

На правах рукописи



Бельгибаев Руслан Рашидович

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ
ЛИНИИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОДЕМОВ УЗКОПОЛОСНОЙ
КВ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПАССИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность:

05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Йошкар-Ола, 2018

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Иванов Дмитрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Дмитриев Александр Сергеевич**, доктор
физико-математических наук, профессор
ФБГУН «Институт радиотехники и
электроники имени В. А. Котельникова РАН»
г. Москва, зав. отделом Института
радиотехники и электроники имени В. А.
Котельникова РАН.

Фрейман Владимир Исаакович кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» г. Пермь,
профессор кафедры «Автоматика и
телемеханика»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский Технический
Университет Связи и Информатики»
г. Москва

Защита диссертации состоится «26» апреля 2018 г. в 13 часов на
заседании объединенного диссертационного совета Д 999.028.03 на базе
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ», ФГБОУ ВО «Марийский
государственный университет», ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
технологический университет» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса,
31/7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
национального исследовательского технического университета им. А.Н.
Туполева-КАИ и на сайте КНИТУ-КАИ (<http://old.kai.ru/science/dissert/>).

Автореферат разослан «21» февраля 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор техн. наук, доцент



С.В. Козлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе представлена и решена актуальная научно-техническая задача развития технологии когнитивной КВ связи путем разработки комплекса для оценки состояния ионосферной линии и каналов дальней КВ связи, а также показателей качества модемов узкополосной КВ связи на основе создания пассивного зонда и совмещения его с системой связи. Разработан метод, алгоритм действия и аппаратурное решение пассивного зонда. Разработаны адаптивные алгоритмы оценки актуальных параметров многомерного КВ канала и определения оптимального парциального канала, а также методика и алгоритм оценки его доступности для различных модемов и каналов связи. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность применения разработанного метода и алгоритмов пассивного зондирования многомерного канала КВ связи в части полученного выигрыша по энергетике для системы связи и увеличения скорости передачи информации. Представлены результаты сравнительного анализа эффективности для среднеширотных и высокоширотных линий дальней КВ связи.

Актуальность темы. Системы ближней и дальней КВ связи работают в одном из самых сложных радиоканалов – ионосферном, из-за изменчивости среды и флуктуирующей многолучевости. Считается, что по этой причине связь обладает недостаточной надежностью и скоростью передачи информации. Поэтому в настоящее время она отнесена к резервному виду, а основной в стране является спутниковая связь. Однако, с течением времени происходит переоценка значимости дальней связи на коротких волнах. Связано это с пониманием уязвимости спутниковых систем связи в случае возможных конфликтов и с выявившимися проблемами ее использования на высоких широтах из-за малых углов прихода, при том, что освоение полярных областей приобретает преобладающую значимость для экономики и обороноспособности страны.

По этой и ряду других причин в настоящее время в мире наблюдается значительный интерес к совершенствованию систем КВ связи путем изучения характеристик многомерного ионосферного радиоканала и их связей с параметрами КВ модемов. Разрабатываются подходы к созданию когнитивной КВ связи, требующей, как обязательное условие, развития систем диагностики многомерного канала, значение которых для повышения качества КВ связи еще недооценено. Однако очевидно, что чем менее известны характеристики изменчивого канала, тем большие энергетические запасы у системы связи, связанные с увеличением мощности и уменьшением скорости передачи, следует создавать для обеспечения требуемого качества.

Одной из причин такого положения дел является разрозненность информации о последних достижениях в области моделирования и диагностики многомерного КВ радиоканала. Недостаточно представлена

информация о новациях в области систем диагностики и об эффективности их использования для повышения показателей качества систем КВ связи.

Степень разработанности темы. Ионосферный радиоканал является многомерным, т.к. включает упорядоченное множество парциальных частотных каналов. Ионосферный радиоканал относится к каналам с замираниями и поэтому характеризуется функцией рассеяния с параметрами: отношение сигнал/шум; рассеяние по задержке и рассеяние по частоте. В пространстве с такими координатами, состояние канала будет отображаться точкой. Из-за временной изменчивости ионосферы параметры многомерного канала меняются и меняется его кондиционность. Это требует создание адаптивных систем управления работой систем КВ связи.

Модемы КВ связи характеризуются функциями производительности с параметрами, соответствующими параметрам канала. Если состояние канала удовлетворяет функции производительности модема, то канал для данного модема является доступным и в нем возможна работа системы. Изменчивость канала требует мониторинга всех парциальных каналов с целью оценки их состояний и установления доступности. В этой связи нами исследовалась задача определения каналов с максимальной доступностью, для улучшения энергетики линии связи и скорости передачи информации на основе применения пассивного зонда, совмещенного с аппаратурой связи.

Нестабильность состояния декаметровых каналов радиосвязи приводит к искажениям принимаемого сигнала и ухудшают помехоустойчивость ВЧ радиосистем. В настоящее время решение данной проблемы идет по двум направлениям. Первое связано с проектированием систем, учитывающих основные физические особенности линии связи. Другое – с созданием адаптивных (когнитивных) систем, в которые включаются системы диагностики сложной среды распространения, основанные на применении метода радиозондирования ионосферы.

Первое направление привело к развитию моделей распространения сигналов по ионосферным линиям связи. Вклад в развитие моделей узкополосных и широкополосных каналов внесли Р.А. Bello, W.D. Bensema, J. Hoffmeyer, J.R. Juroshek, L. Vogler, С.С. Watterson, Н.Н. Зернов.

В создание систем диагностики среды при помощи методов радиозондирования, оценки на этой основе параметров каналов радиосвязи и цифровую обработку сигналов внесли вклад Н.П. Данилкин, Д.В. Иванов, В.А. Иванов, В.И. Куркин, А.П. Потехин, Н.В. Рябова, О.Н. Шерстюков, А.Д. Акчурин, С.А. Колесник, В.П. Дворкович, А.В. Дворкович, Ю.А. Чернов, G.H. Barry, S. Salous, A.W. Pool, P.S. Cannon.

