когнитивность; радиосвязь.

HYPERCONVERGENT HYPERSYNERGETIC AGGREGATED NEUROMORPH RADIO PLATFORM - AS THE FUTURE OF RADIO COMMUNICATIONS

S. V. Karamov[1]

[1]Target Search Lab of Groundbreaking Radio Communication Technologies of Advanced Research Foundation, Voronezh, Russia

Abstract. The problems of modern radio communication systems and complexes, the fundamental extensiveness of their existing development are shown, the need for a transition to their intensive research and development is substantiated. A universal hyperconvergent radio platform is proposed for creating prospective radio communication systems and complexes.

Keywords: hyperconvergence; hypersynergy; hyperplatform; cognitiveness; radio communication.

1. Введение

Качественная и устойчивая радиосвязь среди объектов принадлежащих различных ведомствам и министерствам РФ находится в настоящее время на ненадлежащем уровне. Используемые и разрабатываемые сейчас современные комплексы и системы связи функционально разрознены, основаны на разных принципах, подходах, протоколах, а также не выполняют многие необходимые функции.

Известно, что как в мире так и в РФ активно расширяется применение мобильных робототехнических комплексов (РТК), а по прогнозам экспертов в ближайшем будущем ожидается массовое использование РТК, особенно в войсках. Существенным принципом массового использования РТК будет являться полностью автономное выполнение задач группой РТК. При этом, концепция построения радиоканалов для автономного выполнения группой РТК поставленных задач в настоящее время отсутствует. Наблюдается плохая электромагнитная совместимость существующих средств связи при их одновременной групповой работе. Дополнительной надвигающейся проблемой является взрывной рост числа и типов средств радиосвязи, что при существующих принципах их построения усложняет или делает невозможной

их одновременную работу. Уже сейчас все диапазоны частот, выделенные для радиосвязи, практически полностью заняты, однако уже в ближайшее время, оценочно в течении пяти-семи лет, требуемая ёмкость радиоэфира повысится более чем на порядок. Отмеченные факторы приводят к увеличению риска перенаселенности эфирного пространства. Очевидно, что в виду отсутствия единой концепции к построению радиосвязи существующие и разрабатываемые радиосистемы будут полностью неспособны обеспечить радиообмен на должном уровне качества, что приведёт к деградации функций рассматриваемых объектов.

В связи с изложенным возникают вопросы: какова классификация систем радиосвязи? На каких принципах следует строить перспективную радиосвязь? Что такое перспективные технологии радиосвязи? Каково будущее систем радиосвязи?

Пытаясь ответить на поставленные вопросы из всего разнообразия радиосвязи ограничимся т.н. классом тактического звена управления (ТЗУ). В этом классе необходимость в обновлении радиосредств является наиболее насущной.

2. Существующие подходы к построению перспективной радиосвязи

При рассмотрении выбора концепций построения перспективных радиосистем отдельно следует остановиться на технологии 5G представляющую собой перспективное пятое поколение радиосистемы для мобильных абонентов. Поскольку 5G построена на инфраструктуре на основе базовых станций (БС), то радиосеть строится по топология "звезда". Отсюда истекает абсолютная неприменимость технологии 5G и подобных в определённых сферах, включая ТЗУ. Этому способствует целый ряд причин, например: полная потеря связи у абонентов радиосети при выходе из строя небольшой части БС; низкая надёжность; переизбыток мощности требуемой для радиопередатчиков; лёгкость подавления; худшее покрытие при сложных условиях; переизбыток аппаратуры; разнородность типов средств - БС и абонентское оборудование; большая относительная стоимость комплекса; и др.

Анализ разрабатываемых в РФ перспективных средств радиосвязи и используемых методов разработки, к сожалению, выявляет следующие факторы: подходы к построению перспективных радиосистем разрознены; методы не унифицированы; нет единых маршрутов разработки; стандартных протоколов взаимодействия не существует; взаимозаменяемости узлов практически нет; высокая несовместимость; высокая повторяемость однотипных разработок разными компаниями; и т.п. В качестве примера разобщённости можно привести факты, когда даже в пределах одной компании наличествует десятки школ/подходов к проектированию SDR (программно-определяемого радио), а в пределах РФ подобных школ/подходов набирается несколько сотен с соответствующими реализациями в сотнях изделий. Однако, по существу, сквозной маршрут проектирования SDR един и легко унифицируем. Катастрофичность ситуации легче ощущается принимая во внимание, что подавляющее большинство этих самоподобных SDR радиоподсистем разработаны за государственный счёт. Аналогичная ситуация касается большинства других радиоподсистем, что приводит к огромным и бесполезным тратам.

Также, в последнее время часть авторов пытаясь понять и предсказать будущее в радиосвязи активно продвигают понятие "Седьмое поколение радиосвязи". Суть предлагаемых ими перспективных радиосистем основана на введении классификаций "поколений радиосвязи" от первого до последнего шестого, предполагающегося на настоящее время, его анализе и формировании облика следующего "седьмого" поколения. Причём все поколения ранжируются по четырём признакам: функциональные, конструктивные, технологические, эксплуатационные.

Примерами перехода из шестого в седьмое поколения, следуя предлагаемым классификациям, являются такие: изменение с автоматических многодиапазонных систем связи до автоматических самоорганизующихся многодиапазонных систем связи; универсальные и специализированные СБИС со степенью интеграции 10^7 -10^8 до СНК со степенью интеграции 10^9 -10^{10}; увеличение параметров АЦП с 200 МГц/16бит до 500 МГц/20 бит; увеличение ОЗУ радиосистем с 4 Гб до 64 Гб; и т.п. Отдельного внимания заслуживает признак изменения цветных ЖКИ индикаторов на цветные OLED индикаторы в седьмом поколении, что усиливает кризис системы классификации.

Анализ данных проектов видения будущего радиосвязи показывает сконцентрированность на мелких шагах развития, отсутствие комплексного подхода, что означает принципиальную экстенсивность существующего развития радиосвязи.

По нашему мнению подобное экстенсивное развитие является тупиком.

3. Предлагаемый маршрут интенсивного развития радиосвязи

Выходом из тупиковой ситуации, к которой мы неминуемо движемся, должна быть агрегация всех существующих знаний в радиосвязи, формирование единого системного облика перспективной радиосвязи, разработка методологии построения перспективных радиосредств нового поколения.

Предлагается обобщённый маршрут "интенсивного развития" радиосвязи, предназначенный для построения единой унифицированной перспективной радиоплатформы, перекрывающей все потребности как существующие так и ближайшего будущего.

Введём ключевые принципы построения перспективной радиосистемы:

- Гиперконвергентность;
- Гиперсинергетичность;
- Гиперплатформенность.

Под принципом гиперконвергентности будем понимать существование атрибутов:

- Объединение разнообразных функций;
- Существенная разнотипность функции;
- Объединение функций ранее считавшееся принципиально неосуществимым;
- Многомерность свойств радиосистем;
- Унифицированность использования с точки зрения потребителей;
- Объединение функционала с помощью единой радиоплатформы;
- Мультиархитектурность реализации функций;
- Упрощение понимания и использования радиосистем;

- и др.

Под принципом гиперсинергетичности будем понимать существование атрибутов:

- Свойства объединения функций не аддитивные а мультипликативные;
- Мультипликативность объединения функциональности - многоуровневая;
- Стремление к степенной синергетичности функционала;
- Эмерджентность свойств синергетических радиосистем;
- Синтез дополнительных новых функций в радиосистеме ранее неоткрытых;
- Аргументы синергетической функции берутся из совершенно разных областей науки и техники;
- и др.

Под принципом платформенности понимаются:

- Масштабируемость по функциональности;
- Унифицированный и обобщённый многомерный доступ к радиоэфиру;
- Унификация всех сущностей радиосредств, аппаратуры, протоколов;
- Автоматическая синтезируемость радиоархитектуры по заданным техническим требованиям (машинная архитектурогенерация);
- Мультиуровневость абстракции используемых радиотехнологий;
- Независимость от среды применения (наземное, воздушное, надводное, ...);
- Открытость радиоплатформы сообществу разработчиков и эксплуатантов;
- Лёгкость в сопровождении жизненного цикла;
- Вовлечение огромного числа разнопрофильных российских компаний в создание изделий на единой открытой платформе и её постоянном развитии (расширении);
- Возможность участи даже небольших компаний и коллективов в разработке функций платформы;
- Экспоненциальное развитие Российского рынка IP-радиоядер и всевозможных лицензий на радиоПО;
- Стандартизация радиотехнологий;
- и др.

Например, в качестве атрибута "объединение функций ранее считавшееся принципиально неосуществимым", принципа гиперконвергентности понимаются реализация в единой платформе одновременно свойств:

1) собственно радиосвязи, как надёжная передача разнородных данных и команд управления;
2) радиоэлектронной разведки;
3) интеллектуального радиоэлектронного подавления;
4) радиопеленгации и радиолокации;
5) автономной локальной навигации.

Т.о. перспективная радиосистема должна обладать набором ранее несовместимом и разделённых обычно по разным комплексам. Вместе с тем, атрибут "эмерджентность свойств синергетических радиосистем" признака гиперсинергетичности позволяет спрогнозировать рождение новых свойств радиосистемы. Например наличие подсистемы автономной локальной навигации позволяет осуществить маршрутизацию в

радиосети на основе геопространственных алгоритмов, что в свою очередь позволит значительно поднять общую пропускную способность радиосеи и повысить качество обслуживания абонентов.

Элементами построения предлагаемой радиоплатформы должны являться:

1) реализация в полном объёме SDR технологий;
2) программно-определяемые радиосети на основе самоорганизации и адаптации к внешним и внутренним изменениям;
3) ячеистая (MESH) топология радиосети, одноранговость и полная децентрализация;
4) когнитивность радиосети, алгоритмы принятия решений и управления на основе машинного обучения, нейроморфность радиосети;
5) адаптивный динамический многомерный доступ к радиоэфиру;
6) полное использование геопространственной топологии радиосети и её динамическая корректировка для повышения качества обслуживания;

Дополнительно, в качестве примера, рассмотрим один из атрибутов гиперплатформенности: унифицированный и обобщённый многомерный доступ к радиоэфиру. Как известно, в настоящее время используется частотное распределение радиочастотного ресурса, что является неэффективным и устаревшим. Предлагается в перспективных радиосистемах использовать доступ к радиоресурсу как к обобщённому семимерному пространству радиосигналов V = <F,T,C,S,P,W,A>.

Можно классифицировать типы множественного доступа к радиоэфиру на основе разделения:

1. частотное (F);
2. временное (T);
3. кодовое (C);
4. пространственное (S);
5. поляризационное (P);
6. мощностное (W);
7. орбитальный угловой момент электромагнитного поля (A).

Весь существующий современный парк модуляций радиосигналов и методов доступа, как то CW, AM, FM, PM, LFM, SBB, TCM, GMSK, PSK, BPSK, QPSK, QAM, FQAM, OQAM, TDMA, FDMA, CDMA, MC-CDMA, FBMC, UFMC, GFDM, OTFS, OFDMA, SP-OFDMA, W-OFDM, f-OFDM, CP-OFDM, LDS-OFDM, LDS-CDMA, PDMA, LPMA, SCMA, PD-NOMA, BOMA, MUSA, IDMA, UWB, MIMO, OAM, ... и множество других, можно отнести к разновидностям обобщённого доступа к радиоэфиру V.

Т.о. необходимо разработать единый унифицированный динамический адаптивный многомерный доступ к радиоэфиру и разработать универсальные стандартизированные протоколы радиосвязи.

К сожалению объём данной статьи не позволяет во всех подробностях изложить все свойства гиперконвергентной гиперсинергетической аггрегированной нейроморфной радиоплатформы, однако общее направление в разработке перспективных радиосистем класса ТЗУ видится в свете предложенных решений.

4. Заключение

Взамен существующих в современности экстенсивных путей предложен интенсивный маршрут развития перспективных радиосистем будущего. Предложенный маршрут реализуется в настоящее время Целевой поисковой лабораторией прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований. Лаборатория также приглашает в кооперацию заинтересованные организации для участия в построении будущего радиосвязи.

ИНВЕРСНО-ПРЯМОЙ НЕЙРОКОНТРОЛЛЕР ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОГА РЕШАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ИСТОЧНИКА ИНФОРМАЦИИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Н.М. Рябков, А.Н. Голубинский

АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрено применение искусственных нейронных сетей для формирования порога решающего устройства, позволяющего определить тип источника информации в инфокоммуникационной системе.

Ключевые слова: системы управления, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, нейроконтроллер, порог, решающее устройство, инфокоммуникационная система.

INVERSE-DIRECT NEUROCONTROLLER FOR THE FORMATION OF THE THRESHOLD OF DECISION DEVICE OF INFORMATION SOURCE IN THE INFOCOMMUNICATION SYSTEM

N. M. Ryabkov, A. N. Golubinskiy

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. The use of artificial neural networks for the formation of a threshold for a decision device, which allows determining the type of information source in the infocommunication system, is considered.

Keywords: control system, artificial intelligence, artificial neural networks, neurocontroller, threshold, resolver, infocommunication system.

1. Введение

Обеспечение системы обработки сигналов информацией, необходимой для идентификации объектов, позволяет приемной системе реализовать когнитивную функцию: получать знания о своей среде эксплуатации и географической среде, об установившихся правилах и о своем внутреннем состоянии, динамически и автономно корректировать свои эксплуатационные параметры и протоколы согласно полученным знаниям, для достижения заранее поставленных целей и обучаться на основе полученных результатов [1]. Решение указанной задачи связано с обработкой больших объёмов данных, между которыми присутствуют нелинейные зависимости, позволяющие достоверно определить тип объекта, в связи с чем возникает необходимость применения интеллектуальных систем.

В данной работе в качестве интеллектуального элемента предлагается рассмотреть построенный по схеме инверсно-прямого нейронного управления нейроконтроллер, формирующий пороговое значение для принятия решения по классификации в решающем устройстве.

2. Описание используемого аппарата

В настоящее время для управления различными объектами широкое применение находят классические пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) контроллеры. Однако, при наличии нелинейности в процессе управления, использование указанных контроллеров, как правило, не обеспечивает требуемого качества регулирования [2]. Для решения указанной проблемы применяются системы управления, использующие в своей работе элементы искусственного интеллекта (ИИ). Преимуществами указанных систем являются:

- адаптивность (способность вырабатывать новые управляющие воздействия в зависимости от изменяющейся обстановки);

- возможность функционирования в условиях нелинейности, неопределённости и нестационарности [3].

Цель настоящей работы состоит в выработке алгоритма синтеза контроллера, формирующего порог, который обеспечит заданные выходные реакции объекта управления (решающего устройства), с использованием математического аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС).

Математический аппарат ИНС широко применяется при реализации различных интеллектуальных систем [4]. Это связано, в первую очередь, со способностью к обучению, высоким быстродействием, а также надежностью, обеспечиваемой распараллеливанием вычислений [5].

В качестве базовой схемы управления предлагается использовать схему инверсно-прямого нейронного управления [2], представленную на рис. 1.

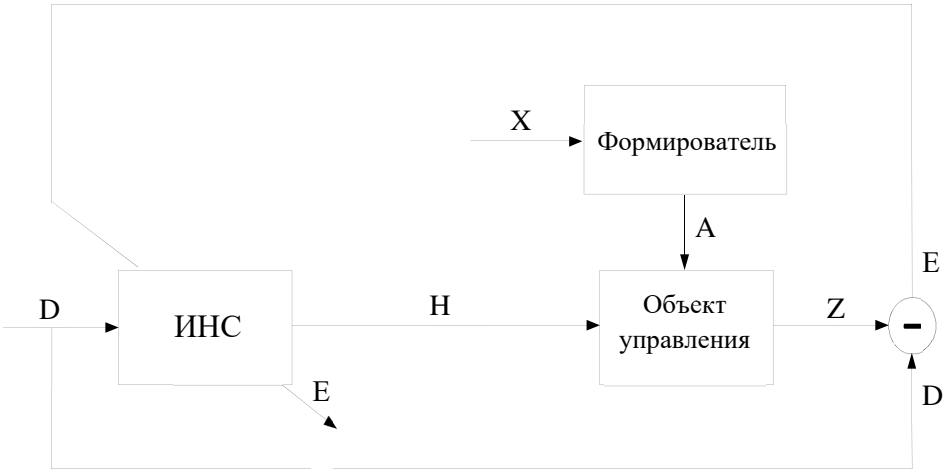


Рис. 1. Схема инверсно-прямого нейронного управления

На рис. 1 ИНС реализует обратную динамику объекта управления [2]: если обозначить соответствие между входом и выходом как $f_p\ (H)$, т.е. $Z = f_p\ (H)$, то ИНС реализует обратное отображение $f_p^{-1}(Z)$, где f_p^{-1} – отображение, обратное отображению f_p. Преимуществом указанной схемы является простота реализации.

Таким образом, если подать на нейронную сеть опорный сигнал (уставку) D, то выходной сигнал объекта управления Z в идеальном случае принимает значение D, так как [2]:

$$Z = f_p(H) = f_p(f_p^{-1}(D)) = D, \quad (1)$$

где H – входной сигнал объекта управления; Z – выходной сигнал объекта управления. Существуют различные способы формирования уставки D, при этом на практике значение уставки получают эмпирическим путём.

Отметим, что ИНС реализует инверсную динамику объекта управления в том случае, когда ошибка $E = D - Z$ становится близкой к нулю (когда ИНС обучена). На схеме рис. 1 формирователь обеспечивает получение вторичных параметров (A) из входных первичных параметров (X) путём проведения математических преобразований. Вторичные параметры A используются объектом управления для формирования выходных реакций (Z) в зависимости от порога (H) в соответствии с функцией Хевисайда $f_p(H)$:

$$Z = \begin{cases} 1, A \geq H; \\ 0, A < H. \end{cases} \quad (2)$$

Наряду с выбором схемы нейронного управления, не менее важным является вопрос выбора архитектуры нейронной сети. Для решения простых задач может применяться однослойный персептрон, а для более сложных задач – многослойный персептрон, рекуррентные сети, сверточные нейронные сети и другие варианты архитектур ИНС. Число нейронов в сети, как правило, определяется эмпирическим путем исходя из требуемой точности вычислений. Типовая архитектура двухслойной ИНС представлена на рис. 2, где D – входной вектор, P – вход скрытого слоя, V– выход скрытого слоя, T – вход выходного слоя, H – выход выходного слоя, n – количество входных векторов ИНС, m – количество нейронов в скрытом слое ИНС, $w_{i,j}$ – весовые коэффициенты скрытого слоя ИНС, k_j – весовые коэффициенты выходного слоя ИНС, где $i \in \overline{1,n}$, $j \in \overline{1,m}$.

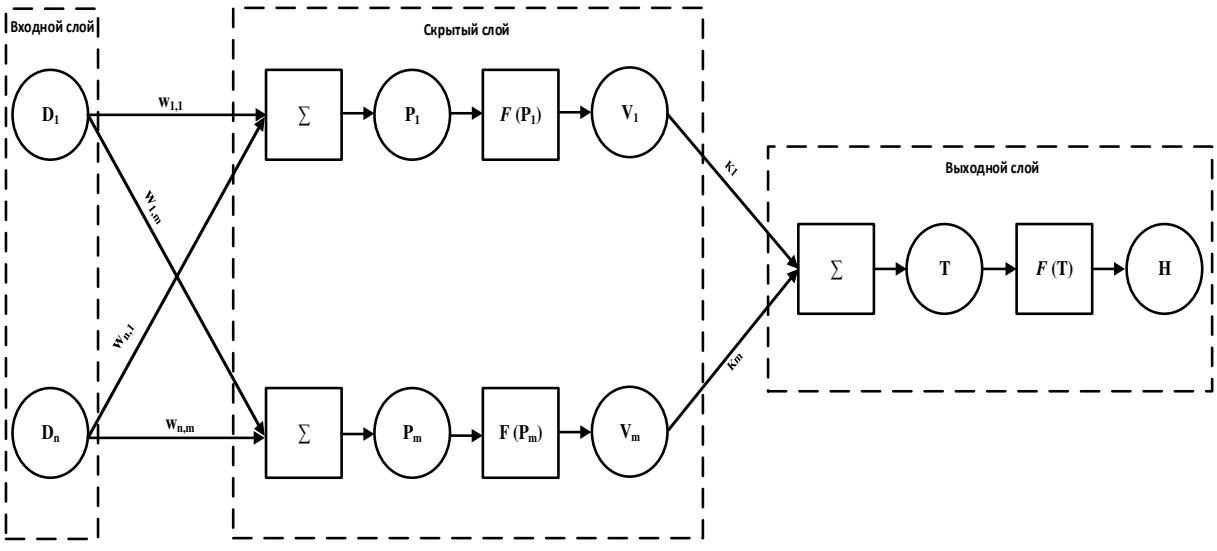


Рис. 2. Типовая архитектура двухслойной ИНС

3. Синтез нейроконтроллера

Процесс синтеза нейроконтроллера можно условно разделить на 2 этапа.

Первый этап «Получение данных для обучения ИНС» предусматривает следующую последовательность:

1) вычисляется выход ИНС (H) в соответствии с выражениями (3) – (6):

$$P_m = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} D_i \cdot w_{ij}; \quad (3)$$

$$V = F(P); \quad (4)$$

$$T = \sum_{i=1}^{m} V_i \cdot k_i; \quad (5)$$

$$H = F(T), \quad (6)$$

где F – функция активации ИНС [6], например, в виде сигмоидальной функции, которая описывается выражением:

$$F(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}. \quad (7)$$

2) формируются вторичные параметры A: так как сигмоидальная функция принимает значения в интервале от 0 до 1, в блоке «формирователь» реализуется нормировка значений вектора X (разделив значения всех элементов вектора X на значение максимального элемента вектора X). Для получения конечного значения порога необходимо выполнить обратное преобразование, умножив полученные значения H на значение максимального элемента вектора X.

3) ошибка ИНС за эпоху обучения рассчитывается следующим образом:

$$E = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} D_i - Z_i. \quad (8)$$

Второй этап «Обучение ИНС». Данный этап реализуется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Особенность применения указанного алгоритма при синтезе нейроконтроллера состоит в необходимости вычисления производной функции $f_p(H)$, описывающей объект управления, что позволяет распространять ошибку в обратном направлении от выхода ИНС с целью корректировки весовых коэффициентов для минимизации ошибки E. Производную $f'_p(H)$ также называют якобианом объекта управления.

Для расчёта градиента выходного слоя (δ) используется выражение:

$$\delta = F'(T) \cdot f'_p(H) \cdot E, \quad (9)$$

где $F'(T)$ – производная функции активации от входа выходного слоя ИНС; $f'_p(H)$ – якобиан объекта управления, вычисляемый в соответствии с выражением:

$$f'_p(H) = \frac{df_p(H)}{dH} = \frac{dZ_i(H)}{dH} = -\frac{\alpha \cdot e^{-\alpha(A_i - H)}}{(1+e^{-\alpha(A_i-H)})^2}, \quad (10)$$

где $i \in \overline{1,n}$.

Якобиан объекта управления представляет собой производную от функции Хевисайда $f_p(H)$. Для расчета якобиана, в качестве аппроксимации функции Хевисайда применяется сигмоидальная функция с коэффициентом α ~10:

$$Z_i = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(A_i - H)}}, \tag{11}$$

где $i \in \overline{1,n}$.

Необходимость применения аппроксимации, а не самой функции Хевисайда обусловлена тем, что производная функции Хевисайда, описывающей преобразование «вход-выход» для объекта управления, представляет собой дельта-функцию Дирака, принимающую значение ноль или стремится к бесконечности в зависимости от аргумента.

Выходные реакции решающего устройства *Z*, а также желаемые выходные реакции *D* формируются в бинарном виде: 0 – объект первого типа, 1 – объект второго типа.

Дальнейшие расчёты для получения значений величин корректировки весов ИНС производятся в соответствии с алгоритмом обратного распространения ошибки.

Рассмотрим типовой пример моделирования нейроконтроллера для формирования порога решающего устройства. Моделирование проводилось с использованием встроенного языка программирования системы Matlab [7]. При реализации нейроконтроллера использовалась трехслойная ИНС прямого распространения различных архитектур.

Параметры обучения:

- количество входных параметров ИНС – *n*=10;
- количество эпох обучения – *S*=2000;
- скорость обучения – 0.1;
- момент инерции – 0.1.

Для обучения нейронной сети использовались нормированные вторичные параметры *A*, приведённые в таблице 1.

Таблица 1. Нормировка параметров *X*

X	0,6783	5,5629	1,4595	3,8619	14,143	11,831	6,069	64,47	6,3	13,574
A	0,0105	0,0862	0,0226	0,0599	0,2193	0,1835	0,0941	1	0,0977	0,2105

На рисунках 3 и 4 приведены графики изменения порога и ошибки обучения для различных архитектур ИНС, соответственно.

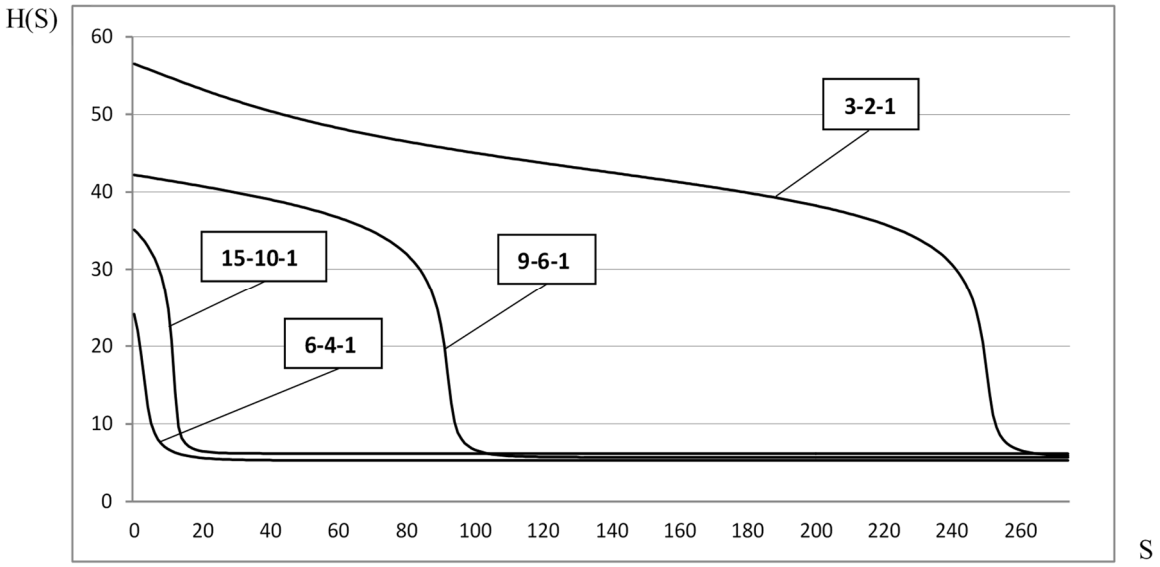


Рис. 3. График зависимости значения порога на выходе ИНС от эпохи обучения

Отметим, что начальное значение порога зависит от инициализации весовых коэффициентов ИНС. В результате обучения значение порога для всех архитектур ИНС приблизительно равно 5,7 (при разном количестве эпох, используемых при обучении ИНС в зависимости от используемой архитектуры).

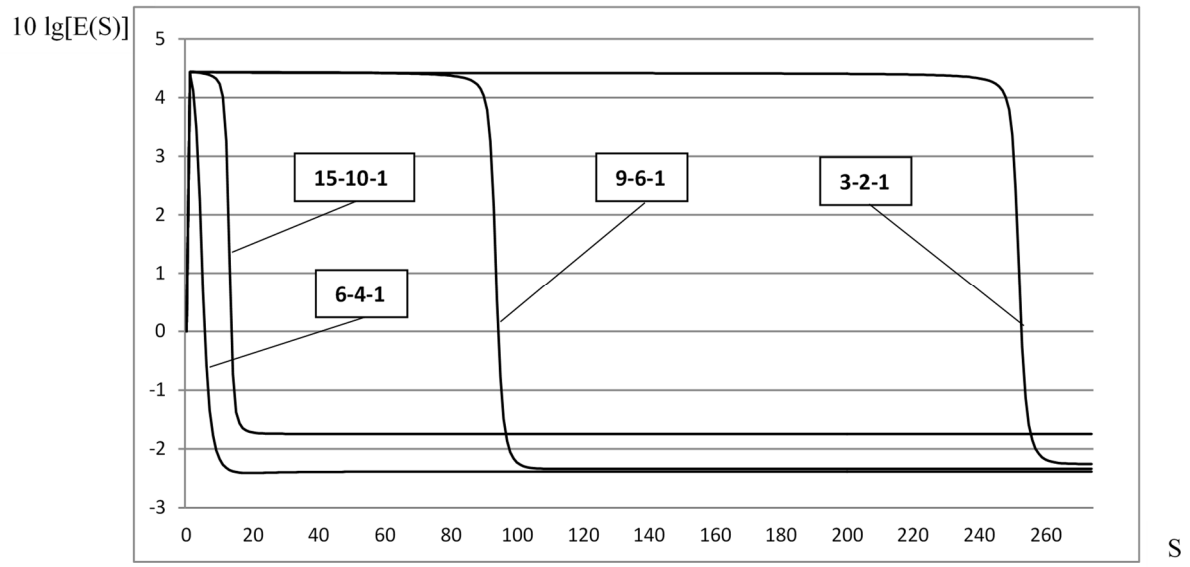


Рис. 4. График зависимости относительной ошибки ИНС от эпохи обучения

В соответствии с зависимостями, приведенными на рисунках 3, 4, наилучшие показатели обучения достигнуты при использовании архитектуры ИНС 6-4-1 (6 нейронов в первом скрытом слое, 4 – во втором, 1 нейрон в выходном слое).

Далее производилась проверка работы объекта управления с порогом H=5.7, полученным на выходе ИНС. Для проверки в решающем устройстве использовалась функция Хевисайда (2). Результаты проверки работы объекта управления приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты проверки работы объекта управления с порогом H=5.7

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
X	0,6783	5,5629	1,4595	3,8619	14,143	11,831	6,069	64,47	6,3	13,574
D	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Z	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

Заметим, что при проверке работы объекта управления используются ненормированные первичные параметры X. Как видно из таблицы 2, выходная реакция Z объекта управления с порогом H=5.7 полностью соответствует желаемой выходной реакции (D) – объекты классифицируются правильным образом (в соответствии с заданной уставкой), что подтверждает правильность порога, сформированного с помощью ИНС.

4. Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет реализовать нейроконтроллер, обеспечивающий выполнение поставленной задачи – сформированный с помощью ИНС порог позволяет правильным образом классифицировать объект. В рамках вычислительного эксперимента реализован модельный пример нейроконтроллера, подтверждающий правильность предложенного алгоритма, а также адаптивность ИНС и возможность их функционирования в условиях нелинейности процесса управления.

Литература

1. Отчет (Сектора связи Международного союза электросвязи) МСЭ-R SM.2152 (09/2009) «Определения системы радиосвязи с программируемыми параметрами (SDR) и системы когнитивного радио (CRS)».
2. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения. М.: ИПРЖР, 2000. - 272 с.
3. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: Дмк-Пресс, 2017. - 652 с.
4. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика. М.: Горячая Линия - Телеком, 2004. - 143 с.
5. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. - 576 с.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. - 1104 с.
7. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. - 496 с.

References

1. Otchet (Sectora svyazi Mezhdunarodnogo soyuza electrosvyazi) MSE-R SM.2152 (09/2009) «Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)».
2. Uskov A.A., Kuz'min A.V. Intellektual'nyye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennyye neyronnyye seti i nechotkaya logika. M.: Goryachaya Liniya - Telekom, 2004. - 143 p.
3. Makarov I.M., Lokhin V.M. Intellektual'nyye sistemy avtomaticheskogo upravleniya. M.: FIZMATLIT, 2001. - 576 p.
4. Omatu S., Khalid M., Yusof R. Neyroupravleniye i yego prilozheniya. M.: IPRZHR, 2000. - 272 p.
5. Gudfellou I., Bendzhio Y., Kurvill' A. Glubokoye obucheniye. M.: Dmk-Press, 2017. - 652 p.
6. Haykin S. Neyronnyye seti: polnyy kurs. M.: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2006. - 1104 p.
7. Medvedev V.S., Potemkin V.G. Neyronnyye seti. MATLAB 6. M.: DIALOG-MIFI, 2002. - 496 p.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ СТРУКТУРЫ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

В. В. Алексеев

Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), Тамбов, Россия

Аннотация. Представлен подход к оценке устойчивости сложной системы к негативным внешним воздействиям на основе определения отношений конфликта, сотрудничества и нейтральности ее элементов. Подход основан на теоретико-множественном представлении систем. Показана возможность использования этих результатов при поддержке принятия решения о готовности системы к функционированию по назначению. Приведено описание разработанной, при участии автора, системы поддержки принятия решений. Представлены некоторые практические результаты.

Ключевые слова: искусственный интеллект; негативное внешнее воздействие; отношения элементов; принятие решения; система; структура; устойчивость.

INTELLECTUALIZATION OF THE DECISION-MAKING PROCESS IN THE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX STRUCTURE SYSTEM BASED ON ITS STRUCTURAL CHARACTERISTICS

V. V. Alekseev

Tambov state technical university (TSTU), Tambov, Russia

Abstract. The approach to evaluating the stability of complex system to negative external effects on the basis of the definition of relationship conflict, cooperation and neutrality of its elements. The approach is based on theoretical-multiple submission systems. Shows how to use these results in support of a decision about the readiness of the system to function as intended. Describes the user interface designed with the participation of the author, decision-making support systems. Are some practical results.

Keywords: artificial intelligence; negative external effects; relationship elements; the adoption of the decision; system; structure; sustainability.

1. Введение

Успешное выполнение задач сложными системами или организациями, в современных условиях, в значительной мере зависит не только от количества и качества сил и средств для их решения, но и от наличия устойчивого, непрерывного и оперативного управления ими. Даже частичное нарушение управления может привести к самым тяжелым последствиям. Поэтому правильная организация управления системой или организацией является одним из важнейших условий успеха ее деятельности.

Одним из основных требований к сложной системе (СС) является требование эффективности ее функционирования. Анализ предметной области показал, что методы и способы построения СС, применяемые в настоящее время, не могут обеспечить в полной мере выполнение требований ее эффективности при негативных внешних воздействиях (НВВ). Это связано, в первую очередь, с ограниченными возможностями

применяемых в настоящее время методов и способов по изменению структуры СС при различных видах негативных воздействий (анализ). В свою очередь это обстоятельство приводит к тому, что существующие СС, не полностью соответствуют предъявляемым к ним требованиям. Кроме того, увеличение сложности решаемых различными прикладными системами задач, расширение их перечня, обуславливают необходимость повышения требований к эффективности СС.

В связи с этим необходимо развивать методы и способы, обеспечивающие эффективное изменение структуры СС при различных видах НВВ, с целью сохранения ее качества и, как следствие, непрерывности, устойчивости и оперативности управления.

В докладе раскрывается подход, обеспечивающий интеллектуализацию процесса анализа и синтеза структуры системы при негативных внешних воздействиях и автоматизацию процесса принятия решения на изменение ее структуры.

2. Методика определения отношений структурных характеристик элементов системы

Как показали результаты исследования, приведенные выше, анализ и синтез СС различными методами, позволяют получить определенные результаты по оценке качества функционирования систем. При этом в большинстве методов оцениваются параметры (связность; диаметр структуры; структурная компактность; степень централизации и др.), характеризующие свойства структуры системы, расчет которых осуществляется на основе матрицы смежности.

Анализ предметной области показал, что, как правило, НВВ приводит к выходу из строя элементов или нарушению связи между ними. Это приводит к конфликту, как между элементами, так и в системе в целом, поэтому предложено использовать математический аппарат теории множеств и подход предложенный профессором Сысоевым В.В. [1-3], описывающий методику анализа влияния элемента на качество структуры системы и, как следствие, на ее эффективность.

В соответствии с целью исследования была построена математическая модель функционирования СС в условиях негативных внешних воздействий.

В основе модели лежит положение об обладании сложной системой множеством свойств $C=\{C_1, C_2, C_3, ..., C_N\}$. Полезность свойства системы или, иначе, качество системы по некоторому свойству характеризуется показателем эффективности, который выражается в абсолютных или относительных единицах. СС, таким образом, характеризуется множеством показателей эффективности. При этом обобщенный показатель эффективности должен учитывать внутренние и внешние факторы, действующие на систему: H – качество структуры системы; N – множество элементов; V – параметры среды; U − управляющие факторы; L – трудозатраты на техническое обслуживание системы, $P(t)$ – показатели надежности техники и др. В общем виде он записан так:

$$\Pi_{об} = F(N, H, P(t), V, L, U). \quad (1)$$

В соответствии с вышесказанным, аналитическое выражение для обобщенной функции полезности $q_{об}$, учитывающей внутренние и внешние факторы действующие на систему, имеет вид:

$$q_{об} = F(N, H, P, V, L, U), \quad (2)$$

где $H=\{h_1, h_2, \ldots h_n\}$ – качество структуры системы, h_n – структурные параметры и характеристики системы.

В предположении, что значения N, V, U, L, P являются постоянными и удовлетворяют заданным требованиям, то оптимизация структуры системы означает максимизацию значения качества структуры. В этом случае, в соответствии с рассмотренными выше критериями, мы будем рассматривать максимальное значение одного из наиболее важных показателей системы – H, поэтому обобщенный критерий эффективности, определяется выражением:

$$H_{opt} = \max_{h_i}(H). \quad (3)$$

Выражение (3) означает, что для повышения качества системы выбирается максимальное значение одного или нескольких наиболее важных показателей структуры при допустимых значениях остальных показателей. Следовательно, для оценки эффективности системы необходимо оценивать параметры или характеристики, определяющие качество взаимодействия элементов систем.

При структурно-параметрическом подходе конфликт рассматривается как специфический способ взаимоотношения элементов систем, в результате которого происходит формирование системы, обладающей уже другими свойствами, чем каждая из конфликтующих сторон в отдельности.

Для нас наиболее интересны вопросы взаимодействия элементов системы в процессе ее функционирования при НВВ. Мы рассматриваем структуру системы и формирование механизма конфликта между элементами ее структуры, возникающего вследствие НВВ так, как предложено в [4,5].

Исследуемая система представлена в виде: $S_M=\{S_1, S_2, S_3, \ldots, S_N\}$, где S_i (i=1, 2, ..., N, N=16 (в частном, рассматриваемом случае)) − элементы системы. В процессе функционирования система S_M стремится к достижению некоторой цели W (являющейся аналогом критериальной функции результатов операции), а каждый из элементов (подсистем) S_i к достижению своей локальной цели W_i . Целью будем называть, в соответствии с определением, приведенным в первом разделе желаемое множество состояний, получаемое в результате действия элемента S_i [4].

При теоретико-множественном представлении системы S_M , считаем, что X – входное множество, Y – выходное множество, а $C=\{C_1, C_2 \ldots C_k\}$ – множество внутренних (глобальных) состояний системы S_M , причем $X = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_m$, $Y=Y_1 \times Y_2 \times \ldots \times Y_n$, где $\times$ – символ декартова произведения.

В процессе исследования считалось, что: произвольная цель W, измерима, т.е. на множестве X задана вещественная функция полезности $q(x)$, такая что если $x^1, x^2 \subset X$ и $q(x^1) > q(x^2)$, то $x^1 \succ x^2$ ($\succ$ – лучше) в процессе достижения W, то есть, предпочитая аргумент x^1 , система S_M достигает цель W эффективней. Функция полезности каждого

из элементов зависит от $X_i = \{x_i\}$ – множества реализаций входных воздействий и $Y_i=\{y_i\}$ – множества реализаций выходных воздействий. Причем $q_i(x_i)=q_i(x_i, \Phi_i(c_i, x_i))$, где Φ_i – некоторый оператор преобразования X в Y.

Рассмотрим матрицу связей для всех элементов множества S_M, считая, что возможна связь между выходом одного и входом другого элемента.

Такая формализация функционирования системы позволила перейти к определению отношения конфликта, сотрудничества и нейтральности.

В результате, из условия дифференцируемости функции полезности вычисляется приращение $\Delta q_j(S_i)$ при условии действия элемента S_i на систему S_M:

$$q'_j(S_i) = \frac{\lim\limits_{\Delta x_i(S_i)\to 0}\left[q_j\left(x_j^0+\Delta x_j^0(S_i),\ldots,x_j^N+\Delta x_j^N(S_i)\right)-q_i\left(x_j^0,\ldots,x_j^N\right)\right]}{\Delta x_i(S_i)}, \qquad (4)$$

где $\Delta x_j(S_i) = (\Delta x_j^0(S_i), \Delta x_j^1(S_i),\ldots, \Delta x_j^N(S_i))$ – сложный вектор-приращение, полученный входами элементов системы в результате действия элемента S_i.

Анализ выражения (4) показал, что:

элемент S_i вступает в конфликт с системой ($S_i\ R_K\ S_M$), если $q'_j(S_i)<0$, это означает, что действие элемента S_i уменьшает эффективность достижения системой S_M своей цели W (критериальной функции результатов операции);

элемент S_i содействует функционированию системы ($S_i\ R_C\ S_M$), если $q'_j(S_i)>0$, т.е. эффективность достижения системой S_M своей цели W возрастает;

функционирование системы S_M не зависит от S_i ($S_i\ R_H\ S_M$), если $q'_j(S_i) = 0$, т.е. элемент S_i не влияет на эффективность функционирования S_M в смысле достижения цели W.

Аналогичные рассуждения справедливы и для оценки влияния элемента S_i на другие элементы системы при их взаимодействии.

Если обозначить через Q полную группу введенных отношений ($Q=R_K\cup R_C\cup R_H$), то по значению приращения $\Delta q_j(S_i)$ на множестве S_M задается вся группа отношений между S_i и S_M ($S_i\ Q\ S_M$).

Такой подход позволяет построить матрицу (якобиан) $\left(\partial q_j / \partial s_i\right)_{i,j=\overline{0,N}}$, элементами которой являются соответствующие производные системы по элементу и элементов между собой. Этот якобиан определяет структуру формирования отношений конфликта, сотрудничества и нейтральности на множестве $S_M=\{S_0, S_1, \ldots, S_N\}$, то есть определяет всю группу отношений: ($S_i\ Q\ S_j$), ($S_j\ Q\ S_i$)).

Теперь предположим, что система функционирует на промежутке времени $t \in [t_0, t_k] = T$, тогда $X(t)$: $\{x(t)\,|_{t\in T}\}$, $Y(t)$: $\{y(t)\,|_{t\in T}\}$, $C(t)$: $\{c(t)\,|_{t\in T}\}$. Действие каждого элемента $S_i(t)$ представим в виде уравнения «вход - состояние - выход» нелинейной системы в дифференциальной форме :

$$C'_i(t) = F_i(C_i(t), X_i(t)), \quad Y_i(t) = R_i(C_i(t), X_i(t)), \qquad (5)$$

где $C_i(t) = \{c_i(t)\}$ – множество глобальных состояний элемента S_i, $X_i(t) = X_{i1}(t) \times X_{i2}(t) \times \ldots \times X_{imi}(t)$ – входной эффект элемента S_i, $Y(t) = Y_{i1}(t) \times Y_{i2}(t) \times \ldots \times Y_{ini}(t)$ – выходной эффект элемента S_i, причем $X_{ik}(t) = \{x_{ik}\}, k = \overline{1, mi}$, $Y_{ir}(t) = \{y_{ir}\}$, $r = \overline{1, ni}$

– множества реализаций соответственно входов и выходов системы S_i. F_i и R_i – вектор-столбцы в общем случае нелинейных зависимостей. $C'_i(t)$ – характеризует изменение внутреннего состояния элемента во времени.

Введем функцию полезности функционирования S_i с временным аргументом $t \in [t_0, t_k] = T$ процесса достижения цели $W_i{:}q_i(x_i(t)) = q_i(x_i(t), R_i(c_i(t), x_i(t)))$, где $x_i(t) \in X_i(t)$, $c_i(t) \in C_i(t)$. Причем будем считать $i = \overline{0,N}$, предполагая представление внешней среды в виде системы S_0.

Для изучения взаимодействия элементов, в первую очередь, необходимо выделить $\forall t \in T$ из множества $S_M(t)$ подмножества элементов $S^{R_H}(t)$, $S^{R_C}(t)$ и $S^{R_K}(t)$, для которых справедливы бинарные отношения R_K, R_C и R_H соответственно. Это равносильно выделению из $G(t) = G(S_M, E, t)$ $\forall t \in T$ подграфов: $G(R_K) = G^{R_K}(S^{R_K}, E^{R_K}, t)$, $G(R_C) = G^{R_C}(S^{R_C}, E^{R_C}, t)$, $G(R_H) = G^{R_H}(S^{R_H}, E^{R_H}, t) \subset G(S_M, E, t)$.

Бинарные отношения R_K, R_C, R_H задаются матрицами смежности для соответствующих подграфов графа $G = G(S_M, E, t)$. Обозначим такие матрицы через $K = \left[\kappa_{ij}\right]$, $K^K = \left[\kappa_{ij}^k\right]$, $K^C = \left[\kappa_{ij}^c\right]$, $K^H = \left[\kappa_{ij}^н\right]$ порядка $n \times n$, причем:

$$\begin{cases} k_{ij}^k = 1,\ k_{ij}^c = 0,\ k_{ij}^н = 0 \text{ если } e_{ij} < 0; \\ k_{ij}^k = 0,\ k_{ij}^c = 1,\ k_{ij}^н = 0 \text{ если } e_{ij} > 0; \\ k_{ij}^k = 0,\ k_{ij}^c = 0,\ k_{ij}^н = 1, \text{ если } e_{ij} = 0. \end{cases} \qquad (6)$$

Значение k_{ij} равно весу дуги, соединяющей S_i с S_j, а значение k_{ji} равно весу дуги, соединяющей S_j с S_i. Количественное значение отношений сотрудничества, конфликта и нейтральности рассчитывается как

$$K_{\Pi}^{C} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} k_{ij}^{c},\ K_{\Pi}^{K} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} k_{ij}^{k},\ K_{\Pi}^{H} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} k_{ij}^{H}, \qquad (7)$$

и по сути являются показателями сотрудничества, конфликта и нейтральности.

Для каждой вершины S_i определим суммы вида

$$d_{исх}(S_i) = \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}\ ,\ d_{вх}(S_i) = \sum_{i=1}^{n} \omega_{ij}\ , \qquad (8)$$

где ω_{ij} – элемент ноль-единичной матрицы $\Omega(Q)$, где Q – обобщенное отношение $Q = (>I_к \vee >I_c \vee >I_н)$. Например, если $\omega_{ij} \in \Omega(>I_к)$, а $e_{ij} \in E^{>I_к}$ и $e_{ij} \neq \varnothing$, то $\omega_{ij} = 1$, в противном случае $\omega_{ij} = 0$.

Равенство суммы $d_{исх}(S_i)$ нулю $(d_{исх}(S_i) = 0)$ служит признаком выделения элементов S_i (конечных подсистем), действие которых не оказывает влияние на формирование отношения Q в соответствии с рассматриваемым графом $G^{>I_к} \vee G^{>I_c} \vee G^{>I_н}$, а значение $d_{исх}(S_i) > 0$ определяет число элементов на которые S_i оказывает влияние при формировании отношения Q.

Равенство же суммы $d_{вх}(S_i)$ нулю служит признаком выделения элементов S_i (исходных подсистем), действие которых оказывают влияние на формирование отношения Q в соответствии с рассматриваемым графом $G^{R_к} \vee G^{R_c} \vee G^{R_н}$, а значение $d_{вх}$

(S_i)> *0* определяет число элементов, которые оказывают влияние на S_i при формировании отношения Q.

Если $d_{исх}$ (S_i)= $d_{вх}$ (S_i)= 0, то вершина является изолированной, в смысле отношения Q.

В виду того, что суммы $d_{исх}$ (S_i) и $d_{вх}$ (S_i) дают представления лишь о месте S_i в структуре G, целесообразно ввести величины, характеризующие степень влияния S_i на формирования отношения Q.

Для каждой вершины S_i определены суммы вида

$$\lambda_o(S_i)=\frac{\sum_{j=1}^{n} k_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} k_{ij}}\cdot 100\ \%,\quad \lambda_в(S_i)=\frac{\sum_{i=1}^{n} k_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} k_{ij}}\cdot 100\ \%, \qquad (9)$$

Сумма λ_o (S_i) показывает степень воздействия S_i на другие элементы системы в смысле отношений Q . Сумма $\lambda_в$ (S_i), наоборот, степень воздействия других элементов системы на S_i в смысле отношений Q.

При таком подходе пары ($d_{исх}$ (S_i), λ_o (S_i)) и ($d_{вх}$ (S_i), $\lambda_в$ (S_i)) достаточно полно характеризуют важность элемента S_i в формировании отношений Q между элементами системы S_M .

Для определения отношения конфликтности и сотрудничества элементов найдены, суммы показателей конфликтов и сотрудничества системы:

$$\rho^K=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} k_{ij},\quad k_{ij}\in K^K,\qquad \rho^C=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} k_{ij},\quad k_{ij}\in K^C.$$

Из этих сумм находим отношения P_K и P_C характеризующие, соответственно, общую конфликтность или сотрудничество элементов системы:

$$P_K=\frac{\rho^K}{\rho^C},\ \mathrm{P_C}=\frac{\rho^{\mathrm{C}}}{\rho^{\mathrm{K}}}. \qquad (10)$$

В дальнейшем были проведены исследования, связанные с понятиями симметричности и транзитивности бинарных отношений, а также исследованы структурные параметры, представляющие интерес для исследования качества структуры существующих и проектируемых систем, адаптивных к воздействию внешних негативных факторов: степень централизации; структурная избыточность и компактность.

Анализ результатов моделирования показал, что оптимизация структуры системы, в соответствии с выражением (3), однозначно определяется максимизацией (повышением) значений характеристики сотрудничества $K_П^C$. В этом случае обобщенный критерий эффективности определяется выражением:

$$\mathrm{H_{opt}}=\max_{\mathrm{h_i}}(\mathrm{H})=\max(\mathrm{K_П^c}). \qquad (11)$$

При поведении исследований было установлено, что для определения работоспособности системы удобно пользоваться критерием пригодности:

$$H = K_{П}^{С} - K_{П}^{К} > 0 . \quad (12)$$

В соответствии с определениями критериев, выражение (11) относится к критериям оптимальности, а выражение (12) – пригодности, так как равенству показателей $K_{П}^{С}$ и $K_{П}^{К}$ соответствует количество не отказавших элементов, при которых система еще работоспособна.

Выражения (4-12) описывают математическую модель структуры сложной системы, позволяющую исследовать конкретные характеристики структуры системы – отношения сотрудничества, нейтральности, конфликта.

Результаты математического моделирования по оценке качества структуры системы при НВВ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценка структурных характеристик системы

Топология (N=16)	Работоспособная система			Отказ 3-го элемента		
	$K_{П}^{С}$	$K_{П}^{Н}$	$K_{П}^{К}$	$K_{П}^{С}$	$K_{П}^{Н}$	$K_{П}^{К}$
Иерархическая	0,67	1,89	0	0,37	1,89	0,3
Регулярная решетка	0,56	2,0	0	0,5	2,0	0,06

Анализ результатов моделирования показывает, что значение H зависит от структурных характеристик системы.

На этой основе получены методы определения наилучшей структуры системы на основе определения структурных характеристик и изменения структуры системы на основе определения структурных характеристик [6-8].

Результаты проведенных исследований показали, что расчетные значения отношений элементов системы целесообразно использовать в разработанной системе поддержки принятия решений для повышения оперативности, обоснованности и достоверности принимаемых решений.

3. Система поддержки принятия решений

Система поддержки принятия решений (СППР) позволяет на основе полученной информации, рассчитать количественные характеристики предпочтительности рассматриваемых альтернатив и определить среди них наиболее оптимальные с учетом большого числа критериев, по которым они сравниваются. Система построена на основе разработанного автором метода взвешенной выборки [9].

Основные этапы работы ЛПР с системой следующие:

– определение цели работы с системой (т.е. цели конкретной задачи);

– определение вариантов решений (альтернатив) и критериев сравнения альтернатив;

– оценка предпочтения альтернатив на множестве критериев;

– анализ результатов решения и возможный переход к выполнению одного из предыдущих этапов.

Взаимодействие лица, принимающего решение (ЛПР) с СППР организовано таким образом, чтобы диалог проходил в наиболее удобной и понятной форме.

Для этого реализованы следующие возможности:

– контроль входной информации на выявление простейших ошибок;

– работа с различной информацией о сравниваемых объектах (количественной, качественной);

– коррекция перечня альтернатив, критериев сравнения альтернатив;

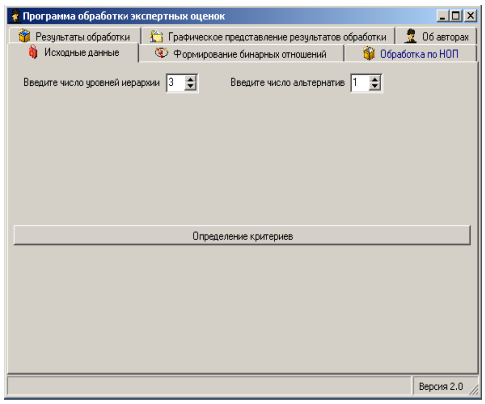
– пересмотр прежних оценок, изменение последовательности отдельных этапов решения и т.д.

Система требует предварительного обучения пользователя и его адаптации к модифицированной шкале относительной важности [9].

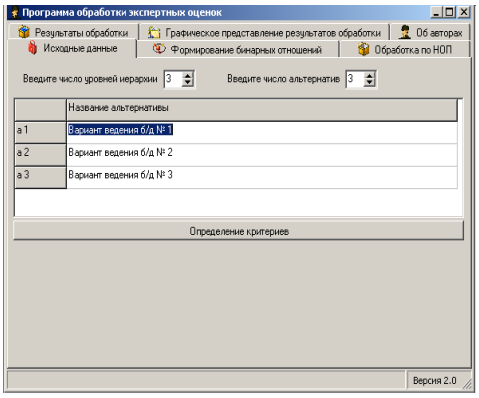
Одной из задач, решаемых в ходе исследования, являлась разработка компьютерной программы, реализующей разработанный алгоритм принятия решений на основе метода анализа иерархий (МАИ) в условиях ограниченного количества исходной информации.

Последовательность действий ЛПР при работе с СППР реализуется этапами (рисунок 1):

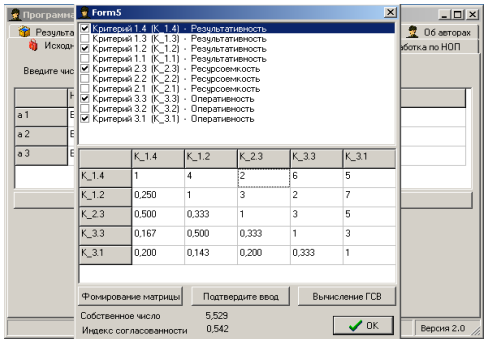
Первый этап – построение иерархии процесса принятия решений, на этом этапе ЛПР указывает количество уровней в иерархии (рисунок 1 а), количество альтернатив и их наименование (рисунок 1 б). Далее пользователь производит выбор критериев эффективности из базы критериев (рисунок 1 в, г).



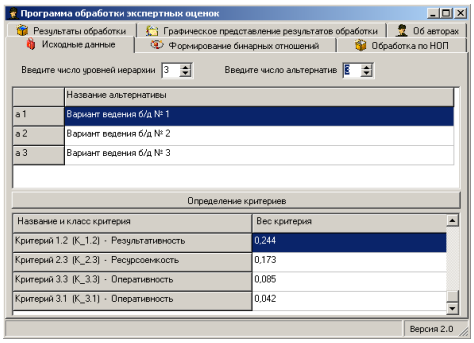
а)



б)



в)



г)

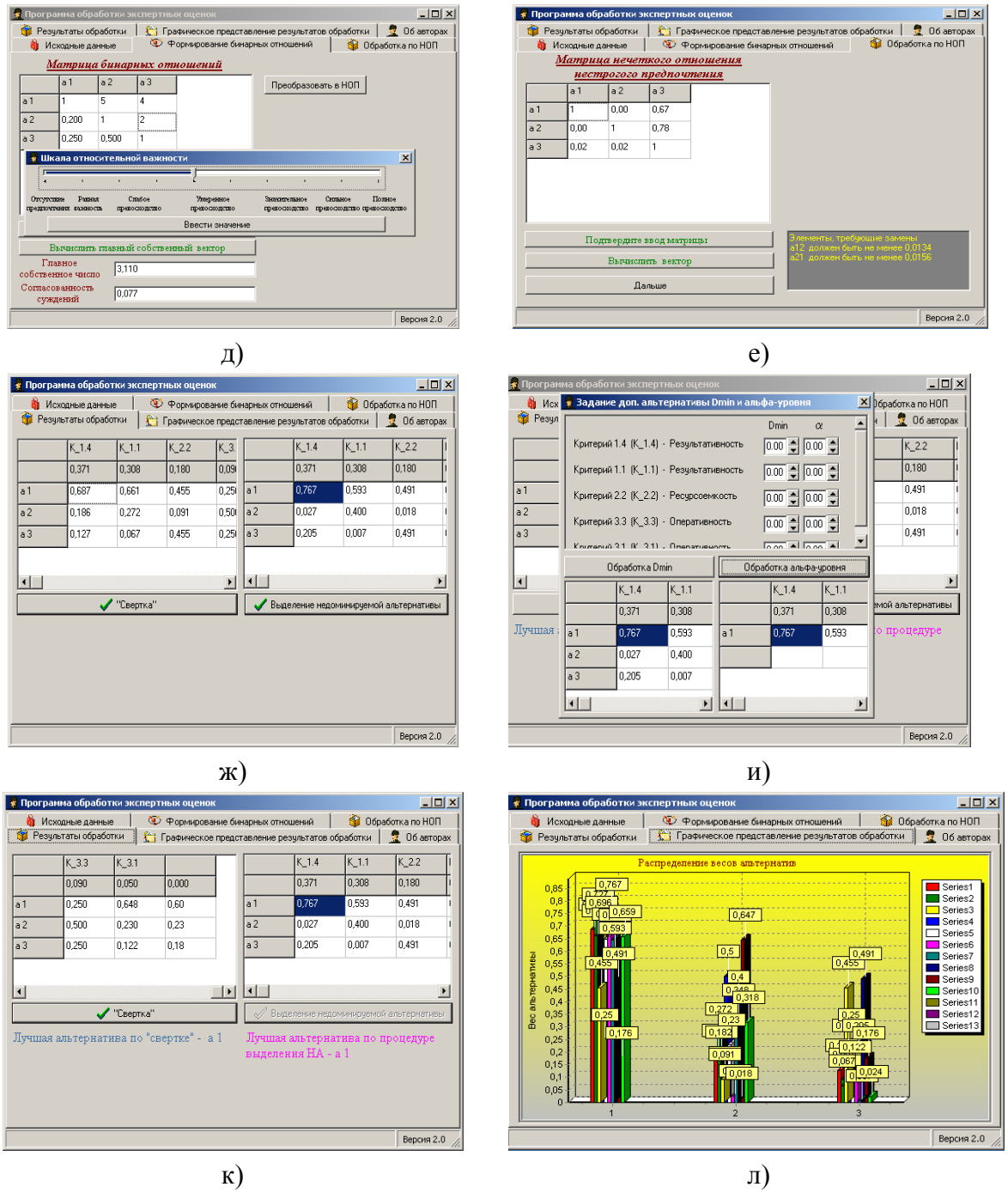


Рис. 1. Интерфейс СППР

Второй этап – формирование суждений экспертов по качественной шкале. По каждой паре сравниваемых объектов каждого уровня иерархии предлагается определить степень предпочтительности того или иного объекта (рисунок 1д).

Матрицы парных сравнений автоматически формируются как рефлексивные отношения, которые удовлетворяют степенной калибровке (рисунок 1д). Предусмотрена коррекция ответов согласно ограничениям шкалы.

После формирования матрицы парных сравнений (как на основе качественных, так и количественных данных) может быть автоматически вычислено отношение согласованности, индекс согласованности, главное собственное значение (рисунок 1д).

Высокое отношение согласованности (более 20 %) показывает на необходимость пересмотреть суждения (рисунок 1е).

По окончании формирования бинарных отношений по частным критериям результаты их обработки заносятся в форму (рисунок 1ж). Из этой формы осуществляется запуск алгоритмов многокритериального выбора альтернатив (рисунок 1и, к). Результаты работы программы могут быть получены также в виде отчета (рисунок 1к) и в графической форме (рисунок 1л).

4. Заключение

Система поддержки принятия решений, позволяет, на основе получаемой информации, автоматически рассчитать количественные характеристики предпочтительности рассматриваемых альтернатив и определить среди них наиболее оптимальные с учетом большого числа критериев, по которым они сравниваются. При этом повышается качество принимаемых решений.

Литература

1. Алексеев В.В. Формирование структур управления информационной системой / В.В. Алексеев, М.А. Никанкин, А.М. Зимарин. // Инженерная физика, 2010, № 3. – С. 17-20.
2. Алексеев В.В. Модель изменения топологии информационной системы в условиях конфликта / В.В. Алексеев, А.А. Соломатин, М.А. Никанкин, Ю.Ю. Громов, С.В. Петренко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2011. – № 7. – С. 22-26.
3. Блюмин С.Л. Метаграфы: матричные представления, связи с орграфами и гиперграфами, с идемпотентной математикой / С.Л. Блюмин // Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации и информационные технологии в образовании» апрель 2011 г.– Липецк: ЛГПУ, 2011. – С. 29-32.
4. Сысоев В.В. Конфликт. Сотрудничество. Независимость. Системное взаимодействие в структурно – параметрическом представлении. / В.В. Сысоев. – М.: МАЭП, 1999.– 151 с.
5. Сысоев В.В. Бинарные отношения в структурно-параметрическом представлении систем / В.В. Сысоев // Информационные технологии и системы, 2001.– Вып.4.– С. 5-15.
6. Алексеев В.В. Метод построения системы управления сложной информационной системой на основе структуры тора / В.В. Алексеев, М.А. Никанкин, А.А. Соломатин // Инженерная физика, 2009, № 11. - С. 47-52.
7. Алексеев В.В., Дидрих В.Е., Липихин А.В. Концепция построения модели иерархической организаций / Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XV Международной научно-методической конференции, Воронеж, 12-13 февраля 2015 г.: в 4 т. – Воронеж: Издательский дом ВГУ. –2015. – Т.1. – С.20-23.
8. Алексеев В.В., Анализ и синтез модульных сетевых информационных систем в интересах повышения эффективности целенаправленных процессов/ Алексеев В.В., Громов Ю.Ю., Яковлев А.В., Старожилов О.Г.// Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена; Гамбург: Изд-во МИНЦ «Нобелистика». - 2012.- 130 с.
9. Алексеев, В.В. Моделирование информационного воздействия на эргатический элемент в эрготехнических системах/ Алексеев В.В., Корыстин С.И., Малышев В.А., Сысоев В.В.// М.:- изд. предп. «Стенсвил», 2003., 163 с.

References

1. Alekseev, V.V. Shaping management structures information system/V.V. Alekseev, M.A. Nikankin, A.M. Zimarin. Engineering Physics, 2010, no. 3. -S. 17-20.
2. Alekseev, V.V. Topology change information system model in conflict/V.V. Alekseev, A.A. Solomatin, M.A. Nikankin, Yu.Yu., Gromov, S.N. Petrenko//Devices and systems. Management, monitoring, diagnostics, 2011. -No. 7. -S. 22-26.

3. Blyumin S.l. Metagrafy: matrix representations, communications with orgrafami and gipergrafami, with idempotent mathematics/S.l. Blyumin//Proceedings of IV international scientific-practical Conference "Innovations and information technologies in education» April 2011-Lipetsk: LSPU, 2011. -S. 29-32.
4. Sysoev V.V. Conflict. Cooperation. Independence. System interaction in structural-parametric view. /V.V. Sysoev. -M.: MAJeP, 1999.-151 p.
5. Sysoev V.V. Binary relations in structural-parametric view systems/V.V. Sysoev//Information technology and systems, 2001.-vol. 4-s. 5-15.
6. Alekseev, V.V. Method of constructing complex information system management system based on the structure of the torus/V.V. Alekseev, M.A. Nikankin, A.A. Solomatin//Engineering Physics, 2009, no. 11. -S. 47-52.
7. Alekseev, V.V., Diedrich V.E., Lipihin A.V., The concept of building the model of hierarchical organizations/information science: problems, methodologies, technology: proceedings of the 15th International scientific-methodical conference, Voronezh, 12-13 February 2015: in 4 t.-Voronezh: MAD Publishing House. -2015. -T. 1. -P. 20-23.
8. Alekseev, V.V., Analysis and synthesis of modular network information systems in order to enhance the effectiveness of targeted processes/V.V. Alekseev, Gromov Yu.Yu., Yakovlev A.V., Old-timers O.g.//Tambov; M.; Spb.; Baku; Vienna; Hamburg: IZD-vo "Nobelistika" MINTZ. -2012.-130 c.
9. Alekseev, V.V.Jergaticheskij information influence on a modeling element in jergotehnicheskih systems/Alekseev, V.V., Korystin S.I., V.A. Malyshev, Sysoev V.V.//M.: ed. guess. «Stensvil», 2003, 163 p.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ РЕГИОНА

В.Г. Бурлов[1], М.О. Лепешкин[1]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассматривается необходимость анализа и учета особенностей управленческой деятельности в информационно-управляющих системах (ИУС) государственного управления техносферной безопасностью (ТБ) региона в условиях непрерывных изменений внутренней и внешней среды. Анализируется управленческая деятельность должностных лиц, занятых в сфере управления ТБ региона.

Ключевые слова: информационно-управляющие системы, государственное управление техносферной безопасностью региона, управленческая деятельность должностных лиц, функции управления, инфокоммуникационные технологии, этапы обработки информации. .

INFORMATION-MANAGING SYSTEMS OF STATE MANAGEMENT OF TECHNOSPHERE SAFETY OF THE REGION

V.G. Burlov[1], M.O. Lepeshkin[1]

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Russia

Abstract. The necessity of the analysis and the account of features of management activity in information-managing systems (IMS) of the state management of technosphere safety (TS) of region in the conditions of continuous changes of internal and external environment is considered. Analyzes the management activities of officials, engaged in the management of TS of region.

Keywords: Information-managing systems, state management of technosphere safety of region, management activities of officials, management functions, information and communication technologies, stages of information processing..

1. Введение

Информационно-управляющие системы (ИУС) государственного управления техносферной безопасностью (ТБ) региона относятся к классу сложных динамических систем, которые функционируют в условиях непрерывных изменений внутренней и внешней среды. Управление такими системами заключается в целесообразной реакции на эти изменения, т.е. в своевременной и эффективной перестройке системы в соответствии с изменяющимися условиями. Поэтому процесс управления с точки зрения содержания управления как вида деятельности есть не что иное, как упорядочение системы. Упорядочивающее воздействие управления сводится к установлению соответствия системы объективным закономерностям и тенденциям развития, характеризующим качественную определенность среды, в которой функционирует данная система. При этом каждый раз решается основная задача управления -

сохранение функциональной и структурной устойчивости системы управления ТБ региона[1].

2. Управленческая деятельность в информационно-управляющих системах государственного управления техносферной безопасностью региона

Организация управления ИУС заключается в целенаправленном сборе, накоплении и систематизации данных о фактическом и требуемом состоянии процессов управления и в упорядочивающих воздействиях на них. В ходе организации создается совокупность таких отношений в системе управления, которые обеспечивают ее целостность и целенаправленность. Управление системами техносферной безопасности региона (СТБР) можно рассматривать как деятельность должностных лиц (ДЛ), занятых в сфере управления, по руководству подчиненными им людьми, коллективами, организованными структурами [3].

Реализация процесса управления в системе управления осуществляется через его функции. В настоящее время еще не сложилось единого мнения в отношении определения функции управления, а следовательно, и относительно ее содержания и состава. Многие исследователи считают, что функции составляют содержание управления. Одни из них понимают под функцией управления виды управленческой деятельности, другие считают, что функции управления соответствуют стадиям, этапам процесса управления, третьи характеризуют функции управления и как содержание, и как стадии процесса управления [2]. Последняя точка зрения представляется наиболее предпочтительной, т.к. отражает двойственную природу функций управления. В соответствии с этим подходом функции управления раскрывают содержание управления и его стадии, т.е. последовательность реализации функций в рамках единого управленческого цикла.

Под функцией управления будем понимать некоторую часть общего процесса управления, которая имеет свои самостоятельные цели, задачи и технологии их выполнения, т.е. будем рассматривать ее как субпроцесс или подпроцесс.

Исходя из этого, практическая реализация процессов управления заключается в выполнении функций управления по организации, планированию, руководству и контролю.

Управленческая деятельность (УД) ДЛ ИУС имеет прикладной характер, т.к. она призвана обслуживать реализацию целей и функций управления, обеспечивать подготовку и проведение в жизнь управленческих решений и действий.

Поскольку ИУС выполняет функции по обеспечению процессов управления, то, как правило, по содержанию элементов УД соответствует содержанию управленческих процессов. При этом важное место в общем процессе организации УД занимают технологии выполнения управленческих работ. В общем случае технология представляет собой совокупность способов и последовательность преобразования чего-либо для получения желаемых результатов [4]. Применительно к ДЛ ИУС технология - совокупность способов и последовательность действий по упорядочиванию УД на основе выбранного метода для достижения заданного уровня ее эффективности.

Внедрение и реализация технологий в УД является непременным условием эффективности и рационализации УД [5].

Важной составляющей общего ресурса управления являются инфокоммуникационные технологии (ИКТ), используемые в ИУС. В настоящее время существует достаточно много подходов к определению ИКТ.

Так, например, под ИКТ понимается определенный комплекс научных и инженерных знаний, воплощенных в способах, приемах труда для создания и применения информационных ресурсов в деятельности человека. В то же время ИКТ рассматривается и как система методов и способов сбора, передачи, накопления, обработки, представления и использования информации на основе применения технических средств [6]. Этот список определений ИКТ можно продолжить. Под ИКТ будем понимать способы и методы преобразования информации на всех этапах ее жизненного цикла.

В то же время определенный способ достижения поставленных целей, состоящий в последовательном пооперационном осуществлении УД представляет собой управленческую технологию. В широком смысле управленческая технология - это распределение, специализация, сочленение и реализация различных процедур и операций в процессе управления. В узком смысле управленческая технология - это элемент организации УД. Она расчленяется на последовательные взаимосвязанные процедуры и операции.

Содержание процессов УД можно определить только в результате последовательного выделения из каждой функции управления входящих в нее работ, операций и их элементов. А это, в свою очередь, позволяет наилучшим образом организовать УД в части, касающейся средств управления, способов и последовательности действий ДЛ ИУС в процессах управления, т.е. определить организационно-техническое содержание управленческой технологии.

3. Деятельность должностных лиц по обработке информации при управлении техносферной безопасностью региона

В целом деятельность ДЛ ИУС носит самый разнообразный характер. Несмотря на это, с точки зрения обработки информации она может быть представлена в виде четырех основных этапов: прием информации, оценка и переработка информации, принятие решения и реализация принятого решения.

На этапе приема информации осуществляется восприятие поступающей информации об объектах управления и тех свойствах окружающей среды, которые важны для решения поставленной задачи. На этой основе формируется информационная модель некоторой «умственной картины» управляемого процесса и условий, в которых он протекает. Такую умственную картину в инженерной психологии принято называть концептуальной моделью.

Она дает возможность ДЛ ИУС соотнести в единое целое различные части управляемого процесса и затем на основе принятого решения осуществить эффективные управляющие действия, т.е. правильно реализовать полученную информацию.

Прием информации рассматривается как процесс перцептивного (чувственного) образа. Под ним понимается субъективное отражение в сознании человека свойств действующего на него объекта. Исследования, проведенные в психологии, показывают, что формирование перцептивного образа является фазным процессом. Оно включает несколько стадий: обнаружение, различение и опознание [7]. Длительность этих стадий зависит от сложности принимаемой информации. Физиологической основой формирования перцептивного образа является работа соответствующих анализаторов, посредством которых человек воспринимает информацию.

Существуют определенные требования к информационным сигналам: их интенсивность должна соответствовать средним значениям чувствительности анализаторов, что обеспечивает оптимальные условия для приема и переработки информации; перепады между сигналами не должны значительно превышать оперативный порог, т.к. при больших перепадах возникает утомление; должно быть обеспечено различие между сигналами, превышающее оперативный порог различения.

На этапе оценки и переработки информации производится сопоставление заданных и текущих (реальных) режимов работы управляемых объектов, производится анализ и обобщение информации, выделяются критические объекты и ситуации и на основе заранее известных (нормативных) критериев важности и срочности определяется очередность обработки информации. При этом часто возникают проблемные ситуации, которые необходимо осмыслить, выявить задачу и найти пути ее решения. ДЛ, как правило, ограничены во времени: опоздание с решением равносильно ошибке и может привести к еще большему усложнению проблемной ситуации, а иногда и к частичному или полному нарушению работы всей ИУС.

Этап принятия решения осуществляется на основе проведенного анализа и оценки информации, а также на основе других известных сведений о целях и условиях работы ИУС, возможных способах действий, последствиях правильных и ошибочных решений и т.п. Время принятия решения существенно зависит от энтропии множества решений. Процедура принятия решения является центральной на всех уровнях приема и обработки информации. В самом общем виде процедура принятия решения включает формирование последовательности целесообразных действий для достижения цели на основе преобразования некоторой исходной информации. К объективным и субъективным условиям, определяющим реализацию процессов решения в ИУС, можно отнести: наличие дефицита информации и времени; «неопределенность ситуаций», вызывающих борьбу мотивов у субъектов, принимающих решения; осуществление волевого акта, обуславливающего преодоление неопределенности; выбор гипотезы, принятие на себя той или иной ответственности. В общем виде подготовка решения связана с функционированием механизмов информационного и информационно-эвристического поиска. В целом процессы принятия решения имеют детерминированно-стохастическую природу.

На этапе исполнения принятого решения выполняются определенные действия или соответствующие решения. В целом же, осуществление всего комплекса действий

ДЛ ИУС сопровождается обработкой разнообразных по характеру и содержанию потоков информации.

4. Заключение

Проведенный анализ функционирования ИУС государственного управления ТБ региона показывает, что в настоящее время роль ДЛ ИУС достаточно велика и требует обязательного учета особенностей их управленческой деятельности при функционировании систем в реальном масштабе времени.

Литература

1. Акинин П.В., Блинников В.А., Братков В.В., Гундарь О.Н., Медведев Н.П., Сергодеева Е.А., Снимщикова Е.В., Арискина А.В., Бабин И.А., Копытов В.В., Косов Г.В., Кузьмин Д.С., Росенко А.П., Шульга М.М., Лепешкин О.М., Бурым Ю.В. Угрозы безопасности России на Северном Кавказе. - Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2004. - 336 с.
2. Бурлов В.Г., Лепешкин О.М., Кириллова Т.В. Моделирование процесса управления социальными и экономическими системами региона на основе потенциально активных элементов пространства и времени// Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. - 2013. - № 3. - С. 82-85.
3. Бурлов В.Г., Лепешкин О.М., Кириллова Т.В. Методологический подход к оценке безопасности функционирования социальной и экономической системы управления региона// Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. - 2013. - № 2. - С. 99-103.
4. Бурлов В.Г., Лепешкин О.М., Кирилова Т.В. Разработка алгоритмического обеспечения реализации процесса функционирования социальных и экономических систем региона при изменении условий// Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. - 2013. - № 4. - С. 89-94.
5. Лепешкин О.М. Синтез модели процесса управления социальными и экономическими системами на основе теории радикалов автореферат дис. ... доктора технических наук. - СПб: С.-Петерб. гос. политехн. ун-т, 2014. - 33 с.
6. Лепешкин М.О., Лепешкин О.М., Сагдеев А.К. Методологический подход оценки функциональной безопасности критической социотехнической информационной системы// Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 3-х томах. - СПб: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2016. - С. 294-299.
7. Лепешкин О.М., Лепешкин М.О., Бурлов В.Г. Синтез модели процесса управления техническими системами на основе теории радикалов //Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов/ Под ред. А.И. Галушкина, А.В. Чечкина, Л.С. Куравского, С.Л. Артеменкова, Г.А. Юрьева, П.А. Мармалюка, А.В. Горбатова, С.Д. Кулика. - М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2016. - С. 18-В.

References

1. Akinin P. V., Blinnikov V.A., Bratkov V. V., Hundar O. N., Medvedev N. P., Sergodeeva E. A., Snimshikova E. V., Ariskina A. V., Babin I. A., Kopytov V. V., Kosov G. V., Kuzmin D. S., Rosenko A. P., Shulga M.M., Lepeshkin O.M., Burym YU. V. Threats to Russia's security in the North Caucasus. - Stavropol: North Caucasus Federal University, 2004. - 336 p.
2. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Kirillova T. V. Modeling of management process of social and economic systems of the region on the basis of potentially active elements of space and time// Problems of economy and management in trade and industry. - 2013. - № 3. - Pp.82-85.
3. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Kirillova T. V. Methodological approach to assessing the safety of the social and economic management system of the region// Problems of Economics and management in trade and industry. - 2013. - № 2. - Pp. 99-103.

4. Burlov, V. G., Lepeshkin O. M., Kirilova T. V. Development of algorithmic support of the implementation of the process of functioning of social and economic systems of the region when conditions change// Problems of Economics and management in trade and industry. - 2013. - № 4. - Pp. 89-94.
5. Lepeshkin O. M. Synthesis of the model of the process of management of social and economic systems on the basis of the theory of radicals ... doctor of engineering. - St. P.: S.-Peterb. state Polytechnic. UN-t, 2014. - 33 p.
6. Lepeshkin M. O., Lepeshkin O. M., Sagdeev A.K. The methodological approach for the assessment of functional safety critical socio-technical information system// Actual problems of infotelecommunication in science and education. Collection of scientific articles: in 3 volumes. - St. P.: St. Petersburg state University of telecommunications. prof. M. A. Bonch-Bruevich, 2016. - Pp. 294-299.
7. Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Burlov V. G. Synthesis of model of process of management of technical systems on the basis of the theory of radicals / / Neurocomputers and their application. Abstracts/ edited by A. I. Galushkin, V. A. Chechkin, L. S. Kuravsky, L. S. Artemenkov, G. A. Yuriev, P. A. Marmalyuk, A. V. Gorbatov, S. D. Kulik. - M.: Moscow state University of psychology and education, 2016. - Pp. 18-B.

