

На правах рукописи



ЕЛСУКОВ Алексей Александрович

**ОДНОПОЗИЦИОННАЯ СИСТЕМА ЧАСТОТНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ДЕКАМЕТРОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО**

Специальность:

05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Йошкар-Ола, 2015

Работа выполнена на кафедрах радиотехники и связи и высшей математики ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет».

- Научный руководитель - д.ф.-м.н., профессор
Иванов Владимир Алексеевич
ФГБОУ ВПО «Поволжский
государственный технологический
университет»
- Официальные оппоненты - д.т.н., профессор,
Бокова Оксана Игоревна
ФГКОУ ВО «Воронежский институт
Министерства внутренних дел Российской
Федерации» г. Воронеж
- д.т.н., профессор
Ромашов Владимир Викторович
Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Владимирский государственный
университет имени Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых» г. Муром
- Ведущая организация - ФГБОУ ВПО «Московский Технический
Университет Связи и Информатики»
г. Москва


Защита диссертации состоится «15» марта 2016 г. в 13 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.028.03 на базе ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», ФГБОУ ВПО «Марийский государственный университет», ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет» по адресу:

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 31/7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и на сайтах www.kai.ru, www.volgatech.net, www.marsu.ru

Автореферат разослан «___» января 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат техн. наук, профессор



Г. И. Щербаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе поставлена и решена актуальная научно-техническая задача совершенствования методов и систем диагностики ионосферных радиоканалов для выбора в автоматическом режиме оптимальных рабочих частот связи, позволяющего повысить помехоустойчивость декаметрового канала связи и обеспечить ее в регионах со сложным рельефом местности на радиопутьях до 400 км. В работе дано научное обоснование алгоритмов и методик синтеза и обработки сигналов, отличающихся более корректным учетом условий распространения радиосигналов в радиоканале, применением цифровых методов синтеза и обработки сигналов в комплексном виде; применением непрерывных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов с амплитудной манипуляцией по псевдослучайному закону, обеспечивающих максимальную энергию сжатого сигнала при ограниченной мощности его излучения, а также - однопозиционную работу системы при использовании для передачи и приема только одной антенны. В ней разработаны новые подходы к построению системы частотного обеспечения на основе использования прорывной технологии программно-конфигурируемых радиосистем.

Актуальность темы. Способность радиоволн декаметрового диапазона отражаться от ионосферы Земли обеспечивает уникальные свойства систем связи. Отражение сигналов на высотах 100-350 км позволяет организовать связь как далеко за линией горизонта (несколько тысяч километров) без ретрансляторов, так и на малые расстояния (несколько сотен километров), что особенно актуально, когда абоненты разделены сложным рельефом местности. Это свойство дает возможность декаметрового радиосвязи до настоящего времени играть важную роль. Известны и ее недостатки. Первым является относительно узкий диапазон рабочих частот (20-30 МГц) и ограниченная дисперсией полоса частот каналов (не более 30-40 кГц), что в обычных условиях не позволяет организовывать высокоскоростные каналы и передавать большие объемы информации, как, например, в УКВ диапазоне. Многолучевой прием и изменчивость параметров частотных каналов во времени и пространстве приводят к нестабильности декаметрового канала связи. Однако, по таким каналам возможна передача текстовой или голосовой информации, как в аналоговом, так и в цифровом виде. Это дает возможность использовать декаметровую связь как резервный вид на случай чрезвычайных ситуаций или для организации связи в труднодоступной местности. В этих случаях она является альтернативой более дорогой спутниковой связи.

Степень работанности темы. Ионосфера обеспечивает прохождение от передатчика к приемнику сигналов из ограниченного диапазона частот от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимальной применимой частоты (МПЧ), зависящих от длины трассы и состояния ионосферы. В силу этого, в таком диапазоне можно организовать m частотных радиоканалов ($m=(МПЧ-НПЧ)/B$, где B - полоса частот парциального радиоканала). Поэтому одной из важнейших проблем функционирования декаметровых систем является повышение эффективности их работы, предполагающее адаптацию информационно-технических характеристик систем к постоянно изменяющимся параметрам ионосферного распространения и выбор наилучшего парциального канала (оптимальной рабочей частоты) для передачи информации. Полученные в последнее время данные свидетельствуют о том, что основными параметрами каналов декаметровой связи являются: отношение сигнал/шум, рассеяние по задержке и рассеяние по частоте.

Нестабильность декаметровых каналов связи преодолевается путем их диагностики и частотных переходов на оптимальные рабочие частоты с применением методов адаптации. Для диагностики применяются методы радиозондирования среды и оценки на этой основе параметров каналов связи. В различное время вклад в развитие методов зондирования ионосферы внесли: Н.П. Данилкин, В.А. Иванов, Д.В. Иванов, В.Е. Куницын, В.И. Куркин, Л.А. Лобачевский, Р.Г. Минуллин, А.П. Потехин, Н.В. Рябова, С.А. Колесник, А.В. Кузьмин, О.Н. Шерстюков, А.Д. Акчурун, Г.В. Гивишвили, S. Salous, G.H. Barry, A.W. Pool.

Актуальной проблемой является организация связи в гористой местности (в регионах со сложным рельефом). В этом случае сигнал в точку приема может приходиться только с почти вертикального направления. Это может обеспечить как спутниковая связь при условии расположения спутника в зените, так и декаметровая связь из-за отражения от ионосферы. Для такого случая системы декаметровой связи получили название - систем квазизенитного распространения (КЗР) или Near Vertical Incidence Skywave – NVIS. Принято считать, что КЗР - это декаметровая связь на дальностях менее 400 км. Для диагностики линии связи в режиме КЗР могут быть использованы вертикальные ионозонды. Мобильность системы КЗР связи и системы диагностики ставит жесткие условия к габаритам и энергопотреблению системы частотного обеспечения. Существующие вертикальные ионозонды малопригодны для решения данной проблемы, т.к. зондирующие сигналы (импульсные и с ФКМ) не обеспечивают при заданной помехоустойчивости минимальную мощность излучения из-за их недостаточной длительности. Ионозонды с непрерывным ЛЧМ сигналом (по

международной классификации FMCW – Frequency-Modulated Continuous Wave), обеспечивают это условие, но не позволяют одновременно излучать и принимать на одну антенну непрерывный сигнал. Требуется усложнение зондирующего сигнала до вида FMICW - Frequency-Modulated Interrupted Continuous Wave.

