

на правах рукописи

РЯБОВА Наталья Владимировна

**РАДИОМОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ**

**Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства радионавигации, радиолокации и телевидения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Казань, 2004

Работа выполнена на кафедре радиотехнических и медико-биологических систем
Марийского государственного технического университета

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Куницын Вячеслав Евгеньевич
доктор технических наук, профессор
Орлов Игорь Яковлевич
доктор физико-математических наук, профессор
Сидоров Владимир Васильевич

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Защита состоится 30 сентября 2004года в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, физический факультет, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан «18» августа 2004года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.081.18
доктор физико-математических наук

А.В. Карпов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одной из важнейших задач радиомониторинга является повышение надежности работы радиосистем, использующих в своем составе линии связи с постоянно меняющимися характеристиками. Именно такая ситуация характерна для радиотехнических систем (РТС) декаметрового (ДКМ) диапазона радиоволн (дальней радиосвязи, загоризонтной радиолокации, радиопеленгации и радионавигации), радиосигналы которых распространяются в ионосфере Земли, подверженной постоянным пространственно-временным вариациям, и принимаются на фоне комплекса изменяющихся помех. Системные характеристики декаметровых каналов (передаточная и импульсная функции), а, следовательно, и их параметры, такие как рабочая частота, полосы конструктивной и деструктивной интерференции, полоса когерентности, память канала, отношение сигнал/шум и др., подвержены влиянию изменяющихся условий распространения радиоволн на линии связи. Игнорирование или слабый учет изменчивости во времени и пространстве характеристик ионосферных радиоканалов существенно снижает информационно-технические параметры РТС (помехоустойчивость, надежность, скрытность, скорость передачи информации, мощность излучения и др.) и представляет собой общую проблему как для существующих, так и для создаваемых систем.

Радиомониторинг и прогнозирование состояния радиоканалов и радиоканалов, а также характеристик помех позволяет выбирать для работы помехоустойчивые каналы и настраивать информационно-технические характеристики РТС ДКМ диапазона на оптимальные значения. Проведенные за рубежом и в стране испытания показывают, что такой подход приводит к резкому повышению надежности работы радиосистем. Однако анализ используемых в стране средств оперативной диагностики канальных параметров свидетельствует о том, что они не позволяют измерять наиболее важные для работы РТС ДКМ диапазона характеристики радиолиний и каналов, отчего их эффективность не соответствует современным требованиям.

Анализ также показал, что в настоящее время наиболее совершенным средством исследования изменчивости ионосферы является ионозонд с непрерывным линейно-частотно-модулированным сигналом, занимающим полосу частот 3-30 МГц (ЛЧМ-ионозонд), который обладает повышенной точностью, чувствительностью в силу использования сигнала со сверхбольшой базой (10^{10}) и оптимальных методов обработки. Однако применение непрерывных ЛЧМ сигналов для решения проблемы радиомониторинга и прогнозирования характеристик ионосферных радиолиний и радиоканалов и выбора на этой основе помехоустойчивых каналов требует проведения теоретических и экспериментальных исследований. В первую очередь необходимо более детально рассмотреть вопросы прохождения сложных зондирующих сигналов с учетом комплекса помех в радиоканале, включающем ионосферную линию связи и каналообразующую аппаратуру; провести на основе этих исследований научное обоснование методов, алгоритмов и средств для измерения, исследований и прогнозирования радиотехнических характеристик ионосферных радиоканалов, а также информационно-технических характеристик РТС по результатам наклонного зондирования радиолиний непрерывными линейно-частотно-модулированными сигналами. Необходимо, чтобы разработанные алгоритмы могли быть реализованы в автоматическом режиме работы ионозонда. В

этой связи требуют разработки методы и алгоритмы автоматического обнаружения и выделения зондирующих сигналов из комплекса помех на выходе системы сжатия ЛЧМ ионозонда, методы пространственной фильтрации изображений ионограмм наклонного ЛЧМ зондирования радиолиний. Необходимо научно обосновать и проверить в натурных экспериментах методики определения большинства основных радиотехнических характеристик радиолиний и каналов по результатам вторичной обработки, результатов зондирования, развить радиотехнические подходы к оценке информационно-технических характеристик (ИТХ) РТС по данным ЛЧМ ионозонда, а также методы краткосрочного прогнозирования, базирующиеся на результатах предсеансового зондирования ионосферы.