Актуальной проблемой является организация устойчивой радиосвязи для цифровых радиотехнических систем (РТС). Мобильность системы цифровой декаметровой радиосвязи и системы диагностики каналов ставит жесткие требования к габаритам и энергопотреблению системы частотного обеспечения. Существующие ионозонды малоприспособны для этих целей из-за

существенных материальных затрат на их изготовление, довольно внушительных габаритов и энергопотребления. Реализация программными средствами на базе стандартного связного приемника устройства, позволяющего выполнять функции пассивного ЛЧМ зондирования создает условия для совмещения систем. Для реализации на его основе сигнала панорамного ионозонда, осуществляющего зондирование многомерного канала, требуется разработка алгоритмов цифровой обработки зондирующего ЛЧМ сигнала, его поэлементном сжатии во временной области для оценки параметров всех каналов декаметрового диапазона СВ. Таким образом, существует острая необходимость в получении новых знаний о пассивном ЛЧМ зондировании в задаче оценки показателей качества модемов СВ связи, с другой стороны этому препятствует недостаточный уровень изученности задачи обработки узкополосного ЛЧМ сигнала с нулевой начальной частотой и отсутствие алгоритмов оценки основных канальных параметров по такому сжатому сигналу.

Цель работы: разработка, научное обоснование и исследование комплекса алгоритмов, методик и программ для оценки состояния ионосферного радиоканала и повышения показателей качества модемов СВ связи на основе пассивного зондирования.

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

1. Обосновать необходимость оценки состояния парциальных каналов СВ связи и показателей качества модемов на основе данных зондирования. Анализ преимуществ пассивного зондирования многомерного СВ канала непрерывным ЛЧМ сигналом для оценки состояния.

2. Научно обосновать и проанализировать алгоритмы работы системы пассивного зондирования, позволяющей осуществлять оценку состояния линии СВ связи, основных канальных параметров при использовании пассивного метода.

3. Исследовать корректность алгоритмов на основе вычислительного эксперимента для построения алгоритма определения доступности радиоканала и качества модемов при использовании пассивного метода

4. Разработать программно-аппаратный комплекс для оценки текущих параметров множества парциальных каналов и показателей качества последовательных модемов СВ связи на основе пассивного зондирования. Обосновать возможность его совмещения с действующими системами связи. Провести верификацию алгоритмов в натурных экспериментах по исследованию доступности каналов и повышению показателей качества (используемой мощности системы связи и скорости передачи информации по каналу) при использовании текущих данных о канале. Экспериментально показать возможности разработанного комплекса при анализе линий связи на средних и высоких широтах.

Объект исследования: программно-аппаратный комплекс для оценки состояния ионосферной линии и показателей качества модемов узкополосной

КВ связи с использованием совмещенного пассивного зонда. Характеристики различных парциальных КВ каналов для задачи адаптивного выбора оптимального для заданного модема связи.

Предмет исследования: новые научные знания о методиках и алгоритмах поэлементной цифровой обработки широкополосного ЛЧМ сигнала с учетом особенностей пассивного зондирования многомерного канала и реализацией возможности совмещения его с аппаратурой системы связи (перенос на нулевую среднюю частоту при помощи алгоритма обработки в связном приемнике, весовая обработка сжатого зондирующего ЛЧМ, определение упорядоченного по рабочей частоте множества ПЗМ канала, разработка методик определения основных канальных параметров для обеспечения адаптивного режима работы системы, оценка доступности множества парциальных каналов, оценка эффективности методов и алгоритмов для снижения мощности связного сигнала и повышения скорости передачи информации). Сравнение эффективности для среднеширотных и высокоширотных линий КВ связи.

Научная новизна работы

1. Показано что развитие когнитивной КВ связи требует разработки методов диагностики, среди которых преимуществом обладает пассивное зондирование.

2. Предложены и обоснованы алгоритмы пассивного зондирования КВ радиоканала, отличающиеся применением сверхширокополосного ЛЧМ сигнала, алгоритмов его поэлементной обработки на основе связного приемника, алгоритмов цифровой обработки изображений позволяющие оценивать полосу прозрачности радиолинии и частотную зависимость отношения сигнал-шум (SNR).

3. Разработана математическая модель системы пассивного зондирования с учетом особенностей канала, формы сложного зондирующего сигнала и возможностей его согласованной обработки, позволившая создать: методику пересчета SNR и алгоритмы оценки рассеяния по задержке и рассеяния по доплеровской частоте в канале.

4. Создан новый алгоритм оценки доступности радиоканала для выбора оптимального модема КВ связи.

5. Разработан программно-аппаратный комплекс пассивного зондирования на базе стандартного связного приемника, позволяющий:

- оценивать полосу прозрачности радиолинии и частотную зависимость SNR ;
- производить оценку рассеяния по задержке и рассеяния по доплеровской частоте в парциальном канале;
- производить выбор оптимального радиоканала для повышения качества работы модемов КВ связи при использовании разработанного алгоритма оценки доступности радиоканала.

- произвести верификацию алгоритмов в натуральных экспериментах при определении каналов с максимальной доступностью на протяженных наклонных трассах с различной географической ориентацией для различного времени суток и сезонов.

Практическая ценность и реализация результатов работы

1. Реализация метода пассивного зондирования с использованием стандартного приемника РТС позволяет интегрировать систему связи и зондирования в одном устройстве с минимальными массогабаритными характеристиками и малым энергопотреблением. Его область применения может быть расширена на случай зондирования ионосферы для задач исследования космической погоды.

2. Разработанные методики и алгоритмы могут быть применены для создания систем диагностики каналов в других частотных диапазонах.

3. Применение технологии пассивного зондирования в программно-аппаратном комплексе системы цифровой КВ связи позволяет упростить решение задачи совмещения коммуникационных и диагностических систем, возникающей при создании систем когнитивной радиосвязи.

4. Применение разработанных алгоритмов определения основных канальных параметров при помощи пассивного ионозонда, позволяет повысить показатели качества модемов цифровой декаметровый радиосвязи.

5. Результаты, полученные автором, использованы при выполнении НИР в следующих организациях: Воронежский филиал ФГУП НПП «Дельта», ООО «КВ-телеком», Поволжском государственном технологическом университете, а также внедрены в учебный процесс в Поволжском государственном технологическом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и «Радиотехника», 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. Также, в рамках работы применены методы численного моделирования с использованием пакетов прикладных программ РТС Mathcad 15.0, РТС Mathcad Prime 3.1, Agilent SystemVue 2011.03. Основные теоретические результаты проверены путем макетирования, а также в вычислительных, лабораторных и натуральных экспериментах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы пассивного зондирования КВ радиоканала, отличающиеся применением сверхширокополосного ЛЧМ сигнала, алгоритмов его поэлементной обработки на основе связного приемника, алгоритмов цифровой обработки изображений позволяющий оценивать полосу прозрачности радиолинии и частотную зависимость SNR .