В последнее время появилась возможность использования в ионозондах перспективной технологии программно определяемого радио (SDR - Software-Defined Radio), которая в принципе позволяет реализовывать программными средствами устройства, выполняющие различные функции (системы связи, зондирования, локации и т.п.) и создает условия для совмещения систем. Для реализации на ее основе панорамного ионозонда, осуществляющего последовательное зондирование многомерного канала декаметрового диапазона сигналами вида FMICW, требуется разработка методик и алгоритмов цифровой обработки зондирующего сигнала при его поэлементном сканировании в частотной области для оценки параметров всех каналов декаметрового диапазона и их верификация в натурных экспериментах. Таким образом, с одной стороны, существует острая необходимость в получении новых знаний об устройствах однопозиционных систем частотного обеспечения для расширенного использования в современных, отвечающих мировому уровню, отечественных системах ближней декаметрового диапазона; с другой стороны, такому использованию препятствует недостаточный уровень изученности научной задачи цифрового синтеза и обработки широкополосных сигналов вида FMICW для передачи и приема ЛЧМ сигнала на одну антенну, обеспечивающих максимальную энергию сканируемого сигнала при ограниченной мощности его излучения, на основе использования прорывной технологии программно конфигурируемых радиосистем.

Цель работы: разработка, научное обоснование и исследование алгоритмов, методик и устройств однопозиционной системы частотного обеспечения ближней декаметрового диапазона с использованием зондирующего сигнала с линейно-частотной модуляцией и применением технологии программно конфигурируемого радио.

Для достижения цели необходимо решить следующие **научные задачи**:

1. Обоснование актуальности и практической значимости совмещения однопозиционной системы частотного обеспечения и системы декаметрового диапазона для повышения ее помехоустойчивости на основе зондирования радиоканала сигналами с линейной частотной модуляцией вида FMICW и применения прорывной технологии программно-конфигурируемого радио.

2. Теоретическое обоснование и анализ алгоритмов работы цифрового модема системы частотного обеспечения при использовании широкополосного

сигнала большой длительности в условиях однопозиционного режима работы, исследование помехоустойчивости системы и влияния переключающей последовательности на характеристики зондирующего сигнала.

3. Исследование частотно-временных характеристик сжатого FMICW сигнала и научное обоснование требований к параметрам на основе теоретического решения задачи его распространения на ионосферной линии связи. Разработка и исследование алгоритмов цифрового синтеза излучаемого и алгоритма поэлементного сжатия комплексной амплитуды принятого зондирующего сигнала, алгоритма измерения дистанционно-частотной характеристики радиоканала и его параметров.

4. Разработка аппаратно-программного комплекса системы, с возможностью совмещения ее с системой декаметрового диапазона на основе использования технологии программно конфигурируемого радио, реализующего функцию частотного обеспечения. Компьютерное моделирование основных характеристик, параметров функциональных блоков и системы в целом. Натурные испытания комплекса по адаптивному определению рабочих частот ближней декаметровой связи.

Объект исследования: программно-аппаратный комплекс однопозиционной системы частотного обеспечения с использованием в качестве зондирующего широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией вида FMICW, на основе использования технологии программно конфигурируемого радио, с возможностью совмещения комплекса с системой ближней декаметровой связи.

Предмет исследования: новые научные знания о методиках и алгоритмах цифрового синтеза и обработки широкополосных сигналов с применением псевдослучайной последовательности для передачи и приема FMICW сигнала на одну антенну, обеспечивающих максимальную энергию сжатого сигнала при ограниченной мощности его излучения, на основе использования прорывной технологии программно конфигурируемых радиосистем.

Научная новизна работы

1. Разработаны новые алгоритмы работы цифрового модема системы частного обеспечения в условиях передачи и приема зондирующего широкополосного сигнала вида FMICW на одну антенну, реализованные в новых пакетах прикладных программ.

2. Впервые научно обоснованы требования к параметрам сигнала вида FMICW на основе теоретического решения задачи его распространения на ионосферной линии связи. Установлено, что:

- применение в качестве переключающей функции периодических кодовых последовательностей с коэффициентом заполнения близким к 50% дают наименьшие потери энергии из-за разделения времени передачи и приёма и обеспечивают равномерный средний уровень отраженного сигнала в определенном диапазоне задержек;

- использование кодовых последовательностей, у которых период совпадает с временем анализа, создает уровень корреляционных шумов не менее -20дБ, а с периодом много меньше его не менее 56дБ;

3. Установлены аналитически и имитационным моделированием значения параметров последовательностей, позволяющих получить вариант решения задачи, когда слепая зона не препятствует приему сигнала, а диапазон однозначности соответствует области зондируемых высот.

4. Впервые разработан аппаратно-программный комплекс системы частотного обеспечения, реализованный по технологии SDR, а также методика частотного обеспечения для различных частотных планов систем связи, позволяющая в адаптивном режиме назначать оптимальные рабочие частоты, в условиях натуральных экспериментов, проведена ее верификация для случаев двухчастотного плана и плана для когнитивных систем связи.

Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Реализация однопозиционного режима работы с использованием широкополосных сигналов позволяет создать мобильный комплекс частотного обеспечения декаметровый связи с минимальными массогабаритными характеристиками, малым энергопотреблением и излучаемой мощностью. Его область применения может быть расширена на случай зондирования ионосферы в задаче исследования космической погоды.

2. Разработанные методики и алгоритмы могут являться базой для создания систем диагностики каналов связи в других частотных диапазонах.

3. Применение технологии программно-конфигурируемого радио в программно-аппаратном комплексе частотного обеспечения значительно упрощает решение задачи совмещения телекоммуникационных и измерительных систем, возникающей при создании систем когнитивного радио.

4. Применение алгоритмов частотного обеспечения, основанных на предварительном зондировании, позволит повысить надежность систем телекоммуникаций в декаметровом диапазоне.