В существующей ситуации разработка, исследование и совершенствование методов радиомониторинга и краткосрочного прогнозирования помехоустойчивых радиоканалов на базе наклонного зондирования ионосферных радиолиний с помощью ЛЧМ ионозонда представляют собой актуальную научную проблему, решению которой и посвящена диссертационная работа. Нерешенность в стране данной проблемы негативно отражается на надежности работы РТС ДКМ диапазона и сдерживает развитие и применение перспективных высокоэффективных радиосистем.

Цель работы состоит в решении научной проблемы теоретического обоснования и разработки методов определения радиотехнических характеристик ионосферных радиоканалов и оптимальных информационно-технических характеристик для радиотехнических систем передачи информации, позволяющих повысить их эффективность. Главным элементом проблемы является радиомониторинг и прогнозирование помехоустойчивых каналов методами теоретического и экспериментального исследования распространения в ионосфере декаметровых радиосигналов с линейной частотной модуляцией.

Задачами данной работы являются

1. Теоретический анализ прохождения непрерывного ЛЧМ сигнала в ионосфере с учетом взаимодействия сигналов со средой распространения и влияния комплекса помех на радиотехнические характеристики зондирующих сигналов на выходе системы их сжатия в частотной области. Теоретическое обоснование метода и разработка комплексного алгоритма выделения сигнала из помех на выходе системы сжатия и на ионограммах радиолиний различной протяженности. Проведение экспериментальных исследований статистических характеристик сжатых в частотной области ЛЧМ сигналов и эффективности метода их выделения;

2. Разработка радиотехнического метода, использующего радиозондирование ионосферных радиолиний непрерывным ЛЧМ сигналом для определения структурных функций многолучевых радиоканалов и их параметров. Теоретическое обоснование метода определения по результатам наклонного зондирования ионосферы АЧХ многолучевой радиолинии. Проведение экспериментальных исследований статистических характеристик основных параметров АЧХ в частотных диапазонах с различными моделями многолучевости;

3. Разработка радиотехнического метода автоматического определения по результатам ЛЧМ зондирования ДКМ радиолинии для различных рабочих частот текущих информационно-технических характеристик РТС передачи информации (отношения сигнал/шум, мощности связного сигнала, скорости передачи информации, диапазона рабочих частот);

4. Теоретическое обоснование и разработка методик определения помехоустойчивых каналов для различных РТС ПИ ДКМ диапазона. Проведение экспериментальных исследований оптимальных ИТХ при работе в помехоустойчивых ионосферных радиоканалах и в каналах одномодового распространения дальних радиолоний. Разработка на основе результатов радиозондирования методики адаптации ИТХ к оптимальным значениям для помехоустойчивых каналов;

5. Теоретическое обоснование метода автоматического краткосрочного прогнозирования характеристик магистральных радиолоний с использованием подходов теории управления. Теоретическое исследование разделения предикторной функции на регулярную и остаточную компоненты. Проведение экспериментальных исследований: для определения характеристик фильтрации предикторной функции при удовлетворении остаточной компоненты критериям случайности; оценки энергетики случайной компоненты; исследования точностных характеристик метода автоматического краткосрочного прогноза (в том числе для радиолоний, не обеспеченных системами радиомониторинга); анализа эффективности радиомониторинга.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории статистической радиотехники, распространения радиоволн в ионосфере, теории распознавания образов, теории автоматического управления, а также технология математического моделирования и вычислительного эксперимента. Натурные исследования проведены с применением метода наклонного зондирования ионосферы, уникального инструмента – ЛЧМ ионозонда и с использованием сети ЛЧМ ионозондов, покрывающих радиолониями, протяженностью от 2,6 до 5,7 Мм, территории Западной Европы и Сибири.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы определяются использованием адекватного математического аппарата, достаточным и статистически достоверным набором экспериментальных данных, полученных за период с 1990 г. по 2003 г., их соответствием результатам вычислительных экспериментов, а также проверкой на соответствие выводам других авторов.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод теоретического анализа прохождения непрерывного ЛЧМ сигнала в ионосфере с учетом взаимодействия сигналов со средой распространения и влияния комплекса помех на радиотехнические характеристики зондирующих сигналов на выходе системы их сжатия в частотной области. Экспериментальные и теоретические законы распределения этих сигналов и их статистические параметры. Метод и комплексный алгоритм выделения сжатого сигнала из помех и выделения мод сигнала на ионограммах радиолоний различной протяженности, его теоретическое обоснование и результаты экспериментальной апробации;