2. Алгоритмы определения основных канальных параметров (отношения сигнал/шум, рассеяния по задержке и рассеяния по доплеровской частоте) с использованием экспериментальных данных о частотных зависимостях профиля задержки мощности канала связи. Методика пересчета SNR для зонда на отношение сигнал/шум для модема связи.

3. Алгоритм оценки доступности радиоканала для выбора оптимального модема КВ связи и условий адаптивной актуализации параметров канала.

4. Разработанный программно-аппаратный комплекс пассивного зондирования для оценки текущих параметров множества парциальных каналов и показателей качества модемов КВ связи.

5. Новые данные натуральных и вычислительных экспериментов по определению доступных радиоканалов при наклонном распространении в различное время суток, в разные сезоны года на дальних среднеширотной и высокоширотной КВ трассах.

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:

Международной научно-технической конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов» (Казань, 2017); International Pre-Conference Workshop «Nonlinear wave structures in complex continuous media including atmosphere, hydrosphere and space plasma» (Kazan, 2017); Социальные, естественные и технические системы в современном мире: состояние, противоречия, развитие «Восемнадцатые Вавилонские чтения» (Йошкар-Ола, 2015); X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу - творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2015); XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Иркутск, 2014); XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Йошкар-Ола, 2011); Научной конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, и студентов Марийского государственного технического университета (Йошкар-Ола, 2007-2009, 2015-2017); Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и XII Конференции молодых ученых (Иркутск, 2011); Поволжской региональной молодежной

конференции «Волновые процессы в средах» (г. Казань - г. Зеленодольск, 2007);

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, в том числе: 6 – в журналах, рекомендованных ВАК, 2 – в изданиях, входящих в базу данных SCOPUS, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

Личный вклад автора.

В работах [2,4,6,9-12] проведена разработка алгоритмов и техническая реализация пассивного зондирования КВ радиоканала, для оценки полосы прозрачности радиолинии и частотной зависимости SNR ионосферы. Автором разработаны алгоритмы [2,5,8,14-17] определения основных канальных параметров (отношения сигнал/шум, рассеяния по задержке и рассеяния по доплеровской частоте) с использованием экспериментальных данных о частотных зависимостях профиля задержки мощности канала связи. Создана методика пересчета SNR для зонда на отношение сигнал/шум для модема связи и алгоритм оценки доступности радиоканала для выбора оптимального модема КВ связи и условий адаптивной актуализации параметров канала [1,5,8,13]. В работах [1,3,6,7,18,19] автор участвовал в проведении эксперимента, обработке полученных данных и их интерпретации. Работы [9,15,16] выполнены автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 104 наименований. Она изложена на 124 страницах машинописного текста, приведено 55 рисунков и 21 таблица.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, приведена степень разработанности темы, сформулирована цель работы и основные задачи диссертации, определена научная новизна и практическая ценность выполненных исследований. Приведена структура диссертации, апробация и внедрение полученных результатов

В **первой главе** дан анализ проблем распространения радиосигналов в ионосферной линии КВ радиосвязи. Основные проблемы связаны с изменчивостью во времени параметров радиолинии из-за изменчивости во времени профиля электронной концентрации ионосферы (суточные, сезонные и т.д.). По географическому положению радиотрассы принято разделять на экваториальные или низкоширотные, среднширотные, субавроральные и высокоширотные. На основе проведенного анализа показано, что интегральной характеристикой узкополосного декаметрового радиоканала является функция рассеяния радиоканала (ФРК), учитывающая параметры рассеяния по величине группового запаздывания (задержки) σ_m , рассеяния по доплеровской частоте σ_{dn} и отношения сигнал-шум SNR . Указано, что преодоление негативных условий возможно с помощью панорамного и канального зондирования многомерного парциального радиоканала.

Современные ионозонды на сложных сигналах представляют собой специализированные приемо-передающие устройства. Это требует существенных материальных затрат на их изготовление и размещение. Поэтому в работе была высказана гипотеза о возможности преодоления этой проблемы путем использования метода пассивного зондирования. Его преимущества заключаются в том, что в этом случае нет необходимости в создании специализированного приемного терминала ионозонда, поскольку имеется возможность использования серийных приемников системы связи. Излучение зондирующего сигнала может осуществляться либо передатчиками существующих зондов, либо передатчиком ионозонда, развернутого в центре связи. Однако, пассивный ЛЧМ ионозонд не позволяет проводить оценку текущих параметров множества парциальных каналов и показателей качества модемов КВ связи. Исследование данной гипотезы требует развития метода пассивного наклонного зондирования непрерывным ЛЧМ сигналом, создания алгоритмов и программ для его реализации, а также их верификации в натурных экспериментах. Для устранения данного противоречия и создания системы частотного обеспечения и оценки показателей качества модемов КВ связи необходимо проведение научных исследований, научное обоснование, разработка алгоритмов, методик и создание специального программного обеспечения, позволяющего реализовать их на стандартной связной аппаратуре.

На основе проведенного анализа сформулирована цель работы и определены задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** развит метод пассивного зондирования многомерного КВ радиоканала, разработаны и обоснованы алгоритмы: поэлементной согласованной обработки сверхширокополосного ЛЧМ сигнала для получения информации о частотной зависимости ПЗМ, цифровой обработки изображений для оценки частотной зависимости SNR и полосы прозрачности радиолинии.

Пусть для приема сигнала используется связной приемник с полосой пропускания $B_S = 3 \text{ кГц}$, настроенный на частоту $\omega = \bar{\omega}_i$, и выделяющий боковую полосу. Такой приемник выделяет в принимаемом сигнале ЛЧМ импульс, длительностью $T_S = 2\pi B_S / \dot{\omega} \approx 30 \text{ мс}$ с частотой от $\omega_{i1} = \bar{\omega}_i - \pi B_S$ до $\omega_{i2} = \bar{\omega}_i + \pi B_S$.