5. Результаты, полученные автором, использованы при выполнении НИР в следующих организациях: Воронежский филиал ФГУП НПО «Дельта», АО «Марийский машиностроительный завод» Концерна ПВО «Алмаз-Антей», ООО «КВ-телеком», Поволжский государственный технологический университет, а также внедрены в учебный процесс в Поволжском

государственном технологическом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», что подтверждается полученными актами.

Методы исследования. Решение поставленных задач и получение основных научно-практических результатов базируется на методах математического анализа, вычислительной математики, спектрального анализа, статистической теории связи, теории распространения радиоволн в ионосфере. Кроме того, в рамках работы были применены методы численного моделирования с использованием пакетов прикладных программ, разработанных с использованием Mathcad, GNURadio. Основные теоретические результаты проверены путем макетирования, вычислительных, лабораторных и натуральных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм работы цифрового модема системы частного обеспечения на основе технологии SDR при использовании для диагностики многомерного канала связи сигналами вида FMICW, обеспечивающими передачу и прием на одну антенну.

2. Алгоритмы: цифрового синтеза комплексной огибающей сигнала вида FMICW в заданном диапазоне частот; синтеза псевдослучайных переключающих последовательностей с минимально возможным уровнем побочных составляющих; алгоритм поэлементного сжатия комплексной амплитуды сигнала вида FMICW и получения на основе сжатого сигнала оценки: ПЗМ (профиля задержки мощности), рассеяния по задержке и отношения сигнал/шум для упорядоченного множества возможных парциальных каналов связи.

3. Созданные новые пакеты прикладных программ, позволяющие реализовать разработанные алгоритмы с целью повышения помехоустойчивости систем ближней связи на основе зондирования радиоканала сигналами с линейной частотной модуляцией вида FMICW и применения прорывной технологии программно-конфигурируемого радио.

4. Разработанный аппаратно-программный комплекс системы частотного обеспечения, реализованный по технологии SDR, с учетом особенностей NVIS связи и одноантенного режима приема-передачи, а также результаты вычислительных и натуральных экспериментов.

Достоверность выводов и рекомендаций обеспечивается использованием адекватного математического аппарата, статистически достаточным набором экспериментальных данных, соответствием результатов, полученных путем аналитического и имитационного моделирования, результатам экспериментальных исследований, выполненных в рамках данной работы, а также проверкой на соответствие независимым выводам других авторов;

повторяемостью результатов на больших объемах экспериментальных данных.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях:

XIII, XX, XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, радионавигация, связь» (Воронеж, 2007, 2014, 2015); 13 и 14 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Москва, 2006, 2008); XXV Всероссийском симпозиуме «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 2007); LXIII Научной сессии, посвящённая Дню радио (Москва, 2008), XXI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Йошкар-Ола, 2005), Научной конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, и студентов Поволжского государственного технологического университета (Йошкар-Ола, 2005-2007, 2015); 11 региональной конференции по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 2005); V Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (Муром, 2015).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 работах, в том числе: 5 – в журналах, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. В работах [3 - 6, 8 - 12, 14, 20] проведена разработка алгоритма и техническая реализация системы зондирования ионосферы сигналом с линейно-частотной модуляцией, составляющей основу системы частотного обеспечения ближней дециметровый связи. В работах [13, 16 - 18] разработана вычислительная модель обработки сигнала для однопозиционного комплекса зондирования, на основе которой получены характеристики зондирующего сигнала. В работах [1, 7, 15] автор участвовал в проведении эксперимента и обработке полученных данных. Работы [2, 19, 21] выполнены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 85 наименований. Она изложена на 133 страницах машинописного текста, приведено 70 рисунков и 8 таблиц.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы и основные задачи диссертации, определена научная новизна, практическая ценность выполненных исследований.

Приведена структура диссертации, форма апробации и внедрения результатов.

В первой главе представлен анализ проблем распространения радиосигналов для ближней ионосферной декаметровая связи (КЗР), связанных с изменчивостью во времени параметров радиоканала из-за вариаций профиля электронной концентрации ионосферы (суточные, сезонные и др.). Показано, что преодоление негативных явлений в условиях КЗР связано с адаптацией параметров модемов связи к параметрам радиоканалов по результатам их панорамного вертикального зондирования (ВЗ) на принципах частотного обеспечения пользователей сети связи. Рассмотрены возможности применения для этих целей существующих ионозондов для ВЗ (с ФКМ и с непрерывными ЛЧМ (FMCW) сигналами). Показано, что они не в полной мере удовлетворяют условиям мобильности и энергопотребления диагностирующей аппаратуры. В этой связи предложено использовать для зондирования сигналы с FMCW (FMCW сигналы, с манипуляцией амплитуды псевдослучайными коммутующими функциями), прорывную технологию программно-конфигурируемого радио (SDR), а ионозонд реализовать на универсальной аппаратной платформе. Такие сигналы позволяют осуществлять их передачу и прием на одну антенну, а также излучать в эфир электромагнитные колебания минимальной мощности. SDR технология позволит совмещать в одной аппаратуре выполнение функций систем зондирования и декаметровой связи. Однако на сегодняшний день в этой области недостаточно научных знаний для реализации данного комплекса вопросов. Для устранения данного противоречия и создания системы частотного обеспечения декаметровой КЗР связи необходимо проведение научных исследований, научное обоснование и разработка алгоритмов, методик и создание специального программного обеспечения, позволяющего реализовать их с использованием SDR технологии и универсальной аппаратной платформы.

Во **второй главе** приводится решение вопроса разделения временных интервалов передачи и приема при условии минимальной потери энергии в задаче теоретического обоснования и анализа алгоритмов работы цифрового модема системы частного обеспечения.

Условия решаемой задачи: сигнал излучается и анализируется за время T_a , задержка сигнала в радиоканале (высота отражения от ионосферы) априори неизвестна, но известно, что она находится в диапазоне $\tau_g \in (\tau_m, \tau_M)$. Требуется выбрать сигнал, который бы обеспечивал максимальную энергию при минимальной мощности излучения, обеспечивал предельно возможную разрешающую способность по задержке отраженных

сигналов (их полосу частот) и позволял одновременно осуществлять передачу и прием сигнала на одну антенну. Очевидно, что требованиям к энергетике удовлетворяют «длинные» (непрерывные) сложные сигналы вида FMCW. Для однопозиционной работы их необходимо прерывать на прием. Тогда они приобретают вид FMICW.