2. Радиотехнический метод, использующий радиозондирование ионосферных радиолоний непрерывным ЛЧМ сигналом для определения структурных функций многолучевых радиоканалов и их параметров. Теоретическое обоснование метода определения по результатам наклонного зондирования ионосферы АЧХ многолучевой радиолонии. Результаты экспериментальных исследований статистических характеристик основных параметров АЧХ в частотных диапазонах с различными моделями многолучевости;

3. Радиотехнический метод автоматического определения по результатам ЛЧМ зондирования ДКМ радиолинии для различных рабочих частот текущих информационно-технических характеристик РТС передачи информации (отношения сигнал/шум, мощности связанного сигнала, скорости передачи информации, диапазона рабочих частот);

4. Методика определения помехоустойчивых каналов для различных РТС ПИ ДКМ диапазона и их теоретическое обоснование. Экспериментальные характеристики помехоустойчивых радиоканалов в диапазонах однодогового распространения дальних радиолиний и параметры оптимальных ИТХ для РТС ПИ. Методика адаптации ИТХ к оптимальным значениям для помехоустойчивых каналов, основанная на результатах радиомониторинга радиолинии;

5. Метод автоматического краткосрочного прогнозирования характеристик дальних радиолиний, в котором используются подходы теории управления, и его теоретическое обоснование. Экспериментальные характеристики остаточной компоненты предикторных функций и точностные характеристики нового метода автоматического краткосрочного прогнозирования.

Научная новизна работы

1. Развита радиотехнический подход к описанию распространения декаметровых радиоволн на ионосферных радиолиниях, учитывающий взаимодействие сигналов со средой распространения - ионосферной плазмой. Установлены связи между данными наклонного зондирования радиолинии непрерывными ЛЧМ сигналами и радиотехническими характеристиками декаметровых ионосферных радиолиний и радиоканалов:

- аналитические функциональные зависимости для определения системных характеристик многолучевых ионосферных ДКМ радиоканалов и их основных параметров;
- аналитические соотношения для оценки частотных зависимостей основных информационно-технических параметров РТС ПИ ДКМ диапазона.

2. Впервые теоретически обоснованы законы распределения смеси сигнала и помех на выходе системы сжатия непрерывного ЛЧМ сигнала в частотной области (в спектрах разностной частоты) и критерий обнаружения зондирующего сигнала.

Впервые получены и систематизированы обширные экспериментальные данные о параметрах законов распределения смеси сигнала и помех на выходе системы сжатия зондирующего сигнала в частотной области.

Предложен, теоретически обоснован и экспериментально апробирован новый метод обнаружения непрерывного ЛЧМ сигнала в спектрах разностной частоты, который позволил решить радиотехническую проблему обнаружения в автоматическом режиме зондирующих сигналов со сверхбольшой базой из комплекса помех на выходе системы сжатия в частотной области.

3. Разработан метод выделения зондирующего ЛЧМ сигнала со сверхбольшой базой из комплекса помех на выходе системы сжатия в частотной области, использующий следствия теории распознавания образов мод ионосферного распространения на ионограммах наклонного зондирования ионосферы, который реализован в комплексном алгоритме. Впервые разработаны и реализованы на радиолиниях различной протяженности принципы адаптации комплексного алгоритма к условиям конкретной радиолинии по набору используемых в нем способов и величинам параметров.

4. Развита математическая модель передаточных функций и импульсных характеристик многолучевых ионосферных радиоканалов. Построены экспериментальные модели многолучевости радиолиний и определены их частотные диапазоны для магистральных среднеширотных радиолиний. Впервые теоретически обоснован метод определения с высоким частотным разрешением модуля передаточной функции на произвольных рабочих частотах из диапазона от ННЧ до МНЧ радиолинии по данным ее зондирования непрерывным ЛЧМ сигналом. Экспериментально получена статистика параметров передаточной функции для различных моделей многолучевости.