КЛАССИФИКАЦИЯ УРОВНЯ ФОРМИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М. Н. Данильченко, Н. М. Рябков, К. В. Пядухова, А. Н. Голубинский

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрено применение искусственных нейронных сетей для решения задачи классификации уровня формирования.

Ключевые слова: система управления, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, нейроклассификатор.

CLASSIFICATION OF THE LEVEL FORMATION USING OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

M. N. Danilchenko[1], N. M. Ryabkov[1], K. V. Piadukhova[1], A. N. Golubinsky[1]

[1]JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. The use of artificial neural networks to solve the problem of classifying the level of formation is considered.

Keywords: control system, artificial intelligence, artificial neural networks, neuroclassifier.

1. Введение

В рамках функционирования автоматизированных систем управления одной из основополагающих задач в ходе управления является задача классификации обнаруженных объектов внешней среды с целью последующего формирования адекватных решений в ходе управления. Особую актуальность приведенная задача приобретает для автоматизированных систем специального назначения, которые характеризуются обработкой большого объема широкого перечня информации, подлежащей единовременному анализу для выработки адекватного решения в сжатые сроки. Ввиду приведенных факторов возможным вариантом устранения противоречий может стать использование интеллектуальных компонентов, обеспечивающих высокую эффективность при решении задач автоматической классификации объектов и ситуаций. В рамках настоящей работы рассмотрено решение задачи автоматической классификации уровня формирования по данным об идентифицированных объектах на электронной карте местности, сложность решения которой на практике связана с отсутствием полной информации об обстановке, что определяет актуальность её решения в виде интеллектуального компонента (помощника командира).

2. Описание задачи

Одним из возможных путей реализации такого компонента может быть применение технологий искусственного интеллекта (ИИ). Используемые в настоящее время подходы к формализации ИИ, как правило, базируются на математическом аппарате искусственных нейронных сетей (ИНС), нечеткой логики, генетических (эволюционных) алгоритмах и их гибридных модификациях [1, 2].

Искусственные нейронные сети широко применяются в случае, когда обычные решения оказываются неэффективными или нереализуемыми. К числу таких задач можно отнести:

- управление информационными потоками в телекоммуникационных сетях [3];
- управление радиоэлектронным подавлением [4];
- управление перестройкой частоты в радиосетях [4];
- автоматическая классификация объектов и ситуаций [5];
- распознавание изображений [5, 6] и др.

В данной работе рассмотрено применение аппарата ИНС для интеллектуализации задачи классификации уровня формирования. На рис. 1 приведена схема для формализации данной задачи и её последующей реализации в качестве интеллектуального компонента с использованием аппарата искусственных нейронных сетей.

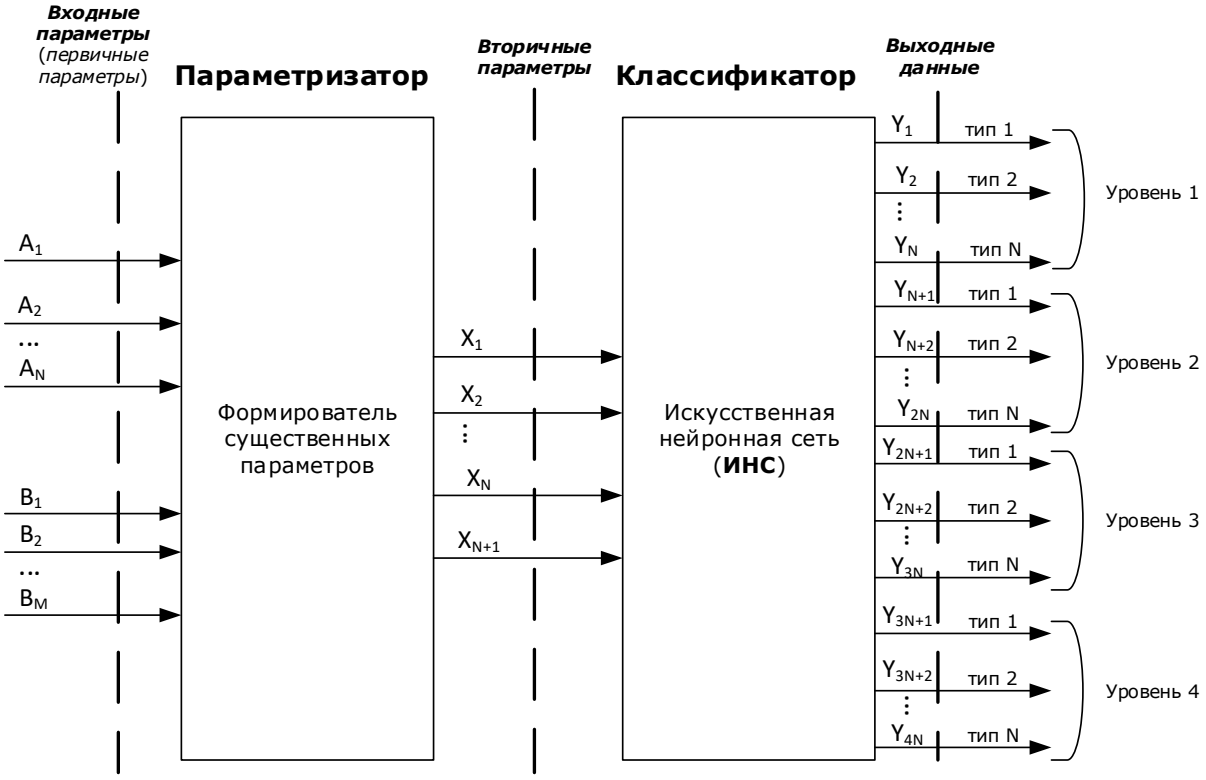


Рис. 1. Схема обработки данных для интеллектуальной системы классификации уровня формирования.

На приведенной схеме параметризатор используется для выделения из набора входных данных совокупности вторичных (существенных) параметров, которые являются определяющими для решаемой задачи. Классификатор, реализованный с помощью математического аппарата искусственной нейронной сети (сеть прямого распространения – многослойный персептрон), используя вторичные (существенные) параметры, классифицирует обстановку по соответствующим категориям (классам).

В качестве входных данных (первичных параметров) использовались:

A_i – количество объектов i-го типа (тип 1, тип 2, тип 3 и др.) анализируемой обстановки ($i \in \overline{1,N}$, где N – количество типов объектов);

B_j – расстояния между объектами на рассматриваемой обстановке ($j \in \overline{1,M}$, где M – количество комбинаций расстояний между объектами).

Параметризатор, приведенный на рис. 1, предназначен для обобщения (компактного структурирования) входных (первичных) параметров в виде совокупности вторичных параметров. Выработка адекватной системы вторичных параметров позволяет успешно классифицировать ситуацию или объект.

Для математической формализации задачи предлагается использовать следующую совокупность вторичных параметров, подаваемых на вход искусственной нейронной сети:

- X_i – параметр, характеризующий относительное количество тактических элементов (обнаруженных объектов);

- X_{N+1} – параметр, характеризующий отношение площади, занимаемой группой элементов ($S_{гр}$), к нормативной площади подразделения самого высокого уровня из рассматриваемых (подразделение 4 уровня) ($S_{норм\ max}$).

Выходными параметрами классификатора (бинарные выходы: 0 либо 1) являются:

- Y_1, …, Y_N – параметры, определяющие решение по классификации подразделения 1 уровня (тип 1, тип 2, тип 3 и др.);

- Y_{N+1}, …, Y_{2N} – параметры, определяющие решение по классификации подразделения 2 уровня (тип 1, тип 2, тип 3 и др.);

- Y_{2N+1}, …, Y_{3N} – параметры, определяющие решение по классификации подразделения 3 уровня (тип 1, тип 2, тип 3 и др.);

- Y_{3N+1}, …, Y_{4N} – параметры, определяющие решение по классификации подразделения 4 уровня (тип 1, тип 2, тип 3 и др.).

Заметим, что успешность классификации определяется полнотой входных данных, а также корректностью определения и оценки вторичных параметров в совокупности с адекватностью соответствующих решений на выходе (при обучении искусственной нейронной сети с учителем).

3. Решение задачи

Необходимость формирования вторичных параметров обусловлена особенностями функционирования ИНС (область изменения значений функции активации), а также снижением затрачиваемой вычислительной мощности.

В качестве оценок вторичных параметров (рис. 1) предлагается использовать:

- параметр, характеризующий относительное количество элементов (обнаруженных объектов):

$$X_i = A_i / \sum_{i=1}^{N} A_i , \qquad (1)$$

при этом сумма всех значений параметров X_i:

$$\sum_{i=1}^{N} X_i = 1; \qquad (2)$$

- параметр, характеризующий отношение площади, занимаемой группой элементов ($S_{гр}$), к нормативной площади подразделения самого высокого уровня из рассматриваемых (подразделение 4-го уровня) ($S_{норм\ max}$):

$$X_{N+1} = \frac{S_{гр}}{S_{норм\max}}. \qquad (3)$$

В качестве оценки площади, занимаемой группой элементов, можно воспользоваться аппроксимацией в виде эллипса (площадь рассеяния): $S_{гр} = \gamma \times \pi \times \sigma_a \times \sigma_b$, где σ_b, σ_a – соответствующие полуоси эллипса рассеяния; γ – параметр характеризующий вероятность попадания классифицируемого подразделения в площадь (эллипс) рассеяния (рис. 2), также на рис. 2 приведен угол поворота эллипса – α. В общем случае площадь $S_{гр}$ определяется через функциональную зависимость от среднеквадратических отклонений (СКО) по соответствующим координатам (σ_x, σ_y) и угла α: $\sigma_a \times \sigma_b = f(\sigma_x, \sigma_y, \alpha)$. В частном случае при α=0 соответствующие СКО имеют значения $\sigma_a=\sigma_x$; $\sigma_b=\sigma_y$, следовательно, $S_{гр} = \gamma \times \pi \times \sigma_x \times \sigma_y$.

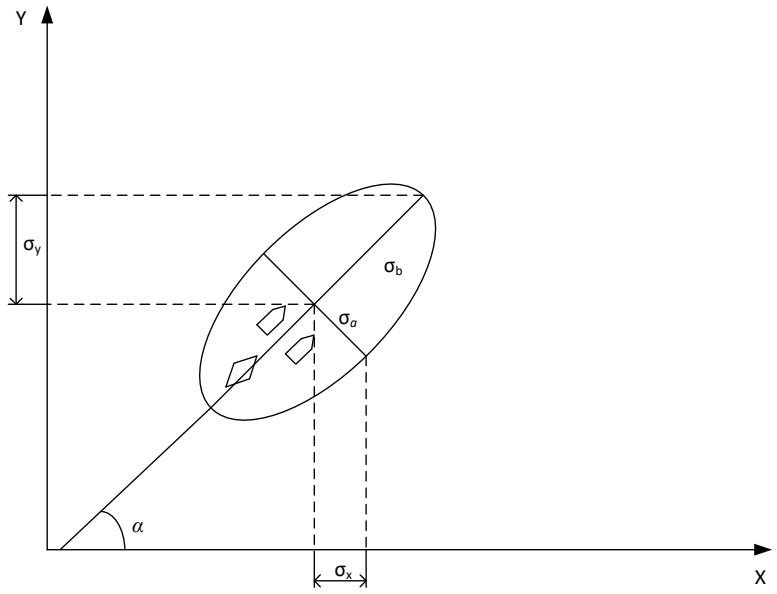


Рис. 2. Геометрическая интерпретация определения площади, занимаемой подразделением.

Применительно к задаче расчета площади эллипса условие для его задания формулируется следующим образом: определение значений радиусов эллипса, обеспечивающих его минимальную площадь, при условии включения в него всех обнаруженных объектов (на основе информации о координатах этих объектов).

При обучении ИНС, используемой для задачи классификации подразделений, применялись обучающие последовательности (192 вектора), сформированные в виде модельного примера. Фрагмент сформированных обучающих последовательностей приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Фрагмент обучающих последовательностей

№	Входные данные				Выходные данные											
					1 уровень			2 уровень			3 уровень			4 уровень		
	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	Y_{11}	Y_{12}
1	0.5	0.5	0	0.005	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0.5	0.5	0	0.0075	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0.5	0.5	0	0.01	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0.5	0	0.5	0.005	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0.5	0	0.5	0.0075	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
…																
21	0.3	0.7	0	0.075	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
…																
40	0.1875	0	0.8125	0.75	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Значения обучающих векторов, приведенные в таблице 1, получены исходя из типовых значений нормативов размещения подразделения на местности, а также общего количества объектов в них. Отношение нормативных площадей, занимаемых подразделениями 1 – 3 уровня к нормативной площади подразделения уровня 4, составляет: 0,001; 0,01; 0,1, соответственно. Стоит отметить, что в реальных условиях решение задачи классификации уровня воинского формирования зачастую осложняется неполнотой (частичным отсутствием) входных данных, поэтому примем, что разброс значений параметра, характеризующего отношение площадей, составляет 25% для каждого из рассматриваемых формирований. Обучение ИНС проводилось для 3-х типов обнаруженных объектов: типов 1, 2, 3. При этом полагалось, что одновременно в оцениваемом подразделении не может быть объектов 2-го и 3-го типа.

В таблице 1 значение параметров обучающего вектора соответствует, например:

- для входных параметров обучающего вектора №21 X_1=0,3, X_2=0,7, X_3=0, X_4=0,075 – наличию 3-х объектов 1-го типа, 7-ми объектов 2-го типа и отсутствию объектов 3-го типа из 10-ти обнаруженных объектов; площадь, занимаемая объектами, составляет 0,075 от нормативной площади подразделения 4-го уровня (или 75% от нормативной площади подразделения 3-го уровня, которое, в свою очередь, составляет 0,1 площади подразделения 4-го уровня); желаемые (истинные) выходные параметры Y_4=1, Y_8=1, остальные значения Y равны нулю, то есть рассмотренный входной вектор соответствует подразделению 2-го уровня с объектами 1-го типа и подразделению 3-го уровня с объектами 2-го типа;

- для входных параметров обучающего вектора №40 X_1=0,1875, X_2=0, X_3=0,8125, X_4=0,75 – наличию 3-х объектов 1-го типа, 13-ти объектов 3-его типа и отсутствию объектов 2-го типа из 16 обнаруженных объектов; площадь, занимаемая объектами, составляет 0,75 от нормативной площади подразделения 4-го уровня; желаемые (истинные) выходные параметры Y_4=1, Y_{12}=1, остальные значения Y равны нулю, то есть рассмотренный входной вектор соответствует подразделению 2-го уровня с объектами 1-го типа и подразделению 4-го уровня с объектами 3-его типа.

Для решения задачи использовалась трехслойная полносвязная ИНС (два скрытых и выходной слой), типовая структура которой приведена на рис. 3 [3].

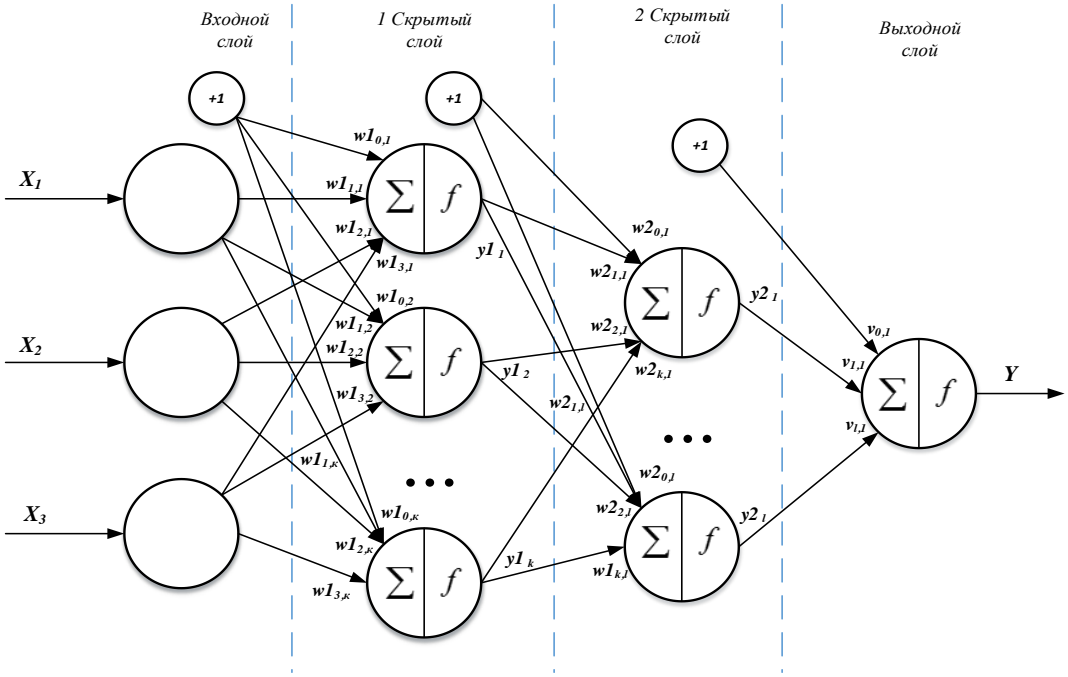


Рис. 3. Общая архитектура трехслойной ИНС.

В результате компьютерного моделирования исследован ряд архитектур ИНС, графики зависимостей относительных значений ошибки для исследуемых архитектур приведены на рис. 4, 5. Следует отметить, что обучение ИНС проводилось с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта (рис. 4) и метода сопряженных градиентов (рис. 5).

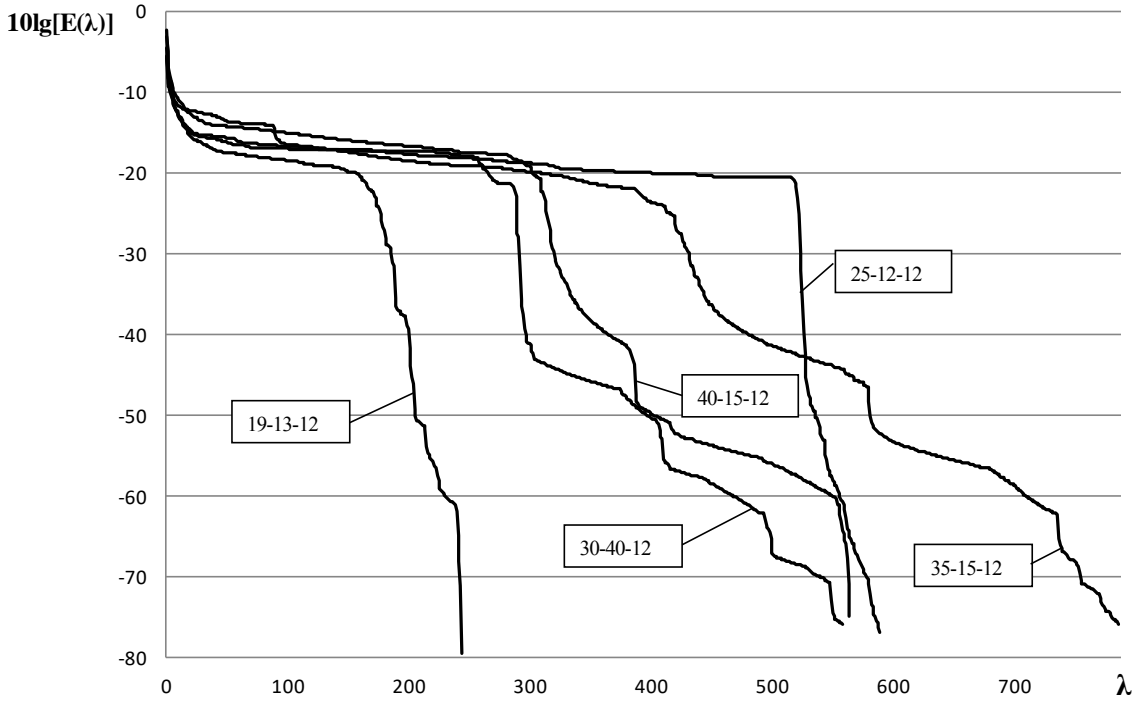


Рис. 4. Зависимости значения ошибки сети от эпохи обучения при различных архитектурах ИНС для алгоритма Левенберга-Марквардта.

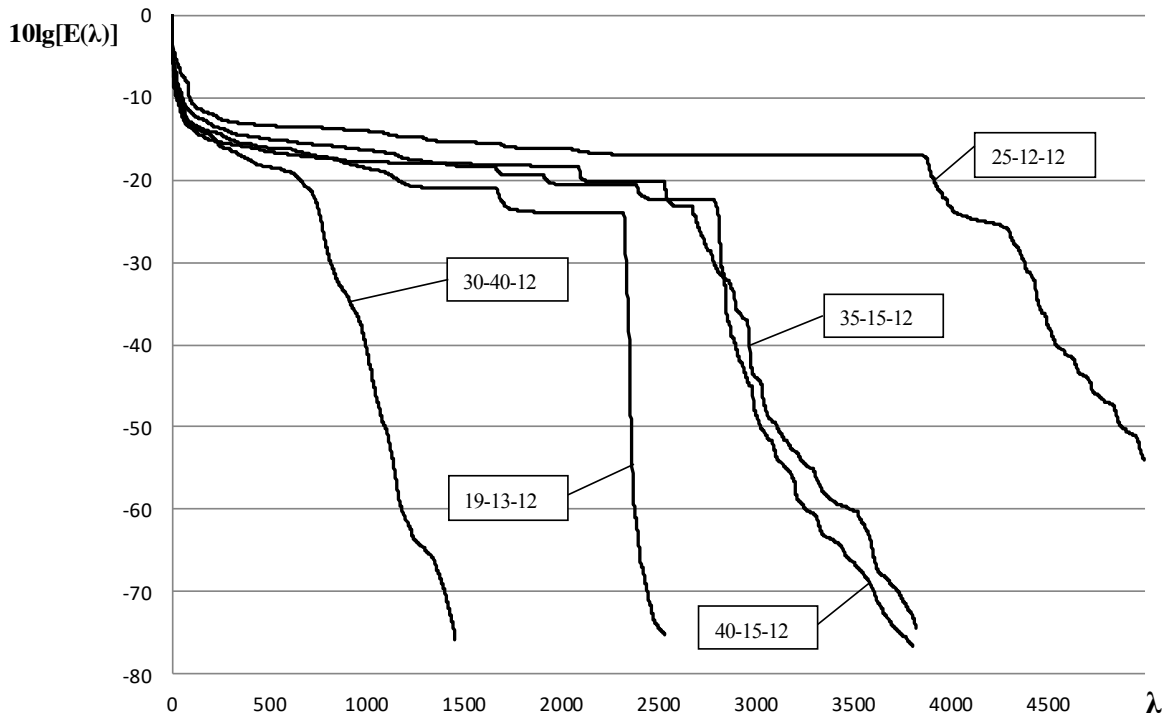


Рис. 5. Зависимости значения ошибки сети от эпохи обучения при различных архитектурах ИНС для алгоритма сопряженных градиентов.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4, позволил определить, что наиболее эффективно решить задачу классификации формирования при обучении с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта позволяет ИНС с архитектурой (4)-19-13-12 – 4 входа, 19 нейронов в первом скрытом слое, 13 нейронов во втором скрытом слое, 12 нейронов в выходном слое. Обучение проводилось до значения ошибки $E=6\times10^{-9}$, которое было достигнуто на 241-й эпохе, что обеспечило разницу более 70 дБ между начальным (до обучения) и конечным значением ошибки (после обучения). В результате установлено, что для достижения ошибки $E=6\times10^{-9}$ требуется от 241 до 1529 эпох обучения в зависимости от начальной инициализации весовых коэффициентов ИНС.

Зависимости, приведенные на рисунке 5, показывают, что наиболее эффективно решить задачу классификации подразделений при обучении с использованием алгоритма сопряженных градиентов позволяет ИНС архитектуры (4)-30-40-12 – 4 входа, 30 нейронов в первом скрытом слое, 40 нейронов во втором скрытом слое, 12 нейронов в выходном слое. Обучение указанной ИНС было остановлено на эпохе $\lambda=1458$ при достижении итогового значения ошибки $E=6\times10^{-9}$, что обеспечило разницу более 70 дБ между начальным (до обучения) и конечным значением ошибки (после обучения). В результате установлено, что для достижения ошибки $E=6\times10^{-9}$ требуется от 1458 до 3309 эпох обучения в зависимости от начальной инициализации весовых коэффициентов ИНС.

Отметим, что работоспособность рассмотренных выше архитектур подтверждена статистически, путем 30-ти успешно выполненных процедур обучения.

4. Заключение

Приведенные на рисунках 4, 5 зависимости показывают, что выигрыш в скорости обучения методом второго порядка (алгоритм Левенберга–Марквардта) относительно метода первого порядка (алгоритм сопряженных градиентов) для рассмотренного примера составил около одно одного порядка. Кроме того, применение алгоритма Левенберга-Марквардта позволяет обучить ИНС с архитектурой, обладающей лучшими обобщающими способностями по сравнению с архитектурами ИНС, способных обучиться методом сопряженных градиентов.

По результатам работы на тестовой выборке ИНС, обученная с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта, показала 100% правильных решений по классификации уровня подразделений, что подтверждает возможность решения задач классификации с использованием математического аппарата искусственных нейронных сетей. Полученные в результате решения задачи архитектуры ИНС могут быть использованы в качестве основы при разработке интеллектуального компонента в составе автоматизированной системы специального назначения.

Литература

1. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта/ Пер. с польск. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с.
2. Рутковская Д., Пильминьский М., Рутковский А. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
3. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 94 с.
4. Данильченко М.Н., Пядухова К.В., Голубинский А.Н. Нейросетевая модель управления связью и радиоэлектронным подавлением в интегрированной системе // XXIV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». – Т. 5. – Воронеж: ООО «Вэлборн». 2018. – С. 361– 368.
5. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
6. Голубинский А.Н., Толстых А.А. Распознавание объектов на телевизионных изображениях с использованием аппарата свёрточных нейронных сетей // Вестник Воронежского института МВД России. 2017. № 1. – С. 71–81.

References

1. Rutcovsky A. Metodi i technologii iscusstwennogo intellekta. M.: Goryachaya linia – Telekom, 2010. – 520 p
2. Rutkovskaya, D., Pelmensky, M., Rutcovsky. A. Neyronnie seti, geneticheskie algoritme i nechetkie sesteme. M.: Goryachaya linia – Telekom, 2006. – 452 p.
3. Komashinsky, V. E., Smirnov, D. A. Neyronnie seti i ih primenenie v sistemah upravleniya i sviyazi. M.: Goryachaya linia – Telecom, 2003. – 94 p.
4. Danilchenko, M. N., Pyaduhova, K. V., Golubinsky, A. N. Neyrosetevaya model upravleniya sviazyu i radioelektronnim podavleniem v integrirovannoy sisteme // XXIV Mezhdunarodnaya nauchno-technichescaya conferenciya “Radiolocaciya, navigaciya, svyaz”. – T. 5. – Voronezh: LLC “Velborn”. 2018. P. 361–368.
5. Haykin, S Neural networks. A comprehensive foundation. M.: Izdatelsky dom “Viliams”, 2006. – 1104 p.
6. Golubinsky, A. N., Tolstih, A. A. Raspoznavanie obyektov na televizionnih izobrazheniyah s ispolzovaniem apparata sviortochnih neyronnih setey // Vestnik Voronezhscogo instituta MVD Rossii. 2017. №1. P. 71–81.

КОМПОЗИЦИОННАЯ ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д. В. Котов, А. А. Молявко

Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации
имени Маршала Советского Союза А. М. Василевского
(ВА ВПВО ВС РФ), г. Смоленск, Российская Федерация

Аннотация. Представлены результаты информационного анализа процесса принятия решений должностными лицами органов управления систем военного назначения. На основании представленного анализа, в интересах реализации информационного поиска в Едином информационном пространстве Вооруженных Сил Российской Федерации, предлагается подход по формализованному представлению процесса принятия решений в виде композиционной онтологической модели.

Ключевые слова: онтология; композиционная онтологическая модель; принятие решения; система военного назначения.

COMPOSITE ONTOLOGICAL MODEL DECISION MAKING IN MILITARY SYSTEMS

D. V. Kotov, A. A. Molyavko

The Russian Federation Armed Forces Army Air Defense Military Academy
Named after the Marshal of the Soviet Union A. M. Vasilevsky
(The RF Armed Forces Army Air Defense Military Academy), Smolensk, Russian Federation

Abstract. The results of the information analysis of the decision-making process by officials of the management of military systems are presented. On the basis of the presented analysis, in the interests of information retrieval in the single information space of the Armed Forces of the Russian Federation, an approach to formalized representation of the decision-making process in the form of a composite ontological model is proposed.

Keywords: ontology; compositional ontological model; decision - making; military system.

1. Введение

В настоящее время современные вооруженные конфликты приобретают характер информационных войн, что оказывает влияние на работу должностных лиц органов управления (ДЛОУ) всех уровней иерархии в процессе выполнения ими своих функциональных обязанностей. В целях наиболее полного удовлетворения информационных потребностей ДЛОУ создается единое информационное пространство Вооруженных Сил Российской Федерации (ЕИП ВС РФ), которое позволит повысить обоснованность принимаемых решений и обеспечит наиболее полную реализацию боевых возможностей подчиненных сил и средств. Однако, при принятии решений в ЕИП ВС РФ ДЛОУ необходимо осуществлять обработку больших объемов разнородной и разноформатной информации в процессе решения задач планирования за ограниченный промежуток время [1].

2. Композиционная онтологическая модель процесса принятия решения в системах военного назначения

Процесс принятия решения ДЛОУ в системах военного назначения состоит из следующих этапов: уяснение задачи, сбор и обработка данных, оценка обстановки, принятие решения и его реализация. Данный процесс в ЕИП ВС РФ определяет потребность в повышении актуальности, точности и полноты информации, характеризующей сложившуюся обстановку. В этих условиях ДЛОУ должно формализовать свою информационную потребность в виде запроса к ЕИП ВС РФ, после чего провести интеллектуальный анализ и обработку полученной информации, что в свою очередь увеличивает время ее сбора и обработки. Для автоматизации этапа сбора и обработки данных предлагается разработать информационно-поисковую систему (ИПС) военного назначения.

Анализ существующих методов информационного поиска [2], показал, что наиболее перспективным направлением в развитии ИПС является применение семантического поиска. Особенностью семантического поиска явное использование знаний о ДЛОУ и предметной области поиска, а также возможность обнаружения знаний. При этом персонификация поиска в сочетании с семантическим поиском позволяет повысить релевантность результатов информационного поиска для каждого ДЛОУ, а в сочетании с коллаборативным поиском – для органа военного управления.

Для реализации информационного поиска в интересах удовлетворения информационных потребностей ДЛОУ требуется разработать онтологическую модель, обеспечивающую интероперабельное представление знаний: о ДЛОУ, о выполняемых ими задачах и специфике предметной области (процесса), которая обеспечит эффективный доступ ДЛОУ к информационным ресурсам ЕИП ВС РФ [3].

Онтологические модели обеспечивают формализованное представление семантики информации с возможностью вывода. Кроме того, ряд языков описания онтологий (например, OWL DL) базируется на дескриптивных логиках, что обеспечивает достаточно точное прогнозирование сходимости и времени работы различных методов обработки знаний, представленных в виде онтологических моделей. [2].

Предлагается подход к подробной формализации с помощью концептуальной схемы [4]. Онтология описывает классы, подклассы, их атрибуты и отношения предметной области, необходимые для определения семантики языка представления информации (рисунок 1), в соответствии с которой формируется представление о предметной области поиска.

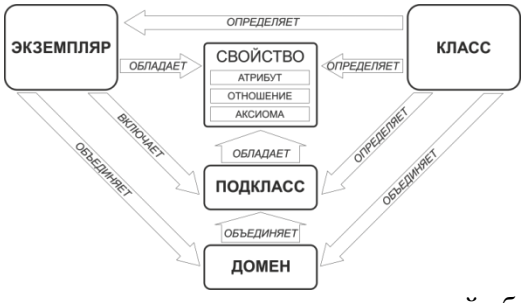


Рис. 1. Онтологическое представление предметной области

Для создания онтологической модели предметной области информационного поиска проведен информационный анализ процесса принятия решения ДЛОУ в ЕИП ВС РФ [5]. Результаты анализа показали, что для реализации персонифицированного, коллаборативного семантического поиска в системах управления военного назначения необходимо процесс принятия решения декомпозировать на две составляющие: функциональную (задачи, выполняемые ДЛОУ) и информационную (информационные ресурсы, необходимые для ее выполнения). Необходимость данной декомпозиции обусловлена тем, что в этих системах ДЛОУ несут высокую степень ответственности за результаты принятых и реализованных ими решений. Поэтому функциональная составляющая характеризуется относительным постоянством и не подвержена частым изменениям. Кроме того, на каждом этапе принятия решения Z_n ДЛОУ решаются задачи $Z^n{}_{tn}$, которые разбиваются на подзадачи $Z^{n.tn}{}_{nr}$, при этом конечными элементами проводимой декомпозиции являются подзадачи по разработке документов D, характеризующие завершение этапа принятия решения. Каждый из документов наполняется исходными данными, представленными в виде информации *Inf*, в том числе, в виде результатов решения информационно-расчетных задач *RZ*. Особенностью процесса принятия решения в системах военного назначения является то, что информация, содержащаяся в разработанных документах может послужить в качестве исходной для документов, разрабатываемых на следующих этапах (задачах, подзадачах) принятия решения (рисунок 2).

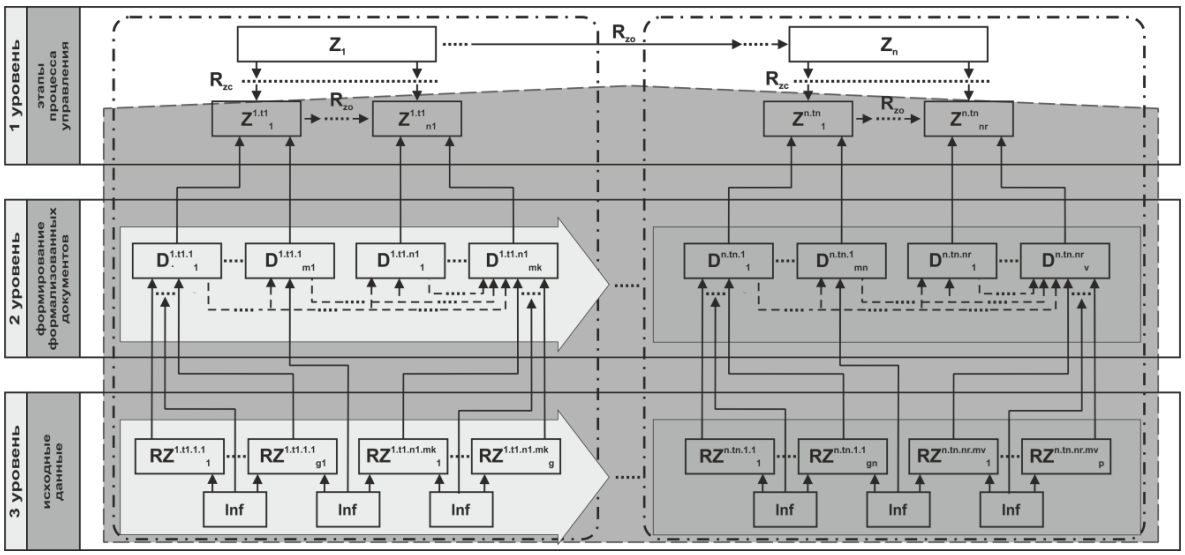


Рис. 2. Информационная модель процесса принятия решения

В отличие от функциональной, информационная составляющая подвержена частым изменениям, что связано с быстроизменяющейся обстановкой и поступлением большого объема разнородной и разноформатной информации. В тоже время, информационная потребность ДЛОУ строго определена руководящими документами и их функциональными обязанностями, что предопределяет поиск, сбор и обработку необходимой информации. Анализ информационных ресурсов, используемых ДЛОУ при принятии решения показал, что их семантическое содержание можно представить в виде

классов и подклассов С (объектов управления и внешних факторов окружающей среды), которые имеют соответствующие им признаки (атрибуты) *A*.

Таким образом, на основе результатов проведенного анализа предлагается представить процесс принятия решения ДЛОУ с помощью двух согласованных взаимозависимых онтологических моделей: задач и информационных ресурсов.

Онтологическая модель задач *Oz*, описывающая совокупность этапов принятия решения, задач и подзадач, выполняемых на каждом из этапов, представляется в следующем виде:

$$Oz=<Z, Rz, A, F(A)>,$$

где $Z= \{Z_n,\ldots,Z^{n.tn}_{rn}\}$ – множество задач и подзадач решаемых ДЛОУ при принятии решения; $Rz =\{Rzc_1,\ldots,Rzc_i; Rzo_1,\ldots,Rzo_v\}$ – множество иерархических отношений между задачей и подзадачей (отношение часть-целое) *Rzc* и отношений обусловленности последовательности выполнения задач (подзадач) этапов *Rzo*; $A=\{A_1,\ldots,A_j\}$– множество атрибутов задач и подзадач, представленных в виде информации (атомарных информационных единиц данных), необходимой для решения данных задач и подзадач; $F(A)=\{F_1(A_1),\ldots,F_k(A_j)\}$ – множество ограничений значений атрибутов.

Онтологическая модель информационных ресурсов *Or*, в которой описана необходимая информация и знания (рисунок 3), представляется в следующем виде:

$$Or=<C, Rr, D, A, F(A), Ax>,$$

где $C=\{C_1,\ldots,C_s\}$ – множество классов и подклассов, представленных в виде объектов, характеризующих информационные ресурсы, необходимые для принятия решений; $Rr=\{Rr_1,\ldots,Rr_u\}$ – множество иерархических отношений между классами и подклассами (отношение часть-целое) и отношений типа «влияет» между атрибутами; $D=\{C_1\{A_1,\ldots,A_p\},\ldots,C_w\{A_1,\ldots,A_p\}\}$ – множество доменов, которые позволяют объединять классы (подклассы) и их экземпляры по совокупности характеризующих их атрибутов; $A=\{A_1,\ldots,A_j\}$ – множество атрибутов классов (подклассов), представленных в виде информации, характеризующей объекты и внешние факторы окружающей среды; $F(A)=\{F_1(A_1),\ldots,F_k(A_j)\}$ – множество ограничений значений атрибутов; $Ax=\{Ax_1,\ldots,Ax_q\}$ – множество аксиом, позволяющих делать обобщенные выводы из совокупности атрибутов и отношений, как между классами (подклассами), так и атрибутами.

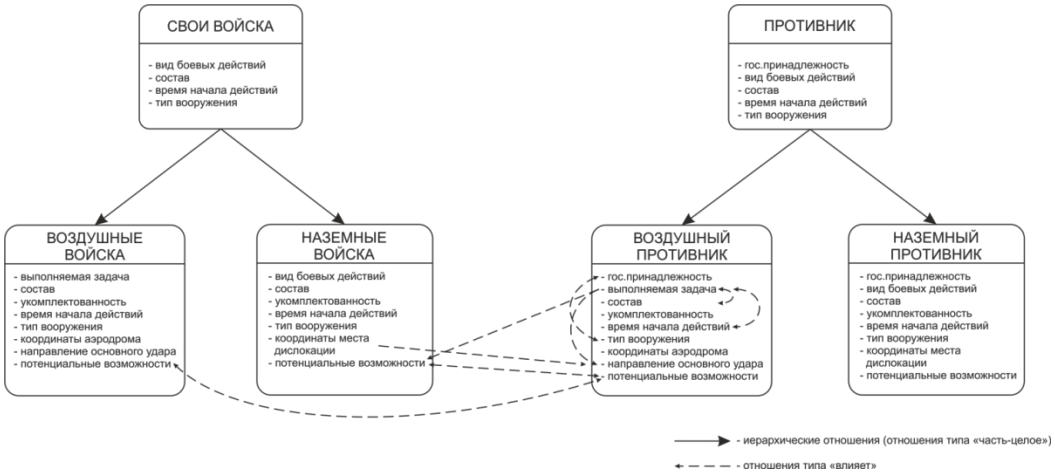


Рис. 3. Онтологическая модель информационных ресурсов

Вышеуказанные онтологические модели имеют одинаковое множество атрибутов классов (подклассов) и множество ограничений, накладываемых на данные атрибуты, что позволяет утверждать о появлении нового множества отношений, возникающих между моделями – отношения соответствия *Rs* (рисунок 4). Таким образом, совокупность описанных онтологических моделей можно представить в виде композиционной онтологической модели процесса принятия решения *KOM* (композиция – составление целого из частей):

$$KOM=<Oz;\ Or;\ Rs>.$$



Рис. 4. Композиционная онтологическая модель процесса принятия решения

Объединение онтологических моделей задач и информационных ресурсов в композиционную онтологическую модель процесса принятия решения на основе отношений соответствия *Rs* предопределяет необходимость создания механизма внесения изменения – адаптации. Этот механизм должен предусматривать гибкое изменение онтологических моделей при внесении изменений в функциональную или информационную составляющую процесса принятия решения. Данный механизм предлагается реализовать на основе мультиагентного подхода [6], в котором агенты представляются в виде профилей ДЛОУ и реализуют функцию автоматического формирования поискового запроса к ЕИП ВС РФ анализ и обобщение результатов информационного поиска.

3. Заключение

Таким образом, предлагаемая композиционная онтологическая модель принятия решения позволяет наиболее полно, с учетом специфики функциональной и информационной составляющей систем военного назначения, описать предметную область поиска. На основе данной модели предлагается разработать информационно-

поисковую систему военного назначения, обеспечивающую персонифицированный, коллаборативный семантический поиск, что в свою очередь обеспечит наиболее полное удовлетворение информационных потребностей ДЛОУ в ЕИП ВС РФ.

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-29-03088_м.

Литература

1. Котов Д.В., Молявко А.А. Особенности функционирования АСУ ВПВО в ЕИП ВС РФ. Сборник докладов девятнадцатой всероссийской научно-практической конференции ВКА ВС РФ, Санкт-Петербург, 2018.
2. Рогушина Ю.В. Разработка онтологической модели информационной потребности пользователя при семантическом поиске. // Онтология проектирования, 2014, № 2.
3. Котов Д.В., Злобинова М.В., Сивакова Л.Н. Интероперабельность как свойство перспективных образцов АСУ ВПВО в ЕИП ВС РФ. Вестник ВА ВПВО, Смоленск, 2018, №20.
4. Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И. Инженерия знаний. Модели и методы. СПб.: Лань, 2016. – 324 с.
5. Борисов В.В., Котов Д.В., Молявко А.А. Результаты информационного анализа процесса организации боевых действий сил и средств ПВО в ЕИП ВС РФ. Вестник ВА ВПВО, Смоленск, 2018, №20.
6. Котов Д.В., Злобинова М.В., Сивакова Л.Н. Применение мультиагентных информационно-поисковых систем в АСУ ВПВО. Вестник ВА ВПВО, Смоленск, 2018, №20.

References

1. Kotov D. V., Molyavko A. A. Peculiarities of functioning of ACS of Army Air Defense in the single information space of the RF armed forces. A collection of papers nineteenth all-Russian scientific-practical conference of the Military space Academy of the Russian armed forces, Saint Petersburg, 2018.
2. Rogushina Yu. V. Development of ontological model of information needs of the user in semantic search. // Ontology of design, 2014, № 2.
3. Kotov D. V., Zlobinova M. V., Sivakov, L. N. Interoperability as a property of advanced models of ACS of Army Air Defense in the single information space of the RF armed forces. Bulletin of the Army Air Defense Military Academy, Smolensk, 2018, No. 20.
4. Gavrilova T. A., Kudryavtsev D. V., Muromtsev D. I. Knowledge Engineering. Models and methods. SPb.: DOE, 2016. - 324 p.
5. Borisov V. V., Kotov D. V., Molyavko A. A. Results of the information analysis of the process of organization of military operations of air defense forces and means in the single information space of the RF armed forces. Bulletin of the Army Air Defense Military Academy, Smolensk, 2018, No.20.
6. Kotov D. V., Zlobinova M. V., Sivakov, L. N. The application of multi-agent information retrieval system in ACS of Army Air Defense. Bulletin of the Army Air Defense Military Academy, Smolensk, 2018, No. 20.

КОНТРОЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГРАДИЕНТА ИЗМЕНЕНИЯ ИХ СОСТОЯНИЙ.

И.А. Елфимов, А.А. Чурсина, М.П. Ляхненко, К. В. Цыганков

Акционерное общество «Концерн «Созвездие» (АО «Концерн «Созвездие»), Воронеж, Россия

Аннотация. Рассматривается возможность анализа состояния инфокоммуникационных систем на основе критерия неразрывности градиента их дискриминационных поверхностей. Определяется критерий корректного функционирования систем с точки зрения градиента динамики их состояний.

Ключевые слова: инфокоммуникационная система, критерий корректности функционирования, мероморфность, градиент.

CONTROL OF OPERATION OF INFORMATION COMMUNICATION SYSTEMS BASED ON THE ANALYSIS OF GRADIENT CHANGE OF THEIR STATES.

I.A. Elfimov, A.A. Chursina, M.P. Lyahnenko, K.V. Tsygankov

Joint Stock Company "Concern "Sozvezdie"(JSC "Concern "Sozvezdie"), Voronezh, Russia

Abstract. The possibility of analyzing the state of infocommunication systems on the basis of the criterion of continuity of the gradient of their discriminatory surfaces is considered. The criterion of correct functioning of systems from the point of view of gradient of dynamics of their states is defined.

Keywords: infocommunication system, criterion of correctness of functioning, meromorphy, gradient.

1. Введение

По статистике количество атак на системы связи и обработки информации ежегодно увеличивается. Это закономерный процесс, связанный со всё большим внедрением цифровых технологий во многие сферы жизни общества. При этом растёт осведомлённость злоумышленников о методах и средствах защиты объекта воздействия, то есть во время подготовки атаки нападающий достаточно хорошо осведомлён как система защиты будет ему противостоять.

Это также объяснимо: инициатором воздействия является атакующий, соответственно, знает какой следующий шаг он сделает, система защиты же этой информации лишена и вынуждена действовать постфактум. На сегодняшний день профессиональные злоумышленники отошли от тактики использования какого-либо одного средства для преодоления ограничений системы защиты и создают полиморфные смешанные угрозы, которые на практике являются труднодетектируемыми. Таким образом в реальности система защиты функционирует в условиях априорной неопределённости исходных данных.

Одновременно с этим повышается необходимость в оперативном обнаружении информационных воздействий на инфокоммуникационные системы. Ввиду того, что

такие системы работают в реальном масштабе времени, то и их контроль должен также проводиться синхронно с их функционированием.

Также необходимо учитывать, что процесс контроля не должен накладывать какие-либо ограничения на функционирование системы, поэтому необходим подход, который позволил бы минимизировать вычислительные ресурсы, требуемые для выполнения этой задачи.

Вышеназванные факторы и определяют актуальность данного исследования.

2. Методы и алгоритмы обнаружения информационных воздействий, применяемые в настоящее время

- Сигнатурный анализ;
- Контроль графа состояний. В этой методике существует описание разрешённых переходов для каждого состояния системы и проводится анализ значимых событий. Нештатной ситуацией считается случай отклонения поведения системы от разрешённого;
- Контроль целостности файлов или областей памяти;
- Эвристический анализ, эмуляция исполнения, приемы виртуализации;
- Пороговые методы. Фиксируют факт превышения каким-либо параметром граничной величины;
- Нечёткие алгоритмы контроля поведения. В ходе анализа последовательности событий выделяется вектор вероятностных характеристик. Некорректное состояние фиксируется только по превышению ими некоторых пороговых значений;
- Поведенческие методы. Ориентированы на построение модели штатного функционирования;
- Кластерный анализ предполагает выделение таких характеристик, которые помогут разделить классифицируемые объекты на группы, которые соответствуют нормальному функционированию системы. Все остальные объекты классифицируются как аномальные;
- Экспертные системы. Основаны на применении правил вывода к данным о входных объектах.

3. Недостатки существующих в настоящее время подходов.

В силу некоторых причин применение всех актуальных методов на практике может быть невозможным, либо неэффективным. Это связано с несовершенством этих технологий.

Сигнатурный и другие структурные методы, которые оперируют строго формализованной моделью угроз (либо, наоборот, разрешённых эталонов в случае контроля штатных воздействий) имеют главный недостаток в виде принципиальной невозможности распознавания новых, неизвестных ранее угроз.

Контроль целостности в может совершать ошибки первого рода (ложные срабатывания), так как объекты могут изменяться и без участия вредоносного кода, также такой метод подходит только для ограниченного количества статичных объектов.

К недостаткам эвристического анализа относится неприемлемое время работы, а также вытекающая из этого неспособность работать в режиме реального времени.

Пороговые методы имеют такие недостатки в своей работе как необходимость точной настройки числового порога, требующая знаний эксперта, отсутствие адаптивных механизмов для автоматического выбора порога, а также необходимость анализа результатов на предмет пропущенных атак и ошибок первого рода.

Для кластерных методов характерны недостатки, основанные на том, что нет жёстко заданных критериев, позволяющих однозначно определить принадлежность ситуации к корректной, либо некорректной. Такие методы полезны при совместном использовании с, например, нейронными сетями, в которые результаты кластерного анализа передаются в качестве исходных данных.

К недостаткам кластерных и других поведенческих методов в первую очередь стоит отнести наличие ошибок первого рода, которые объясняются в основном сложностью полного и точного описания множества корректных объектов. Кроме того, для реализаций поведенческого метода также характерно наличие этапа предварительной настройки для набора системой массива данных для дальнейшей работы. Его длительность может составлять достаточно продолжительное время, что сказывается на возможности применения таких методов в системах реального времени.

Недостатками экспертных систем являются неспособность к обнаружения неизвестных типов воздействий, зависимость от полноты и актуальности правил, а также снижение эффективности работы с увеличением объема данных.

Угрозами нормальному функционированию инфокоммуникационных систем являются не только намеренные воздействия, но и ошибки. Под ошибкой в общем случае подразумевается неумышленное искажение объекта или процесса, выводящее этот объект или процесс за пределы нормального функционирования. При этом предполагается, что имеется эталонное значение контролируемых характеристик. Однако системы контроля зачастую функционируют в условиях априорной неопределённости исходных данных.

Для формализованного подхода к анализу подобных ситуаций и оценивания вероятностей отказа было введено понятие устойчивости систем. Устойчивость может рассматриваться с двух позиций:

1. Возврат элемента или системы в нормальное состояние после выхода из него в результате дестабилизирующих воздействий. Именно с этой точки зрения оценивается устойчивость программных средств по ГОСТ 28195-89[1]. В этом документе устойчивость определяется как способность обеспечивать продолжение работы программы после возникновения отклонений, вызванных сбоями технических средств, ошибками во входных данных и ошибками обслуживания. Таким образом, в данном стандарте, устойчивость предполагает

продолжение работы после возникновения ошибок первого рода (ошибки во входных данных).

2. Диапазон условий (например, воздействий или входных данных), при которых гарантируется безотказное функционирование, либо вероятность реализации целевой функции не ниже заданной.

Однако, анализ устойчивости проводится, как правило, либо экспериментальным путём, либо с помощью построения зависимостей параметра от его производной.

Эмпирический подход нельзя назвать подходящим по нескольким причинам. Основная проблема связана с невозможностью получить полный результат во всём множестве состояний системы ввиду их очень большого количества. Это требует проведения эксперимента на достаточном долгом отрезке времени, в пределе – бесконечно длинном. Также, невозможно констатировать ненулевую вероятность ошибки, пока ошибка не произошла. При этом до окончания эксперимента эксплуатировать такую систему нельзя из-за непредсказуемости последствий её отказа и характера ошибки.

При построении зависимостей параметра от производной процесс функционирования разделён на отрезки и каждый отрезок рассматривается в отдельности. Тогда в интеграле можно получить устойчивую фазовую картину, а в реальной ситуации на интервале сеанса будут наблюдаться срывы функционирования, которые вообще исключают возможность реализации целевой функции любой инфокоммуникационной системой [2].

Таким образом, при рассмотрении устойчивости в режиме взаимодействия систем необходимо использовать иерархический подход.

4. Альтернативный подход

В качестве параметра устойчивости функционирования инфокоммуникационной системы, все элементы которой являются фракталами, образованными триадой элементов: управления, реализации и мешающих воздействий, целесообразно использовать анализ движения рабочей точки по дискриминационной поверхности системы, образованной возможным набором вариантов программной реализации обработки параметров конкретного элемента [2].

Вообще, дискриминационная поверхность представляет собой гиперпространство (то есть пространство с размерностью более 3) в многомерном пространстве унитарных кодов [2]. Размерность конкретной дискриминационной поверхности зависит от количества её параметров. По сути она образована всеми возможными состояниями рабочей точки в процессе выполнения целевой функции. Применение преобразования к этому тензору относительно некоторого выбранного базиса и даёт в результате поверхность, развёрнутую в соответствующих координатных осях, определённых этим базисом.

Но каждая операция, каждая унитарная функция приводит к изменениям не только на связанной с ней оси, но и влияет на все остальные оси и параметры ввиду

взаимосвязанности всех элементов системы. Это приводит к появлению деформаций на какой-либо поверхности при отсутствии явных изменений, связанных с ней параметров.

Главная ось в пространстве координат, в котором существует дискриминационная поверхность является отражением вероятности реализации целевой функции. Её вершина является конечным состоянием системы, в которое она попадает при успешном выполнении задачи, более того, в первоначальном (неискажённом) виде такая вершина будет только одна. При возмущающих воздействиях поверхность деформируется, соответственно, рабочая точка уходит за пределы устойчивости.

Процесс рассмотрения функционирования всей системы целесообразно начинать с рассмотрения отдельных элементов её составляющих. Следует заметить, что на первом этапе предлагается построить дискриминационную поверхность каждого из элементов, функционирующих на одном уровне, но без учёта их взаимодействия друг с другом. В итоге будет получен набор поверхностей элементов этого уровня. На следующем этапе совокупность таких поверхностей образуют дискриминационную поверхность всего уровня. Таким образом, повышается уровень абстракции и при рассмотрении сложной системы в целом отпадает необходимость рассчитывать влияние отдельного элемента на состояние системы. Это не противоречит данному ранее определению состояния системы, так как состояния элемента учтены в дискриминационной поверхности уровня, в который он входит.

При нормальном функционировании система имеет определённое состояние при конкретных входных данных и моментах времени. Соответственно, дискриминационная поверхность такой системы не должна иметь разрывов, то есть должна быть определена в любой точке. Другими словами, целевая функция является мероморфной. Для дискриминационной поверхности, как и для любой другой, градиент своим направлением обозначает максимальное в данной точке возрастание некоторого параметра, а величиной – скорость изменения этого параметра. В общем случае при нормальной работе он направлен на точку, обозначающую конечное состояние системы, при этом, если не нарушено функционирование, градиент будет цельным.

При нормальном функционировании любой системы можно выделить устойчивые циклы, которые образуются замкнутыми линиями состояний соответствующих элементов[3]. Количество и вложенность таких циклов определяются количеством элементов и их иерархией. При нарушении функционирования, эти циклы обнуляются, соответственно, происходит разрыв в дискриминационной поверхности. Критерием такой ситуации как раз и является градиент, а именно – его величина. В случае наличия разрыва градиент по величине станет равен бесконечности, а по направлению – перпендикулярным к поверхности в данной точке.

5. Заключение

Основной идеей описанного подхода к анализу системы на корректность функционирования является её проверка на неразрывность градиента. Цельность градиента является критерием безошибочного функционирования. Такой способ, в

отличии от известных, позволит применять систему контроля при функционировании в условиях априорной неопределённости исходных данных.

Литература

1. ГОСТ 28195-89. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. - С. 2.
2. Н.Н. Толстых. Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности. Воронеж.: Воронежский государственный технический университет, 2013. - С. 3, 130
3. А.Г. Алферов, М.В. Артемов, Ю.Л. Козирацкий, С.А. Панов, В.Ф. Свердел, Ю.А. Степанец, Н.Н. Толстых. Удаленное управление динамикой целевого состояния процессорной системы // Теория и техника радиосвязи. 2017. №4. - С. 15.

References

1. GOST 28195-89. M.: IPK Publishing house of standards, 2001. - P. 2.
2. N.N. Tolstykh. Software and hardware for information security. Voronezh.: Voronezh State Technical University, 2013. - Pp 3, 130.
3. A.G.Alferov, M.V. Artemov. Y.L.Koziratsky, S.A. Panov, V.F. Sverdel, Y.A. Stepanets, N.N.Tolstykh. Remote control of the dynamics of the target state of the processor system / / Theory and technology of radio. 2017. No. 4. - P. 15

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

А.М. Межуев, Д.Л. Стуров
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия

Аннотация. Работа посвящена разработке метода, обеспечивающего получение структурно устойчивой цифровой системы передачи информации. При решении задачи предложен подход, основанный на использовании математического аппарата спектральной теории графов. Разработаны алгоритмы коррекции базовых топологий, позволяющие определять коспектральные топологии с требуемыми структурными характеристиками. Результаты моделирования для конкретных вариантов структурного построения систем подтвердили работоспособность и практическую реализуемость предложенного метода.

Ключевые слова: цифровая система; графовая модель; базовая топология; структурная устойчивость; спектральный анализ.

METHOD OF INCREASE OF STRUCTURAL STABILITY DIGITAL SYSTEMS OF INFORMATION TRANSFER WITH USE OF THEIR SPECTRAL CHARACTERISTICS

A.M. Meghuev, D.L. Sturov
MERC AF «AFA», Voronezh, Russia

Abstract. Work is devoted working out of the method ensuring deriving of structurally steady digital system of information transfer. At a problem solution the approach based on use of mathematical apparatus of the spectral graph theory is offered. Algorithms of correction of the base topology are developed, allowing to define kospectral topology with demanded structural performances. Outcomes of modelling for concrete variants of structural construction of systems have confirmed working capacity and a practical realizability of the offered method.

Keywords: digital system; graph model; base topology; structural stability; the spectral analysis.

1. Введение

Анализ общепринятых подходов к обеспечению структурной устойчивости ЦСПИ показал, что они сводятся к решению многокритериальной оптимизационной задачи и имеют ряд недостатков, в том числе: сложность математических выкладок, высокие вычислительные затраты, достаточно грубое упрощение моделей, приводящее к снижению точности решения [1].

В данной работе предлагается новый подход к решению задачи обеспечения структурной устойчивости ЦСПИ, основанный на использовании математического аппарата спектральной теории графов.

Цель работы – разработка метода, алгоритмов и моделей повышения структурной устойчивости ЦСПИ в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

2. Этапы метода

Предлагаемый метод включает следующие основные этапы:

1. Определение исходных данных с учетом требований к структурной устойчивости. В качестве исходных данных могут выступать: начальные значения и

интервал интенсивности входного трафика $\gamma_{вх}$ ЦСПИ, пропускные способности каналов связи (КС) $C_{кан}$, ограничение на временную задержку $T_{доп}$, количество узлов коммутации (УК) в сети $N_{УК}$, предельные и усредненные структурные характеристики: k-связность $a(G)$, средняя связность (ранг) УК r, число остовных деревьев $t(G)$, диаметр сети d, а также средняя длина маршрута в сети π или средний диаметр $\bar{d}$.

2. Формирование базовой топологии сети (с начальной структурной избыточностью, исходя из требований исходных данных):

- полносвязная структура (при высоком входном трафике);
- звездообразная структура (при слабом входном трафике);
- ячеистая (иерархическая) структура (при умеренном входном трафике);

Данный выбор связан с особенностями функционирования ЦСПИ представленных топологий при изменениях входного трафика, а структурная устойчивость обеспечивается алгоритмом последовательных итераций основных структурных характеристик ЦСПИ.

3. Математическое описание структурных свойств базовой модели ЦСПИ в терминах спектральной теории графов.

Топологическая модель ЦСПИ представляется графом $G(X,U)$, где X $(i=1...N)$ – множество вершин графа, U $(j=1...M)$ – множеством соединяющих их ребер. Для модели ЦСПИ используем неориентированные простые графы без кратных ребер и петель. Задание графа будем осуществлять с помощью матрицы смежности:

$$A=(a_{ij})=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & ... & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & ... & a_{2N} \\ ... & & & \\ a_{n1} & a_{n2} & ... & a_{NN} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где N – количество вершин (УК) сети, a_{ij} – элементы матрицы, которые отличны от нуля, если элемент, стоящий на пересечении i-й строки и j-го столбца, имеет ребро, соединяющее вершину i, с вершиной j.

Матрица определяемая выражением:

$$B=\lambda I-A, \quad (2)$$

называется характеристической матрицей графа G, где λ – произвольный коэффициент, I – единичная матрица. Определитель матрицы (2) называется характеристическим многочленом графа и обозначается $P_G(\lambda)$.

Корни характеристического уравнения $P_G(\lambda)=0$ называются собственными значениями матрицы A, а их совокупность образует «обыкновенный» спектр графа G [2]:

$$Sp(G)=[\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_N]. \quad (3)$$

Графы имеющие одинаковый спектр называются изоспектралъными или коспектральными.

Кроме того, для нахождения важнейших структурных характеристик необходимо использование C-спектра, получаемого из матрицы полных проводимостей [3]:

$$C=D-A, \quad (4)$$

где D – диагональная матрица степеней или валентностей (число дуг, выходящих из i-того УК или количество соседних УК) графа G.

Тогда характеристический многочлен матрицы *C* имеет вид:

$$C_G(\lambda)=|\lambda I-C|=|\lambda I-D+A|=\lambda^N+c_1\lambda^{N-1}+...+c_N, \quad (5)$$

а соответствующий ему спектр, (при $C_G(\lambda)=0$) обозначается в виде:

$$Sp_C(G)=[\lambda_1,...,\lambda_N]_C. \quad (6)$$

На основе представленных спектров могут быть найдены основные структурные характеристики базовых структур ЦСПИ, такие как:

I. Число внутренней устойчивости $\alpha(G)$ графа G, которое характеризуется максимальным числом не соединенных УК в графе, определяется с помощью обыкновенного спектра:

$$\alpha(G) \le p_0 + \min(p_-, p_+), \tag{7}$$

где p_0, p_-, p_+ – соответственно количества собственных значений графа G, равных нулю, меньших или больших нуля, соответственно.

II. Диаметр графа ЦСПИ:

$$d = \max_{i,j \in X} \{d_{ij}\}, \tag{8}$$

где d_{ij} – расстояние, состоящее из минимального числа ребер, образующих путь из вершины i в вершину j на всем множестве путей $i, j \in X$.

Для связной графовой модели диаметр удовлетворяет неравенству:

$$d \le m - 1, \tag{9}$$

а средний диаметр определяется средним значением из интервала:

$$\frac{d}{2} \le \bar{d} \le d, \tag{10}$$

тогда обобщенный структурный показатель равен:

$$\text{ОСП} = 0{,}75d / M, \tag{11}$$

где m – количество различных собственных значений обыкновенного спектра $\text{Sp}(G)$, M – число ребер (КС) в графовой модели ЦСПИ) [3, 4].

III. Число остовных деревьев графа G, определяющее число непересекающихся путей соединяющих два любых УК, находится с использованием С-спектра:

$$t(G) = \frac{1}{N} \prod_{i=1}^{N-1} \lambda_i . \tag{12}$$

IV. k-связность графовой модели ЦСПИ, характеризуемая наименьшим числом УК (КС), при удалении которых граф становится несвязным (в нем появляется изолированный УК), определяется вторым минимальным собственным значением С-спектра:

$$a(G) = \lambda_{N-1} . \tag{13}$$

V. С точки зрения обеспечения устойчивости особый интерес представляют регулярные структуры, их важной характеристикой является индекс графа r, определяемый через собственные значения обыкновенного спектра выражением:

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \lambda_i^2 . \tag{14}$$

Таким образом, на основе спектрального анализа графовых моделей могут быть определены все основные структурные характеристики базовой модели ЦСПИ.

4. Определение критериев оптимизации и алгоритмы коррекции базовой топологии графовой модели ЦСПИ.

В качестве критериев оптимизации выступают экстремальные значения определенных выше структурных характеристик ЦСПИ:

$$\alpha(G) \to \min \; ; \; d \to \min \; ; \; \text{ОСП} \to \min \; ;$$
$$t(G) \to \max \; ; \; a(G) \to \max \; ; \; r \to \max . \tag{15}$$

Моделирование структурных характеристик для получения графовых моделей ЦСПИ высокой устойчивости осуществляется по отдельным итерационным алгоритмам для различных вариантов базовых топологий.

Так в условиях высокого входного трафика (с учетом вероятного снижения загруженности сети) для полносвязной базовой структуры, обладающей максимальной структурной избыточностью (по наличию резервных УК и КС), алгоритм отыскания квазиоптимальной топологии будет направлен на допустимое снижение избыточности при сохранении (обеспечении) требуемых характеристик структурной устойчивости ЦСПИ (итеративное решение «сверху»). В то же время для базовой топологии типа «звезда» при слабом входном трафике (с учетом дальнейшего роста интенсивности информационной нагрузки) алгоритм структурной оптимизации, напротив, осуществляет итеративное увеличение избыточности до достижения требуемых параметров структурной устойчивости (итеративное решение «снизу»). Таким образом, в рассмотренных случаях поставленная задача получения графовых моделей ЦСПИ высокой устойчивости решается «встречно» до достижения определенной в исходных данных требуемой границы устойчивости (с необходимым запасом на возможные дестабилизирующие факторы). В случае умеренного входного трафика решается наиболее сложная компромиссная адаптивная задача (позволяющая учесть изменения входного трафика, как в сторону увеличения, так и уменьшения), когда исходя из текущего значения входного трафика определяются последовательные шаги по снижению или увеличению структурной избыточности графовой модели ЦСПИ с контролем результатов на каждой итерации для выбора «правильного» направления дальнейших преобразований.

При этом вне зависимости от используемого алгоритма осуществляется нахождение коспектральных графовых моделей ЦСПИ с целью получения нескольких альтернативных вариантов максимальной структурной устойчивости [2 – 4].

5. Определение коспектральных структур высокой устойчивости и моделирование функционирования ЦСПИ.

При нахождении коспектральных (изоспектральных) структур для топологий ЦСПИ, удовлетворяющих заданным требованиям устойчивости (на 4 этапе работы метода), могут применяться различные аналитические методы (например, метод Сунада, переключение Зайделя) [2]. Так для графовой модели из 6 УК определяются только две коспектральные структуры ЦСПИ (рисунок 1).

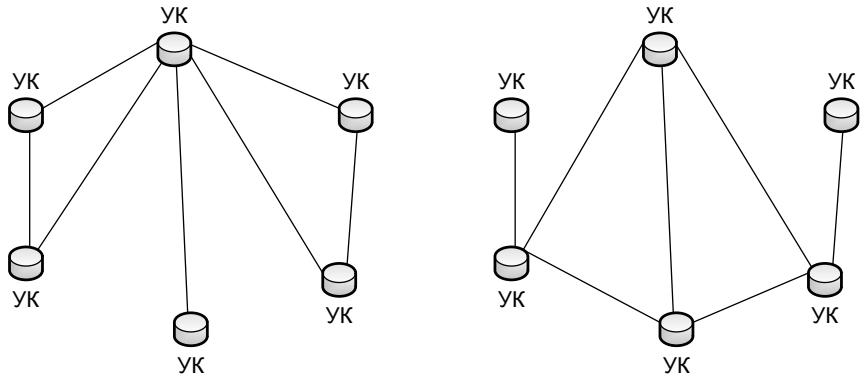


Рис. 1. Коспектральные топологии графовых моделей ЦСПИ, состоящие из 6 УК

Определение коспектральных структур необходимо для обеспечения альтернативного выбора топологии ЦСПИ при оценке ее информационной эффективности на основе системы обобщенных показателей [5, 6].

3. Заключение

Для ЦСПИ, состоящей из 6 УК, были разработаны аналитическая и имитационная модели информационного обмена в ЦСПИ с базовой полносвязной структурой (рисунок 1) и ее преобразованиями при реализации итеративного решения «сверху» в условиях высокого входного трафика и воздействия помех. Программы аналитических моделей выполнены в средах программирования Maple и Delphi 7, а программы имитационного моделирования в средах GPSS/PC и LiteIDE X. Результаты моделирования показали, что максимальной устойчивостью и наибольшей информационной эффективностью к изменениям входного трафика и помеховой обстановки обладают структуры с $\max[t(G)]$ и $\min[d]$. Это объясняется уменьшением числа конфликтов и потерь пакетов в виду распределенности потоков по различным независимым путям в первом случае, а также уменьшения вероятности их возникновения во втором.

Таким образом, реализация рассмотренных этапов предлагаемого метода повышения структурной устойчивости ЦСПИ позволяют получить несколько альтернативных вариантов построения графовых моделей (коспектральных структур), обеспечивающих выполнение заданных требований к системе. Результаты аналитического и имитационного моделирования подтверждают работоспособность предлагаемого способа, а также достоверность, получаемых на его основе параметров и характеристик. По итогам работы, основываясь на результатах проведенных исследований, могут быть сформулированы конкретные практические рекомендации по применению вариантов построения структурно устойчивых ЦСПИ. Разработанный метод также может быть практически реализован при организации комплексной многоконтурной адаптации ЦСПИ в реальном масштабе времени к изменяющимся условиям информационного обмена и помеховой обстановки, что позволит обеспечить повышение (поддержание) требуемой структурной устойчивости и информационной эффективности системы [7].

4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №17-47-680748р_центр_а).

Литература

1. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Поликом, 2010. – 389 с.
2. Цветкович Д., Дуб М., Захс Х. Спектры графов. Теория и применение. Киев: Наукова думка, 1984. – 384 с.
3. Андреев А.М., Можаров Г.П., Сюзев В.В. Многопроцессорные вычислительные системы: Теоретический анализ, математические модели и применение. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 334 с.
4. Межуев А.М. Структурные характеристики информационной сети на основе спектрального анализа топологии / А.М. Межуев, И.И. Пасечников, М.Г. Третьяков // Вестник Тамбовского университета. – Тамбов: 2016. – т.21, вып.2. – С. 676-680.
5. Межуев А.М. Тензорные методы в теории оценки информационной эффективности и анализа элементов цифровых радиосетей (монография). Тамбов: Интеграция, 2008. – 262 с.
6. Межуев А.М. Анализ функции эффективности информационной сети и алгоритм оценки режимов информационного обмена на основе производных обобщенного показателя /

А.М. Межуев, И.И. Пасечников, А.В. Коренной // Электромагнитные волны и электронные системы. – М.: 2017, № 5. – С. 12-22.
7. Межуев А.М. Совместное решение задач алгоритмической и структурной адаптации в инфокоммуникационных системах / А.М. Межуев // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – С.-Пб.: 2015. – Т. 7, №6. – С. 36-43.

REFERENCES

1. Nazarov A.N., Sychev K.I. Models and methods for calculating the quality of functioning indicators of the node equipment and structural-network parameters of the next generation communication networks. Krasnoyarsk: Polikom, 2010. – 389 p.
2. Tsvetkovich D., Dub M., Zahs H. Spectrums of graphs. Theory and application. Kiev: Naukova dumka, 1984. – 384 p.
3. Andreev A.M., Mozharov G.P., Suzev V.V. Multiprocessor computing systems: Theoretical analysis, mathematical models and application. M.: MSTU N.E. Baumana, 2011. – 334 p.
4. Mezhuev A.M. Structural characteristics of an information network based on spectral analysis of topology / A.M. Mezhuev, I.I. Pasechnikov, M.G. Tretyakov // Bulletin of Tambov University. – Tambov: 2016. – Vol. 21, Rel. 2. – Pp. 676-680.
5. Mezhuev A.M. Tensor methods in the theory of evaluating information efficiency and analysis of elements of digital radio networks (monograph). Tambov: Integration, 2008. – 262 p.
6. Mezhuev A.M. Analysis of the information network efficiency function and the algorithm for evaluating informational exchange modes based on derivatives of the generalized indicator / A.M. Mezhuev, I.I. Pasechnikov, A.V. Korennoi // Electromagnetic waves and electronic systems. – M.: 2017, No. 5. – Pp. 12-22.
7. Mezhuev A.M. Joint solution problems solving of algorithmic and structural adaptation in infocommunication systems / A.M. Mezhuev // Knowledge-intensive technology in space research of the Earth. – St. P.: 2015. – Vol. 7, No. 6. – Pp. 36-43.

МЕТОДИКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЛИС АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РАДИОКОНТРОЛЯ

М.И. Спажакин[1], А.Б. Токарев[1,2]

[1]АО ИРКОС, Москва, Россия
[2]Воронежский государственный технический университет ФГБОУ ВО «ВГТУ», Воронеж, Россия

Аннотация. Технология когнитивного радио позволяет эффективно использовать спектральный ресурс. Эта технология постоянно развивается и начинает активно внедряться в практику для обретения дополнительных преимуществ за счет гибкого учета локальных условий распространения радиоволн и локальной занятости радиочастотного ресурса. Однако, радиоконтроль устройств, работающих с использованием данной технологии, оказывается сложной технической задачей. В статье представлены общие подходы к радиоконтролю источников радиоизлучения, работающих в составе когнитивной радиосети, обоснована необходимость применения распределенной сети комплексов радиоконтроля, оснащенных цифровыми обработчиками, построенными по схеме радиоустройств с программируемыми параметрами, показана актуальность задачи повышения энергоэффективности разрабатываемых комплексов. Характерной особенностью подобных комплексов оказывается необходимость параллельной обработки потоков данных на нескольких некратных частотах дискретизации, что порождает потребность в эффективных алгоритмах изменения частоты дискретизации с произвольным множителем конверсии и алгоритмах высококачественной широкополосной фильтрации сигналов. В работе предложен ряд технических приемов, рекомендуемых при практической реализации подобных алгоритмов на ПЛИС, и приведены сведения об обеспечиваемой энергоэффективности решений.

Ключевые слова: радиоконтроль, когнитивное радио, ПЛИС, ресемплер, энергоэффективность.

METHOD OF ENERGY EFFICIENT FPGA-BASED IMPLEMENTATION OF DIGITAL WIDEBAND SIGNALS PROCESSING IN RADIO MONITORING SYSTEMS

M. I. Spazhakin[1], A. B. Tokarev[1,2]

[1]JSC IRKOS, Moscow, Russia
[2]Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

Abstract. The cognitive radio technology allows efficient usage of the spectral resource. This technology is constantly evolving and is beginning to be actively introduced into practice in order to gain additional benefits due to the flexible consideration of local propagation conditions of radio waves and local employment of the radio frequency resource. However, the monitoring of devices using this technology is a complex technical task. This article presents general approaches to radio monitoring of radio emitters working as a part of cognitive radio network, justifies the need to use a distributed network of radio monitoring complexes equipped with digital processors built according to the radio device scheme with programmable parameters, the urgency of the task of increasing the energy efficiency of the developed complexes is shown. A characteristic feature of such complexes is the need for parallel processing of data streams at several non-multiple sampling frequencies, which creates the need for effective algorithms for changing the sampling rate with an arbitrary conversion factor and high-quality wideband filtering algorithms. The paper proposed a number of

techniques recommended in the practical implementation of such algorithms on the FPGA, and provides information about the energy efficiency of solutions.

Keywords: radio monitoring, cognitive radio, FPGA, resampler, energy efficiency.

1. Введение

Согласно рекомендациям международного союза электросвязи (МСЭ) [1] современный комплекс радиоконтроля (КРК) должен, в частности, обеспечивать эффективное обнаружение сигналов систем связи, классификацию наблюдаемых радиоизлучений и оценку их параметров. Надежная классификация сигналов возможна при условии декодирования набора идентификационных признаков, однозначно характеризующих источник радиоизлучения (ИРИ), что подтверждается рекомендациями МСЭ [1]. Система когнитивного радио предполагает использование большого числа возможных технологий радиодоступа. Поэтому при радиоконтроле систем когнитивного радио КРК должен быть способен обрабатывать сигналы в многозадачном режиме реального времени для многих стандартов связи одновременно, причем если при реализации систем связи возможным решением может оказаться быстрая реконфигурация аппаратуры, то при реализации КРК эффективной оказывается именно параллельная обработка нескольких потоков данных.

2. Когнитивное радио. Основные особенности

Основная задача системы когнитивного радио заключается в эффективном использовании радиочастотного ресурса [2]. Данная задача решается за счет динамической и автономной коррекции своих эксплуатационных параметров и протоколов согласно полученным знаниям о среде эксплуатации и внутреннем состоянии, а также за счет возможности обучения на основе полученных ранее результатов [3]. Узлы в когнитивных радиосетях взаимодействуют друг с другом, этим обеспечивается динамическое управление сетью. Динамическое управление когнитивной сетью достигается за счет организации взаимодействия узлов друг с другом с большей или меньшей степенью централизации.

При передаче сигналов используются различные радиотехнологии (схема множественного доступа, модуляции, канального кодирования, кодирования данных, протоколы управления, различные радиослои для поддержания логических каналов), такие как GSM, UMTS, Wi-Fi, DMR, LTE [4]. Принятие решения об использовании соответствующей радиотехнологии, которое по мнению системы будет оптимальным (в зависимости от задач пользователя, количества узлов, их активности, помеховой обстановки, интерференции и т.д.) на текущей момент, ведется с использованием первоначально заданных правил, которые модифицируются в процессе работы системы.

Как правило, абонентские терминалы, базовые станции и прочие радиоустройства, функционирующие в когнитивной сети, реализуются по схеме радиоустройств с программируемыми параметрами (SDR) [5].

3. Требования к комплексам радиоконтроля систем когнитивного радио

В соответствии с рекомендациями МСЭ [1] наиболее эффективным средством радиоконтроля систем когнитивного радио является распределенная сеть КРК, которая для извлечения набора идентификационных признаков регистрируемых радиоизлучений должна со всей доступной полнотой реализовывать следующие технологии:

- мультистандартная обработка сигналов в параллельном многозадачном режиме;
- техническая идентификация мобильных терминалов, базовых станций и т.д. на основе анализа протоколов и декодирования данных;
- гибкое (интеллектуальное) принятие решений об эффективном использовании имеющихся обработчиков и накопление статистики;
- использование технологий машинного обучения для организации энергоэффективной обработки больших массивов данных, полученных в ходе наблюдения за радиообстановкой в режиме реального времени;
- организация радиоконтроля с применением распределенной сети мобильных и стационарных КРК;
- одновременная полоса обзора КРК 100 – 500 МГц в зависимости от назначения комплекса;
- использование технологий SDR и мультирадио при разработке и реализации приемопередатчиков КРК;
- реализация КРК преимущественно на ПЛИС и DSP-процессорах для обеспечения динамической конфигурации и гибкой обработки сигналов.

Отвечающая перечисленным требованиям структурная схема обработчика сигналов представлена на рисунке 1. Её ядром является ПЛИС (возможно, и даже желательно, оснащенная DSP-процессором), реализующая обработку данных в соответствии с различными стандартами связи (GSM, Wi-Fi, LTE, DECT). Результаты идентификации, получаемые от обработчиков, используются как для принятия решений о регистрируемой радиообстановке, так и для оптимизации работы самого КРК, например, с использованием алгоритмов машинного обучения, реализуемых на основе нейронной сети.