В нашем случае рассматривался FMICW сигнал с ЛЧМ несущей. Решение задачи распространения сигнала в радиоканале с учетом его сжатия в частотной области в приемнике позволило получить формулу для спектра элемента длительностью T_a сжатого к разностной частоте сигнала в виде:

$$S_i(\hat{F}) = 0.5\sqrt{2P_T} H_{O_i}(f) \cdot \int_{t_n}^{t_n+T_a} [g(t - \tau_{gi}) - g(t) \cdot g(t - \tau_{gi})] \cdot \exp[j2\pi(F_i - \hat{F})t] \cdot dt \quad (1)$$

где $g(t)$ - двоичная переключающая функция передачи, $[1 - g(t)]$ - двоичная переключающая функция приема, τ_g - время задержки сигнала в радиоканале.

Максимальное значение спектра имеет вид:

$$\max[S_i(F_{ik})] = 0,5\sqrt{2P_T} \cdot H_i(f_k) \int_{t_k - \tau_{gi}}^{t_k + T_a - \tau_{gi}} g(t) \cdot [1 - g(t + \tau_{gi})] \cdot dt \quad (2)$$

Видно, что средняя амплитуда принимаемого FMICW сигнала (САПС) с ЛЧМ на его выходе, пропорциональна энергии взаимодействия переключающих функций, которую можно записать в виде:

$$E(\tau_g) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} g(\hat{t} - \tau_g) \cdot [1 - g(\hat{t})] d\hat{t} \quad (3)$$

Из (3) видно, что за время анализа T_a максимальной средней амплитудой $E_m=1$ обладает непрерывный FMCW сигнал, что, однако, делает невозможным одновременный прием и передачу сигнала на одну антенну. При 50% цикле приема-передачи (скважность процесса равна 2) среднее значение уменьшается вдвое, т.е. $\left\langle \frac{E(\tau_g)}{E_m} \right\rangle = 0,5$. Однако в этом случае имеют

место диапазоны задержек, для которых уровень сигнала близок или равен нулю (см. линию E1 на рис.1). Их можно назвать «слепыми» зонами. Для исключения в некотором диапазоне задержек «слепых» зон предложено для переключения использовать псевдослучайные последовательности (ПСП). Это могут быть: М-последовательность с периодом $T_s = T_a$ («длиннопериодическая») (при САПС 0,25), М-последовательность с

периодом $T_s \ll T_a$ (короткопериодическая) (см. линию $E2$), коротко периодические ПСП Salous (см. линию $E3$) и Barry (см. линию $E4$), представленные на рис. 1. Здесь t_b - длительность бита, N_b - число битов на периоде $T_s = t_b \cdot N_b$ ПСП.

Видно, что периодические ПСП обеспечивают в некотором диапазоне задержек, на 2-3 бита меньшем периода ПСП, практически постоянный уровень сигнала на выходе коррелятора. При этом интервал нарастания САПС определяет наименьшую задержку $\tau_m = m_b t_b$ (m_b - задержка в битах) наблюдаемого отраженного сигнала. Различия в САПС для перечисленных ПСП не превышают (10-20)%. Очевидно, что $\tau_M = (N_b - m_b)t_b$.

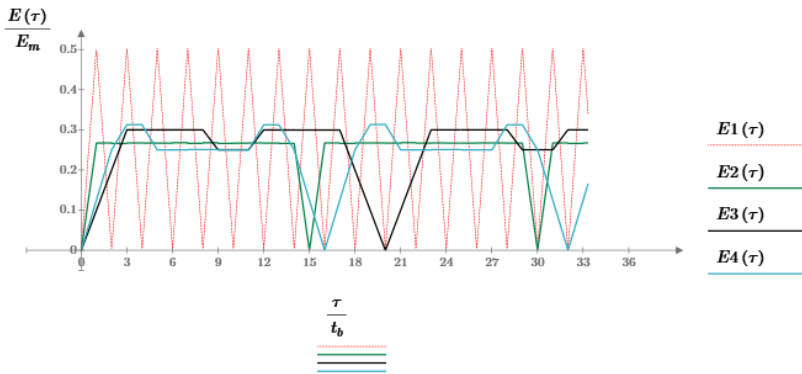


Рисунок 1 – Функция САПС при использовании в качестве переключающей функции: прямоугольных импульсов ($E1$ - красный), равной длительности; периодической М-последовательности длиной $N_b=15$ бит ($E2$ - зеленый) и периодических последовательностей Salous длиной $N_b=20$ бит ($E3$ - черный) и Barry ($E4$ - голубой) длиной $N_b=16$ бит.

В **третьей** главе проведено исследование частотно-временных характеристик излучаемого сигнала вида FMICW и сжатого отражённого сигнала, когда носителем является электромагнитное колебание с линейной частотной модуляцией. В начале, исследовалось внеполосное излучение из-за амплитудной ПСП манипуляции. Результаты расчетов для частот за пределами полосы сигнала представлены на рис. 2. Видно, что амплитудная манипуляция в FMICW сигнале с ЛЧМ приводит к существенному росту внеполосного излучения, являющегося помехой для других пользователей. В этой связи исследовался вопрос влияния сглаживающих фронты оконных функций, с половиной длительности, равной $t_b/2$.

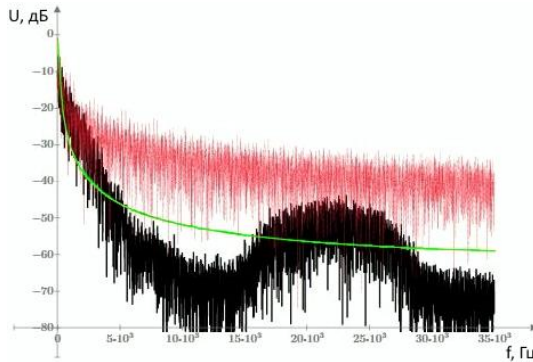


Рисунок 2 – Спектр «внеполосного» излучения FMICW сигнала с ЛЧМ: непрерывного (зеленый), с амплитудной манипуляцией М-последовательностью с прямоугольными фронтами (красный) и она же с фронтами, сглаженными функцией Хеннинга (черный).