Впервые получены и систематизированы обширные экспериментальные результаты исследования моделей и параметров радиотехнических системных функций многолучевых ДКМ радиоканалов для дальних ионосферных радиолиний.

5. Впервые теоретически обоснованы и реализованы в экспериментальных исследованиях следующие методики оценки оптимальных ИТХ РТС ПИ по результатам панорамного зондирования радиолинии непрерывными ЛЧМ сигналами:

- автоматического определения частотной зависимости сигнал/шум;
- оценки отношения сигнал/шум для РТС ПИ;
- мощности сигнала для РТС ПИ;
- коэффициента двоичной ошибки для рабочих частот различных модемов РТС ПИ;
- автоматического определения максимальной скорости передачи информации;
- автоматического определения диапазона рабочих частот.

6. Впервые экспериментально получены характеристики диапазонов одномодового распространения (ДОР), их зависимости от протяженности среднеширотных дальних радиолиний, а также имеющих важное значение для практики дальней радиосвязи ИТХ декаметровых РТС ПИ:

- значения КДО для различных модемов в помехоустойчивых каналах;
- память каналов и скорость передачи информации в помехоустойчивых каналах;
- вероятность попадания помехоустойчивого канала с заданным КДО в ДОР;
- ИТХ РТС ПИ для кругосветных радиолиний.

Впервые для диапазонов одномодового распространения радиоволн на радиолиниях западноевропейского и сибирского регионов земного шара получены и систематизированы экспериментальные данные о вариациях ИТХ в помехоустойчивых радиоканалах.

7. Разработан и апробирован новый метод автоматического пространственно-временного краткосрочного прогнозирования МПЧ, с применением адаптации глобальных моделей ионосферы к региональным особенностям космической погоды по данным наклонного зондирования радиолиний непрерывным ЛЧМ сигналом. Экспериментально получены ее точностные характеристики.

Научная и практическая значимость работы, внедрение результатов исследований. Разработанные математические модели, алгоритмы и ППП могут быть использованы в действующих системах декаметровой радиосвязи для повышения эффективности их работы, а также при разработке и испытаниях перспективных систем дальней радиосвязи, загоризонтной радиолокации и других радиотехнических систем, работа которых должна осуществляться через ионосферные

радиоканалы. Кроме того, значимость работы заключается в повышении информативности ЛЧМ ионозондов для исследований радиотехнических характеристик ионосферных радиолиний и радиоканалов. Новые технологии радиопрогнозирования с учетом региональных особенностей космической погоды могут быть использованы для планирования экспериментов при фундаментальных исследованиях ионосферы, повышения точности декаметровых систем пеленгации и радионавигации.

Научная ценность работы подтверждается поддержкой исследований автора Российским фондом фундаментальных исследований (проекты: 02-05-64950, 04-05-65120), а также грантами Президента Республики Марий Эл для докторантов. Результаты исследований использовались при выполнении грантов РФФИ: 93-02-15893, 95-02-04890, 96-02-19575, 99-02-17309, 00-02-31009, 02-02-16318, Министерства образования РФ: V-102, 95-0-8.1-41, E00-8.0-41, E02-8.0-48; Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки» (проект №199/2001 и госконтракт №И0208/1173 на 2002-2006 гг.), а также программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники на 2003-2004гг.» (проект 209.06.01.006); при выполнении НИР и ОКР «Тренд-РВО», «Спрут», «Спринт», «Стратег», «Опора-КВ», «Планета». Они внедрены в ОАО Концерн ПВО «Алмаз-Антей» (ММЗ), ФГУП «ВНИИС», ФГУП НПП «Полет», ИСЗФ СО РАН (акты прилагаются), в учебный процесс МарГТУ по дисциплинам «Статистическая теория радиотехнических систем», «Статистическая теория радиосвязи», «Обработка экспериментальных данных на ЭВМ» специальности 200700 «Радиотехника» и 201100 «Радиосвязь, радиовещание и телевидение», 220400 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» (акт прилагается) и используются в ЛЧМ ионозондах МарГТУ, входящих в экспериментальную российскую сеть мониторинга ионосферы методами ВЗ и НЗ.