В задачи алгоритма машинного обучения входят:

- первичная идентификация типов радиотехнологий, которые используются для передачи данных;
- обработка статистических данных, восстановление правил (частичное), по которым работают узлы когнитивной сети;
- повышение энергоэффективности использования вычислительной мощности имеющихся цифровых обработчиков сигналов стандартов связи;
- формирование решений о работе КРК для эффективного радиоконтроля когнитивной сети.

Следует иметь в виду, что при недостаточных вычислительных ресурсах ПЛИС и большой вариации потенциально возможных радиотехнологий можно рекомендовать к использованию периодическую реконфигурацию применяемого набора обработчиков сигналов, однако наиболее эффективной, естественно, является одновременная обработка максимально большого числа потоков данных в параллельно функционирующих

обработчиках различных стандартов. Вместе с тем, многопоточная обработка данных на высоких частотах дискретизации оказывается весьма энергоемкой, поэтому при реализации на ПЛИС ресемплеров и обработчиков следует уделять особое внимание их энергоэффективности.

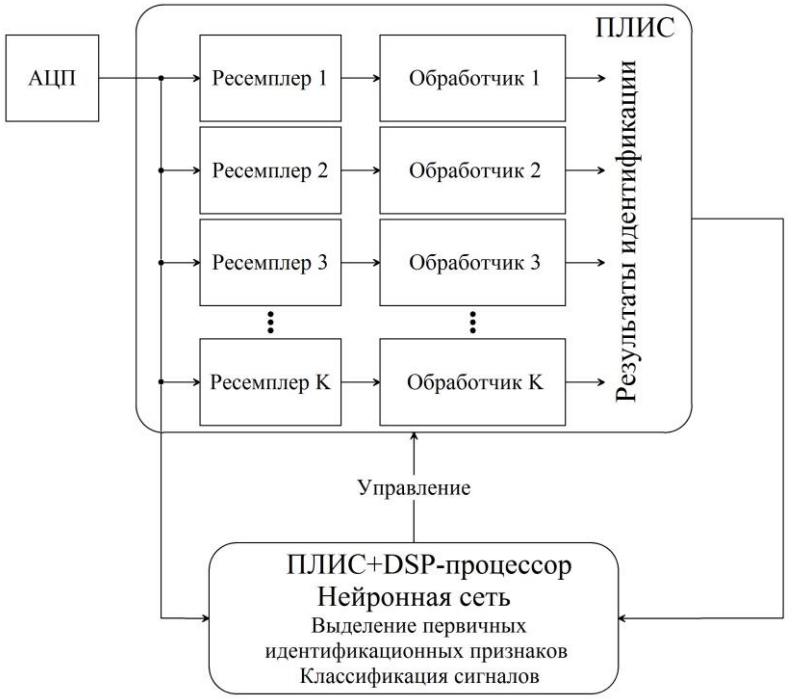


Рис. 1. Структурная схема многозадачного цифрового обработчика сигналов для КРК

•

4. Произвольное изменение частоты дискретизации

Произвольное изменение частоты дискретизации с использованием полиномиальных ресемлеров как метод изменения частоты дискретизации широко описан в литературе по цифровой обработке сигналов [6], однако в задачах РК алгоритм изменения частоты дискретизации широкополосных сигналов должен обеспечивать высокий динамический диапазон – не ниже *75* дБ, а ширина спектра обрабатываемых сигналов превышает *80* МГц. При использовании современной аппаратной базы предварительное повышение частоты дискретизации, предполагаемое многими классическими способами передискретизации сигналов, в таких условиях оказывается энергозатратным. Предлагаемая же в работе [7] методика синтеза широкополосных ресемплеров с использованием метода наименьших квадратов (МНК) удовлетворяет обозначенным требованиям и обладает следующими возможностями:

- алгоритм произвольного изменения частоты дискретизации [8] не требует предварительного ее повышения даже при отношениях эффективной полосы комплексного широкополосного сигнала к частоте дискретизации превышающих *80..90%;*
- подстройка крутизны характеристики в переходной полосе АЧХ производится соразмерно со сложностью решаемой задачи;
- динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих, составляет не менее *75* дБ;

• гибкое использование доступных ресурсов ПЛИС обеспечивается за счет перестройки структуры Фарроу.

Проблема обеспечения энергоэффективности при реализации алгоритма произвольного изменения частоты дискретизации на ПЛИС подробно исследовалась в работе [9]. В ходе исследований было установлено:

• энергопотребление ресемплеров существенно зависит от реализации операций перемножения обрабатываемых данных с матрицей коэффициентов ресемплера, размерность которой определяется произведением длины импульсной характеристики ресемплера в отсчетах входного сигнала на порядок интерполяционного полинома и может быть весьма значительной;

• предлагаемое в литературе [10] использование «CSD»-умножителей, построенных на логических элементах, оказывается эффективным лишь при невысоких требованиях к динамическому диапазону ресемплера (не более 40 дБ) [9];

• использование лишь аппаратных умножителей позволяет устранить проблему обеспечения динамического диапазона, но приводит к заметному росту энергопотребления и нерациональному использованию ресурсов ПЛИС.

Как следствие, наиболее энергоэффективной оказывается методика реализации алгоритма изменения частоты дискретизации на ПЛИС, предполагающая совместное использование умножителей, построенных на логических элементах, и аппаратных умножителей ПЛИС; её графическая интерпретация представлена на рисунке 2.

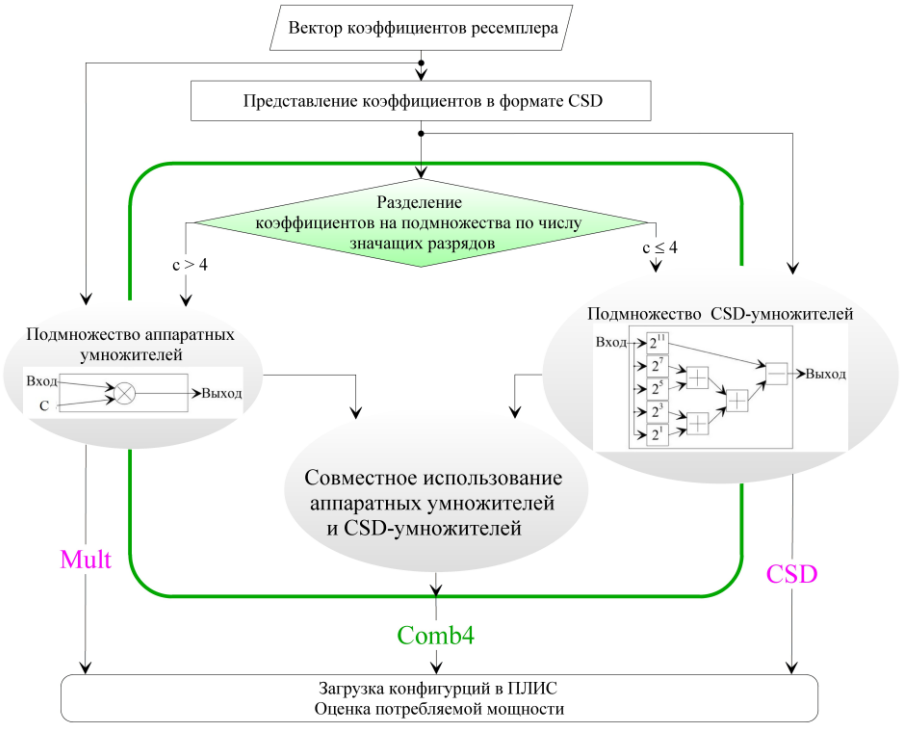


Рис. 2. Оценка энергоэффективности реализации на ПЛИС широкополосного ресемплера

Результаты сравнительного анализа энергопотребления ресемплеров, построенных в соответствии с разными методиками показаны в таблице 1. Колонка «Mult» таблицы

содержит данные, полученные при реализации ресемплеров лишь на аппаратных умножителях ПЛИС, колонка «CSD» характеризует ситуацию при использовании лишь умножителей, построенных на логических элементах, а колонка «Comb4» определяет мощность, потребляемую ПЛИС при совместном использовании как аппаратных умножителей, так и умножителей, построенных на логических элементах. Именно последний вариант был принят в исследованиях [9] за основу, и потому все значения в последней колонке таблицы 1 равны 100%, а значения в предыдущих столбцах характеризуют увеличение энергопотребления при использовании более простых, но менее энергоэффективных решений. Из представленных в таблице сведений видно, что при порядках полиномов и длинах импульсных характеристик ресемплеров, соответствующих требованиям к КРК, следование методике из [9] позволяет уменьшить потребляемую мощность на 20-30%.

Таблица 1. Результаты оценки потребляемой ресемплерами мощности

Нормированное значение потребляемой мощности %				
Порядок полинома	Длина ИХ фильтра ресемплера	Реализация		
		Mult	CSD	Comb4
5	17	128	120	100
5	33	134	118	100
7	49	126	115	100

5. Энергоэффективная реализация цифровых КИХ-фильтров

Проблема реализации в ПЛИС операций перемножения обрабатываемых данных с векторами постоянных коэффициентов большой размерности является типовой и для многочисленных операций фильтрации сигналов. Причем попытки использовать «CSD»-подход, опирающийся на округление коэффициентов фильтра, вновь позволяют получать энергоэффективные решения лишь ценой заметного ухудшения динамического диапазона аппаратуры, а повсеместное применение аппаратных умножителей порождает проблему нехватки ресурсов и повышения энергопотребления.

Исследования [9] показали, что и при реализации КИХ-фильтров различных порядков энергоэффективным оказывается подход, предполагающий комбинированный вариант реализации умножителей:

- если после оптимизации вектора весовых коэффициентов фильтра число ненулевых разрядов в его «CSD»-представлении оказывается меньшим 4, то реализовывать операцию умножения следует посредством умножителей на логических элементах;
- для реализации же умножений на весовые коэффициенты, представленные не менее чем 4 ненулевыми разрядами, следует использовать аппаратные умножители.

Результаты сравнительного анализа энергопотребления КИХ-фильтров, построенных в соответствии с разными методиками, представлены в таблице 2. Заметное увеличение потребляемой мощности в колонках «Mult» и «CSD» по сравнению с рекомендуемой комбинированной методикой (колонка «Comb4») показывает, что и при

построении КИХ-фильтров методика [9,11] обеспечивает существенное снижение энергопотребления.

Таблица 2. Результаты оценки потребляемой цифровыми фильтрами мощности

Мощность, потребляемая на обработку сигналов, нормированная по отношению к минимальному значению, %			
Длина фильтра	Способ реализации		
	Mult	CSD	Comb4
24	150	119	100
68	166	123	100
128	189	119	100

6. Заключение

Радиоконтроль систем когнитивного радио является сложной технической задачей, требующей использования распределенных сетей КРК, оснащенных цифровыми обработчиками сигналов разнообразных стандартов связи. При практической реализации подобных обработчиков на ПЛИС остро встает задача энергоэффективности. Анализ показывает, что энергопотребление обработчиков существенно зависит от способа реализации операций перемножения входных потоков данных с векторами (матрицами) коэффициентов фильтров (ресемплеров), часто имеющими значительные размерности; при этом представленные в литературе подходы часто оказываются неприменимыми из-за специфики технических требований, предъявляемых к КРК. В подобных случаях оказывается полезной методика, предполагающая комбинированное использование аппаратных умножителей ПЛИС и умножителей, построенных на логике, при реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов. Результаты моделирования и натурных испытаний доказывают, что применение предлагаемых технических приемов обеспечивает при реализации КИХ-фильтров и ресемплеров сигналов в цифровых обработчиках КРК энергетический выигрыш от 20% до 80% по сравнению с широко распространенными методиками.

Литература

1. Техническая идентификация цифровых сигналов [Электронный ресурс]: Рекомендация МСЭ-RSM.1600-1, Женева, 2013. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1600-1-201209-S!!PDF-R.pdf (6.3.2019).
2. Cognitive radio systems specific for International Mobile Telecommunications systems [Электронный ресурс]: Report ITU-R M.2242, Geneva, 2011. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2242-2011-PDF-E.pdf (6.3.2019).
3. Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service [Электронный ресурс]: Report ITU-R M.2225, Geneva, 2011. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2225-2011-PDF-E.pdf (6.3.2019).
4. Reconfigurable Radio Systems (RRS); Functional Architecture (FA) for the Management and Control of Reconfigurable Radio Systems [Электронный ресурс]: ETSI TR 102 682 V1.1.1 (2009-07). Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102682/01.01.01_60/tr_102682v010101p.pdf

5. Reconfigurable Radio Systems (RRS); Radio Base Station (RBS) Software Defined Radio (SDR) status, implementations and costs aspects,including future possibilities [Электронный ресурс]: ETSI TR 102 681 V1.1.1 (2009-06). Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102681/01.01.01_60/tr_102681v010101p.pdf
6. Hentschel T. Sample Rate Conversion for Software Configurable Radio / T. Hentschel. – Norwood, USA: Artech House, 2002. – 284 p.
7. Спажакин М.И. Применение многоканальных ресемлеров Фарроу в задачах радиомониторинга / М.И. Спажакин // Радиотехника. – 2018. – №7. – С. 29-34.
8. Спажакин М.И. Оценка искажений при передискретизации цифрового сигнала с использованием фильтра Фарроу/ М.И. Спажакин, В.Д. Репников, А.Б. Токарев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. №6-3. – С. 26-29.
9. Спажакин М.И. Методика проектирования и реализации на ПЛИС энергоэффективных устройств обработки сигналов в системах радиоконтроля: дис. … канд. техн. наук: 05.12.04. – Воронежский гос. техн. университет, Воронеж, 2018 – 159 с.
10. Arie Y. Evolutionary stagnation avoidance for design of CSD coefficient FIR filters using GA/ Y. Arie, K. Suyama // Proc. of ITC-CSCC 2016. – 2016.
11. Спажакин М.И. Энергоэффективная реализация высокоскоростных КИХ фильтров на ПЛИС // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – №2. – С. 69-74.

REFERENCES

1. Technical identification of digital signals [Electronic resource]: Recommendation ITU-RSM.1600-1, Geneva, 2013. – Access mode: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1600-1-201209-S!!PDF-R.pdf (6.3.2019).
2. Cognitive radio systems specific for International Mobile Telecommunications systems [Электронный ресурс]: Report ITU-R M.2242, Geneva, 2011. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2242-2011-PDF-E.pdf (6.3.2019).
3. Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service [Электронный ресурс]: Report ITU-R M.2225, Geneva, 2011. – Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2225-2011-PDF-E.pdf (6.3.2019).
4. Reconfigurable Radio Systems (RRS); Functional Architecture (FA) for the Management and Control of Reconfigurable Radio Systems [Электронный ресурс]: ETSI TR 102 682 V1.1.1 (2009-07). Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102682/01.01.01_60/tr_102682v010101p.pdf
5. Reconfigurable Radio Systems (RRS); Radio Base Station (RBS) Software Defined Radio (SDR) status, implementations and costs aspects,including future possibilities [Электронный ресурс]: ETSI TR 102 681 V1.1.1 (2009-06). Режим доступа: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102681/01.01.01_60/tr_102681v010101p.pdf
6. Hentschel, T. Sample Rate Conversion for Software Configurable Radio / T. Hentschel. – Norwood, USA: Artech House, 2002. – 284 p.
7. Spazhakin M.I. Application of multichannel Farrow resamplers in radio monitoring tasks/ M. I. Spazhakin // Radiotekhnika. – 2018. – №7. – P. 29-34.
8. Spazhakin M.I. Resampling by using Farrow filter – evaluation of distortion/ M. I. Spazhakin, V. D. Repnikov, A. B. Tokarev // Vestnik Voronezh state technical university. – 2013. – Vol. 9. №6-3. – P. 26-29.
9. Спажакин М.И. Методика проектирования и реализации на ПЛИС энергоэффективных устройств обработки сигналов в системах радиоконтроля: дис. … канд. техн. наук: 05.12.04. – Воронежский гос. техн. университет, Воронеж, 2018 – 159 с.
10. Arie Y. Evolutionary stagnation avoidance for design of CSD coefficient FIR filters using GA/ Y. Arie, K. Suyama // Proc. of ITC-CSCC 2016. – 2016.
11. Spazhakin M. I. Energy-efficient realization of high-speed FIR filters on FPGA//Cifrovaya obrabotka signalov. – 2018. – №2. – P. 69-74.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДСИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИАЦИОННОЙ СЕТЬЮ СВЯЗИ

М.И. Бабкова, К.А. Смирнов

АО «НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В рассматриваемом методическом подходе оценку устойчивости подсистемы обеспечения единого времени в автоматизированной системе управления телекоммуникационной сетью связи, функционирующей в нормальных (штатных) условиях, предлагается производить по частным показателям надежности и киберустойчивости. Приведены методики оценки аппаратурной и структурной надежности подсистемы обеспечения единого времени, а также методика оценки киберустойчивости указанной подсистемы.

Ключевые слова: подсистема обеспечения единого времени; автоматизированная система управления; устойчивость; надежность; киберустойчивость; компьютерные атаки.

METHODICAL APPROACH TO STABILITY ASSESSMENT OF PROVIDING SUBSYSTEM OF UNIFORM TIME IN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR TELECOMMUNICATION NETWORK

M.I. Babkova, K.A. Smirnov

AO «NII «Rubin», Saint-Petersburg, Russia

Abstract. In the considered methodical approach stability assessment of providing subsystem of uniform time in automated control system for telecommunication network, functioning in normal (regular) conditions, is offered to be made on private indicators of reliability and cyberstability. Assessment methods of hardware and structural reliability of a providing subsystem of uniform time and also assessment method of cyberstability of the specified subsystem are given.

Keywords: providing subsystem of uniform time; automated control system; stability; reliability; cyberstability; computer attacks.

1. Введение

Важным элементом автоматизированной системы управления (АСУ) телекоммуникационной сетью связи (ТКС) является подсистема обеспечения единого времени (ОЕВ), позволяющая синхронизировать работу, с требуемым качеством (с требуемой точностью и стабильностью), пользователей, всех важных программных приложений, серверных ресурсов, телекоммуникационного оборудования, средств мониторинга, управления.

Актуальность вопросов определения и повышения устойчивости подсистемы ОЕВ обусловлена высокими требованиями к качеству обслуживания, предъявляемыми к современным АСУ ТКС, в условиях функционирования их в неблагоприятной среде.

В соответствии с нормативными документами [1] устойчивость системы связи характеризует ее способность выполнять свои функции при выходе из строя части ее элементов в результате воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ).

В целом подсистема ОЕВ пользователей в АСУ ТКС характеризуется надежностью, живучестью, помехоустойчивостью, которые определяют ее системное свойство – устойчивость. Требования по устойчивости могут задаваться как в интегральном виде (характеризуют функционирование системы связи в условиях всех видов воздействия), так и в виде требований по отдельным составляющим (живучести, надежности и помехоустойчивости).

Надежность подсистемы ОЕВ - это ее способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия внутренних ДФ (т.е. сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения и технического обслуживания) [1].

Живучесть подсистемы ОЕВ - это ее способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия средств поражения обычного и ядерного оружия противника [1].

Помехоустойчивость подсистемы ОЕВ характеризует ее способность обеспечивать пользователей единым временем с требуемым качеством в условиях воздействия на нее радиопомех.

Под ДФ понимаются воздействия на подсистему ОЕВ, источником которых является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего характера, приводящий к выходу из строя её элементов. В соответствии с этим различают:

- внутренние ДФ (технико-эксплуатационные причины);
- внешние ДФ (высокоточное и ядерное оружие, преднамеренные помехи).

При этом способность подсистемы ОЕВ противостоять внутренним ДФ характеризуется надежностью, а способность противостоять внешним ДФ - характеризуется живучестью и помехоустойчивостью.

В современных условиях целесообразно выделить отдельно еще одну группу воздействий – информационные воздействия с применением компьютерных атак, так называемых «кибератак» (КА). Воздействие на подсистему ОЕВ путем применения противником КА может привести к существенному снижению устойчивости подсистемы ОЕВ [2].

Компьютерные атаки (кибератаки) – действия в киберпространстве, направленные на манипулирование критически важными системами, ресурсами, информацией или их кражу, блокирование, порчу (искажение), разрушение и уничтожение [3].

Цели КА на подсистему ОЕВ очевидны – частичное или полное нарушение функционирования, сбор разведданных (вскрытие структуры сети, системы адресования и др.), не легитимное использование телекоммуникационного ресурса, навязывание ложной информации. Можно считать, что цель КА на элементы подсистемы ОЕВ – это получение значений параметров функционирования подсистемы и/или их изменение, т.е. получение сведений о свойствах и состоянии элементов и/или перевод элементов в

состояние, соответствующее цели КА. В этом случае, КА – один из основных факторов, определяющих устойчивость подсистемы ОЕВ.

Поэтому наряду с общепринятым определением устойчивости по совокупности оценок надежности, живучести и помехоустойчивости, необходимо рассматривать киберустойчивость как четвертую составляющую устойчивости подсистемы ОЕВ.

Киберустойчивость подсистемы ОЕВ - это возможность предусматривать проведение кибератак, адаптироваться к ним и быстро восстанавливаться после вызванных ими нарушений.

Таким образом, составляющие устойчивости могут оцениваться следующими показателями: надежность - коэффициентом исправного действия по надежности $K_{и\,н}$; живучесть - коэффициентом исправного действия по живучести $K_{и\,ж}$; помехоустойчивость - коэффициентом исправного действия по помехоустойчивости $K_{и\,пу}$; киберустойчивость - коэффициентом исправного действия по киберустойчивости $K_{и\,ку}$.

Так как перерывы связи из-за воздействия помех, ядерного оружия, КА и по технико-эксплуатационным причинам – события независимые, то устойчивость подсистемы ОЕВ можно оценить как произведение всех показателей составляющих устойчивости:

$$K_{и} = K_{и\,н} \cdot K_{и\,ж} \cdot K_{и\,пу} \cdot K_{и\,ку}. \qquad (1)$$

Также устойчивость подсистемы ОЕВ можно оценить через коэффициенты простоя:

$$K_{и} = \left(1 - K_{п\,н}\right) \cdot \left(1 - K_{п\,ж}\right) \cdot \left(1 - K_{п\,пу}\right) \cdot \left(1 - K_{п\,ку}\right), \qquad (2)$$

где $K_{п\,н}$, $K_{п\,ж}$, $K_{п\,пу}$, $K_{п\,ку}$ - коэффициенты простоя по надежности, живучести, помехоустойчивости и киберустойчивости, соответственно.

На практике определение интегральной оценки устойчивости по всем вышеперечисленным показателям является очень сложной задачей и не всегда целесообразной.

Опыт локальных войн свидетельствует о том, что еще в мирное время и в период непосредственной угрозы начала агрессии основным воздействующим фактором на ТКС, в том числе и на подсистему ОЕВ в АСУ ТКС, являются КА. В этом случае эффективность ТКС в нормальных (штатных) условиях функционирования и в условиях информационного противоборства зависит от технико-эксплуатационных характеристик, оперативности управления ТКС и способности противостоять различным видам КА.

Поэтому в данном методическом подходе предлагается оценивать устойчивость подсистемы ОЕВ по отдельным её составляющим: надежности и киберустойчивости.

2. Оценка надежности подсистемы обеспечения единого времени

Для подсистемы ОЕВ, являющейся сложной многофункциональной системой, состоящей из элементов, разнородных по своим свойствам, показателям надежности,

назначению и т.п., можно выделить два основных аспекта надежности: аппаратурный, отражающий надежность оборудования, и структурный, отражающий надежность функционирования подсистемы в целом [4].

Методика определения аппаратурной надежности подсистемы ОЕВ предназначена для расчета вероятности безотказной работы и определения учета влияния отказов элементов оборудования и программного обеспечения (устойчивых отказов и отказов сбойного характера) на работоспособность объектов подсистемы ОЕВ и основана на рассмотрении ее элементов как изделий вида I, которые в процессе эксплуатации могут находиться либо в работоспособном состоянии (состоянии с номинальной эффективностью), либо в неработоспособном состоянии (состоянии отказа). Указанное рассмотрение определяется функциональным назначением подсистемы ОЕВ.

Математической основой методики является логико-вероятностный метод [5 – 7] с использованием структурных схем расчета надежности (СхРН), построенных с учетом заданного критерия отказа объектов подсистемы ОЕВ. В качестве элементов СхРН рассматриваются отдельные технические средства (устройства), обеспечивающие функционирование объектов подсистемы ОЕВ в соответствии с назначением, отказы, которых приводят к нарушению работоспособности объектов подсистемы ОЕВ.

В соответствии с [8] вероятность безотказной работы $P(t_{бр})$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

$$P\left(t_{бр}\right) = P\left(\tau \geq t_{бр}\right), \tag{3}$$

где $t_{бр}$ - время безотказной работы; τ - наработка от начального момента до возникновения отказа.

В общем случае, в структурной схеме расчета надежности можно выделить два типа соединений, определяющих расчетные соотношения методики определения аппаратурной надежности объектов подсистемы ОЕВ:

– последовательное соединение элементов;

– параллельное соединение элементов.

При последовательном соединении элементов расчет вероятности безотказной работы изделия $P(t_{бр})$ выполняется в соответствии с выражением:

$$P\left(t_{бр}\right) = \prod_{i=1}^{N} P_i\left(t_{бр}\right), \tag{4}$$

где $P_i\left(t_{бр}\right)$ – вероятность безотказной работы i-й составной части (элемента) объекта подсистемы ОЕВ; N – общее количество последовательно соединенных элементов СхРН.

Вероятность безотказной работы i-й составной части (элемента) объекта подсистемы ОЕВ определяется в соответствии с выражением:

$$P_i\left(t_{бр}\right) = e^{\frac{t_{бр}}{T_{Oi}}}, \tag{5}$$

где T_{oi} – средняя наработка на отказ i-го элемента в часах.

При параллельном соединении элементов (в случае резервирования) расчет вероятности безотказной работы группы из двух однотипных элементов $P_{гр}(t_{бр})$ выполняется в соответствии с выражением:

$$P_{гр}(t_{бр}) = 1 - [1 - P_i(t_{бр})]^2. \quad (6)$$

Расчет вероятности безотказной работы объектов подсистемы ОЕВ выполняется в соответствии с разработанными схемами расчета надежности по формулам (4) - (6).

По результатам расчетов вероятности безотказной работы объектов можно оценить надежность аппаратурного аспекта исследуемой подсистемы ОЕВ.

Структурный аспект надежности отражает функционирование подсистемы в зависимости от работоспособности или отказов узлов (пунктов) или линий, магистралей, т.е. он связан с возможностью существования в сети путей доставки информации.

Основными элементами подсистемы ОЕВ при оценке ее структурной надежности выступают объекты подсистемы ОЕВ (узлы АСУ ТКС, на которых они расположены) и пути, совокупность которых образуют направления связи (НС) между объектами [4].

Надежность пути – вероятность его безотказной работы – определяется, с одной стороны, аппаратурной надежностью его элементов, а с другой исправностью линий связи.

В качестве показателя степени структурной надежности подсистемы ОЕВ предлагается использовать среднее значение коэффициента готовности НС подсистемы ОЕВ $K_{Г\,ОЕВ}$, который характеризует вероятность исправного (работоспособного) состояния путей сети для заданных пар узлов в произвольный момент времени в процессе эксплуатации:

$$K_{Г\,ОЕВ} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \alpha_i K_{Гi}\ , \quad (7)$$

где N – количество НС, обеспечивающих связь между двумя объектами в подсистеме ОЕВ; $K_{Гi}$ – значение коэффициента готовности i-го НС, $i = \overline{1, N}$; α_i - значение коэффициента важности i-го НС.

Весовые коэффициенты α_i в выражении (7) задаются, исходя из конкретных условий и целей функционирования подсистемы ОЕВ. В качестве коэффицентов важности i-го НС предложено использовать категорию пользователей и необходимую для них точность подстройки времени.

Методику расчета коэффициента готовности $K_{Гi}$, представляющего собой вероятность существования хотя бы одного работоспособного пути между полюсами заданного НС в произвольный момент времени, предлагается осуществить с применением математической модели сети связи – двухполюсного графа, на основе статистических данных по отказам элементов транспортной сети, с использованием метода прямого перебора всех состояний.

Шаг 1. Построение двухполюсного графа сети.

Для расчета структурной надежности подсистема ОЕВ моделируется взвешенным графом $G=\{A,B\}$, вершинами $A=\{a_i\}$, $i=\overline{1,N}$ и ребрами $B=\{b_{ij}\},i,j=\overline{1,N},i\neq j$ которого являются множество узлов и линий связи между ними, соответственно, отображающих транспортную сеть АСУ ТКС. На графе сети выбираются анализируемые НС между парой объектов подсистемы ОЕВ и представляются в виде двухполюсного графа. В качестве весов элементов графа (вершин или ребер) используются коэффициенты готовности участков $K_{Гуч}$, расчет которых можно провести по полученным статистическим данным отказов и восстановлений на участках действующих линий связи на транспортной сети (8).

$$K_{\text{Гуч}}=\frac{T_{\text{Оуч}}}{T_{\text{Оуч}}+T_{\text{Вуч}}}, \qquad (8)$$

где $T_{\text{О уч}}$ - наработка на отказ, $T_{B\,уч}$ - время восстановления.

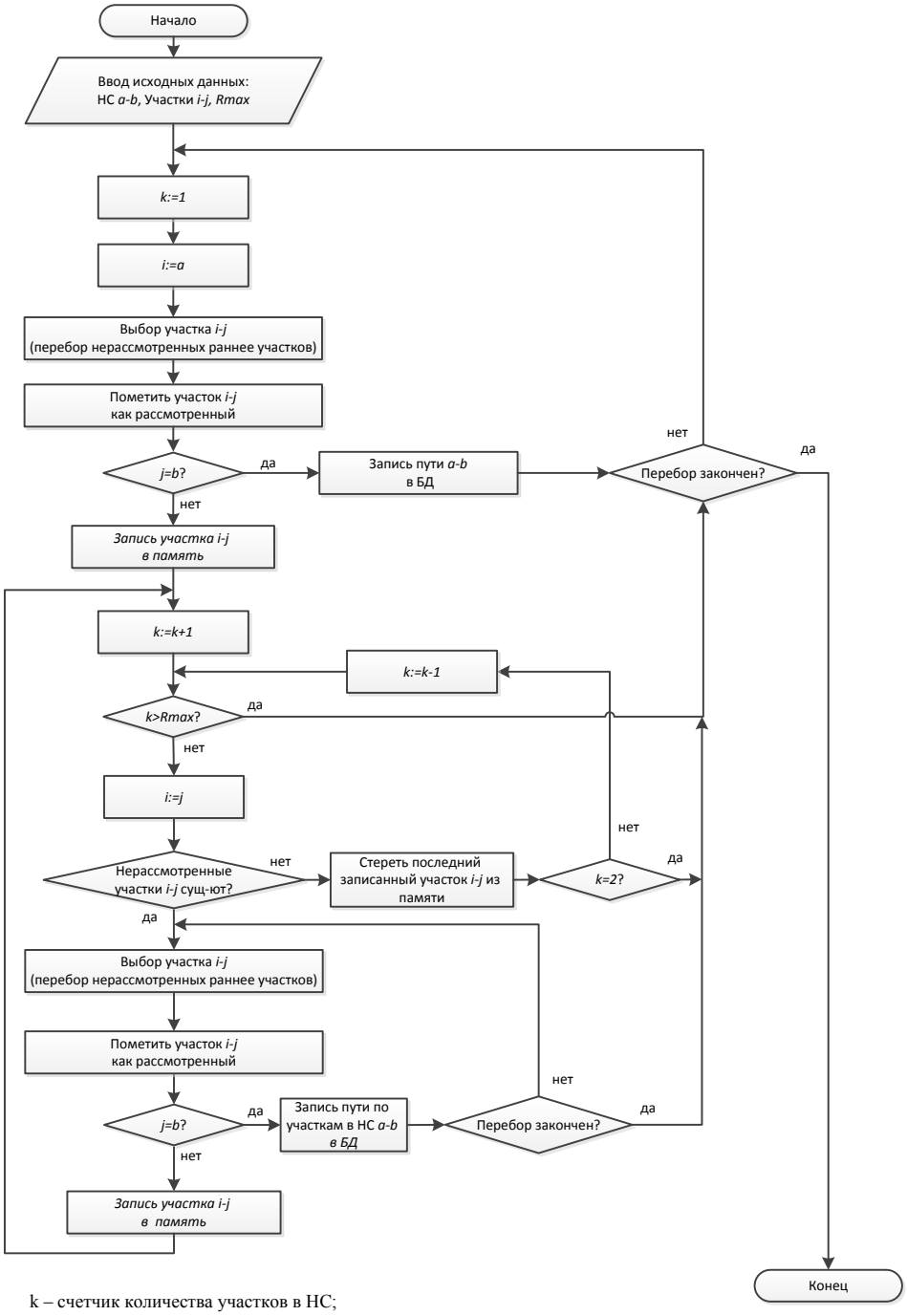
Путь НС представляет собой совокупность участков, образующих одиночный маршрут прохождения сигналов синхронизации ОЕВ между двумя серверами точного времени, и определяется, исходя из сетевой топологии и с учетом результатов планирования подсистемы ОЕВ, в соответствии с алгоритмом, приведенном на рисунке 1.

Шаг 2. Расчет коэффициента готовности НС.

Так как не все двухполюсные сети можно привести к последовательно-параллельному соединению элементов, к примеру, мостиковый граф, для определения коэффициента готовности НС предлагается использовать метод прямого перебора всех состояний [9]. Показатели надежности НС рассчитываются на основании предположения, что система может находиться только в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, определяющимся состоянием элементов и их сочетанием. Расчет безотказности НС сводится к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, при этом независимо рассматриваются состояния всех элементов двухполюсной сети, определению коэффициента готовности каждого из них и сложению коэффициентов готовности работоспособных состояний системы.

Так как количество рассматриваемых состояний сети зависит от числа ее элементов, а транспортная сеть связи может включать в себя несколько сотен сетевых элементов, необходима автоматизация вычисления коэффициентов готовности НС, алгоритм которой приведен на рисунке 2.

С помощью программы по приведенному алгоритму можно не только рассчитать коэффициенты готовности НС $K_{Гi}$, но и определить коэффициенты готовности путей $K_{ГП}$ прохождения сигналов точного времени в НС, что может быть использовано для нахождения основного и резервных путей на этапе планирования подсистемы ОЕВ, а также выделить критически важные участки пути по количеству их повторений в НС доведения услуг ОЕВ пользователям, необходимых для принятия решения по резервированию.



k – счетчик количества участков в НС;
Rmax - максимальный ранг пути.

Рис. 1. Алгоритм формирования путей в НС

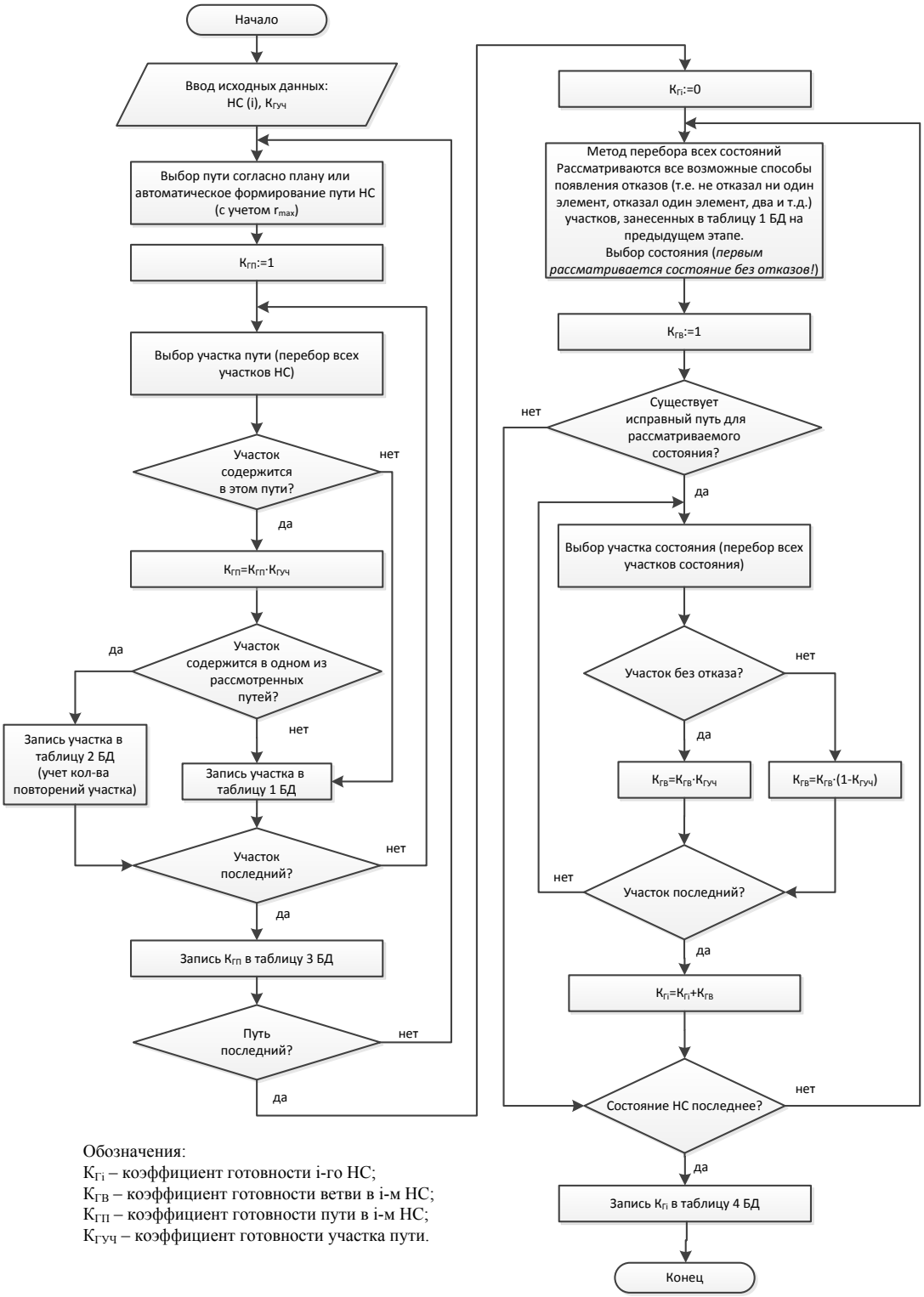


Рис. 2. Алгоритм расчета коэффициента готовности направления связи

Шаг 3. Расчет среднего значения коэффициента готовности НС.

Определение среднего значения коэффициента готовности НС подсистемы ОЕВ $K_{Г\,ОЕВ}$ осуществляется по формуле (7).

Методика оценки надежности подсистемы ОЕВ АСУ ТКС позволяет произвести расчет вероятности безотказной работы оборудования, устанавливаемого в подсистеме

ОЕВ, и оценить аппаратурную надежность подсистемы, а также дать комплексную оценку надежности функционирования подсистемы ОЕВ на различных этапах разработки, создания и эксплуатации объектов. На этапе проектирования расчет надежности производится с целью прогнозирования (предсказания) ожидаемой надежности проектируемой системы, а также для решения организационно-технических вопросов: выбора оптимального варианта структуры, способа резервирования, глубины и методов контроля, количества запасных элементов, периодичности профилактики.

На этапе испытаний и эксплуатации расчеты надежности проводятся для определения слабых мест, оценки влияния на надежность отдельных факторов, и, наконец, разработки мер по повышению надежности.

3. Оценка киберустойчивости подсистемы обеспечения единого времени

Результатом воздействия КА являются блокирование управляющей информации и внедрение ложной информации, нарушение установленных регламентов сбора, обработки и передачи информации в АСУ, отказы, сбои в работе подсистемы ОЕВ, а также компрометация передаваемой (получаемой) информации.

Кибератаки – это действие, которое заключается в поиске и использовании той или иной уязвимости. Таким образом, атака – это реализации угрозы.

Задача методики оценки киберустойчивости подсистемы ОЕВ – дать объективное представление об уровне киберрисков путем формирования риск-факторов для подсистемы и последующей их оценки [10].

Основная цель внедрения рассматриваемой методики – не тратить основные ресурсы на снижение несущественных рисков, а направить усилия на обработку рисков недопустимого уровня. Поэтому наряду с оценкой меры риска – степени киберустойчивости, необходимо рассмотреть меры риска – степени опасности угроз.

В соответствии с [11] риск информационной безопасности есть возможность того, что данная угроза сможет воспользоваться уязвимостью актива или группы активов и тем самым нанесет ущерб организации.

Активы (информация, информационные и телекоммуникационные технические средства, программное обеспечение) имеют определенную ценность для реализации целей функционирования подсистемы ОЕВ. Ценность активов можно интерпретировать как критичность (недопустимость простоев) активов.

Для более точной оценки возможного воздействия КА вначале необходимо определить ценность активов или группы активов подсистемы ОЕВ безотносительно угрозам, которые могут стать источником воздействия. Необходимо согласовать используемую шкалу ценностей (количественную, например, в пределах от 0 до 9, или качественную, колеблющеюся, например, в пределах от «очень низкой» до «очень высокой») и критериев для присвоения каждому активу определенного положения на шкале. [12]

Далее необходимо определить уязвимости активов подсистемы ОЕВ, через которые угрозы могут реализоваться, и классифицировать их по шкале уязвимостей (например: слабая; сильная; очень сильная).

Затем следует определить перечень актуальных угроз, возможность использования уязвимости активов и вероятности возникновения угроз. На вероятности возникновения угроз влияют перечень угроз, уязвимости, через которые эти угрозы могут реализоваться, частота реализации угроз (например: 1 раз в день и чаще; от 1 раза в месяц до 1 раза в день; от 1 раза в год до 1 раза в месяц; реже 1 раза в год), потенциал нарушителя (например: пользователи, администраторы, хакеры, террористические и преступные группы, спецслужбы; разработчики ПО и техники; бывшие сотрудники, третьи лица, принимаемые по договору; лица без квалификации) и эффективность защитных мер (например: несущественная; невысокая; высокая; очень высокая).

Совокупность активов, их уязвимостей и соответствующих угроз может создать определенные риски для активов подсистемы ОЕВ.

Для оценки меры риска (степени киберустойчивости) активов подсистемы ОЕВ предлагается использовать метод оценки киберустойчивости с помощью таблиц с заранее определенными значениями [12]. Соответствующая строка в таблице устанавливается по значению ценности актива, а соответствующая колонка устанавливается по вероятности возникновения угрозы и степени уязвимости. Таким образом, для каждой комбинации (ценность активов, уровни уязвимостей и вероятность возникновения угрозы), относящейся к каждому виду возможного ущерба (последствий реализации угрозы), идентифицируется соответствующая мера риска (степень киберустойчивости).

Для каждого актива рассматриваются уместные уязвимости и соответствующие им угрозы. Если существует уязвимость без соответствующей угрозы или угроза без соответствующей уязвимости, то в настоящее время риск отсутствует (но следует принимать меры в случае изменения этой ситуации).

Для оценки опасности угроз для активов подсистемы ОЕВ может быть использована таблица ранжирования угроз посредством мер риска (степени опасности) [12].

Первый шаг состоит в оценке последствий утраты ценности активов после реализации угрозы (ущерб) по заранее определенной шкале, например, от 1 до 5.

Второй шаг состоит в оценке вероятности возникновения угрозы по заранее определенной шкале, например от 1 до 5 для каждой угрозы.

Третий шаг состоит в вычислении меры риска (опасности), в основу которого положена классическая формула риска – это вероятность инцидента, умноженная на ущерб от его реализации.

Угрозы могут быть ранжированы в порядке соответствующей меры риска.

При практическом применении такой подход позволяет сравнивать риски между собой (определять их рейтинг), для того, чтобы выяснить, какие из них находятся в приоритете для подсистемы ОЕВ.

От оценки риска зависят общие требования безопасности, которые выполняются реализацией защитных мер. Защитные меры исключают или снижают до приемлемого (остаточного) уровня риски активам.

Последовательность и взаимосвязь процессов оценки киберустойчивости подсистемы ОЕВ в АСУ ТКС приведена на рисунке 3.



Рис. 3. Последовательность и взаимосвязь процессов оценки киберустойчивости подсистемы ОЕВ в АСУ ТКС

Ценность активов, возможные уязвимости, потенциальные угрозы и вероятности их возникновения можно осуществить методом экспертных оценок.

Оценка риска происходит за три шага.

Шаг 1. Формирование системы риск-факторов для оцениваемого вида риска.

Для каждого вида киберриска эксперты определяют перечень актуальных угроз, уязвимостей и мер защиты.

Шаг 2. Экспертная оценка риск-факторов.

Независимо друг от друга эксперты оценивают каждый риск фактор, определяя его вес, чтобы снизить влияние на итоговый показатель риска некритичных для него факторов. Далее по таблицам с заранее установленными значениями вычисляется мера риска - степень киберустойчивости и мера риска – степень опасности угроз.

Шаг 3. Вычисление рейтинга киберриска.

На основе определения оценки опасности угроз и их ранжирования вычисляется рейтинг киберриска.

В соответствии с результатами оценки киберустойчивости подсистемы ОЕВ, меры риска (киберопасности) для данного вида угроз и ценности активов, следует разрабатывать варианты резервирования и восстановления подсистемы ОЕВ.

После того, как накопится достаточный объем статистики о динамике показателей, а также причинах, по которым происходили скачки ущерба, можно спрогнозировать величину ущерба в следующем периоде.

Следует отметить, что уровни рисков постоянно меняются с трансформацией набора угроз, уязвимостей, вероятности, и, как правило, известны только частично. Поэтому для выявления изменений необходим непрерывный мониторинг, предоставляющий информацию о новых угрозах или уязвимостях.

4. Заключение

Рассмотренные выше структурно-вероятностные и временные параметры определяющие показатель устойчивости могут быть взаимоувязаны в единую формализованную систему, представленную на рисунке 4.



Рис. 4. Оценка устойчивости подсистемы ОЕВ в АСУ ТКС

Применительно к подсистеме ОЕВ в АСУ ТКС используются понятия структурной и функциональной устойчивости [13].

При рассмотрении структурной устойчивости учитываются топология подсистемы, межэлементные связи и надежностные характеристики элементов, вследствие чего задачи, связанные с анализом структурной устойчивости, можно свести к задачам надежности и устойчивости топологических структур в зависимости от конкретизации понятия «воздействие ДФ».

При исследовании функциональной устойчивости рассматривается способность подсистемы ОЕВ достигать цели своего функционирования, а особенности ее топологии

и межэлементных связей учитываются опосредованно, так как предполагается, что в подсистеме ОЕВ уже обеспечивается связность работоспособных компонентов.

Функционирование подсистемы ОЕВ в АСУ ТКС рассматривается в нормальных (штатных) условиях, и при оценке устойчивости подсистемы предлагается учитывать воздействия на нее КА.

Оценка устойчивости подсистемы ОЕВ производится по частным показателям надежности и киберустойчивости.

Литература

1 ГОСТ Р 53111 – 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. требования и методы проверки. -М.: Стандартинформ, 2009.
2 Коцыняк М.А., Кулешов И.А., Кудрявцев А.М., Лаута О.С. Киберустойчивость информационно-телекоммуникационной сети / – СПб.: Бостон-спектр, 2015. – 150 с.
3 Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
4 Бабкова М.И. Методика оценки надежности подсистемы обеспечения единого времени автоматизированной системы управления телекоммуникационной сетью связи. // «Автоматизация процессов управления»: сборник научных трудов Молодежной научно-технической конференции–Ульяновск: ФНПЦ АО «НПО Марс», 2018. С. –Ч.1. – 138 с. С. 5-12.
5 Надежность технических систем: Справочник / Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др.; Под ред. Ушакова И.А.. – М.: Радио и связь, 1985 – 608 с.
6 Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов / Под ред. Ушакова И.А. – М.: Радио и связь, 1988 – 208 с.
7 Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем – М.: Радио и связь, 1981 – 264 с.
8 ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Термины и определения.
9 Ремешков В.Ю., Писарев О.В., Милов В.Р. Применение автоматизированного алгоритма расчета коэффициентов готовности двухполюсных сетей для анализа надежности технологических сетей связи в газовой отрасли // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. http://science-education.ru/ru/article/view?id=13763.
10 ГОСТ Р 56545-2015. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Правила описания уязвимостей. -М.: Стандартинформ, 2015.
11 ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.-М.: Стандартинформ, 2011.
12 Буренин А.Н., Легков К.Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления: Монография.- М.: ООО «ИД Медиа Паблишер», 2015.- 348 с.
13 Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, № 4, 2013. - С. 69-79.

References

1 GOST R 53111 – 2008. Stability of functioning of the public communication network. Requirements and check methods. - M.: Standartinform, 2009.
2 Kotsynyak M.A., Kuleshov I.A., Kudryavtsev A.M., Lauta O.S. Ciberstability of an information and telecommunications network / – SPb.: Boston-range, 2015. – 150 p.
3 Federal law of 26.07.2017 No. 187-FZ "About safety of critical information infrastructure of the Russian Federation".
4 Babkova M.I. Technique of reliability assessment of a providing subsystem of uniform time in automated control system for telecommunication network.// “Process automation of management”:

collection of scientific works of the Youth scientific and technical conference, Ulyanovsk: FNPTs AO “NPO Mars”, 2018. – Ch.1. – 138 p. Pp. 5-12.

5 Reliability of technical systems: Reference book / Belyaev U.K., Bogatyrev V.A., Bolotin V.V., etc.; Under the editorship of Ushakov I.A. – M.: Radio and communication, 1985 – 608 p.

6 Raynshke K., Ushakov I.A. Reliability assessment of systems with use of graphs / Under the editorship of Ushakov I.A. – M.: Radio and communication, 1988 – 208 p.

7 Ryabinin I.A., Circassians G.N. Logic-probability research methods of a structural complex systems reliability – M.: Radio and communication, 1981 – 264 p.

8 GOST 27.002-2015. Reliability in the equipment. Terms and definitions.

9 Remeshkov V.U., Pisarev O.V., Milov V.R. Application of the automated calculation algorithm of availability quotients of bipolar networks for reliability analysis of technological communication networks in gas industry//Modern problems of science and education. – 2014. – No. 3. http://science-education.ru/ru/article/view?id=13763.

10 GOST R 56545-2015. Information protection. Vulnerabilities of information systems. Description rules of vulnerabilities. - M.: Standartinform, 2015.

11 GOST R ISO/IEC 27005-2010. Information technology. Methods and security protections. Management of risk of information security. - M.: Standartinform, 2011.

12 Burenin A.N., Legkov K.E. Modern infocommunication systems and special purpose networks. Basics of creation and control: Monograph. – M.: Ltd “PH Media Publisher”, 2015. – 348 p.

13 Makarenko S.I., Mikhaylov R.L. Stability assessment of a communication network in the conditions of impact on it of the destabilizing factors//Radio engineering and telecommunication systems, No. 4, 2013. – Pp. 69-79.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ РЕСУРСА В РЕЖИМЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА

К. В. Пядухова, Н. Н. Толстых

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. Предложена методология определения вероятности реализации целевой функции системы управления телекоммуникационными комплексами путем анализа динамики изменения вероятности реализации в их среде информационных воздействий и соответствующего расхода информационного ресурса.

Ключевые слова: информационный конфликт, вероятность реализации целевой функции, информационный ресурс, баланс.

METHODOLOGICAL APPROACH TO EVALUATING THE EFFICIENCY OF COMMUNICATION CONTROL SYSTEMS WHEN RESTRICTED RESOURCE IN THE INFORMATION CONFLICT MODE

K. V. Pyaduhova, N. N. Tolstyh

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russian Federation

Abstract. Proposed the methodology for determining the probability of implementing the target function of a telecommunications complex management system by analyzing the dynamics of changes in the probability of information in their environment and the corresponding consumption of an information resource.

Keywords: information conflict, the probability of the implementation of objective function, information resource, balance.

1. Введение

Для существующих в настоящее время автоматизированных систем управления тактического звена, а также для систем управления, находящихся в стадии разработки, характерно слияние функций управления подсистемой связи и информационного обмена с функциями подсистемы боевого управления и принятия решений. Вследствие этого, по мнению ряда специалистов [1–4], целесообразно рассматривать такие комплексы как единую информационно-управляющую систему (ИУС), в которой функции и процедуральные компоненты информационных и информационно-управляющих подсистем граничат с аналогичными компонентами подсистем связи и обмена данными.

В процессе функционирования такая ИУС синтезирует наряду с преобразованным в линейный код сигналом и служебные посылки унитарных кодов, обеспечивающих изменение параметров и режимов информационного обмена в соответствии с меняющимися условиями функционирования. Кроме того, поддерживают режим централизованного управления, реализация которого позволяет исключить выходящие за пределы декларированных унитарные коды, а в случае приема последовательности,

приводящей к нерегламентированным действиям или решениям, – нейтрализовать их путем коррекции протокола.

Однако наряду с происхождением конфликтного компонента за счет естественных ошибок приема/передачи в настоящее время все большее распространение получают искусственно синтезированные конфликтные компоненты, которые одновременно воздействуют как на низшем уровне (уровень обработки сигнала), так и на высшем уровне (уровень системы управления в целом). Применение таких воздействий направлено на снижение устойчивости функционирования ИУС (информационной устойчивости), что приводит к снижению качества боевого управления или, в худшем случае, к полной потере управления войсками и силами.

Поэтому особый интерес представляет разработка методологии оценки эффективности программных воздействий на систему управления (в рассматриваемом контексте – информационно-управляющую систему) тактического звена с целью повышения надежности боевого управления своими войсками и силами в условиях воздействий со стороны противника, а также для формирования собственных воздействий на аналогичные системы противника. По мнению авторов, такая методология должна строиться с учетом общих принципов построения и функционирования ИУС, а также использовать формализм, основанный на исследовании изменения вероятности реализации целевой функции ИУС в процессе конфликтного взаимодействия с учетом распределения информационного ресурса ИУС.

2. Методический подход к оценке эффективности программных воздействий на ИУС тактического звена

Принципы построения и функционирования ИУС и их элементов неоднократно рассматривались в известных работах [3–5], при этом в качестве базовых выделялись:

– принцип иерархии построения и функционирования системы, в соответствии с которым целевая функция низшего элемента системы должна быть согласована с целевой функцией высшего элемента;

– принцип единства форматов при информационном обмене;

– принцип соответствия информационного ресурса требуемому для решения поставленной задачи на каждом уровне;

– принцип динамического распределения информационного ресурса системы, в соответствии с которым ресурсы, выделяемые для решения задач ИУС, распределены по динамически изменяемой таблице приоритетов в зависимости от важности задачи в данный момент времени.

При этом в качестве основного рассматривается принцип единства системы, в соответствии с которым все компоненты ИУС образуют неразделяемое целое – систему, реализующий свою целевую функцию с условным выделением частных целевых функций отдельных элементов. Любая реакция в ИУС синтезируется по схеме:

сигнал →
преобразованная форма →
процессорная обработка →
первичная форма ответа →
преобразование к формату выхода →
сигнал.

Формально эта схема может быть представлена рекуррентным соотношением значения сигнала датчика S_D, фиксирующего *k*-е свойство *i*-го объекта на *j*-м шаге функционирования:

$$S_{D,j}(w_{i,j}^k) = S_{D,j}[w_{i,j-n}^k + \Delta w_{i,j-m}^k(S_{D,j-m}) \cdot P_{D,j}(S_{D,j-m}) + \Delta w_{i,j-m}^k(D_{i,j})],$$

где w – параметр свойства объекта, Δw – изменение свойства, P_D – вероятность влияния системы управления на свойства объекта, D – фактор собственного изменения свойств объекта в соответствии с решаемой центральной задачей и целевой функцией.

Необходимо отметить универсальность приведенного соотношения:

– при $P_D = 0 \ \forall \ i, j, k$ реализуется случай, когда центральной задачей ИУС является выработка оптимального поведения (стратегии) собственного функционирования при независимом поведении объекта взаимодействия (адаптация), в этом случае ИУС синтезирует некоторую дискриминационную (рабочую) поверхность $R(S_{Dj}, \Delta w_{i,j}^k)$; в соответствии с выбранной стратегией и изменением $\Delta w_{i,j}^k$ делается попытка на *j*-м шаге реализовать оптимальную траекторию движения рабочей точки на этой поверхности;

– при $P_D > 0$ хотя бы при одном наборе *i*, *j*, *k* ИУС решает задачу нахождения оптимального воздействия на объект;

– в качестве объекта может выступать другая ИУС, при этом в первом случае реализуется независимое функционирование двух систем, а во втором – взаимодействие (в том числе конфликтное) ИУС в общем информационном пространстве.

Учитывая, что центральной задачей (проблемной ориентацией) ИУС является управление (влияние на свойства) объектом или другой ИУС, то величина P_D представляет собой вероятность реализации целевой функции этой системы. Целевая функция при этом понимается как проблемно ориентированная операция, позволяющая на рассматриваемом уровне обработки (преобразовании) информации получить результирующий компонент, который, в свою очередь, может быть использован как исходный для целевой функции следующего уровня. В общем случае под целевой функцией можно понимать совокупность алгоритмов или формализованных правил получения решения для обработки входного потока данных и управления базами данных и знаний, реализуемых конкретной ИУС.

Предлагаемая в работе методология оценки эффективности программных воздействий на ИУС тактического звена основывается на исследовании изменения вероятности реализации целевой функции рассматриваемой системы в процессе

конфликтного взаимодействия с конкурирующими ИУС в общем информационном пространстве.

В соответствии с определением самого понятия информация [6] целесообразно рассматривать взаимодействие ИУС на трех уровнях: сигнальном, семантическом и прагматическом.

1. Сигнальный (аппаратный, интерфейсный) уровень определяется процедурами передачи, приема и обработки сигнала по энергетическим признакам. Для этого уровня наиболее характерны процедуры первичной обработки сигналов, формально представляемые преобразованием аналогового потока $S_{i,j}^{k}$, сформированного *i*-м объектом (или ИУС), в цифровой сигнал S_{Dj} оператором преобразования P_S в цифровую форму:

$$S_{Dj} = P_S\{S_{i,j}^{k}(t)\cdot k_N(t) + S_N(t)\},$$

где $k_N(t)$ – мультипликативная составляющая искажающего воздействия на передаваемый сигнал, $S_N(t)$ – аддитивная составляющая искажающего воздействия.

Реализуемые на этом уровне информационные технологии, как правило, консервативны [8], а входы/выходы элементов сопряжены или непосредственно с исполнительными устройствами (мульдемы, кодеки и т.п.), или с информационными системами более высокого уровня (автоматизированные системы картографирования и т.п.).

2. Семантический (программно-информационный) уровень определяется процедурами сопоставления сигнала его смысловой нагрузке (командам, данным). Выполняемые на этом уровне операции формально сводятся к выбору из упорядоченного множества $U_{i,j}^{k}$ унитарных кодов (например, команд процессора) последовательности S_{Wj} в соответствии с цифровым кодом S_{Dj} обрабатываемого сигнала

$$S_{Wj}(w) = P_{i,,j}^{k}[S_{Dj}, U_{i,j}^{k}, w_{i,j}^{k}(S_{Dj-m}, S_{Dj-n}), \Delta w_{i,j-m}^{k}, \Delta w_{i,j-n}^{k}],$$

где *m* и *n* – сдвиг по шагам (дискретному времени) обработки сигнала в двух взаимодействующих системах или элементах системы (фазовое рассогласование).

Приведенный функционал определяет связь между принимаемым сигналом, его формализованными свойствами (параметрами) на последовательных этапах обработки (m и n) и сопоставленной ему последовательностью команд (блоков команд, программ). На этом уровне рассмотрения дискриминационная поверхность представляет собой плоскость в многомерном пространстве унитарных кодов, последовательность которых образует на этой плоскости траекторию, реализующую целевую функцию ИУС или ее элемента. При этом целевая функция *k*-го элемента (ИУС), реализуемая *i*-й траекторией рабочей точки в пространстве унитарных кодов на *j*-м шаге реализации может путем некоторого преобразования координат, отображающего эту траекторию в точку в новом пространстве, деформировать плоскость дискриминационной характеристики,

образуя дискретное (в общем случае – многомерное) множество с центральной точкой, соответствующей центральной задаче системы.

3. Целевой (прагматический, управляющий) уровень определяется процедурами формирования решения и синтеза последовательности команд для реализации целевой функции. Фактически, на этом уровне решается задача синтеза управляющего воздействия с учетом пролонгации изменения свойств объекта воздействия, определение эффективности функционирования $g(S_{Wj}, U_{i,j}^k, \Delta w_{i,j}^k)$, а также выбор оптимальных характеристик воздействия на основе изменения свойств объекта $\Delta w_{i,j}^k$ при известном воздействии на него. Тогда процесс реализации целевой функции для решения центральной задачи на данном уровне можно формализовано представить в виде

$$S_C(U_{i,j}^k) = Arg \underset{\{i,j,k\}\subset U}{Max} \{g(S_{Wj}, U_{i,j}^k, \Delta w_{i,j}^k)\},$$

где U – область унитарных кодов, общих для взаимодействующих систем.

На данном уровне используются алгоритмы оптимизации принимаемых решений и адаптация процедуры синтеза решений. С точки зрения оптимальной реализации конфликтного компонента ИУС, это выражается реализацией условия сохранения максимума реализации целевой функции F_S при произвольном (в общем случае случайном) варьировании траектории движения рабочей точки по дискриминационной поверхности или ее случайной деформации

$$F_S(U_{i,j}^k + \Delta U_{i,j}^k) =$$
$$= Arg \underset{\{i,j,k\}\subset U}{Max} \{V_C^k \cdot g^k(S_{Wj}, U_{i,j}^k, \Delta w_{i,j}^k) - V_C^{k-n} \cdot g^{k-n}(S_{Wj-m}, U_{i,j-m}^{k-n}, \Delta w_{i,j-m}^{k-n})\},$$

где $\Delta U_{i,j}^k$ – адаптирующая добавка, определяемая при условии максимального различия показателя эффективности конфликтующих систем, V_C^k – функция управления k-м объектом или элементом.

Если рассматривать это выражение с точки зрения нейтрализации информационного конфликта (или исключения условий его возникновения) между элементами одной ИУС, тогда функция управления V_C^k направлена на минимизацию различия целевой функции при расхождении целевых функций элементов. В этом случае существует оптимальное соотношение между минимизирующей функцией и диапазоном отклонений траектории реализации целевой функции. При отсутствии централизованного управления функция V_C^k будет случайной и некоррелированной с аналогичной функцией для конкурента. В этом случае в полной мере реализуется информационный конфликт, связанный с распределением общих ресурсов в общем информационном пространстве.

На всех трех уровнях выполняются рекурсивные соотношения, связывающие состояние ИУС на предыдущих и последующем шаге:

$$\begin{cases} S_{Dj+1} = S_{Dj-1} + S_{Dj}(\Delta w_{i,j}^{k}), \\ S_{Wj+1} = S_{Wj-1} + S_{Wj}(\Delta w_{i,j}^{k}), \\ S_{Cj+1} = S_{Cj-1} + S_{Cj}(\Delta w_{i,j}^{k}). \end{cases}$$

На каждом шаге функционирования ИУС в режиме информационного конфликта переход системы из заданного начального состояния в требуемое конечное на каждом уровне рассмотрения осуществляется с некоторой вероятностью P, отличной от 1, в силу предполагаемой возможности реализации конфликтного компонента. Применительно к ИУС тактического звена это означает снижение качества боевого управления в результате программного подавления.

Вероятность реализации целевой функции ИУС является функцией начального и конечного состояний системы. Так, если начальное состояние ИУС есть s_0 (точка на дискриминационной поверхности системы), требуемое конечное состояние есть s (другая точка дискриминационной поверхности), N – общее число траекторий, исходящих из точки s_0 (т.е. число существующих в системе реализаций целевой функции для соответствующего входного потока), n – число траекторий, проходящих через s (т.е. соответствующих требуемому выходному потоку), то вероятность реализации целевой функции будет определяться как предел

$$P(s, s_0) = \lim_{N \to \infty} \frac{n}{N}\bigg|_{s,s_0} \approx \frac{n}{N}\bigg|_{s,s_0}.$$

Изменения целевой функции могут быть следствием различных условий реализации конкурентных компонентов в информационной среде ИУС. Однако всю совокупность конфликтных взаимодействий можно условно разделить на два класса [7]. К конфликтам первого рода отнесены конфликты, приводящие к деформации дискриминационной поверхности за счет искажений входного потока данных и наличия в них специфических структур при неизменности вида целевой функции (траектории движения точки по дискриминационной поверхности). К конфликтам второго рода отнесены конфликты, приводящие к изменению вида целевой функции при неизменности входного потока данных, т.е. искажающие траекторию движения рабочей точки по неизменной дискриминационной поверхности.

Независимо от рода конфликта вероятности реализации целевых функций ИУС изменяются в процессе взаимодействия, при этом в строгом конфликте задачи конкурирующих ИУС состоят в сохранении (максимизации) вероятности реализации своей целевой функции с одновременным снижением соответствующего показателя противника. При этом соответствующие изменения вероятностей могут быть рассчитаны с помощью системы уравнений динамического изменения вероятностей [6, 7], имеющей следующий вид

$$\begin{cases} P_1(X^k_{i,j}) = P_{0,1}(X^k_{i,j-1}) - \sum\limits_{m=2}^{M}\sum\limits_{v=1}^{V} Q_{1,m}\cdot P_{1,S}(X^v_{i,j-1})\cdot Q_{1,R}(X^k_{i,j-1}, X^v_{i,j-1}) \\ P_2(X^k_{i,j}) = P_{0,2}(X^k_{i,j-1}) - \sum\limits_{m=1,m\neq 2}^{M}\sum\limits_{v=1}^{V} Q_{2,m}\cdot P_{2,S}(X^v_{i,j-1})\cdot Q_{2,R}(X^k_{i,j-1}, X^v_{i,j-1}) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ P_N(X^k_{i,j}) = P_{0,N}(X^k_{i,j-1}) - \sum\limits_{m=1,m\neq n}^{M}\sum\limits_{v=1}^{V} Q_{N,m}\cdot P_{N,S}(X^v_{i,j-1})\cdot Q_{N,R}(X^k_{i,j-1}, X^v_{i,j-1}) \end{cases}, \quad (1)$$

где $P_N(X^k_{i,j})$ – текущая вероятность реализации N-й информационной системой своей целевой функции i-й последовательностью унитарных кодов для решения k-й задачи на основе j-й совокупности данных; $P_{0,N}(X^k_{i,j})$ – исходная вероятность реализации своей целевой функции N-й информационной системой (или элементом); $Q_{N,m}$ – вероятность доставки воздействия от m-й информационной системы к N-й; $P_{N,S}(X^v_{i,j})$ – вероятность ошибки реализации целевой функции N-й системой (компонентом) при воздействии i-й последовательностью унитарных кодов v-го типа информационного воздействия (программного подавления) при j-й последовательности (наборе) исходного массива; $Q_{N,R}(\ldots)$ – коэффициент восстановления информационной системы, определяющий количество пропускаемых реализаций целевой функции для восстановления исходного состояния $P_{0,N}(X^k_{i,j})$ или заданного допустимого уровня.

Эта система уравнений определяет динамику конфликта, т.е. изменение вероятности реализации целевой функции каждого из составляющих ИУС элементов $X^k_{i,j}$, и должна применяться с учетом конкретного вида коэффициентов $P(...)$, Q, $Q(...)$ на каждом уровне представления информации.

Большинство реальных конфликтов носят характер «дуэльных ситуаций», в которых выделяется взаимодействие только двух ИУС. В этом случае можно связать в системе уравнений (1) величину P_S, обусловленную воздействием конкурента, с вероятностью реализации его целевой функции, поскольку как реализация целевой функции, так и ее конфликтного компонента связаны с текущим состоянием системы. Тогда, в соответствии с (1), для конфликта двух информационных единиц можно записать

$$\begin{cases} P_1(X^k_{i,j}) = P_{0,1}(X^k_{i,j-1}) - P_2(X^k_{i,j-1})\cdot Q_{1,2}\cdot P_{1,2}(X^V_{i,j-1}) \\ P_2(X^k_{i,j}) = P_{0,2}(X^k_{i,j-1}) - P_1(X^k_{i,j-1})\cdot Q_{2,1}\cdot P_{2,1}(X^V_{i,j-1}) \end{cases}. \quad (2)$$

Такой подход позволяет проследить динамику конфликтного функционирования ИУС при реализации программного подавления со стороны конкурента на всех трех уровнях представления информации с учетом конкретного вида коэффициентов $P(...)$, Q, $Q(...)$.

Для определения эффективности программного подавления целесообразно рассмотреть процесс реализации конфликтного компонента как некоторый процесс синтеза информации в соответствующем элементе ИУС (так называемой, «квазиинформации» [8]) при достоверности p_h<1 (фактически, это вероятность отсутствия реализации воздействия, и поэтому она всегда меньше 1), которая

синтезируется на основе ретроспективной информации с достоверностью p_o=1 (например, реализация трафика в момент начала и при окончании передачи). При таком формализованном подходе для анализа процесса реализации конфликтного компонента достаточно выделить две его составляющие – искажение информационной структуры воздействием и ее восстановление самой ИУС.

Далее подход основывается на рассмотрении трех математических моделей: модели объекта воздействия (элемента ИУС), модели фона (прочие элементы ИУС), модели управляющего локального и/или глобального элементов, а также представления контура ранжирования процессов в ИУС и формирования области индифферентности (нечувствительности) в системе [6]. В этом случае для формального представления процесса программного подавления требуется определить два вектора состояний $P^{ko}{}_{i,j}(S)$ и $P^{kf}{}_{i,j}(S)$, характеризующих состояние показателей объекта воздействия и фона соответственно. В общем случае в соответствии с системой уравнений (1) и ее частным случаем для дуэльного режима (2) эти векторы можно выразить через показатели ξ состояний k-го объекта:

$$\begin{aligned} S_k^o &= S_{i,j}^{ko}(\xi_{1k}, \xi_{2k}, \xi_{3k} \ldots) \\ S_k^f &= S_{i,j}^{kf}(\xi_{1k}^f, \xi_{2k}^f, \xi_{3k}^f \ldots) \end{aligned} . \qquad (3)$$

Показатели и сами векторы в дальнейшем используются ИУС в качестве исходных данных для ранжирования целей в целевой функции с учетом основных F^{ko} и дополнительных F^{kf} ресурсов системы, основных показателей ξ объекта (или всей совокупности объектов). В этом случае с учетом весовых управляющих функций φ_{ik} и ψ_{ik} можно записать уравнение ресурса системы:

$$R_k^{\max}(v_{i,j}) = F^{ko} \cdot \varphi_{i,k}(q_{ik}, q_{2k} \ldots q_{N,k}) + F^{kf} \cdot \psi_{i,k}(\varepsilon_{ik}, \varepsilon_{ik} \ldots \varepsilon_{Nk}), \qquad (4)$$

где $R(...)$ – информационный ресурс системы с собственной (k-го объекта) и связанными фоновыми составляющими; $v_{i,j}$ – требуемый для реализации целевой функции объем статических и динамических ресурсов i-м элементом на j-м шаге реализации задачи; $\varphi_{ik}(...)$ и $\psi_{ik}(...)$ – весовые функции показателей и целей (фоновых ресурсов); q и ε – частные показатели (относительные) частных целевых функций и фоновых задач.

Для дальнейшего рассмотрения целесообразно ограничиться случаем адаптивного воздействия, т.е. рассматривать процесс программного подавления как последовательное приближение к требуемому решению в соответствии с системой уравнений (2). В этом случае в качестве частного критерия оценки эффективности можно рассматривать расход информационного ресурса, который для процедур с мягким отказом будет характеризовать возможности поддержки определенного числа процессов со своими весовыми функциями. Тогда с учетом базового соотношения Кобба–Дугласа информационный ресурс, требуемый k-м объектом на j-м шаге функционирования для реализации своей целевой функции n элементами, можно представить в виде

$$v_{i,j}^k(n) = a_{i,j} \cdot [V_{i,j}^k(n)]^{\alpha i} \cdot [D_{i,j}^k(n)]^{\beta i} \cdot L_{i,j}^k(n), \qquad (5)$$

где $a_{i,j} = a_{i,j}(\varphi_{i,j}, \psi_{i,j})$ – весовой коэффициент элемента целевой функции, реализуемого на j-м шаге; V – ресурс, требующийся для реализации целевой функции на j-м шаге функционирования; D – суммарный ресурс n элементов на j-м шаге реализации целевой функции или ее компонента; L – длина цикла реализации целевой функции; α и β – коэффициенты перекрытия циклов по логической и цикловой переменным.

С учетом (2), можно записать на основе выражения (5) для компонентов V и D на каждом шаге реализации целевой функции взаимодействующих компонентов систему уравнений баланса ресурса и времени:

$$\begin{cases} V_{i,j}^{k}(n) = V_{i,j-1}^{k}(n-1) + \varphi_{i,j}^{k}(n) \cdot \Delta V_{i,j-1}^{k}(n) \\ D_{i,j}^{k}(n) = D_{i,j-1}^{k}(n-1) + \psi_{i,j}^{k}(n) \cdot \Delta D_{i,j-1}^{k}(n) \end{cases}, \tag{6}$$

где $\varphi_{ik}(\ldots)$ и $\psi_{ik}(\ldots)$ – управляющие весовые функции.

Таким образом, в зависимости от цели исследования процесса реализации конфликтного компонента (снятие конфликта без заметного уменьшения вероятности реализации целевой функции «своей» ИУС или его развитие для минимизации вероятности реализации целевой функции ИУС противника) требуется максимизировать или минимизировать критериальную функцию (при введении нормировки по области определения этой функции она будет равна вероятности реализации целевой функции на всем интервале существования решения системы уравнений (2)) вида

$$P_{N,m}^{n} = \sum_{k=1}^{N}\sum_{i=1}^{m} V_{i,j}^{k}(n) =$$
$$= a_{i,j}^{k} \cdot [V_{i,j-1}^{k}(n-1) + \varphi_{i,j}^{k}(n) \cdot \Delta V_{i,j-1}^{k}(n)]^{\alpha i} \cdot \tag{7}$$
$$\cdot [D_{i,j-1}^{k}(n-1) + \psi_{i,j}^{k}(n) \cdot \Delta D_{i,j-1}^{k}(n)]^{\beta i} \cdot L_{i,j}^{k}(n)$$

при выполнении ограничений

$$\sum \varphi_{i,j}^{k}(n) \le 1; \quad 0 \le d_{\min}^{k}(n) \le \varphi_{i,j}^{k}(n) \le d_{\max}^{k}(n) \le 1, \tag{8}$$

$$\sum \psi_{i,j}^{k}(n) \le 1; \quad 0 \le c_{\min}^{k}(n) \le \psi_{i,j}^{k}(n) \le c_{\max}^{k}(n) \le 1, \tag{9}$$

где c и d – ограничения на ресурсы управления и количественные (временные) параметры циклов реализации целевой функции. Эти ограничения всегда существуют для реальной системы и фактически отражают ее способность реализовывать за заданный интервал времени алгоритм обработки входного воздействия при заданных ресурсах дополнительных систем и/или алгоритмов других задач.

Для реальных ИУС необходимо дополнить полученные выражения уравнением баланса ресурса:

$$w_{m,j}^{k}(n) = w_{m,j}^{k}(n-1) + \sum_{i=1}^{m} V_{i,j}^{k}(n) = w_{m,j}^{k}(n-1) +$$
$$+ \sum_{i=1}^{m} a_{i,j}^{k} \cdot [V_{i,j-1}^{k}(n-1) + \varphi_{i,j}^{k}(n) \cdot \Delta V_{i,j-1}^{k}(n)]^{\alpha i} \cdot \tag{10}$$
$$\cdot [D_{i,j-1}^{k}(n-1) + \psi_{i,j}^{k}(n) \cdot \Delta D_{i,j-1}^{k}(n)]^{\beta i} \cdot L_{i,j}^{k}(n)$$

где $w(n)$ – общий информационный ресурс, требуемый для реализации целевой функции n элементами на j-м шаге ее реализации k-м объектом.

С учетом дополнения (10) эффективность программного подавления можно описать системой (7) – (10) при ограничениях (8) и (9) на основе обеспечения (в зависимости от поставленной задачи) условия

$$\max\{P_{i,j}^{k}(n)\} = \max\ w(n)\,. \tag{11}$$

Задача может быть одна, поскольку $\max\{P\}$ – это $1-\min\{P\}$.