Учитывая, что начало отсчета времени происходит от чирп-тайм (времени, когда начальная частота ЛЧМ сигнала равнялась нулю), введем следующие моменты времени:

$$\hat{t}_{i1} = \omega_{i1} / \dot{\omega}, \quad \hat{t}_{i2} = \omega_{i2} / \dot{\omega}, \quad \bar{\hat{t}}_i = \bar{\omega}_i / \dot{\omega}. \quad (1)$$

Таким образом, выделенный на частоте $\bar{\omega} = \bar{\omega}_i$ узкополосный ЛЧМ сигнал можно представить в виде:

$$u_R(\bar{\omega}_i, t) = \begin{cases} \sqrt{2P} \cdot H_0(\bar{\omega}_i) \cdot \cos \frac{\dot{\omega}}{2} (\hat{t} - \tau_g(\bar{\omega}_i))^2 & \forall \hat{t} \in [\hat{t}_{i1}, \hat{t}_{i2}] \\ 0 & \forall \hat{t} \notin [\hat{t}_{i1}, \hat{t}_{i2}] \end{cases}, \quad (2)$$

База выделенного элемента ЛЧМ сигнала составляет $D = \dot{\omega} T^2 / 2\pi \approx 70$.

Синхронно с излучаемым ЛЧМ сигналом будем менять частоту настройки приемника с шагом $B = 100 \text{ кГц}$. Учтем, что время достижения частотой ЛЧМ сигнала частоты настройки приемника равно $\bar{t}_i = t_{ch} + \bar{\omega}_i / \dot{\omega}$.

Учитывая шаг сетки частот, для индекса частоты настройки получим:

$$i = \frac{\bar{\omega}_i}{2\pi B} = \frac{\dot{\omega} (\bar{t}_i - t_{ch})}{2\pi B}. \quad (3)$$

Переключение на новую частоту должно произойти заранее. Поэтому запишем его в виде:

$$t_{nep} = \bar{t}_i - t_0 = t_{ch} + \bar{\omega}_i / \dot{\omega} - t_0, \quad (4)$$

где t_0 – время упреждения.

Очевидно, что должно выполняться условие:

$$\frac{B_S}{\dot{\omega}} < t_0 < \frac{B}{\dot{\omega}}. \quad (5)$$

Переключая в соответствии с сеткой частоту настройки приемника, будем иметь упорядоченное множество ПЗМ:

$$PDP = \{PDP(i)\}. \quad (6)$$

Согласованная фильтрация узкополосных элементов на сетке несущих при приеме сверхширокополосного сигнала с линейной частотной модуляцией осуществляется двухканальным корреляционным методом. Сигнал на выходе системы сжатия можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} |U_{RT}(\bar{\omega}_i, \tau)|^2 &= I^2 + Q^2 = k_{RT}^2 |h(\bar{\omega}_i, \tau)|^2 = \\ &= 2PT^2 \cdot H_0^2(\bar{\omega}_i) \cdot \sin^2 \left(\frac{T\dot{\omega}(\tau - \tau_g)}{2} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

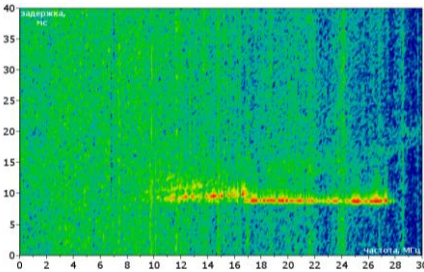


Рисунок 1 – Ионограмма профиля задержки-мощности

По результатам цифровой согласованной обработки сигнала со входа приемника формируется ионограмма или изображение упорядоченного по средним частотам $\bar{\omega}_i$ ПЗМ каналов (рис. 1).

Ионограмма профиля задержки-мощности состоит из: полезного сигнала, фонового шума, сосредоточенных помех и одиночных выбросов. Для определения полосы

прозрачности радиолинии и основных канальных параметров необходимо произвести разделение сигнала и шума, позволяющее оценить их отношение. Для этого используются цифровые методы обработки изображений (очистка изображения от шума). В диссертации на этот случай развита новая методика определения частотной зависимости отношения сигнал/шум на основе медианного эквалайзирования, позволяющая совместно с методом моментов выделять элементы изображения, содержащие сигнал. Этот подход позволяет также получить оценку полосы прозрачности зондируемой линии КВ связи (размерности многомерного канала). Предположим, что шум является квази-белым, то есть его спектральная плотность постоянна в полосе частот элемента ЛЧМ сигнала. В таком случае амплитуда шума распределена по закону Релея. Решая интегральное уравнение для распределения Релея, найдем, что мощность шума в заданной полосе равна 1,44 медианного значения отсчетов в столбце ионограммы. Проводя обнуление столбцов по этому значению и удаляя оконным методом одиночные выбросы, мы получим

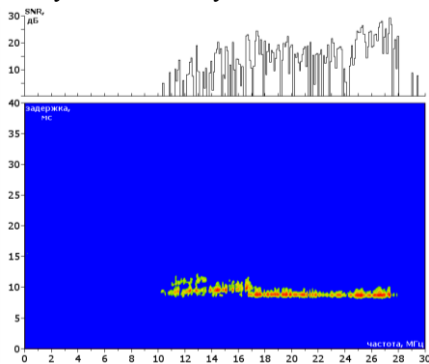


Рисунок 2 – Очищенная ионограмма профиля задержки-мощности и график частотного отношения сигнал/шум

частотную зависимость (в виде ионограммы) профиля задержки-мощности пригодную для определения полосы прозрачности радиолинии и частотной зависимости отношения сигнал/шум для каждого элемента многомерного радиоканала (рис.2).

Таким образом, в результате проведенных во второй главе исследований создано научное обоснование методик и алгоритмов пассивного зондирования при помощи связного приемника для оценки полосы прозрачности и частотной зависимости SNR .

В третьей главе проведена разработка математической модели системы пассивного зондирования с учетом особенностей канала, формы сложного зондирующего сигнала и возможностей его согласованной обработки, позволившая создать: методику пересчета SNR , алгоритмы оценки рассеяния по задержке и рассеяния по доплеровской частоте в канале. Создана методика и разработан новый алгоритм оценки доступности радиоканала для выбора оптимального парциального канала для заданного модема или оптимального модема КВ связи для заданного канала.