Работа представляет также интерес для зарубежных исследователей. В частности, совместно с учеными Electronic and Surveillance Research Laboratory (Salisbury, Australia) проведены экспериментальные исследования аномальных ДКМ радиоканалов сигналами с линейной частотной модуляцией на радиолинии Алис-Спрингс – Йошкар-Ола, протяженностью 12,5 тыс. км.

Личный творческий вклад автора. Экспериментальные работы по наклонному зондированию ионосферы, включенные в диссертацию, выполнены в кооперации с учеными НИРФИ, ИСЗФ СО РАН, ИКИР ДВО РАН, ФГУП НПП «Полет», Electronic and Surveillance Research Laboratory (Salisbury, Australia). В диссертации подробно излагаются лишь те экспериментальные результаты, вклад автора в которые был существенным на всех этапах работы. Автор внесла основной вклад в постановку задач исследований, разработку методик измерений, методику проведения экспериментов, анализ и интерпретацию полученных данных, подготовку публикаций. Ею полностью разработаны предлагаемые в диссертации методы и алгоритмы расчета, прогноза и радиомониторинга. Автору принадлежат все выводы и научные положения настоящей работы. Подробный анализ личного вклада автора в результаты, опубликованные в ведущих научных журналах, перечень которых утвержден ВАК РФ, приведен в приложении 1 диссертации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных, всероссийских научно-технических симпозиумах, конференциях, семинарах и совещаниях: International Symposium on Antennas and Propagation (Sapporo, Japan, 22-25 Sept. 1992); Tenth International Conference on Antennas and Propagation (Venue, 14-17 Apr. 1997); Millennium Conference on Antennas and Propagation AP2000 (Davos, Switzerland, 9-14 April 2000); International Conference on Electromagnetic in Advanced Applications «ICEAA 95» (Torino, Italy, 1995); V, VII, VIII, IX международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация и связь» (Воронеж, 1999, 2001, 2002, 2003); XVII, XVIII, XIX, XX Всероссийских конференциях по распространению радиоволн (Ульяновск, 21-24 сент. 1993 г.; С.Петербург, 17-19 сент. 1996 г.; Казань, 22-25 июня 1999 г.; Н.Новгород, 2-4 июля 2002 г.); 48, 50, 52, 54, 56 научных сессиях, посвященных Дню радио (Москва, 1993, 1995, 1999, 2001, 2003); научной конференции «Проблемы поддержания боевой готовности и совершенствование систем связи и боевого управления РВСН» (Москва, 1999); межведомственным научном семинаре «Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ-диапазона» (Н.Новгород, 12-14 июня 1991 г.); IV международной научно-технической конференции «Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах» (Москва, 1994); XI Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению волн (Москва, 12-15 янв. 1998 г.); X научно-технической конференции «Проблемы радиосвязи» (Н.Новгород, 1999); международном симпозиуме, посвященном 60-летию регулярных ионосферных исследований в России «Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики» (Томск, 18-21 июня 1996 г.); III Suzdal URSI Symposium on Modification of the Ionosphere by Powerful Radio Waves (ISIM-3) (Suzdal, 9-13 Sept. 1991); Third Volga International Summer School on Space Plasma Physics «ISS 97» (1-11 June 1997); научно-технической конференции НИТРИ-97 «Новые информационные технологии в региональной инфраструктуре» (Астрахань, сент., 1997); международной конференции, посвященной 50-летию ионосферных исследований в Иркутске «Физика ионосферы и атмосферы Земли» (Иркутск, 16-18 июня 1998 г.); 2-й международной научно-практической конференции «Информационные технологии и радиосети»; ИНФОРРАДИО'2000 (Омск, 21-26 авг. 2000 г.); VIII Joint International Symposium: «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics» (Irkutsk, 25-29 June 2001); IX Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics» (Tomsk, 4-5 July 2002); IV Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2002); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники «Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления ТУСУР» (Томск, 2-4 окт. 2002 г.); юбилейной всероссийской научной конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 30 окт.-1 нояб. 2002 г.); Научной сессии МИФИ-2003 (Москва, 2003).