Алгоритм решения задачи (11) в наиболее общем виде приведен в [6]. Он основан на составлении гамильтониана системы

$$\begin{aligned} H(n) &= \sum_{i=1}^{m} z_i(n)\cdot[V_{i,j}^{k}(n-1)+\varphi_{i,j}^{k}(n)\Delta V_{i,j}^{k}(n)]+ \\ &+\sum_{i=1}^{m} y_i(n)\cdot[D_{i,j}^{k}(n-1)+\psi_{i,j}^{k}(n)\Delta D_{i,j}^{k}(n)]+x(n)\cdot w(n-1)+ \\ &+x(n)\cdot\sum_{i=1}^{m} a_{i,j}^{k}\cdot[V_{i,j}^{k}(n-1)+\varphi_{i,j}^{k}(n)\Delta V_{i,j}^{k}(n)]^{\alpha i}\cdot \\ &\cdot[D_{i,j}^{k}(n-1)+\psi_{i,j}^{k}(n)\Delta D_{i,j}^{k}(n)]^{\beta i}\cdot L_{i,j}^{k} \end{aligned}, \tag{12}$$

на основе которого получается сопряженная система

$$\begin{aligned} z_i(n) &= \frac{\partial H(n)}{\partial V_{i,j}^{k}(n-1)}= \\ &= z_i(n)+\alpha_i x_i(n)\cdot a_i[V_{i,j}^{k}(n-1)+\varphi_{i,j}^{k}(n)\Delta V_{i,j}^{k}(n)]^{\alpha i-1}\cdot, \\ &\cdot[D_{i,j}^{k}(n-1)+\psi_{i,j}^{k}(n)\Delta D_{i,j}^{k}(n)]^{\beta i}\cdot L_{i,j}^{k} \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} y(n-1) = z_i(n) &= \frac{\partial H(n)}{\partial D_{i,j}^{k}(n-1)}= \\ &= y_i(n)+a_i x_i(n)\cdot\beta_i[V_{i,j}^{k}(n-1)+\varphi_{i,j}^{k}(n)\Delta V_{i,j}^{k}(n)]^{\alpha i-1}\cdot, \\ &\cdot[D_{i,j}^{k}(n-1)+\psi_{i,j}^{k}(n)\Delta D_{i,j}^{k}(n)]^{\beta i}\cdot L_{i,j}^{k} \end{aligned} \tag{14}$$

$$x(n-1) = \frac{\partial H(n)}{\partial v_{i,j}^{k}(n-1)} = x(n) = Const \tag{15}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} z_i(N) &= \frac{\partial w(N)}{\partial V_{i,j}^{k}(N)} = 0 \\ y_i(N) &= \frac{\partial w(N)}{\partial D_{i,j}^{k}(N)} = 0\,. \\ x_i(N) &= \frac{\partial w(N)}{\partial w(N)} = 1 \end{aligned} \tag{16}$$

С учетом этих граничных условий гамильтониан (12) и сопряженная система принимают вид

$$H(n) = \sum_{i=1}^{m} z_i(n) \cdot [V_{i,j}^k(n-1) + \varphi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)] + \\ + \sum_{i=1}^{m} y_i(n) \cdot [D_{i,j}^k(n-1) + \psi_{i,j}^k(n)\Delta D_{i,j}^k(n)] + \\ + w(n-1) + \sum_{i=1}^{m} \alpha_i [V_{i,j}^k(n-1) + \varphi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)]^{\alpha i} \cdot \\ \cdot [D_{i,j}^k(n-1) + \psi_{i,j}^k(n)\Delta D_{i,j}^k(n)]^{\beta i} \cdot L_{i,j}^k \quad , \tag{17}$$

$$z(n-1) = z_i(n) + a_i\alpha_i [V_{i,j}^k(n) + \varphi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)]^{\alpha i - 1} \cdot \\ \cdot [D_{i,j}^k(n-1) + \psi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)]^{\beta i} \cdot L_{i,j}^k \quad , \tag{18}$$

$$y(n-1) = y_i(n) + a_i\beta [V_{i,j}^k(n) + \varphi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)]^{\alpha i} \cdot \\ \cdot [D_{i,j}^k(n-1) + \psi_{i,j}^k(n)\Delta D_{i,j}^k(n)]^{\beta i - 1} \cdot L_{i,j}^k \quad . \tag{19}$$

Необходимо отметить, что, в соответствии с условием оптимальности системы управления, для уравнений (2) и, соответственно, уравнений (6) и (11) необходимо, чтобы для системы $[\varphi(n), \psi(n)]$ при ограниченном n выполнялось условие, при котором функция Гамильтона (12) в области определения достигала максимума. Для определения этого значения в [6] предлагается воспользоваться алгоритмом, который основан на градиентном методе оптимизации приращений целевой функции:

$$\delta P_{i,j}^k = \delta w(n) \sum_{n=1}^{N} \sum_{i=1}^{m} [g_i(n) \cdot \delta\varphi_{i,j}^k(n) + r_i(n)\psi_{i,j}^k(n)] , \tag{20}$$

где $g_i(n) = \dfrac{\partial H(n)}{\partial \varphi_{i,j}^k(n)}$, $r_i(n) = \dfrac{\partial H(n)}{\partial \psi_{i,j}^k(n)}$.

Откуда с учетом (13) получается

$$g_i(n) = z_i(n)\Delta V_{i,j}^k(n) + a_i\alpha_i [V_{i,j}^k(n-1) + \varphi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)]^{\alpha i - 1} \cdot \\ \cdot [D_{i,j}^k(n-1) + \psi_{i,j}^k(n)\Delta D_{i,j}^k(n)]^{\beta i - 1} \cdot L_{i,j}^k \cdot \Delta V_{i,j}^k(n) \quad , \tag{21}$$

$$r_i(n) = y_i(n)\Delta D_{i,j}^k(n) + a_i\beta_i [V_{i,j}^k(n-1) + \varphi_{i,j}^k(n)\Delta V_{i,j}^k(n)]^{\alpha i} \cdot \\ \cdot [D_{i,j}^k(n-1) + \psi_{i,j}^k(n)\Delta D_{i,j}^k(n)]^{\beta i - 1} \cdot L_{i,j}^k \cdot \Delta D_{i,j}^k(1) \quad , \tag{22}$$

а с учетом (13) – (16)

$$g_i(n) = z_i(n)\Delta V_{i,j}^k(n) \\ r_i(n) = y_i(n)\Delta D_{i,j}^k(n) \quad . \tag{23}$$

Приведенный алгоритм определения эффективности программного воздействия имеет итерационный характер и для некоторой *K*-й итерации целевая функция отражает управляющее воздействие

$$\{\varphi^K(n),\ \psi^K(n)\} .$$

Решая систему (2) с учетом (12) при приведенном выше заданном целевом управлении можно рассчитать *K*-е приближение $\{V, D\}$. Подставляя эти значения в (10) и опуская индекс *K* (которое полагается конечным) уравнение баланса ресурса можно представить в виде

$$w(n) = w(n-1) + \sum_{i=1}^{m} v_i(n) = w(n-1) + \sum_{i=1}^{m} \{a_i V(n) D(n)\}^{\beta i} \cdot L_i \ . \qquad (24)$$

После этого необходимо определить K-е приближение решения сопряженной системы, которое приводится к виду [6]:

$$\begin{aligned} z_i(n-1) &= z_i(n) + \Delta z_i(n) \\ y(n-1) &= y(n) + \Delta y(n) \end{aligned}, \qquad (25)$$

где $\Delta z_i(n) = \dfrac{\alpha_i v_i(n)}{V_{i,j}^k(n)}$, $\Delta y_i(n) = \dfrac{\beta_i v_i(n)}{D_{i,j}^k(n)}$.

Далее несложно определить искажения градиента целевой функции при реализации конфликтного компонента, исходя из условия $\max\{\delta w^k(N)\}$. Последнее выражение определяется на основе (20) при ограничениях (16).

Таким образом, проводя последовательные итерации по приведенному выше алгоритму можно получить значения искажения целевой функции или расход ресурса на компенсацию (нейтрализацию) воздействия, характеризующие эффективность программного подавления ИУС, которые будут характеризовать достижимые значения (т.е. оптимальные параметры) при условии

$$\begin{cases} \varphi_{i,j}^{k,K}(n) = \varphi_{i,j}^{k,K+1}(n) \\ \psi_{i,j}^{k,K}(n) = \psi_{i,j}^{k,K+1}(n) \end{cases}. \qquad (26)$$

Кроме этого, может быть использовано более слабое условие оптимальности получаемых значений, которое выражается через отсутствие изменений при вариации возмущения (информационного воздействия), т.е. когда

$$\left| w^K(n) - w^{K-1}(n) \right| < \varepsilon \ ,$$

где ε – оценка точности определения вероятности реализации целевой функции.

3. Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет оценить эффективность программного подавления конкретной ИУС тактического звена на основе исследования изменения параметров системы (вероятности реализации целевой функции и баланса информационного ресурса) при реализации конфликтного компонента.

Литература

1. Борисов В. И. Воронежский НИИ связи – 40 лет на рынке информационных технологий. // Теория и техника радиосвязи, 1998. Вып. 1. – С. 8-17.
2. Конторов Д. С., Конторов М. Л., Слока В. К. Радиоинформатика. М.: Радио и связь, 1993. 296 с.
3. Толстых Н. Н., Власов Ю. Б, Николаев В. И., Толстых И. О., Челядинов Ю. В. Оценка потенциальной опасности потоков данных в инфокоммуникационной системе. // Радиотехника, 2012. №8. – С. 33-39.
4. Алферов А. Г., Толстых Н. Н., Толстых И. О., Челядинов Ю. В. Формализованное представление эволюционирующего информационного конфликта в телекоммуникационной системе. // Радиотехника, 2012. №8. – С. 27-32.
5. Пятунин А. Н., Толстых Н. Н., Павлов В. А. и др. Оценка возможности применения метода координации при моделировании конфликтного функционирования автоматизированных

телекоммуникационных систем. Труды научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь», 24 – 26 апреля 2001, Воронеж.
6. Павлов В. А. Формализованное представление реализации конфликтного компонента в телекоммуникационных системах. Труды научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь», 24 – 26 апреля 2001, Воронеж.
7. Павлов В. А., Павлов Р. В., Толстых Н. Н. Обобщенная модель процесса функционирования автоматизированных систем в режиме информационного конфликта. // Информация и безопасность, 1999. № 4.
8. Буслов С. Д, Павлов В. А., Сидоров Ю. В., Толстых Н. Н. Особенности анализа информационного конфликт в автоматизированных системах. // Теория и техника радиосвязи, 1999. Вып. 2.

REFERENCES

1. Borisov V. I. Voronezh Communications Research Institute – 40 years on the information technology market. // Theory and technology of radio communications, 1998. Vol. 1. - Pp. 8-17.
2. Kontorov D. S., Kontorov M. L., Sloka V. K. Radioinformatics. M .: Radio and communication, 1993. 296 p.
3. Tolstykh N. N., Vlasov Yu. B, Nikolaev V. I., Tolstykh I. O., Chelyadinov Yu. V. Estimation of the potential hazard of data flows in the information and communication system. // Radio engineering, 2012. No 8. - Pp. 33-39.
4. Alferov A. G., Tolstykh N. N., Tolstykh I. O., Chelyadinov Yu. V. Formalized representation of an evolving information conflict in a telecommunication system. // Radio engineering, 2012. No 8. - Pp. 27-32.
5. Pyatunin A. N., Tolstykh N. N., Pavlov V. A. and others. Assessment of the possibility of using the coordination method in modeling the conflict functioning of automated telecommunication systems. Proceedings of the scientific and technical conference «Radiolocation, Navigation and Communication», April 24 – 26, 2001, Voronezh.
6. Pavlov V. A. Formalized representation of the implementation of the conflict component in telecommunication systems. Proceedings of the scientific and technical conference «Radiolocation, Navigation and Communication», April 24 – 26, 2001, Voronezh.
7. Pavlov V. A., Pavlov R. V., Tolstykh N. N. A generalized model of the process of functioning of automated systems in the mode of information conflict. // Information and Security, 1999. № 4.
8. Buslov S. D, Pavlov V. A., Sidorov Yu. V., Tolstykh N. N. Features of the analysis of informational conflict in automated systems. // Theory and technology of radio communications, 1999. Vol. 2

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕТЯМИ СВЯЗИ

А.В. Боговик, О.А. Кривов

АО «НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются основные методы моделирования организационных структур систем оперативного управления, которые могут быть использованы при решении задач проектирования и построения современных и перспективных систем оперативного управления сетями связи.

Ключевые слова: организационная структура; система оперативного управления; сети связи; проектирование.

METHODOLOGICAL APPROACH TO ORGANIZATION STRUCTURES MODELLING OF OPERATIONAL MANAGEMENT SYSTEMS OF COMMUNICATION NETWORKS

A.V. Bogovik, O.A. Krivov

AO «NII «Rubin», Saint-Petersburg, Russia

Abstract. In article the main methods of organization structures modeling of operational management systems, which can be used at a problems solution of design and creation of modern and perspective systems of operational management of special purpose communication networks, are considered.

Keywords: organization structure; operational management system; communication network; design.

1. Введение

Современные сети связи постоянно совершенствуются и развиваются. Интересы обеспечения эффективности процессов оперативного управления современными и перспективными сетями связи требуют развития и применения соответствующих методов анализа и синтеза для решения задач проектирования рациональных иерархических структур систем оперативного управления и алгоритмов их функционирования.

В общем случае, процесс разработки организационных структур систем оперативного управления (ОС СОУ) следует рассматривать как итерационно-циклический процесс, реализуемый в рамках структурно-параметрического описания ОС СОУ как объекта проектирования с использованием графов. При этом формирование вершин графа в структурном плане обеспечивается процедурами вертикальной и горизонтальной структуризации целей и задач ОС СОУ. Варианты вертикальной структуризации задач будут отображать множество альтернатив иерархического представления ОС, а варианты их горизонтальной структуризации дают возможность определить альтернативы их структурного представления на горизонтальных уровнях. Структурно-параметрическое описание ОС СОУ с использованием графов обеспечивает декомпозицию процесса проектирования ОС и содержит уровневую этапную

декомпозицию ОС СОУ и процесса ее проектирования. В целом решение этой сложной задачи требует пространства структурно-параметрических описаний альтернативных вариантов организации ОС и разработки определенных правил, связывающих процессы раскрытия вершин графа, в том числе и с применением экспертной информации.

2. Общая постановка задачи проектирования организационной структуры системы оперативного управления сетью связи

Общая постановка задачи проектирования организационной структуры системы оперативного управления сетью связи может быть следующей.

Пусть варианты решений (альтернатив) оргструктуры СОУ описываются набором (вектором) параметров $S_n \in E^{N_n}$ размерности N_n, принимающим значения из множества S_n^0.

Используя модели функционирования ОС, можно провести анализ поведения альтернативных вариантов оргструктуры во времени и во внешней среде. Сравнение результатов функционирования для всевозможных пар альтернатив из S_n^0 определяется на множестве S_n^0: альтернатива S_{nx} эффективнее альтернативы S_{ny} тогда и только тогда, когда $\left(S_{nx}, S_{ny}\right) \in \Phi$ или $\left(S_{nx}\,\hat{\mathrm{O}}\,S_{ny}\right)$, где Ф – бинарное отношение.

В зависимости от свойств модели $\left(S_n,\ \Phi\right)$ приемлемыми могут оказаться следующие решения: множество всех мажорант модели $\left(S_n,\ \Phi\right)$, ядро ее смешанного расширения, ядро модели $\left(S_n,\ \Phi^T\right)$, где Φ^T – транзитивное замыкание отношения Ф и др. Наиболее общей постановкой задачи проектирования ОС СОУ является:

$$S_n \rightarrow S_n^* = C\left(S_n\right), \qquad (1)$$

где $C\left(\bullet\right)$ – некоторая функция выбора.

Так как всякая функция выбора может быть представлена в конечном счете в виде композиции нормальных функций выбора, то она в полной мере определяется совокупностью бинарных отношений на множестве S_n. Таким образом, язык бинарных отношений является наиболее приемлемым для решения задач проектирования СОУ. Тогда под задачей проектирования ОС СОУ будем понимать задачу выделения ядра – множества максимальных элементов из S_n^0 по бинарному отношению Ф:

$$S_n^0 \rightarrow S_n^* = \max\left(S_n,\ \Phi\right), \qquad (2)$$

где Ф в общем случае имеет нечеткий характер.

Наличие нечеткости отношений предпочтения альтернатив связано со сложностью объекта проектирования, с невозможностью в ряде случаев полной централизации всех процессов сбора и обработки информации и принятия решений. Это определяет необходимость декомпозиции ОС СОУ и этапную декомпозицию процесса проектирования.

Каждому этапу проектирования сопоставляется своя модель функционирования ОС

СОУ, а постоянное, поэтапное усложнение задачи связано с расширением состава учитываемых в моделях параметров и их взаимосвязей. В итоге процесс проектирования приобретает иерархический характер.

Отношение Ф порождается параметрическим семейством критериев сравнительной эффективности ОС $\left(W\left(S_n\right)\right)$.

Нечеткость и векторный характер эффективности формируемых оргструктур определяют особенности методов сравнительной эффективности альтернатив $S_{ni}\,\varepsilon\, S_n^0$. Учитывая векторный характер критериев эффективности, можно рассматривать различные способы задания бинарных отношений Ф на S_n^0. При этом наиболее употребительными в практических приложениях проектирования ОС СОУ являются бинарные отношения Парето на конечные множества.

Тогда задача оптимизации ОС СОУ состоит в отыскании

$$\mathrm{Arg}\ \underset{S_n\in S_n^0}{\mathrm{extr}} W\left(S_n\right), \tag{3}$$

где extr есть min или max в зависимости от вида скалярной функции.

Векторный критерий эффективности функционирования оргструктур СОУ может быть представлен группами взаимно противоположных критериев: с одной стороны, это критерии реальной продуктивной деятельности должностных лиц (вероятности своевременного и безошибочного решения оперативно-тактических задач или их время решения), а с другой – стоимостные, массогабаритные и т. п. показатели, то наиболее эффективен метод линейной многокритериальной скаляризации .

При этом

$$W\left(S_n\right)=\sum_{i=1}^{m_n}\lambda_i W_i^O\left(S_n\right), \tag{4}$$

где λ_i – весовые коэффициенты, $0\le\lambda_i\le 1$;

$\sum_{i=1}^{m_n}\lambda_i=1$; $W_i^O\left(S_n\right)$ – нормированное значение i-го частного критерия

$$0<W_i^O\left(S_n\right)\le 1.$$

Для нормирования векторов $W_i\left(S_n\right)$ используются предельные значения составляющих вектора эффективности $W_{i\,\text{пред}}$, определение которых осуществляется на основе решения задач оптимизации с условным критерием предпочтения, т. е.

$$\underset{S_n\in S_n^0}{\mathrm{opt}}\, W_i\left(S_n\right)\ \text{при}\ W_j\left(S_n\right)\subset\Delta W_j;\ \ j=\overline{1,m_n};\ j\ne i, \tag{5}$$

где ΔW_j – область допустимых значений j-го критерия эффективности ОС.

Данную проблему связывают с определением области компромиссов по эффекту или затратам на организацию функционирования ОС СОУ. Это приводит к сужению множества решений и необходимости решения задачи векторной оптимизации при наличии строгого противоречия между отдельными показателями качества.

Таким образом, задачу проектирования ОС СОУ на всех этапах ее реализации следует рассматривать как многокритериальную задачу векторной оптимизации, решение которой обеспечивается последовательным сравнением альтернатив организации ОС СОУ по эффективности на основе моделирования целевого применения системы. Иерархический характер процесса проектирования при этом определяет только лишь сложность самих моделей выбора.

Специфической особенностью задач проектирования организационных структур систем оперативного управления сетями связи является их высокая размерность. Данный факт практически исключает возможность применения полного перебора проектных решений и определяет необходимость поиска путей сокращения анализа альтернатив в задачах проектирования ОС СОУ. В этом плане актуальным может явиться применение метода последовательного анализа альтернатив проектных решений, использующих специфику решаемых задач.

Рассмотрим задачу проектирования ОС СОУ как задачу отыскания ядра альтернатив.

$$S_n \rightarrow S_n^* = \max\left(S_n, \Phi\right), \qquad (6)$$

где S_n – множество конкурирующих вариантов организации ОС СОУ.

Тогда суть последовательного анализа проектных решений ОС СОУ может быть сведена к применению на каждой j-й итерации метода некоторого "правила отбраковки" альтернатив ОС СОУ, определяемого содержанием решаемой задачи, т. е.

$$S_{n\,j-1} \rightarrow S_{n\,j} = S_{n\,j-1} \setminus \Omega_j, \qquad (7)$$

где Ω_j – множество альтернатив организации СОУ, отбракованных на j-й итерации проектирования организационной структуры. Решением служит получаемое на выходе, т. е. на kn-шаге процедуры, множество S_{nk}.

К правилам отбраковки предъявляются два требования: во-первых, правила отбраковки проектных решений должны быть согласованы с отношением Ф эффективности работы оргструктуры СОУ с тем, чтобы множество S_{nk} должным образом аппроксимировало искомое ядро решения задачи S_n^*, т. е. $\left(S_{nk} \supseteq S_n^*\right)$, во-вторых, правила отбраковки должны реализовываться "быстрыми", "упрощенными" алгоритмами.

Необходимость включения в общую систему проектирования оргструктур "быстрых" алгоритмов поиска опорных (базовых) вариантов ОС СОУ наряду с алгоритмами глобальной оптимизации ОС, получила строгое логическое подтверждение. В рамках этого же подхода может быть определено их положение в общей структуре последовательного применения технических средств проектирования ОС СОУ.

На рисунке 1 приведена структурная схема последовательного проектирования ОС СОУ. В ней согласование требований внешнего и внутреннего процессов проектирования системы обеспечивается процедурами генерирования вариантов ОС на основе

автоматического формирования альтернативных вариантов вертикальной и горизонтальной структуризации задач, решаемых ОС.

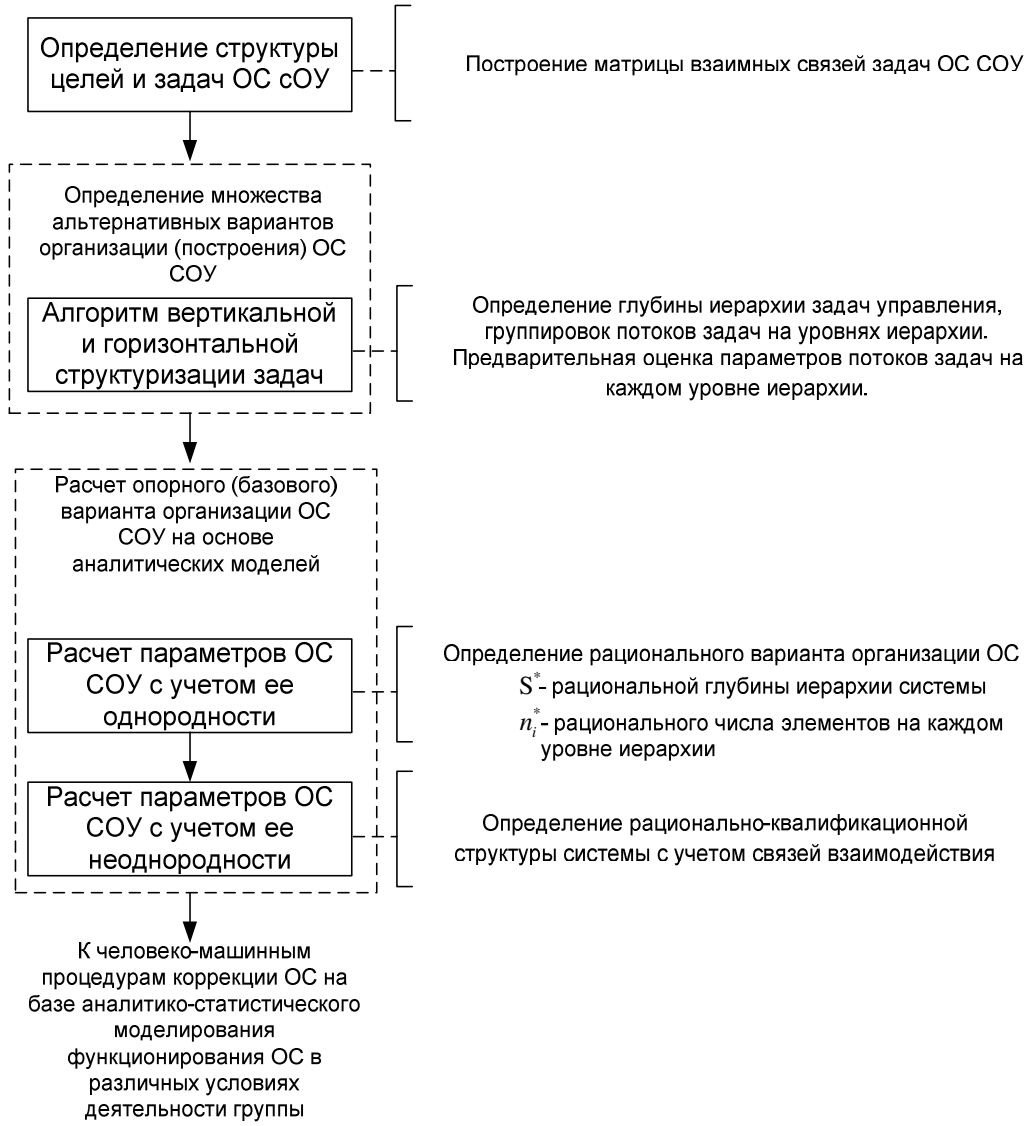


Рис.1. Структурная схема процесса последовательного проектирования организационной структуры системы оперативного управления

Формирование базовой структуры ОС СОУ обеспечивается последовательно применяемыми аналитическими алгоритмами расчета параметров ОС.

Дальнейшее уточнение структуры ОС СОУ обеспечивается уже более сложными методами на основе аналитико-статистического моделирования с применением человеко-машинных методов принятия решений. Наличие базового варианта в процессе последовательного проектирования ОС дает возможность упростить ряд зависимостей и перейти от нелинейных моделей к линейным в окрестности базового варианта организации ОС СОУ.

Таким образом, методология последовательного проектирования ОС предполагает наличие иерархически взаимосвязанных постепенно усложняющихся, в основном за счет

расширения числа учитываемых факторов, моделей функционирования ОС СОУ. На каждом уровне иерархии последовательного проектирования решается свой комплекс задач. Это позволяет, с одной стороны, экономить ресурсы, отпускаемые на решение проектных задач, а с другой – адаптировать сам процесс проектирования в условиях усложнения и расширения взаимного влияния факторов, определяющих эффективность СОУ.

3. Заключение

Реализация предлагаемого подхода к решению задач проектирования рациональных вариантов организационных структур СОУ требует, во-первых, формального описания процесса иерархического проектирования, формально выражаемого в процедурах декомпозиции и агрегирования, а во-вторых, требует детального анализа условий согласования отношений предпочтения альтернативных вариантов ОС СОУ на различных уровнях иерархии.

Рассмотренные и предлагаемые в статье методы и модели могут быть рекомендованы для использования при разработке методик синтеза организационных структур систем оперативного управления сетями связи при их проектировании и построении.

Литература

1. Боговик А.В., Игнатов В.В. Теория управления в системах военного назначения. Учеб. – СПб.: ВАС, 2008. – 460 с.
2. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки – СПб.: ВАС, 2006. – 184 с.
3. Месарович М.Д., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. Пер. с англ., М.,Мир, 1973.
4. Методы математического моделирования систем и процессов связи. Под общ. ред. Чемиренко В.П. С-Пб. Изд-во Политехнического университета. 2009. - 308 с.

References

1. Bogovik A.V., Ignatov V.V. The theory of management in military systems. Studies. – SPb.: MAC, 2008. – 460 p.
2. Bogovik A.V., Ignatov V.V. Efficiency of military communication systems and methods of its assessment – SPb.: MAC, 2006. – 184 p.
3. Mesarovich M.D., Mako D., Takahara I. Theory of hierarchical multilayer systems. Translation from English, M., World, 1973.
4. Mathematical modeling methods of systems and processes of communication. Under a general edition of Chemirenko V.P. SPB. Publishing house of the Polytechnical university. 2009. - 308 p.

МЕТОДЫ И ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.В. Боговик, О. А. Кривов

АО «НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается и предлагается методологический подход к оценке эффективности и оптимизации телекоммуникационных систем с учетом их многоуровневого иерархического построения.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления связью, качество телекоммуникационных систем, телекоммуникационные системы, эффективность, оптимизация.

METHODS AND PRINCIPLES OF EFFICIENCY ASSESSMENT AND OPTIMIZATION OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS

A.V. Bogovik, O.A. Krivov

AO «NII «Rubin», Saint-Petersburg, Russia

Abstract. In article methodological approach to efficiency assessment and optimization of telecommunication systems, taking into account their multilevel hierarchical creation, is considered and offered.

Keywords: automated management systems of communication, telecommunication systems quality, telecommunication systems, efficiency, optimization.

1. Введение

Качество управления в автоматизированных системах управления связью (АСУС), решение задач построения современных и перспективных телекоммуникационных систем, функционирующих в условиях противоборства, требует наличия в арсенале должностных лиц органов управления связью соответствующего методического аппарата, применение которого будет способствовать достаточно продуктивно выполнять процедуры анализа и синтеза телекоммуникационных систем с учетом их многоуровневой иерархической архитектуры. Реализация современных требований к системам телекоммуникаций– это проблема, которая сегодня особенно актуальна. В рамках этой общей проблемы необходимо решать частные проблемные вопросы, в том числе и те, которые направлены на совершенствование систем поддержки организационного управления, методов и приемов оценки эффективности и оптимизации при принятии решений по построению и обеспечению функционирования телекоммуникационных систем в различных условиях их применения.

2. Обоснование процедуры оценивания эффективности в многоуровневых иерархических системах

Управляемые телекоммуникационные системы являются, как правило, многоуровневыми и иерархическими.

При таком представлении подсистема k-го уровня иерархии характеризуется совокупностью некоторых параметров состояния объекта управления S и управлений V, так называемых внутренних (или собственных) параметров.

Объектом управления k-го уровня при заданных (фиксированных) входном процессе (продукте) X, внешних воздействиях N, выделенном ресурсе R и поставленных целях Z реализуется выходной процесс (продукт) Y, характеризуемый некоторой совокупностью свойств – показателей качества Q.

$$Q(t) = Q\{t : Y(S,V)/X, N, R, Z\} \quad (1)$$

При оптимальном управлении управляющий орган k-го уровня решает задачу отыскания такого управления объектом, при котором достигается наилучшее качество выходного процесса (продукта):

$$V_{opt} = \arg \underset{\{V\}}{extr} Q\{\bullet\} \quad (2)$$

Реализуемое при этом наилучшее качество $Q_e = \underset{\{V\}}{extr} Q\{\bullet\}$ является внешним показателем подсистемы k-го уровня иерархии. О реализуемом качестве Q_e выходного процесса Y управляющий орган k-го уровня информирует вышестоящий (k+1)-й.

Управляющий орган (k+1)-го уровня оценивает эффективность работы системы k-го уровня (своего объекта управления) путем определения степени выполнения поставленных целей:

$$Э = F\{Z, Q, (R, X)\}$$

Если эффективность нижестоящего уровня не удовлетворяет вышестоящий, то он может осуществить корректирующее воздействие K в виде изменения цели Z, выделенного ресурса R или коррекции входного процесса X.

Задача оптимального управления в данном случае будет решаться аналогично предыдущей, т.е. сводится к задаче отыскания

$$K_{opt} = \arg \underset{\{k\}}{extr} Э\{\bullet\} \quad (3)$$

В общем случае воздействие со стороны высшего уровня иерархии на низший может осуществляться посредством:

корректировки его целей (уровень целей);

корректировки образов, моделей, взаимосвязей (уровень представлений);

корректировки ресурсов (ограничений, альтернативных действий и т.д.) для выполнения поставленных целей (уровень ограничений).

Часто цель системы формулируют в виде некоторой совокупности требований к ее выходному процессу (выдаваемому продукту или услугам) – качественным показателям.

Тогда под эффективностью системы понимается степень выполнения заданных требований, определяемых функционалом:

$$Э = F\{Q^*, Q(R, X)\}. \quad (4)$$

Функционал $F\{\bullet\}$ обычно называется критерием эффективности и отражает меру близости внешних показателей системы $Q(R, X)$ к требуемым Q^* при конкретных выделенном ресурсе и входном процессе X (нагрузке на систему).

Декомпозиция сложной иерархической системы на совокупность двухуровневых систем позволяет производить оценку эффективности любого уровня иерархии независимо от других с общих методологических позиций.

При этом для оценки эффективности любого уровня иерархии необходимо:

задать (определить) требования к внешним показателям системы (Q^*) и ресурс, выделяемый для их достижения (R);

определить условия функционирования системы, заключающиеся в задании внешних воздействий на систему (N) и характеристик входного процесса (X);

определить понятие внутреннего состояния системы (S);

определить связь между показателями качества Q, внутренним состоянием системы S для заданных ресурса R и условий X, N, то есть разработать модель системы;

и, наконец, определить целевой функционал (критерий эффективности) F.

Формально это означает, что в системе математических моделей должна существовать некоторая последовательность образования понятий на каждом уровне обобщения из понятий нижестоящего уровня или базового уровня описания:

$$\Phi_V : S \to V;\ \Phi_K : V \to K \tag{5}$$

Предполагается также, что существует операторы обратного отображения понятий языка верхнего уровня на язык нижестоящего уровня описаний:

$$\overline{\Phi}_V : K \to V;\ \overline{\Phi}_S : V \to S \tag{6}$$

Понятия (элементы) языков разных уровней при этом должны соотноситься как:

$$\begin{aligned} &\Phi_{U_i} : \{S_{\mu_i}\} \to u_i;\ \Phi_{K_S} : \{u_{ij}\} \to K_j \\ &\overline{\Phi}_{ij} : k_j \to \{u_{ij}\};\ \overline{\Phi}_{S_i} : u_i \to \{S_{\mu_i}\}. \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь Φ и $\overline{\Phi}$ – операторы формирования понятий верхнего уровня из некоторого набора понятий нижнего уровня и наоборот.

3. Постановка решения задач оценки эффективности и оптимизации телекоммуникационных систем

Оценка эффективности функционирования телекоммуникационных систем и их элементов является составной частью анализа, проводимого на различных этапах жизненного цикла систем (при определении путей развития, проектирования, создания и применения по назначению).

В общем случае под системным анализом понимают совокупность методов выявления рациональных решений, базирующихся на использовании количественных оценок достигаемого эффекта и необходимых затрат.

Для многоуровневых систем, в которых общая цель разбивается на частные подцели, основной задачей анализа является получение обоснованных ответов на вопросы:

на что целесообразно тратить ресурсы, то есть, между какими целями их распределить;

в каком соотношении распределять ресурсы, то есть, какой объем ресурсов выделить на каждую цель.

Решение этих взаимосвязанных вопросов составляет суть проводимого анализа с системных позиций. Критерием распределения ресурсов между отдельными целями,

очевидно, является получение максимальных совокупных результатов на основе использования всего объема ресурсов.

Системный анализ предполагает оценку трех групп показателей существенных свойств: военных, экономических и временных.

Военные показатели определяют цель деятельности (конечный результат) системы в целом и ее элементов.

Экономические показатели отражают объем требуемых (или израсходованных) на достижение цели ресурсов.

Для достижения согласованности действий элементов в многоуровневых системах, как военные, так и экономические показатели не отделимы от временных, определяющих сроки достижения частных и общих целей и, следовательно, и сроки расходования ресурсов.

При этом следует иметь в виду, что путей достижения цели может быть несколько, а, следовательно, различными будут сроки (длительность) достижения цели, объем израсходованных ресурсов и степень достижения цели. Поэтому военно-экономический анализ предполагает в общем случае оценку трех групп показателей: эффекта (Э), затрат (З) и времени (Т).

В зависимости от поставленной цели анализа выходной результат решения задачи может быть двух видов:

значения основных показателей альтернативных вариантов: ожидаемого эффекта, времени его достижения (получения) и объема требуемых ресурсов (задача оценки показателей);

оптимальный план достижения поставленной цели (задача оптимизации деятельности).

Для решения задачи оптимизации после определения существенных свойств и их показателей необходимо:

сформировать множество альтернатив достижения цели;

выбрать критерий, наиболее соответствующий цели функционирования;

оценить количественные значения показателей на каждой альтернативе;

сравнить альтернативы по выбранному критерию с учетом имеющихся ограничений и определить наилучший вариант из числа допустимых;

подготовить ЛПР рекомендации для принятия решения.

Исходя из трех групп показателей, постановка задачи оптимизации может иметь три формы:

1. Если заданы объем выделяемых ресурсов (Зтр) и требуемое время достижения цели (Ттр), то решается задача нахождения такого способа использования ресурсов, при котором достигается наибольший конечный результат (эффект): $Э \rightarrow max$, $З \leq Зтр$, $Т \leq Ттр$.

Такую задачу можно назвать задачей повышения эффективности функционирования системы, а результат – наиболее эффективным.

2. Вторая постановка возникает тогда, когда заданы требуемый результат (Этр) и время его достижения (Ттр). Требуется выбрать вариант, при котором затраты ресурсов на его реализацию будут минимальными: $Э \rightarrow min$, $Э \geq Этр$, $Т \leq Ттр$.

Такая задача является задачей повышения экономичности, а результат – наиболее экономичным.

3. Третья постановка задачи характеризуется тем, что заданы требуемый эффект (Этр) и объем выделенных на его реализацию ресурсов (Зтр). Необходимо определить такой вариант действий, при котором цель будет достигнута за минимальное время: $T \rightarrow \min$, $Э \geq Этр$, $З \leq Зтр$.

Такую задачу можно назвать задачей на быстродействие.

Таким образом, для решения задачи синтеза любой динамической системы, прежде всего, необходимо определить показатели и критерии качества ее функционирования.

Под качеством ТКС в данном случае будем понимать совокупность характеристик или параметров выдаваемого ею продукта (услуг), по которым к системе предъявляются какие-либо требования. В общем случае таких требований может быть предъявлено несколько, например, по достоверности, по задержкам сообщений, по пропускной способности, по стоимости и т.д. То есть, требуемое качество системы, в общем случае, представляет собой вектор $\vec{Q}^* = \{q_1, q_2, ..., q_n\}$, компонентами которого являются частные требования, предъявляемые к системе (показателем качества). Вполне естественно, что в процессе работы текущее качество выходного процесса (продукта) системы $\vec{Q}(t)$ будет отличаться от требуемого. Причем из-за случайного характера внешних воздействий на систему и неопределенностей в представлении ее внутреннего состояния, текущее качество $\vec{Q}(t)$ будет случайной функцией времени.

Под эффективностью системы обычно понимают свойство системы соответствовать ее целевому предназначению. Целевым предназначением любого элемента ТКС и системы в целом, очевидно, является выполнение требуемых показателей качества. Тогда показатель эффективности, связывающий значения $\vec{Q}^*$ и $\vec{Q}(t)$, должен выражать степень выполнения заданных требований по всем показателям, причем, с учетом случайности $\vec{Q}(t)$ показатель эффективности может быть определен только в вероятностном смысле:

$$Э = P\left\{\vec{Q}(t) \in \vec{Q}^*\right\}, \tag{8}$$

то есть трактоваться как вероятность выполнения заданных требований по всем характеристикам системы.

Как видно из (8) получение значения показателя эффективности связано в данном случае с отысканием совместного закона распределения вектора показателей качества $\vec{Q}(t)$.

имеющего размеренность n:

$$\begin{aligned} Э &= P\left\{\vec{Q}(t) \in \vec{Q}^*\right\} = \int_{\vec{Q}^*}^{n} \dots \int_{\vec{Q}^*}^{n} \vec{Q}(t)\omega\left[\vec{Q}(t)\right] d\vec{Q} = \\ &= \int_{q_n^*} \dots \int_{q_n^*} q_1, q_2, \dots q_n \omega(q_1, q_2, \dots, q_n) dq_1, dq_2, \dots dq_n . \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь возникают обычно большие проблемы в определении совместного (n-мерного) распределения $\omega(q_1, q_2, ...q_n)$ частных показателей системы.

Для преодоления указанных трудностей часто используют метод «ведущей» компоненты, суть которого заключается в выделении из компонент вектора $\vec{Q}$ одной или нескольких ведущих и наложения на остальные ограничения вида $L: \{\vec{Q} \quad \vec{Q}^*\}$.

В соответствии с существующими в настоящее время положениями качество выдаваемого системой связи продукта приято характеризовать совокупностью таких важнейших показателей как своевременность, достоверность и безопасность. Причем для оценки эффективности телекоммуникационных систем вязи, обеспечивающих в основном доставку информационных сообщений потребителям, на первый план выдвигаются показатели своевременности и достоверности.

Тогда, с учетом (8) и 9), основными показателями для оценки эффективности ТКС целесообразно принять:

вероятность своевременной доставки сообщений, определяемую как вероятность того, что время передачи сообщений в системе (сети) не превысит допустимое:

$$Э_c = P\{T_{пер} \le T^*_{пер}\}; \qquad (10)$$

вероятность достоверной передачи, определяемую как вероятность того, что потери достоверности при передаче сообщений не превысят допустимые:

$$Э_д = P\{P_{ош} \le P^*_{ош}\}. \qquad (11)$$

Вполне очевидно, что в реальном процессе информационного обмена указанные показатели взаимозависимы. Действительно, низкая достоверность передачи сообщений приводит к необходимости их повторения, а это ведет, в свою очередь, к снижению своевременности передачи.

В связи с указанным, за обобщенный показатель эффективности ТКС принимают обычно совместную вероятность своевременной и достоверной передачи сообщений (предоставления соответствующей услуги) системой (сетью):

$$Э = P\{T_{пер} \le T^*_{пер}, P_{ош} \le P^*_{ош}\} = P\{T_{пер} \le T^*_{пер} / P_{ош} \le P^*_{ош}\} \cdot P\{P_{ош} \le P^*_{ош}\} \qquad (12)$$

где $P\{T_{пер} \le T^*_{пер} / P_{ош} \le P^*_{ош}\}$ – условная вероятность своевременной передачи при условии, что сообщение передано достоверно;

$P\{P_{ош} \le P^*_{ош}\}$ – безусловная вероятность достоверной передачи сообщений.

В дальнейшем при решении конкретных задач планирования и управления (при оценке различных и выборе рациональных вариантов (альтернатив) ТКС) показатель эффективности (12) целесообразно использовать как основной.

Важной особенностью оценки эффективности ТКС по критерию (12) является то, что доставка сообщений между УС ПУ осуществляется одновременно по многим направлениям связи (информационным направлениям). В этом случае неизбежно приходится сталкиваться с необходимостью введения векторного показателя для решения задач оптимизации ТКС.

4. Методы и принципы решения задач оптимизации телекоммуникационных систем

Необходимость оптимизации по векторному показателю возникает также при решении задач распределения выделенных на систему ресурсов, так как в данном случае из-за ограниченности ресурсов, выделяемых на сеть, повышение эффективности одного направления связи всегда происходим за счет снижения эффективности других направлений.

Пути решения задач по векторному показателю (многокритериальных задач) представляют наибольший интерес для оценки эффективности ТКС.

Пусть задана система связи, состоящая из N направлений, причем эффективность одного направления связи характеризуется частным показателем $Э_i(Q)$. Тогда все множество решений при оптимизации по векторному показателю Λ можно разбить на две области: первую $\Lambda_c \in \Lambda$, в которой все частные показатели изменяются с одним знаком, то есть $Э_i(Q_a) \geq Э_i(Q_b), \forall_i = \overline{1,N}, Q_{a,b} \in Q$ – так называемая область согласия, и вторую $\Lambda_k \in \Lambda$, в которой улучшение одного показателя сопровождается обязательным ухудшением, по крайней мере, одного другого показателя – область компромисса. Очевидно, что оптимальное решение должно лежать вне области согласия, так как любое решение из этой области может быть улучшено по всем показателям.

Таким образом, поиск области оптимальных решений всегда должен начинаться с отыскания области компромисса, так называемой «Парето-области». Причем, область компромисса, соответствующая приведенному выше определению, оказывается инвариантной к масштабу измерения частотных показателей и их приоритету.

Последнее очень важно ввиду того, что для ТКС, как иерархической системы, в числе частных могут оказаться показатели эффективности функционирования элементов разного уровня иерархии, имеющие к тому же разные единицы измерения.

Введем понятие идеальной системы – как системы, у которой все частные показатели достигают максимума: $Э_i = Э_{i\,max}, \forall_i = \overline{1,N}$. Тогда выбор оптимального решения превращается в задачу наилучшего приближения к идеальному вектору $\vec{Э}_u = \{Э_{1\,max}, Э_{2\,max}, ..., Э_{k\,max}\}$. Причем в данной задаче вместо абсолютной величины частных показателей можно рассматривать их относительные (безразмерные) значения $\tilde{Э}_i = \frac{Э_i}{Э_{i\,max}}, \tilde{Э}_i \in [0,1]$. Данный способ нормализации вполне применим для ТКС, так как реально допустимая область решений Q замкнута и ограничена, а все функционалы $Э_i(Q)$ ограничены сверху.

Анализ ряда работ по данной проблематике показывает, что решение большинства задач векторной оптимизации в области компромисса в конечном итоге осуществляется путем сведения векторного критерия к скалярному.

В настоящее время существует множество способов сведения векторного критерия к скалярному, основными из которых являются:

- методы введения обобщенного функционала;
- методы последовательной оптимизации.

Сущность методов введения обобщенного функционала заключается в функциональном объединении частных критериев по некоторому аналитически или алгоритмически заданному правилу в обобщенный структурный функционал $Э = F\{Э_1, Э_2, ..., Э_N\}$.

Существенным ограничением указанных методов является зависимость получаемых решений от вида обобщенного функционала. Для выбранного обобщенного функционала задача всегда будет иметь решение, оптимальность которого гарантирована. Вопрос же о том, существует ли решение лучшее, чем найденное, остается открытым, так как при любом другом задании обобщенного функционала может быть найдено другое условно оптимальное решение, несравнимое с первым. Это является основным и весьма существенным недостатком подхода, так как вносит в него значительную долю субъективизма.

Методы последовательной оптимизации позволяют при решении многокритериальных задач находить решения, близкие к оптимальным по одному, важнейшему из показателей, за счет введения уступок по остальным, удовлетворяющих наложенным ограничениям.

Широко используемыми принципами при решении задач методами последовательной оптимизации являются:

1. Принцип равенства:

$$Opt_1 \tilde{Э}(Q) = \tilde{Э}_1(Q) = \tilde{Э}_2(Q) = ... = \tilde{Э}_N(Q), Q \in \Lambda_k \quad (13)$$

2. Принцип равномерности:

$$Opt_2 \tilde{Э}(Q) = \max_{Q \in \Lambda_k} \min_{i \in N} Э_i(Q) \quad (14)$$

3. Принцип квазиравенства:

$$Opt_3 \tilde{Э}(Q) = \left\{ \left| \tilde{Э}_i(Q) - \tilde{Э}_j(Q) \right| \le \delta, \ i, j \in N, \ Q \in \Lambda_k \right\} \quad (15)$$

4. Принцип максимизации суммы:

$$Opt_4 \tilde{Э}(Q) = \max_{Q \in \Lambda_k} \sum_{i \in N} \tilde{Э}_i(Q) \quad (16)$$

5. Принцип относительной уступки:

$$Opt_5 \tilde{Э}(Q) = \max_{Q \in \Lambda_k} \prod_{i \in N} \tilde{Э}_i(Q) \quad (17)$$

6. Принцип выделения главного критерия:

$$Opt_6 \tilde{Э}(Q) = \max_{Q \in \Lambda_k} \tilde{Э}_i(Q), \ \tilde{Э}_{i \ne 1}(Q) \in \tilde{Э}_T(Q) \quad (18)$$

7. Принцип максимизации взвешенной суммы:

$$Opt_7 \tilde{Э}(Q) = \max_{Q \in \Lambda_k} \sum_{i \in N} \alpha_i \tilde{Э}_i(Q), \ \alpha_i \in [0,1], \ \sum_{i \in N} \alpha_i = 1 \quad (19)$$

8. Принцип лексикографической оптимизации:

$$Opt_8 \tilde{Э}(Q) = \underset{Q \in \Lambda_k}{lex}\ \tilde{Э}(Q) \qquad (20)$$

Сущность лексикографической оптимизации заключается в том, что решение «u» считается лучше решения «V», если выполняется одно из условий:

$$\begin{aligned} &1)\ \tilde{Э}_1(u) > \tilde{Э}_1(V); \\ &2)\ \tilde{Э}_1(u) = \tilde{Э}_1(V),\ \tilde{Э}_2(u) > \tilde{Э}_2(V); \\ &\vdots \\ &N)\ \tilde{Э}_e(u) = \tilde{Э}_e(V),\ e = 1,2,...,N-1\ \ \tilde{Э}_N(u) > \tilde{Э}_N(V); \end{aligned} \qquad (21)$$

Решение считается эквивалентным, если выполняется условие:

$$\tilde{Э}_i(u) = \tilde{Э}_i(V),\ \forall_i \in N \qquad (22)$$

Наиболее общим из всех рассмотренных принципов оптимизации является принцип максимизации суммы взвешенных критериев (19), поскольку из него при соответствующем задании весовых коэффициентов α_i, вытекают любые из перечисленных подходов.

Центральным для практического применения критерия (19) является вопрос о назначении весовых коэффициентов α_i.

В настоящее время известно большое число работ, посвященных определению весовых коэффициентов. Так в некоторых работах для этих целей предлагается использовать методы экспертных оценок, в других – методы статистического усреднения, или методы ранжирования коэффициентов по степени устойчивости и чувствительности получаемого решения и т.д.

Задача нахождения весовых коэффициентов существенно упрощается, если каким-либо образом определен ряд приоритетов частных критериев, то есть показатели эффективности упорядочены по мере убывания (возрастания) их важности: $\tilde{Э}_1 > \tilde{Э}_2 > ... > \tilde{Э}_N$

В этом случае задача определения оптимальных границ весовых коэффициентов может быть сформулирована следующим образом. Найти $opt\,\alpha_i$ при ограничениях:

$$\alpha_i - \alpha_{i+1} - \gamma_{i+1} = 0,\ \forall_i \in N;\ \sum_{i \in N} \alpha_i = 1,\ \gamma_{i+1} \geq 0 \qquad (23)$$

Здесь $opt\,\alpha_i$ означает либо $\max \alpha_i = \alpha_i^+$, если имеется верхняя граница доверительного интервала, либо $\min \alpha_i = \alpha_i^-$, если имеется нижняя граница.

Как видно из (23) эта задача является задачей линейного программирования. Для ее решения могут использоваться, например, стандартные процедуры симплекс-метода.

Поскольку решение указанной задачи позволяет найти не сами значения весовых коэффициентов, а лишь их доверительные границы, то возникает неопределенность в выборе значений весовых коэффициентов. Из-за неопределенности α_i возникает проблема устойчивости получаемых по критерию (19) решений. В данной ситуации

можно принять условие, что решение (19) «устойчиво», если незначительному изменению весовых коэффициентов в пределах $\alpha_i^+ > \alpha_i > \alpha_i^-$, что соответствует малое изменение Q_{opt}.

При этом одним из частных решений задачи (23), обладающих устойчивостью, может быть выбор весовых коэффициентов в виде средних от доверительных интервалов $\alpha_i = \frac{\alpha_i^+ + \alpha_i^-}{2}$.

Для данного случая справедливо рекуррентное правило определения весовых коэффициентов:

$$\alpha_{N-i} = \frac{i+1}{\sum_{k=1}^{N} k},\ i = 1,2,...,N-1. \qquad (24)$$

В отдельных задачах оптимизации приоритеты могут быть заданы бинарным отношением предпочтения: $\lambda_i \in [1,\infty]$, определяющими степень превосходства по важности двух соседних показателей из ряда приоритета:

$$\lambda_i \frac{\alpha_i}{\alpha_{i+1}},\ i = 1,2,..,N-1,\ \lambda_N = 1, \qquad (25)$$

где N – число ранжируемых показателей.

Весовой вектор для данного случая может быть определен из соотношения:

$$\alpha_i = \frac{\prod_{v=i}^{N} \lambda_v}{\sum_{v=1}^{N} \prod_{j=v}^{N} \lambda_j},\ i = 1,2,...,N-1. \qquad (26)$$

При решении задачи методами лексикографической оптимизации на основе соотношений (20) и (21) требуется также априорное задание ряда приоритетности частных показателей. При этом составляющие векторного критерия располагаются в ряд приоритета по убыванию важности $\tilde{Э}_i(Q) > \tilde{Э}_{i+1}(Q), \forall i \in N$. Далее приводится последовательная оптимизация по показателям $\tilde{Э}_i(Q)$, при которой не допускается повышение уровня менее важных показателей, если это вызывает хотя бы незначительное снижение уровня более важного показателя, который далее задается как дополнительное ограничение. Затем ищется глобальный экстремум на трансформированной области компромисса второго по важности показателя и т.д.

Задача лексикографической оптимизации может быть также сведена к задаче максимизации взвешенной суммы (19). Для этого достаточно взять произвольный коэффициент $\alpha_N > 0$, а остальные $\alpha_{N-1},...,\alpha_1$ последовательно назначить в соответствии с правилом:

$$\alpha_i = \frac{1}{\mu} \sum_{l=i+1}^{N} \alpha_l \mu_l, \qquad (27)$$

где $0 \le \mu_i \le \inf\limits_{\substack{u \in Q \\ \tilde{Э}_i(u) \ne \tilde{Э}_i(v)}} \left| \tilde{Э}_i(u) - \tilde{Э}_i(v) \right|$. (28)

$$M_l \ge \max_{u \in Q} \tilde{Э}_l(u) - \min_{u \in Q} \tilde{Э}_l(u). \quad (29)$$

Таким образом, в качестве основного критерия оптимального выбора наилучших альтернатив при решении задач построения (развития) телекоммуникационных систем целесообразно приять принцип максимизации взвешенной суммы частных показателей (19).

Особенностью решения задач оптимизации систем связи в условиях противоборства при этом будет то, что в данном случае частные показатели должны представляться в виде функционалов $\tilde{Э}_l(u,v)$, определенных на множестве $v \times V$, где v – множество решений (стратегий) системы связи S, V – множество стратегий системы противодействия (РЭБ).

Необходимо отметить, что в общем случае значение стратегии v зависит от стратегии u, то есть имеет вид $v(u)$. Однако для моделей поэтапного принятия решений, которыми часто описываются задачи планирования ТКС можно считать, что при поиске оптимальной стратегии u^* множество V остается неизменным. Тогда можно построить обобщенный критерий, позволяющий свести задачу векторной оптимизации к одной скалярной задаче вида:

$$Э = \max_{u \in U} \min_{v \in V} \tilde{Э}(u,v) = \max_{u \in U} \min_{v \in V} \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \tilde{Э}_i(u,v) = \min_{v \in V} \max_{u \in U} \sum_{i=1}^{N} \alpha_i \tilde{Э}_i(u,v), \quad (30)$$

где весовые коэффициенты α_i могут быть определены из соотношений (24), (26) или (27).

Ввиду сложности рассматриваемых телекоммуникационных систем, непосредственный анализ эффективности по указанным выше показателям оказывается весьма затрудненным и может быть использован при построении и применении соответствующих систем поддержки принятия решений.

5. Оценивание эффективности телекоммуникационных систем на основе метода декомпозиции

В соответствии с многоуровневым характером архитектуры анализ ТКС целесообразно осуществлять путем декомпозиции системы (сети) на ее отдельные элементы и определения частных показателей эффективности этих элементов, непосредственно влияющих на общие (системные) показатели.

Практика показывает, что для сетей связи возможно выделение как минимум девяти уровней декомпозиции с соответствующими каждому уровню показателями эффективности:

0 – физическая среда (ФС),

1 – физический элемент (ФЭ),

2 – функциональный элемент (ФЦЭ),

3 – функциональный блок (ФБ),

4 – радиоэлектронное средство (РЭС),

5 – однозвенная система передачи (ОСП) или информационное звено (ИЗ),

6 – информационная цепь (ИЦ) или многозвенная система (линия) передачи,

7 – направление связи (НС) или информационное направление (ИН),

8 – сеть (система) связи (СС) или информационная сеть (ИС).

Уровни 1–3 относятся к элементам РЭС и, поэтому, имеют существенное значение при разработке новых поколений техники связи и автоматизации. На этих уровнях основным показателем их эффективности будет техническая надежность, то есть способность обеспечивать заданные технические характеристики в течение максимально возможного времени эксплуатации. Таким показателем обычно является вероятность безотказной работы

$$K_{TH(1,2,3)} = 1 - P_{TO(1,2,3)}, \tag{31}$$

где $P_{TO(1,2,3)}$ – вероятность технического отказа физических, функциональных элементов или функциональных блоков соответственно.

К наиболее существенным показателям сети при ее эксплуатации (начиная с четвертого уровня) можно отнести следующие.

На уровне РЭС:

коэффициент разведзащищенности РЭС от огневого поражения

$$K^{ОП}_{рз\,РЭС} = 1 - P^{ОП}_{обн\,РЭС} \cdot P^{ОП}_{оц\,РЭС}, \tag{32}$$

где $P^{ОП}_{обн\,РЭС}$ и $P^{ОП}_{оц\,РЭС}$ – вероятности обнаружения и оценки параметров РЭС, необходимых для его огневого поражения;

коэффициент разведзащищенности РЭС от радиоподавления

$$K^{РП}_{рз\,РЭС} = 1 - P^{РП}_{обн\,РЭС} \cdot P^{РП}_{оц\,РЭС}, \tag{33}$$

где $P^{РП}_{обн\,РЭС}$ и $P^{РП}_{оц\,РЭС}$ – вероятности обнаружения и оценки параметров используемых радиосигналов системой РЭП, необходимых для радиоподавления;

коэффициент помехозащищенности РЭС, определяемый как такое предельное отношение мощности помехи к мощности сигнала на входе приемного устройства, при котором качество передачи информации еще будет соответствовать требуемому:

$$K_{ПЗ\,РЭС} = \left(\frac{P_П}{P_C}\right)_{\substack{BX \\ \max}} \Big/ P_{ош} \le P^*_{ош} \tag{34}$$

или

$$K_{ПЗ\,РЭС}[дБ] = 10\lg\left(\left(\frac{P_П}{P_C}\right)_{\substack{BX \\ \max}} \Big/ P_{ош} \le P^*_{ош}\right) \tag{35}$$

– коэффициент технической надежности РЭС

$$K_{ТН\ РЭС} = 1 - P_{ТО\ РЭС}, \tag{36}$$

где $P_{ТО\ РЭС}$ – вероятность возникновения технического отказа РЭС за время его функционирования.

При планировании операций обычно считается, что за время проведения операции $P_{ТО\ РЭС} \approx 0$, $K_{ТН\ РЭС} \approx 1$.

В соответствии с определением, простейшей моделью однозвенной системы передачи может быть взята модель, включающую передающее и приемное устройство РЭС, а также помеху (прогнозируемое воздействие) среды.

За основной показатель эффективности ОСП может быть взят коэффициент устойчивости ОСП:

$$K_{у\ зв\ ij} = K_{ж\ i\ РЭС} \cdot K_{ж\ j\ РЭС} \cdot K_{ПУ\ зв\ ij} \cdot K_{ТН\ i\ РЭС} \cdot K_{ТН\ j\ РЭС}. \tag{37}$$

Здесь:

$$K_{ж\ i\ РЭС} = 1 - \left(1 - K^{ОП}_{рз\ i\ РЭС}\right) \cdot P^{ОП}_{пр} = 1 - P_{ОП\ i} \tag{38}$$

– коэффициент живучести i-го РЭС,

$P^{ОП}_{пр}$ – вероятность применения по РЭС средств огневого поражения.

$$P_{ОП} = \left(1 - K^{ОП}_{рз\ РЭС}\right) \cdot P^{ОП}_{пр} \tag{39}$$

– вероятность огневого поражения РЭС.

$$K_{ПУ\ зв} = 1 - \left(1 - K^{РП}_{рз\ РЭС}\right) \cdot P_{ЭП} \cdot P_{ВП} \cdot P_{ПП} \tag{40}$$

– коэффициент устойчивости однозвенной системы передачи к помехам,

$K^{ОП}_{рз\ РЭС}$ и $K^{РП}_{рз\ РЭС}$ – коэффициенты разведзащищенности РЭС от огневого и радиоподавления,

$$P_{ЭП} = P\left\{\left(\frac{P_П}{P_С}\right)_{вх\ РЭС} \geq K_{нз\ РЭС}\right\} \tag{41}$$

– вероятность энергетического подавления ОСП,

$$P_{ВП} = \frac{t_{пер}}{t_{пер} + \tau_{РЭП}} \tag{42}$$

– вероятность временного подавления ОСП (временного контакта),

$t_{пер}$ – время работы РЭС на передачу,

$\tau_{РЭП}$ – время реакции системы РЭП (от обнаружения РЭС до постановки преднамеренных помех),

$K_{ТН\ i\ РЭС}$ – коэффициент технической надежности РЭС.

При оценке эффективности вариантов ТКС на этапах планирования можно считать $K_{ТН\ РЭС} \approx 1$.

Как видно из (37), в показатель эффективности однозвенной системы передачи в качестве аргументов входят все показатели РЭС.

Физически показатель (37) по сути, означает вероятность доставки ОСП информации с требуемым качеством в условиях технических отказов, огневого и радиоэлектронного поражения.

В качестве показателя эффективности многозвенной линии передачи примем устойчивость информационной цепи, которая с учетом последовательного соединения ОСП формально может быть описана выражением:

$$K_{у\,ИЦ} = \prod_{i=1}^{N} K_{у\,зв\,i}\,, \tag{43}$$

где $K_{у\,зв\,i}$ – коэффициент устойчивости однозвенной системы передачи i-го звена ИЦ.

С учетом этого показателем эффективности направления связи (информационного направления) может быть принята вероятность сохранения на данном направлении не менее L информационных цепей из M запланированных, удовлетворяющих требованиям по своевременности и достоверности передачи (доставки) информации. Это, так называемая связность информационного направления:

$$K_{св\,ИН} = P\left\{l \geq L/M\right\}. \tag{44}$$

В частном случае минимальная связность информационного направления может быть вычислена как вероятность сохранения на нем хотя бы одной информационной цепи, удовлетворяющей требованиям своевременности и достоверности:

$$K_{св\,\min} = P\left\{l \geq 1/M\right\} = 1 - \prod_{i=1}^{N}\left(1 - K_{у\,ИЦ\,i}\right), \tag{45}$$

где $K_{у\,ИЦ\,i}$ – коэффициент устойчивости i-й информационной цепи данного направления.

В качестве обобщенного показателя эффективности системы связи, как совокупности направлений связи, в данном случае может служить матрица связностей направлений связи:

$$K_{св} = \left\{K_{св\,ИЦ\,i\,j}\right\}. \tag{46}$$

Таким образом, при поиске оптимальной структуры телекоммуникационной системы (сети) связи необходимо решить задачу векторной оптимизации, решение которой может быть найдено одним из способов, описанных выше.

В частности, в качестве обобщенного показателя может быть выбрана средневзвешенная по важности информационных направлений связность сети:

$$K_{св\,СВН} = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i K_{св\,НС\,i},\ \sum_{i=1}^{N} \alpha_i = 1, \tag{47}$$

где $K_{св\,НС\,i}$ – связность i-го направления связи,

α_i – весовой коэффициент, учитывающий важность i-го направления связи.

6. Заключение

Результативность работы органов управления связью при решении задач построения (развития) телекоммуникационных систем определяется не только опытом и квалификацией должностных лиц, но характеристиками комплексов средств поддержки организационного управления, наличием в структуре АСУС достаточно эффективной системы моделей анализа и синтеза, используемой в процессе планирования и оперативного управления.

Рассмотренный в статье методологический подход, представленные методы и модели оценки эффективности и оптимизации телекоммуникационных систем могут быть рекомендованы для использования при разработке специального программного обеспечения систем поддержки организационного управления. Их программная реализация может позволить не только строить ТКС в соответствии с требуемыми архитектурными принципами, но и количественно оценивать ее основные параметры и вероятностно-временные характеристики.

Литература

1. Боговик А.В., Игнатов В.В. Теория управления в системах военного назначения. Учеб. – СПб.: ВАС, 2008. – 460 с.
2. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки – СПб.: ВАС, 2006. – 184 с.
3. Месарович М.Д., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. Пер. с англ., М.,Мир, 1973.
4. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. Пер. с англ., М., Наука, 1972.
5. Методы математического моделирования систем и процессов связи. Под общ. ред. Чемиренко В.П. С-Пб. Изд-во Политехнического университета. 2009. - 308 с.
6. Емельянов С.В., Борисов В.И., Малевич А.А. Модели и методы векторной оптимизации – В кн: Итоги науки и техники. Техническая кибернетика, т. 5, М., ВИНИТИ, 1973.

References

1 Bogovik A.V., Ignatov V.V. The theory of management in military systems. Studies. – SPb.: MAC, 2008. – 460 p.
2 Bogovik A.V., Ignatov V.V. Efficiency of military communication systems and methods of its assessment – SPb.: MAC, 2006. – 184 p.
3 Mesarovich M.D., Mako D., Takahara I. Theory of hierarchical multilayer systems. Translation from English, M., World, 1973.
4 Li E.B., Markus L. Bases of the theory of optimum control. Translation from English, M., Science, 1972.
5 Mathematical modeling methods of systems and processes of communication. Under a general edition of Chemirenko V.P. SPB. Publishing house of the Polytechnical university. 2009. - 308 p.
6 Yemelyanov S.V., Borisov V.I., Malevich A.A. Models and methods of vector optimization – In book: Results of science and technology. Engineering cybernetics, t. 5, M., VINITI, 1973.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СИНТЕЗА И КООРДИНАЦИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

М.В. Павловский[1]

[1] Военный учебно-научный центр Военно-Воздушных Сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), г. Воронеж Россия

Аннотация. В статье приведены результаты анализа исследований, который показал существующее противоречие между потребностью синтеза и координации специальных систем радиоэлектроники и развитием соответствующей методологии, представлены апробированные модели и методы, связанные воедино.

Ключевые слова: специальная система радиоэлектроники, синтез, модель, координация, тензорный анализ, инфлюентный анализ, технико-экономический анализ.

MODELS AND METHODS OF SYNTHESIS AND COORDINATION OF THE SPECIAL SYSTEMS ELECTRONICS

M. V. Pavlovsky[1]

[1] Military educational scientific center Air Force "air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. Gagarin" (VUNTS VVS "VVA"), Voronezh, Russia

Abstract. The article presents the results of research analysis, which showed the existing contradiction between the need for synthesis and coordination of special systems of radio electronics and the development of appropriate methodology, presents proven models and methods related together.

Keywords: special system of radio electronics, synthesis, model, coordination, tensor analysis, influent analysis, technical and economic analysis.

1. Введение

Анализ выполненных к настоящему времени исследований в области программного планирования развития образцов техники в составе специальных систем радиоэлектроники (ССРЭ) (например, [1 – 3]) показал, что развитие этих систем предполагает только создание новых видов и типов образцов, а их объединение в системы предусматривает комплекс исследований, в которых, несмотря на накопленный опыт и знания, до сих пор применяются экспертные модели и методы. В то же время, продекларированное в [4, 5] понятие координации, которое определяет сферу деятельности (или задачу) вышестоящей управляющей системы, в ходе которой она пытается добиться согласованного функционирования и взаимодействия нижестоящих систем управления в интересах повышения своей эффективности, в современных условиях вообще не рассматривается. Вследствие этого, совершенствование ССРЭ в настоящее время осуществляется через постоянное усложнение количества и качества взаимосвязей элементов в их составе. Это позволяет сформулировать существующее противоречие: в настоящее время отсутствует научно-теоретическая работа, которая освещает системные аспекты программного создания ССРЭ и позволяет математически не противоречиво осуществлять их синтез и координацию на уровне систем, для которых вопросы применения отдельных образцов техники, комплексов и систем

являются исходными данными. Следовательно, предпринятая работа, направленная на ликвидацию данного противоречия, является актуальной и необходимой. Тогда цель работы – предложение не противоречивой, математически обоснованной и цельнотянутой системы методического обеспечения синтеза и координации ССРЭ.

2. Обоснование процедуры исследований

В практике программного строительства ССРЭ, под которыми могут рассматриваться системы радиосвязи, радиолокации, радионавигации и радиоэлектронной борьбы, традиционно используется методология «генерации – анализа – выбора» оптимального варианта ССРЭ из перечня сгенерированных и проанализированных альтернативных вариантов. Данная процедура обеспечивает полноту поля анализируемых вариантов и обеспечивает если не стопроцентно оптимальный вариант ССРЭ, то максимально рациональный в данных условиях вариант. Поэтому в исследованиях по синтезу и координации ССРЭ также необходимо использовать стандартную процедуру «генерация – анализ – выбор», доработка которой должна быть направлена на устранение выявленного противоречия.

Необходимо отметить, что в практике военного строительства принято говорить о группировке войск (сил) [2, 3], но:

1) для исключения не формализуемых действий личного состава и для расширения диапазонов исследования по звену управления (эшелоны ССРЭ), по уровням сложности принимаемых решений (слои ССРЭ) и по вариантам описания (страты ССРЭ);

2) для исключения привязки к существующим организационно-штатным структурам, определяющим ограничения по звену управления (эшелонам ССРЭ), по уровням сложности принимаемых решений (слоям ССРЭ) и по вариантам описания (стратам ССРЭ);

3) для обеспечения возможности обоснования общих тактических и технических требований к ССРЭ и их элементам;

в исследованиях по синтезу и координации рассматривается только техническая составляющая ССРЭ. В соответствии с обозначенной целью в качестве объекта исследований рассматривается ССРЭ, участвующая в составе группировки войск (сил) вооруженных сил на театре военных действий в конфликтном взаимодействии с силами потенциального противника, в качестве предмета - система методического обеспечения синтеза, координации и выбора такой ССРЭ. Следовательно, задача раздела работы решена, а процедура проведения исследований обоснована.

3. Методология исследований на этапе генерации

На этапе генерации или синтеза альтернативных вариантов ССРЭ до настоящего времени использовались либо морфологические методы (метод отрицания и конструирования; метод систематического покрытия поля; метод морфологического ящика)) [6], либо методы, основанные на использовании экспертных оценок [7]. Основным недостатком морфологических методов заключается в формировании полного поля возможных состояний, из которого после проведения анализа

исключаются не реализуемые методы. Методы, основанные на использовании экспертных оценок, традиционно применяются в тех областях, для которых не возможно применение формальных методов. Однако, как первая, так и вторая группа методов приводят к формированию чрезвычайно большого поля возможных ССРЭ, анализ которых требует привлечения всевозможных решающих правил и постулатов [1, 2]. Кроме того, синтез комплексов, подробно описанный в [1, 4] и использованный в [8, 9], существенно отличается от синтеза ССРЭ, что не позволяет применять разработанную методологию. Отличительными признаками ССРЭ, не позволяющими применять для их генерации методологию синтеза комплексов, являются:

объем решаемых задач, который может меняться как от звена управления, так и от предназначения ССРЭ;

наличие не связанных друг с другом задач, когда элементами ССРЭ решаются задачи по предназначению этих элементов в отрыве от задач по предназначению всей ССРЭ;

структурированность состава и, в то же время, отсутствие «жесткой» связи между элементами ССРЭ.

В работе [10] предложен способ генерации (синтеза) ССРЭ на основе преобразования систем образцов техники к системам полосовых фильтров и дальнейшего использования методов радиотехнического синтеза. При этом сформирована геометрическая модель перехода от ССРЭ к системам полосовых фильтров [11], которая теоретически обоснованно позволяет применить тензорный анализ к проблеме представления образцов техники ССРЭ в виде математической модели матрицы пятого порядка. Данная геометрическая модель позволяет обоснованно перейти от образцов техники из состава ССРЭ различного уровня иерархии к полосовым фильтрам и их системам с различными полосами пропускания (что эквивалентно рассмотрению диапазонов рабочих частот ССРЭ в целом и их элементов) и добротностью (что эквивалентно рассмотрению эффективности этих систем) на основе применения алгебры топологий.

Основной проблемой математического описания образцов техники ССРЭ является сложность их представления в виде математической модели, в которой не осуществляется смесь не согласованных величин. В работе [10] сформирован способ перехода от стандартного описания образца техники из состава ССРЭ к математически не противоречивому объекту на основе применения методов эконометрии. При этом разработана методика матричного описания образцов техники как элементов ССРЭ, которая позволяет перейти от несогласованных описаний различных уровней иерархии образцов техники к стандартному математическому (в виде матриц пятого порядка) описанию как элементов радиотехнических схем. На основе [10] и [11] сформирована модель перехода от образцов техники к электрическим схемам на основе топологических структур ССРЭ, что обеспечило математически обоснованное применение идей тензорного анализа Крона к процедуре генерации альтернативных вариантов ССРЭ. При этом тензор преобразования Крона приобретает математически обоснованный вид стандартизации характеристик и объединения их в систему.

Для решения задач радиотехнического синтеза полосовых фильтров в [12] предложено множество методов, на основе которых в [13] разработан новый метод решения системы матричных неравенств, используемых для генерации альтернативных вариантов ССРЭ на основе решения задачи целочисленного линейного программирования. При этом, в соответствии с данными [10, 13], каждая матрица, описывающая образцы техники ($\mathbf{A}_{\mathbf{O\text{-}1}}$, $\mathbf{A}_{\mathbf{O}\text{-}2}$, …, $\mathbf{A}_{\mathbf{O}\text{-}No}$), комплексы ($\mathbf{A}_{K\text{-}\mathbf{1}}$, $\mathbf{A}_{K\text{-}2}$, …, $\mathbf{A}_{K\text{-}Nk}$) или системы ($\mathbf{A}_{S\text{-}\mathbf{1}}$, $\mathbf{A}_{S\text{-}2}$, …, $\mathbf{A}_{S\text{-}Ns}$), а также требования по эффективности к элементам ССРЭ (соответственно, $\mathbf{E}_{\mathbf{O\text{-}Tr}}$, $\mathbf{E}_{\mathbf{K\text{-}Tr}}$, $\mathbf{E}_{\mathbf{S\text{-}Tr}}$), каждая их которых имеет размер 5×5, представляется двадцатью пятью уравнениями:

$$S=\begin{cases} i_1\mathbf{A}_{\mathbf{O\text{-}1}}+ & i_2\mathbf{A}_{\mathbf{O\text{-}2}}+ & \dots & i_{No}\mathbf{A}_{\mathbf{O\text{-}No}}\geq & \mathbf{E}_{\mathbf{O\text{-}Tr}} \\ j_1\mathbf{A}_{K\text{-}\mathbf{1}}+ & j_2\mathbf{A}_{K\text{-}2}+ & \dots & j_{Nk}\mathbf{A}_{K\text{-}Nk}\geq & \mathbf{E}_{\mathbf{K\text{-}Tr}} \\ b_1\mathbf{A}_{S\text{-}\mathbf{1}}+ & b_2\mathbf{A}_{S\text{-}2}+ & \dots & b_{Ns}\mathbf{A}_{S\text{-}Ns}\geq & \mathbf{E}_{S\text{-}\mathbf{Tr}} \\ i_1+ & i_2+ & \dots & i_{No}\leq & N_O \\ j_1+ & j_2+ & \dots & j_{Nk}\leq & N_K \\ b_1+ & b_2+ & \dots & b_{Ns}\leq & N_S \end{cases}=\begin{cases} i_1a_{\mathbf{O\text{-}1}_{11}}+ & i_2a_{\mathbf{O}\text{-}2_{11}}+ & \dots & i_{No}a_{\mathbf{O}\text{-}No_{11}}\geq & e_{\mathbf{O\text{-}Tr}_{11}} \\ i_1a_{\mathbf{O\text{-}1}_{12}}+ & i_2a_{\mathbf{O}\text{-}2_{12}}+ & \dots & i_{No}a_{\mathbf{O}\text{-}No_{12}}\geq & e_{\mathbf{O\text{-}Tr}_{12}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_1a_{\mathbf{O\text{-}1}_{21}}+ & i_2a_{\mathbf{O}\text{-}2_{21}}+ & \dots & i_{No}a_{\mathbf{O}\text{-}No_{21}}\geq & e_{\mathbf{O\text{-}Tr}_{21}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ j_1a_{K\text{-}\mathbf{1}_{11}}+ & j_2a_{K\text{-}2_{11}}+ & \dots & j_{Nk}a_{K\text{-}Nk_{11}}\geq & e_{\mathbf{K\text{-}Tr}_{11}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_1a_{S\text{-}\mathbf{1}_{55}}+ & b_2a_{S\text{-}2_{55}}+ & \dots & b_{Ns}a_{S\text{-}Ns_{55}}\geq & e_{S\text{-}\mathbf{Tr}_{55}} \\ i_1+ & i_2+ & \dots & i_{No}\leq & N_O \\ j_1+ & j_2+ & \dots & j_{Nk}\leq & N_K \\ b_1+ & b_2+ & \dots & b_{Ns}\leq & N_S \end{cases}.$$

Данная система неравенств требует значительного вычислительного ресурса, однако ее решение позволит:

1) из предлагаемых перспективных структур ССРЭ исключить волюнтаристские структуры, что приведет к сокращению времени обоснования неприемлемых систем;

2) математически точно обосновать структуры данных ССРЭ, что позволит лицам, принимающим решение, наиболее полно учесть известные исходные данные и не завысить возможности перспективных систем;

3) обеспечить выполнение ограничений заказчика по уровню организационно-штатной структуры ССРЭ и наличию в ней транспортных единиц.

Таким образом, на этапе генерации предложено использование методов перехода от образцов техники ССРЭ к полосовым фильтрам и расчета ССРЭ на основе решения задач целочисленного программирования. Это стало возможным только благодаря комплексному применению методов тензорного анализа, синтеза радиотехнических цепей и решения задач целочисленного линейного программирования. В результате на этапе генерации ССРЭ исключается возможность применения волюнтаристских методов экспертного анализа, что позволяет сократить количество исследуемых альтернативных вариантов ССРЭ.

4. Методология исследований на этапе анализа

На этапе анализа традиционно используется методология системного анализа с применением методов анализа операций [1, 2, 4, 5, 8, 9]. Однако, данная методология не позволяла по требуемым параметрам перспективной ССРЭ определять необходимые доработки как ССРЭ, так и ее составляющих. Для устранения указанного недостатка в работах [14-18] была доработана методология инфлюентного анализа [19] в направлении ее применения к сложным не детерминированным системам, получающим новое системное свойство, имеющим различные пути перевода из существующего состояния в перспективное. При этом были осуществлены:

1) разработана модель координации ССРЭ на основе применения теории инфлюентного анализа, которая позволяет по знанию существующего состояния системы и по требованиям к перспективному состоянию этой системы определить наиболее приемлемые пути перевода из существующего состояния к перспективному облику;

2) сформулированы обратные задачи инфлюентного анализа, решение которых в интересах координации ССРЭ позволяет при различных ограничениях или требуемых результатах осуществлять координацию анализируемой системы;

3) осуществлена доработка теоретического аппарата инфлюентного анализа ССРЭ в направлении учета специфических свойств систем (в первую очередь, факта, что сумма приращений эффективности образцов техники не равна приращению эффективности ССРЭ, содержащих эти образцы);

4) разработана методика оценки приращений эффективности образцов техники, составляющих ССРЭ, на основе теоремы обращения инфлюент, позволяющая выявить влияние на эффективность этой системы любого усовершенствованного отдельного образца техники, даже если данный образец не имеет непосредственного влияния на показатель эффективности систем (например, тренажер или аппаратная технического обеспечения);

5) впервые обоснована и разработана методика координации ССРЭ, разделяющая понятия линейной и текущей координации, позволяющая определить номенклатуру организационно-штатных элементов и образцов техники в составе ССРЭ (или средств в составе комплексов и технических характеристик отдельных образцов техники), подлежащих первоочередной координации на длительности действия государственной программы вооружения (линейная координация) или государственного оборонного заказа (текущая координация) [1, 2], и контроль выполнения планов координации. При этом данная методика позволяет сформировать к перспективным ССРЭ общие технические требования, которые содержат общесистемные требования (включая внешнесистемные и структурные требования) и специальные требования к подсистемам первого уровня (включая требования к организационно-штатным структурам и оперативно-тактические требования как к ССРЭ в целом, так и подсистемам первого уровня).

Таким образом, в разделе показаны осуществленные доработки аксиоматического аппарата инфлюентного анализа, которые позволяют осуществить усовершенствования

образцов техники в составе ССРЭ (а в общем виде любой системы за счет усовершенствования подсистем первого уровня). Такое расширение математического аппарата обеспечивает проведение синтеза ССРЭ за счет осуществления текущей и линейной координации.