В результате сглаживания функции передачи $g(t)$ и приёма $1-g(t)$ изменяются, преобразуясь в $g_T(t)$ и $g_R(t)$, соответственно, а функция $E(\tau_g)$ - в $E_{TR}(\tau_g)$. Данные, представленные на рис. 2 демонстрируют положительный эффект сглаживания. Так, в результате сглаживания фронтов функцией Хеннинга уровень шума понижается на 15-30 дБ.

Необходимо было исследовать величину эффекта сглаживания в зависимости от вида сглаживающей функции, от вида ПСП, а также их влияние на функцию САПС. Для этого была создана вычислительная модель. Расчеты внеполосного излучения показали, что все функции Хемминга, Хеннинга, Барлетта, Блэкмана и Наттала обеспечивают ослабление «внеполосного» излучения от -30 до -45 дБ при отстройке на 22 кГц. Существенные отличия наблюдаются при отстройке на 12 кГц, где лучшие результаты (подавление от -25 до -60 дБ) показывают функции Хеннинга и Блэкмана.

Результаты влияния на САПС оценивались коэффициентом потерь на периоде последовательности T_s из-за сглаживания, который задавался формулой:

$$w = 20 \log \sum_{\tau_g} E(\tau_g) - 20 \log \sum_{\tau_g} E_W(\tau_g), \quad (4)$$

где $E(\tau_g)$ - функция САПС без использования окон, $E_W(\tau_g)$ - функция САПС с использованием окон.

Результаты вычислений w для различных последовательностей и оконных функций представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициент усреднённых потерь w для различных последовательностей и оконных функций

Функция окна	w , дБ				
	Посл. Salous	Посл. Barry	М-посл. 7 бит	М-посл. 15 бит	М-посл. 32 бит.
Хемминг	1,8	2,4	5,6	5	4,8
Хеннинг	1,9	2,6	6,2	5,5	5,3
Барлетт	1,9	2,6	6,2	5,5	5,3
Блэкман	2,3	3	7,4	6,5	6,3
Натгал	2,5	3,3	8,3	7,3	7

Обобщая результаты проведенного анализа можно сделать вывод, что наибольшую эффективность обеспечивают функции Хеннинга и Блэкмана. Учитывая, что функция Хеннинга не много (см. таблицу 1) проигрывает функции Хемминга по потере средней амплитуды сигнала, можно сделать вывод, что использование функции Хеннинга предпочтительнее.

Особенностью FMICW сигнала с ЛЧМ является то, что для определения параметров канала сжатый по частоте сигнал разностной частоты подвергается спектральному анализу с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для сигнала, задержанного в радиоканале на время τ_g , разностная частота равна $F = \dot{f} \cdot \tau_g = \dot{f} \cdot 2h'/c$, где учтено, что задержка связана с отражением сигнала на некоторой виртуальной высоте h' . Это потребовало исследования вопроса влияния переключений на спектр сигнала разностной частоты. В частности, - на уровень корреляционных шумов и возникновение дополнительных спектральных линий, воспринимаемых как дополнительные отраженные сигналы. Анализировались случаи $T_s = T_a$ (ПСП - «длиннопериодическая») и $T_s \ll T_a$ (ПСП - «короткопериодическая»).

На рис. 3 представлены результаты расчета для случая $T_s = T_a$ и $T_a/T_s = 136,5$. Как и следовало ожидать, в первом случае в спектре сигнала разностной частоты дополнительные спектральные составляющие не возникают. В случае $T_s \ll T_a$ они появляются на частотах:

$$F + n \frac{1}{T_s}, \text{ где } n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Первой дополнительной линии («ложные» сигналы) будет соответствовать задержка $\tau_{1g} = \dot{f}/T_s$. Важно чтобы она превышала максимальную задержку из анализируемого диапазона (т.е. $\tau_{1g} > \tau_M$).

Обобщенные результаты теоретического анализа представлены на рис. 3.

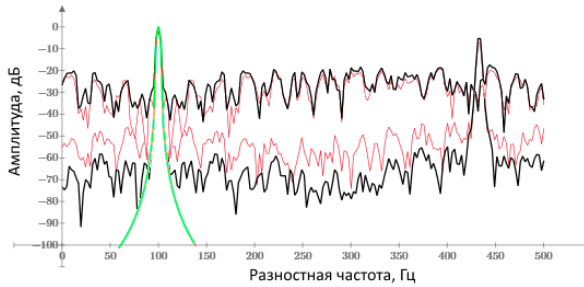


Рисунок 3 – Спектры сжатого непрерывного (зеленый) и FMICW сигнала: М-последовательности с $T_s = T_a$ (две верхние линии) и при $T_a / T_s = 136,5$ без весовой обработки (нижняя красная линия) и с весовой обработкой (черная линия)

Дополнительно установлено (см. рис.3), что сжатый FMICW сигнал с ЛЧМ при $T_s = T_a$ имеет высокий (до 20дБ) уровень корреляционных шумов, на который сглаживание не оказывает влияние. Это при оценке параметров канала по результатам его зондирования может приводить к ошибкам в оценке отношения сигнал/аддитивный шум, что является не приемлемым. В случае $T_s \ll T_a$ уровень корреляционных шумов значительно ниже и составляет -46 дБ без весовой обработки и -56 дБ - с весовой обработкой. Таким образом, для зондирования необходимо использовать «короткопериодические» ПСП, выбирая период последовательности и длину бита таким образом, чтобы избежать «слепых» зон и «ложных» сигналов в исследуемом диапазоне задержек. Заметим, что периодический характер отраженного сигнала в диапазоне задержек, вмещающем три скачка, позволяет иметь одну и даже две «слепых» зоны на этом интервале, выбранные с учетом этой периодичности. Кроме того, для увеличения τ_M можно снижать скорость перестройки ЛЧМ сигнала.