Сигнал на выходе системы сжатия представляет собой $sinc$ функцию, которая отличается сравнительно высоким уровнем боковых лепестков. Для устранения подобного недостатка применяют оконные методы обработки

сигнала. Кроме того, необходимо соблюсти условие максимального ослабления уровня боковых лепестков при сохранении допустимой разрешающей способности по задержке. В этой связи исследовался вопрос сглаживания фронтов сигнала различными оконными функциями. Проведенные исследования показали, что этим условиям удовлетворяет весовая обработка гаусс-окном длительностью $0,21 \cdot T$ фронтов опорного сигнала.

В практических целях отношение сигнал/шум, полученное для зонда (SNR_S), необходимо пересчитывать в отношении сигнал/шум для системы связи (SNR_C). Оценим SNR_C для параллельного 39-тонового модема, удовлетворяющего стандартам. В полосе канала 2,4 кГц можно выделить 39 подканалов полосой 61 Гц для каждого тона. Тогда длительность одной посылки будет составлять $\tilde{T}_C = 2/61 \approx 33 \text{ мс}$. Энергия одной посылки будет равна $\tilde{E}_C = P_C \Pi \tilde{T}_C$ (где Π - потери при распространении, P_C - мощность посылки). Из-за наличия защитного интервала (для подавления эффекта межсимвольной интерференции) длительность посылки, а, следовательно, и энергия уменьшается на 5 мс или на 15%. Поэтому энергия будет равна $\tilde{\tilde{E}}_C = 0,85 \cdot P_C \Pi \tilde{T}_C$. Значит, для параллельного модема $SNR_C = 2\tilde{\tilde{E}}_C / n_0 = 2 \cdot 0,85 P_C \Pi \tilde{T}_C / n_0$. Для ЛЧМ сигнала $SNR_S = 2E_S / n_0 = 2P_S \Pi T_S / n_0$. Тогда при условии равенства отношений SNR для двух систем, получим:

$$\tilde{P}_C = P_S T_S / 0,85 \tilde{T}_C = P_S \cdot 0,82 \approx P_S . \quad (8)$$

Для случая интерферирующих мод рассеяние по задержке оценивается нами на основе среднего ПЗМ по уровню -6 дБ. Используемые нами оценки доплеровского рассеяния основаны на анализе работ А. J. Stocker, E. M. Warrington и D. R. Siddle из University of Leicester (UK), где представлены данные о параметрах рассеяния, полученные за период 2002 - 2003гг. и 2009 - 2012гг. на трансполярных и среднеширотных радиотрассах. Рассчитанный коэффициент корреляции между рассеянием по задержке и доплеровским рассеянием для всех типов радиоканалов приведенных в этих работах равен $R(\sigma_m, \sigma_{dn}) = 0,8$. Поэтому была высказана гипотеза существования регрессионной связи между ними по параболическому закону (рис.3):

$$\sigma_{dn} [\text{Гц}] = f(\sigma_m) = K_0 + K_1 \sigma_m [\text{мс}] + K_2 \sigma_m^2 [\text{мс}^2] \quad (9)$$

где, $K_0 = 1,55 [\text{Гц}]$, $K_1 = -0,24 [\text{Гц/мс}]$, $K_2 = 0,33 [\text{Гц/мс}^2]$.

Данная зависимость позволяет по определенным с помощью метода пассивного зондирования рассеяния по задержке σ_m оценить доплеровское рассеяние σ_{dn} . Доступность радиоканала есть мера долговременного

использования радиоканала с учетом энергетических резервов системы связи, и строиться на усредненных значениях параметров канала полученных за

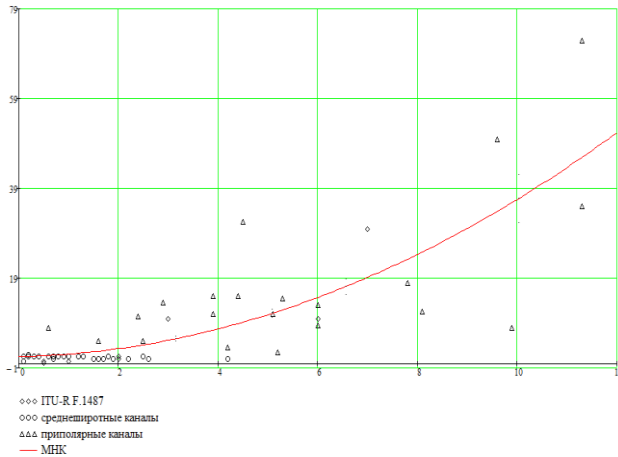


Рисунок 3 – Регрессия доплеровского рассеяния от задержки

определенный промежуток времени. Обычно канал называется доступным для данного модема, если точка состояния принадлежала параллелепипеду, аппроксимирующему характеристическую функцию модема (ХФМ), более 80% времени наблюдения (сеанса связи).

Данное значение выбрано с учетом коррекции ошибок при передаче

информации. Положим, что каналные параметры распределены по закону Гаусса со средним значением \bar{A} и СКО σ . Нетрудно убедиться, что вероятность превышения некоторого заданного значения η_m будет выше 80% при условии:

$$\bar{\eta}_m < \bar{A} + \sigma. \tag{10}$$

Таким образом, формула (10) позволяет оценивать доступность канала по параметрам закона распределения для измеряемых канальных параметров

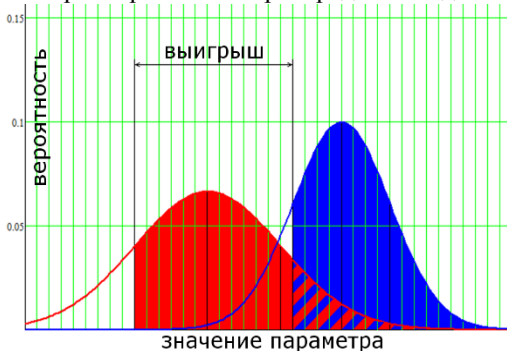


Рисунок 4 – Выигрыш в канальных параметрах на разных рабочих частотах

и отношения сигнал/шум, когда параметры распределения удовлетворяют неравенствам: $SNR_n \geq SNR_0$, $\sigma_m \leq \sigma_{\tau 0}$, $\sigma_{dn} \leq \sigma_{d0}$.

Подход к оценке максимально возможного выигрыша в канальных параметрах представлен на рис 4.

Закрашенные области соответствуют вероятности 80%. Красный цвет

соответствует распределению параметров в канале на первой рабочей частоте, а синий – на второй. Как видно из рисунка, указанный на нем интервал определяет выигрыш в канальных параметрах для системы связи при работе на второй частоте. Его длина равна сумме разностей средних значений и СКО двух распределений.