5. Методология исследований на этапе выбора

На этапе выбора, в соответствии с положениями [1 – 3, 20] используется методология технико-экономического анализа (ТЭА). При решении данной задачи были использованы стандартные методы, доработанные в направлениях учета особенностей применения ССРЭ. При доработке методов ТЭА был сделан акцент:

1) на использовании методов эконометрии в интересах определения образцов-аналогов для расчета стоимости перспективных образцов техники, находящихся на стадии разработки [21];

2) на анализе особенностей прогнозирования затрат на различных этапах жизненного цикла наземных и авиационных образцов техники из состава ССРЭ и разработке новых методик расчета стоимости на основе методов аналогов и нормативных пересчетов;

3) на обосновании особенностей вычисления оценок военно-экономической целесообразности альтернативных образцов и организационно-штатных структур ССРЭ;

4) на модели выбора наиболее рационального варианта состава, структуры и общих технических требований к организационно-штатным структурам ССРЭ.

Таким образом, в разделе показаны осуществленные доработки аппарата ТЭА, которые позволяют осуществить расчет показателя экономической целесообразности усовершенствования как отдельных образцов техники в составе ССРЭ, так и ССРЭ в целом.

6. Методология исследований при получении математических зависимостей и финальных рекомендаций

Для математического обоснования необходимости проведения исследований была разработана модель конфликтного взаимодействия ССРЭ с информационно-управляющей системой противника. Научная новизна данной модели заключается в установлении взаимно однозначного соответствия между протеканием элементарных конфликтов и конфликтным взаимодействием двух систем. Практическая ценность предлагаемой модели заключается в формализации процесса расчета информационного (на уровне отдельных элементарных конфликтов), технического (на уровне взаимодействия комплексов) и системного (на уровне конфликта двух систем) показателей. Данная модель обеспечивает:

1) математический расчет недостаточности существующей ССРЭ;

2) получение функциональных зависимостей для этапов генерации и анализа с применением моделей тензорного анализа Крона и инфлюентного анализа;

3) расчет прогнозных оценок системного показателя эффективности ССРЭ в ходе ее конфликтного взаимодействия с информационно-управляющей системой противника.

Исходными данными для работы модели являются сведения:

1) о составе и возможностях наращивания противоборствующих систем;

2) о составе и характеристиках радиоэлектронных систем и средств радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радио- и радиотехнической разведки, а также образцов техники радиоэлектронной борьбы;

3) о возможностях существующих и перспективных средств, используемых для размещения предлагаемых образцов техники из состава ССРЭ;

4) о возможностях изменения организационно-штатных структур существующих ССРЭ;

5) о значениях потенциала нашей системы в интересах расчета оценок потерь потенциала без применения ССРЭ ($\Delta П_c^0$) и с использованием ССРЭ ($\Delta П_c^1$), на основании которых по формуле

$$p_{1-0}(\Delta) = \frac{\left|\Delta П_c^0 - \Delta П_c^1\right|}{\Delta П_c^0}.$$

вычисляется оценка снижения уровня потерь потенциала техники в составе группировки наших войск за счет применения образцов техники в составе ССРЭ на длительности (Δ) ведения боевых действий. Данная модель позволила сформировать предложения по составу ССРЭ и по ее применению на обоснованном театре действий. Создание данной модели стало возможным благодаря работам [22 - 28].

Таким образом, в данном разделе описаны результаты создания программной реализации модели конфликтного взаимодействия ССРЭ и информационно-управляющей системы противника, содержащей радиоэлектронные средства и системы радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радио- и радиотехнической разведки. На основании данной модели могут быть получены как исходные оценки, определяющие необходимость проведения исследований по синтезу и координации ССРЭ, так и финальные оценки, на основании которых будут получены рекомендации по синтезу и координации реально существующих ССРЭ.

7. Заключение

Уточняя описанные во втором – шестом разделах результаты по теоретическим аспектам, можно говорить, что получено пять результатов, а цель работы достигнута, так как:

в интересах методического обеспечения процесса генерации альтернативных вариантов ССРЭ осуществлена доработка методов тензорного анализа Крона, причем каждый образец техники представляется в виде полосового фильтра, параметры которого не изменяются при переходе от рассмотрения одной ССРЭ к другой;

в интересах методического обеспечения процесса анализа альтернативных вариантов ССРЭ осуществлена доработка (сформулированы и доказаны новые теоремы) инфлюентного анализа, что в отличие от классической теории позволяет осуществлять анализ сложных ССРЭ, в которых невыполнимо основное положение инфлюентного

анализа: приращение эффективности системы равно сумме приращений эффективности ее составляющих;

в интересах методического обеспечения процесса выбора из альтернативных вариантов ССРЭ разработаны новые методики технико-экономического обоснования необходимости разработки перспективных образцов техники, рассматриваемых в составе ССРЭ.

Таким образом, показана взаимосвязь осуществленных разработок, представленных в статьях [10, 11, 13 – 18, 21 – 28], которые направлены:

1) на создание имитационной модели конфликтного взаимодействия информационно-управляющей системы противника и ССРЭ;

2) на совершенствование методов тензорного анализа Крона, позволяющих осуществить переход от анализа и синтеза ССРЭ, для которых не существует строгих математических методов, к анализу и синтезу радиотехнических цепей, процедуры синтеза которых представляют собой законченный, четко структурированный и математически обоснованный аппарат;

3) на расширение методов инфлюентного анализа, которые обеспечивают оптимизацию процесса совершенствования ССРЭ и способствуют отысканию объектов приложения усилий по координации, совершенствование которых (объектов) оказывает наибольшее влияние на системный показатель эффективности ССРЭ;

4) на разработку методического аппарата технико-экономического обоснования предложений по созданию и координации ССРЭ.

Следовательно, цель статьи достигнута и предложена не противоречивая, математически обоснованная и цельнотянутая система методического обеспечения синтеза и координации ССРЭ.

Литература

1. Ладенко И.С., Тульчинский Г.П. Логика целевого управления, - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1988, 198 с.
2. Солнышков Ю.С. Оптимизация выбора вооружения, - М: Военное издательство, 1976. – 104 с.
3. Военный бюджет государства. Методы обоснования и анализа. Под ред. канд. эконом. наук Олейника В.П., - М.: Воениздат, 2000.
4. Месарович М., Мако Д., Такахара И. «Теория иерархических многоуровневых систем», -М.: «Мир», 1973, 633 с.
5. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Основы военной системотехники, - М.: МО СССР, войска ПВО, 1983, 415 с.
6. Титов В.В. Морфологический подход. 1990 // Интернет-ресурс http://www.metodolog.ru/00915/00915.html . Обращение 18.01.2019.
7. Нестругин А.С., Ничуговский В.Н. и др. Синтез комплексов радиосвязи в условиях неопределенности. Вестник ВГТУ, серия «САПР и системы автоматизации производства», вып.3.3 – Воронеж: ВГТУ, 2003.
8. Козлов С.В., Карпухин В.И., Лазаренков С.М. Модели конфликта авиационных систем радиоэлектронной борьбы и противовоздушной обороны / Монография. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. – 468 с.
9. Радзиевский В.Г., Неволин А.Д. Модели и методики оценки эффективности радиоподавления средств радиоэлектронной разведки и поражения авиационно-космических систем высокоточного оружия в условиях информационного конфликта./ Монография.

Рецензенты: дтн доцент Кирсанов ЭА. Дтн снс Маевский ЮИ– Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – 234 с.; 36 ил.
10. Павловский М.В. Модель применения тензорного анализа Крона в интересах синтеза сложных специальных систем радиоэлектронного вооружения. Сборник докладов на XXII МНТК «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2016, - Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 19-21 апреля, 2016. Т.3 С 1523 – 1530.
11. Павловский М.В. Геометрическая теория иерархических построений сложных специальных систем радиоэлектронного вооружения. Сборник докладов на XXII МНТК «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2016, - Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 19-21 апреля, 2016. Т.3 С 1531 – 1546.
12. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. Изд. 2-е, переработанное и дополненное, - М.: «Сов. радио», 1971. 672 с., илл.
13. Павловский М.В. Метод решения матричных уравнений, используемых для синтеза сложных специальных систем. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Системный анализ и информационные технологии». №1, 2018. С. 19 – 25.
14. Павловский М.В. Теорема представимости инфлюент образцов специальной техники в составе сложных эргатических систем. Сборник докладов на XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2015, - Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 14-16 апреля, 2015. Т.2 С 1000 – 1007.
15. Павловский М.В. Метод вычисления инфлюент выделенного влияния образцов специальной техники в составе сложных эргатических систем. Сборник докладов на XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2015, - Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ», 14-16 апреля, 2015. Т.2 С 1008 - 1014.
16. Павловский М.В. Метод выбора координации сложных систем радиоэлектронного вооружения на основе применения теорем непрерывности и сепарабельности инфлюентного анализа. //«Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн», №32, 2016 г., с.4-7. «Радиотехника» №8, 2016 г., с. 6 – 9.
17. Павловский М.В. Метод учета улучшения отдельных характеристик сложных специальных систем радиоэлектронного вооружения на основе теоремы независимости инфлюент.Сборник докладов на XXIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2017, - Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации» ООО «ВЭЛБОРН», 2017. В трех томах. Т.1 С. 103 – 110.
18. Павловский М.В. Решение задачи деления процесса координации на этапы и правила применения инфлюентного анализа к проблеме координации сложных специальных систем радиоэлектронного вооружения. Сборник докладов на XXIII международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2017, - Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации» ООО «ВЭЛБОРН», 2017. В трех томах. Т.1 С. 111 – 116.
19. Трухаев Р.И. «Инфлюентный анализ и принятие решений (детерминированный анализ)», - М: «Наука», 1984. – 235 с.
20. Луценко А.Д. Методики оценки военно-экономической целесообразности работ по созданию перспективных образцов техники РЭБ, - Воронеж: ФГНИИЦ РЭБ ОЭСЗ, 2009. 50 с.
21. Павловский М.В., Попов И.В. Использование эконометрического моделирования в интересах оценки стоимости и длительности работ по создпнию образцов техники радиоэлектронной борьбы. «Вестник Военно-воздушной академии», №2 (23), 2015 г. ДСП. С 255 – 259.
22. Павловский М.В., Петров А.В. Управление маршрутами в имитационной модели распределенной сети связи и передачи данных.// «Телекоммуникации» №11 2008 г., с. 10-15.
23. Павловский М.В. Имитационное моделирование радиоэлектронного конфликта сложных эргатических систем: структура модели. Материалы XV Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» 12-13 февраля 2015 года. Т.1, с. 369 – 373, - Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. С. 490.
24. Павловский М.В., Тюкачев Н.А. Имитационное моделирование радиоэлектронного конфликта сложных эргатических систем: исходные данные.// Вестник Воронежского

государственного университета. Серия «Системный анализ и информационные технологии». // №3, 2015. С. 17 – 23.
25. Павловский М.В., Тюкачев Н.А. Имитационное моделирование радиоэлектронного конфликта сложных эргатических систем: динамика структур сторон конфликта. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Системный анализ и информационные технологии». // №3, 2015. С. 24 – 32.
26. Павловский М.В., Тюкачев Н.А. Имитационное моделирование радиоэлектронного конфликта сложных эргатических систем: динамика загрузки сторон. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия «Системный анализ и информационные технологии». // №4, 2015. С. 13 – 21.
27. Павловский М.В., Гаршина В.В. Алгоритм множественного доступа с прослушиванием несущей и обнаружением конфликта и анализа энергетического конфликта. Материалы XV Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» 11-12 февраля 2016 года. Компьютерное моделирование в фундаментальных и прикладных исследованиях, с. 371 – 375, - Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2016.
28. Павловский М.В., Тюкачев Н.А. Учет функционирования алгоритмов маршрутизации информационных потоков. Материалы XV Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» 11-12 февраля 2016 года. Компьютерное моделирование в фундаментальных и прикладных исследованиях, с. 375 – 381, - Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2016.

REFERENCES

1. Ladenko I. S., Tulchinsky G. P. logic of target management, Novosibirsk: Nauka, si-birsky branch, 1988, 198 p .
2. Solnishkov Y. S. Optimization of selection of weapons, - M: Military publishing house, 1976. 104 p.
3. The military budget of the state. Methods of justification and analysis. Under the editorship of Cand. steward. Oleynik's Sciences V. P., - M.: Voenizdat, 2000.
4. Mesarovich M., Mako D., Takahara I. "theory of hierarchical multilevel systems", - M.: "World", 1973, 633 p.
5. Druzhinin V. V., D. S. Kontorov the basics of military engineering, - M.: the USSR Ministry of defense, air defense forces, 1983, 415 p.
6. Titov V. V. Morphological approach. 1990 / / Internet resource http://www.metodolog.ru/00915/00915.html ahhh! Appeal 18.01.2009.
7. Nestrugin A. S., Nichugovsky V. N. and others. Synthesis of radio communication complexes in the conditions of uncertainty. Vestnik of Voronezh state technical University, series "a CAD and system automation", vol.3.3-Voronezh: VSTU, 2003.
8. Kozlov S. V., Karpukhin V. I., lazarenkov S. M. models of conflict of aviation systems of electronic warfare and air defense / Monograph. – Voronezh: VUNTS VVS "VVA", 2013. - 468 p.
9. Radzievskiy V. G. Nevolin, A. D. Models and methodology for assessing the effectiveness radiopod-tion of the means of electronic reconnaissance and destruction of aerospace systems of precision weapons in the information conflict./ Monograph. Recenzent-doctor of technical Sciences associate Professor Kirsanov EA. Doctor of engineering SNS Majewski YUI– Voronezh: VUNTS VVS "VVA", 2016. - 234 p.; 36 Il.
10. Pavlovsky M. V. model for the application of the tensor analysis, the Crown in the interests of the synthesis of complex special systems electronic warfare systems. Collection of papers at the XXII conference "Radar, navigation, communication" RLNC-2016, - Voronezh: NPF "SEQUOIA", 19-21 April, 2016. Vol. 3 From 1523-1530.
11. Pavlovsky M. V. Geometric theory of hierarchical constructions of complex specialized systems of radio-electronic weapons. Collection of papers at the XXII conference "Radar, navigation, communication" RLNC-2016, - Voronezh: NPF "SEQUOIA", 19-21 April, 2016. Vol. 3 From 1531-1546.
12. Gonorovsky I. S. Radio circuits and signals. Textbook for universities. Ed. 2nd, re-worked and supplemented, - M.: "Owls. radio", 1971. 672 p., Fig.

13. Pavlovsky M. V. method for solving matrix equations used for the synthesis of complex special systems. // Bulletin of Voronezh state University. Series "System analysis and information technologies". No. 1, 2018. S. 19 – 25.
14. Pavlovsky M. V. representation Theorem of influent samples of special equipment in complex ergatic systems. Collection of papers at the XXI international scientific-technical conference "Radiolocation, navigation, communications" RLNC-2015 - Voronezh, NPF "SEQUOIA", 14-16 April, 2015. Vol. 2 1000 – 1007.
15. Pavlovsky M. V. method of calculation of the influent of the selected influence of samples of special equipment as a part of complex ergatic systems. Collection of papers at the XXI international scientific-technical conference "Radiolocation, navigation, communications" RLNC-2015 - Voronezh, NPF "SEQUOIA", 14-16 April, 2015. Vol. 2 From 1008-1014.
16. Pavlovsky M. V. the Method of choice coordination complex electronic systems armed-tion on the basis of application of the theorems of continuity and separability influencesa analysis // "Information conflict in the spectrum of electromagnetic waves", No. 32, 2016, pp. 4-7. "Radio engineering" №8, 2016, p. 6-9.
17. Pavlovsky M. V. the method of accounting for the improvement of individual characteristics of complex specialized systems of electronic weapons on the basis of the independence theorem in-fluid.The collection of papers XXIII international scientific-technical conference "Radiolocation, navigation, communications" RLNC-2017, - Voronezh: Publishing house "Scientific research publishing" LTD ", WELBORN", 2017. In three volumes. Vol. 1 P. 103 – 110.
18. Pavlovsky M. V. Solution of the problem of division of the coordination process into stages and rules of application of the influent analysis to the problem of coordination of complex special systems of electronic weapons. The collection of papers XXIII international scientific-technical conference "Radiolocation, navigation, communications" RLNC-2017, - Voronezh: Publishing house "Scientific research publishing" LTD ", WELBORN", 2017. In three volumes. Vol. 1 Pp. 111 – 116.
19. Truchaev R. I. "Influently analysis and decision making (deterministic analysis)", M: "Nauka", 1984. - 235 p.
20. Lutsenko A. D. Methods for the assessment of military-economic expediency of works on creation of perspective samples of EW equipment - Voronezh: GNIIT EW OESS, 2009. 50 PP.
21. Pavlovsky M. V., Popov I. V. the use of econometric modeling in the evaluation of the cost and duration of work on the creation of samples of radioelectronic warfare equipment. "Bulletin of The air force Academy", №2 (23), 2015 chipboard. 255 to 259.
22. Pavlovsky M. V., Petrov A.V. route Management in simulation model of distributed communication and data transmission network.// "Telecommunications" №11 2008, p. 10-15.
23. Pavlovsky M. V. Simulation modeling of radio-electronic conflict of complex ergatic systems: the structure of the model. Proceedings of the XV International scientific and methodological conference "Informatics: problems, methodology, technologies" 12-13 February 2015. Vol. 1, p. 369-373, - Voronezh: Publishing house of VSU, 2015. P. 490.
24. Pavlovsky M. V., Tyukachev N. Ah. Simulation modeling of radio-electronic conflict of complex ergatic systems: initial data.// Bulletin of the Voronezh state University. Series "System analysis and information technologies". // №3, 2015. Pp. 17 – 23.
25. Pavlovsky M. V., Tyukachev N. Ah. Simulation modeling of radio-electronic conflict of complex ergatic systems: dynamics of structures of the parties to the conflict. // Bulletin of Voronezh state University. Series "System analysis and information technologies". // №3, 2015. Pp. 24 – 32.
26. Pavlovsky M. V., Tyukachev N. Ah. Simulation modeling of radio-electronic conflict of complex ergatic systems: dynamics of loading sides. // Bulletin of Voronezh state University. Series "System analysis and information technologies". // №4, 2015. P. 13 – 21.
27. Pavlovsky, M. V., Garshina V. V. Algorithm of multiple access with listening of carrier and conflict detection and analysis of energetic conflict. Proceedings of the XV International scientific and methodological conference "Informatics: problems, methods, technologies" 11-12 February 2016. Computer modeling in funda-mental and applied research, p. 371-375, - Voronezh: Publishing house of VSU, 2016.
28. Pavlovsky M. V., Tkachev N.. Take into account the working of routing algorithms information flows. Materials of the XV International scientific and methodological conference "Informatics: problems, methodology, technologies" 11-12 February 2016. Computer modeling in fundamental and applied research, p. 375-381, - Voronezh: Publishing house of VSU, 2016.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНФЛИКТНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

М. П. Иванкин[1], Н. Н. Толстых[1], В. Ф. Свердел[2], В. В. Сафронов[3]

[1] АО “Концерн «Созвездие», Воронеж, Россия
[2]Министерство обороны РФ, Москва, Россия
[3]Воронежский государственный технический университет (ФГБОУ ВО ВГТУ), Воронеж, Россия

Аннотация. Описаны результаты моделирования работы подсистемы ситуационного управления в инфокоммуникационной системе, функционирующей в условиях информационного конфликта

Ключевые слова: воздействие, инфокоммуникационная система, информационный конфликт, моделирование, нечеткие множества, ситуационное управление

CORRECTION PROCESSES MODELING OF INFOCOMMUNICATION SYSTEMS CONFLICT COMPONENTS PERAMETERS

M. P. Ivankin[1], N. N. Tolstykh[1], V. F. Sverdel[2], V. V. Safronov[3]

[1]Join Stock Company “Concern “Sozvezdie”, Voronezh, Russia
[2]Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia
[3]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The results of modeling the work of the situational control subsystem in the infocommunication systems operating in the conditions of information conflict are described.

Keywords: fuzzy sets, impact, infocommunication system, information conflict, modeling, situational control

1. Введение

На сегодняшний день успешное функционирование инфокоммуникационных систем (ИКС) напрямую зависит от их способности к адаптации. Это прежде всего необходимо при изменении внешних условий, когда от них напрямую зависит вероятность реализации целевой функции системы. Устойчивое функционирование ИКС в таких условиях может обеспечить возможность коррекции ее поведения при неполных данных, оценка степени адекватности (выполнимости) принимаемых решений при ведении различных, в том числе и запланированных, действий [1].

Одним из вариантов решения описанной задачи является введение в такую систему S, подсистемы управления R, которая в процессе функционирования на основе заложенного аппарата сможет скорректировать поведение компонентов ИКС, повысив эффективность ее функционирования.

Можно выделить три основных типа систем управления: ситуационные, адаптивные, рефлексивные. Так как зачастую в современных ИКС процессы протекают достаточно быстро, а время реализация воздействий (сигнальных, информационных) априорно неизвестно, то они нуждаются в подсистеме оперативного управления для выработки ситуационного решения в реальном времени [1].

Целесообразно рассмотреть моделирование процессов функционирования ИКС, включающей в себя подсистему ситуационного управления [3], в условиях неопределенности типа и метода проведения воздействий (сигнальных, информационных).

2. Результаты моделирования

Рассмотрим подсистему ситуационного управления на основе работы имитационной модели [2] ИКС, включающей в себя 10 компонентов s_i, каждый из которых содержит 10 рабочих параметров par_i.

В процессе ее работы было обнаружено порядка $2*10^4$ случаев коррекции параметров системы. На рисунке 1 представлены параметры компонентов системы до попытки управления:

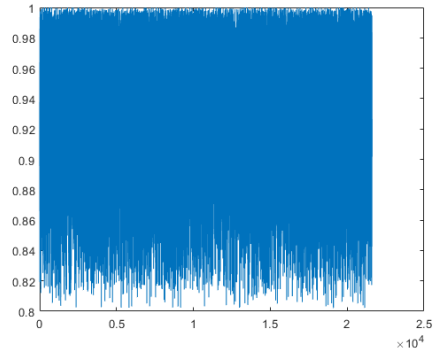


Рис. 1. Параметры конфликтных компонентов системы критических приложений до попытки коррекции

Для каждого из компонентов подсистема управления ставит в соответствие элемент нечеткого множества [4,5] R, на основе параметров которого принимается решение о необходимости коррекции работы компонента ИКС. Для всех рассмотренных в результате работы модели случаев была построена гистограмма верхних границ диапазонов рабочих состояний компонентов ИКС, представленный на рисунке 2.

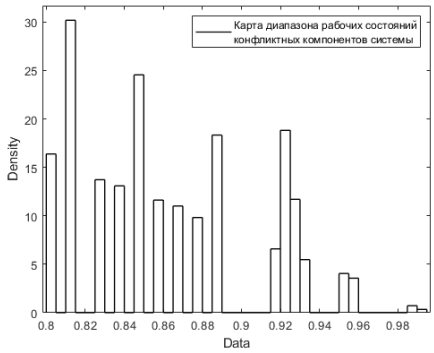


Рис. 2. Гистограмма верхних границ диапазонов рабочих состояний конфликтных компонентов системы критических приложений

Для описания полученных результатов целесообразно рассмотреть работу подсистемы ситуационного управления в процессе функционирования имитационной

модели. Подсистема управления хранит в памяти множество R рабочих параметров компонентов системы:

$$R = \begin{pmatrix} 1,1807 & 0,9577 & 1,2835 & 1,1248 & 1,2706 & 0,8459 & 0,9272 & 1,7044 & 1,4118 & 1,3891 \\ 1,6619 & 1,5027 & 1,5537 & 1,0725 & 0,9548 & 1,0757 & 1,1144 & 0,8790 & 1,0613 & 1,6176 \\ 1,5222 & 1,3862 & 1,6425 & 1,3994 & 1,6344 & 0,8386 & 1,7954 & 1,2798 & 1,6455 & 1,0875 \\ 1,4028 & 0,9292 & 0,8868 & 0,9190 & 0,8681 & 0,8021 & 1,6251 & 1,7319 & 1,7911 & 1,5540 \\ 1,0565 & 1,7723 & 1,3271 & 0,9944 & 0,8498 & 1,5487 & 1,5929 & 1,4880 & 0,8590 & 1,2520 \\ 1,3851 & 1,1864 & 1,4719 & 1,1359 & 1,0183 & 1,0228 & 1,1225 & 0,9218 & 1,7286 & 1,5791 \\ 0,9896 & 1,2575 & 0,8135 & 1,5391 & 0,9246 & 1,6042 & 1,6552 & 1,6674 & 0,8282 & 1,1240 \\ 1,6672 & 1,7179 & 1,0218 & 1,5781 & 1,5874 & 1,1878 & 1,5569 & 1,4314 & 1,2718 & 1,7086 \\ 1,1174 & 0,9302 & 1,4125 & 0,8144 & 1,5576 & 1,2772 & 1,5011 & 1,1915 & 0,9236 & 1,0782 \\ 1,6047 & 0,8855 & 1,0826 & 1,4689 & 1,4640 & 1,3782 & 1,6468 & 1,7862 & 1,5337 & 1,4088 \end{pmatrix} \quad (1)$$

В момент времени *t* подсистема управления получает информацию о текущих значениях параметров компонентов системы, описанных множеством S:

$$S = \begin{pmatrix} 0,8437 & 0,4955 & 0,0087 & 0,6069 & 0,8095 & 0,0596 & 0,9284 & 0,1808 & 0,3577 & 0,7992 \\ 0,1772 & 0,0689 & 0,4063 & 0,6841 & 0,0710 & 0,0982 & 0,9605 & 0,2699 & 0,3663 & 0,8682 \\ 0,9228 & 0,7454 & 0,2360 & 0,1969 & 0,3124 & 0,3477 & 0,3301 & 0,5605 & 0,8647 & 0,4560 \\ 0,8699 & 0,8693 & 0,6265 & 0,0271 & 0,9185 & 0,2045 & 0,5137 & 0,6925 & 0,9849 & 0,5183 \\ 0,0995 & 0,7358 & 0,0037 & 0,5798 & 0,4809 & 0,9114 & 0,5372 & 0,9502 & 0,8074 & 0,9391 \\ 0,7456 & 0,6560 & 0,3693 & 0,5316 & 0,5632 & 0,3216 & 0,5441 & 0,7133 & 0,7175 & 0,2379 \\ 0,5821 & 0,9761 & 0,1251 & 0,2064 & 0,7922 & 0,9718 & 0,8060 & 0,0274 & 0,5375 & 0,0338 \\ 0,1705 & 0,0875 & 0,4094 & 0,5004 & 0,8077 & 0,1072 & 0,0684 & 0,9329 & 0,6584 & 0,2164 \\ 0,7090 & 0,9429 & 0,9722 & 0,2501 & 0,3982 & 0,9552 & 0,3527 & 0,3428 & 0,1637 & 0,0649 \\ 0,2939 & 0,3963 & 0,2535 & 0,4679 & 0,5853 & 0,1742 & 0,4549 & 0,2919 & 0,7440 & 0,6614 \end{pmatrix} \quad (2)$$

На рисунке 3 представлена гистограмма выборочной статистики для случая, когда была необходима коррекция параметров системы.

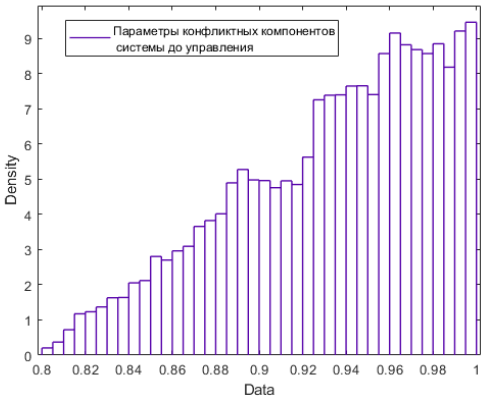


Рис. 3 Гистограмма параметров конфликтных компонентов системы критических приложений до попытки управления

На основе работы анализатора подсистема переходит от нечеткого множества [5] к обычному и делает вывод о том, что необходимо скорректировать работы компонентов 1,4 и 9:

$$\underset{\simeq}{S} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Результат попытки коррекции параметров компонентов системы описан множеством $S^{'}$:

$$S' = \begin{pmatrix} 0,8437 & 0,4955 & 0,0087 & 0,6069 & 0,8095 & 0,0596 & 0,9106 & 0,1808 & 0,3577 & 0,7992 \\ 0,1772 & 0,0689 & 0,4063 & 0,6841 & 0,0710 & 0,0982 & 0,9605 & 0,2699 & 0,3663 & 0,8682 \\ 0,9228 & 0,7454 & 0,2360 & 0,1969 & 0,3124 & 0,3477 & 0,3301 & 0,5605 & 0,8647 & 0,4560 \\ 0,8699 & 0,8693 & 0,6265 & 0,0271 & 0,8377 & 0,2045 & 0,5137 & 0,6925 & 0,9849 & 0,5183 \\ 0,0995 & 0,7358 & 0,0037 & 0,5798 & 0,4809 & 0,9114 & 0,5372 & 0,9502 & 0,8074 & 0,9391 \\ 0,7456 & 0,6560 & 0,3693 & 0,5316 & 0,5632 & 0,3216 & 0,5441 & 0,7133 & 0,7175 & 0,2379 \\ 0,5821 & 0,9761 & 0,1251 & 0,2064 & 0,7922 & 0,9718 & 0,8060 & 0,0274 & 0,5375 & 0,0338 \\ 0,1705 & 0,0875 & 0,4094 & 0,5004 & 0,8077 & 0,1072 & 0,0684 & 0,9329 & 0,6584 & 0,2164 \\ 0,7090 & 0,8742 & 0,9722 & 0,2501 & 0,3982 & 0,9552 & 0,3527 & 0,3428 & 0,1637 & 0,0649 \\ 0,2939 & 0,3963 & 0,2535 & 0,4679 & 0,5853 & 0,1742 & 0,4549 & 0,2919 & 0,7440 & 0,6614 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Результат работы подсистемы ситуационного управления представлен в виде гистограммы на рисунке 4.

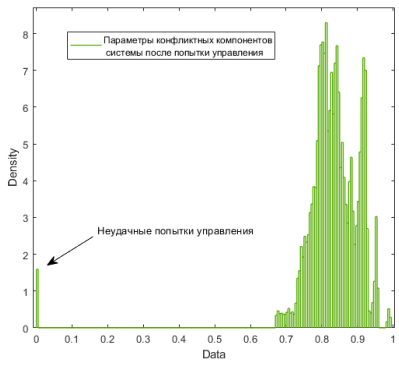


Рис. 4. Гистограмма параметров конфликтных компонентов системы критических приложений после попытки управления

После попытки коррекции подсистема управления снова анализирует параметры текущих состояний и делает вывод о том, что параметры компонентов системы вернулись в рабочий диапазон:

$$\underset{\simeq}{S'} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

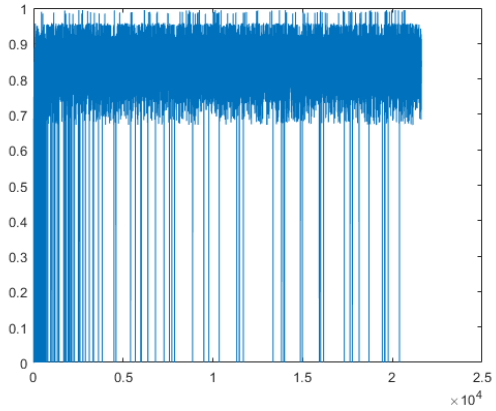


Рис. 5. Параметры конфликтных компонентов системы критических приложений после попытки коррекции

Неудачные попытки управления в работе модели характеризуются перезагрузкой конфликтного компонента системы и сброса его параметров в 0 (рисунок 5). После интервала времени Δt, когда статистика для базы знаний была набрана, вероятность успешной коррекции параметров выросла.

3. Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что в начале функционирования ИКС, когда компонент R не обладает достаточно обширной базой знаний, попытки коррекции были неудачными и происходила перезагрузка потенциально конфликтного компонента. Таким образом, для штатной работы подсистемы необходим определенный временной интервал, который позволит накопить статистику.

На основе полученных результатов представляется возможным сделать вывод о потенциале использования в различных ИКС предлагаемого подхода к построению подсистемы ситуационного управления для повышения вероятности реализации ее целевой функции.

Литература

1. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. Для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 2001. – 343 с.: ил.
2. Иванкин М.П. // К вопросу оценки эффективности систем программно-определяемого радио в условиях информационного конфликта / Иванкин М.П., Толстых Н.Н., Савинков А.Ю., Свердел В.Ф. Теория и техника радиосвязи, 2018, №4. – С.
3. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. -М.: Наука, 1986.
4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с., ил.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного ителлекта / Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.

References

1. Ivankin M.P. To the issue of evaluating the effectiveness of software-defined radio systems in the context of information conflict / Ivankin M.P., Tolstykh N.N., Savinkov A.Y., Sverdel V.F. // Radio Communication Theory and Technology, 2018, No. 4. – Pp. 14-18
2. Pospelov D.A. Situational management: theory and practice. –Moscow: Nauka, 1986.
3. Sovetov B.Y., Yakovlev S.A. System modelling. –Moscow: High School, 2001. – 323 p.
4. Kofman A. Fuzzy Sets Theory. – Moscow: Radio and Communication, 1982. – 432 p.
5. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models / Ed. D.A. Pospelov. – Moscow: Nauka, 1986. – 312 p.

МОДЕЛЬ ГРУППОВОЙ АТАКИ АВТОНОМНЫМИ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

А. В. Мефедов[1]

[1]Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье осуществлено моделирование групповой атаки ударными беспилотными летательными аппаратами при их оптимальном целераспределении в автономном режиме, в условиях противодействия со стороны противовоздушной обороны противника.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; интеллектуальная информационно-управляющая система; автономный режим.

MODEL OF GROUP OF AUTONOMOUS UNMANNED ATTACK AIRCRAFT

A.V. Mefedov[1]

[1]Military education scientific center of the Air Force «Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (MESC AF «AFA»), Voronezh, Russian Federation

Abstract. In this article modeling of group attack by shock unmanned aerial vehicles at their optimum target distribution in the Autonomous mode, in the conditions of counteraction from antiaircraft defense of the opponent is carried out.

Keywords: unmanned aerial vehicle; intelligent information management system; offline mode.

1. Введение

В военных конфликтах последних десятилетий активно стали применяться и приобретать всё большее значение ударные (разведывательно-ударные) БПЛА. Тактико-технические характеристики (ТТХ) современных ударных (разведывательно-ударных) БПЛА практически вплотную приблизились к ТТХ пилотируемых истребителей. Это даёт основание предполагать, что в скором времени пилотируемые истребители будут существенно сокращены и заменены на ударные (разведывательно-ударные) БПЛА. Одним из основных преимуществ БПЛА перед пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА) является отсутствие лётчика на борту, что снимает многие ограничения связанные с человеческим фактором. Отдельно стоит остановиться на групповом применении ударных (разведывательно-ударных) БПЛА.

2. Постановка задачи

Известно, что воздушный удар группой БПЛА имеет существенно большую эффективность по сравнению с атакой одиночного БПЛА [1]. Однако при типовом групповом применении БПЛА может возникать ряд существенных недостатков:

– каналы управления и передачи данных могут быть легко перехвачены, подавлены средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ) противника, в результате чего может быть обнаружена и уничтожена вся группа БПЛА;

– высока вероятность поражения большей части группы БПЛА при пролете насыщенной зоны противовоздушной обороны (ПВО) противника, что требует повторного решения задачи целераспределения для максимизации наносимого ущерба;

– при типовом варианте группового применения БПЛА нет оценки потребного количества операторов управления, нет согласованности их действия между собой.

Данные проблемы могут быть разрешены при групповом применении ударных (разведывательно-ударных) БПЛА в автономном режиме.

Для автономных действий ударных (разведывательно-ударных) БПЛА над территорией противника необходимо автоматизировать процесс решения задачи по оценке собственных сил и вторичного целераспределения. Для чего предлагается использовать единый алгоритм целераспределения и управления сетью БПЛА, установленный на борту каждого участника сети. На борту каждого БПЛА предполагается устанавливать единую, интеллектуальную информационно-управляющую систему (ИУС) с едиными алгоритмами решения задачи целераспределения. Для работы такой интеллектуальной ИУС необходима информация об оставшихся БПЛА и их координатах после пролёта насыщенной зоны ПВО противника, т.е режим информационной осведомленности:

– каждый БПЛА должен иметь свой групповой номер, в заданный момент времени происходит излучение каждым БПЛА в пространство кодовой посылки, содержащей свой номер и текущие координаты;

– на каждом БПЛА в ИУС формируется таблица с функционирующими БПЛА группы и их координатами.

При этом на борту всех БПЛА должны быть зашиты координаты всех атакуемых наземных целей с коэффициентами их важности. Важность целей возможно определить с помощью метода анализа иерархий (МАИ) [2].

В качестве условной боевой задачи (БЗ) рассматривается нанесение авиаудара группой автономных ударных (разведывательно-ударных) БПЛА по неоднородным рассредоточенным наземным целям противника, защищенных системами ПВО. Группу ударных (разведывательно-ударных) БПЛА предлагается рассматривать как средство гарантированного поражения или нанесения максимально возможного ущерба противнику за отведенный для операции интервал времени T. После пролёта насыщенной зоны ПВО противника, в определённый момент времени каждый БПЛА излучает разовые кодовые посылки со своим групповым номером и текущими координатами. При этом на борту каждого БПЛА производится прием кодовых посылок и их расшифровка. В результате чего, к определенному моменту времени на каждом БПЛА в его бортовой цифровой вычислительной системе (БЦВС) будет иметься информация о работоспособных (не сбитых) БПЛА и их координатах. Зная координаты атакуемых целей и координаты каждого БПЛА, мы можем определить расстояния от каждого БПЛА в группе до каждой цели.

3. Алгоритм решения задачи оптимального целераспределения группы БПЛА

Обладая информацией о потребном количестве применяемых по каждой цели ударных (разведывательно-ударных) БПЛА, зададим матрицу R размером $m \times n$, где m – количество БПЛА в группе, а n – количество поражаемых целей. Расстояния r_{ij} от каждого j-го БПЛА до каждой i-й цели укажем на пересечении строк и столбцов данной матрицы:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{ij} & \cdots & r_{ij} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для наиболее эффективного, оптимального целераспределения необходимо также учесть потребное количество N БПЛА на каждую атакуемую наземную цель противника:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{ij} & \cdots & r_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Далее применим Венгерский метод решения задачи о назначениях. В результате получим матрицу оптимального целераспределения БПЛА:

$$D = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где единица на пересечении i-й строки и j-го столбца означает назначение j-го ударного (разведывательно-ударного) БПЛА на i-ю атакуемую цель, ноль в противном случае. Причем на каждую атакуемую наземную цель противника назначается потребный наряд ударных (разведывательно-ударных) БПЛА в зависимости от важности каждой атакуемой наземной цели.

Зададим условную БЗ. Зададим тип и количество целей противника, а также введем исходные данные в предлагаемую имитационную модель координированной атаки группой автономных ударных (разведывательно-ударных) БПЛА. Пусть необходимо поразить три радиолокационные станции (РЛС) и один пункт управления (ПУ) противника. Тогда необходимый наряд БПЛА, будет определяться из расчета два-три ударных (разведывательно-ударных) БПЛА на одну РЛС-цель (в зависимости от типа) и восемь БПЛА на один ПУ согласно [4]. Для преодоления систем ПВО, необходимый наряд составляет около четырёх ударных (разведывательно-ударных) БПЛА, коэффициент вероятности их поражения, согласно [4], составляет 0,7. Следовательно для преодоления ПВО противника может понадобиться около трёх БПЛА. В таком случае необходимый наряд группы, с учётом преодоления ПВО, составит восемнадцать ударных (разведывательно-ударных) БПЛА, после преодоления зоны ПВО противника – пятнадцать. Введём данные значения в исходную таблицу (матрицу). Расстояния в матрице R зададим с учётом координат БПЛА после

преодоления зоны ПВО противника, а также зададим потребное количество БПЛА на каждую цель. В результате работы предлагаемого алгоритма получим таблицу (матрицу) оптимального целераспределения БПЛА с учётом введённых исходных данных:

Таблица 1. Оптимальное целераспределение группы БПЛА

БПЛА / Цели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
4	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0

В данной таблице единицами обозначены номера назначенных на каждую цель ударных (разведывательно-ударных) БПЛА.

Модель групповой атаки автономными БПЛА была запрограммирована в среде МАТЛАБ. Графически представлены полученные результаты, показанные на рисунках 2,3.

4. Моделирование групповой атаки ударными БПЛА

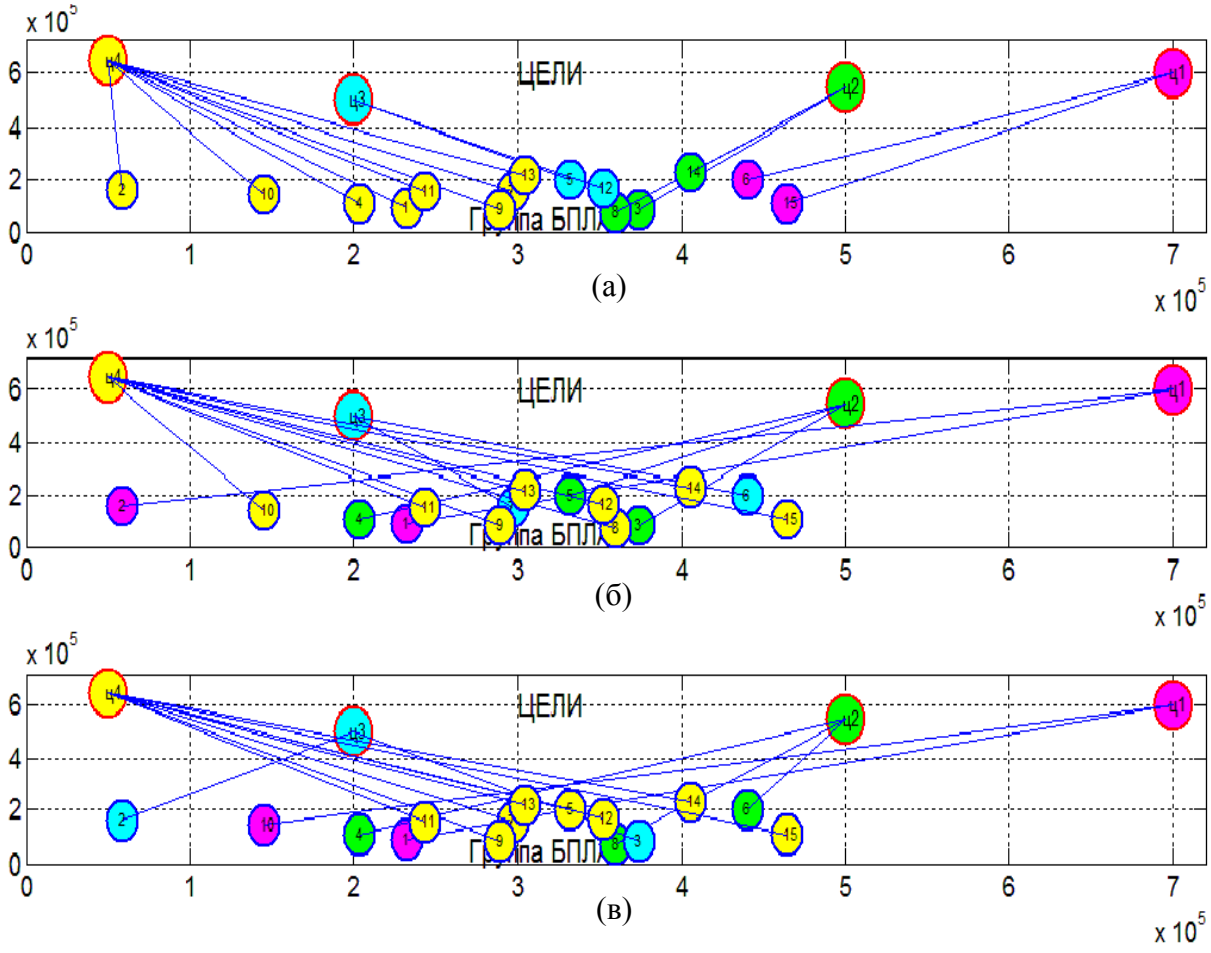


Рис. 2. Варианты целераспределения группы БПЛА: а) оптимальный; б) последовательный; в) средний из 500 случайных (метод Монте-Карло).

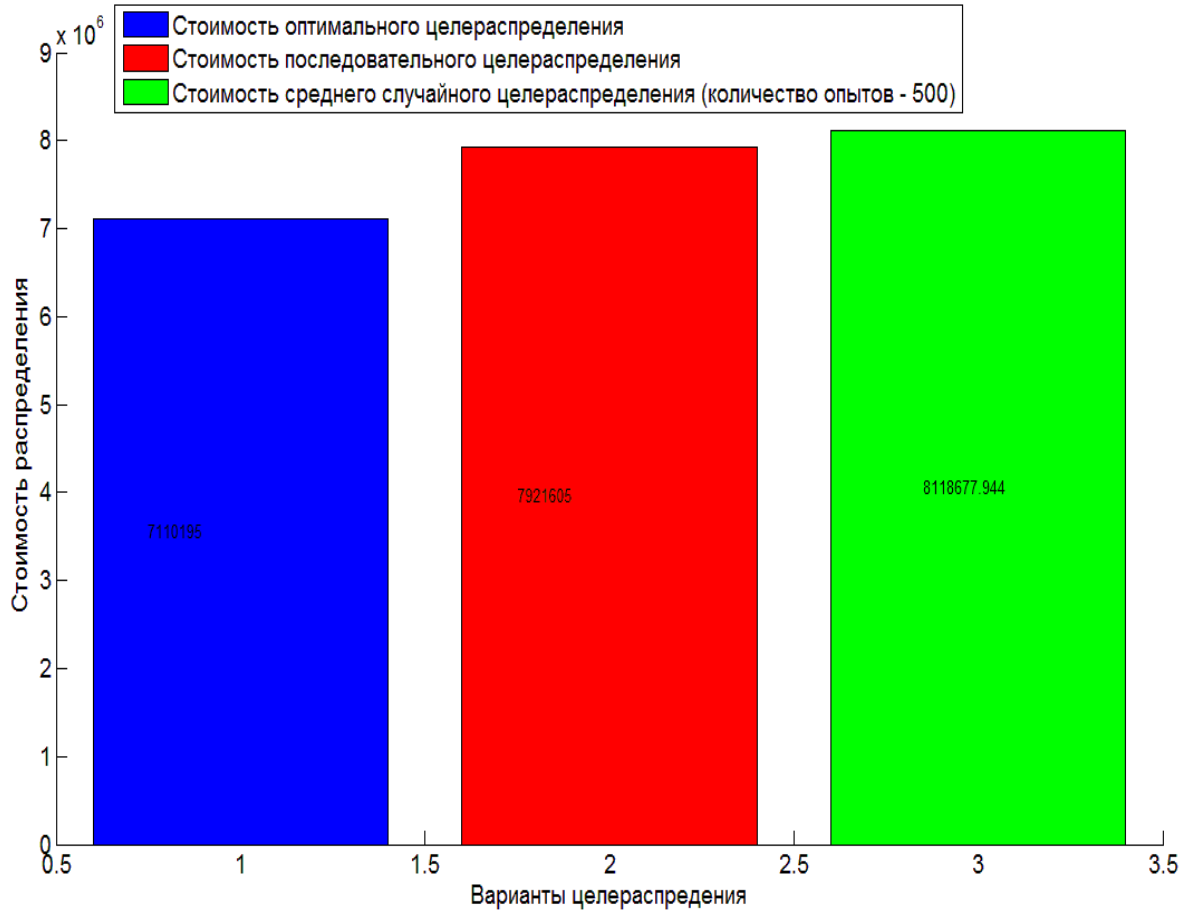


Рис. 3. Гистограмма стоимостей нескольких вариантов целераспределения БПЛА.

На данной гистограмме наглядно представлена эффективность предлагаемой модели групповой атаки автономными БПЛА. Было промоделировано несколько вариантов целераспределения группы БПЛА. Наименьшая стоимость матрицы целераспределения указывает на наибольшую эффективность предлагаемой модели.

5. Заключение

Таким образом решение задачи оптимального целераспределения ударных (разведывательно-ударных) БПЛА при групповой атаке наземных целей противника с учётом оценки их важности, а также оценки расстояний от каждого БПЛА до каждой атакуемой наземной предлагается с помощью данной модели.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

– предложенная модель адекватна и имеет научную новизну;

– моделирование отвечает условиям реальной БЗ;

– возможно практическое применение данной модели для решения БЗ по групповому применению ударных (разведывательно-ударных) БПЛА.

Литература

1. Верба В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография / В.С. Верба. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

2. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
3. Бабич В. К. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / В.К. Бабич. – М.: Дрофа, 2001. – 816 с.
4. Панов В.В., Фатеев А.В., Сурда В.П., Курдасов В.К., Попов Б.И. Сборник научно-технической информации (спецвыпуск). Зарубежные комплексы ПРО №4 (50). – Тула.: ОАО КБК им. академика А.Г. Шипунова, 2014. – 256 с.

REFERENCES

1. Verba V. S. Aircraft radar patrol and guidance. Principles of construction, problems of development and features of functioning. Monograph / V. S. Verba. – M.: Radio engineering, 2014. – 528 p.
2. Saati T. Decision-Making. Analytic hierarchy process / T. Saaty ; lane. from English. R. G. Vachnadze. – M: Radio and communication, 1993. – 278 p.
3. Babich V. K. Aviation air defense of Russia and scientific-technical progress. Military complexes and systems yesterday, today, tomorrow / V. K. Babich. - M: Drofa, 2001. – 816 p.
4. Panov V. V., Fateev A. V., Surda V. P., Kurdasov V. K., Popov B. I. Collection of scientific and technical information (special issue). Foreign missile defense systems №4 (50). – Tula.: PC them academician A.G. Shipunova, 2014. – 256 p.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

А. Ф. Латыпова[1]

[1]АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрен подход к оценке пропускной способности автоматизированной системы управления в ходе динамики местоположения объектов противостоящей системы. Предложена методика разработки модели оценки пропускной способности с использованием аппарата нечеткой логики.

Ключевые слова: автоматизированная система управления специального назначения, пропускная способность, нечеткая логика, алгоритм Мамдани; функции принадлежности.

MODEL OF EVALUATING THE THROUGHPUT OF THE SYSTEM IN THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM BASED OF FUZZY LOGIC

A. F. Latypova[1]

[1]JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

Abstract. The approach to estimating the throughput of the automated control system during the dynamics of the location of objects of the opposing system in the article is considered. The authors offer a method for the development of the model of estimating the throughput using a fuzzy logic.

Keywords: automated control system for special purpose, throughput, fuzzy logic, algorithm Mamdani; membership functions.

1. Введение

Одной из основных функций автоматизированной системы управления (АСУ) является выработка и принятие обоснованных решений в условиях неопределенности. Для этого необходимо, чтобы лицо, принимающее решение, имело достаточно полную информацию о состоянии автоматизированной системы управления в режиме реального времени. От качества предоставления информации в большей степени зависит непрерывность и оперативность процессов управления. Поэтому решение задач пропускной способности является актуальной задачей.

Вопросы распределения входящего трафика в автоматизированных системах специального назначения в интересах сокращения длительности цикла управления представляют собой сложную задачу. Перед исследователями встают проблемы оценки пропускной способности системы на основе большого количества исходных данных. Необходимость учитывать характеристики отдельных составляющих автоматизированных систем, условия их функционирования, нечеткость исходной информации приводит в результате к задаче построения разделяющей поверхности, выраженной сложной многокритериальной функцией.

Для решения данной задачи в работе предлагается подход к оценке пропускной способности автоматизированной системы управления специального назначения на

основе аппарата нечеткой логики через параметры внешней среды. Аппарат нечеткой логики, являясь более простым для понимания и вычислительной реализации, представляет собой инструмент моделирования динамических процессов в реальном времени в условиях, когда детальной информации для построения строгой аналитической модели процесса недостаточно либо сама математическая модель оказывается сложной для практической реализации в реальном времени.

Целью настоящей работы является разработка модели оценки пропускной способности автоматизированной системы управления на основе аппарата нечеткой логики при изменении внешней среды.

2. Методика построения модели оценки пропускной способности АСУ

Пусть имеется сеть радиодоступа, состоящая из базовой станции и N количества абонентских терминалов, движущихся со средней скоростью V, находящихся на расстоянии R между собой. В данной сети используется коммутация пакетов. Информация об абонентах и вновь появляющихся объектах поступает в автоматизированную систему управления для принятия решения о дальнейших действиях.

Поток пакетов в сети рассматривается как случайный поток заявок на обслуживание, линия связи рассматривается как обслуживающее устройство, которое занимаются передаваемыми пакетами на некоторое случайное время, равное времени передачи пакета. Модель такой системы должна описывать взаимодействие двух случайных процессов: процесса поступления заявок и процесса освобождения, т.е. является моделью системы массового обслуживания (СМО).

Подробно модели СМО описаны в [1]. Они разработаны для потоков и процессов, имеющих определенные свойства. От правильного выбора этой модели зависит точность расчета основных характеристик СМО. Однако в связи с тем, что в пакетных сетях связи информационные потоки могут иметь постоянную, переменную и смешанную битовую скорость, построить адекватную математическую модель с помощью СМО очень сложно [1].

Количественная оценка непосредственного влияния количества объектов противостоящей стороны на пропускную способность системы управления вызывает значительные трудности в связи с тем, что количество объектов и поступающих от них сообщений влияют на пропускную способность опосредованно, через объем передаваемой информации.

Задача комплексного учета совокупности описанных параметров требует наличия специализированных знаний и эвристического опыта со стороны разработчиков. В этом случае математическую модель оценки пропускной способности при воздействии внешней среды в условиях изменения местоположения противостоящей стороны можно представить в виде следующей функциональной зависимости:

$$G = f(N, R, \overline{V}, ...), \qquad (1)$$

где N – количество объектов противостоящей стороны, R – среднее расстояние между объектами, V – средняя скорость движения объектов противостоящей стороны, G – нормированная пропускная способность.

На данный момент в литературных источниках отсутствует аналитическая формулировка представленной зависимости [2-7].

Поэтому для принятия решения о присвоении нормированных коэффициентов пропускной способности информационных каналов АСУ в зависимости от местоположения объектов противостоящей стороны воспользуемся аппаратом нечеткой логики с наиболее распространенной схемой нечеткого вывода Мамдани [8,11].

При построении нечеткого вывода (рисунок 1) в качестве входных переменных будут использоваться N – количество объектов, R – среднее расстояние между объектами, V – средняя скорость движения объектов противостоящей стороны.

Выходной переменной будет являться относительный показатель пропускной способности G, базовое значение которого находится в диапазоне [0;1], где 1 означает низкую пропускную способность G.



Рис. 1. Структура модели нечеткой системы принятия решения

Как показано на рисунке 1 принятие решения с использованием аппарата нечеткой логики представляет собой последовательность этапов.

Первый этап - «фаззификация» (вычисление степеней принадлежности) - сопоставление численных значений переменных их значениям лингвистических (нечетких) переменных (термам) посредством функций принадлежности, определяющих степень соответствия численных значений соответствующим термам. [8, 9, 11].

В качестве функций принадлежности для каждого терма всех лингвистических переменных задаются треугольные функции принадлежности. Использование такого вида функций определено широким кругом задач, решаемых с их использованием, а также [11] возможностью минимизировать количество настроечных параметров системы (для задания функций принадлежности), тем самым упрощая настройку системы. Области значений для всех функций принадлежности лежат в пределах [0;1], где значение «0» - полное несоответствие, а «1» - полное соответствие базового значения соответствующему терму.

Для модельного примера примем значения средней скорости движения группировки объектов противостоящей стороны в диапазоне от 1 – 30 км/ч. Дистанции

между объектами противостоящей стороны могут быть 25 – 50 м. Количество объектов предполагается от 1 до 60.

В качестве терм-множества лингвистической переменной N будем использовать множество F_M = {«малое» (М), «среднее» (С), «большое» (Б)} с функцией принадлежности $\mu_N(N, F_N)$, представленной на рисунке 2.

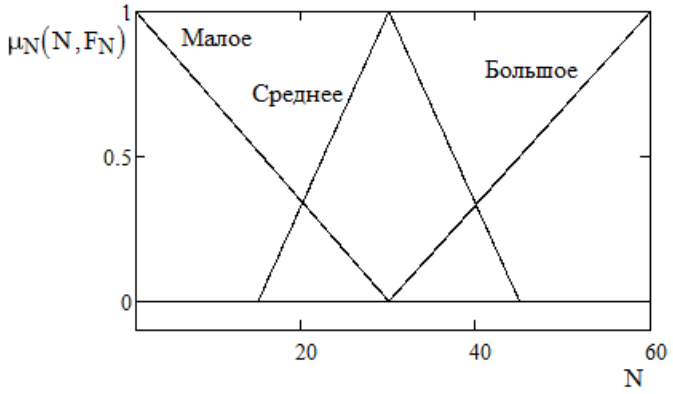


Рис. 2. Функции принадлежности переменной количества объектов противостоящей стороны

Аналогично для переменной V будем использовать множество F_V – {«малая», (М), «средняя» (С), «большая» (Б)} с функцией принадлежности $\mu_V(V, F_V)$, представленной на рисунке 3.

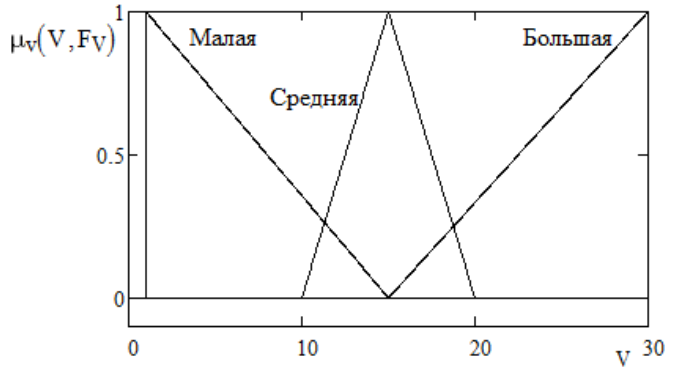


Рис. 3. Функции принадлежности переменной средней скорости объектов противостоящей стороны

Для переменной R будем использовать множество F_R = {«малое», (М), «большое» (Б)} с функцией принадлежности $\mu_R(x)$, представленной на рисунке 4.

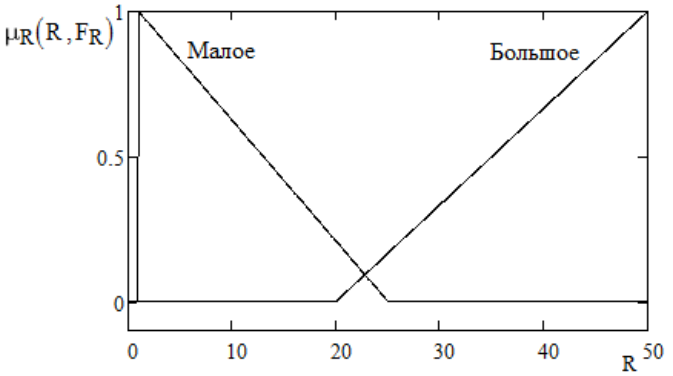


Рис. 4. Функции принадлежности среднего расстояния между объектами противостоящей стороны

Для выходной переменной G определим нечеткое множество в виде F_G = {«малый» (М), «средний» (С), «большой» (Б)} и с функцией принадлежности, представленной на рисунке 5.

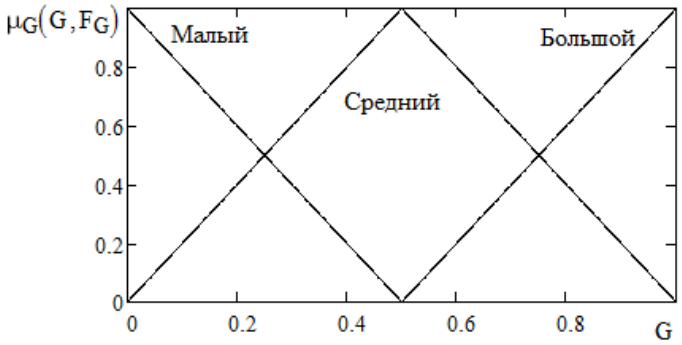


Рис. 5. Функции принадлежности нормированной пропускной способности в АСУ

Второй этап – формирование нечеткого вывода. Основа для проведения –нечеткие правила, используемые для сопоставления сочетаний функций принадлежности входных переменных функции принадлежности выходной переменной по принципу «условие-следствие» («если-то»), при этом сочетание входных условий в данном случае определяется оператором пересечения «И».

В нашем случае система нечеткого вывода будет содержать 18 правил нечетких продукций следующего вида (таблица. 1)

Таблица 1. Правила нечетких продукций

Правило 1:	ЕСЛИ «N есть М»	и	«R есть М»	и	«V есть М»	ТО	«G есть М»
Правило 2:	ЕСЛИ «N есть М»	и	«R есть М»	и	«V есть С»	ТО	«G есть М»
Правило 3:	ЕСЛИ «N есть М»	и	«R есть М»	и	«V есть Б»	ТО	«G есть М»
Правило 4:	ЕСЛИ «N есть М»	и	«R есть Б»	и	«V есть Б»	ТО	«G есть С»
Правило 5:	ЕСЛИ «N есть М»	и	«R есть Б»	и	«V есть С»	ТО	«G есть С»
Правило 6:	ЕСЛИ «N есть М»	и	«R есть Б»	и	«V есть М»	ТО	«G есть С»
Правило 7:	ЕСЛИ «N есть Б»	и	«R есть Б»	и	«V есть Б»	ТО	«G есть Б»
Правило 8:	ЕСЛИ «N есть Б»	и	«R есть Б»	и	«V есть С»	ТО	«G есть Б»
Правило 9:	ЕСЛИ «N есть Б»	и	«R есть Б»	и	«V есть М»	ТО	«G есть Б»
Правило 10:	ЕСЛИ «N есть Б»	и	«R есть М»	и	«V есть Б»	ТО	«G есть С»
Правило 11:	ЕСЛИ «N есть Б»	и	«R есть М»	и	«V есть С»	ТО	«G есть С»
Правило 12:	ЕСЛИ «N есть Б»	и	«R есть М»	и	«V есть М»	ТО	«G есть С»
Правило 13:	ЕСЛИ «N есть С»	и	«R есть Б»	и	«V есть Б»	ТО	«G есть Б»
Правило 14:	ЕСЛИ «N есть С»	и	«R есть Б»	и	«V есть М»	ТО	«G есть Б»
Правило 15:	ЕСЛИ «N есть С»	и	«R есть Б»	и	«V есть С»	ТО	«G есть Б»
Правило 16:	ЕСЛИ «N есть С»	и	«R есть М»	и	«V есть М»	ТО	«G есть С»
Правило 17:	ЕСЛИ «N есть С»	и	«R есть М»	и	«V есть С»	ТО	«G есть С»
Правило 18:	ЕСЛИ «N есть С»	и	«R есть М»	и	«V есть Б»	ТО	«G есть С»

Вычисляются степени принадлежности для каждого правила нечеткого вывода (степень выполнения условия). В данном случае используется оператор пересечения (или t-норма) – одновременное выполнение трех входных условий:

$$\mu_G(G, F_T) = \mu_N(N, F_N) \cap \mu_R(R, F_R) \cap \mu_V(V, F_V), \tag{2}$$

Третий этап - композиция. Производится объединение найденных усеченных функций (ограниченным по оси ординат их вычисленными значениями) с использованием операции МАКСИМУМ, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для выходной переменной с функцией принадлежности:

$$\mu_G^*(G) = \mu_G^*(G, M) \cup \mu_G^*(G, C) \cup \mu_G^*(G, B), \tag{3}$$

где $\mu_G^*(G)$ - обобщенная функция принадлежности.

Четвертый этап – дефаззификация. Для процедуры «дефаззификации» - приведения из нечеткого вида к численному значению относительной пропускной способности используется метод центра тяжести [10-11]:

$$G_i = \frac{\int_0^1 G \cdot \mu_G^*(G) dG}{\int_0^1 \mu_G^*(G) dG}, \tag{4}$$

где G – значение весового коэффициента информационного обмена в АСУ.

По результатам проведения вычислений формируются поверхности вывода значений нормированной пропускной способности [9], соответствующей синтезированной нечеткой системе, представленные на рисунках 6,7,8.

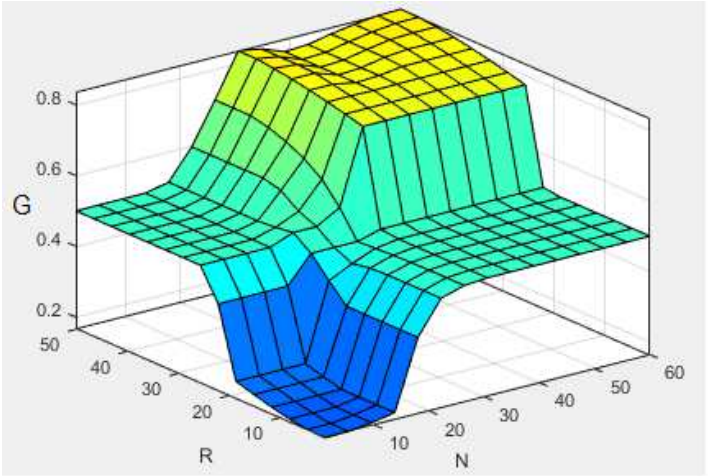


Рис. 6. Поверхность значений нормированной пропускной способности G при V = const

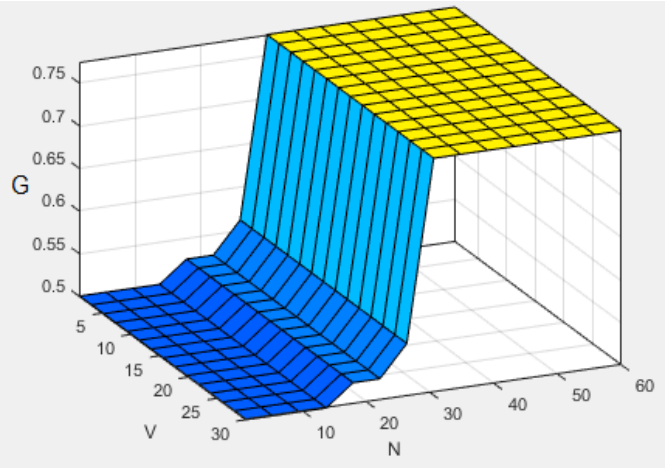


Рис. 7. Поверхность значений нормированной пропускной способности G при R = const

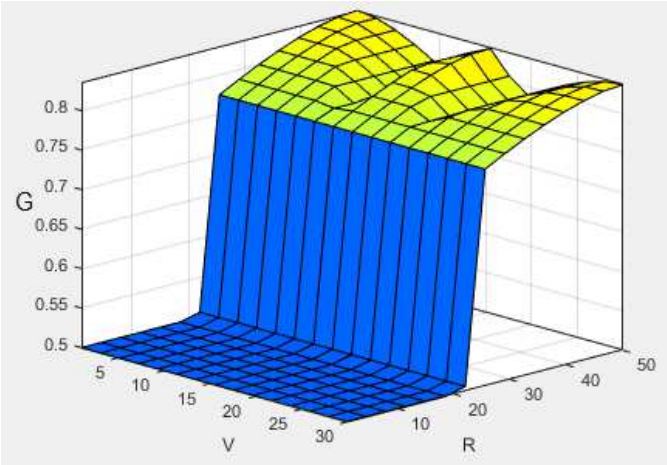


Рис. 8. Поверхность значений нормированной пропускной способности G при N = const

Полученные зависимости, приведенные на рис. 6-8, позволяют анализировать предварительное распределение нагрузки в автоматизированной системе специального назначения для идентификации интервала значений исходных параметров в интересах обеспечения устойчивости АСУ.

3. Заключение

Использование аппарата нечеткой логики позволяет предложить новый подход к оценке пропускной способности в АСУ в динамике изменения внешней среды, определяемой местоположением объектов противостоящей стороны, в условиях нечеткой окружающей среды и невозможности получения устойчивых вероятностных оценок в быстро изменяющейся обстановке.

Предложенный подход к оценке нормированной пропускной способности АСУ с использованием аппарата нечеткой логики может быть применен при концептуальных исследованиях, проводимых при обосновании концепции построения и обеспечения устойчивости АСУ.

Литература

1. Крылов В.В., Самохвалов С.С. Теория телетрафика и ее приложения. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288с.
2. Зальмарсон А.Ф. Общесистемные показатели эффективности автоматизированных систем управления (программно-аппаратных комплексов) / Зальмарсон А.Ф., Васильев В.А., Елецкий М.И., Сидоров С.С.// Автоматизированные системы управления, 2018, №3. – С.11-19.
3. Волков В.Ф. Методика обоснования рационального варианта системы информационного обеспечения АСУ специального назначения / Волков В.Ф., Толмачев А.А.// Автоматизированные системы управления, 2014, №5. – С.52-59.
4. Фендриков М.Н., Яковлев В.И. Методы расчетов боевой эффективности вооружения М.: Воениздат, 1971. – 224 с.
5. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
6. Чуев Ю.В. Прогнозирование в военном деле. М.: Воениздат, 1975. – 279 с.
7. Мартыщенко Л.А. Методы военно-научных исследований в задачах разработки и испытания вооружения. Ч.1. М.: МО, 1981. – 280 с.
8. Круглов В.В., Дли М.И. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит, 2001. – 201 с.
9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 716 с.
10. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. – 165 с.
11. Ярушкина Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

References

1. Krylov V.V., Samokhvalov S.S. Teletraffic theory and its applications. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. – 288p.
2. Zalmarson A.F. System-wide performance indicators of automated command and control systems (software-hardware complexes) / Zalmarson A.F., Vasilev V.A.,Eletskii M.I., Sidorov S.S. // Automated control systems, 2018, №3. – P.11-19.
3. Volkov V.F. Technique of the substantiation of the rational variant of system of information support of the management information system of the special appointments / Volkov V.F., Tolmachyov A.A.// Automated control systems, 2014, №5. – P.52-59.
4. Fendrikov M.N., Yakovlev V.I. Methods for calculating the combat effectiveness of weapons M.: Military publishing house, 1971. – 224 p.
5. Ventcel E.C. The research of the operations. M.: Soviet radio, 1972. – 552 p.
6. Chuev Y.V. Forecasting in the military. M.: Military publishing house, 1975. – 279 p.
7. Martyshenko L.A. Methods of military research in the development and testing of weapons.P.1. M.: MO, 1981. – 280 p.
8. Kruglov V.V., Dli M.I. Fuzzy logic and artificial neural networks. M.: Physmathlit, 2001. – 201 p.
9. Leonenkov A.V. Fuzzy simulation in MATLAB и FuzzyTECH. St.P.: BXV-Petersburg, 2003. – 716 p.
10. Zadeh L.A. A fuzzy-set-theoretic interpretation of linguistic hedges. M.: World, 1976. – 165 p.
11. Yarushkina N.G. Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems. M.:Finance and statistic, 2004. – 320 p.

ОБОБЩЁННАЯ ОРТОГОНАЛИЗАЦИЯ ГРАМА-ШМИДТА И ПОДАВЛЕНИЕ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ В СЕТЯХ КОГНИТИВНОГО РАДИО

А. В. Харин[1], С. В. Карамов[1]

[1]Целевая поисковая лаборатория прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований, Воронеж, Россия

Аннотация. Предложена процедура ортогонализации, обобщающая процедуру ортогонализации Грама-Шмидта. На основе предложенной процедуры ортогонализации разработан метод ортогонального диаграммообразования для подавления взаимных помех первичных и вторичных пользователей в сети когнитивного радио.

Ключевые слова: ортогонализация; когнитивное радио; спектральное сосуществование; диаграммообразование; MIMO.

GENERALIZED GRAM-SCHMIDT ORTHOGONALIZATION AND MUTUAL INTERFERENCE CANCELATION IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

A. V. Kharin[1], S. V. Karamov[1]

[1]Target Search Lab of Groundbreaking Radio Communication Technologies of Advanced Research Foundation, Voronezh, Russia

Abstract. We proposed orthogonalization process that is a generalization of the Gram-Schmidt orthogonalization process. Using by the proposed orthogonalization process we create a method of orthogonal beamforming for avoiding the mutual interference between primary and secondary users in cognitive radio networks.

Keywords: orthogonalization; cognitive radio; spectral coexisting; beamforming; MIMO.

1. Введение

В настоящее время качественная и устойчивая радиосвязь в различных ведомствах находится на ненадлежащем уровне. Используемые и разрабатываемые сейчас современные комплексы и системы связи разрознены, основаны на разных принципах, подходах, протоколах, не выполняют многие необходимые функции.

Также в гражданском секторе и различных ведомствах активно расширяется применение как устройств интернета вещей (IoT) так и робототехнических комплексов (РТК). По прогнозу экспертов в ближайшем будущем ожидается массовое использование технологий IoT и РТК. Аналогичная ситуация с началом массового внедрения технологий мобильной связи 5G, требующих огромной пропускной способности и, соответственно, частотных полос.

Дополнительной проблемой является взрывной рост числа средств радиосвязи, что при существующих принципах их построения усложняет или делает невозможной их одновременную работу. Уже сейчас все диапазоны частот, выделенные для радиосвязи, практически полностью заняты и наблюдается плохая электромагнитная совместимость средств связи. Однако, в ближайшие время, оценочно в течении пяти-семи лет,

требуемая ёмкость эфира повысится на два порядка. Отмеченные факторы приводят к увеличению риска перенаселенности эфирного пространства.

Существуют различные методы для решения данной проблемы, однако требуются принципиально иные подходы. Одним из таких подходов является совместное использование двух популярных технологий: технологии когнитивного радио [1] и технологии пространственного кодирования сигнала Multiple Input Multiple Output (MIMO) [2]. В [3, 4] поставлена задача диаграммообразования для подавления взаимных помех.

Целевая задача формулируется следующим образом. В простых сетях когнитивного радио имеются два типа пользователей: первичные пользователи (primary users, сокращённо PU) и вторичные пользователи (cognitive radio users, сокращённо CRU). Кроме того, имеются базовые станции двух типов: базовая станция для первичных пользователей (primary users base station, сокращённо PU BS), которая передаёт информацию для первичных пользователей, а также базовая станция для вторичных пользователей (cognitive radio base station, сокращённо CR BS), которая передаёт информацию для вторичных пользователей, однако, может также связываться и с первичными пользователями, например, для оценки канала, телеметрии или для других потребностей. Первичные пользователи имеют приоритет перед вторичными пользователями и могут свободно использовать весь предоставленный спектральный диапазон. В то же время, вторичные пользователи так же могут использовать данный спектральный диапазон, однако, системы связи вторичных пользователей не должны создавать какие-либо существенные помехи для первичных пользователей. Предполагается, что у CR BS имеется несколько антенн для передачи информации, оптимальное использование этого физического преимущества и является основной задачей, решаемой группой методов, которые можно назвать CR&MIMO. Таким образом, задача ортогонального диаграммообразования может быть сформулирована как задача оптимального подбора коэффициентов антенн базовой станции CR BS на основе имеющейся информации о свойствах каналов сети когнитивного радио.

При решении задачи ортогонального диаграммообразования в [3,4], была использована процедура ортогонализации Грама-Шмидта. При этом предложенная процедура имела существенные недостатки, а именно: предлагаемый в [3,4] метод можно использовать только в случае, когда имеется один первичный пользователь PU; кроме того, ортогональное диаграммообразование, предложенное [3,4] не даёт возможности подавлять взаимные помехи вторичных пользователей.

Целью данной работы является создание обобщённой процедуры ортогонализации Грама-Шмидта и разработка на её основе нового обобщённого метода ортогонального диаграммообразования, который бы был лишён недостатков существующих методов.

2. Обобщённый процесс ортогонализации грама-шмидта

Пусть линейно независимые векторы $\{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^n$ и $\mathbf{b}$ принадлежат векторному пространству со скалярным произведением $(\cdot,\cdot)$. Пусть далее матрица $\mathbf{C} = \left(C_{i,j}\right)_{i=1\,j=1}^{n\;\;n}$, содержит попарные скалярные произведения векторов из множества $\{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^n$, т. е. $C_{i,j} = (\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j)$. Обозначим $\mathbf{r} = (r_i)_{i=1}^n$, где $r_i = (\mathbf{b}, \mathbf{a}_i)$. Найдём линейное преобразование $f(\mathbf{b}, \mathbf{a}_1, ..., \mathbf{a}_n) = \mathbf{b}^{ort}$ такое, что для любого i выполняется $(\mathbf{b}^{ort}, \mathbf{a}_i) = 0$. После необходимых вычислений, которые для краткости здесь опущены, можно получить явное выражение для искомого преобразования:

$$\mathbf{b}^{ort} = f(\mathbf{b}, \mathbf{a}_1, ..., \mathbf{a}_n) = \mathbf{b} - \sum_{i=1}^{n} q_i \mathbf{a}_i \,, \tag{1}$$

где $\{q_i\}_{i=1}^n$ это элементы вектора $\mathbf{q} = (q_i)_{i=1}^n$, который можно найти по формуле:

$$\mathbf{q} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{r} \,. \tag{2}$$

Формулы (1) и (2) задают обобщённое преобразование Грама-Шмидта, которое в частном случае, когда векторы $\{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^n$ не произвольны, а построены определённым образом, может быть сведено к преобразованию Грама-Шмидта.

3. Когнитивное радио и передача данных при наличии первичных и вторичных пользователей

Рассмотрим модель системы связи, в которой сосуществуют первичные пользователи (PU) и вторичные (CRU) пользователи, а также имеются две базовые станции (PU BS и CR BS), описание которых дано во введении. Информация, принимаемая первичными и вторичными пользователями от базовых станций, в такой системе может быть записана в виде:

$$y_i^{PU} = g_i^{PU} x_i^{PU} + \sum_{j=1}^{M} \mathbf{w}_j^T \mathbf{h}_i^{PU} x_j^{CRU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq i}}^{N} g_k^{PU} x_k^{PU} + n_i^{PU} \,, \tag{3}$$

$$y_j^{CRU} = \mathbf{w}_j^T \mathbf{h}_j^{CRU} x_j^{CRU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k\neq j}}^{M} \mathbf{w}_k^T \mathbf{h}_k^{CRU} x_k^{CRU} + \sum_{i=1}^{N} g_j^{CRU} x_i^{PU} + n_j^{CRU} \,, \tag{4}$$

здесь обозначено:

y_i^{PU}, y_j^{CRU} – информация, принятая i–м первичным и j–м вторичным пользователями, соответственно;

g_i^{PU}, g_j^{CRU} – величины, характеризующие каналы между PU BS и i–м первичным пользователем и между PU BS и j–м вторичным пользователем, соответственно;

x_i^{PU}, x_j^{CRU} – информация, передаваемая базовыми станциями, а именно, информация, передаваемая PU BS для i–го первичного пользователя и передаваемая CRU BS для j–го вторичного пользователя;

$\mathbf{h}_i^{PU}$, $\mathbf{h}_j^{CRU}$ – векторы, характеризующие каналы между CR BS и i–м первичным пользователем и между CR BS и j–м вторичным пользователем, соответственно, каждый вектор имеет размерность $N_{ANT} \times 1$, где N_{ANT} – число антенн базовой станции CR BS;

n_i^{PU}, n_j^{CRU} – шумы приёмников;

N, M – число первичных и вторичных пользователей, соответственно;

$\mathbf{w}_i$ – вектор размерности $N_{ANT} \times 1$ содержащий весовые коэффициенты соответствующих антенн базовой станции CR BS.