Далее исследовались особенности алгоритмов синтеза и обработки FMICW сигнала с ЛЧМ при использовании SDR технологии. Главная из них связана с тем, что все процедуры для сигналов дециметрового диапазона выполняются в цифровой форме и в комплексной плоскости. В начале, синтезируется комплексная амплитуда FMICW сигнала с применением переключающей функции $g_T(t)$. Затем спектр комплексной амплитуды переносится на несущую f_c и, путем суммирования, получается действительный FMICW сигнал. Он усиливается и через быстродействующий электронный переключатель прием-передача поступает на антенну. Сигнал отражается на различных высотах ионосферы, в зависимости от мгновенной частоты. Принимаемый той же антенной сигнал

поступает на переключатель и АЦП приемника. Далее он в смеси с аддитивным шумом трансформируется в комплексную амплитуду примерно из того же диапазона частот, что и в излучаемом сигнале. Затем она перемножается с комплексно-сопряженной амплитудой излучаемого сигнала и выделяется сигнал разностной частоты, для него находится спектр, который пропорционален импульсной характеристике канала. Это позволяет определить его профиль задержки мощность (ПЗМ) и оценить рассеяние по задержке во всех зондируемых каналах.

Из-за того, что спектр зашумлен аддитивными и корреляционными помехами, в случае существенного преобладания первых экспериментальный ПЗМ также позволяет оценить в нем отношение сигнал/шум. Информацию о многомерном канале дает ионограмма зондирования, представляющая растровое изображение упорядоченного по средним частотам f_{ck} ПЗМ парциальных каналов.

На рисунке 4 а, б представлены полученные в натурном эксперименте ионограмма (а) и ПЗМ (б) одного из каналов на частоте $f_{ck}=8,5$ МГц.

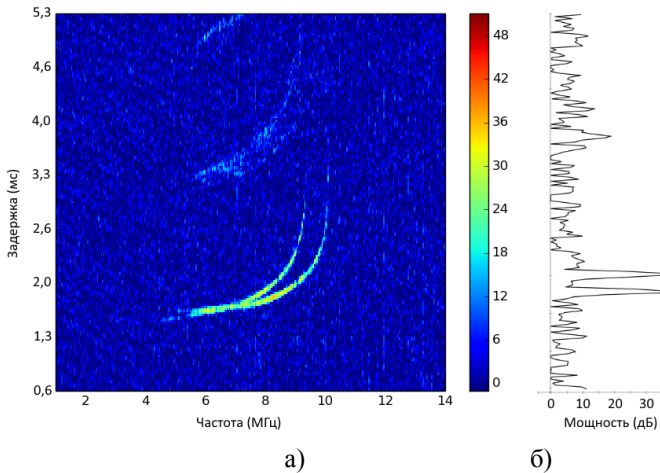


Рисунок 4 – а – ионограмма, б - ПЗМ одного из каналов с полосой 20 кГц на средней частоте 8,5 МГц

Ионограмма показывает, каким образом при изменении средней частоты канала меняется вид ПЗМ и позволяет оценить текущую полосу прозрачности линии связи. Цветом на ионограмме обозначается уровень сигнала, приходящийся на пиксел. Пики на графике ПЗМ соответствуют задержкам отражённого сигнала $\tau = \tau_{gm}$, которые для всего множества каналов представляют собой следы на ионограмме на синем фоне.

В четвертой главе представлена структура и программное обеспечение разработанного программно-аппаратного комплекса, а также результаты апробации методики частотного обеспечения.

Аппаратно-программный комплекс частотного обеспечения ближней декаметровый связи построен на основе универсальной платформы USRP N210. В диссертации было создано программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы. Выбранные параметры системы обеспечивали: область анализируемых задержек от 0,6мс до 6,7мс (что соответствует диапазону виртуальных высот от 90км до 1000км), диапазон зондирующих частот от 2МГц до 20МГц, разрешение по задержке 48 мкс, мощность излучаемого сигнала менее 10 Вт.

Для верификации математической модели и алгоритмов работы однопозиционной системы частотного обеспечения (ЧО) при диагностике радиоканала сигналом вида FMICW с ЛЧМ были проведены вычислительные и натурные эксперименты. Имитационная модель радиоканала предполагала линейную зависимость задержки от частоты в полосе прозрачности декаметровый линии связи.

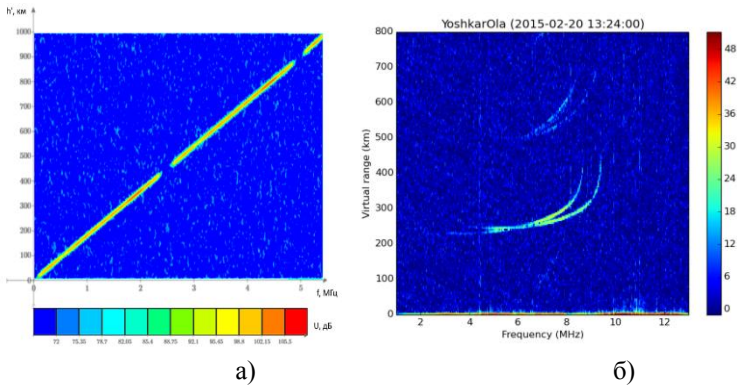


Рисунок 5 – а – ионограмма, полученная методом имитационного моделирования, б – реальная ионограмма

На рис. 5 а, б приведены, соответственно, ионограммы, полученные путем имитирования радиоканала и натурные ионограммы. В качестве переключающей здесь использовалась 15 битовая М-последовательность с $t_b = 0,2$ мс. Ионограмма на рис. 6а иллюстрирует «слепые» зоны и их диапазоны задержек. Для выбранных параметров ПСП «ложные отражения» не попадают в область анализируемых высот отражения (задержек). Для экспериментальной ионограммы путем выбора параметров ПСП «слепая» зона находится в районе 450км, где отраженный сигнал итак отсутствует. Результаты демонстрируют полное соответствие между результатами теории, численных расчетов и натуральных экспериментов.

Методика выбора оптимальных рабочих частот ближней декаметровой связи по результатам зондирования многомерного радиоканала FMICW сигналом с ЛЧМ учитывала существующие частотные планы систем декаметровой связи. Верификация методики осуществлялась для систем связи с двухчастотным планом и для условий когнитивного радио, в экспериментах, проведенных в июне 2011 года и марте 2015 года на трассах Йошкар-Ола – Яльчик, протяженностью 76 км и вертикальной Йошкар-Ола – Йошкар-Ола. Вторая трасса использовалась для сравнения полученных данных.