Публикации. По теме диссертации всего опубликовано 95 печатных работ, из них: авторская монография «Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов»; статьи в ведущих научных журналах: «Радиотехника», «Электросвязь», «Радиофизика», «Доклады РАН», «Геомаг-

нетизм и аэрономия», «Radio Science», «J. of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics», «Wave in Random Media», в междувед. сб. «Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн» (МФТИ), в сб. трудов «Радиолокация, навигация, связь» (ВНИИС) и др., авторское свидетельство на изобретение. Результаты и выводы диссертационной работы вошли в 9 научно - технических отчетов, а также в учебное пособие с грифом Министерства образования РФ «Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона». Список основных публикаций приводится в конце реферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Она содержит 309 страниц основного текста, 113 иллюстраций, 27 таблиц, список цитируемой литературы из 303 наименований и 2 приложения.

Основное содержание диссертации

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации, дана краткая характеристика выбранного научного направления, сформулированы цель и задачи исследований, приведены краткая характеристика и содержание работы.

Первая глава содержит анализ современного состояния вопроса, формулировку проблемы диссертации и обоснование выбора направления исследований. В ней рассмотрены основные факторы, негативно сказывающиеся на работе РТС ДКМ диапазона в оптимальном режиме, и пути их преодоления. Главным из них является пространственно-временная изменчивость среды распространения сигналов – ионосферной плазмы. Проанализированы современные воззрения на причины изменчивости состояния ионосферы и классифицированы ее основные характеристики. Дан анализ влияния изменчивости ионосферы на качество работы декаметровых РТС ПИ, представлены современные принципы работы перспективных РТС ПИ, связанные с применением методов комплексной адаптации (по рабочей частоте и характеристикам РТС). Показано, что при этом на передний план выходят методы радиомониторинга и прогнозирования ионосферных радиолиний и радиоканалов, позволяющие в автоматическом режиме определять возможные для работы радиоканалы, выбирать из них оптимальный и настраивать ИТХ радиосистем на оптимальные значения.

Проанализированы наиболее известные методы и средства зондирования ионосферы. Показано, что в различные годы большой вклад в развитие методов и систем зондирования ионосферы наземного и космического базирования внесли Н.А.Арманд, Э.Л.Афраймович, В.Д.Гусев, Н.П.Данилкин, В.А.Иванов, В.Е.Куницын, В.И.Куркин, Л.А.Лобачевский, Д.С.Лукин, Р.Г.Минуллин, А.П.Потехин, В.П.Урядов, Ю.Н.Черкашин. Установлено, что в настоящее время наибольшее распространение в мировой практике диагностики ионосферы получили ионозонды с непрерывным ЛЧМ сигналом, обладающим сверхбольшой базой сигнала и в котором реализованы оптимальные методы приема. Показан вклад российских ученых в развитие данного направления и участие автора.

Однако такой ЛЧМ ионозонд оказывается не предназначенным для решения радиотехнических задач радиомониторинга декаметровых радиолиний и радиоканалов при наклонном зондировании ионосферы. Для него не решены задачи автоматического обнаружения и выделения сигнала из комплекса помех на выходе си-

стемы сжатия зондирующего сигнала в частотной области. Кроме того, он не позволяет решать в автоматическом режиме задачу определения радиотехнических характеристик радиолиний и каналов, а также задачу определения ИТХ для заданных РТС. Неисследованными и неразработанными оказались методы автоматического краткосрочного прогнозирования важных для работы декаметровых РТС характеристик. На основании данного противоречия сформулирована цель работы и определены задачи диссертационного исследования.

Поскольку исследование в основном носят экспериментальный характер или опираются на экспериментальные данные, а результаты теоретических исследований апробируются в натурных экспериментах, то в главе рассмотрена экспериментальная научная установка Марийского государственного технического университета, основу которой составляет ЛЧМ ионозонд, имеющий следующие характеристики: диапазон рабочих частот 1,6-30 МГц; скорость изменения частоты 100 кГц/с; диапазон наблюдаемых задержек сигнала 5 мс; излучаемая мощность 100 Вт.

Информация об использованной в экспериментах диссертационного исследования сети наклонного зондирования ионосферы, покрывающей радиолиниями Западную Европу и Сибирь, приведена в табл. 1. Эксперименты проводились круглосуточно и в различные сезоны года.