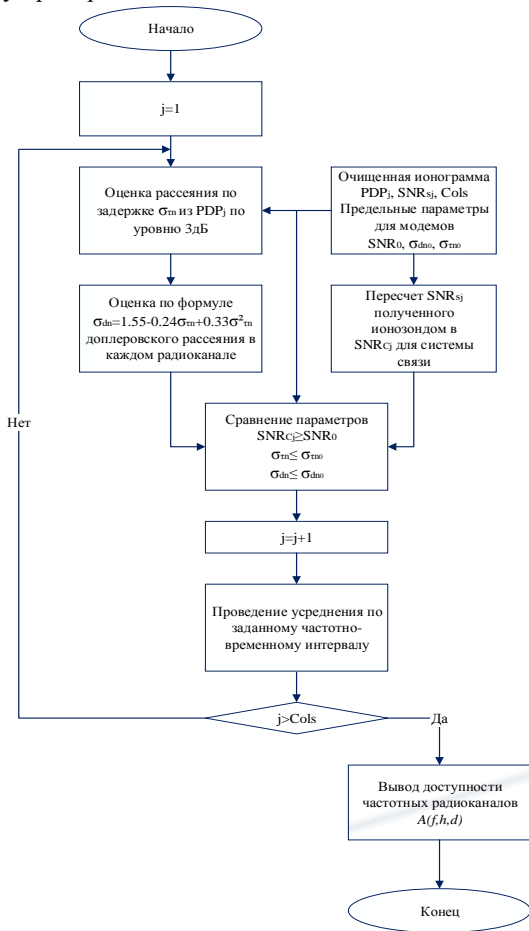


Рисунок 5 – Алгоритм оценки доступности радиоканала

В стандартах STANAG 4285, STANAG 4539 и MIL-STD-188-110B приведены предельные значения отношения сигнал/шум SNR_0 , рассеяния по задержке (σ_{m0}) и доплеровского рассеяния (σ_{db0}) для различных скоростей передачи данных KB модемами.

Для учета вышеприведенных параметров в доступности радиоканала нам необходимо произвести их учет в условиях предельных параметров, определяемых этими стандартами (см. рис. 5).

Итак, проведенное в данной главе исследование дает практическую основу для выполнения вычислительных и натурных экспериментов по определению основных параметров узкополосных примыкающих радиоканалов, на основе их пассивного зондирования ЛЧМ сигналом.

В четвертой главе представлен разработанный программно-аппаратный комплекс пассивного зондирования на базе стандартного связного приемника, а также результаты апробации методики оценки текущих параметров радиолинии, параметров рассеяния и выбора оптимальных каналов.

Проведена его верификация на натуральных экспериментах по определению каналов с максимальной доступностью при наклонном распространении в различное время суток и соответствующих сезонам года на радиотрассах с различной географической ориентацией и протяженностью.

Аппаратно-программный комплекс построен на основе связанного приемника IC-78, производства фирмы ICOM. В рамках диссертационного исследования было создано программное обеспечение, реализующее разработанные алгоритмы. Выбранные параметры системы обеспечивали диапазон анализируемых задержек от 0 до 40 мс (что соответствует длине радиотрасс до 12000 км), диапазон зондирующих частот от 2 МГц до 30 МГц.

Блок-схема и внешний вид разработанного в ПГТУ устройства для пассивного зондирования многомерного ВЧ радиоканала представлена на рис. 6. Блоки, изображенные фиолетовым цветом, разработаны диссертантом непосредственно.

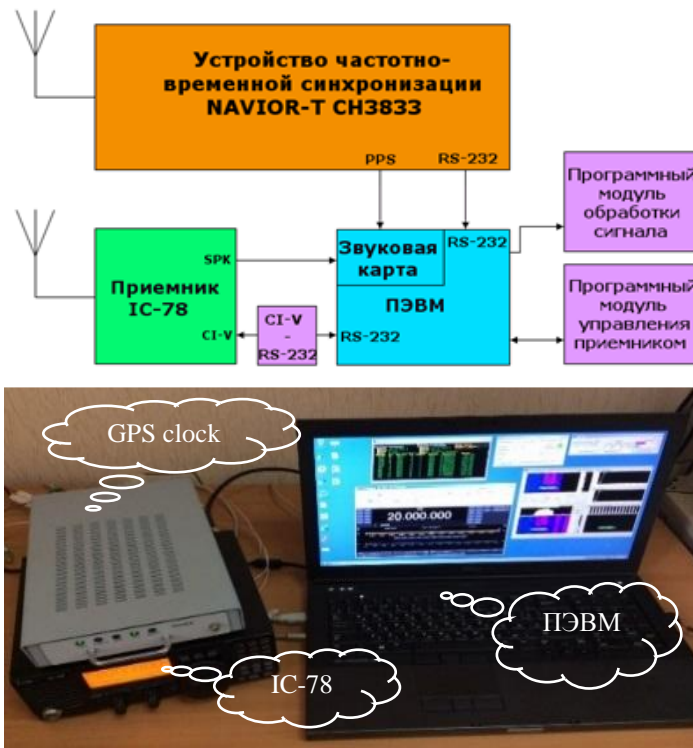


Рисунок 6 – Блок-схема и внешний вид комплекса пассивного ЛЧМ ионозонда

Принимаемый ЛЧМ сигнал переносится на нулевую частоту приемником IC-78. С выхода приемника сигнал оцифровывается звуковой картой ПЭВМ, после чего над ним осуществляется двухканальная корреляционная обработка модулем обработки сигнала. Устройство частотно-временной синхронизации NAVIOR-T CH3833 обеспечивает синхронизацию ПЭВМ со шкалой единого мирового времени и выдачу секундных импульсов для синхронной перестройки приемника с заданным шагом частоты модулем управления приемником. Преобразователь уровня CI-V – RS-232 обеспечивает сопряжение логических уровней ПЭВМ и приемника IC-78.

По предложенным методикам было произведено исследование доступности радиоканалов на 2 радиотрассах: среднеширотной о.Кипр – г.Йошкар-Ола протяженностью 2623км и приполярной п.Диксон – г.Йошкар-Ола протяженностью 2367 км. Выборка охватывает все сезоны года для среднеширотной радиотрассы и переходные сезоны – для приполярной; ионограммы снимались круглосуточно с периодом 5 минут. Всего было обработано 5184 ионограммы.