Установлено, что значение диагностики становится особенно важным для условий когнитивного радио, когда оптимальная частота связи (оптимальный парциальный канал) должны определяться в режиме реального времени для адаптации когнитивной системы. В этом случае определяются диапазоны ОРЧ (ДОРЧ), по значениям измеряемых ионозондом основных канальных параметров на всевозможных рабочих частотах, влияющих на вероятность ошибки системы связи. В разработанной системе - это отношение сигнал-шум и рассеяние по задержке. При этом критическим параметром является отношение сигнал-шум. Поэтому на первом шаге выбирается ДОРЧ с максимальным отношением. Из этого диапазона выбирается ОРЧ с минимальным рассеянием по задержке. По величине рассеяния по задержке и отношения сигнал-шум определяется модем, обеспечивающий ошибку передаваемого сообщения меньше заданной.

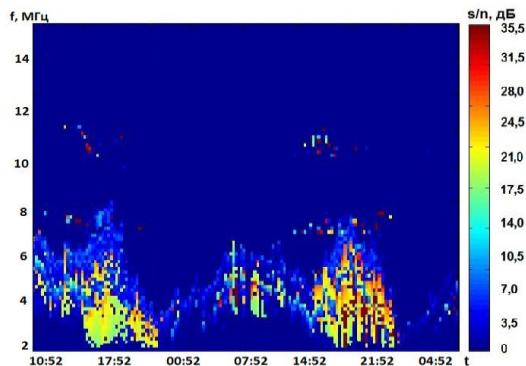


Рисунок 6- Суточный ход частотных зависимостей отношения сигнал/шум для радиолинии Яльчик – Йошкар-Ола

На рис. 6 представлен суточный ход отношения сигнал/шум в зависимости от частоты для радиолинии Яльчик – Йошкар-Ола. Аналогичный результат имел место и для трассы Йошкар-Ола - Йошкар-Ола. Экспериментальные данные иллюстрирует существенную изменчивость ключевого параметра в течении суток. ДОРЧ соответствуют темно красному

цвету. Видно, что в течение суток положение ДОРЧ на оси частот испытывает значительные вариации. Кроме этого, виден суточный ход диапазона прозрачности линии связи Яльчик – Йошкар-Ола. Итак, для обеспечения эффективной работы систем когнитивного радио необходимо использовать системы диагностики многомерного канала связи, т.к. результаты зондирования позволяют оценивать оперативное состояние многомерного ионосферного радиоканала и его параметры.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Главным результатом диссертационной работы является развитие методов и систем диагностики ионосферных радиоканалов для выбора в автоматическом режиме оптимальных рабочих частот связи, позволяющего повысить помехоустойчивость связи, обеспечить связь в регионах со сложным рельефом местности на радиолиниях до 400км и на основе SDR технологии создать возможность совмещения системы частотного обеспечения с системой декаметровой связи.

1. Использование системы частотного обеспечения для ближней декаметровой связи в регионах со сложным рельефом местности на основе использования вертикального зондирования многомерного радиоканала сигналами вида FMICW, универсальной аппаратной платформы, реализованной по технологии SDR, позволяет проводить оценку параметров парциальных каналов связи, в адаптивном режиме выбирать оптимальные из них и создает возможность совмещения системы частотного обеспечения с системой связи.

2. Теоретически обоснованы и исследованы алгоритмы работы цифрового модема системы частотного обеспечения на основе технологии SDR при использовании для диагностики многомерного канала связи сигналами вида FMICW, обеспечивающими передачу и прием на одну антенну. В том числе:

- алгоритм цифрового синтеза комплексной огибающей сигнала вида FMICW в заданном диапазоне частот;

- алгоритм синтеза псевдослучайных переключающих функций с минимально возможным уровнем побочных составляющих;

- алгоритм поэлементного сжатия комплексной амплитуды сигнала вида FMICW и получения на основе сжатого сигнала оценки: ПЗМ, рассеяния по задержке и отношения сигнал/шум для упорядоченного множества возможных парциальных каналов связи;

- алгоритм формирования дистанционно-частотной характеристики линии связи и оценки полосы прозрачности ионосферной линии декаметрового диапазона.

3. Теоретически обоснованы требования к параметрам сигнала вида FMICW на основе теоретического решения задачи его распространения на ионосферной линии связи. Установлено, что:

- применение в качестве переключающей функции периодических кодовых последовательностей с коэффициентом заполнения близким к 50% дают наименьшие потери энергии из-за разделения времени передачи и приема и обеспечивают равномерный средний уровень отраженного сигнала в определенном диапазоне задержек;

- использование кодовых последовательностей, у которых период совпадает с временем анализа, создает уровень корреляционных шумов не менее -20дБ, а последовательностей, у которых период много меньше времени анализа – -56дБ. Однако при этом в диапазоне зондируемых высот возникает несколько «слепых» зон и дополнительные сигналы;

- установлены аналитически и имитационным моделированием значения параметров последовательностей, позволяющих получить компромиссный результат, когда слепая зона не препятствует приему сигнала, а дополнительный сигнал выходит за область зондируемых высот.

4. Разработан аппаратно-программный комплекс системы частотного обеспечения, реализованный по технологии SDR, с учетом особенностей NVIS связи и одноантенного режима приема-передачи. На основе полученных алгоритмов создано программное обеспечение его работы. Разработана методика ЧО для различных частотных планов систем связи, позволяющая в адаптивном режиме назначать оптимальные рабочие частоты и в условиях натурных экспериментов проведена ее верификация для случаев двухчастотного плана и плана для программно конфигурируемой системы декаметрового диапазона.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых изложены в диссертации, можно сделать ряд обобщающих выводов и рекомендаций:

- Использование универсальной платформы как основы для разработанного аппаратно-программного комплекса системы ЧО позволят совмещать систему связи и систему ЧО на той же платформе, что открывает перспективы для использования полученных результатов в современных системах когнитивного радио.

- За счет малых габаритов и однопозиционного режима работы созданный комплекс обладает возможностью мобильного развертывания, что расширяет область применения результатов.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Статьи в журналах из перечня российских рецензируемых научных журналов

1. Глобальные вариации максимально применимых частот ВЧ радиолиний в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, **А.А. Елсуков**, А.Р. Лашевский, А.В. Мальцев, М.И. Рябова, И.Е. Царев // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2008. – № 3. – С. 21-27.