Таблица 1

№ п/п	Передачик - приемник	Протяженность, км	Годы экспериментов
1	Хабаровск - Йошкар-Ола	5700	1990 - 2003
2	Хабаровск - Киев	7000	1990 - 1991
3	Иркутск - Йошкар-Ола	3600	1997 - 2003
4	Магадан - Йошкар-Ола	5400	1997 - 2003
5	Душанбе - Мурманск	4000	1990 - 1991
6	Душанбе - Бельцы	3400	1990 - 1991
7	Душанбе - Киев	3300	1990 - 1991
8	Душанбе - Йошкар-Ола	2500	1990 - 1991
9	Кипр - Йошкар-Ола	2600	2001 - 2003
10	Инскип - Йошкар-Ола	3200	2001 - 2003
11	Сан Торказ - Йошкар-Ола	4000	2001 - 2003
12	Шпицберген - Йошкар-Ола	2700	2001 - 2003
13	Хабаровск - Йошкар-Ола прямая кругосветная радиолиния (КР)	45600	1997 - 1998
14	Иркутск - Йошкар-Ола прямая КР	43600	1997 - 1998
	обратная КР	36400	

Вторая глава посвящена комплексному исследованию задачи автоматического обнаружения и выделения непрерывного ЛЧМ сигналов из комплекса помех на выходе системы сжатия ионозонда в частотной области. Для этого в приближении геометрической оптики проведено теоретическое исследование прохождения непрерывного ЛЧМ сигнала в ДКМ радиоканале с учетом сжатия. Показано, что непрерывный ЛЧМ сигнал на выходе ионосферной радиолинии из-за многолучевого характера распространения можно представить в виде:

$$a_R(t) = \sum_{j=1}^m |H_j(f)| \cdot \cos(\varphi_{Rj}(t)), \quad (1)$$

где $\varphi_{R_j}(t) = \left(2\pi \left(f_n \cdot (t - \tau_{\phi_j}) + 0,5 \dot{f} \cdot (t - \tau_{\phi_j})^2 \right) + \varphi_1 \right)$, τ_{ϕ_j} – фазовая задержка;

$|H_j(f)|$ – коэффициент передачи при распространении волны по j -му лучу.

Радиотехническая операция сжатия сигнала описывается следующей математической моделью:

$$A(t) = \sum_{j=1}^m \frac{|H_j(f)|}{2} \cdot \cos(\varphi_{R_j} - \varphi_T) = \sum_{j=1}^m \frac{|H_j(f)|}{2} \cdot a_0^2 \cos(2\pi F_j t + \Delta\varphi), \quad (2)$$

где $F_j = \frac{d}{dt}(\tau_{\phi_j}(f) \cdot f) = f \left(f \frac{d\tau_{\phi_j}}{df} + \tau_{\phi_j}(f) \right) = f \tau_j(f)$ – разностная частота;

τ_j – групповая задержка волны в ионосфере по j -му лучу;

f – текущая частота непрерывного ЛЧМ сигнала.

Сигнал разностной частоты на интервалах времени $t \sim 1$ с представляет собой тоны (низкочастотные) с частотами F_j , которые подвергаются спектральному БПФ-анализу.

Показано, что кроме сигнала на элемент анализатора могут действовать флуктуационные и стационарные помехи, сигналы которых, соответственно, можно представить в виде:

$$u_{\phi n}(t) = |u_{\phi n}| \cos(2\pi F_j t + \varphi_{\phi nj}), \quad u_{cn}(t) = |u_{cn}| \cos(2\pi F_j t + \varphi_{cnj}), \quad (3)$$

$|u_{cn}| = |U_{cn}| / \sqrt{B_{\Sigma}} \cdot B_{\Sigma}$ – база элемента сигнала $\sim 10^5$.

Начальные фазы и амплитуды сигналов (3) являются случайными медленно меняющимися функциями времени.

На элемент анализатора могут действовать одновременно полезный сигнал и комплекс помех или сигнал и флуктуационная помеха, или обе помехи, или только флуктуационная помеха. Таким образом, логарифм амплитудного спектра сигнала разностной частоты из M точек можно представить в виде стохастического M - мерного ($M \sim 1000$) вектор-столбца вида $(\lg|u_{jk}|)_{M \times k}$, координатами которого являются логарифмы модулей суммы пересчитанных выше сигналов, действующих на отдельный элемент, а ионограмму – в виде стохастической матрицы $(\lg|u_{jk}|)_{M \times N}$ ($N \sim 300$).