Отметим, что на практике векторы $\left\{\mathbf{h}_i^{PU}\right\}_{i=1}^{N}$ могут быть достаточно просто и точно измерены базовой станцией CR BS. В то же время измерение векторов $\left\{\mathbf{h}_j^{CRU}\right\}_{j=1}^{M}$ представляет собой более сложную задачу, поэтому в дальнейшем мы рассмотрим две ситуации: ситуацию с неизвестными $\left\{\mathbf{h}_j^{CRU}\right\}_{j=1}^{M}$ и ситуацию, когда $\left\{\mathbf{h}_j^{CRU}\right\}_{j=1}^{M}$ известны.

4. Метод подавления помех

Основной целью предлагаемого в данной статье метода является подавление помех, которые создают первичным пользователям сигналы, передаваемые базовой станцией CR BS для вторичных пользователей. Указанные помехи сосредоточенны во втором слагаемом правой части выражения (3). Перепишем это слагаемое с использованием введённого выше обозначения для скалярного произведения:

$$\sum_{j=1}^{M} \mathbf{w}_j^T \mathbf{h}_i^{PU} x_j^{CRU} = \sum_{j=1}^{M} \left(\mathbf{w}_j, \mathbf{h}_i^{PU}\right) x_j^{CRU},$$

таким образом, для подавления помех от вторичных пользователей достаточно чтобы для всех i и j выполнялось условие

$$\left(\mathbf{w}_j, \mathbf{h}_i^{PU}\right) = 0. \qquad (5)$$

Используя предложенный в данной работе обобщённый процесс ортогонализации Грама-Шмидта (см. формулы (1) и (2)), можно сразу получить выражения для векторов весовых коэффициентов антенн CR BS:

$$\mathbf{w}_j^{ort} = \mathbf{w}_j - \sum_{i=1}^{N} \left(\mathbf{q}_j\right)_i \mathbf{h}_i^{PU}, \qquad (6)$$

здесь введены следующие обозначения:

$$\mathbf{q}_j = \mathbf{C}_{PU}^{-1} \mathbf{r}_j, \qquad (7)$$

$\mathbf{C}_{PU} = \left(C_{m,k}^{PU}\right)_{m=1\,k=1}^{N\quad N}$, $C_{m,k}^{PU} = \left(\mathbf{h}_m^{PU}, \mathbf{h}_k^{PU}\right)$, $\mathbf{r}_j = \left(\left(\mathbf{w}_j, \mathbf{h}_k^{PU}\right)\right)_{k=1}^{N}$.

Если весовые коэффициенты для антенн CR BS вычислены по формулам (6) и (7), то формулы (3) и (4) перепишутся как:

$$y_i^{PU} = g_i^{PU} x_i^{PU} + \sum_{j=1}^{M} \mathbf{w}_j^{ortT} \mathbf{h}_i^{PU} x_j^{CRU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} g_k^{PU} x_k^{PU} + n_i^{PU} = g_i^{PU} x_i^{PU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} g_k^{PU} x_k^{PU} + n_i^{PU}, \quad (8)$$

$$y_j^{CRU} = \mathbf{w}_j^{ortT} \mathbf{h}_j^{CRU} x_j^{CRU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{M} \mathbf{w}_k^{ortT} \mathbf{h}_k^{CRU} x_k^{CRU} + \sum_{i=1}^{N} g_j^{CRU} x_i^{PU} + n_j^{CRU}. \quad (9)$$

Таким образом, предложенный метод позволяет избавиться от помех, вносимых CR BS в сигнал, принимаемый первичными пользователями от PU BS.

Теперь рассмотрим использование предложенного в данной работе обобщённого процесса ортогонализации Грама-Шмидта для подавления помех в случае, когда множество векторов $\left\{\mathbf{h}_j^{CRU}\right\}_{j=1}^{M}$ так же известно.

Зададим множества векторов $\left\{\left\{\breve{\mathbf{h}}_k^j\right\}_{k=1}^{N+M-1}\right\}_{j=1}^{M}$, следующим образом:

если $j < M$, то $\breve{\mathbf{h}}_k^j = \begin{cases} \mathbf{h}_k^{PU}, if\ 1 \le k \le N, \\ \mathbf{h}_{k-N}^{CRU}, if\ \text{N+1} \le k \le N + j - 1, \\ \mathbf{h}_{k-N+1}^{CRU}, if\ N + j \le k \le N + M - 1, \end{cases}$

если $j = M$, то $\breve{\mathbf{h}}_k^j = \begin{cases} \mathbf{h}_k^{PU}, if\ 1 \le k \le N, \\ \mathbf{h}_{k-N}^{CRU}, if\ \text{N+1} \le k \le N + M - 1. \end{cases}$

Будем строить весовые векторы для антенн CR BS так, чтобы j-й весовой вектор был ортогонален всем векторам из множества $\left\{\breve{\mathbf{h}}_k^j\right\}_{k=1}^{N+M-1}$. С учётом описанного выше определения векторов $\breve{\mathbf{h}}_k^j$ это множество имеет следующую структуру:

$$\left\{\breve{\mathbf{h}}_k^j\right\}_{k=1}^{N+M-1} = \left\{\mathbf{h}_1^{PU}, ..., \mathbf{h}_N^{PU}, \mathbf{h}_1^{CRU}, ..., \mathbf{h}_{j-1}^{CRU}, \mathbf{h}_{j+1}^{CRU}, \mathbf{h}_M^{CRU}\right\} = \left\{\left\{\mathbf{h}_v^{PU}\right\}_{v=1}^{N} \cup \left\{\mathbf{h}_v^{CRU}\right\}_{v=1}^{M}\right\} \Big/ \mathbf{h}_j^{CRU}.$$

Применяя предложенную процедуру ортогонализации (см. (1) и (2)) получаем:

$$\breve{\mathbf{w}}_j^{ort} = \mathbf{w}_j - \sum_{i=1}^{N+M-1} \left(\breve{\mathbf{q}}_j\right)_i \breve{\mathbf{h}}_i^j, \quad (10)$$

где введены обозначения:

$$\breve{\mathbf{q}}_j = \breve{\mathbf{C}}_j^{-1} \breve{\mathbf{r}}_j, \quad (11)$$

$\breve{\mathbf{C}}_j = \left(\breve{C}_{k,m}^j\right)_{\substack{k=1 \\ m=1}}^{(N+M-1)(N+M-1)}$, $\breve{C}_{k,m}^j = \left(\breve{\mathbf{h}}_k^j, \breve{\mathbf{h}}_m^j\right)$, $\breve{\mathbf{r}}_j = \left(\left(\mathbf{w}_j, \breve{\mathbf{h}}_k^j\right)\right)_{k=1}^{N+M-1}$.

Теперь, при условии, что весовые коэффициенты для антенн CR BS вычислены по формулам (10) и (11), то формулы (3) и (4) для принятой первичными и вторичными пользователями информации можно переписать в виде:

$$y_i^{PU} = g_i^{PU} x_i^{PU} + \sum_{j=1}^{M} \breve{\mathbf{w}}_j^{ortT} \mathbf{h}_i^{PU} x_j^{CRU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} g_k^{PU} x_k^{PU} + n_i^{PU} = g_i^{PU} x_i^{PU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N} g_k^{PU} x_k^{PU} + n_i^{PU}, \quad (12)$$

$$y_j^{CRU} = \breve{\mathbf{w}}_j^{ortT} \mathbf{h}_j^{CRU} x_j^{CRU} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{M} \breve{\mathbf{w}}_k^{ortT} \mathbf{h}_k^{CRU} x_k^{CRU} + \sum_{i=1}^{N} g_j^{CRU} x_i^{PU} + n_j^{CRU} = \breve{\mathbf{w}}_j^{ortT} \mathbf{h}_j^{CRU} x_j^{CRU} + \sum_{i=1}^{N} g_j^{CRU} x_i^{PU} + n_j^{CRU} \quad (13)$$

Из формул (12) и (13) следует, что, при наличии достаточной информации об абонентах CRU, мы можем подавить все типы взаимных помех: как помехи, создаваемые базовыми станциями CR BS для первичных пользователей, так и помехи, создаваемые вторичными пользователями друг для друга.

5. Заключение

В данной работе предложено обобщение процедуры ортогонализации Грама-Шмидта и основанного на данной процедуре метода ортогонального диаграммообразования. Полученные обобщения устраняют важные недостатки метода ортогонального диаграммообразования, описанного в [3, 4] и других подобных ему существующих методов. Предложенный метод можно применять в разнообразных перспективных когнитивных радиосетях использующих MIMO.

В настоящее время в Целевой поисковой лаборатории прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований используются результаты данной работы для формирования облика и построения гиперконвергентной перспективной платформы радиосвязи.

Литература

1. Mitola, J., Cognitive Radio Architecture The Engineering Foundations of Radio XML, 2006. – C 477.
2. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия - Телеком, 2014. — 242 с.
3. Kwon, Y . Orthogonal Beamforming Methodology in Cognitive Radio Networks / Y. Kwon, H. Kim, J. Yoo, J. Chung // Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), 2008, 15-17 May – C. 1-5.
4. Kwon, Y . A Non-Interfering Cognitive Radio System for Spectrum Sharing/ Y. Kwon, H. Kim, J. Yoo, J. Chung // Proceedings of the 9th International Symposium on Communications and Information Technology, 2009, 28-30 Sept. – C. 664-665.

References

1. Mitola, J., Cognitive Radio Architecture The Engineering Foundations of Radio XML, 2006. –477 p.
2. Bakulin M. G., Varukina L. A., Kreyndelin V. B., MIMO Technology: Principles and Algorithms M.: Goryachaya liniya - Telekom, 2014. — p. 242.
3. Kwon, Y . Orthogonal Beamforming Methodology in Cognitive Radio Networks / Y. Kwon, H. Kim, J. Yoo, J. Chung // Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), 2008, 15-17 May – C. 1-5.
4. Kwon, Y . A Non-Interfering Cognitive Radio System for Spectrum Sharing/ Y. Kwon, H. Kim, J. Yoo, J. Chung // Proceedings of the 9th International Symposium on Communications and Information Technology, 2009, 28-30 Sept. – pp. 664-665.

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ОБЛИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ СИСТЕМ СВЯЗИ

В.С. Артамонов [1], А.В. Винниченко [1]

[1] АО «НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье обосновывается концептуальный облик автоматизированной системы управления связью, обеспечивающей эффективное применение ведомственных систем связи.

Ключевые слова: система связи, автоматизированная система управления связью, организационное управление, оперативно-техническое управление, технологическое управление, информационная архитектура, единая распределенная база данных, техническая архитектура, концептуальный облик.

JUSTIFICATION THE CONCEPTUAL IMAGE OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM COMMUNICATION SYSTEMS

V.S. Artamonov [1], A.V. Vinnichenko [1]

[1] JSC "Scientific Research Institute «Rubin», Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article substantiates the conceptual image of the automated control system communication, ensuring effective use of departmental communications systems.

Keywords: communication system, communication control system, organizational management, operational and technical management, technology management, information architecture, unified distributed database, technical architecture, conceptual image.

1. Введение

Автоматизированные системы управления связью (АСУС) являются важнейшим системным компонентом, выполняющим задачи обеспечения эффективного применения систем связи (СС). Требования к АСУС СС определяются нормативными документами ведомств, положения которых требуют уточнения с учетом применения в составе систем связи современных информационных и телекоммуникационных технологий. Предлагаемые концептуальные подходы к построению АСУС могут обеспечить комплексное решение задач эффективного управления связью в современных системах связи и поэтапное наращивание их функциональности при перспективном развитии.

2. Уточненные общие требования к АСУС

Управление связью должно обеспечивать эффективное использование возможностей сил и средств связи, а также успешное выполнение подразделениями связи задач по развертыванию системы связи в установленные сроки, обеспечению функционирования телекоммуникационного оборудования в заданных режимах, своевременному предоставлению пользователям услуг связи требуемого качества.

В соответствии с требованиями нормативных документов по связи различных ведомств, для осуществления руководства системой связи создается система

управления связью, которая включает: органы управления связью; пункты управления связью (ПУС); сеть служебной связи; средства автоматизации.

Сеть служебной связи и средства автоматизации составляют техническую основу обеспечения автоматизированной управленческой деятельности органов и пунктов управления. Эти компоненты реализуются средствами АСУС.

Система управления связью и соответственно АСУС имеют иерархическую организационную структуру, соответствующую структуре системы связи и включающую следующие уровни (рисунок 1):

1) центральный;

2) региональный;

3) территориальный;

4) объектовый (узловой).

Каждая ступень иерархии должна включать: подразделения связи, обслуживающие центральные, региональные и территориальные органы управления ведомства; пункты управления связью, комплексы средств автоматизации (КСА), развернутые на узлах связи (УС) соответствующего уровня системы связи.

АСУС предназначается для автоматизации процессов контроля ресурсов системы связи и эффективного управления ими, а также административной и управленческой деятельности органов управления связью различных уровней иерархии.

Автоматизированное управление связью должно осуществляться на следующих уровнях:

- организационном (ОУ), на котором обеспечивается достижение целевых задач функционирования системы связи путем планирования ее структуры и применения по назначению;

- оперативно-техническом (ОТУ), на котором обеспечивается контроль состояния сетей связи и качества предоставляемых ими услуг связи;

- технологическом (ТУ), на котором осуществляется контроль и изменение состояния телекоммуникационного оборудования (ТКО).

АСУС – организационно-техническое объединение КСА оперативного состава ПУС, должностных лиц органов управления связью (подразделений связи) различных уровней иерархии для автоматизированного решения задач организационного, оперативно-технического и технологического уровней управления связью, осуществляемых с целью обеспечения требуемого качества функционирования системы связи.

В перспективе АСУС должна стать единой централизованной системой, взаимодействующей с различными частными системами управления отдельных компонентов системы связи и другими информационными системами.

АСУС должна быть полнофункциональной и обеспечивать автоматизированное решение следующих задач:

а) на пунктах управления связью:

1) оперативно-техническое управление сетями связи;

2) технологическое управление состоянием ТКО УС;

б) в органах управления связью различных уровней иерархии:

1) задачи управления развитием (уровень ОУ):

- разработка программ и планов развития СС, ее подсистем и сетей связи, расчет уровня затрат на реализацию задач развития;

- планирование, учет и контроль закупок/поставок оборудования и программного обеспечения (ПО);

- планирование, учет и контроль ввода в эксплуатацию узлов связи, линий связи;

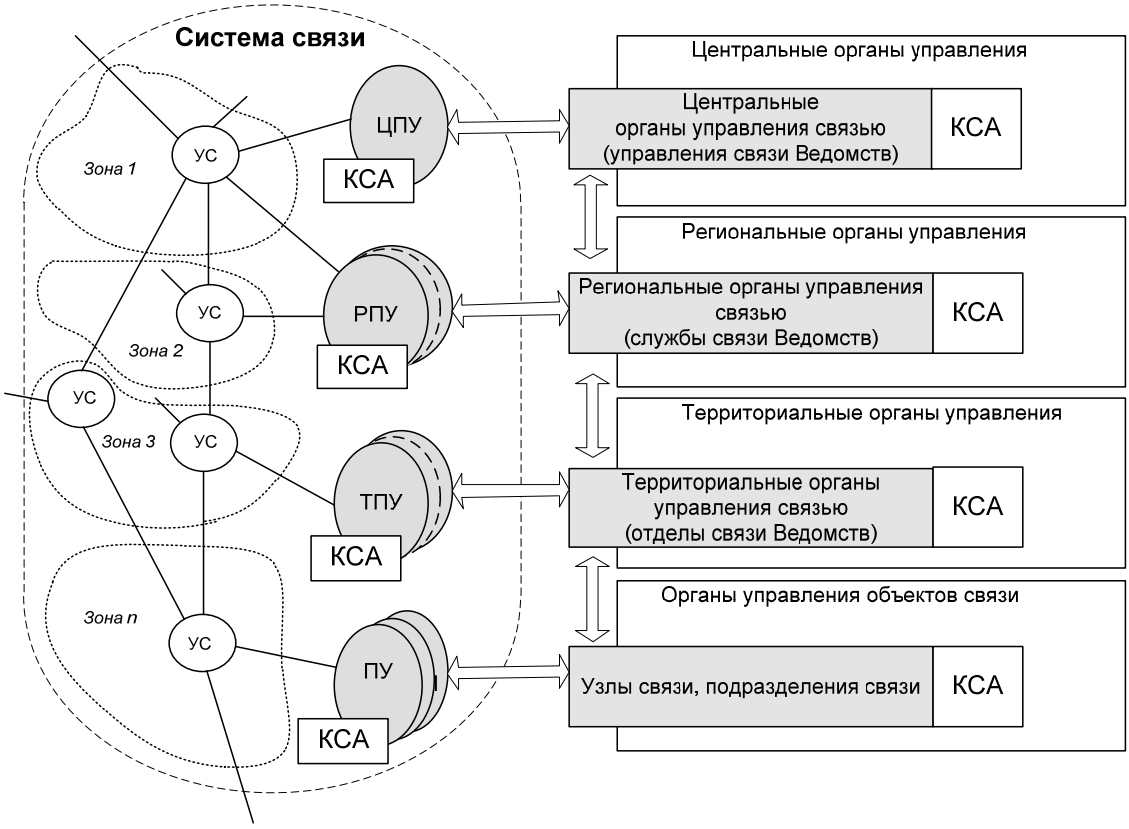


Рис. 1. Организационная структура системы управления связью

2) задачи управления применением (уровень ОУ):

- разработка документов по связи для системы и сетей связи (планирование системы связи и сетей связи);

- организация информационного и документального взаимодействия центральных, региональных и территориальных органов управления связью;

- планирование и контроль несения оперативно-технической службы на УС;

3) задачи управления функционированием (уровень ОТУ):

- контроль состояния системы связи в целом;

- контроль функционирования сетей связи на соответствие заданным требованиям, в том числе обеспечение заданной пропускной способности и качества предоставляемых услуг связи;

- устранение неисправностей оборудования сетей связи;

- подготовка статистических отчетов, справок, донесений о состоянии связи (за систему, зону связи, сеть связи, УС и др.);

4) задачи управления обслуживанием (уровень ОТУ):

- взаимодействие с поставщиками арендуемых ресурсов (операторами связи);
- контроль выполнения соглашений по предоставлению арендованных ресурсов и услуг (биллинг);

5) задачи управления технической эксплуатацией (уровень ОУ):

- материально-технический учет технических и программных средств;
- планирование технического обеспечения связи и информатизации;
- организация и контроль выполнения задач технического обеспечения связи и информатизации;

6) задачи управления защитой информации (уровень ОУ, ОТУ и ТУ):

- планирование мероприятий по безопасности связи (БС) и информационной безопасности (ИБ) на объектах системы связи;
- управление выполнением мероприятий по обеспечению БС и ИБ на объектах системы связи;
- контроль выполнения требований БС и ИБ на объектах системы связи.

3. Принципы построения АСУС

При создании АСУС в соответствии с положениями руководящих документов [1, 2, 3] и опытом выполнения работ по созданию автоматизированной системы и ее компонентов следует руководствоваться следующими принципами:

- принцип первого руководителя, означающего, что организация работ по созданию АСУС и контроль за их исполнением должны проходить под управлением руководства управлений связи силовых ведомств;
- соответствия организационно-технической структуры АСУС организационно-технической структуре системы управления связью ведомственной системы связи;
- организации как централизованного, так и децентрализованного управления связью на ПУС и в органах управления связью (подразделениях связи), относящихся к различным уровням иерархии СС;
- системности и комплексного подхода, заключающегося в том, что проектирование и создание АСУС должно осуществляться путём определения целей и критериев функционирования системы, взаимоувязанных организационно-технологических и системотехнических решений, программно-математического, информационного, правового и технического обеспечения системы;
- преемственности и эволюционного развития, предполагающего максимальное использование возможностей и ресурсов существующей АСУС, поэтапную интеграцию их в АСУС перспективного развития, а также способность АСУС при обновлении версий СПО улучшать функциональные характеристики и обрабатывать данные, накопленные при использовании предыдущих версий СПО;
- снижения финансовых и временных затрат на создание СПО за счет использования применяемых программных средств и их интеграции в АСУС нового

поколения, опыта по разработке программных средств, интеграции информационно-аналитических систем (ИАС);

- совместимости, т.е. способности обеспечения взаимодействия и согласованного функционирования всех подсистем АСУС, а также ее возможности взаимодействовать с системами управления ТКО и сторонними системами управления на основе стандартных информационных интерфейсов. Принцип полной информационной совместимости предусматривает применение согласованных подходов к разработке электронных баз данных, входных и выходных документов, программных комплексов;

- стандартизации и унификации, что означает необходимость применения типовых, унифицированных и стандартизированных решений по созданию АСУС, что позволит сократить временные, трудовые и стоимостные затраты на создание системы;

- новых задач, что означает необходимость выявления новых задач управления связью в ходе информационного обследования системы управления связью, автоматизация которых даст существенных эффект от применения АСУС в целом;

- ориентации на передовые информационные и телекоммуникационные технологии (единой информационной модели для формирования логически централизованных данных об объектах учета, слабосвязанной архитектуры, сервис-ориентированной архитектуры, общей интеграционной шины обмена данными и др.);

- гибкости – способности АСУС адаптироваться к изменяющимся требованиям системы управления связью;

- универсальности функциональной архитектуры – способности поддерживать управление сетями связи, реализующими различные телекоммуникационные технологии;

- масштабируемости – способности изменять функциональность системы управления и производительность при изменении числа пользователей, услуг и управляемого оборудования;

- надежности и живучести – способности АСУС выполнять функции в заданных условиях в течение заданного промежутка времени.

4. Информационная архитектура АСУС

Для описания различных аспектов построения АСУС целесообразно использовать понятие «архитектура системы управления связью», в соответствии с Рекомендациями МСЭ-Т М.3010.

Наибольший интерес в данном контексте представляет информационная архитектура, которая определяет порядок сбора, обработки, предоставления, передачи, накопления и хранения информации пользователями АСУС.

Вариант информационной архитектуры АСУС приведен на рисунке 2.

Информационная архитектура АСУС должна представлять собой совокупность баз данных различных уровней иерархии системы связи, средств их ведения, взаимосвязей между ними, а также средств информационного обеспечения функционирования системы.

Основными элементами информационной архитектуры АСУС должны стать базы данных (БД) управлений, служб и подразделений связи центральных, региональных и территориальных органов управления силовых ведомств, предназначенные для учета, хранения и предоставления сведений о компонентах СС. На основе учетных сведений должны решаться задачи организационного и оперативно-технического управления.

В АСУС должна быть создана единая распределенная база данных (ЕРБД), представляющая информационно-логическое объединение центральной БД, региональных БД и территориальных БД, развернутых на ЦПУ, РПУ и ТПУ соответственно.

В соответствии с принятой подчиненностью органов управления связью (подразделений связи) при решении задач управления связью, определенных в руководящих документах по связи соответствующих ведомств, в ЕРБД должен быть реализован регламент информационного взаимодействия:

- ответственными за организацию наполнения актуальными сведениями, ведения БД являются начальники связи (руководители организаций связи) соответствующего уровня управления. Задачи по настройке и обеспечению функционирования должны выполняться администраторами БД;

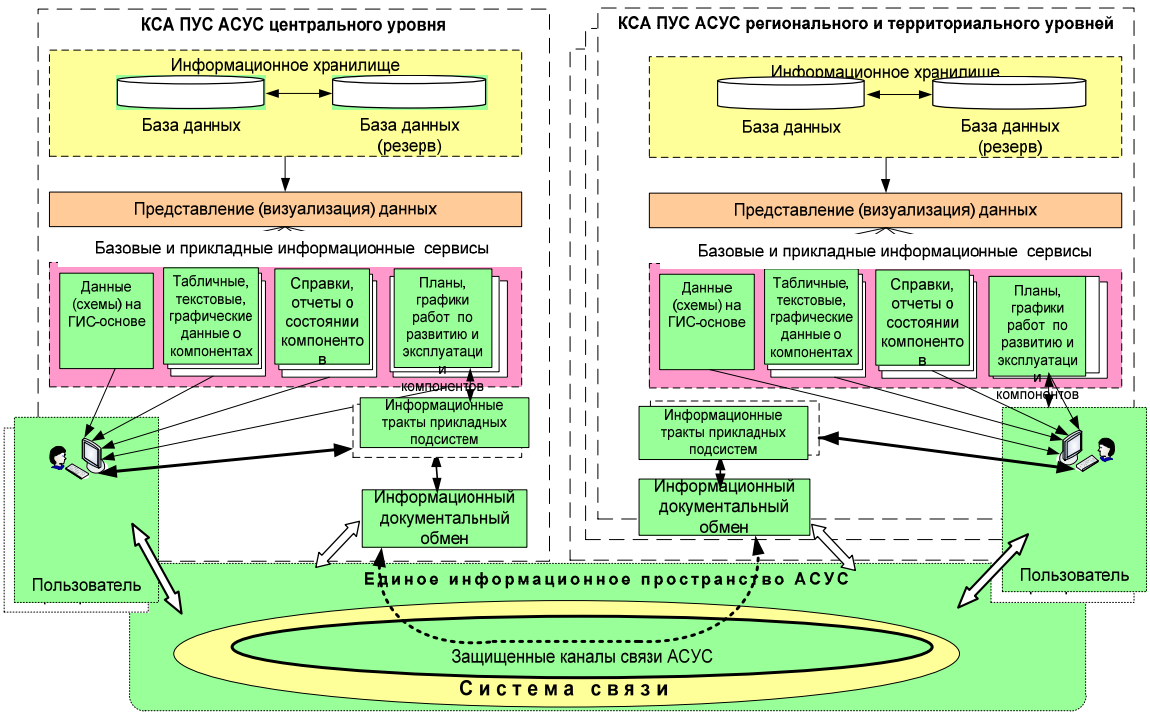


Рис. 2. Вариант информационной архитектуры АСУС

- между БД ЦПУ и БД РПУ, БД ТПУ должны быть организованы информационное взаимодействие двух типов. Первый тип – репликация данных, т.е. периодическое автоматическое обновление данных в старшей БД путем передачи измененных учетных данных от подчиненных БД. Второй тип – информационные запросы от пользователей старших БД к подчиненным БД;

- в БД должен быть реализован механизм строгого разграничения доступа пользователей к хранящимся учетным сведениям. При каждом обращении пользователя в БД должно осуществляться журналирование всех его действий (время и дата запроса, какие данные затребованы, какие действия с данными проведены и т.д.).

В базы данных АСУС должна обеспечиваться интеграция данных от взаимодействующих систем управления ТКО.

Сведения, хранящиеся в базах данных, должны обрабатываться и предоставляться пользователям в виде схем, таблиц, справок, отчетов и др.

5. Концептуальный интегральный облик АСУС

С учетом изложенных в статье требований, принципов построения и информационной архитектуры системы предлагается концептуальный интегральный облик АСУС (рисунок 3).

Основу АСУС составляет техническая архитектура, которая должна представлять собой распределенную вычислительную платформу в составе КСА открытого и закрытого сегментов ПУС различных уровней иерархии, связанных между собой каналами связи.

КСА должны включать серверное и терминальное оборудование, телекоммуникационные средства, средства шифрования, а также средства общего, общесистемного и специального программного обеспечения, реализующие услуги управления связью, предоставляемые пользователям.

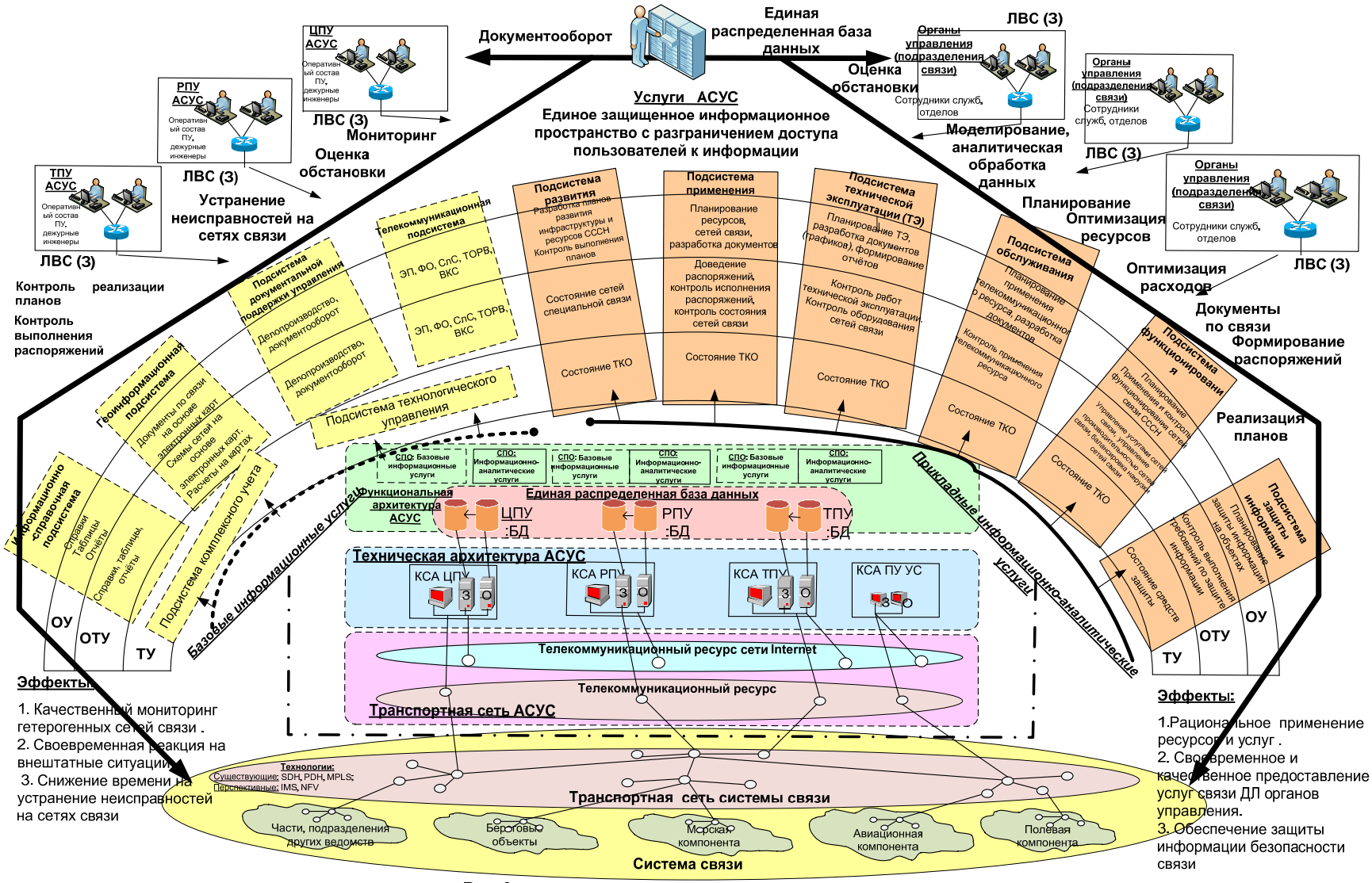
В составе технической архитектуры АСУС должны создаваться информационные сети в составе автоматизированных рабочих мест (АРМ) оперативного состава ПУС и должностных лиц органов управления и подразделений связи. Именно эти информационные сети позволят увеличить количество пользователей, которым предоставляются автоматизированные услуги управления связью, и тем самым достичь оптимального значения критерия оценки эффективности АСУС - «цена/качество управления».

КСА ПУС должны обеспечивать информационно-техническое взаимодействие с внешними информационно-аналитическими системами и системами управления ТКО.

Для обеспечения информационного обмена между КСА ПУС и АРМ пользователей информационных сетей различных уровней иерархии должна создаваться транспортная сеть (ТС) АСУС на основе выделяемого телекоммуникационного ресурса типа Ethernet (например: ресурс MPLS-сети системы связи). Пропускная способность каналов связи должна составлять не менее 2 Мбит/с.

Достижение требуемых показателей устойчивости информационного обмена может обеспечиваться за счет создания резервной транспортной сети АСУС на основе телекоммуникационного ресурса сети Internet. При этом особое внимание должно быть уделено обеспечению информационной безопасности.

Каналы связи указанных транспортных сетей АСУС должны закрываться специальной аппаратурой.



Эффекты:

1. Качественный мониторинг гетерогенных сетей связи .
2. Своевременная реакция на внештатные ситуации.
3. Снижение времени на устранение неисправностей на сетях связи

Эффекты:

1.Рациональное применение ресурсов и услуг .
2. Своевременное и качественное предоставление услуг связи ДЛ органов управления.
3. Обеспечение защиты информации безопасности связи

Рис. 3 – Концептуальный интегральный облик АСУС

Функциональная архитектура АСУС должна отражать реализацию ее функциональных возможностей и представлять совокупность программных средств двух типов:

- средства СПО, реализующие базовые информационные услуги;
- средства СПО, реализующие прикладные информационно-аналитические услуги.

Состав средств СПО должен быть достаточным для автоматизации всех функций организационного, оперативно-технического и технологического уровней управления АСУС и предоставления соответствующих услуг управления связью пользователям.

Средства СПО первого типа должны реализовывать автоматизированные функции подсистем, сведения о которых приведены в таблице 1.

Средства СПО второго типа должны реализовывать автоматизированные функции подсистем, сведения о которых приведены в таблице 2.

В АСУС должно реализовываться единое защищенное информационное и телекоммуникационное пространство на основе совокупности технически и информационно взаимоувязанных КСА пунктов управления, АРМ информационных сетей органов управления связью, каналов связи, базовых и прикладных средств СПО, систем управления производителей ТКО, видов обеспечения (информационного, математического, нормативного и др.).

Таблица 1. Подсистемы АСУС, реализующие базовые информационные услуги

№ п/п	Наименование подсистемы АСУС	Основные автоматизированные функции подсистемы АСУС
1	Подсистема комплексного учета	Учет всех сведений о компонентах системы связи. Создание информационных хранилищ (баз данных) на КСА ПУС и реализацию ЕРБД АСУС.
2	Подсистема ТУ	Полный и своевременный сбор данных состояния ТКО и сетевых элементов. Взаимодействие с СУ ТКО.
3	Информационно-справочная подсистема	Регламентированный доступ пользователей к структурированной информации ЕРБД. Предоставление пользователям типовых услуг по работе с текстовым, графическим, мультимедийным контентом.
4	Геоинформационная подсистема	Предоставление пользователям услуг по разработке и отображению схем связи на основе электронных карт
5	Подсистема документальной поддержки управления	Предоставление пользователям типовых услуг по работе с электронными документами, циркулирующими в АСУС (услуги электронного документооборота и делопроизводства)

Таблица 2. Подсистемы АСУС, реализующие прикладные информационно-аналитические услуги

№ п/п	Наименование подсистемы АСУС	Основные автоматизированные функции подсистемы АСУС
1	Подсистема управления	Реализация услуг по автоматизированной разработке

	развитием	и ведению стратегических планов технологического и инфраструктурного развития системы связи
2	Подсистема управления применением	Реализация услуг автоматизированного долгосрочного и оперативного планирования применения СС и ее сетей связи, оптимизации планов на основе анализа функционирования системы
3	Подсистема управления функционированием	Реализация услуг автоматизированного мониторинга текущего состояния сетей связи, ресурсов и услуг связи в реальном масштабе времени с целью максимально возможной реализации плановых показателей функционирования СС в условиях реальной обстановки по связи
4	Подсистема управления обслуживанием	Реализация услуг автоматизированного взаимодействия с абонентами – потребителями услуг СС и поставщиками арендуемых ресурсов (доверенными операторами связи ССОП ЕСЭ РФ) по вопросам предоставления услуг и ресурсов (активация услуг, аренда ресурсов и т.д.)
5	Подсистема управления технической эксплуатацией	Реализация услуг автоматизированного планирования и контроля выполнения комплекса мероприятий по техническому обслуживанию и технической поддержки эксплуатации средств СС и АСУС
6	Подсистема управления защитой информации	Реализация услуг автоматизированного планирования и контроля выполнения комплекса мероприятий, направленных на достижение и поддержание требуемого уровня комплексной безопасности в СС и АСУС

6. Заключение

Реализация рассмотренных концептуальных подходов позволит создать единую высокотехнологичную АСУС, обеспечивающую предоставление должностным лицам органов и пунктов управления ведомственных систем связи полного набора сервисов и услуг по управлению связью с высоким уровнем их практической востребованности.

Литература

1. ГОСТ 24.104-85 Автоматизированные системы управления. Общие требования.- М.: Стандартинформ, 2001.
2. ГОСТ 24.702-85. Эффективность автоматизированных систем управления. Основные положения. - М.: Стандартинформ, 2001.
3. ГОСТ Р 53633.0-2009 Информационные технологии. Сеть управления электросвязью. Расширенная схема деятельности организации связи (eTOM). Общая структура бизнес-процессов.– М.: Стандартинформ, 2009.

REFERENCES

1. GOST 24.104-85 automated control systems. General requirements.-m.: Standartinform, 2001.
2. GOST 24.702-85. The effectiveness of automated control systems. The main provisions. -M.: Standartinform, 2001.

3. GOST r 53633.0-2009 information technology. Telecommunications management network. Extended activity diagram communications (eTOM). The overall structure of the business processes.-M.: Standartinform, 2009.

ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗЬЮ

А. Н. Буренин [1], В.С. Артамонов [1], В.А. Васильев [2]

[1] АО НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия
[2] ВКА им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к организации и обеспечению управления безопасностью функционирования комплексов геоинформационной поддержки процессов управления связью в составе автоматизированных систем, обеспечивающих эффективное функционирование различных систем связи в условиях информационных воздействий и компьютерных атак.

Ключевые слова. Автоматизированная система управления связью, геоинформационные системы, информационная безопасность комплексов геоинформационной поддержки.

FRAMEWORK FOR ENSURING THE SAFE OPERATION OF COMPLEXES OF GEOINFORMATION SUPPORT COMMUNICATION MANAGEMENT PROCESSES

A.N. Burenin [1], V.S. Artamonov [1], V.A. Vasilev [2]

[1] JSC "Scientific Research Institute «Rubin», Saint-Petersburg, Russia
[2] MKA them. Alexander Mozhaisky, St. Petersburg, Russia

Abstract. This article discusses approaches to organization and management of safety operation of complexes of geoinformation support link control in automated systems to ensure effective functioning of the various systems of communication in terms of information and computer attacks.

Keywords. Automated control system of communications, geographic information systems, information security complexes of geoinformation support.

1. Введение

В настоящее время для гарантированной нормальной работы различных структур во главу угла ставится гарантированное обеспечение органам управления требуемых телекоммуникационных услуг, что, как правило, связано с решением ряда сложных задач проектирования, организации, эксплуатации, обеспечения безопасности и управления системами связи (СС) [1].

Решение задач по созданию и развертыванию автоматизированных систем управления связью (АСУС) преследует ряд целей, одной из главных из которых является получение максимального эффекта при эксплуатации СС в различных условиях и в различных регионах страны.

При этом организация качественного функционирования пространственно разнесенной СС невозможна без соответствующего управления ею. Такое управление требует, чтобы его процессы имели устойчивую поддержку в части необходимой геоинформационной информации [2 – 4], несмотря на различные информационные воздействия нарушителей. Это накладывает определенные требования к безопасности

комплексов геоинформационной поддержки АСУС с решением всего комплекса частных задач в соответствии с международными рекомендациями X.800, M.3016.0 – M.3016.4, Y.2701 и стандартами ISO 7498-2, ISO 10164-7, 10164-8, 10164-9, ISO/IEC 17799:2000 и др.

2. Комплексы геоинформационной поддержки процессов управления связью как объекты компьютерных атак

Функционирование АСУС невозможно без развертывания подсистемы обеспечения ее элементов данными о местоположении компонентов СС, картографической информации и т.д., что обеспечивает подсистема геоинформационной поддержки АСУС.

Геоинформационные системы [2 – 4] и соответственно комплексы или подсистемы геоинформационной поддержки АСУС предназначены для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных и связанной с ними информации о представленных в ГИС объектах СС. ГИС включают в себя возможности СУБД, редакторов растровой и векторной графики, а также аналитических средств [2 – 4].

ГИС включают уязвимые для атак технологии (прежде всего технологии сбора информации) таких систем, как географические информационные системы, системы картографической информации (СКИ), автоматизированные системы картографирования (АСК), автоматизированные фотограмметрические системы (АФС), земельные информационные системы (ЗИС), автоматизированные кадастровые системы (АКС) и т.п.

ГИС характеризуются уязвимым для атак широким набором данных, собираемых с помощью разных методов и технологий. При этом следует подчеркнуть, что они объединяют в себе как уязвимые базы данных обычной (цифровой) информации, так и графические базы данных. В связи с большим значением экспертных задач, решаемых при помощи ГИС, возрастает роль экспертных систем, входящих в состав ГИС.

Технологии ГИС включают в себя методы и алгоритмы сбора пространственно-временных данных, технологии использования навигационных систем, технологии реального масштаба времени, и, следовательно, весьма уязвимы для атак.

3. Модели подсистемы геоинформационной поддержки АСУС

При создании комплекса геоинформационной поддержки как подсистемы АСУС важным является обеспечение всех требуемых элементов системы управления связью необходимой информацией для организации качественного управления СС, что обычно достигается выделением специального компонента в информационной подсистеме АСУС, рисунок 1.

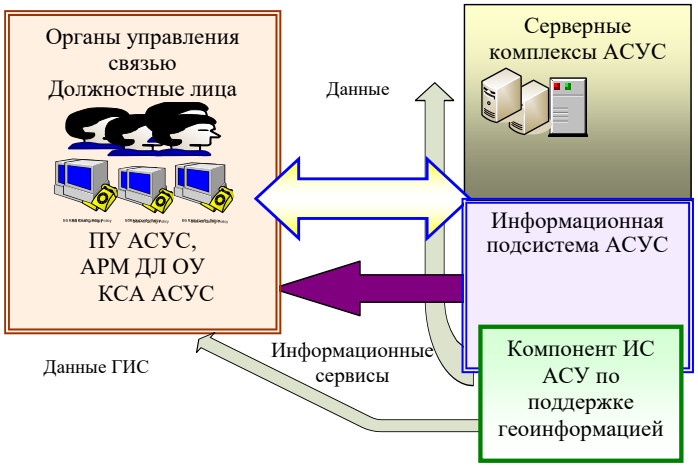


Рис. 1. Организация геоинформационной поддержки АСУС

Сам комплекс геоинформационной поддержки АСУС является распределенной по элементам АСУС системой со сложной многоуровневой архитектурой (архитектурная модель комплекса), рисунок 2.

В формализованном виде физическую структуру комплекса геоинформационной поддержки АСУС представляют неориентированным графом *G(N, L),* содержащим конечное множество N узлов, соответствующих информационным узлам ГИС, конечное множество L ребер, соответствующих каналам (в т. ч. виртуальным) и трактам передачи информации.

Для комплекса геоинформационной поддержки АСУС зададим матрицу следующего вида:

$$S = [s_{ij}], \quad \forall i, j \in N, \tag{1}$$

где $s_{ij} = 1$, при наличии ребра между вершинами i и j, а $s_{ij} = 0$, в противном случае.

Информационная структура комплекса определяется потребностями отдельных информационных процессов АСУС в обмене геоинформацией и представляется совокупностью пространственно-распределенных информационных узлов ГИС, испытывающих потребность взаимосвязи, и логических путей доставки информации между ними и потребителями ГИС услуг.

Потребности во взаимосвязи характеризуются тяготением клиентов АСУС и информационных процессов ГИС, которое задают в виде матрицы интенсивностей информационного обмена $\Lambda = \left[\lambda_{i,j} \right]$, количественно описывающей потребность в информационном обмене в определенном интервале наибольшей нагрузки (ИНН) между парами всех информационных узлов комплекса.

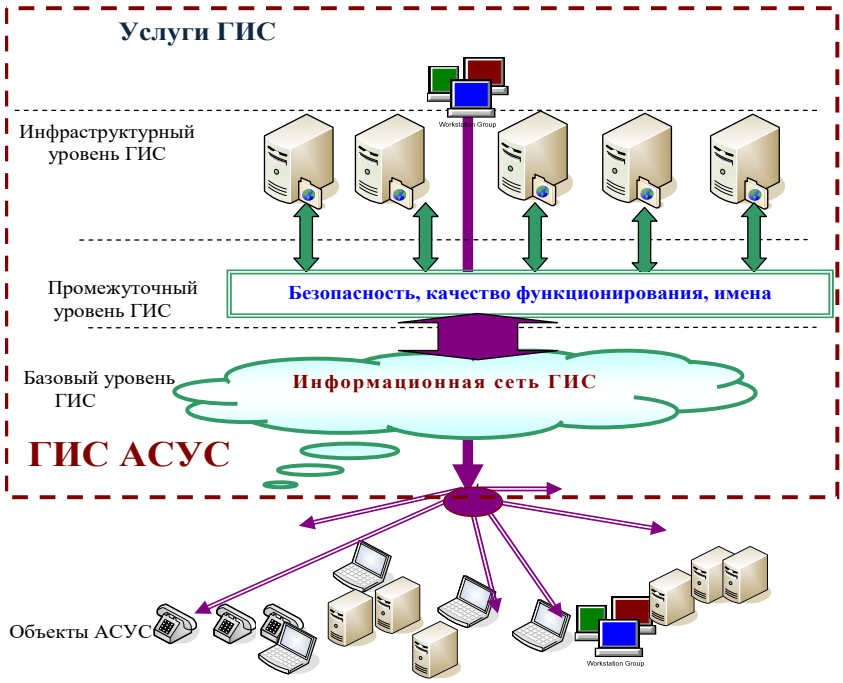


Рис. 2. Архитектура комплекса геоинформационной поддержки

Конкретные решения по управлению комплексом геоинформационной поддержки АСУС могут быть как интегрированными (включающими в себя несколько задач управления), так и однокомпонентными (когда программное средство СУ ГИС решает только одну задачу управления, например, безопасностью).

4. Особенности управления безопасностью комплекса геоинформационной поддержки АСУС

Важнейшей задачей управления комплексом является обеспечение безопасного его функционирования при разнообразных внешних и внутренних воздействиях как на сам комплекс, так и СУ комплексом.

В общем случае процесс управления включает следующие этапы: получение информации о состоянии комплекса геоинформационной поддержки АСУС, анализ полученной информации, выработка решения и исполнение решения, т.е. осуществление управляющих воздействий [1, 5].

При внедрении современного комплекса управления, даже при наличии «трудно управляемого» устаревшего оборудования (например, устаревшие серверы ГИС), орган управления получает следующие преимущества:

– повышается качество предоставляемых услуг ГИС в условиях атак;

– оперативно обнаруживаются и устраняются отказы, возникающие вследствие атак;

– снижаются эксплуатационные расходы и появляются дополнительные возможности за счет своевременно предоставленных услуг ГИС, несмотря на воздействия атак;

– орган управления комплекса может контролировать техническое

состояние и работоспособность как отдельных элементов, так и всего комплекса при массированных атаках.

5. Средства обеспечения безопасности и средства управления безопасностью комплексов геоинформационной поддержки АСУС

Для обеспечения безопасности функционирования комплексов геоинформационной поддержки АСУС используют ряд программно-аппаратных средств, рисунок 3, которые наряду со средствами управления составляют подсистему обеспечения комплексной безопасности [5].

Требуемый уровень защищенности ресурсов комплекса обеспечивается путем разграничения доступа пользователей к функциям АРМ, контроля целостности программных модулей и массивов информации, а также блокировки всех попыток несанкционированного воздействия потенциального нарушителя на процессы управления. Для этого в составе средств безопасности включают комплекс средств защиты информации (КСЗИ).

Специальное программное обеспечение СЗИ должно обеспечивать поддержку выполнения следующих функций:

-идентификация и аутентификация субъектов доступа при входе в систему;

-идентификация и аутентификация технических средств при их взаимодействии;

-предоставление пользователю информационных ресурсов АСУС и сетевых служб ТКС СН в соответствии с его полномочиями;

-регистрация входа/выхода субъектов доступа в систему/из системы;

-регистрация действий должностных лиц при работе на АРМ АСУС и подсистемы обеспечения информационной безопасности.

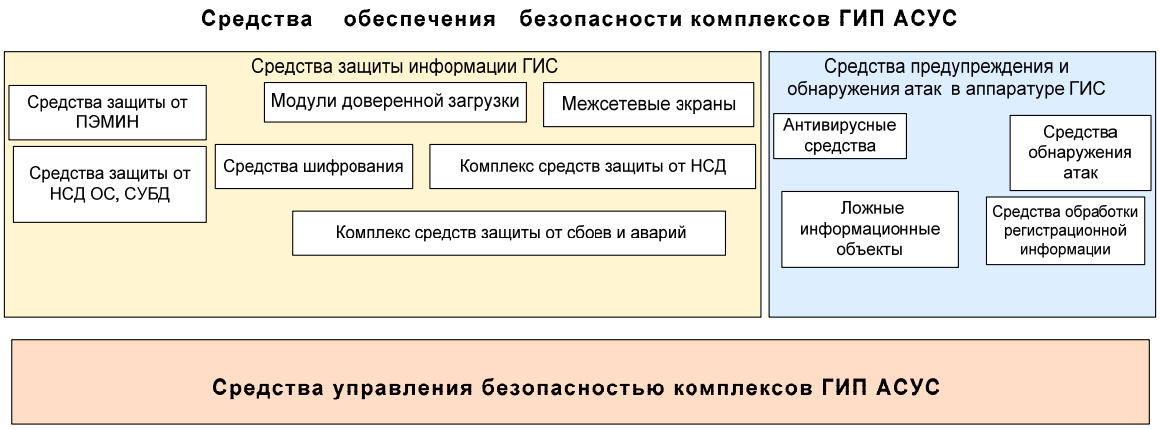


Рис. 3 – Средства обеспечения безопасности комплексов геоинформационной поддержки процессов управления связью

В состав средств, обеспечивающих информационную безопасность комплекса геоинформационной поддержки АСУС включают также программно-аппаратные средства обнаружения атак

Таким образом, для обеспечения безопасности ресурсов комплекса геоинформационной поддержки АСУС необходимо согласованно использовать значительное число разнородных средств защиты информации.

Учитывая сложность задач обеспечения безопасности, недостаточную эффективность таких традиционных механизмов защиты, как разграничение доступа, аутентификация, фильтрация, для её решения целесообразно создание специальной подсистемы для управления безопасностью комплекса.

Для обеспечения функциональной полноты, в состав подсистемы управления безопасностью комплекса геоинформационной поддержки АСУС (рисунок 4) включают следующие:

-средства управления инцидентами;

-средства управления рисками;

-средства управления политиками безопасности;

-средства аудита безопасности и тестирования подсистемы;

-средства управления восстановлением функционирования комплекса;

-средства поддержки принимаемых решений;

-средства управления.

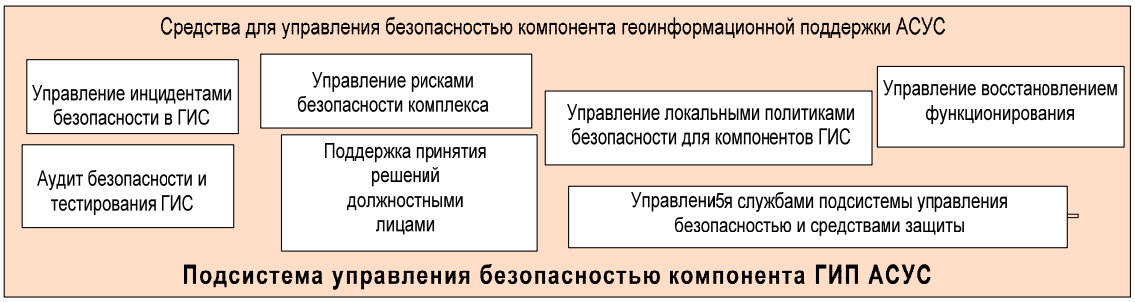


Рис. 4. Состав средств управления безопасностью комплекса геоинформационной поддержки АСУС

Средства управления инцидентами обеспечивают возможность оперативного и документального контроля событий, отражающих состояние (в плане нарушений безопасности) ресурсов комплекса и самой подсистемы обеспечения безопасности.

Средства управления рисками обеспечивают выявление и ранжирование уязвимостей (по степени серьезности ущерба от воздействий) компонент комплекса геоинформационной поддержки, угроз (исходя из вероятности их реализации) и т. д.

Средства управления политиками безопасности реализуют руководящие принципы, правила, процедуры и практические приемы в области безопасности в комплексе геоинформационной поддержки АСУС.

Средства аудита безопасности и тестирования комплекса предназначаются для регулярной проверки, насколько реализованные или используемые механизмы защиты информации соответствуют положениям принятых политик безопасности.

Средства управления восстановлением функционирования комплекса геоинформационной поддержки АСУС и подсистемы обеспечения безопасности комплекса обеспечивают возможность резервного копирования критических информационных ресурсов, удаленное восстановление и обновления ПО изделий, включая обновление базы сигнатур антивирусных средств, средств обнаружения атак.

6. Задачи управления безопасностью комплекса геоинформационной поддержки АСУС

Основные задачи по управлению безопасностью комплексов геоинформационной поддержки АСУС сводятся к следующему:

– выполняются утвержденные политики безопасности;

– вырабатываются и выполняются команды управления, направленные на все средства обеспечения безопасности комплексов;

– осуществляется мониторинг состояний комплекса в плане безопасности и осуществляется регулярный аудит безопасности его компонентов для принятия оперативных решений по изменению политик безопасности и усовершенствованию средств обеспечения безопасности.

Управление безопасностью комплекса геоинформационной поддержки АСУС предусматривает использования восьми механизмов безопасности [5]: «Нотаризация», «Управление маршрутизацией в контексте безопасности», «Управление доступом», «Аутентификация обмена», «Целостность данных», «Цифровая сигнатура», «Заполнение трафика» и «Шифрование», а также ряда служб безопасности, поддерживающих прикладные процессы управления безопасностью: «Аутентификация равноправных объектов», «Аутентификация подлинности данных», «Управление доступом», «Конфиденциальность соединения», «Конфиденциальность без установления соединения», «Конфиденциальность выбранной области», «Конфиденциальность потока трафика», «Целостность (сохранность) соединения с восстановлением», «Целостность соединения без восстановления» и др.

Процессы проведения аудита безопасности комплекса геоинформационной поддержки АСУС представляют собой независимые экспертизы отдельных областей его функционирования. Аудит безопасности комплекса геоинформационной поддержки АСУС дает возможность должностным лицам получить ответы на вопросы:

– как оптимально использовать существующий комплекс;

– как решаются вопросы безопасности и контроля доступа;

– как установить единую систему управления и мониторинга комплекса;

– когда и как необходимо провести модернизацию оборудования и программного обеспечения комплекса геоинформационной поддержки АСУС;

– как минимизировать риски при размещении конфиденциальной информации в комплекса геоинформационной поддержки АСУС, а также наметить пути решения обнаруженных проблем.

Работы по аудиту включают ряд этапов:

– начало процедуры аудита;

– сбор информации аудита;

– анализа данных аудита;

– выработки рекомендаций на основе анализа данных аудита;

– составление аудиторского отчета.

При управлении рисками осуществляют анализ рисков, с которого должно начинаться построение любой системы безопасности и управления ею. Он включает в себя мероприятия по обследованию безопасности комплекса геоинформационной поддержки АСУС, с целью определения того какие ресурсы и от каких угроз надо защищать, а также в какой степени те или иные ресурсы нуждаются в защите. Определение набора адекватных контрмер осуществляется в ходе управления рисками. Риск определяется вероятностью причинения ущерба и величиной ущерба, наносимого ресурсам сети, в случае осуществления угрозы безопасности. Процесс анализа и управления рисками приведен на рисунок 5.

Анализ рисков состоит в том, чтобы выявить имеющиеся риски и оценить их величину (дать им качественную и количественную оценку). Процесс анализа рисков состоит из этапов:

– идентификация ключевых ресурсов комплекса;

– определение важности тех или иных ресурсов;

– идентификация существующих угроз безопасности и уязвимостей, делающих возможным осуществление угроз;

– вычисление рисков, связанных с осуществлением угроз безопасности.

Важность (или стоимость) ресурса комплекса определяется величиной ущерба, наносимого в случае нарушения конфиденциальности, целостности или доступности этого ресурса. Обычно рассматриваются следующие виды ущерба:

данные были раскрыты, изменены, удалены или стали недоступны;

аппаратура или программное обеспечение были повреждены и разрушены;

нарушена целостность программного обеспечения.

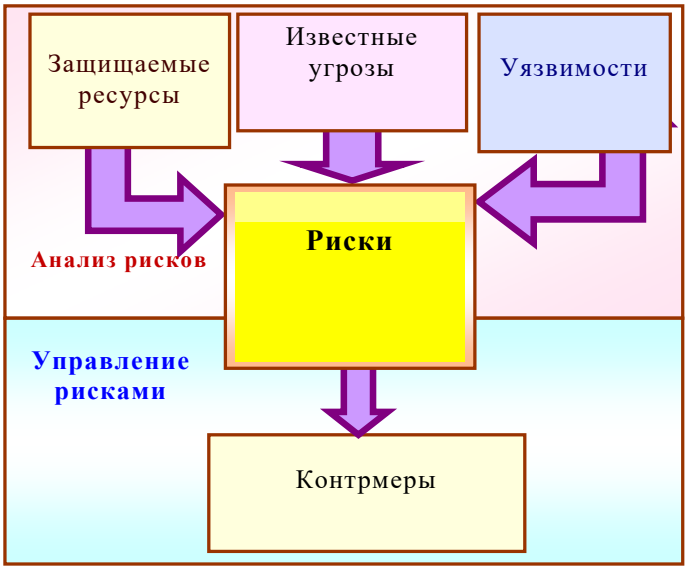


Рис. 5. Процессы анализа и управления рисками безопасности комплекса

Ущерб может быть нанесен в результате успешного осуществления следующих видов угроз безопасности:

локальные и удаленные атаки на ресурсы;

аварийные ситуации;

ошибки, либо умышленные действия обслуживающего персонала;

сбои в работе, вызванные ошибками в программном обеспечении (в т. ч. закладки) или неисправностями аппаратуры комплекса.

Обычно величину риска Risk определяют на основе условной стоимости ресурса C_{ur}, вероятности осуществления угрозы P_{ugr} и величины уязвимости V_s.

Значения величин рисков (4) сравниваются с допустимым значением

$$\mathrm{Risk}_k \le R_{кр} \tag{2}$$

Получив результаты анализа рисков, при невыполнении условия (2), можно перейти к выполнению задачи управления рисками, которая заключается в выборе обоснованного набора контрмер, позволяющих снизить уровни рисков до приемлемой величины. Стоимость реализации контрмер должна быть меньше величины возможного ущерба. Разница между стоимостью реализации контрмер и величиной возможного ущерба должна быть обратно пропорциональна вероятности причинения ущерба комплексу геоинформационной поддержки АСУС.

Сама оценка вероятности представляет собой довольно сложную задачу. Обычно предполагают, что потоки атак на комплекс геоинформационной поддержки АСУС носят Пуассоновский характер и характеризуются следующим:

$$P\{N(t,\tau)=k\}=\frac{\alpha^k e^{-a}}{k!}. \tag{3}$$

Задача управления инцидентами фактически сводится к проведению оперативного мониторинга событий [6, 7] в комплексе геоинформационной поддержки АСУС, связанных с нарушением безопасности. При этом должна обеспечиваться возможность оперативного и документального контроля событий, отражающих состояние комплекса и самой подсистемы обеспечения безопасности в контексте ее нарушений.

После обнаружения, анализа и классификации инцидента, важным этапом является процедура противодействия его распространению. Действия по противодействию распространению во многом зависят от того, насколько качественно отработаны предыдущие этапы оценки инцидентов. Правильная классификация и глубина анализа возможных последствий, играют решающую роль и существенного сокращают время реагирования. Лучшей практикой подготовки к противодействию распространения инцидента является заранее подготовленный сценарий действий и новый вариант сетевой политики безопасности (или предложения по корректировке существующей), проведённый анализ рисков и классифицированные события по каждому основному классу инцидентов.

Процедура противодействия распространению инцидента строится отдельно для каждого конкретного инцидента и зависит от его типа. Критерии стратегии противодействия должны быть формализованы и доступны для всех прикладных процессов управления.

Сбор свидетельств инцидента информационной безопасности представляет собой процедуру сбора фактов злонамеренных действий с целью нанести ущерб функционированию комплекса геоинформационной поддержки АСУС или отдельным его компонентам.

Однако задача представления реальных инцидентов, произошедших в комплексе геоинформационной поддержки АСУС, некоторыми числовыми данными, необходимыми для анализа, является достаточно сложной.

Причины, по которым необходим сбор свидетельств, анализируются с целью получения законных оснований как для привлечения к ответственности должностных лиц по безопасности, так и для получения повода выработать новую политику безопасности. Другая причина – формирование пакета для анализа уязвимости и ликвидации последствий инцидента информационной безопасности.

Типичными метриками для хранения данных инцидента являются:

– количество обработанных инцидентов безопасности;
– среднее время, затрачиваемое на обработку одного инцидента;
– описание расследования инцидента, включая рассмотренные источники данных инцидента, свидетельства инцидента, качественная или количественная оценка ущерба, причина возникновения события инцидента, события, которые могли бы предотвратить инцидент.

Важной задачей является защита ресурсов комплекса, которая в значительной степени осуществляется процедурами аутентификации и авторизации доступа. В рамках решения задачи реализуются различные по функциональности схемы аутентификации, каждая из которых включает тип аутентификации и способ (механизм) идентификации объектов.

Для выбора типа аутентификации предусматривают следующие возможности: аутентификация клиента при доступе к средствам комплекса геоинформационной поддержки АСУС или локальным операционным системам, аутентификация клиента при доступе к услугам ГИС. Для выбора способа идентификации предусмотрены следующие варианты, предполагающие их любое совместное использование: смарт-карта, пароль, «внешняя» аутентификация.

Для осуществления контроля доступа для инициализации защищенного соединения от локальной операционной системы или при получении запроса на установление внешнего соединения, локальные агенты безопасности на концах соединения (и/или на промежуточном шлюзе) обращаются к правилам, заданным локальной политикой безопасности сервера ГИС или другого устройства (комплекса) и проверяют, разрешено ли установление этого соединения. В случае если такое соединение разрешено – обеспечивается требуемый сервис защиты данного соединения, если запрещено – соединение не предоставляется.

При контроле доступа на уровне прикладных объектов для незащищенных распределенных приложений обеспечивается сервис разграничения прав доступа на уровне внутренних объектов данного приложения. Контроль доступа на уровне объектов прикладного уровня обеспечивается за счет применения механизма proxy. Proxy разрабатывается для каждого прикладного протокола. Часто для этих целей применяют протокол HTTP.

Для построения распределенной схемы управления и снижения загрузки комплекса геоинформационной поддержки АСУС используется архитектура распределенных прокси-агентов в составе локальных агентов безопасности.

В зависимости от вида управляемых объектов набор управляющих функций в комплексе геоинформационной поддержки АСУС можно условно разбить на три категории.

Функции управления информационным каталогом определяют информационную составляющую безопасности комплекса:

- формирование разделов каталога;
- описание услуг каталога;
- назначение и контроль сетевых ресурсов, требуемых для выполнения услуги;
- регистрацию описания услуги;
- контроль состояния услуг или разделов каталога услуг;
- мониторинг исполнения услуг;
- подготовку и пересылку отчетов (протоколов) по состоянию каталога.

Для управления правами доступа клиентов ГИС к услугам обеспечиваются следующие функции:

- формирование групп клиентов по привилегиям доступа к услугам ГИС;
- формирование иерархических агрегаций клиентов по административным, территориальным или иным критериям (домены и/или компоненты);
- формирование ролей доступа клиентов к услугам;
- назначение уровней секретности для услуг и клиентов;
- назначение фиксированных прав доступа группам, ролям, агрегациям;
- подготовку и пересылку отчетов.

Правила политик безопасности ставят в соответствие конкретные свойства защиты (как для соединений, так и для доступа клиентов к услугам ГИС) предустановленным уровням безопасности комплекса. Контроль соблюдения правил политик безопасности выполняет специальный программный модуль в составе сервера управления безопасностью, обеспечивающий:

- определение каждого из уровней безопасности набором параметров защиты соединений, схемы аутентификации и разграничения прав;
- назначение уровней безопасности конкретным услугам или разделам каталога услуг;
- назначение уровней безопасности клиентам;
- контроль целостности политик безопасности (полноты правил);

- контроль исполнения политик безопасности по различным критериям;
- подготовку и пересылку отчетов о всех попытках несанкционированного нарушения политик безопасности.

Управление восстановлением комплекса и его компонентов после успешных атак является составной частью процесса восстановления нормального функционирования в целом.

Конкретное содержание процессов восстановления, в основном, будет зависеть от характера воздействий и объектов комплекса, против которых эти атаки были направлены, т.е. определяется возможными угрозами безопасности. Поэтому, оценив соответствующие риски безопасности, может быть проведена предварительная работа по возможным процедурам восстановления функционирования комплекса и выработке тех управляющих воздействий, которые должны реализовать эти процедуры в требуемой последовательности за заданное время.

Анализ характера возможных атак, позволяют предположить, что с точки зрения восстановления компонент и всего комплекса геоинформационной поддержки АСУС, основную роль играют процессы восстановления программного обеспечения (ПО) и используемых данных.

Для этого в подсистеме управления безопасностью должны быть предусмотрены должностные лица, организующие реализацию процедур восстановления ПО и данных.

7. Заключение

Применение на практике подходов, моделей, средств и механизмов обеспечения информационной безопасности, рассмотренных в статье, позволит достичь требуемую эффективность применения комплексов геоинформационной поддержки в составе АСУС в условиях применения компьютерных атак. Изложенный комплексный подход можно рекомендовать для построения системы обеспечения информационной безопасности на сетях связи и в АСУС в целом.

Литература

1. Буренин А.Н., Легков К.Е. Инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы организации и управления. М.: ИД Медиа Паблишер. 2015. 364 с.
2. Браун Л. А. История географических карт. — Москва: Центрполиграф, 2006. 479 с.
3. Капралов Е., Кошкарев А., Тикунов В., Лурье И., Семин В., Серапинас Б., Сидоренко В. , Симонов А. Геоинформатика. В 2 книгах. Москва: Academia, 2010.
4. Журкин И. Г., Шайтура С. В. Геоинформационные системы. — Москва: Кудиц-пресс, 2009. 272 с.
5. Буренин А.Н., Курносов В.И. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями. М.: Наука. 2011. 464 с.
6. Васильев В.А., Буренин В.А. Оперативный мониторинг состояния коммутатора выделенной транспортной АТМ сети. Труды всероссийской научной конференции. г. Калуга. 2005. С. 146-148.
7. Васильев В.А., Буренин В.А., Лезин Ю.В. Задачи оценки параметров трафика для коммутатора выделенной транспортной АТМ сети. Труды всероссийской научной конференции. г. Калуга. 2005. С. 149-152.

References

1. Burenin A.N., Legkov K.E. Infocomm systems and special purpose network. Principles of organization and management. Pm: ID Media Publisher. 2015.364 s.
2. Brown l. A. Story maps. — Moscow: Tsentrpoligraf, 2006. 479 s.
3. Corporals E. Koshkarev, A., Tikunov V., Lurie I., Semin V., Serapinas B., v., Sidorenko A. Simonov F. Geoinformatics. In 2 books. Moskva: Academia, 2010.
4. Zhurkin I.G., Shajtura S. V. Geoinformation systems. — Moscow: Kudic press, 2009. 272 s.
5. Burenin A.N., Kurnosov V.I. And theoretical bases of modern management. telecommunication networks. Moscow.: Nauka. 2011.464 s.
6. Vasiliev V.A., Burenin A.N. Operational status monitoring switch selected transport ATM network. Proceedings of the all-Russian Scientific Conference. Kaluga. 2005.146-148.
7. Vasiliev V.A, VA, Burenin A.N., Lezin U.V. Task parameters estimation of traffic for the selected switch ATM transport network. Proceedings of the all-Russian Scientific Conference. Kaluga. 2005.149-152.

ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ОРГАНИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМИ СЕТЯМИ

А. Н. Буренин [1], В.С. Артамонов [1]

[1] АО «НИИ «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье приведены методические материалы, позволяющие реализовать системный подход к построению автоматизированных систем управления связью, обеспечивающих эффективное функционирование современных телекоммуникационных сетей

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть, автоматизированная система управления связью, системный подход.

BASES OF SYSTEM APPROACH TO AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF MODERN TELECOMMUNICATION NETWORKS

A.N. Burenin [1], V.S. Artamonov [1]

[1] JSC "Scientific Research Institute «Rubin», Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article contains methodical materials to implement a systematic approach to building automated control systems of communication, providing for an efficient functioning of modern telecommunication networks

Keywords: telecommunication network, automated control system communication, system approach.

1. Введение

Основой современных ведомственных телекоммуникационных сетей (ТС), предназначенных для нужд обороны, безопасности и обеспечения правопорядка в РФ в соответствии с законом РФ «О связи» [1], являются различные комплексы и средства коммутации, каналообразования, информационные тракты и цифровые каналы, объединенные в единую систему, строящуюся в соответствии с концепцией сетей следующего поколения (NGN) [2, 5]. Телекоммуникационные сети реализуются в виде требуемых структур с распределением ресурсов сетей и решения задач защиты информации. Эффективное функционирование ТС требует организации качественного управления ими в реальном масштабе времени, реализуемого АСУ ТС [2 – 5].

Естественно такие АСУ ТС будут многоуровневыми иерархическими, а процессы управления будут декомпозированы по пяти основным задачам управления: управление производительностью, безопасностью, структурой (конфигурацией) и адресацией, ресурсами и нештатными ситуациями.

Для выявления основных путей создания АСУ ТС необходим системный подход.

Системный подход предполагает рассмотрение объекта как целого, состоящего из совокупности элементов, процессов и подсистем, связи между которыми образуют некоторую структуру. Общие принципы системного подхода, заложенные в теории систем, предполагают рассматривать систему путём последовательного перехода от общего к частному, когда исследуемый объект выделяется из окружающей среды.

Результатом системных исследований является, как правило, выбор плана решения проблемы, параметров и способов решения и т.д. При этом системный подход в целом, предусматривает такую последовательность:

- постановка задачи;
- структуризация системы;
- построение модели;
- исследование модели.

2. Элементы системного подхода

АСУ современных ТС имеют в своем составе комплексы средств автоматизации (КСА), расположенные, как правило, на пунктах управления (ПУ) и в органах управления (ОУ). Для организации обмена всей необходимой управляющей информацией в АСУ должна быть создана транспортная сеть АСУ ТС, типовая структура которой приведена на рисунке 1.

Транспортная сеть является первым системным компонентом АСУ ТС.

Вторым системным компонентом является комплекс архитектур АСУ ТС. В соответствии со стандартами сетевого управления (рек. МСЭ-Т серии М.30XX) в системах управления можно выделить различные архитектуры АСУ ТС: оперативная, организационная, техническая, функциональная.

Третьим системным компонентом является уровень обеспечения информационной безопасности объектов АСУ ТС.

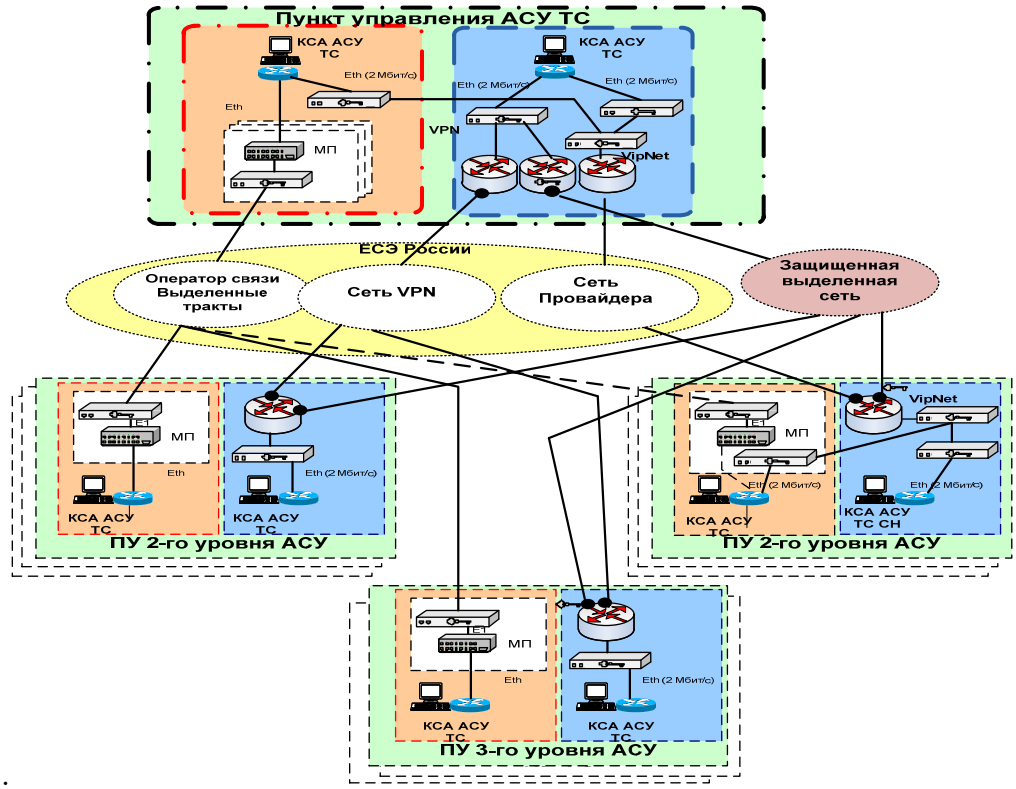


Рис. 1. Пример структуры транспортной сети АСУ ТС

3. Структура и архитектуры АСУ ТС

АСУ ТС как иерархическая структура описывается графом прадеревом на множестве объектов $\bigcup_{l-1}^{k} A_{jl} = A_j;\quad A_{jl} \cap A_{js} = \varnothing;\quad l,s = \overline{1,k}$ [1, 6, 7].

Степень централизации структуры АСУ ТС $\alpha_{ACY\ EITS}^{centr}$ является мерой разделения полномочий между уровнями АСУ и определяется степенью централизации для каждой пары $(i-1, i)\ \forall\, i = \overline{2, N}$ смежных уровней иерархии, которая измеряется отношением объема задач, решаемых на уровнях, т.е.:

$$\alpha_{ACY\ EITS}^{centr} = \sum_{i=1}^{N} \beta_i \alpha_i^{centr} = \sum_{i=1}^{N} \beta_i \frac{W_i}{W_{i-1}}. \qquad (1)$$

Для АСУ современных ТС эти соотношения иллюстрируются рисунком 2.

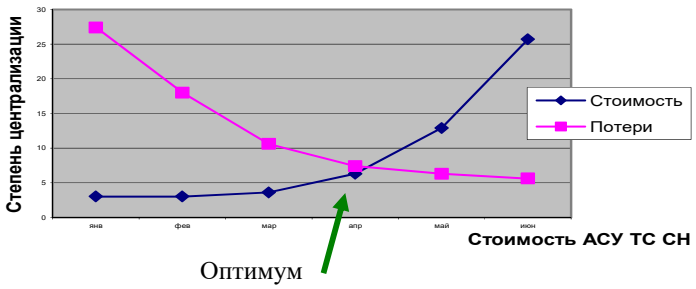


Рис.2 – Уровень централизации АСУ ТС в зависимости от стоимости и возможных потерь при недостаточной централизации

Уровень предоставления услуг автоматизации АСУ ТС должностным лицам (ДЛ) органов управления зависит от их количества d_i на каждом уровне иерархии, которым предоставлены услуги автоматизации, и от общего числа ДЛ на уровне r_i

$$Luz_{ASU\ ITS} = \sum_{i=1}^{N_o} \varphi_i \frac{d_i}{r_i}. \qquad (2)$$

Техническая архитектура АСУ ТС определяется множеством решаемых АСУ задач $E = \{E_i\}$. Связи между задачами управления задаются графом задач $G_E = \{E_{qi}, (E_{qij})\}$ с множеством вершин E_{qi}, соответствующим задачам, и множеством дуг E_{qij}, отражающим связи задач между собой.

Пусть имеется множество пунктов управления АСУ ТС $M = \{M_j\}$ j = 1,…M, связи между которыми заданы в виде графа $G_M = \{M_{qj}, (B_{qij})\}$ с множеством вершин M_{qj}, соответствующим центрам (пунктам) управления, и множеством дуг B_{qij},

отражающим связи центров (пунктов) управления между собой. Задано множество технических средств АСУ ТС СН $A_{ASUEITS} = \{a_l\}$. Тогда в соответствии с теорией сложных систем [7, 8] целесообразная техническая архитектура АСУ ТС будет характеризоваться выражением:

$$A_{TEXH} = \sup \sum_{e_i \in E_i;\, a_{ij} \in A_i} d_{e_l}^{\,a_l} \sum_{M_j \in M;\, a_{iJ} \in A_i} z_{Mq,a_i}^{\,a_i}, \qquad (3)$$

где $d_{e_l}^{\,a_l}$ – эффект от решения задачи e_j на техническом средстве a_i;

$z_{Mq,a_i}^{\,a_i}$ – переменная, которая принимает значение 1, если задача решается на j-м ЦУ (ПУ) техническим средством a_{ij}, и значение 0 в противном случае.

Естественно, что с увеличением номенклатуры компонент оборудования уровень технической архитектуры реальной АСУ ТС снижается (рисунок 3)

Поэтому для повышения уровня необходимо снижать номенклатуру за счет унификации и типизации технических средств, что позволит повысить этот показатель.

Функциональная архитектура АСУ ТС представляет собой набор (множество) функциональных компонентов (подсистем), связанных между собой определенным образом, с использованием стандартных интерфейсных точек взаимодействия.