2. **Елсуков, А.А.** Синтез и анализ численной модели вертикального однопозиционного ЛЧМ ионозонда / А.А. Елсуков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – № 1. – С. 12-20.

3. Иванов, В.А. Разработка и испытание однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда с минимальной мощностью передатчика / В.А. Иванов, **А.А. Елсуков** // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – Т. 11, № 1. – С. 75- 81.

4. SDR-ионозонд с непрерывным ЛЧМ сигналом на платформе USRP / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Елсуков, М.И. Рябова, А.А. Чернов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы.. – 2013. – № 3. – С. 80-93.

5. Многомерный ионосферный радиоканал и связанные с ним проблемы работы модемов высокочастотной связи / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, Р.Р. Бельгибаев, А.А. Елсуков, М.И. Рябова, А.А. Чернов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы.. – 2014. – Т. 23, № 4. – С. 6-22.

Другие статьи и материалы конференций

6. Рябова, Н.В. Разработка имитационной модели вертикального ионозонда / Н.В. Рябова, **А.А. Елсуков** // Тезисы докладов 13-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. М., 2007. – Т. 1. – С. 127-129.

7. Рябова, Н.В. Разработка аппаратного комплекса зондирования ионосферы ЛЧМ сигналом / Н.В. Рябова, **А.А. Елсуков**, В.В. Павлов // Тезисы докладов 14-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – М., 2008. – Т. 1. – С. 101-102.

8. Рябова, Н.В. Определение критических значений частот и высот для вертикального ионозонда / Н.В. Рябова, **А.А. Елсуков**, В.М. Яшин // Тезисы докладов международной молодежной научной конференции XV Туполевские чтения. – Казань, 2007. – Т. 4. – С. 68-69.

9. Антенна для вертикального ЛЧМ ионозонда / Н.В. Рябова, В.В. Павлов, А.Н. Махмутов, **А.А. Елсуков** // Тезисы докладов региональной 11-й конференции по распространению радиоволн. – СПб., 2005. – С. 49-51.

10. Радиозондирование ионосферных каналов ВЧ связи. Методы и оборудование поволжского государственного технологического университета / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, М.И. Рябова, **А.А. Елсуков**, А.А. Чернов, Н.Н. Михеева, А.В. Зуев, А.Р. Лашевский, Р.Р. Бельгибаев // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», РРВ-24. – Иркутск, 2014. – Т. 1. – С. 38-45.

11. Особенности ЛЧМ-ионозонда, реализованного на базе USRP- и GNU-технологий. Сравнение с аналоговым ионозондом / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, М.И. Рябова, **А.А. Елсуков**, А.А. Чернов // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», РРВ-24. – Иркутск, 2014. – Т. 1. – С. 167-170.

12. Иванов, Д.В. Однопозиционный с одной антенной вертикальный ионозонд с непрерывным ЛЧМ сигналом на основе SDR технологии / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, **А.А. Елсуков** // Радиолокация, навигация, связь: XXI Международная научно-техническая конференция, Воронеж 14-16 апреля 2015 г. – Воронеж, 2015. – С. 1169-1176.

13. ЛЧМ ионозонд нового поколения на платформе USRP / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова, **А.А. Елсуков**, М.И. Рябова, А.А. Чернов // Сборник докладов XX международной НТК «Радиолокация, радионавигация, связь». – Воронеж, 2014. – С. 403-414.

14. Иванов, В.А. Теоретические исследования помехоустойчивости однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда / В.А. Иванов, **А.А. Елсуков**, А.В. Мальцев // Сборник докладов XIII международной НТК «Радиолокация, радионавигация, связь». – Воронеж, 2007. – Т. 3. – С. 2261-2270.

15. Прогнозирование регулярной компоненты критических частот основных ионосферных слоев по данным однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда / В.А. Иванов, **А.А. Елсуков**, М.И. Рябова, А.В. Мальцев, Н.В. Рябова // Сб. статей Международный Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. – Иркутск, 2007. – С. 121-123.

16. Иванов, В.А. Определение оптимальных параметров сигнала для однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда / В.А. Иванов, **А.А. Елсуков**, А.В. Мальцев // Труды российского научно-технического общества радиотехники электроники и связи имени А.С. Попова. – М., 2008. – Т. LXIII. – С. 311-313.

17. Моделирование однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда с минимальной мощностью излучения / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.Н. Махмутов, **А.А. Елсуков** // Распространение радиоволн: сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции. – Йошкар-Ола, 2005. – Т. 2. – С. 340-345.

18. Алгоритм работы однопозиционного вертикального ЛЧМ ионозонда с минимальной излучаемой мощностью / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, **А.А. Елсуков**, А.В. Мальцев // Сборник докладов XIII международной НТК «Радиолокация, радионавигация, связь». – Воронеж, 2007. – Т. 3. – С. 2250-2260.

Свидетельства о государственной регистрации разработки

19. **Елсуков А.А.** Tx Chirp – Программа синтеза непрерывного ЛЧМ сигнала для передатчика ионозонда на универсальной платформе USRP, версия 1.0, Программа 2015661639, 02.11.2015.

20. **Елсуков А.А.** Иванов В.А. LFSR Transmitter – Программа синтеза диагностирующего ЛЧМ сигнала и переключающей M-последовательности для передатчика однопозиционного ионозонда на универсальной платформе USRP, версия 1.0, Программа 2015661708, 06.11.2015.

21. **Елсуков А.А.** Chirp Demod – Программа моделирования алгоритма демодуляции диагностирующего непрерывного ЛЧМ сигнала для реализации технологии программно-конфигурируемого радио на универсальной платформе USRP, версия 1.0, Программа 2015661709, 06.11.2015.

ЕЛСУКОВ Алексей Александрович

**ОДНОПОЗИЦИОННАЯ СИСТЕМА ЧАСТОТНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ДЕКАМЕТРОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО**

Специальность:

05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ____.____.201___. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Суг.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № ____.
ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный
технологический университет»
Центр оперативной полиграфии
424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3