В рассматриваемые периоды уровень геомагнитной активности показывал низкие значения и слабую изменчивость своих суточных ходов. Это позволяет сделать заключение о слабом влиянии геомагнитной возмущенности на значения электронной концентрации ионосферы, а, следовательно, и на характеристики ионосферного радиоканала. Полученные в результате обработки экспериментальные данные о рассеянии по задержке показали, что они находятся в диапазоне от 0 до 2,5 мс. Согласно корреляционному анализу доплеровское рассеяние не превышало 3 Гц. Таким образом, параметры рассеяния удовлетворяют предельным значениям для модемов со скоростями до 2400 бод. Следовательно, в условиях проведенных экспериментов критическим являлся параметр *SNR*.

Проведенные исследования количества возможных для зондируемой линии связи парциальных каналов с полосой 3 кГц для двух трасс показали, что на среднеширотной радиотрассе о.Кипр – г.Йошкар-Ола можно организовать значительно больше каналов с полосой 3 кГц, чем на приполярной радиотрассе п.Диксон – г.Йошкар-Ола. Это связано с меньшей возмущенностью среды на данной трассе (см. таблицу 1).

Таблица 1 - Количество парциальных каналов с полосой 3 кГц

Трасса	Сезон	Количество парциальных каналов с полосой 3 кГц	
о. Кипр – г.Йошкар-Ола	Весна	2159	6715
	Лето	1493	6449
	Осень	1083	7242
	Зима	1200	7234
п.Диксон – г.Йошкар-Ола	Осень	1255	3449
	Весна	1635	5391

Экспериментальные исследования с применением разработанного в диссертации программного обеспечения позволили получить данные о зависимостях доступности двух парциальных каналов от времени суток и сезонов года. Оценки проводили по усредненным значениям доступности в частотно-временном окне размером 500 кГц и 1 час. По полученным зависимостям для дальнейшего анализа были выделены два канала: первый (И_ОРЧ) имел доступность выше 80%, а второй соответствовал рабочей частоте 0,85МПЧ (Ф_ОРЧ). Для первого и второго каналов анализировалась разница SNR , разница СКО для них и выигрыш в SNR при работе в первом канале. Обобщенные данные для трассы о.Кипр – г.Йошкар-Ола приведены в таблице 2, а для трассы п.Диксон – г.Йошкар-Ола - в таблице 3

Таблица 2 - Выигрыш в SNR для трассы о.Кипр – г.Йошкар-Ола от применения пассивного зондирования

	Средние по сезонам разницы параметров		Выигрыш
	ΔSNR	$\Delta \sigma_{SNR}$	$\Delta SNR + \Delta \sigma_{SNR}$
Весна	4,7	2,3	7,0
Лето	1,9	2,4	4,3
Осень	7,9	4,1	12
Зима	5,3	4,0	9,3

Полученные данные позволили сделать вывод, что выигрыш в SNR при работе системы связи на среднеширотной трассе на первой частоте, а, следовательно, выигрыш в излучаемой мощности при неизменной скорости передачи информации, составляет 4,5-12 дБ.

Таблица 3 - Выигрыш в SNR для трассы п.Диксон – г.Йошкар-Ола от применения пассивного зондирования

	Средние по сезонам разницы параметров		Выигрыш
	ΔSNR	$\Delta \sigma_{SNR}$	$\Delta SNR + \Delta \sigma_{SNR}$
Осень	4,96	1,41	6,37
Весна	3,97	0,78	4,75

На высокоширотной трассе выигрыш в излучаемой мощности при неизменной скорости передачи информации составляет 4,75-6,37 дБ. Наблюдаемые отличия результатов, полученных на двух трассах можно объяснить большим значением коэффициента поглощения энергии сигнала в нижней ионосфере высоких широт. Эти данные свидетельствуют о том, что мощность связных передатчиков для КВ связи в приполярных и полярных регионах должна быть выше примерно в 5 - 10 раз, чем в среднеширотных регионах.

Аналогичные исследования по оценке выигрыша в скорости передачи информации при неизменной мощности системы связи при работе в первом или втором канале позволяет повысить скорость передачи данных при работе в первом радиоканале до двух раз по сравнению со вторым радиоканалом.

Представленные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность применения разработанного метода и алгоритмов пассивного зондирования многомерного канала КВ связи в части полученного выигрыша по энергетике для системы связи и увеличения скорости передачи информации. Они имеют большое значение для развития технологии когнитивного КВ радио.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Главным результатом диссертационной работы является решение важной научно-технической задачи разработки комплекса для оценки состояния ионосферной линии и показателей качества модемов узкополосной КВ связи на основе пассивного зондирования для обеспечения их эффективного функционирования, а также разработки методов совмещения телекоммуникационных, измерительных и управляющих систем.

К числу научно - технических результатов, сформулированных в диссертации, относятся:

1. Показано что развитие когнитивной КВ связи требует разработки методов диагностики, среди которых преимуществом обладает пассивное зондирование.

2. Предложен метод и обоснованы алгоритмы пассивного зондирования КВ радиоканала включающие:

- алгоритмы поэлементной обработки сверхширокополосного ЛЧМ на основе связного приемника;

- алгоритмы цифровой обработки изображений частотных зависимостей ПЗМ;

- алгоритмы оценки частотной зависимости SNR и полосы прозрачности радиолинии.

3. Разработана математическая модель системы пассивного зондирования с учетом особенностей канала, формы сложного зондирующего сигнала и возможностей его согласованной обработки. На базе ее созданы:

- алгоритмы оценки рассеяния по задержке, рассеяния по доплеровской частоте и методика пересчета SNR для модемов систем КВ связи;

- алгоритм оценки доступности радиоканала для выбора оптимального модема КВ связи;

- методика оценки выигрыша в излучаемой мощности скорости передачи информации при работе в канале И_ОРЧ, по сравнению с Ф_ОРЧ.