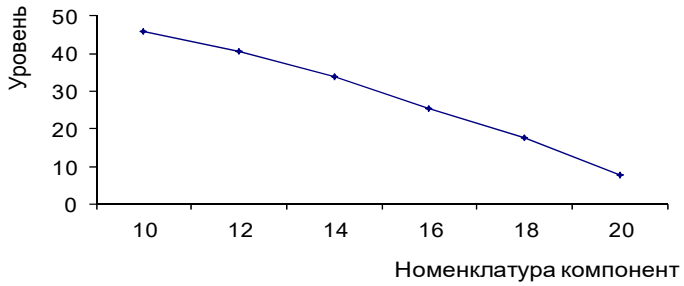


Рис. 3– Уровень технической архитектуры реальной АСУ ТС в зависимости от номенклатуры компонент оборудования

Все задачи управления ТС, выполняемые АСУ, формируются исходя из выполнения максимума выражения $\max(G - L)$, где G – качество функционирования ТС, а L – затраты.

В соответствии с этим АСУ ТС разбивается (декомпозируется) на n функциональных подсистем $s_1, s_2, ..., s_i, ..., s_n$, каждая из которых выполняет определенные функции в рамках АСУ, характеризующихся полезностью x_i и потерями y_i, которые в совокупности определяют функцию качества $F_i(x_i, y_i)$.

Тогда в соответствии с теорией больших систем [7, 8] функцию качества функциональной архитектуры АСУ ТС можно задать как:

$$F_i(x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n, y_1, y_2, ..., y_i, ..., y_n) = \sum_{i=1}^{n} F_i(x_i, y_i)\,. \qquad (4)$$

Показатель функциональности функциональной архитектуры АСУ ТС будет, в частности, зависеть от того, как организованы службы АСУ, как они взаимодействуют друг с другом, какие сервисы каждая из них использует (или не использует).

В качестве примера на рисунке 4 приведены зависимости показателя функциональности АСУ ТС в зависимости от числа функциональных подсистем АСУ, обеспечивающих те или иные информационные сервисы поддержки процессов управления, для двух вариантов организации служб:

- с обращением к службе при необходимости;
- с автоматическим предложением спектра услуг при решении той или иной задачи.

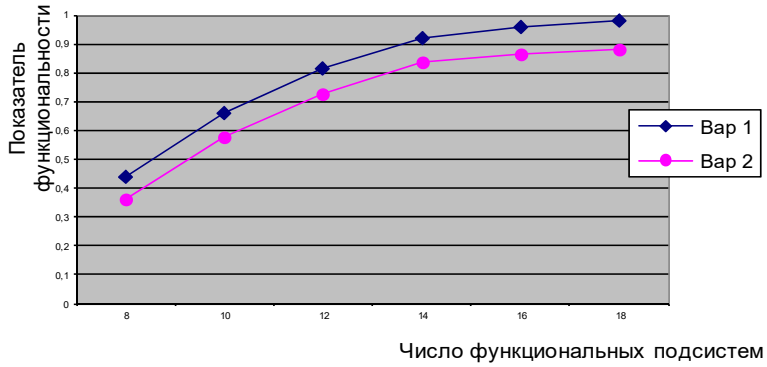


Рис. 4 – Показатель функциональности, характеризующий функциональную архитектуру АСУ ТС

4. Системный подход к транспортной сети открытого сегмента АСУ ТС

Транспортная сеть, предоставляющая услуги по переносу информации открытого сегмента АСУ ТС, фактически является вырожденной подсетью, так как ее элементы пространственно и функционально размещаются за пределами самой АСУ ТС и, как правило, это услуги виртуальных сетей некоторого провайдера на базе ресурсов Ростелекома (VPN), т.е. специально созданной сети, доступ к которой осуществляется с помощью пограничных маршрутизаторов (как правило, импортного производства, фирм Cisco или Alcatel).

При этом этот транспортная составляющая (с точки зрения АСУ ТС) может быть представлена одноуровневой многоканальной (по числу точек доступа) системой обслуживания с ограниченной (требуемой) пропускной способностью (временем обслуживания) и задана выражением [9, 10]:

$$\left.\begin{aligned} P_{ij0} &= \frac{1}{\left(1+\frac{\rho_{ij}}{1!}+\frac{\rho_{ij}^2}{2!}+\ldots+\frac{\rho_{ij}^{k_{ij}}}{k_{ij}!}\right)}; \\ P_{ijn} &= \frac{\rho_{ij}^n}{n!}P''_{ij0} \;\forall\; n=1,2,\ldots,k_{ij} \end{aligned}\right\}, \tag{5}$$

в котором ρ_{ij} – величина, характеризующая нагрузку, поступающую на транспортную компоненту со стороны всех пограничных маршрутизаторов АСУ ТС, соотнесенную с временем обслуживания сетью, определяемому пропускной способностью точек доступа к транспортному компоненту, т.е. равна интенсивности суммарного потока пакетов, поступающих со всех пограничных маршрутизаторов АСУ ТС $\sum_{j=1}^{n}\lambda_j$, поделенной на величину, обратную величине среднего времени обслуживания. $(t_{obsl})^{-1}$.

В соответствии с этим вероятность того, что рассматриваемая сеть не будет справляться с предложенной нагрузкой (соответствует максимуму пропущенной нагрузки) составит:

$$P^m{}_{otkr\ segm} = \frac{\left(t_{obsl}\sum_{j=1}^{m}\lambda_j\right)^m}{m!\left(\sum_{k=0}^{m}\frac{\left(t_{obsl}\sum_{j=1}^{m}\lambda_j\right)^k}{k!}\right)}. \tag{6}$$

5. Системный подход к транспортной сети закрытого сегмента АСУ ТС

Транспортная сеть, предоставляющая услуги по переносу информации закрытого сегмента АСУ ТС (обмен закрытой управляющей информацией), является основой для формируемой информационной сети АСУ ТС, предназначенной для организации обмена КСА управляющей информацией, имеющий соответствующий гриф конфиденциальности. Эта сеть фактически представляет собой двухуровневую систему инфотелекоммуникаций, образованную на базе выделенных цифровых трактов оператора, нижний уровень которой представляет собой защищенную цифровую сеть коммутируемых цифровых каналов, а верхний – наложенную защищенную IP-сеть. Каждый порт маршрутизатора пункта управления АСУ ТС должен поддерживать интерфейс соответствующего канала в качестве конечного узла. После того как цифровые каналы скоммутированы и установлены, криптомаршрутизаторы могут пользоваться ими как физическими, посылая данные порту соседнего (по отношению к виртуальному каналу) криптомаршрутизатора. Так образуется сеть выделенных защищенных каналов с собственной топологией.

В соответствии с этим эффективность такой организации зависит от соотношения между средним временем передачи одного массива IP-пакетов $\overline{t}_{i1}$ и временем

установления соединения (коммутации цифрового канала) $\overline{t}_y$. Ясно, что должно выполняться условие $\overline{t}_{n1} > \overline{t}_y$.

При этом среднее время доставки IP-пакета в сети этого типа можно определить из выражения: $\overline{t}_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{v_{ef}} + \overline{t}_{k2} + \overline{t}_3$, где $\overline{t}_з$ – среднее время задержки пакета; $\overline{t}_{к2}$ – среднее время обработки заголовка IP-пакета с обращением к маршрутной таблице, $Q_{\text{п}}$ и v_{ef} – соответственно объем IP-пакета и эффективная скорость передачи его по установленному цифровому каналу, а

$$\overline{t}_3 = \frac{Q_{\text{п}} \sum_{k=1}^{m} \frac{(k-1)m!\rho^k}{(m-k)!}}{v_{ef}\left(1 + \frac{m!\rho}{(m-1)!} + \sum_{k=2}^{m} \frac{m!\rho^k}{(m-k)!}\right)}. \qquad (7)$$

В соответствии с этим выражением можно получить зависимость вероятности своевременной доставки управляющих сообщений в сети защищенного (закрытого) сегмента АСУ ТС от уровня нагрузки информации АСУ, рисунок 5.

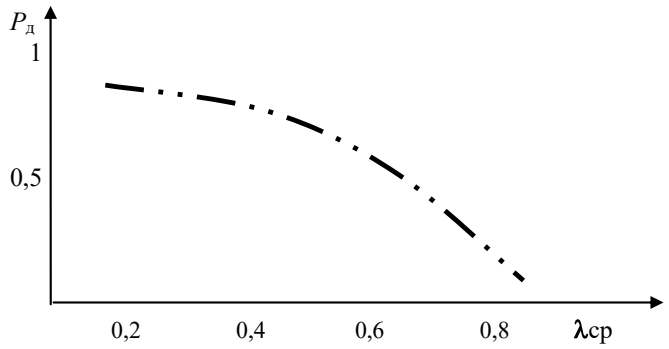


Рис. 5 – Вероятность своевременной доставки управляющих сообщений в транспортной сети закрытого сегмента АСУ ТС

6. Системный подход к оценке уровня информационной безопасности на объектах АСУ ТС

Информационная безопасность АСУ ТС является свойством АСУ, обеспечивающим ее нормальную качественную работу и сохранение ее информационных ресурсов в условиях информационных воздействий нарушителей [5].

В соответствии с этим уровень информационной безопасности характеризует степень защищенности информационных ресурсов на объектах АСУ ТС от потенциальных угроз.

Сама степень защищенности зависит, во-первых, от наличия, качественного и количественного состава системы обеспечения информационной безопасности (СОИБ) АСУ ТС, а во-вторых, от наличия и от качественных показателей системы управления информационной безопасностью АСУ ТС.

Таким образом, уровень информационной безопасности каждого объекта АСУ ТС (максимум его равен 1) будет определяться следующим образом:

$$W_{ob\ ACY\ EITS} = \eta_{soib}\Pi_{soib} + \eta_{SUpr\,sec}\Pi_{SUpr\,sec}, \quad (8)$$

где $\eta_{soib}, \eta_{SUpr\,sec}$ – весовые коэффициенты подсистем;

$\Pi_{soib}, \Pi_{SUpr\,sec}$ – относительные качественные показатели систем обеспечения информационной безопасности и подсистем управления информационной безопасностью АСУ ТС.

Очевидно, что максимальные значения, которые могут принимать величины $\Pi_{soib}, \Pi_{SUpr\,sec}$, также равны 1.

Наиболее простой вид Π_{soib} можно задать выражением

$$\Pi_{soib} = \sum_{i=1}^{k_{soib}} \kappa_i R_i \quad \forall i = 1,...,k_{soib}, \quad (9)$$

где R_i=(0,1) – величина, характеризующая наличие R_i=1, или отсутствие R_i=0 i-го компонента СОИБ в составе СОИБ;

κ_i – коэффициент важности i-го компонента СОИБ.

Так i = 1 соответствует комплексу средств защиты информации от НСД, i = 2 – комплексу средств защиты информации от СВАС, i = 3 – комплексу средств обнаружения атак, i = 4 – средствам доверенной загрузки и т.д.

Аналогично наиболее простой вид $\Pi_{SUpr\,sec}$ можно задать выражением

$$\Pi_{SUpr\,sec} = \sum_{j=1}^{k_{SUpr\,sec}} \iota_j Z_j \quad \forall\ j = 1,..,k_{SUpr\,sec}, \quad (10)$$

где Z_j=(0,1) – величина, характеризующая наличие Z_j = 1, или отсутствие Z_j = 0 j-й подзадачи управления информационной безопасностью в составе всех задач управления.

Так j = 1 соответствует подзадачи периодического проведения аудита безопасности, j = 2 – подзадачи управления рисками, j = 3 – подзадачи управления инцидентами, j = 4 – подзадачи уточнения правил безопасности по результатам задач j = 1, 2 и 3, т. е.

$$\Pi_{SUpr\,sec} = \sum_{j=1}^{4} \iota_j Z_j. \quad (11)$$

Значения величин весовых коэффициентов подсистем $\eta_{soib}, \eta_{SUpr\,sec}$ и коэффициентов важности κ_i и ι_j определяется методами экспертных оценок [7, 8] и

обычно принимают для типовых АСУ ТС $\eta_{soib} = 0,7,\ \eta_{SUpr\,\sec} = 0,3,\quad \kappa_i = \frac{1}{k_{soib}},$

$\iota_j = \frac{1}{k_{SUpr\,\sec}}.$

Например, если в СОИБ АСУ ТС реализовано 90% потенциальных средств защиты и обеспечения информационной безопасности, а в системе управления информационной безопасности выполняется 30% потенциально возможных задач управления (что достаточно типично для многих АСУ ТС), то для развернутых объектов такой АСУ ТС уровень информационной безопасности составит $W_{ob\ ACY\ EITS} = 0,63 + 0,1 = 0,73$. Вместе с тем, этот уровень не такой уж неприемлемый, так как в целом попадает в интервал требуемого уровня информационной безопасности объектов информационных систем специального назначения, значение которого было получено также с применением методов экспертных оценок и составляют $W^{\text{int}\,dop}_{ob\ ACY\ EITS} = (0,7; 0,95]$.

7. Заключение

В практике создания и развития инфокоммуникаций для обеспечения обороноспособности, безопасности и правопорядка [1], требуется правильно наметить пути создания и организации развертываемых автоматизированных систем управления информационными и телекоммуникационными сетями и системами. Осуществить это можно только с позиций системного подхода.

В статье приведен методический материал, обеспечивающий системный подход к построению структурных компонентов АСУ ТС и системы в целом с определением их качественных показателей.

Литература

1. Федеральный Закон «О связи» от 7 июля 2003 года N 126-ФЗ (с внесенными изменениями, ред. 2007 г.).
2. Легков К.Е., Буренин А.Н. Некоторые проблемы управления современными инфокоммуникационными сетями специального назначения // H&ES: Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2012. –№ 2.
3. Буренин А.Н., Легков К.Е. Особенности архитектур, функционирования, мониторинга и управления полевыми компонентами современных инфокоммуникационных сетей специального назначения // H&ES: Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. –№ 3.
4. Легков К.Е. Буренин А.Н. Проблемы математического описания потоков управляющей информации в процессе управления современной инфокоммуникационной сетью специального назначения // H&ES: Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2013. –№ 5.
5. Буренин А.Н., Легков К.Е. Инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления. М.: ИД Медиа Паблишер. 2015. 348 с.
6. Лебедев А.Т., Готнога С.В. Построение на сети дерева Штейнера / Проблемы внедрения новых сетевых технологий в системы связи ВС РФ. Под ред. Академика МАИ Н.И. Буренина. ВУС. 2002

7. Lee T.H., Adams G.E., Gaines W.M. Computer process control. Modeling and optimizaion. New York. 1972.
8. О сущности системного подхода к решению сложных задач практики и о проблемах больших систем / Большие системы. Теория, методология, моделирование. М.: Наука. 1971.
9. Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания. М.: Физматгиз. 1963. 236 с.
10. Захаров Г. П. Методы исследования сетей передачи данных. М.: Радио и связь. 1982. 208 с.

REFERENCES

1. Federal law "on communications" from July 7, 2003 N 126-FZ (revised ed. 2007).
2. Legkov K.E., Burenin A.N. Some problems of management of modern special purpose networks/infokommunikacionnymi/H&ES: high tech in space studies of the Earth. -2012. -No. 2.
3. Burenin A.N., Legkov K.E. Features architectures, operation, monitoring and management of field components of modern communication networks, special-purpose//H&ES: high tech in space studies of the Earth. -2013. -No. 3.
4. Legkov K.E. Burenin A.N. Problems of mathematical description of management information flows in the process of managing a modern communication network for special purpose//H&ES: high tech in space studies of the Earth. -2013. -No. 5.
5. Burenin A.N., Legkov K.E. Infocomm systems and special purpose network. The basics of building and management. Pm: ID Media Publisher. 2015. with 348.
6. Lebedev A.T., Gotnoga S.V. Building on a network of Steiner tree Problem/introduction of new network technologies in the communications system of the RF ARMED FORCES. Ed. Aca MAI Ni Burenin. VSL. 2002.
7. Lee T.H., Adams G.E., Gaines W.M. Computer process control. Modeling and optimizaion. New York. 1972.
8. On the essence of a systematic approach to address the challenges of practice and the problems of large systems/large systems. Theory, methodology, simulation. Moscow.: Nauka. 1971.
9. A. Y. Khinchin's work on the mathematical theory of mass service. M.: Year. 1963.236 p.
10. Zakharov G.P. Research methods of data transmission networks. PM: radio and communications. 1982.208 c.

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КЛАСТЕРНОЙ MESH-СЕТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANYLOGIC

М.В. Богатырев, С. А Житенёв, А.А. Ерыгин, А.М. Сепкин

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Россия

Аннотация. Предлагается методический подход к оценке пропускной способности кластерной mesh-сети на основе имитационного моделирования в среде AnyLogic. При моделирования используется объектно-ориентированный подход, в соответствии с которым модель mesh-сети представляется в виде совокупности взаимодействующих между собой агентов – абонентских терминалов. Взаимодействие агентов моделируется на сеансовом, транспортном, сетевом, канальном и физическом уровнях в соответствии с моделью OSI (Open Systems Interconnection, ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99). Модель может быть использована при проектировании mesh-сетей в интересах анализа их возможностей по передаче планируемого трафика.

Ключевые слова: кластер; mesh-сети; моделирование; AnyLogic; пропускная способность; оконечное оборудование; маршрутизатор; модель OSI.

EVALUATION OF THE BANDWIDTH OF THE CLUSTER MESH-NETWORK BASED ON SIMULATION IN THE ANYLOGIC

M. V. Bogatyrev, S. A. Zhitenev, A. A. Erygin, A. M. Sepkin

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

Abstract. A methodical approach to estimating the bandwidth of a cluster mesh network based on simulation modeling in AnyLogic environment is proposed. When modeling, an object-oriented approach is used, according to which the mesh-network model is represented as a set of agents interacting with each other - subscriber terminals. The interaction of agents is modeled at the session, transport, network, channel and physical levels in accordance with the OSI model (Open Systems Interconnection, GOST R ISO / IEC 7498-1-99). The model can be used in the design of mesh-networks in the interests of analyzing their ability to transfer the planned traffic

Keywords: cluster; mesh networks; modeling; AnyLogic; bandwidth; terminal equipment; router; OSI model.

1. Введение

В настоящее время в телекоммуникационных системах различного назначения широкое распространение получили сети беспроводного доступа, основанные на mesh-технологии (mesh-сети). Mesh-сети, как правило, имеют кластерную самоорганизующуюся структуру. В каждом кластере абонентские терминалы одновременно выполняют роль точек доступа и ретрансляторов для переадресации трафика в соседний кластер. Благодаря этому обеспечивается перекрытие отдельных кластеров и, в конечном итоге, – сплошное покрытие в зоне обслуживания mesh-сети.

Вместе с тем, наличие ретрансляции может вызвать задержку при передаче данных в mesh-сети и, как следствие, снижать качество обслуживаемого трафика. В связи с этим при проектировании подобных сетей особое внимание уделяется оценке

их пропускной способности, под которой понимается среднее значение скорости передачи данных на заданных информационных направлениях.

В статье предлагается методический подход к оценке пропускной способности кластерной mesh-сети на основе имитационного моделирования в среде AnyLogic.

2. Методическое обеспечение

Оценка пропускной способности ρ_{ij} mesh-сети на информационном направлении от i-го к j-му абонентскому терминалу проводится путем моделирования процесса передачи сообщений в этом направлении с последующим обобщением результатов передачи согласно выражению:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{L_{ij}^0} \sum_{l=1}^{L_{ij}} s_{ijl} / t_{ijl}, \quad (1)$$

где L_{ij}^0, L_{ij} – общее количество передаваемых и успешно переданных сообщений от i-го к j-му абоненту;

s_{ijl} – объем l-го сообщения, успешно переданного от i-го к j-му абоненту;

t_{ijl} – время передачи l-го сообщения, успешно переданного от i-го к j-му абоненту.

При моделирования процесса передачи сообщений используется объектно-ориентированный подход [1], в соответствии с которым модель mesh-сети представляется в виде совокупности взаимодействующих между собой агентов – абонентских терминалов. Каждый агент реализует необходимый набор функций для моделирования процесса передачи данных и согласно рисунку 1 включает:

- оконечное оборудование, реализующие функции генерации сообщений, их фрагментации и сеансового обслуживания (управления отправкой и получением фрагментов сообщений);
- маршрутизатор, реализующий функции по сегментации фрагментов сообщений, а также по построению матриц маршрутизации и адресации сегментов сообщений;
- радиоблоки, реализующие функции по пакетированию сегментов сообщений, организации доступа к радиоканалам и передаче пакетов сообщений по радиоканалам.

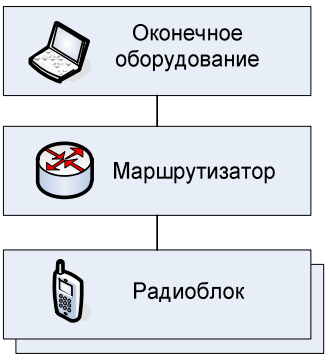
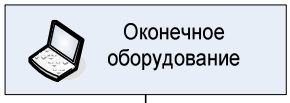


Рис. 1. Состав абонентских терминалов

Взаимодействие агентов при реализации перечисленных функций моделируется на сеансовом, транспортном, сетевом, канальном и физическом уровнях в соответствии с моделью OSI (Open Systems Interconnection, ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99) [2]. При этом с целью оптимизации моделируемого процесса учитываемые уровни взаимодействия ограничены «снизу» по значимости. Зона моделирования, включающая учитываемые значимые уровни взаимодействия агентов, приведена на рисунке 2 (выделена фоном).

Алгоритм взаимодействия агентов на сеансовом, транспортном, сетевом, канальном и физическом уровнях определяется соответствующими протоколами. Перечень моделируемых протоколов с детализацией по уровням модели OSI представлен в таблице 1.

Таблица 1. Моделируемые протоколы

Абонентский терминал	Уровни взаимодействия	Протоколы взаимодействия
	Сеансовый	Wi-Fi
	Транспортный	**UDP (user datagram protocol)** -дейтограммная передача без установления соединения
	Сетевой	**IP (Internet protocol) –** межсетевой протокол протокол без установления соединения **TBRPF (topogy broadcast based on reserved path forwarding) –** протокол проактивной маршрутизации на основе состояния канала
	Канальный	**PAR (position acknowledgement with retransmission) –** положительное подтверждение с повторной передачей **CSMA/CA (carrier-sense multiple access/ collision avoidance) –** множественный конкурентный доступ с контролем несущей и с предотвращением коллизий
	Физический	Wi-Fi



Ф С П - фрагмент, сегмент и пакет передаваемых данных, соответственно

P_{Ax} - порт ОО в составе АТ

IP_{Ax} $IP_{Бx}$ IP_{Px} - IP адреса ОО, маршрутизаторов и радиоблоков

E_{Ax} $E_{Бx}$ E_{Px} - MAC адреса ОО, маршрутизаторов и радиоблоков

Рис. 2. Зона моделирования (выделена фоном)

3. Реализация

Модель mesh-сети реализована в среде имитационного моделирования AnyLogic Professional 7.0.3. Она обеспечивает:

- задание структуры моделируемой системы связи с выделением актуальных информационных направлений;

- ввод исходных данных по каждому абонентскому терминалу (количество передаваемых сообщений и их интенсивность, размер и категория срочности);

- выполнение расчета и выдачу результатов в виде диаграмм, отображающих изменение средней скорости передачи (пропускной способности), среднего времени передачи и вероятности недоведения (потери) сообщений по отдельным информационным направлениям и в системе связи в целом;

- сохранение результатов расчета в файле в формате данных (*.xls).

Основные экранные формы модели представлены на рисунке 3.

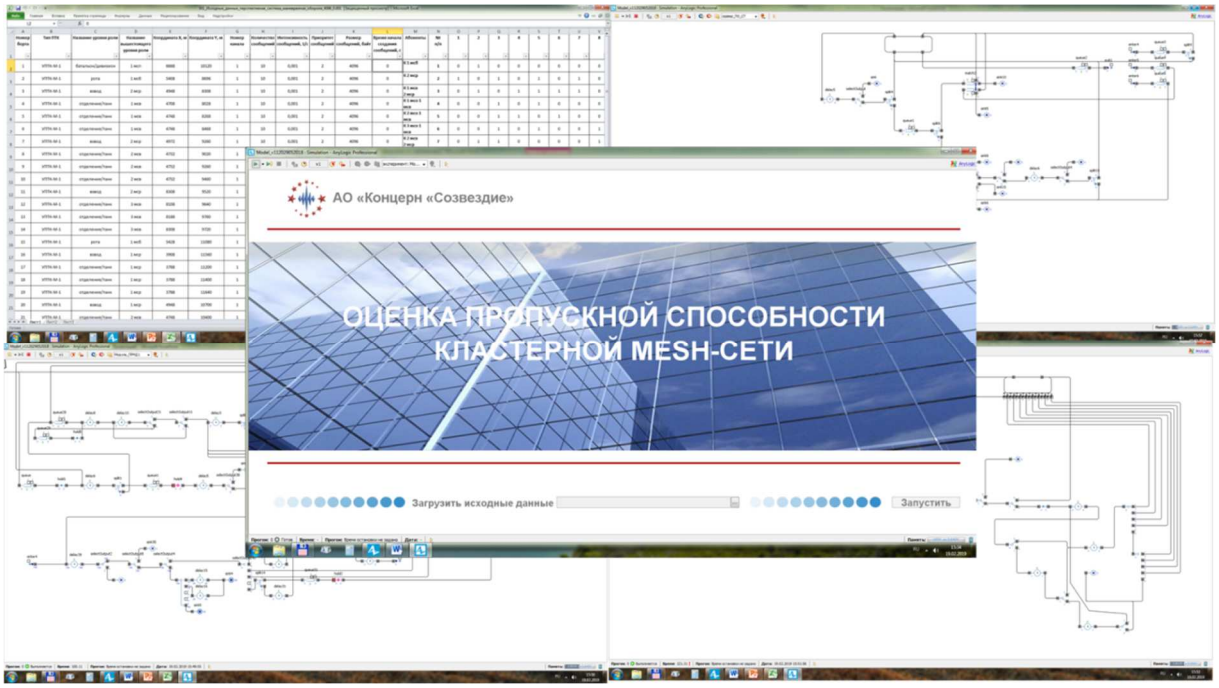


Рис. 3. Основные экранные формы

Комплекс программ, реализующих модель mesh-сети, зарегистрирован в Роспатенте – №№ 2019610006, 2019610050, 2019610051, 2019610432, 2019610434.

4. Апробация

С использованием разработанной модели проведена оценка пропускной способности mesh-сети, структурная схема которой представлена на рисунке 4.

Моделируемая mesh-сеть состоит из 40 территориально распределенных абонентских терминалов, объединенных в 9 кластеров. Результаты моделирования в виде зависимости усредненной по основным информационным направлениям пропускной способности mesh-сети от интенсивности и объема передаваемых сообщений приведены на рисунке 5.

Результаты полученной оценки показывают, что разработанная модель позволяет оценивать пропускную способность кластерных mesh-сетей на заданных информационных направлениях. При этом обеспечивается учет архитектуры mesh-сетей, а также технических решений по их построению на сеансовом, транспортном, сетевом, канальном и физическом уровнях. Указанные обстоятельства подтверждают целесообразность использования разработанной модели при проектировании mesh-сетей в целях анализа их возможностей по передаче планируемого трафика.

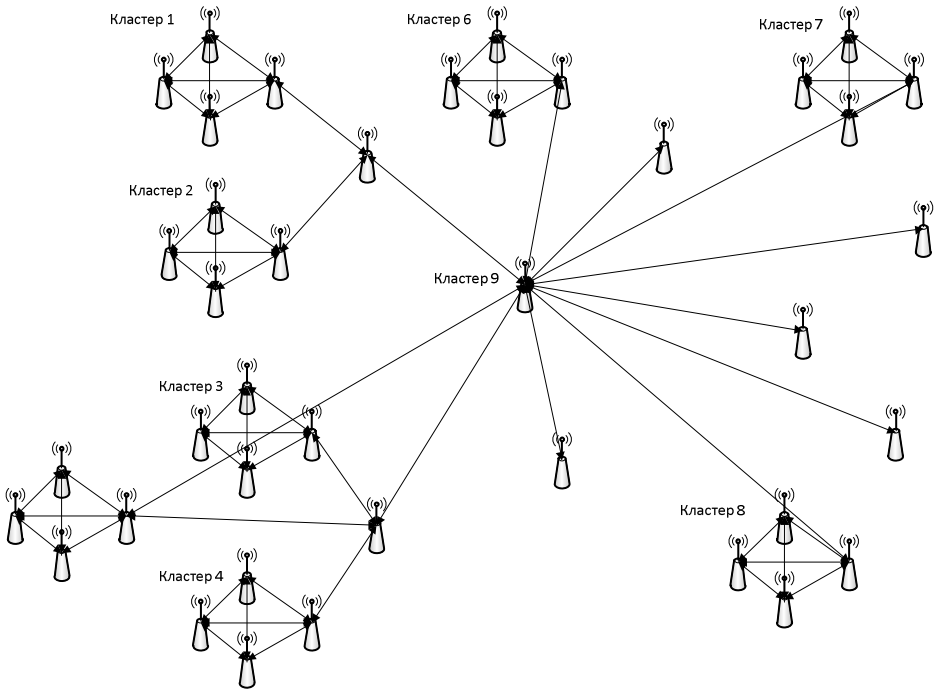


Рис. 4. Моделируемая mesh-сеть

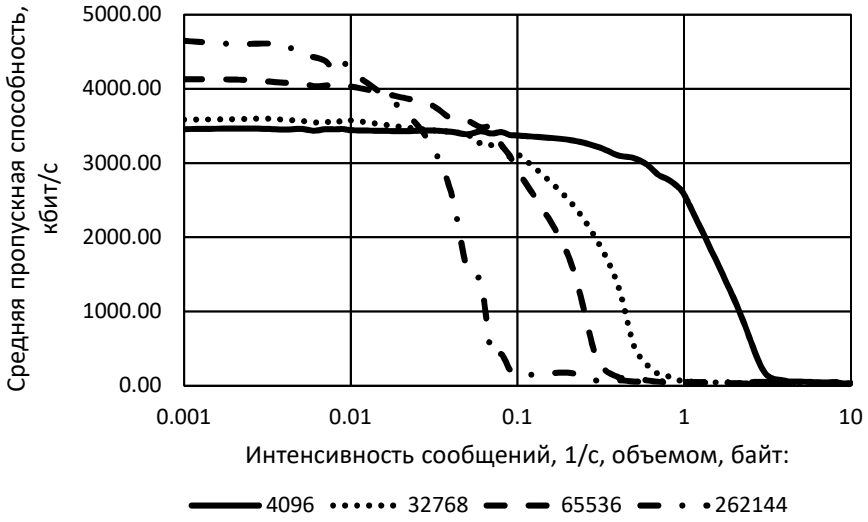


Рис. 5. Средняя пропускная способность на информационных направлениях

5. Заключение

Разработанная на основе объектно-ориентированного (агентного) подхода в среде AnyLogic модель позволяет проводить оценку пропускной способности mesh-сетей на заданных информационных направлениях и может быть использована при проектировании mesh-сетей в интересах анализа качества планируемого к передаче трафика.

Литература

1. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 496 с.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая модель. Часть 1. Базовая модель.– М.: Госстандарт, 2006.

References

1. Katalevsky D.Yu. Fundamentals of simulation and system analysis in management. M .: Publishing house "Delo" RANCHiGS, 2015. - 496 p.
2. GOST R ISO / IEC 7498-1-99. Information technology. The interconnection of open systems. The base model. Part 1. The base model. - M .: Gosstandart, 2006.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ОПЕРАТИВНОСТЬ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ТРАКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

М. В Богатырев, В. П. Пустовит, Ф. П. Астапенко, С. А. Житенев, А. А. Ерыгин

АО «Концерн «Созвездие», Воронеж, Россия

Аннотация. Предлагается методический подход к оценке эффективности АСУ по показателю оперативность, позволяющий учитывать ограниченную пропускную способность и надежность трактов управления. Предлагаемый методический подход основан на представлении реализуемого в АСУ процесса управления в виде сетевой стохастической модели, в которой ограниченная пропускная способность и надежность трактов управления учитываются через увеличение времени решения и доведения частных задач управления. Реализация предлагаемого методического подхода осуществлена в виде программы для ПЭВМ на языке С++ с использованием кроссплатформенной библиотеки Qt. Применение предлагаемого методического подхода обеспечит повышение достоверности оценок эффективности АСУ на различных этапах их жизненного цикла.

Ключевые слова: АСУ; тракт управления; показатель эффективности; оперативность; пропускная способность; надежность.

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS IN TERMS OF EFFICIENCY, TAKING INTO ACCOUNT LIMITED BANDWIDTH AND RELIABILITY OF CONTROL PATHS

M. V. Bogatyrev, V. P. Pustovit, F. P. Astapenko, S. A. Zhitenev, A. A. Erygin,

JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

Abstract. A methodical approach is proposed to assess the effectiveness of the automated control system in terms of efficiency, which allows to take into account the limited capacity and reliability of control paths. The proposed methodological approach is based on the representation of the management process implemented in the automated control systems as a network stochastic model, in which the limited throughput and reliability of the control paths are taken into account by increasing the solution time and bringing private management tasks. The implementation of the proposed methodological approach is implemented as a program for PC in C ++ using the Qt cross-platform library. The application of the proposed methodological approach will increase the reliability of assessments of the effectiveness of automated control systems at various stages of their life cycle.

Keywords: automated control systems; control path; performance indicator; efficiency; bandwidth; reliability.

1. Введение

Оценка эффективности автоматизированных систем управления (АСУ) различного назначения проводится на разных этапах их жизненного цикла – при задании требований на этапе формирования замысла разработки, при выборе вариантов построения в ходе проектирования, при анализе соответствия заданным требованиям на этапах испытания и эксплуатации. При этом важнейшим оцениваемым показателем

эффективности АСУ является показатель оперативности [1], который количественно выражается через вероятность реализации процесса управления за заданное время:

$$P(t < t_0), \tag{1}$$

где t , t_0 – обеспечиваемое системой и заданное время реализации процесса управления, соответственно.

При проведении оценки эффективности АСУ по показателю оперативность, как правило, не учитываются задержки управления, связанные с ограничением пропускной способности и надежности трактов управления. Вместе с тем, для АСУ с жесткими требованиями по оперативности и трактами управления с низкой надежностью и пропускной способностью (тракты управления по радиоканалам), учет указанных факторов является критически важным. Их игнорирование может привести к неоправданному завышению оценок эффективности АСУ, и как следствие, к выбору неоптимальных вариантов их построения.

В статье предлагается методический подход к оценке эффективности АСУ по показателю оперативность, позволяющий учитывать ограниченную пропускную способность и надежность траков управления.

2. Методический подход

Реализуемый в АСУ процесс управления может быть представлен в виде сетевой стохастической модели [2,3], вершины которой соответствуют задачам $\{i\}$, решаемым должностными лицами (ДЛ) в ходе управления, а дуги характеризуют время, затрачиваемое ДЛ на решение задач и на доведение (передачу) их результатов. При этом в силу стохастического характера время, затрачиваемое ДЛ на решение задач и на доведение (передачу) их результатов, задается в виде среднего значения $\{t_{ij}\}$ и среднеквадратического отклонения $\{\sigma_{ij}\}$. В этом случае расчет вероятности (1) сводится к определению «критического» пути на графе сетевой стохастической модели, суммированию парциальных средних значений $\{t_{ij}^*\}$ и квадратов среднеквадратических отклонений $\{\sigma_{ij}^*\}$, лежащих на «критическом» пути, и определению окончательного значения согласно выражению:

$$P(t < t_0) = \int_0^{t_o} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_ц} \cdot \exp\left(-\frac{(t - t_ц)^2}{2\sigma_ц^{\,2}} \right) dt , \tag{2}$$

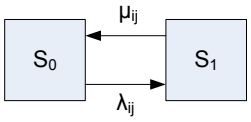
где $t_ц = \sum t_{ij}^*$ – среднее значение длительности процесса управления;

$\sigma_ц = \sqrt{\sum \sigma_{ij}^{*2}}$ – среднеквадратическое отклонение длительности процесса управления;

t_{ij}^*, σ_{ij}^* – среднее значение и среднеквадратическое отклонение времени, затрачиваемого ДЛ на решение i-ой задачи управления и на доведение (передачу) ее

результатов взаимодействующему ДЛ для решения j-ой задачи в пределах «критического» пути.

Влияние ограниченной надежности трактов управления на длительность процесса управления проявляется в увеличении времени решения задач ДЛ и доведения их результатов, что является следствием возникающих в такте управления отказов. Модель отказов тракта управления может быть представлена системой массового обслуживания, показанной на рисунке 1[4].



S_0 – тракт работоспособен, S_1 – тракт неработоспособен

Рис. 1. Модель отказов тракта управления.

В случае простейшего (пуассоновского) потока отказов и восстановления в тракте управления средние значения $\{t_{ij}\}$ и среднеквадратические отклонения $\{\sigma_{ij}\}$ времени решения задач ДЛ и доведения их результатов могут быть представлены в следующем виде:

$$t_{ij} = t_{ij}^0 \left(1 + \lambda_{ij} / \mu_{ij}\right), \tag{3}$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 \left(1 + \lambda_{ij} / \mu_{ij}\right), \tag{4}$$

где t_{ij}^0, σ_{ij}^0 – среднее значение и среднеквадратическое отклонение времени, затрачиваемого ДЛ на решение i-й задачи управления и доведение (передачу) ее результатов взаимодействующему ДЛ для решения j-й задачи управления, в случае отсутствия отказов в тракте управления;

λ_{ij}, μ_{ij} – интенсивности отказов и восстановления тракта управления, задействованного при решении ДЛ i-й задачи управления и доведении (передачи) ее результатов взаимодействующему ДЛ для решения j-й задачи управления.

Согласно (3)-(4) увеличение средних значений $\{t_{ij}\}$ и среднеквадратических отклонений $\{\sigma_{ij}\}$ времени решения задач ДЛ и доведения их результатов в условиях ограниченной надежности трактов управления определяется отношением интенсивностей отказов и восстановления в трактах управления $\{\lambda_{ij}/\mu_{ij}\}$. По величине указанного отношения все отказы в каналах управления могут быть условно разделены на следующие группы:

- технические отказы, $\lambda_{ij}/\mu_{ij} \approx 10^{-5}...10^{-3}$;

- сбои программного обеспечения, $\lambda_{ij}/\mu_{ij} \approx 10^{-3}...10^{-2}$;

- отказы вследствие воздействия радиопомех, $\lambda_{ij}/\mu_{ij} \approx 10^{-2}...10^{-1}$.

Последняя группа отказов (отказы вследствие воздействия радиопомех) характеризуются наибольшим значением отношения интенсивностей отказов и восстановления в каналах управления. При их возникновении возможно возрастание до

нескольких раз как парциальных значений времени, затрачиваемого ДЛ на решение задач управления и на доведение (передачу) их результатов в каналах управления, так и длительностей процессов управления в целом. Следовательно, при оценке эффективности именно отказы этой группы требуют первоочередного учета.

Средние значения $\{t_{ij}^0\}$ и среднеквадратические отклонения $\{\sigma_{ij}^0\}$ времени решения ДЛ задач управления и доведения их результатов в случае отсутствия отказов в тракте управления могут быть рассчитаны:

$$t_{ij}^0 = t_i^з + t_{ij}^n, \tag{5}$$

$$\sigma_{ij}^0 = \sqrt{(\sigma_i^з)^2 + (\sigma_{ij}^n)^2}, \tag{6}$$

где $t_i^з$, $\sigma_i^з$ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение времени, затрачиваемого ДЛ на решение i-й задачи в случае отсутствия отказов в тракте управления;

t_{ij}^n, σ_{ij}^n – среднее значение и среднеквадратическое отклонение времени, затрачиваемого ДЛ на доведение (передачу) результатов решения i-й задачи взаимодействующему ДЛ для решения j-й задачи в случае отсутствия отказов в тракте управления.

Время, затрачиваемое ДЛ на доведение (передачу) результатов решения задач управления, будет определяться отношением объема передаваемых данных к пропускной способности канала передачи. В случае, если объем передаваемых данных и пропускная способность канала передачи случайны и подчинены равномерному закону, среднее значение и среднеквадратическое отклонение времени, затрачиваемого ДЛ на доведение (передачу) результатов решения задач управления, могут быть рассчитаны:

$$t_{ij}^n = \frac{1}{2} \cdot \frac{\nu_{ij}^{\max} + \nu_{ij}^{\min}}{\rho_{ij}^{\max} - \rho_{ij}^{\min}} \cdot \ln \frac{\rho_{ij}^{\max}}{\rho_{ij}^{\min}}, \tag{7}$$

$$\sigma_{ij}^n = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{(\nu_{ij}^{\min})^2 + \nu_{ij}^{\min}\nu_{ij}^{\max} + (\nu_{ij}^{\max})^2}{\rho_{ij}^{\min}\rho_{ij}^{\max}} - (t_{ij}^n)^2}, \tag{8}$$

где $\nu_{ij}^{\max}, \nu_{ij}^{\min}$ – верхняя и нижняя границы изменения объема данных, передаваемых от ДЛ при решении i-й задачи управления в адрес взаимодействующего ДЛ для решения j-й задачи управления;

$\rho_{ij}^{\max}, \rho_{ij}^{\min}$ – верхняя и нижняя границы изменения пропускной способности канала при передаче результатов решения ДЛ i-й задачи управления в адрес взаимодействующего ДЛ для решения j-й задачи управления.

Таким образом, предложенный подход позволяет проводить оценку эффективности АСУ ТЗ по показателю оперативность, выражаемому через вероятность реализации процесса управления за заданное время, с учетом ограниченной пропускной способности и надежности трактов управления. При этом учет ограниченной пропускной способности и надежности трактов управления обеспечивается:

- в части пропускной способности трактов управления – через изменение среднего значения и среднеквадратического отклонения времени, затрачиваемого ДЛ на доведение (передачу) результатов решения задач управления согласно (7)-(8);

- в части надежности трактов управления – через изменение среднего значения $\{t_{ij}\}$ и среднеквадратические отклонения $\{\sigma_{ij}\}$ времени решения задач ДЛ и доведения их результатов согласно (3)-(4).

3. Реализация

Предложенный методический подход к оценке эффективности АСУ по показателю оперативность реализован в виде программы для ПЭВМ. Программа написана на языке C++ с использованием кроссплатформенной библиотеки Qt и ориентирована на применение в операционной системе Windows 7.0 и выше. Основные экранные формы программы представлены на рисунке 2.

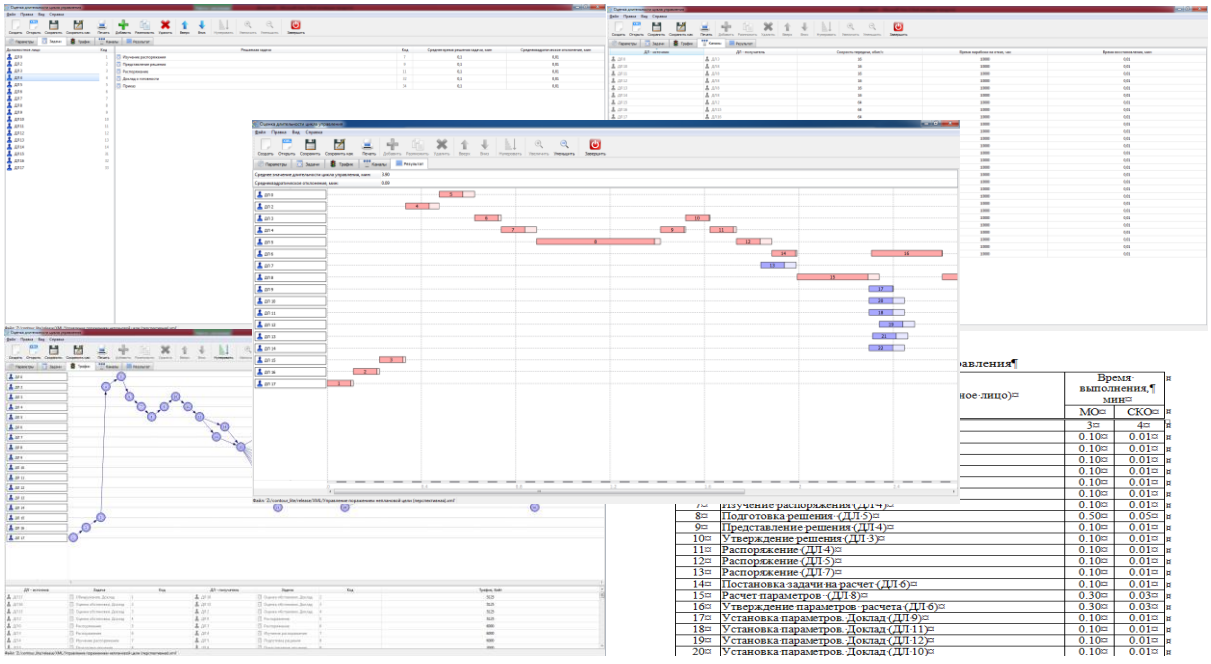


Рис.2.Основные экранные формы программы

В программе применен сценарный подход, в соответствии с которым исходные данные и результаты оценки по каждому процессу (контуру) управления объединены в отдельный сценарий. Программа обеспечивает:

- задание наименования и времени создания сценария;

- ввод данных по оцениваемому процессу управления в объеме: перечней задействованных в процессе ДЛ; решаемых ДЛ задач с указанием их продолжительности и объема передаваемых данных; пропускной способности радиоканалов между ДЛ;

- выполнение расчета и выдачу результатов в виде: временной диаграммы решения ДЛ отдельных задач и передачи их результатов в процессе управления (диаграммы Ганта); общей длительности процесса управления;

- сохранение сценария в файле в формате данных с расширяемым языком разметки (xml).

Программа зарегистрирована в Роспатенте – свидетельство о регистрации №2019610211 от 09 января 2019 года.

4. Заключение

Разработанный методический подход позволяет проводить оценку эффективности АСУ различного назначения по показателю оперативность с учетом ограниченной пропускной способности и надежности трактов управления. Его применение обеспечит повышение достоверности оценок эффективности АСУ на различных этапах их жизненного цикла.

Литература

1. ГОСТ 24.702-85.Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Эффективность автоматизированных систем управления. Общие положения.–
2. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: Монография / Д.И. Голенко-Гинзбург. – Воронеж: «Научная книга», 2010. – 284 с.
3. Филлипс Д. Методы анализа сетей: Пер. с англ. / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т./Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1988. Том 3. Эффективность технических систем/Под общ. Ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова – 328 с.

References

1. GOST 24.702-85. Unified system of standards for automated control systems. The effectiveness of automated control systems. General provisions.–
2. Golenko-Ginzburg D.I. Stochastic network models of planning and development management: Monograph / D.I. Golenko-Ginzburg. - Voronezh: “Scientific book”, 2010. - 284 p.
3. Phillips D. Methods of network analysis: Trans. from English / D. Phillips, A. Garcia-Diaz. - M .: Mir, 1984. - 496 p.
4. Reliability and efficiency in technology: a Handbook of 10 tons. / Ed. Council: V.S. Avduevsky (previous) and others. M .: Mashinostroenie, 1988. Volume 3. Efficiency of technical systems / Under total. Ed. V.F. Utkina, Yu.V. Kryuchkov - 328 p.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАССАЖИРОВ НА БАЗЕ АЛГОРИТМА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ КОГНИТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

А. А. Гладких[1], Ан. К. Волков[1], Ал. К. Волков[1]

[1]Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева (ФГБОУ ВО УИ ГА), Ульяновск, Россия

Аннотация. В работе описана новая концепция организации пассажиропотоков в аэропортах на основе цифровой идентификации личности. Представлены основные компоненты данной концепции. Выявлены ее основные преимущества и недостатки. Основным недостатком является фактор изменчивости биометрических характеристик, который может породить возникновение ошибок в процедуре идентификации личности. Предложен новый подход к повышение надежности функционирования систем цифровой идентификации пассажиров на базе алгоритма помехоустойчивого кодирования с элементами когнитивной обработки данных. Алгоритм включает в себя использование недвоичных кодов Рида-Соломона, с одновременной интеграцией в модель перестановочного декодера когнитивной карты. Предложенный алгоритм позволяет получать значительный выигрыш в ускорении вычислений за счет исключения арифметических действий в процедуре поиска эквивалентного кода.

Ключевые слова: биометрическая информация, цифровая идентификация, помехоустойчивое кодирование, недвоичные коды Рида-Соломона, когнитивная карта.

IMPROVING THE RELIABILITY OF FUNCTIONING OF DIGITAL IDENTIFICATION SYSTEMS OF PASSENGERS ON THE BASIS OF THE ALGORITHM OF NOISING STABLE CODING WITH ELEMENTS OF COGNITIVE DATA PROCESSINGA

A. A. Gladkih[1], An. K. Volkov[1], Al. K. Volkov[1]

[1]Ulyanovsk Civil Aviation Institute (UCAI), Ulyanovsk, Russian Federation

Abstract. The paper describes a new concept of organizing passenger traffic at airports based on digital identification. Presents the main components of this concept. Revealed its main advantages and disadvantages. The main disadvantage is the variability factor of biometric characteristics, which can cause the occurrence of errors in the procedure of identification. A new approach is proposed to improve the reliability of the operation of digital passenger identification systems based on a noise-resistant coding algorithm with elements of cognitive data processing. The algorithm involves the use of non-binary Reed-Solomon codes, with simultaneous integration of a cognitive map permutation decoder into the model. The proposed algorithm allows to obtain a significant gain in speeding up the calculations by eliminating arithmetic operations in the search procedure for the equivalent code.

Keywords: biometric information, digital identification, error-correcting coding, non-binary Reed-Solomon codes, cognitive card.

1. Введение

Совершенствование организации пассажиропотоков на уровне авиакомпаний и аэропортов тесно связано с внедрением комплексных автоматизированных решений на

базе новой концепции цифровой идентификации авиапассажиров по биометрическим параметрам: лицевому изображению, голосу, отпечаткам пальцев и др. Основные преимущества применения предлагаемой концепции заключаются в следующем: повышение пропускной способности точек контроля, сокращение количества обслуживающего персонала, повышение эффективности обеспечения авиационной безопасности. Идентификационное устройство (терминал) состоит из специального сканера, считывающего те или иные биометрические параметры пассажира и метода сравнительного анализа, полученных параметров с достоверным шаблоном [1]. Терминал самообслуживания представляет собой терминал для регистрации пассажиров, использование которого устраняет необходимость в наземном обслуживающем персонале. Если раньше авиакомпании были вынуждены иметь специальные стойки с персоналам, текущие технологии позволяют обслуживать заявки на регистрацию для нескольких авиакомпаний. Использование данных терминалов способствует как рациональному использованию пространства аэровокзала, так и снижению финансовых расходов. По результатам проверки личности пассажира формируется его цифровой проездной документ, который после сдачи багажа дополняется данной информацией. В совокупности с терминалом «быстрого выхода на посадку», автоматизировано проверяющим посадочный талон, пассажир самостоятельно садится на борт воздушного судна. В данном случае персонал службы досмотра не акцентирует свое внимание на пассажирах, успешно прошедших все этапы идентификации личности, что позволяет в большей мере уделить внимание высокорисковым пассажирам. Одним из важных недостатков предлагаемой концепции является то, что извлекаемые биометрические параметры по ряду причин не идентичны при каждой процедуре взятия образца. Большинство регистрируемых параметров стабильны, но некоторые подвержены определенным изменениям по причине возраста и других факторов. Это может породить возникновение ошибок в идентификации. По этой причине использование алгоритмов помехоустойчивого кодирования является лучшим способом исправления незначительных изменений и ошибок. Требования по высокой скорости обработки информации в таких системах не позволяют использовать длинные избыточные коды [2,3]. Некоторые результаты применения алгоритмов помехоустойчивого кодирования в системах цифровой идентификации отражены в работах [4-7]. При этом в предыдущих исследованиях отсутствовали научно обоснованные подходы к организации помехоустойчивого кодирования в системах обмена данными с применением когнитивных принципов. Указанные положения, позволяют обосновать актуальность выбранной темы.

2. Методы исследования

Предлагаемая концепция когнитивной обработки биометрических данных в системе перестановочного декодирования (ПД) заключается в том, что часть надёжных символов кодового слова длины n переставляются на место k информационных разрядов, где $n<k$, и эти разряды кодируются эквивалентным кодом [8]. Данная процедура осуществляешься в приемнике. Поскольку данные такого кода не

передаются по телекоммуникационным системам с высоким уровнем помех, то вероятность ошибочного декодирования эквивалентного кода оказывается на уровне внутренних сбоев вычислительной системы приемника. Главным препятствием на пути реализации указанного метода является сложная процедура получения порождающих матриц эквивалентных кодов, которая должна проводиться для каждой уникальной перестановки символов, каждого кодового вектора [8]. Число перестановок для кода длины n оценивается как $n!$.

В предлагаемом методе ПД защиты данных от ошибок предлагается использовать недвоичные коды Рида-Соломона (РС), как наиболее приспособленные для защиты оцифрованных изображений. Суть когнитивного подхода проста: если декодер вычислил хотя бы один раз некоторую порождающую матрицу эквивалентного кода, то она заносится в когнитивную карту (КК) декодера и при повторении подобной перестановки из карты извлекается готовый результат. Этот прием позволяет избежать сложных повторяющихся вычислений и решить задачу поддержания высокой скорости обработки данных сервером. На примере кода РС (7,3,5) можно показать, что предложенный метод обладает рядом свойств, позволяющих снизить объем памяти КК, что важно для кодов большой длины, например, для двоичных полей Галуа восьмой степени расширения.

3. Результаты интеграции когнитивной карты в перестановочный декодер

Пусть в системе обмена данными используется недвоичный код РС с параметрами (7,3,5). Порождающая матрица G этого кода в систематической форме имеет вид, и столбцы матрицы нумеруются обычным образом слева направо

$$G = \begin{Vmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{Vmatrix}, \qquad (1)$$

здесь и далее α – примитивный элемент поля $GF(2^3)$.

Пусть надежными символами в некотором принятом кодовом векторе кода РС будут символы с номерами (2 4 5), а менее надежные символы в порядке убывания значений $K_{пр}$ располагаются в последовательности вида (6 7 1 3). Тогда из выражения (1) следует

$$G_{\text{пер}} = \begin{Vmatrix} 0 & \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 0 \\ \alpha^0 & \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^6 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & 0 & \alpha^0 \end{Vmatrix}. \qquad (2)$$

Задача заключается в том, чтобы матрицу (2) перевести в систематическую форму. Принципиально для этого используются классические методы матричных вычислений известные как линейные преобразования. Обозначим подобную процедуру через выражение вида $G_{\text{пер}} \Rightarrow G_{пер}^{сис}$. Тогда

$$G_{пер} \Rightarrow G_{пер}^{сис} = \begin{Vmatrix} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \end{Vmatrix}. \qquad (3)$$

В ходе оперативной обработки данных сочетание надежных символов кодовой комбинации вида (2 4 5) с высокой долей вероятности может повторяться. Для экономии в будущем вычислительного ресурса декодера целесообразно сохранить этот результат в памяти и использовать его при возможных перестановках с номерами (2 4 5). Матрица, представленная на рисунке 1, со строго возрастающей последовательностью номеров строк называется канонической, и сама матрица является эталонной.

$$\begin{array}{ccccc} \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^2 & 2 \\ \alpha^3 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^1 & 4 \\ \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & 5 \\ 6 & 7 & 1 & 3 & \end{array}$$

Рис. 1. Структура эталонной матрицы в каноническом виде по системе надежных символов.

Следуя принципам когнитивной обработки данных, декодер, получив, например, кортеж значений $K_{пр}$ в виде (5 2 4) для первых k надежных символов принятой комбинации и оставшихся $(n-k)$ менее надежных символов в виде (3 7 1 6), формирует матрицу $G_{пер}$ исходя из структуры эталонной матрицы, как показано ниже

$$G_{\text{пер}} \Rightarrow G_{пер}^{сис} = \left\| \begin{array}{ccccccc} \alpha^0 & 0 & 0 & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 \\ 0 & \alpha^0 & 0 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^6 & \alpha^6 \\ 0 & 0 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^3 \end{array} \right\|. \qquad (4)$$

В ходе исследований установлено, что при сохранении номеров позиций в перестановках k надежных и $(n-k)$ ненадежных символов следует на первом шаге переставлять строки матрицы (4), а на втором шаге – столбцы этой новой матрицы.

Перестановочное декодирование таких кодов приводит к снижению вычислительной сложности декодера за счет образования константных структур в вычислительном процессе декодирования, характерных для всего цикла работы устройства. Применение когнитивных процедур дает дополнительный выигрыш в процедуре минимизации вычислительной сложности. Проведенными исследованиями установлено, что свойство цикличности кодовых комбинаций позволяет в n раз уменьшить требования к объему памяти декодера. Например, для кода РС (7,3,5) вместо 35 эталонных матриц необходимо будет использовать только 5. Пусть сортировка надежных символов привела к последовательности (6 2 7) и некоторой последовательности ненадежных символов вида (3 5 1 4). Канонический вид первой последовательности дает (2 6 7). Становится ясно, что следует обрабатывать эталонную матрицу с нумерацией строк (6 7 2) и нумерацией столбцов (1 3 4 5) и последующей их перестановкой.

$$G_{сис}^{672} = \begin{array}{ccccc} \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^0 & 6 \\ \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^0 & 7 \\ \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 2 \\ 1 & 3 & 4 & 5 & \end{array} \Rightarrow \begin{array}{ccccc} \alpha^1 & \alpha^3 & \alpha^1 & \alpha^0 & 6 \\ \alpha^4 & \alpha^4 & \alpha^5 & \alpha^0 & 2 \\ \alpha^6 & \alpha^2 & \alpha^2 & \alpha^0 & 7 \\ 1 & 3 & 4 & 5 & \end{array} \Rightarrow \begin{array}{ccccc} \alpha^3 & \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^1 & 6 \\ \alpha^4 & \alpha^0 & \alpha^4 & \alpha^5 & 2 \\ \alpha^2 & \alpha^0 & \alpha^6 & \alpha^2 & 7 \\ 3 & 5 & 5 & 1 & \end{array}.$$

Таблица 1. Результаты вычисления матрицы эквивалентного кода

Классический подход			
PC (7, 3, 5)	*PC* (15, 5, 11)	*PC* (15, 9, 7)	*PC* (15, 13, 3)
336	2410	2912994	68584334026
$6720*10^{-9}$ с	$48200*10^{-9}$ с	$58259880*10^{-9}$ с	$1371686680520*10^{-9}$ с
Число операций при реализации предлагаемого метода			
(3+4) 7	(5+10) 15	(9+6) 15	(13+2) 15
$140*10^{-9}$ с	$300*10^{-9}$ с	$300*10^{-9}$ с	$300*10^{-9}$ с
Выигрыш в 48 раз	Выигрыш в $1.6*10^{2}$ раза	Выигрыш в $1.9*10^{6}$ раза	Выигрыш в $4.6*10^{9}$ раза

Применение принципов когнитивной обработки данных в декодере недвоичного кода обеспечивает снижение сложности реализации процедуры декодирования за счет использования системы быстрых матричных преобразований (БМП), не требующих арифметических действий.

Согласно таблице 1 при использовании предложенного метода достигается значительный выигрыш в ускорении вычислений за счет исключения арифметических действий в процедуре поиска эквивалентного кода по классическому сценарию и замены ее при работе декодера тривиальной сортировкой строк и столбцов эталлоной матрицы, извлекаемой из памяти КК, в соотвествии с перестановками надежных и ненадежных символов кодового вектора.

Таблица 2 показывает возможность хранения данных эталонных матриц когнитивной карты в оперативной памяти типовых программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Это позволяет поддержать высокие темпы обработки данных приемником, поскольку нет необходимости затрачивать временной ресурс для обращения к внешней памяти процесса приемника.

Таблица 2. Возможность реализации когнитивной карты декодера

Коды	Система полного множества матриц	Система (БМП) система эталонных матриц	Система на базе циклических свойств эталонных матриц
PC (7,3,5)	$V_{kk} << 1\%\,(9*10^{-4})$ Мбайт	$V_{kk} << 1\%\,(1.5*10^{-4})$ Мбайт	$V_{kk} << 1\%\,(2.1*10^{-5})$ Мбайт
PC (15,11,5)	5715950 %	1,5 %	0,1 %
PC (15,7,9)	43300 %	8,6 %	0,5 %

4. Заключение

В данной работе описана новая концепция организации пассажиропотоков в аэропортах на основе цифровой идентификации личности и представлены ее основные

компоненты. Выявлены преимущества и недостатки данной концепции. Основным недостатком является фактор изменчивости биометрических характеристик, который может породить возникновение ошибок в процедуре идентификации личности. Предложен новый подход к повышение надежности функционирования систем цифровой идентификации пассажиров на базе алгоритма помехоустойчивого кодирования с элементами когнитивной обработки данных. Алгоритм включает в себя использование недвоичных кодов Рида-Соломона, с одновременной интеграцией в модель перестановочного декодера когнитивной карты. Предложенный алгоритм позволяет получать значительный выигрыш в ускорении вычислений за счет исключения арифметических действий в процедуре поиска эквивалентного кода.

Литература

1. Тюкалова Н. М., Разувакин А. А. Современная концепция цифровой идентификации авиапассажиров. // Научный вестник МГТУ ГА, 2018, № 21 (04). – С. 39-47.
2. Гладких А. А., Ал-Тамими Т. Ф. Х. Концепция когнитивной обработки данных в системе перестановочного декодирования недвоичного избыточного кода. // Электросвязь, 2018, № 9. – С. 69-74.
3. Gladkikh A. A, Mishin D. V., Chilikhin N. Y. Improving efficiency of fiber optic communication systems with the use of lexicographic decoding of polar codes. Proceedings of SPIE. Optical Technologies for Telecommunications, 2018, Vol. 10744. pp. 1-15.
4. Hao F., Anderson R., Daugman J. Combining Crypto with biometrics effectively. IEEE Transactions on Computers, 2006, Vol. 55, No. 9. pp. 1081-1088.
5. Alawi A. Al-Saggaf. Secure Method for Combining Cryptography with Iris Biometrics. Journal of Universal Computer Science, 2018, Vol. 24, No. 4. pp. 341-356.
6. Peng L., Xin Y., Hua Q., Kai C., Eryun L., Jie T. An effective biometric cryptosystem combining fingerprints with error correction codes. Expert Systems with Applications, 2012, Vol. 39. pp. 6562–6574.
7. Haitham W., Abdel-Moneim W., Aliaa A. A. Y. Cryptosystem from multiple biometric modalities. European Scientific Journal, 2013, Vol. 9, No. 30. pp. 242-256.
8. Carrasco R. A., Johnston M. Non-binary error control coding for wireless communication and data storage. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 322 p.

References

1. Tyukalova, N. M., Razuvakin, A. A. The modern concept of digital identification of air passengers. // Scientific Bulletin of MSTU GA, 2018, Vol. 21, No. 4. - Pp. 39-47.
2. Gladkih, A. A., Al-Tamimi, T. F. H. The concept of cognitive data processing in a permutation decoding system of a non-binary redundant code. // Telecommunication, 2018, Vol. 9. - Pp. 69-74.
3. Gladkikh A. A, Mishin D. V., Chilikhin N. Y. Improving efficiency of fiber optic communication systems with the use of lexicographic decoding of polar codes. Proceedings of SPIE. Optical Technologies for Telecommunications, 2018, Vol. 10744. pp. 1-15.
4. Hao F., Anderson R., Daugman J. Combining Crypto with biometrics effectively. IEEE Transactions on Computers, 2006, Vol. 55, No. 9. pp. 1081-1088.
5. Alawi A. Al-Saggaf. Secure Method for Combining Cryptography with Iris Biometrics. Journal of Universal Computer Science, 2018, Vol. 24, No. 4. pp. 341-356.
6. Peng L., Xin Y., Hua Q., Kai C., Eryun L., Jie T. An effective biometric cryptosystem combining fingerprints with error correction codes. Expert Systems with Applications, 2012, Vol. 39. pp. 6562–6574.
7. Haitham W., Abdel-Moneim W., Aliaa A. A. Y. Cryptosystem from multiple biometric modalities. European Scientific Journal, 2013, Vol. 9, No. 30. pp. 242-256.
8. Carrasco R. A., Johnston M. Non-binary error control coding for wireless communication and data storage. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 322 p.

ПОДХОДЫ К МАШИННОМУ ОБУЧЕНИЮ В КОГНИТИВНОМ РАДИО

Е. А. Балашова[1], С. В. Карамов[1]

[1]Целевая поисковая лаборатория прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований, Воронеж, Россия

Аннотация. Радиостанции, способные воспринимать частично занятое пространство сигналов, определять альтернативы сосуществования сигналов в нем, мультиплексироваться с использованием частотного, кодового или временного разделения, использовать методы многопользовательского обнаружения с целью максимального использования этого пространства называются когнитивными. Для определения незанятого пространства сигналов целесообразно использование машинного обучения. В работе рассмотрены основные принципы обучения когнитивного радио, показано, что перспективным является обучение с помощью искусственных нейронных сетей, представлены примеры обучения.

Ключевые слова: когнитивное радио, нейронные сети, машинное обучение.

APPROACHES TO MACHINE LEARNING IN COGNITIVE RADIO

E. A. Balashova [1], S. V. Karamov [1]

[1]Target Search Lab of Groundbreaking Radio Communication Technologies of Advanced Research Foundation, Voronezh, Russia

Abstract. Radio stations capable of perceiving partially occupied signal space, defining alternatives for coexisting signals in it, multiplexed using frequency, code or time division, use multi-user detection methods to maximize the use of this space are called cognitive. To determine the unoccupied space of signals, the use of machine learning is required. The paper discusses the basic principles of learning cognitive radio, it is shown that promising is learning using artificial neural networks, presents examples of learning.

Keywords: cognitive radio, neural networks, machine learning.

1. Введение

С появлением технологии программно-определяемых радиостанций стало возможным изменение в реальном времени типа модуляции, частоты и времени передачи, гарантируя отсутствие помех для существующих сигналов. Это позволяет реализовать все больше услуг связи, использующих выделенный частотный спектральный диапазон без вмешательства одних служб в другие.

Когнитивные радиостанции [4, 7, 8] используют программно-определяемые радиоплатформы и анализируют радиоэфир ("радиосцену"), обнаруживая «дыры» в спектре (белое пространство), в котором сигналы могут передаваться без помех для других. Кроме белого (полностью не занятого) пространства в спектре существуют черные и серые пространства [1]. Черное - это пространство, которое вообще нельзя использовать, так как места для другого сигнала нет, и передача сигнала приведет к подавлению всех сигналов в этом пространстве. Серым называют частично занятое пространство сигналов, в котором возможна передача большего количества сигналов. Концепция серого пространства подразумевает, что данное пространство сигналов - это

не просто спектр, а некое многомерное пространство, включающее время, частоту, код и местоположение.

Целью когнитивной радиосвязи является определение пространства сигналов и эффективное использование ресурсов для обеспечения надежной, незапланированной и бесструктурной связи. На основе анализа пространства сигналов осуществляется предсказание будущего поведения сигналов в нем и разделение окружающей среды на будущее белое и серое пространство. Затем выполнятся передача сигналов в незанятой части спектра. Причем передача сигнала не ограничивается белым или серым пространством в спектре, возможно использование частично занятого пространства. Кроме эффективного использования пространства сигналов когнитивная радиостанция может быть использована для подавления помех [1]. В этом случае пространство сигналов анализируется таким образом, что с учетом характера и прогнозируемой природы обнаруживаемых сигналов можно создавать сигналы помех, которые потребляют минимальное количество энергии и ресурсов.

2. Принципы обучения когнитивного радио

Работа системы может быть проиллюстрирована рисунком 1. Входной сигнал поступает на модуль подавления помех и выделения сигнала. У отфильтрованного сигнала оцениваются значения характеристик в модуле извлечения признаков и поступают в подсистему классификации сигналов, позволяющую определить где имеет место серое пространство. Установленный тип сигнала используется для расчета и применения ограничительных политик функционирования когнитивной радиостанции и параметров передачи. Для надежной классификации сигналов и прогнозирования серого пространства (анализа ширины полосы, времени и т.п.) требуется машинное обучение.

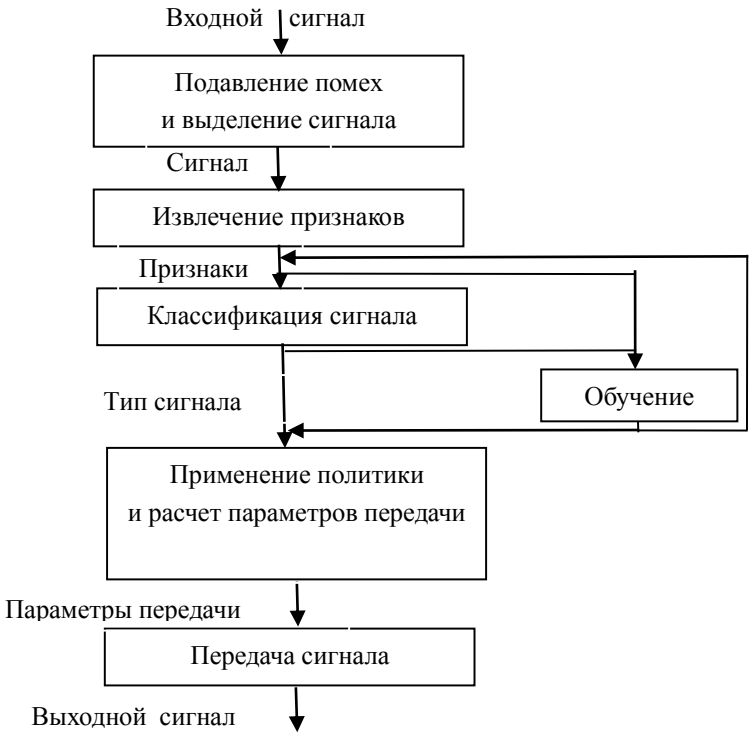


Рис. 1. Принцип работы когнитивного радио

Цикл работы когнитивного радио, состоит из следующих этапов [4, 7, 8].

1) Наблюдение. Осуществляются измерение и накапливание входных информационных потоков из пользовательского домена, домена радиосвязи, домена политики и самого радио. Информация о области применения и сетевых потребностях является пользовательской. Данные об окружающей среде и радиочастотах (например, источники распространения или помех), которые могут повлиять на производительность системы, относятся к информации домена радиосвязи. Информация о политике используется для принятия решения.

2) Ориентация. Оценивается значимость наблюдения на основе сравнения имеющихся данных (опыта работы) с вновь полученными. Если существует точное соответствие между текущей информацией и предшествующим опытом система повторяет однажды сделанный ею вывод и применяет предшествующий опыт к текущей ситуации, иначе требуется фаза планирования задачи.

3) Планирование. Если анализ входной информации не может оперативно выдать выработанное на основе предыдущего опыта решение, требуется генерация плана обработки, включающего в себя временной аспект. Инструменты планирования позволяют предложить альтернативы поведения когнитивного радио на основании полученной входной информации, правил и ранее изученных пользовательских предпочтений.

4) Решение. Выбирает решения из альтернатив, полученных на этапе планирования с целью повышения эффективности работы;

5) Действие. Включает как действия по отношению к внешней среде, так и изменения внутреннего состояния. Внешне ориентированные действия - настройка параметров и передача сигнала в соответствии с принятым решением и политикой передачи. Внутренне ориентированные действия включают в себя добавление новых и изменение существующих моделей поведения, политик передачи и т.п. Изменения внутреннего состояния тесно связано с обучением.

6) Обучение. Выполнятся анализ влияния принимаемых решений на степень достижения поставленных целей, на основании которого производится перенастройка алгоритма принятия решений. Обучение также происходит путем добавления к существующим моделям новых, связанных с конкретными случаями.

Алгоритм обучения предназначен для наблюдения за изменением состояния радиосистемы в результате предпринятых действий, сравнения наблюдаемого состояния с ожидаемым состоянием и изменения базы знаний с целью отражения успеха (или неудачи) выбранного действия. Изменение базы знаний может принимать различные формы, от изменения существующих знаний до создания новых знаний, которые будут применяться в последующих действиях.

Представление знаний в базе зависит как от их типа, так и от выбранного механизма рассуждения, определяющего процесс обучения системы. Чаще всего знания выражаются либо в декларативной, либо в поведенческой форме [4]. Декларативная форма утверждает описательные фактические знания об объекте, например, описание свойств радио и связей между ними. Знания о поведении связаны с влиянием действий

радиостанции на систему знаний. Действия могут быть инициированы внутренними процессами в системе, или внешними событиями, изменяющими среду. При этом фиксируется начальное состояние до выполнения действия, конечное состояние по завершении действия и время действия.

Декларативная форма использует символическое представление на языках программирования высокого уровня (C++, Java и т.п.). Описательная информация образует символ или единицу знаний (свойства объекта или связь между объектами).

В поведенческой форме представления знания организованы в онтологию для поддержки рассуждений и обучения [5, 16, 17], образуя иерархию классов. При возникновении новых ситуаций ищется подходящая для них классификация среди существующих онтологий знаний. Обучение в системе (расширение набора знаний), осуществляется путем классификации новых знаний и включения их в существующие онтологии на основе сходства. Алгоритм обучения должен отслеживать результаты действий системы и усиливать решения, ведущие к достижению цели. Поведенческие системы для образования онтологий могут использовать как знания о текущей ситуации (обстоятельствах) (рисунок 2), так и знания в виде набора правил (рисунок 3).

Системы, принимающие решение на основе обстоятельств (рисунок 2), основаны на следующем принципе. Когда существует высокая степень сходства между текущей ситуацией и предшествующим опытом в памяти, ранее предпринятые действия обычно могут быть применены к текущей ситуации. Если сходство с предшествующим опытом частичное, может быть применимо только некоторое модифицированное подмножество предыдущих действий.

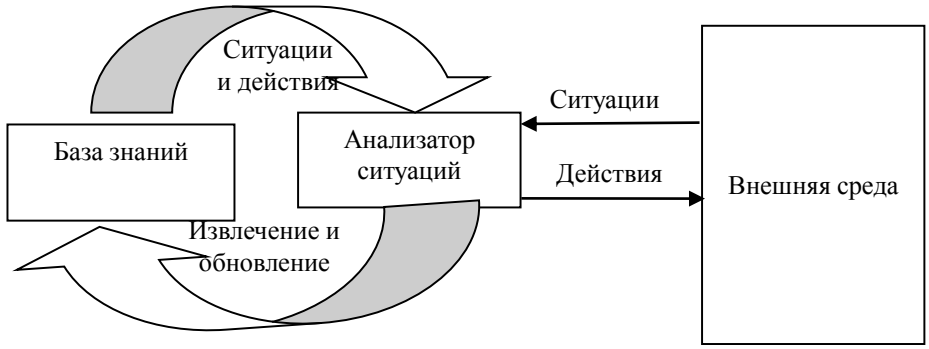


Рис. 2. Принцип работы систем на основе анализа текущей ситуации

Процесс сравнения текущих ситуаций с предыдущим опытом для принятия решения [10] состоит из следующих этапов

1. Классификация текущего состояния

2. Сравнение текущего состояния с предыдущим опытом (набором аналогичных сохраненных состояний).

3. Применение к текущей ситуации ранее предпринятых для наиболее похожих случаев действий. Выработка новых решений при отсутствии аналогов [9].

4. Сохранение текущей ситуации и осуществленных действий в базе знаний.

Система, основанная на правилах (рисунок 3), имеет базу знаний, представленную в виде набора «правил» вида «если имеет место факт - то ». Текущее состояние системы

представлено в виде набора фактов. Анализ заключается в сопоставлении этого набора с шаблонами правил. В случае совпадения правило помещается в набор правил, из которого специальный алгоритм выбирает одно. Затем выбранное правило активирует некоторое действие и данные в памяти обновляются. Однако в системе отсутствует механизм самоанализа знаний, позволяющий корректировать, добавлять и удалять правила в зависимости от эффективности принятого решения в конкретной ситуации.

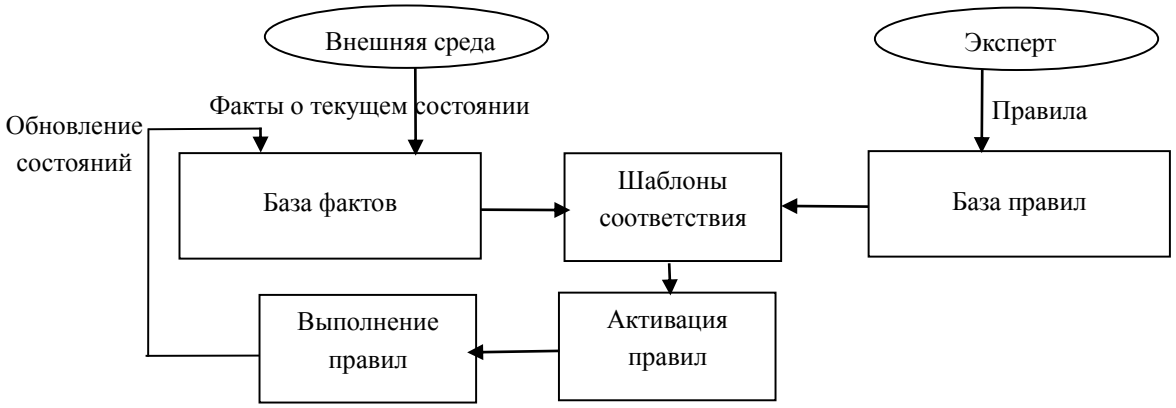


Рис. 3. Принцип работы системы, основанной на правилах.

Отметим, что ни одна система представления и анализа знаний не способна воплотить все типы знаний и выразительность рассуждений, требуемые для всех возможных ситуаций, в которых должна работать радиосистема. Хотя алгоритм принятия решения предусматривает анализ ситуаций, не имеющих аналогов, возникновение совершенно новой ситуации, требующей дополнительного обучения, резко снижает эффективность принятия решения. Увеличение количества знаний в системе улучшает эффективность принятия решения, но требует увеличения памяти и вычислительных ресурсов.

Одним из важных аспектов обучения является контроль. В системе контролируемого обучения система обучается принимать решение связывая набор входных данных с известным результатом. Когда радиосистема может расширять свои знания с помощью алгоритма обучения и добавлять новые знания к существующей базе – имеет место неконтролируемое обучение. В этом случае процесс обучения может привести к неправильным решениям, прежде чем будет найдено приемлемое. Обучение на основе подкрепления увеличивает вес награды за действие, совпадающее (или близкое) к желаемому результату, тем самым усиливая выбор этого конкретного действия, если система окажется в том же состоянии в будущем. Механизм обучения может быть реализован в различных вариантах:

- Запоминание. Фиксируется последовательность шагов принятия решений для определенного набора входных данных. В случае повторения набора исходной информации применяются сохраненные ответы. Эффективно, если диапазон ситуаций, с которыми сталкивается радиосистема, ограничен и четко определен.
- Классификация. Определяют сходства или закономерности в структуре и содержании данных. Обеспечивают обучение, расширяя онтологию новыми концепциями, основанными на их сходстве с уже существующими в системе.

- Вероятностный подход. Оцениваются вероятность исхода для заданного набора входной информации. Обучение осуществляется с помощью сравнения фактического результата с прогнозируемым и соответствующей корректировке весов. Необходимость проверки прогноза для корректировки вероятностей ограничивает применимость подхода.
- Дерево решений. Представляет собой ориентированный граф в пространстве решений, каждый узел которого, содержит решение или действие. Система генерирует набор возможных альтернативных действий для данного состояния, вычисляет общий их вес и вероятность, обучаясь по-разному реагировать на различные состояния динамически корректируя веса, сравнивая наблюдаемое и ожидаемое состояния.
- Теория игр. В обучении используется механизм подкрепления. Действие может быть выбрано на основе вероятности, случайной генерации или другого метода. Успех стратегии сохраняется для дальнейшего использования.
- Нейронные сети и генетические алгоритмы. Генетические алгоритмы изменяют входной вектор (выполняют генетическую мутацию) в зависимости от эффективности выполненного действия, генерируя новые знания и оценивая их эффективность. Каждый узел нейронной сети принимает вектор входных данных и передает его на следующий уровень сети вплоть до выхода с учетом весов связей между нейронами. В зависимости от вида задачи, решаемой нейронной сетью возможны все три подхода к обучению: контролируемое, неконтролируемое и обучение с подкреплением.

3. Применение нейронных сетей в обучении когнитивного радио

Нейронные сети по своей сути - нелинейная функция отображения пространства входов в пространство выходов. Использование всех перечисленных подходов к обучению и широкий круг решаемых задач (диагностика состояния, классификация объектов, интерполяция, аппроксимация, фильтрация входных данных и т.п.) делают их удобным инструментом, обеспечивающим обработку сигнала на нескольких уровнях функционирования когнитивной радиостанции. В литературе освещены примеры применения аппарата нейронных сетей в различных подсистемах когнитивного радио.

Для контролируемого обучения когнитивного радио часто используются многослойные сети с прямой передачей сигнала и обратным распространением ошибки. Наиболее часто решаемая задача – классификация. На основе классификации может быть создана система онтологий. Например, система связи на основе шаблонов [14] классифицирующая сигналы в онтологии, на основе которых могут быть выбраны схема модуляции и кодирования, в соответствии с отношением сигнал/шум и спектральной эффективностью канала.

Как было показано на рисунке 1 этапу классификации типа сигнала предшествует извлечение значений признаков. Алгоритм извлечения может быть достаточно сложным, например, циклический спектральный анализ [3] (преобразование второго порядка сигнальной функции и связанных с ней спектральных частот). Полученные признаки являются входными данными многослойной нейронной сети прямого распространения сигнала для классификации схем модуляции (амплитудная модуляция,

средняя манипуляция, квадратурная амплитудная модуляция, импульсная амплитудная модуляция и двоичная фазовая манипуляция).

Кроме классификации, многослойные нейронные сети могут быть использованы для прогнозирования. На основании значений частоты ошибок, величины отношения сигнал/шум, контрольной суммы ошибок и т.п. исходных данных с помощью нейронной сети может быть осуществлен прогноз пропускной способности, задержки и других характеристик. В [12] чтобы предсказать ожидаемые скорости передачи данных, экспериментировали с различными конфигурациями нейронных сетей, слоями и размером входной выборки. В качестве входных данных использовались наблюдаемые максимальные скорости, уровень сигнала и качество линии. Прогнозировалась будущая средняя максимальная скорость передачи данных. Кроме того, на основании имеющихся максимальных скоростей передачи данных и значений мощности принимаемого сигнала прогнозировалась пропускная способность канала в постоянно меняющейся среде.

На основе частоты ошибок, величины отношения сигнал/шум с помощью нейронной сети обратного распространения ошибки в [2] выполнили прогноз пропускной способности, задержи и надежности связи когнитивного радио.

Нейронные сети на основе алгоритма обратного распространения ошибки использовались для решения задачи сохранения энергии вторичного пользователя когнитивного радио за счет оптимизации сканирования состояния занятых слотов канала [13, 15]. В качестве входных данных использовались состояния каналов [13], закодированные как 1 для свободных и −1 для занятых каналов. Выходом нейронной сети являлись номера слотов, которые будут незаняты. Прогноз позволил увеличить энергоэффективность вторичного пользователя на 50%, а спектральную эффективность на 60%. Предложенная [15] схема зондирования канала наряду с энергетическими и циклостационарными функциями для обучения нейронной сети зондирования спектра использует энергию и статистику Чжана предыдущего события зондирования. Полученные результаты превосходят схему классического обнаружения энергии.

Неконтролируемое обучение когнитивного радио чаще используется для классификации текущего состояния и прогнозирования поведения на этой основе. Примером использования самоорганизующихся нейронных сетей для прогнозирования частоты ошибки по битам на основе скорости передачи данных, мощности принимаемого сигнала, скорости передачи битов является работа [11].

Обучение с подкреплением получило развитие в глубоком машинном обучении, что позволяет успешно решать задачи классификации с большим количеством классов на основании выборок исходных данных, содержащих миллионы примеров. Задача классификации сигналов, принимаемых когнитивным радио была решена в [9]. Набор из 11 классов сигналов в слабых средах с относительно низкой плотностью информации и 24 классов сигналов с модуляциями высокого порядка в условиях канала с очень высоким отношением сигнал/шум и низким замиранием был успешно классифицирован с использованием глубоких сверточных сетей.

4. Заключение

Основной задачей когнитивной радиосвязи является определение пространства сигналов и передача сигналов в незанятой или частично занятой части спектра, либо генерирование/подавление помех. Для поддержания цикла функционирования когнитивного радио (Наблюдение – Ориентация – Планирование – Решение – Действие – Обучение) важен способ представления данных (декларативный или поведенческий) и механизм рассуждения, определяющий процесс обучения системы. Поскольку одной из основных отличительных особенностей когнитивного радио является принятие решений на основе собственного опыта, поведенческий способ представления знаний, расширяющий систему знаний за счет информации о последствиях собственных действий, является предпочтительным. Накопление знаний в системе возможно с помощью контролируемого, неконтролируемого обучения, и обучения с подкреплением. Все перечисленные способы обучения можно реализовать с помощью аппарата искусственных нейронных сетей, позволяющих решать задачи на каждом из этапов когнитивного цикла.

В настоящее время в Целевой поисковой лаборатории прорывных технологий радиосвязи Фонда перспективных исследований реализуется данный подход для формирования облика и построения перспективных систем радиосвязи основанных, в том числе, на принципах когнитивного радио.

References

1. Apurva N. Mody, Stephen R. Blatt, Diane G. Mills, Thomas P. McElwain, Ned B. Thammakhoune Cognitive radio methodology, physical layer policies and machine learning. US8929936B2, stated. 31.10.2013, publ. 6.01.2015.
2. Baldo N. and Zorzi M., Learning and adaptation in cognitive radios using neural networks, in Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE, pp. 998 – 1003, IEEE, 2008.
3. Fehske A., Gaeddert J., and Reed J., A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks, in New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pp. 144 – 150, IEEE, 2005.
4. Fette, Bruce A., ed. Cognitive radio technology. Academic Press, 2009.
5. Kokar, M., D. Brady, and K. Baclawski, Roles of Ontologies in Cognitive Radios, Cognitive Radio Technology, B. Fette (ed.), pp. 401–434, Newens/Elsevier, 2006.
6. Kolodner, J., Improving Human Decision Making through Case-Based Decision Aiding, The AI Magazine, 12(2):52–68, 1991.
7. Mitola J. III, Cognitive Radio Architecture: The Engineering Foundations of Radio XML. John Wiley and Sons, 2006.
8. Newman T. R., Barker B. A., Wyglinski A. M., Agah A., Evans J. B., and Minden G. J., Cognitive engine implementation for wireless multicarrier transceivers, Wireless communications and mobile computing, vol. 7, no. 9, pp. 1129 – 1142, 2007.
9. O'Shea, Timothy James, Tamoghna Roy, and T. Charles Clancy. Over-the-air deep learning based radio signal classification. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 12.1 (2018): 168-179.
10. Schank, R., Dynamic Memory: A Theory of Learning in Computers and People, Cambridge University Press, 1982.
11. Tsagkaris K., Bantouna A., and Demestichas P., Self-organizing maps for advanced learning in cognitive radio systems, Computers & Electrical Engineering, vol. 38, no. 4, pp. 862–881, 2012.

12. Tsagkaris K., Katidiotis A., and Demestichas P., Neural network-based learning schemes for cognitive radio systems, Computer Communications, vol. 31, no. 14, pp. 3394–3404, 2008.
13. Tumuluru V. K., Wang P., and Niyato D., A neural network based spectrum prediction scheme for cognitive radio” in Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on, pp. 1 – 5, IEEE, 2010.
14. Ustundag B. and Orcay O., A pattern construction scheme for neural network-based cognitive communication, Entropy, vol. 13, no. 1, pp. 64 – 81, 2011.
15. Vyas, Maunil R., Patel D. K., and Miguel Lopez-Benitez. Artificial neural network based hybrid spectrum sensing scheme for cognitive radio. 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2017.
16. Wang, J., D. Brady, K. Baclawski, and M. Kokar, The Use of Ontologies for the Self- Awareness of the Communications Nodes, Proceedings Software Defined Radio Technical Conference, Orlando, November 2003.
17. Wang, J., M. Kokar, K. Baclawski, and D. Brady, Achieving Self-Awareness of SD Nodes Through Ontology-Based Reasoning and Reflection, Proceedings Software Defined Radio Technical Conference, Phoenix, November 2004.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МПЧ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЕВРОАЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ

В. П. Урядов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин

НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Представлены результаты прогнозирования и экстраполяции МПЧ на субавроральных и среднеширотной трассах Евроазиатского региона путем адаптации справочной модели ионосферы IRI-2007 по результатам наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы на контрольных и рабочих радиолиниях. Результаты могут быть использованы для динамического управления ресурсом КВ радиолиний.

Ключевые слова: наклонное ЛЧМ зондирование; максимально применимая частота; максимально наблюдаемая частота; пространственная корреляция; прогнозирование; экстраполяция.

FORECASTING AND EXTRAPOLATION OF MUF ACCORDING TO IONOSPHERE OBLIQUE SOUNDING IN THE EUROASIAN REGION

V. P. Uryadov, F. I. Vybornov, A. V. Pershin

Radiophysical Research Institute UNN, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The results of forecasting and extrapolation of MUF on the subauroral and mid-latitude paths of the Euro-Asian region by adapting the IRI-2007 reference ionosphere model on results of the ionosphere oblique chirp sounding on the control and working radio lines are presented. Results can be used for dynamic management of HF radio lines resource.

Keywords: oblique chirp sounding; maximum usable frequency; maximum observed frequency; spatial correlation; forecasting; extrapolation.

1. Введение

В последние годы во многих странах наблюдается рост интереса к системам КВ радиосвязи. В значительной мере это связано с развитием новых технологий, микроэлектроники, средств вычислительной техники и цифровой обработки сигналов.

Следует отметить, что способность эффективно управлять ресурсами КВ диапазона зависит от точности и оперативности прогнозирования характеристик ионосферного радиоканала. Широкое распространение получило долгосрочное прогнозирование, имеющее важное значение для выбора стратегии функционирования радиотехнических систем. Долгосрочное прогнозирование основано на моделях, разработанных для фиксированных солнечной и магнитной активности, сезона, времени суток, географической зоны и т.д. Для долгосрочного прогнозирования используется статистическая модель ионосферных параметров, основанная на усредненных данных. Большое распространение получила прогностическая справочная модель ионосферы International Reference Ionosphere (IRI), [1]. Модель базируется на данных мировой сети ионозондов, радаров некогерентного рассеяния и других инструментов, она постоянно совершенствуется по мере поступления новой информации. Однако вариации

ионосферы день ото дня, ее зависимость от гелиогеофизических условий могут сводить на нет эффективность такого прогнозирования.

Для прогнозирования на короткие интервалы времени (день, час или несколько минут) требуется мониторинг ионосферных параметров с такими же временными интервалами. Такой прогноз называется краткосрочным. При этом для корректировки ионосферных параметров и повышения точности прогноза используют зондовые измерения в реальном масштабе времени, основанные на данных ВЗ, НЗ и ВНЗ ионосферы, а также используют сигналы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС для мониторинга ионосферы Земли. Наличие сети станций позволяет оперативно получать сведения о состоянии ионосферы в контрольных точках и экстраполировать их на близлежащий регион, где отсутствуют средства зондирования ионосферного канала.

Для зондирования ионосферного канала широко применяются маломощные ионозонды с непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала, обладающие высокой помехозащищенностью [2,3]. Проблему адаптации радиоэлектронных систем к текущему состоянию ионосферы можно было бы решить при наличии постоянно работающей разветвленной сети ЛЧМ ионозондов с доступом результатов зондирования ионосферного канала в режиме on-line. Однако отсутствие такой сети делает актуальной задачу пространственно-временного прогнозирования ключевого параметра ионосферного канала – максимальной применимой частоты (МПЧ) и ее экстраполяции на трассы, не оснащенные средствами диагностики. Определение значимых временных интервалов корреляционных связей максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) особенно важно при длительных (десятки минут, часы) сеансах связи.

Инерционность ионосферных процессов позволяет устанавливать пространственно-временные корреляционные связи параметров КВ канала и использовать их для прогнозирования на короткие интервалы времени (десятки минут), что имеет важное значение для обеспечения устойчивой КВ радиосвязи в периоды быстрой перестройки ионосферы и во время ионосферных возмущений.

Согласно измерениям [4] радиус пространственной корреляции вариаций критической частоты ионосферы по данным сети станций вертикального зондирования в Австралии и Папуа Новая Гвинея оказался равен ~ 1000 и 1500 км в направлении север-юг и восток-запад, соответственно.

В работах [5,6] экспериментальные данные по МНЧ, получаемые на сети трасс НЗ используются для определения эффективного числа солнечных пятен или солнечного потока на длине волны $\lambda = 10.7$ см. Поток находится из условия, чтобы прогнозируемая модель обеспечивала измеряемую МНЧ. Для односкачковых трасс поток связывается с состоянием ионосферы в средней точке трассы НЗ, которая принимается за ионосферную контрольную точку (ИКТ). Для сети трасс НЗ получается некоторое распределение ИКТ. В случае, если другие ИКТ расположены достаточно близко к средней точке прогнозируемой трассы, то ее МПЧ может быть уточнено путем линейной интерполяции экспериментальных данных [6]. Результаты эксперимента [6] свидетельствуют, что процедуру интерполирования данных НЗ на средних широтах,

повышающую точность прогноза, имеет смысл проводить в пределах области, простирающейся на 700 км в широтном и ~400 км в долготном (меридиональном) направлениях.

В статье представлены результаты прогнозирования и экстраполяции МПЧ на субавроральных и среднеширотной трассах путем адаптации справочной модели ионосферы IRI-2007 к результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы на контрольных и рабочих радиолиниях.

2. Результаты наблюдений и моделирования

Исследования пространственно-временных корреляционных связей максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) проводились на субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования Соданкюля (Финляндия) – Нижний Новгород, Ловозеро (Мурманская обл.) – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород и на среднеширотной трассе ст. Горьковская (Ленинградская обл.) – Нижний Новгород.

Наблюдения проводились в декабре 2016г. Передатчики в Ловозеро, Салехарде, Диксоне и ст. Горьковская работали круглосуточно с интервалом зондирования 15 минут; диапазон частот 2-30 МГц, скорость перестройки частоты 550 кГц/с. Передатчик в Соданкюля работал в диапазоне частот 2 – 16 МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с, интервал зондирования – 5 минут. Прием проводился в Нижнем Новгороде. Схема эксперимента показана на рисунке 1. Средние точки контрольных трасс Ловозеро (Мурманская обл.) – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород и ст. Горьковская (Ленинградская обл.) – Нижний Новгород соединены между собой. На рисунке также отмечены средние точки рабочих трасс Соданкюля – Нижний Новгород и Диксон – Нижний Новгород. В таблице 1 указаны координаты приемо-передающих пунктов, а в таблице 2 приведены расстояния от средней точки контрольной трассы Ловозеро – Нижний Новгород до средних точек рабочих трасс.

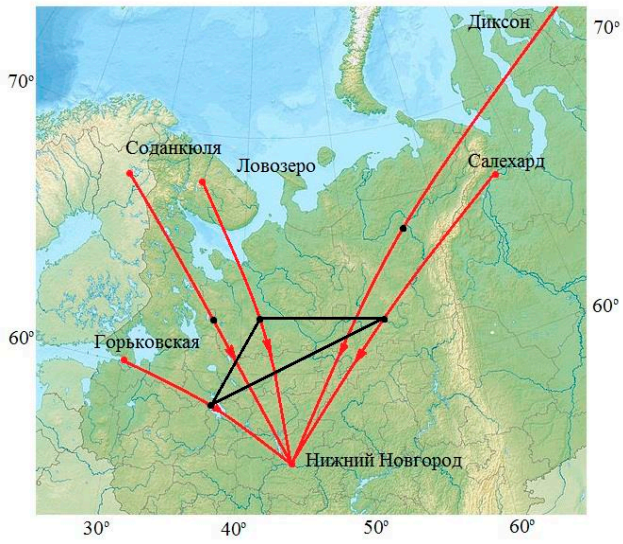


Рис. 1. Схема эксперимента

Таблица 1. Координаты приемо-передающих пунктов

Приёмо-передающие пункты	Географические координаты
Нижний Новгород	56,00°N, 44,00° E
Ловозеро	68,00°N, 35,02°E
Салехард	66,52°N, 66,37°E
НИС Горьковская	60,27°N, 29,38°E
Соданкюля	67.4°N, 26.6°E
Диксон	73.5°N, 80.7°E

Таблица 2. Расстояния между средними точками трасс

Трассы	D, км
Ловозеро – Н.Новгород / Горьковская – Н.Новгород	450
Ловозеро – Н.Новгород / Соданкюля – Н.Новгород	180
Ловозеро – Н.Новгород / Диксон – Н.Новгород	870
Ловозеро – Н.Новгород / Салехард – Н.Новгород	680

На основе данных, полученных на исследуемых трассах, была определена временная зависимость изменения МНЧ для спокойных и возмущенных условий. По ним вычислялся коэффициент временной корреляции. Затем с помощью уравнения регрессии делался прогноз МНЧ на различный интервал времени. Согласно полученным данным коэффициент корреляции МНЧ моды 1F2 на интервал прогноза $\tau \approx 0,5$-1 час составлял величину $\rho \sim 0,7$-0,9. С ростом τ коэффициент корреляции уменьшался.

Коэффициент пространственной корреляции МНЧ моды 1F2 на субавроральных и среднеширотной трассах составлял величину $\rho \sim 0,8$-0,95.

Высокие значения коэффициентов пространственной корреляции МНЧ позволили применить для прогнозирования и экстраполяции МНЧ метод адаптации глобальной модели ионосферы к результатам НЗ на рабочих радиолиниях.

Метод адаптации глобальной модели ионосферы осуществлялся путем коррекции ее управляющего параметра – эффективного числа солнечных пятен W. Коррекция W приводит к изменению распределения электронной концентрации вдоль трассы, т.е. к изменению ее МПЧ, которая определяется путем моделирования ионограммы НЗ на основе скорректированных данных. Коррекция W позволяет подогнать рассчитанное значение МПЧ к экспериментальной МНЧ с некоторой погрешностью σ.

Далее считалось, что модель с выбранным значением W адекватно описывает распределение электронной концентрации в окрестности исследуемой трассы. Адаптированная таким образом модель используется как для прогнозирования поведения МПЧ для данной трассы на временной интервал прогноза, так и для экстраполяции МПЧ на соседние трассы, не оснащенные средствами диагностики. Подбор нового значения W производился в том случае, когда отклонение σ превышало заданное значение σ_{max}.

В качестве контрольной трассы использовалась трасса Ловозеро – Нижний Новгород. На рисунке 2 (крестиками) показан временной ход МНЧ моды 1F2 на этой трассе для 17.12.2016 г. Измерения проходили в условиях спокойной магнитной обстановки с индексом Кр = 1. Путем подбора числа солнечных пятен W проводилось моделирование ионограмм наклонного зондирования для наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной ионограмм. Модельная кривая МПЧ, рассчитанная по адаптивной модели ионосферы IRI-2007, приведена на рисунке2 (красная кривая 2). Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчетах изменялось число W.

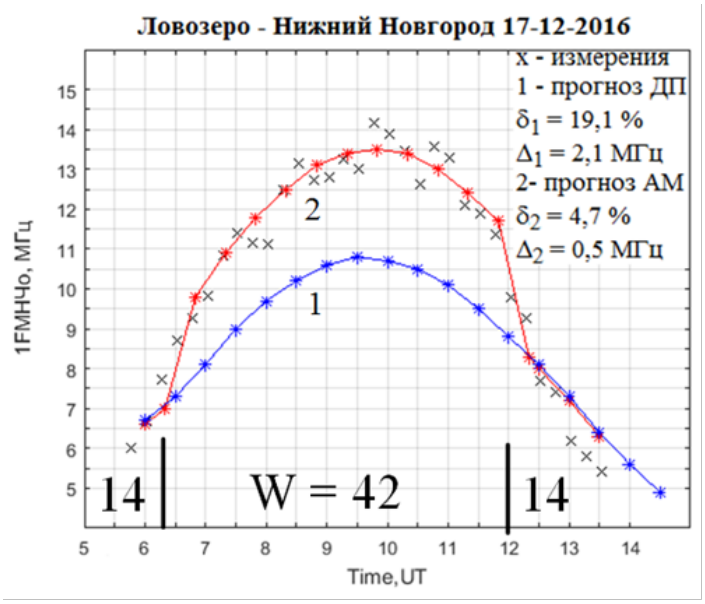


Рис. 2. Временной ход МНЧ и МПЧ на трассе Ловозеро – Нижний Новгород

Значение W в каждом временном интервале указано в поле рисунка. Результаты расчета МПЧ по долгосрочному прогнозу показаны синей кривой 1. Эффективность прогноза оценивалась по формуле [7]

$$\delta = \frac{\left[\sum_i (P_i - Q_i)^2\right]^{1/2}}{\left(\sum_i Q_i^2\right)^{1/2}} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где P_i - прогноз (МПЧ), Q_i – эксперимент (МНЧ).

Рассчитывалось также среднее отклонение

$$\Delta(МГц) = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(МПЧ_i - МНЧ_i)^2\right]^{1/2} \qquad (2)$$

Согласно оценкам прогноз по адаптированной модели дает среднюю ошибку δ_2 = 4.7%. По долгосрочному прогнозу (ДП) [8], когда для условий проведения эксперимента значение W = 15, ошибка прогноза составляет δ_1 = 19.1%, т.е. существенно выше, чем для прогноза по адаптированной модели (АМ) ионосферы. Среднее значение Δ_2 для всего временного ряда составляет величину ~0,5 МГц.

На рисунках 3-6 приведены экспериментальные (МНЧ) и расчетные (МПЧ) для рабочих субавроральных трасс Соданкюля – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород и среднеширотной трассы Горьковская – Нижний Новгород. Для всех этих трасс в расчетах использовалось значение W, полученное на контрольной трассе Ловозеро – Нижний Новгород при адаптации ионосферной модели IRI-2007. В поле всех рисунков приведены значения W, ошибки прогноза δ и отклонения Δ для ДП и АМ. Как видно из рисунков в утренние и вечерние часы в период перестройки ионосферы моменты времени изменения значения W для различных трасс могут отличаться на 20-30 минут.

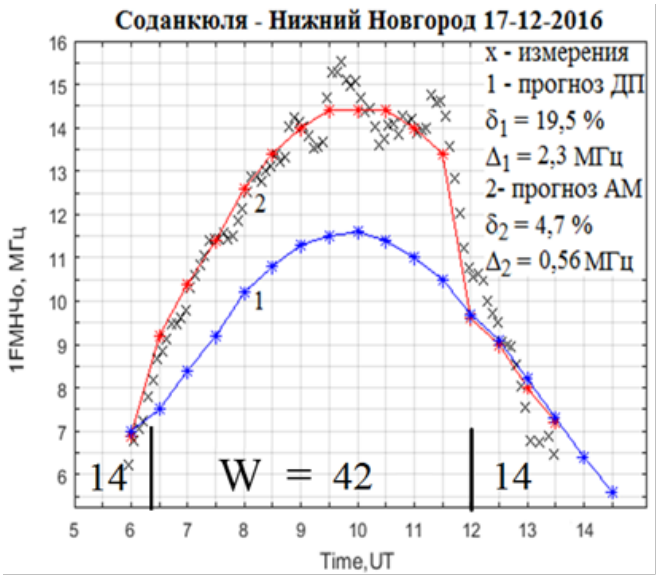


Рис. 3. Временной ход МНЧ и МПЧ на трассе Соданкюля – Нижний Новгород

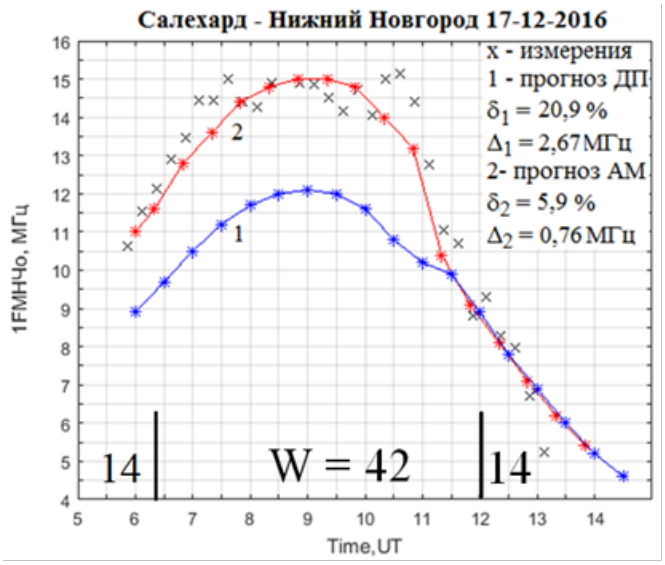


Рис. 4. Временной ход МНЧ и МПЧ на трассе Салехард – Нижний Новгород

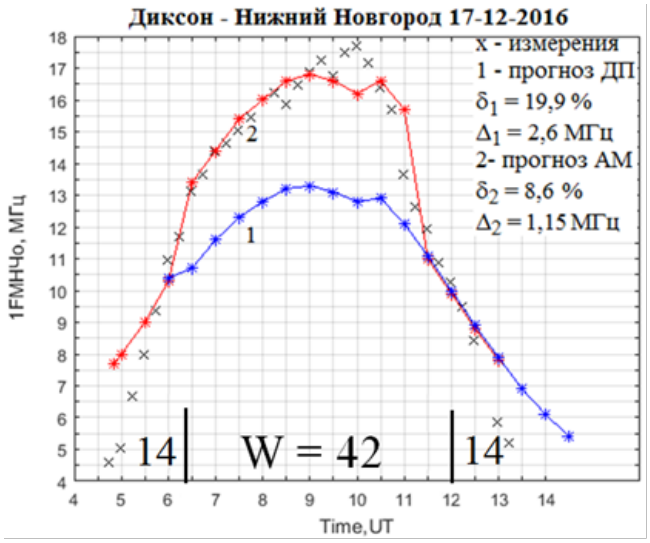


Рис. 5. Временной ход МНЧ и МПЧ на трассе Диксон – Нижний Новгород

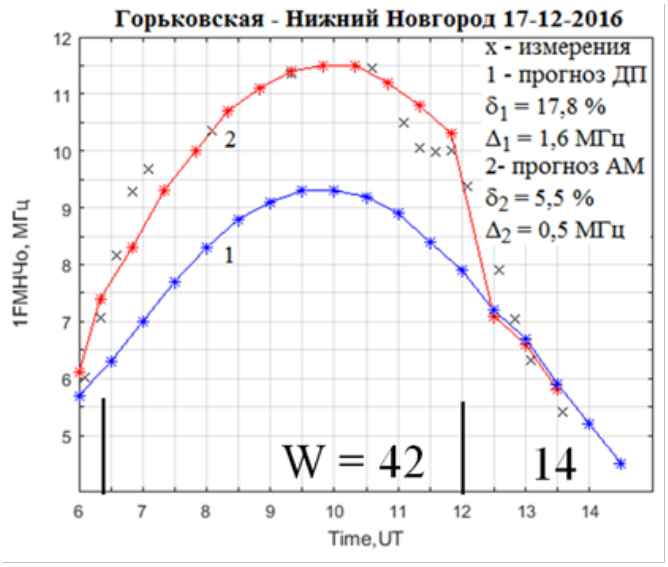


Рис. 6. Временной ход МНЧ и МПЧ на трассе Горьковская – Нижний Новгород

Из рисунков видно, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~180÷870 км составляют ~4.7÷8.6%, что существенно меньше, чем ошибки по данным долгосрочного прогнозирования ~18÷21%.

Для экстраполяции МПЧ используется также, предложенный в [6] метод контрольных точек, когда по данным зондирования и адаптации ионосферной модели на трех контрольных трассах для расчета МПЧ на соседних радиолиниях осуществляется линейная интерполяция числа солнечных пятен.

При этом для всех трех контрольных трасс по модели ионосферы IRI рассчитываются МПЧ и путем подбора числа солнечных пятен W_i добиваются наилучшего согласования с экспериментальным значением МНЧ. В результате

моделирования получают значения W_1, W_2 и W_3 для трасс 1, 2 и 3 соответственно. В эксперименте используются контрольные трассы: Горьковская – Н. Новгород, Ловозеро – Н. Новгород и Салехард – Н. Новгород.

Далее в предположении линейной зависимости значений Wi от географических координат средних точек трасс (точек отражения радиоволн) в их небольшой окрестности имеем уравнение

$$W = a + bx + cy \qquad (3)$$

где a, b, c - постоянные, $x \equiv \varphi, y \equiv \lambda$ - широта и долгота средней точки трассы НЗ, соответственно.

Затем решается система линейных уравнений:

$$\begin{aligned} W_1 &= a + bx_1 + cy_1 \\ W_2 &= a + bx_2 + cy_3 \\ W_3 &= a + bx_3 + cy_3 \end{aligned} \qquad (4)$$

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ - географические координаты средних точек трех трасс НЗ.

Трассы НЗ и их средние точки показаны на рисунке 1. Путем решения системы (4) определяются постоянные a*, b*, c* для каждого временного интервала T , т.е. находится зависимость числа солнечных пятен W от координат (x,y) , которыми могут быть точки отражения соседних трасс вблизи контрольных точек $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$.

Для апробации метода используются данные МНЧ на рабочих трассах Соданкюля – Н. Новгород и Диксон – Н.Новгород, координаты их средних точек (x_c, y_c) и $(x_д, y_д)$, соответственно. Для этих точек получаем уравнения $W_c = a^* + b^* x_c + c^* y_c$ и $W_д = a^* + b^* x_д + c^* y_д$ и находятся значения W_c и $W_д$.

Для этих значений W_c и $W_д$ делается расчет ионограмм НЗ на трассах Соданкюля – Н. Новгород и Диксон – Н. Новгород и определяются МПЧ. Данные МПЧ сопоставляются с экспериментом, и находится ошибка экстраполяции. Результаты обработки приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты обработки17.12.2016 г.

Время, UT	Трасса	1F МНЧ, МГц	1F МПЧ, МГц	W	δ, %
07:00	Горьковская-Н.Новгород	9.54	9.4	56	1.5
	Ловозеро – Н.Новгород	9.74	9.8	38	0.6
	Салехард – Н.Новгород	13.98	13.8	49	1.3
	Соданкюля-Н.Новгород	9.9	10.0	36	1.0
	Диксон – Н.Новгород	14.4	14.3	40	0.7
09:00	Горьковская-Н.Новгород	11.1	11.0	40	0.9
	Ловозеро – Н.Новгород	12.8	12.8	38	0
	Салехард – Н.Новгород	14.89	14.9	40	0.1
	Соданкюля-Н.Новгород	14.08	13.6	38	3.4

Время, UT	Трасса	1F МНЧ, МГц	1F МПЧ, МГц	W	δ, %
07:00	Горьковская-Н.Новгород	9.54	9.4	56	1.5
	Диксон – Н.Новгород	16.85	16.4	39	2.7
12:30	Горьковская-Н.Новгород	8.155	8.0	26	1.9
	Ловозеро – Н.Новгород	8.4	8.3	17	1.2
	Салехард – Н.Новгород	7.87	7.9	16	0.4
	Соданкюля-Н.Новгород	9.33	9.4	18	0.75
	Диксон – Н.Новгород	8.4	8.35	10.9	0.6

Как видно из таблицы 3 если значения числа солнечных пятен W по трем контрольным точкам подобраны таким образом, что ошибки прогнозирования МПЧ по ним составляют ~0.1÷0.9%, то ошибки экстраполяции МПЧ на рабочие трассы (Соданкюля – Н.Новгород и Диксон – Н.Новгород), средние точки которых расположены в пределах ~180 – 470 км от ближайших средних точек контрольных трасс (см. рис.1), составляют ~0.6÷3.4%, что приемлемо для обеспечения надежной работы связных радиолиний (с адаптацией по частоте), не оснащенных средствами диагностики ионосферного КВ канала.

3. Заключение

Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы IRI-2007 ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния ~180÷870 км составляют ~4.7÷8.6%, что заметно меньше, чем по данным долгосрочного прогнозирования.

Показано, что ошибки экстраполяции МПЧ по трем контрольным точкам для различных временных интервалов (утро, день, вечер) в условиях спокойной геомагнитной обстановки составляют ~0.6÷3.4%, что существенно меньше, чем ошибки по долгосрочному прогнозу.

В заключение заметим, что ионосферный канал как среда распространения подвержен пространственно-временным вариациям, контролируемым солнечной и магнитной активностью. Кроме того, на эффективность работы связных систем существенное влияние оказывают случайные и преднамеренные помехи от посторонних радиостанций. Поэтому, для обеспечения эффективной работы радиоэлектронных систем в условиях нестационарности ионосферного канала, обусловленной воздействием различного рода возмущений, необходимо осуществлять мониторинг ионосферного канала на базе помехозащищенного ЛЧМ-ионозонда, чтобы в реальном времени получать текущую информацию о состоянии ионосферы. Результаты зондирования могут быть использованы для адаптации систем КВ радиосвязи и загоризонтной КВ радиолокации к условиям распространения радиоволн.

Следует отметить, что разработанные алгоритмы обработки разностного сигнала на выходе ЛЧМ-приемника, позволяют, в отличие от традиционно используемых методов, определять все необходимые параметры для оценки вероятности битовой ошибки и надежности систем КВ радиосвязи по данным наклонного ЛЧМ-зондирования [9]. Созданный ЛЧМ комплекс может быть использован для сервисного обслуживания в составе ионосферно-волновой и частотно-диспетчерской службы.

Сеть ЛЧМ ионозондов с оптимальной протяженностью трасс ~1500-2500 км, объединенная в глобальную программно-управляемую структуру, позволит оперативно оценивать реальное состояние КВ канала на всей территории России, осуществлять прогнозирование ионосферного канала и динамическое управление частотным ресурсом радиолиний, определять оптимальную маршрутизацию каналов передачи информации и обеспечит высокую эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения.

4. Благодарности

Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу ЛЧМ-передатчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

Литература

1. Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. // Adv. Space Res., 2008, Vol.42, Issue 4. – P. 599.
2. Goodman J., Ballard J., Sharp E. A long-term investigation of the HF communication channel over middle- and high-latitude paths. // Radio Sci., 1997, Vol. 32, No.4. - Pp. 1705-1715.
3. Иванов В.А. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях / Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. // Изв. Вузов. Радиофизика, 2003, Т.46, № 11. - С. 919-952.
4. McNamara L.F., Wilkinson P.J. Spatial correlations of foF2 deviations and their implications for global ionospheric models: 1. Ionosondes in Australia and Papua New Guinea. // Radio Sci., 2009, Vol. 44. RS2016, doi:1029/2008RS003955.
5. Reilly M.H., Yamamura E.K. Oblique ionograms and HF propagation assessment. // Proc. IEEE MILCOM Conf. Los Angeles Calif. Oct. 1984. - Pp.100-104.
6. Reilly M.H., Daehler M. Sounder updates for statistical model predictions of maximum usable frequencies on HF sky wave paths. // Radio Sci., 1986, Vol. 21, No. 6. - Pp. 1001-1008.
7. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. - 200 с.
8. www.swpc.noaa.gov, 20.01.2019
9. Вертоградов Г.Г, Урядов В.П., Вертоградова Е.Г. Расчет оптимальных рабочих частот связной радиолинии по данным наклонного зондирования ионосферы. // Изв. Вузов. Радиофизика, 2008, Т. 51, №1. - С. 10-21.

References

1. Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. //Adv. Space Res., 2008, Vol.42, Issue 4. - P. 599.
2. Goodman J., Ballard J., Sharp E. A long-term investigation of the HF communication channel over middle- and high-latitude paths. //Radio Sci., 1997, Vol. 32, No.4. - Pp. 1705-1715.
3. Ivanov V.A. LFM ionosonde and its application in ionospheric studies. / Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., Uryadov V.P., Shumaev V.V. // Radiophysics and Quantum Electronics, 2003, Vol. 46, No 11. Pp.821-851. (Engl. Transl.)

4. McNamara L.F., Wilkinson P.J. Spatial correlations of foF2 deviations and their implications for global ionospheric models: 1. Ionosondes in Australia and Papua New Guinea. //Radio Sci., 2009, .Vol. 44. RS2016, doi:1029/2008RS003955.
5. Reilly M.H., Yamamura E.K. Oblique ionograms and HF propagation assessment. // Proc. IEEE MILCOM Conf. Los Angeles Calif. Oct. 1984. - Pp. 100-104.
6. Reilly M.H., Daehler M. Sounder updates for statistical model predictions of maximum usable frequencies on HF sky wave paths. // Radio Sci., 1986, Vol. 21, No. 6. - Pp. 1001-1008.
7. Chetyrkin E.M. Statistical methods of forecasting. M.: Statistica, 1977. - 200 p. (in Russian).
8. www.swpc.noaa.gov, 20.01.2019
9. Vertogradov G.G., Uryadov V.P., Vertogradova E.G. Calculation of optimal operating frequencies of a communication radio line according to oblique ionosphere sounding. // Radiophysics and Quantum Electronics, 2008, Vol. 51, No1, - Pp. 9-19.

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ СИСТЕМАМИ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

В.Г. Бурлов[1], М.О. Лепешкин[1]

[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматривается необходимость реализации процессного подхода в управлении системами техносферной безопасности региона (СТБР). Построение в соответствии с процессным подходом более гибкого и эффективного управления СТБР обусловливает актуальность проблемы его использования в целях оптимизации регионального управления ТБ.

Ключевые слова: процессный подход в управлении, управление системами техносферной безопасности региона, аналог бизнес-систем в управлении СТБР, аналог бизнес-процессов в управлении СТБР, система менеджмента качества.

PROCESS APPROACH IN THE MANAGEMENT SYSTEMS OF TECHNOSPHERE SAFETY OF THE REGION

V.G. Burlov[1], M.O. Lepeshkin[1]

[1]Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), city St. Petersburg, Russia

Abstract. The article deals with the need to implement the process approach in the management of technosphere safety systems in the region (TSSR). The construction of a more flexible and effective management of TSSR in accordance with the process approach makes the problem of its use in order to optimize the regional management of TB relevant.

Keywords: process approach in management, management of technosphere safety systems in the region, analogue of business systems in the management of TSSR, analog of business processes in the management of TSSR, quality management system.

1. Введение

Современная система государственного управления техносферной безопастностью (ТБ) на региональном уровне является критической социотехнической системой, неэффективная работа которой ухудшает социальное и экономическое развитие региона. В сфере управления бизнесом решение таких проблем достаточно отработаны. Это касается внедрения международных стандартов менеджмента качества серии ISO. Важнейшей задачей управления системами техносферной безопасности региона (СТБР) является повышение эффективности и качества осуществления функций системы управления на основе их стандартизации и регламентации.

2. Основы процессного подхода к управлению техносферной безопасностью региона

С принятием международных стандартов менеджмента качества ISO серии 9000:2000 дало серьезный импульс к развитию методик процессного управления. Система менеджмента качества (СМК) - часть системы внутриорганизационного управления. Соответствие стандарту ISO 9001:2008 «Quality management system -

Requirements» («Системы менеджмента качества. Требования») означает, что достигнутый уровень менеджмента отвечает минимальному набору стандартизованных требований, гарантирующих производство продукции предсказуемого качества, а это определяет конкурентоспособность бизнес-системы.

В органах государственного управления ТБ регионом можно найти аналогии основным функциям управления типичной компании, такие как целеполагание, стратегическое планирование, организация структур для различных целей, управление бизнес-процессами, управление персоналом. Поэтому методика автоматизации разработки и контроля выполнения регламента в управлении СТБР должна соответствовать требованиям стандарта ISO 9001.

Управленческие процессы в органах власти регионов недостаточно организованы и эффективны. Качество этих процессов может быть улучшено путем их модернизации за счет составления стандартов и регламентов [1].

Процессный подход дает возможность в условиях ограниченности средств и ресурсов достигать требуемых результатов с минимальными затратами.

Идея процессного подхода появилась в конце 80-х годов XX века в США. Майкл Хаммер (Michael Hammer) и Джеймс Чампи (James Champy), изучая систему управления штаба НАТО, описывавшего свои регламенты в терминах процессов по нотации IDEF (Integrated Definition), а так же изучая систему управления крупных компаний, обнаружили, что система их управления характеризуется: сложной иерархией, централизацией, а так же «функциональностью» структур организаций. М. Хаммера и Д. Чампи в работе «Реинжиниринг корпорации» видели ключ к оптимизации деятельности предприятия в создании новых процессов «с чистого листа» [2].

В основе процессного подхода лежит теория вариабельности Уолтера Шухарта, который в 1924 г. в книге «Статистические методы с точки зрения управления качеством» указывал, что все процессы производства продукции/услуг в организации подвержены отклонениям (вариациям) от заданных значений. Причинами вариаций могут быть общие (внутренне присущие процессу) и специальные (внешние по отношению к процессу) причины.

По мнению У. Шухарта снизить вариации по необходимым критериям можно было путем применения в управлении концепции PDCA (планируй (Plan), делай (Do), проверяй (Check), воздействуй (Act)), в 1939 г. Э. Деминг, развивая данную концепцию, предложил модификацию цикла PDCA - цикл PDSA («Study» - изучать).

В цикле Деминга-Шухарта PDC(S)A результативность процессов обеспечивается управляющей обратной связью по установленному критерию. Управление процессами деятельности направлено на эффективное достижение желаемых результатов с заданной точностью.

Согласно ISO 9001:2008 под процессным подходом понимается идентификация процессов и управление ими (обеспечение их взаимодействия). Стандарт ISO 9000-2005 устанавливает необходимость определения последовательности и взаимодействия указанных процессов. Процесс — совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующая «входы» в «выходы».

Применение процессного подхода в управлении СТБР позволит отслеживать ход управления на каждом из этапов и, как следствие, повысит его эффективность и результативность. Процесс управления СТБР - это определенная совокупность управленческих действий, направленная на достижение целей путем преобразования ресурсов на «входе» (финансовые, материально-технические и кадровые) в требуемый результат обеспечения СТБР на «выходе» системы.

Для обеспечения устойчивого функционирования региона необходима поддержка процесса управления СТБР, исключающая разрушение процесса обеспечения СТБР, и информационная поддержка принятия решения лицом принимающим решение (ЛПР) на основе анализа выполнимости регламентов системы. Для этого необходимо реализовать подход, позволяющий контролировать процесс управления СТБР при выполнении регламентов.

Внутри процесса происходит использование и переработка материальных или финансовых потоков, информации в иные потоки или услуги.

При этом подразделения рассматриваются как участники цепочки взаимосвязанных процессов, направленных на достижение глобальной цели обеспечения СТБР. Анализ и улучшение проводятся по отношению к процессу в целом для выполнения цели в сложившихся условиях.

3. Принципы процессного подхода к управлению техносферной безопасностью региона

Процессный подход основан на следующих принципах.

1. Деятельность компании рассматривается как совокупность процессов.
2. Выполнение процессов подлежит обязательному документированию и формальному описанию.
3. У каждого процесса есть потребитель (внутренний или внешний), определяющий требования к процессу и к его результатам, которые формируют цель процесса.
4. У каждого процесса есть лицо, отвечающее за его функционирование и результат.
5. Каждый бизнес-процесс характеризуется ключевыми показателями, описывающими его исполнение, результат или влияние на итог деятельности организации в целом.

Основой процессного подхода является принцип регулирования последовательности выполняемых операций. Й. Беккер отмечает, что организация процессов - это инструмент для контроля выполнения задач, а также координации временных и пространственных аспектов их выполнения [3].

Аналогом бизнес-систем в системе государственного управления ТБ региона будем понимать лица или организации, инициирующие процесс обеспечения СТБР, который в свою очередь разделяется на цепь последовательно выполняемых операций. Аналогом продукции в системе государственного управления ТБ региона можно считать достигнутый результат процесса обеспечения СТБР [4].

Аналогом бизнес-процесса в системе государственного управления ТБ региона понимается устойчивая, целенаправленная совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, служащая осуществлению основных целей обеспечения СТБР и преобразовывающая входные элементы (политика, ресурсы, потребности и ожидания населения) в выходы (результаты, представляющие ценность для обеспечения СТБР). Вход в процесс, операция, результат являются этапами процесса. Содержание данных этапов должно определяться владельцами процесса в соответствии со стратегическими целями обеспечения ТБ региона. Владельцы процесса выполняют большую часть работ по процессу, и, вследствие этого, его контролируют.

В рамках системы процессного управления должны рассматриваться все процессы, причем реальные процессы, а не искусственно обособленные от деятельности по обеспечению СТБР. «Реальность» процессов достигается путем привязки сети (системы) процессов к функциональным подразделениям [5].

Процессный подход заключается в разделении процесса управления на подпроцессы и вмешательство в каждый из подпроцессов с целью обеспечения качества управления. Процессы как элемент объекта системы управления представляют собой совокупность действий (операций), которыми субъект системы управления воздействует на ее объект в целях получения запланированных результатов. Процессы системы управления, ориентированной на результаты, разнообразны и имеют различное предназначение.

Процессный подход позволяет диагностировать проблемы, как реального состояния СТБР, так и взаимодействия различных ее подразделений при выполнении общей задачи управления СТБР. Именно выделение в качестве основного объекта управления «сквозных» процессов и формирование института их владельцев позволяет гибко реагировать на информацию, причем сигнал, полученный на «входе» в виде заказа по обеспечению СТБР, тут же обрабатывается всей системой [6].

Существуют различные уровни процессов: некоторые из них охватывают всю организацию, но включают в себя довольно много мелких операций [7]. Выделяя процессы по уровням (верхнего уровня; детальные; элементарные), можно разложить всю совокупность деятельности по обеспечению СТБР на самые простые, элементарные процессы, но при этом особо актуально, какой уровень детализации необходим при решении конкретных задач. Выход одного процесса часто служит входом для другого. При определении процесса и владельца процесса необходимо четко регламентировать взаимодействие владельца с руководителями функциональных подразделений (владельцами ресурсов). Также необходим анализ «стандартных» деревьев процессов и их «наложение» на функции для того, чтобы отобрать те ключевые процессы, которые обеспечивают достижение целей в области выполнения заданных критериев обеспечения СТБР.

4. Заключение

Процессный подход позволяет понять, что конечный продукт деятельности компании является результатом совместной работы всех без исключения ее

сотрудников, кроме того, он позволяет устранить разрывы на стыке процессов, восстанавливая связь между ними. Процессный подход не отвергает существующей системы управления, а определяет пути ее улучшения и модификации. Процессный подход позволяет диагностировать проблемы, как реального состояния СТБР, так и взаимодействия различных ее подразделений при выполнении общей задачи управления СТБР. Применение процессного подхода в управлении СТБР требует некоторых дополнений и корректировок с учётом сложности, иерархичности и масштабности СТБР.

Литература

1. Бурлов В.Г., Лепешкин О.М., Кириллова Т.В. Методологический подход к оценке безопасности функционирования социальной и экономической системы управления региона// Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. - 2013. - № 2. - С. 99-103.
2. Бурлов В.Г., Лепешкин О.М., Кириллова Т.В. Моделирование процесса управления социальными и экономическими системами региона на основе потенциально активных элементов пространства и времени// Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. - 2013. - № 3. - С. 82-85.
3. Бурлов В.Г., Лепешкин О.М., Кирилова Т.В. Разработка алгоритмического обеспечения реализации процесса функционирования социальных и экономических систем региона при изменении условий// Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. - 2013. - № 4. - С. 89-94.
4. Акинин П.В., Блинников В.А., Братков В.В., Гундарь О.Н., Медведев Н.П., Сергодеева Е.А., Снимщикова Е.В., Арискина А.В., Бабин И.А., Копытов В.В., Косов Г.В., Кузьмин Д.С., Росенко А.П., Шульга М.М., Лепешкин О.М., Бурым Ю.В. Угрозы безопасности России на Северном Кавказе. - Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2004. - 336 с.
5. Лепешкин О.М. Синтез модели процесса управления социальными и экономическими системами на основе теории радикалов автореферат дис. ... доктора технических наук. - СПб: С.-Петерб. гос. политехн. ун-т, 2014. - 33 с.
6. Лепешкин М.О., Лепешкин О.М., Сагдеев А.К. Методологический подход оценки функциональной безопасности критической социотехнической информационной системы// Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Сборник научных статей: в 3-х томах. - СПб: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2016. - С. 294-299.
7. Лепешкин О.М., Лепешкин М.О., Бурлов В.Г. Синтез модели процесса управления техническими системами на основе теории радикалов //Нейрокомпьютеры и их применение. Тезисы докладов/ Под ред. А.И. Галушкина, А.В. Чечкина, Л.С. Куравского, С.Л. Артеменкова, Г.А. Юрьева, П.А. Мармалюка, А.В. Горбатова, С.Д. Кулика. - М.: Московский государственный психолого-педагогический университет, 2016. - С. 18-В.

References

1. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Kirillova T. V. Methodological approach to assessing the safety of the social and economic management system of the region// Problems of Economics and management in trade and industry. - 2013. - № 2. - Pp. 99-103.
2. Burlov V. G., Lepeshkin O. M., Kirillova T. V. Modeling of management process of social and economic systems of the region on the basis of potentially active elements of space and time// Problems of economy and management in trade and industry. - 2013. - № 3. - Pp.82-85.
3. Burlov, V. G., Lepeshkin O. M., Kirilova T. V. Development of algorithmic support of the implementation of the process of functioning of social and economic systems of the region when

conditions change// Problems of Economics and management in trade and industry. - 2013. - № 4. - Pp. 89-94.
4. Akinin P. V., Blinnikov V.A., Bratkov V. V., Hundar O. N., Medvedev N. P., Sergodeeva E. A., Snimshikova E. V., Ariskina A. V., Babin I. A., Kopytov V. V., Kosov G. V., Kuzmin D. S., Rosenko A. P., Shulga M.M., Lepeshkin O.M., Burym YU. V. Threats to Russia's security in the North Caucasus. - Stavropol: North Caucasus Federal University, 2004. - 336 p.
5. Lepeshkin O. M. Synthesis of the model of the process of management of social and economic systems on the basis of the theory of radicals ... doctor of engineering. - St. P.: S.-Peterb. state Polytechnic. UN-t, 2014. - 33 p.
6. Lepeshkin M. O., Lepeshkin O. M., Sagdeev A.K. The methodological approach for the assessment of functional safety critical socio-technical information system// Actual problems of infotelecommunication in science and education. Collection of scientific articles: in 3 volumes. - St. P.: St. Petersburg state University of telecommunications. prof. M. A. Bonch-Bruevich, 2016. - Pp. 294-299.
7. Lepeshkin O. M., Lepeshkin M. O., Burlov V. G. Synthesis of model of process of management of technical systems on the basis of the theory of radicals / / Neurocomputers and their application. Abstracts/ edited by A. I. Galushkin, V. A. Chechkin, L. S. Kuravsky, L. S. Artemenkov, G. A. Yuriev, P. A. Marmalyuk, A. V. Gorbatov, S. D. Kulik. - M.: Moscow state University of psychology and education, 2016. - Pp. 18-B.

СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ В КОНТЕКСТЕ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА

М. П. Иванкин[1], Н. Н. Толстых[1], В. Ф. Свердел[2], В. В. Сафронов[3]

[1] АО "Концерн «Созвездие», Воронеж, Россия
[2]Министерство обороны РФ, Москва, Россия
[3]Воронежский государственный технический университет (ФГБОУ ВО ВГТУ), Воронеж, Россия

Аннотация. Рассмотрен подход к коррекции параметров компонентов инфокоммуникационной системы, функционирующей в условиях информационного конфликта.

Ключевые слова: воздействие, инфокоммуникационная система, информационный конфликт, нечеткие множества, ситуационное управление

SITUATION MANAGEMENT SYSTEMS IN THE CONTEXT OF INFORMATION CONFLICT

M. P. Ivankin[1], N. N. Tolstykh[1], V. F. Sverdel[2], V. V. Safronov[3]

[1]Join Stock Company "Concern "Sozvezdie", Voronezh, Russia
[2] Ministry of Defence of the Russian Federation, Moscow, Russia
[3]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The approach to the correction of the parameters of the components of an infocommunictaion systems operating in conditions of information conflict.

Keywords: fuzzy sets, impact, infocommunication system, information conflict, situational control

1. Введение

В настоящее время при разработке инфокоммуникационных систем (ИКС) целесообразно проводить анализ на наличие в системе компонентов, снижающих вероятность реализации ее целевой функции [1]. Под этим подразумевается учет возможности реализации в ее отношении тех или иных видов воздействий, чаще всего типовых. Далее необходимо промоделировать ситуации, которые могут возникнуть в процессе ее функционирования, выработать управленческое решение, которое закладывается в разрабатываемую систему. Но так как ИКС существуют в условиях многообразия воздействий (сигнальных, информационных) [1] этого чаще всего недостаточно.

Адекватным решением здесь была бы возможность пересчета характеристик рассматриваемых систем при изменении внешних условий в реальном времени. Тогда это порождает необходимость включения в систему подсистемы, которая смогла бы вырабатывать новое управленческое решение в априорной неопределенности типа и метода проведения различных видов воздействий (сигнальных, информационных).

В связи с этим представляется целесообразным исследование возможности применения подсистемы выработки управленческих решений при реализации различных видов информационных воздействий в ИКС.

2. Системы ситуационного управления

Если рассматривать процессы функционирования ИКС в условиях априорной неопределенности типа и метода проведения воздействий, то выполняется условие необходимости учета конкретной уникальной ситуации, связанной с управлением объекта, для которой не подходит стандартная процедура управления [2]. Следовательно, в таких системах может быть применимо ситуационное управление, типовая схема реализации которого представлена на рисунке 1. В работе [2] вместо блока выбора решения используется блок случайного выбора, так как предполагается, что подсистема управления располагает необходимой информацией для принятия решения.

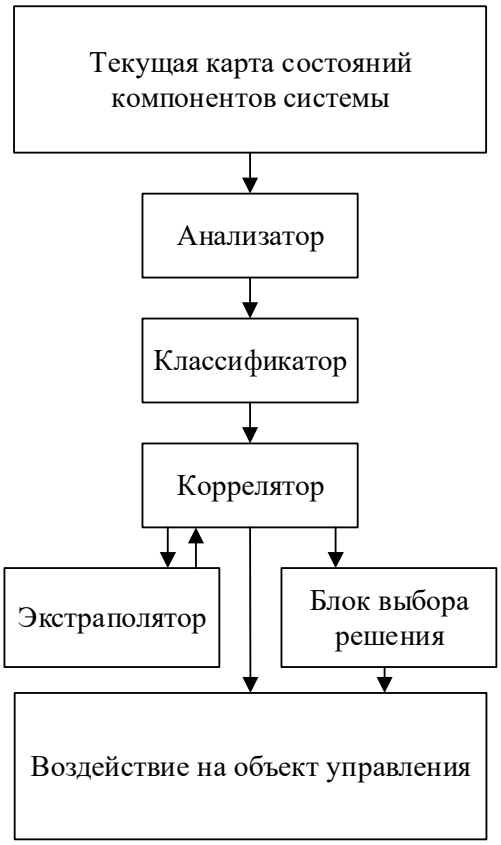


Рис. 1. Схема реализации ситуационного управления в системе критических приложений

Рассмотрим систему с набором элементов таких, что каждый из которых в любой момент времени является потенциально конфликтным:

$$S = \{s_i\}. \quad (1)$$

В процессе функционирования ИКС представляется сложным спрогнозировать какой из элементов будет использован для реализации воздействия в системе и в какое состояние она после этого перейдет. Для реализации процессов ситуационного управления целесообразно рассмотреть такую систему следующим образом: каждый ее компонент имеет набор параметров, имеющих нормальный рабочий диапазон. Выход параметров компонента за пределы рабочего диапазона подразумевает, что, либо происходит попытка реализации воздействия, либо на данный компонент была

произведена повышенная нагрузка со стороны других компонентов системы. Кроме этого целесообразно задать определенный порог выхода за пределы рабочего диапазона, после которого системой в независимости от подсистемы управления будет сделан вывод о том, что воздействие было успешно реализовано. В такой ситуации, система переходит в точку бифуркации.

Под подсистемой управления в контексте данной работы целесообразно рассмотреть компонент *R*, который включает в себя верхние границы карты рабочих диапазонов остальных компонентов ИКС. В процессе функционирования компонент *R* выполняет следующие задачи:

- собирает статистику о текущих параметрах компонентов ИКС;
- на основе собранной статистики принимает решение о том, что компонент потенциально конфликтный и требует коррекции;
- осуществляет типовые процессы [2, 3], характерные для систем ситуационного управления.

Отсюда получаем ИКС:

$$S = \left\{ \{s_1\}, \{s_2\}, ..., \{s_n\}, R \right\}, \tag{2}$$

где компоненты системы:

$$s_i = \left\{ par_1^i, par_2^i, ..., par_m^i \right\}. \tag{3}$$

Компонент *R* представляет собой множество:

$$R = \left\{ \{r_1\}, \{r_2\}, ..., \{r_n\} \right\}, \tag{4}$$

с набором параметров:

$$r_i = \left\{ map_1^i, map_2^i, ..., map_m^i \right\}. \tag{5}$$

Задачу управления целесообразно описать на основе аппарата теории нечетких множеств [4, 5].

3. Решение задачи ситуационного управления в ИКС

В процессе нормального функционирования множества S и R не пересекаются. Целевая функция подсистемы ситуационного управления состоит в выполнении условия доминирования множества R над множеством S:

$$R \succ S \text{ , при } r_1 \succ s_1, ..., r_m \succ s_m . \tag{6}$$

В тоже время любое нестрогое доминирование подмножеств множества S над подмножествами множества R дает их пересечение, отсюда возникает необходимость коррекции текущих состояний компонентов ИКС. Такая ситуация описывается следующим образом:

$$S \succ R : \mathrm{s}_1 \geq r_1, ..., \mathrm{s}_m \geq r_m . \tag{7}$$

Для определения возможности пересечения множеств целесообразно использовать расстояние Хэмминга [5]:

$$d(S,R) = \sum_{i=1}^{n} \left| \mu_S(x_i) - \mu_R(x_i) \right|. \tag{8}$$

На основе этого выражения анализатор в процессе функционирования может рассчитать модифицированное расстояние Хэмминга без учета модуля для каждой пары $\left(par_j^i, map_j^i \right)$:

$$d\left(par_j^i, map_j^i \right) = \mu_{par_j^i} - \mu_{map_j^i} . \tag{9}$$

Тогда функцию принадлежности удобно описать следующим образом:

$$\mu_{S \cap R} = \begin{cases} 1, d\left(par_j^i, map_j^i \right) > 0, \\ 0, d\left(par_j^i, map_j^i \right) \leq 0. \end{cases} \tag{10}$$

Если s_i является конфликтным компонентом системы, то верхние границы карты диапазонов рабочих состояний компонента s_i и его текущие состояние описываются следующим образом:

$$s_i = \left\{ par_1^i, par_2^i, ..., par_m^i \right\}, \tag{11}$$

$$r_i = \left\{ map_1^i, map_2^i, ..., map_m^i \right\}, \tag{12}$$

такие что для первого параметра выполняется условие $par_1^i \geq map_1^i$, а для всех остальных $par_j^i \prec map_j^i$. Получаем нестрогое доминирование параметра компонента системы над параметром из карты подсистемы управления. Тогда обычное множество s_i в конкретной ситуации примет вид:

$$\underset{=}{s_i} = \{1;0;0;0\} . \tag{13}$$

Отсюда подсистема может сделать вывод о необходимости коррекции компонента системы s_i, на основе его параметра par_1^i. Для этого подсистеме управления необходимо построить функцию принадлежности пересекающихся множеств s_i и r_i:

$$\mu_{s_i \cap r_i} = \left\{ map_1^i, par_2^i, ..., par_m^i \right\}. \quad (14)$$

На основе полученных выражений подсистема может рассчитать компенсационный параметр для коррекции конфликтного компонента системы.

4. Заключение

Целесообразно отметить, что выработка управленческого решения чаще всего обусловлена двумя причинами. Во-первых, это совершенствование системы управления, а во-вторых, необходимость уточнения поведения системы и возникающих в ней ситуаций с целью компенсации изменений системы, как объекта управления [3].

Полученные выражения представляется возможным использовать в дальнейшем при моделировании и анализе процессов функционирования подсистемы ситуационного управления в ИКС, функционирующей в условиях реализации различных видов воздействий, как сигнальных, так и информационных.

Литература

1. Иванкин М.П. К вопросу оценки эффективности систем программно-определяемого радио в условиях информационного конфликта / Иванкин М.П., Толстых Н.Н., Савинков А.Ю., Свердел В.Ф. // Теория и техника радиосвязи, 2018, №4. – С. 14-18
2. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. –М.: Наука, 1986.
3. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. Для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 2001. – 343 с.: ил.
4. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с., ил.
5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 312 с.

References

1. Ivankin M.P. To the issue of evaluating the effectiveness of software-defined radio systems in the context of information conflict / Ivankin M.P., Tolstykh N.N., Savinkov A.Y., Sverdel V.F. // Radio Communication Theory and Technology, 2018, No. 4. – Pp. 14-18
2. Pospelov D.A. Situational management: theory and practice. –Moscow: Nauka, 1986.
3. Sovetov B.Y., Yakovlev S.A. System modelling. –Moscow: High School, 2001. – 323 p.
4. Kofman A. Fuzzy Sets Theory. – Moscow: Radio and Communication, 1982. – 432 p.
5. Fuzzy sets in control and artificial intelligence models / Ed. D.A. Pospelov. – Moscow: Nauka, 1986. – 312 p.

СПОСОБ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ СЕТЕЙ СВЯЗИ

[1]С.Е. Потапов, [1]А.А. Потапова, [1]Л.Ю. Лобанова, [1]М.В. Сагиров, [1]В.В. Храмогин, [2]А.Н. Кривоногов

[1]Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого в г. Серпухове (ФВА РВСН)
[2]ФГБУ «18 Центральный научно-исследовательский институт» МО РФ (18 ЦНИИ), г. Москва

Аннотация. В статье изложен способ диагностирования основных элементов приёмо-передающей аппаратуры сетей связи, основанный на отслеживании динамики отклонений их работы в процессе передачи информации. Работоспособность и общее состояние аппаратуры связи определяется по величине комплексного параметра состояния приборов с учетом их важности для процесса передачи данных.

Ключевые слова: сеть связи, способ диагностирования, надёжность, радиопередающий тракт.

METHOD OF DIAGNOSING THE MAIN ELEMENTS OF THE RECEIVING-TRANSFERING DEVICES OF COMMUNICATION NETWORKS

S.E. Potapov, A.A. Potapova, L,Y. Lobanova, M.V. Sagirov, V.V. Hramogin

Branch of the Peter the Great Military Academy of the Strategic Missile Forces (BMA SMF), Serpukhov, Russia

Abstract. The article describes a method for diagnosing the main elements of the receiving and transmitting equipment of communication networks based on tracking the dynamics of deviations of their work in the process of transmitting information. The operability and general condition of communications equipment is determined by the value of the complex parameter of the state of the devices, taking into account their importance for the data transfer process

Keywords: communication network, diagnostic method, reliability, radio transmission path.

1. Введение

Сеть связи, как известно, состоит из каналов связи и коммутационных устройств, а также абонентского оборудования для доступа пользователей к ресурсам сети [1]. При этом, для эффективного управления информационными потоками необходимо точно знать техническое состояния элементов оборудования сетевых устройств и каналов связи. Для повышения коэффициента готовности сетевого и каналообразующего оборудования необходимо своевременно выявлять и устранять потенциальные неисправности данного оборудования [2]. Поэтому одной из важных задач управления сетями связи является задача диагностики состояния сетевого и каналообразующего оборудования.

2. Методика периодического диагностирования аппаратуры связи

Диагностика канала связи в целом осуществляется на основе анализа состояний его составных частей. При этом анализу подлежат различные по физической природе и функциональному предназначению параметры работы основных блоков оборудования,

что порой затрудняет формирование комплексного показателя состояния канала связи и его использование при принятии решений в той или иной ситуации. Для более точного оценивания состояния оборудования сети предлагается следующий способ диагностирования, основанный на вычислении и интерпретации комплексного параметра состояния оборудования связи. Иллюстрация указанного способа производится на примере диагностирования передающего тракта канала связи (рисунке1).

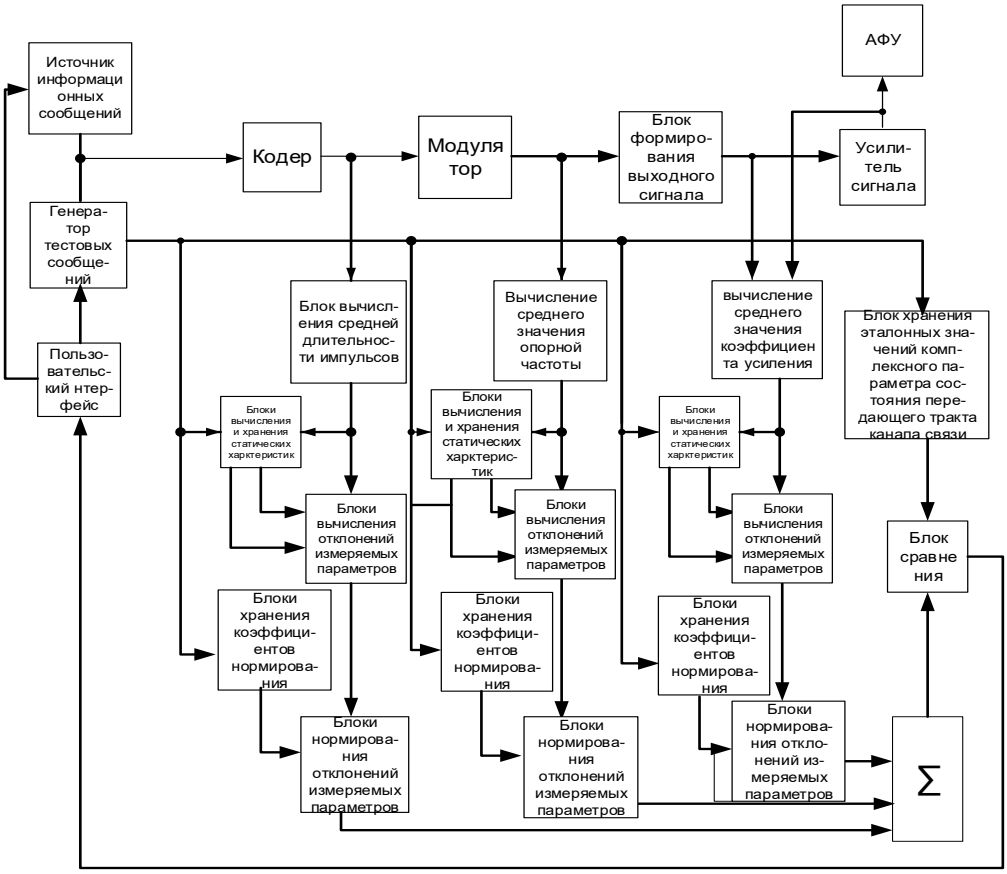


Рис. 1 Блок-схема устройства диагностирования передающего тракта

Способ диагностирования передающего тракта канала связи реализуется следующим образом. Технические характеристики передающего тракта (средняя длительность импульсов на выходе кодера канала, значение опорной частоты модулированного колебания и значения коэффициента усиления мощности радиосигнала) являются случайными величинами [3]. Поэтому при оценивании их на интервале тестирования получают оценки данных случайных величин [3]. Для оценивания работоспособности передающего тракта канала связи измеряются технические характеристики его основных блоков (оценка длительности импульсов на выходе кодера канала, оценка опорной частоты модулированного колебания и оценка коэффициента усиления мощности радиосигнала). В процессе эксплуатации передающего тракта канала связи измеряемые величины могут изменять свои значения. При этом для правильной работы канала связи отклонения измеряемых величин от их среднего значения не должно превышать определённых пределов [4]. В случае, если

отклонения измеренных значений указанных технических характеристик приближаются к критическому порогу, то необходимо производить регламентное обслуживание блоков передающего тракта. Оценивание величин отклонения технических характеристик от среднего значения производится с помощью комплексного параметра состояния передающего тракта канала связи, вычисляемого по формуле (1):

$$R^2 = \rho_1 \frac{(M[T_c] - T_c^{изм})^2}{D[T_c]} + \rho_2 \frac{(M[f_o] - f_o^{изм})^2}{D[f_o]} + \rho_3 \frac{(M[K_y] - K_y^{изм})^2}{D[K_y]}, \quad (1)$$

где $M[T_c]$, $D[T_c]$ и $T_c^{изм}$ - соответственно математическое ожидание, дисперсия и измеренная оценка средней длительности импульсов;

$M[f_o]$, $D[f_o]$, и $f_o^{изм}$ - соответственно математическое ожидание, дисперсия и измеренная оценка опорной частоты;

$M[K_y]$, $D[K_y]$ и $K_y^{изм}$ - соответственно математическое ожидание, дисперсия и измеренная оценка коэффициента усиления;

ρ_1, ρ_2, ρ_3 - коэффициенты важности комплексного учёта отклонений измеряемых величин от их среднего значения.

Коэффициенты важности комплексного учёта отклонений измеряемых величин от их среднего значения введены вследствие неодинаковой значимости измеряемых характеристик для состояния передающего тракта канала связи.

Диагностика состояния передающего тракта канала связи производится с помощью тестовых последовательностей. Тестовых последовательностей может быть несколько в зависимости от вида передаваемой информации, например, текст, цифровое видео и прочее. Соответственно, коэффициенты важности отклонений измеряемых величин от их среднего значения, а также сами средние значения и дисперсия значений рассчитываются для каждой тестовой последовательности отдельно. При этом, для формирования математического ожидания и дисперсии измеряемых параметров передающего тракта [3] производится многократная прокрутка тестовых сообщений при заведомо исправном состоянии передающего тракта канала связи.

Оператор через интерфейс пользователя осуществляет выдачу в передающий тракт канала связи информационное сообщение, сформированное в источнике информационных сообщений. Перед тем, как выдать подлежащую передаче информацию в эфир через все основные блоки передающего тракта канала связи пропускается тестовая последовательность, сформированная в генераторе тестовых сообщений. Эта последовательность преобразуется в кодере в избыточную последовательность в соответствии с принятым алгоритмом кодирования информации [5]. Длительность каждого символа избыточной последовательности измеряется в блоке вычисления оценки длительности импульсов и затем вычисляется их оценка. Избыточная последовательность символов кодовой комбинации подается на вход модулятора, на выходе которого формируется гармоническое колебание с определёнными параметрами в соответствии с принятым способом модуляции [6]. Значение опорной частоты, поступающего на вход блока формирования выходного сигнала гармонического колебания измеряется в блоке вычисления оценки опорной

частоты и затем вычисляется её оценка. С выхода блока формирования выходного сигнала подготовленный к передаче по физической линии связи аналоговый сигнал поступает на вход усилителя сигнала и одновременно происходит измерение его мощности в блоке вычисления оценки коэффициента усиления. С выхода усилителя сигнала радиосигнал подается на вход антенно-фидерного устройства и одновременно происходит измерение его мощности в блоке вычисления оценки коэффициента усиления. Вычисленное значение коэффициента усиления сигнала усредняется для всей тестовой последовательности. Радиосигнал тестовой последовательности в антенно-фидерном устройстве подаётся на эквивалент нагрузки антенны и в эфир не излучается. Полученные значения оценки длительности импульсов, оценки опорной частоты и оценки коэффициента усиления подаются на вход соответствующих блоков вычисления отклонений измеряемых параметров, на другие входы этих блоков подаются значения математического ожидания и дисперсии измеряемых параметров, хранящиеся в соответствующих блоках вычисления статистических характеристик. Расчёт отклонений измеряемых параметров производится по формуле (1). Затем полученные значения поступают в соответствующие блоки нормировки отклонений измеряемых параметров, на другой вход которых подаются значения коэффициентов важности из соответствующих блоков хранения коэффициентов важности. Уточнённые значения отклонений измеряемых параметров с выходов всех блоков поступают на сумматор, где формируется комплексный параметр состояния передающего тракта канала связи. Сформированный в сумматоре комплексный параметр состояния передающего тракта канала связи поступает на вход блока сравнения, на второй вход которого с выхода блока хранения эталонных значений комплексного параметра состояния передающего тракта канала связи поступают эталонные значения комплексного параметра состояния передающего тракта канала связи. Результаты сравнения вычисленного и эталонных значений передаются на пользовательский интерфейс. При этом, если значение вычисленного комплексного параметра состояния передающего тракта канала связи находится в пределах допустимого интервала значений данного показателя, то осуществляется передача информационного сообщения. В случае, если значение вычисленного комплексного параметра состояния передающего тракта канала связи находится в пределах интервала значений, соответствующего предкритическому состоянию передающего тракта, как показано на рисунке 2, то осуществляется соответствующая сигнализация оператору и передача информационного сообщения. В случае, если значение вычисленного комплексного параметра состояния передающего тракта канала связи больше критического значения состояния передающего тракта, то осуществляется соответствующая сигнализация оператору и передача информационного сообщения не осуществляется.

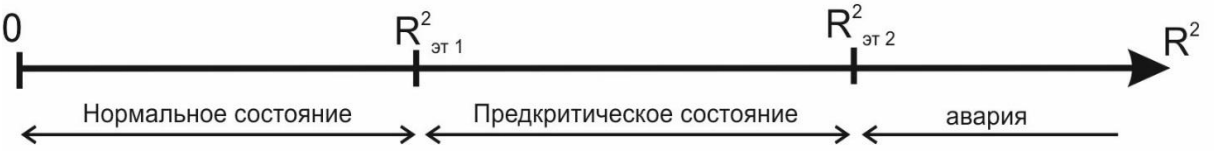


Рис.2 Иллюстрация работы блока сравнения

Вследствие случайности величины R^2 её отдельные значения могут сильно отличаться от предыдущего ряда значений и последующих результатов измерений. Такие события вносят необоснованные изменения средних величин и снижают достоверность оценки состояния передающего тракта. Поэтому, для уменьшения влияния таких явлений применяются сглаживающие фильтры измеренной информации как, например, показано в [7].

3. Заключение

Таким образом, применение описанного выше способа диагностирования составных частей сетевого оборудования позволит на этапе эксплуатации более точно отслеживать динамику контролируемых параметров сетевого и каналообразующего оборудования, а также своевременно принимать меры по выявлению и предупреждению скрытых отказов техники связи.

Литература

1. Пятибратов А.П., Гудыно Л.П., Кириченко А.А. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации, уч. пособие. – М: «финансы и статистика», 2004 г.
2. Р. Галлагер Теория информации и надёжная связь. – М.: «Советское радио», 1974, 720 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 2003. – 564 с.
4. Гречишников Е.В., Иванов В.А., Поминчук О.В., Белов А.С. Способ диагностирования и обеспечения технической готовности элементов сетей связи. RU 2 325 031 C2, заяв. 11.05.2006, опубл. 20.05.2008.
5. М. Вернер. Основы кодирования. Учебник для ВУЗов М.: Техносфера, 2004. - 288с. ISBN 5-94836-019-9.
6. Л.Н. Пуртов, А.С. Замрий, А.И. Захаров и др. Теория и техника передачи данных и телеграфия. – СПб.: ВАС, 1973, 482 с.
7. Потапов С.Е. Математическая модель статистической обработки информации о состоянии сети / В сборнике: РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ XXII международная научно-техническая конференция. 2016. С. 500-507.

References

1. Pyatibratov A.P., Gudyno L.P., Kirichenko A.A. Computing systems, networks and telecommunications. - M: "Finance and Statistics", 2004.
2. R. Gallager Information Theory and Reliable Communication. - M .: Soviet Radio, 1974, 720 p.
3. Wentzel E.S. Probability theory - M .: Science, 2003. - 564 p.
4. Grechishnikov EV, Ivanov V.A., Pominchuk OV, Belov A.S. The way to diagnose and ensure technical readiness of communication network elements. RU 2 325 031 C2, appl. 11.05.2006, publ. 20.05.2008.
5. M. Werner. Basics of coding. Textbook for universities M .: Technosphere, 2004. - 288c. ISBN 5-94836-019-9.
6. L.N. Purtov, A.S. Zamriy, A.I. Zakharov and others. Theory and technology of data transmission and telegraphy. - SPb .: YOU, 1973, 482 p.
7. Potapov S.E. Mathematical model of statistical processing of network status information / In the collection: RADIOLOCATION, NAVIGATION, COMMUNICATIONS XXII international scientific and technical conference. 2016. p. 500-507.

Научное издание

РАДИОЛОКАЦИЯ,
НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ

Сборник трудов
XXV Международной научно-технической конференции
(г. Воронеж, 16–18 апреля 2019 г.)

Том 6

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 05.04.2019. Формат 60×84/16.
Усл. п. л. 26,9. Тираж 120. Заказ 243

Издательский дом ВГУ
394018 Воронеж, пл. Ленина, 10
Отпечатано с готового оригинала-макета в типографии
Издательского дома ВГУ
394018 Воронеж, ул. Пушкинская, 3



Контакты для справок по работе конференции:

Всю необходимую информацию
Вы можете найти на сайте конференции:
http://rlnc.ru

e-mail конференции:
info@rlnc.ru