4. Разработан программно-аппаратный комплекс, совмещаемый с системой связи на основе метода пассивного зондирования многомерного КВ канала для оценки состояния радиолинии и показателей качества модемов. В экспериментах по верификации метода и алгоритмов установлено, что:

- при работе системы связи на среднеширотной трассе в оптимальном парциальном канале выигрыш в излучаемой мощности при неизменной скорости передачи информации, составляет 4,5-12 дБ;

-при работе системы связи на высокоширотной трассе выигрыш в излучаемой мощности при неизменной скорости передачи информации составляет 4,75-6,37 дБ, что объясняется большим значением коэффициента поглощения энергии сигнала в нижней ионосфере высоких широт;

- выигрыш в скорости передачи информации при неизменной мощности системы связи при работе в оптимальном канале увеличивается примерно в два раза;

- при работе системы связи в высоких широтах мощность связанных передатчиков должна быть выше в 5 - 10 раз, чем на средних широтах.

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:

- разработанные методы, алгоритмы и совмещенная аппаратура открывает возможности их применения для развития технологии когнитивного КВ радио в отечественной дальней связи;

- разработанный аппаратно-программный комплекс за счет возможности совмещения может быть применен в действующих системах КВ связи, что расширяет область применения результатов.

- применение метода, алгоритмов действия и аппаратурных решений пассивного зондирования многомерного КВ канала позволяет существенно снизить мощность связанного сигнала и повысить скорость передачи.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Оценка доступности частотных каналов для различных модемов КВ-связи на основе пассивного зондирования многомерного ионосферного радиоканала / Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., **Бельгибаев Р.Р.** // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2017. – № 2 (34). – С. 39-53.

2. Система частотного обеспечения на основе пассивного зондирования многомерного КВ-радиоканала / **Бельгибаев Р.Р.**, Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2016. – № 2 (30). – С. 52-63.

3. Влияние радио блэкаута на частотную ёмкость линии декаметрового КВ-связи / **Бельгибаев Р.Р.** // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 4 (23). – С. 23-34.

4. Многомерный ионосферный радиоканал и связанные с ним проблемы работы модемов высокочастотной связи / Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., **Бельгибаев Р.Р.**, Елсуков А.А., Рябова М.И., Чернов А.А. // Вестник

Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 4 (23). – С. 6-22.

5. Определение основных параметров многомерного коротковолнового радиоканала с использованием панорамного ионозонда // Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Лашевский А.Р., **Бельгибаев Р.Р.**, Елсуков А.А., Мальцев А.В., Павлов В.В., Рябова М.И., Чернов А.А. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 2. – С. 15-23.

6. Автоматическое обнаружение работы и поддержание синхронизации станций в мировой сети ЛЧМ ионозондов / **Бельгибаев Р.Р.**, Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – № 2. – С. 3-12.

Публикации в иностранных изданиях, входящих в базу данных SCOPUS:

7. Engineering development of passive ionosonde to study the effect of the blackout on HF communication / **R. Belgibaev**, D. Ivanov, V. Ivanov, N. Ryabova, M. Ryabova // Journal of applied engineering science. – 2016. – №4. – vol.14. – pp. 493-501.

8. Processing signals of passive chirp ionosonde in the problem of estimation the HF channel availability(Conference Paper) / **Belgibaev, R.R.**, Ivanov, D.V., Ivanov, V.A., Ryabova, N.V. // SINKHROINFO 2017, 3-4 July 2017, IEEE, №7997501, Kazan, Russia.

Свидетельства о государственной регистрации разработки

9. **Бельгибаев Р.Р.** Tx Chirp – 2ChannelCorrel – Модель двухканальной корреляционной обработки сигнала в системе компьютерной алгебры MathCad 15.00, версия 1.0, Программа 2017614972, 02.05.2017.

10. **Бельгибаев Р.Р.**, Иванов В.А., Иванов Д.В. ChirpIGU – Программный модуль для обработки ионограмм, версия 1.0, Программа 2017614048, 05.04.2017.

11. **Бельгибаев Р.Р.**, Иванов В.А., Иванов Д.В. ChirpSPU– Программа для обнаружения и согласованной обработки узкополосного ЛЧМ сигнала, версия 1.0, Программа 2015661709, 06.11.2015.

Публикации в других изданиях, входящих в базу данных РИНЦ:

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

13. Краткосрочная оценка состояния радиолинии на основе пассивного ионозонда / Иванов В.А., Иванов Д.В., **Бельгибаев Р.Р.** // В книге: Взаимодействие полей и излучения с веществом тезисы Международной

Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и XII Конференции молодых ученых. – 2011. – С. 73-74.

14. Автоматическая оценка МПЧ - радиолинии пассивным и активным ЛЧМ – ионозондом/Иванов В.А, **Бельгибаев Р.Р.**, Лашевский А.Р.// В сборнике: Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» Йошкар-Ола, 2011, т.1 с.345-349

15. Пассивное зондирование многомерного ионосферного КВ радиоканала / **Бельгибаев Р.Р.** // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. – 2017. – № 5. – С. 39-51.

16. Алгоритм оценки частотной емкости многомерного КВ-радиоканала методом пассивного зондирования/ **Бельгибаев Р.Р.**// Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. – 2016. – № 4. – С. 36-41.

17. Автоматическая оценка МПЧ радиолинии цифровым ионозондом на базе USRP SDR-приемника / Ширшова К.А., **Бельгибаев Р.Р.** // В сборнике: Научному прогрессу - творчество молодых материалы X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. Поволжский государственный технологический университет. – 2015. – С. 86-87.

18. Влияние внезапных ионосферных возмущений на размерность многомерного ионосферного радиоканала / **Бельгибаев Р.Р.** // В книге: Социальные, естественные и технические системы в современном мире: состояние, противоречия, развитие. Восемнадцатые Вавиловские чтения Материалы международной междисциплинарной научной конференции: В 2 частях. Под общей редакцией В.П. Шалаева. – 2015. – С. 310-312.

19. Автоматическая оценка МПЧ-радиолинии пассивным и активным ЛЧМ-ионозондами / Ширшова К.А., **Бельгибаев Р.Р.** // В книге: Социальные, естественные и технические системы в современном мире: состояние, противоречия, развитие. Восемнадцатые Вавиловские чтения Материалы международной междисциплинарной научной конференции: В 2 частях. Под общей редакцией В.П. Шалаева. – 2015. – С. 339-341.

Диссертант



Р.Р. Бельгибаев

Бельгибаев Руслан Рашидович

**КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ЛИНИИ
И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МОДЕМОВ УЗКОПОЛОСНОЙ КВ
СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПАССИВНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность:

05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.02.2018. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 248.

Поволжский государственный технологический университет
424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «Принтекс»
Республика Марий-Эл, г. Йошкар-Ола, бул. Победы, 14