Построена аналитическая модель и проведено теоретическое исследование законов распределения для координат стохастической матрицы и для ее вектор-столбцов. Показано, что законы распределения координат, содержащих только шум, имеют вид (4), а содержащие смесь сигнала и шума – вид (5):

$$p(z) = \frac{10^{10} \ln 10}{10} \exp \left\{ -10^{\frac{z}{10}} \right\} \quad (4)$$

$$p(z) = \frac{10^{10} \ln 10}{20} I_0 \left(2 \cdot 10^{\frac{z+\eta}{20}} \right) \exp \left\{ -10^{\frac{z}{10}} - 10^{\frac{\eta}{10}} \right\}, \quad (5)$$

где $z = 20 \lg |u_{jk}|$, η – отношение сигнал/шум, выраженное в дБ.

Установлено, что в 70-80% случаев экспериментальные законы удовлетворяют формулам (4), (5). Эксперименты показывают, что в присутствии сигнала законы распределения координат вектор-столбцов бимодальные и состоят из (4) и (5)

с соответствующими весовыми коэффициентами, а без сигнала они унимодальные. Установлено, что унимодальные законы (4), (5) обладают отрицательной асимметрией, бимодальные – положительной. На основе этого эффекта дано новое решение задачи обнаружении сигнала на выходе системы сжатия сигнала в частотной области. Для этого получена функциональная зависимость коэффициента асимметрии $\gamma(\eta)$ от отношения сигнал/шум в виде кусочно-линейных функций:

$$\gamma(\eta) = \begin{cases} 0,04\eta - 0,74, & \text{если } -15 \leq \eta < 2\text{дБ}, \\ 0,17\eta - 1,11, & \text{если } 2 \leq \eta < 12\text{дБ}, \\ 0,1\eta - 0,07, & \text{если } 12 \leq \eta < 40\text{дБ}, \end{cases} \quad (6)$$

а также экспериментальные законы распределения для него в виде:

$$p(\gamma) = 2,6 \exp\left\{-\frac{(\gamma - \gamma_{cp})^2}{0,045}\right\}, (-15\text{дБ} < \eta < 12\text{дБ}); p(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\gamma} \exp\left\{-\frac{(\gamma - \gamma_{cp})^2}{2\sigma_\gamma^2}\right\}. \quad (7)$$

Полученные решения позволили разработать и исследовать метод автоматического обнаружения сигнала на выходе системы сжатия ЛЧМ ионозонда по коэффициенту асимметрии, а также принципы его адаптации к изменяющимся во времени условиям распространения сигнала в ионосфере и уровню помех в пункте приема. Задача выделения полезного сигнала на фоне шумов в спектрах сигналов разностной частоты решалась с применением методов теории распознавания образов при пороговой обработке вектор-столбцов и пространственной фильтрации стохастической матрицы-ионограммы.

На основе анализа большого объема экспериментальных результатов по выделению сигнала из элементов стохастической матрицы, полученных на радиолиниях различной протяженности (см. табл. 1), предложен комплексный алгоритм цифровой обработки стохастической матрицы, включающий следующие основные методы: обнаружение сигнала в вектор-столбцах по коэффициенту асимметрии, выделение сигнала из координат вектор-столбца пороговыми методами, обнуление в стохастической матрице элементов, представляющих собой выбросы, и восстановление утраченных элементов при помощи оконных фильтров.

Проведенные исследования также показали, что комплексный алгоритм требует адаптации к условиям работы на заданной радиолинии как по используемым в нем методам, так и по значениям их параметров. На рис. 1 представлены ионограммы наклонного зондирования различных радиолиний (последний случай – кругосветная радиолиния), которые демонстрируют эффективность разработанного комплексного алгоритма при его адаптации к условиям распространения радиоволн и комплексу помех при приеме зондирующего сигнала. Слева приведены исходные ионограммы, а справа – после применения к ним комплексного алгоритма автоматического обнаружения и выделения сигнала.

В этой главе разработаны практические рекомендации по методике адаптации комплексного алгоритма. Полученные результаты создали базу для решения задачи определения радиотехнических характеристик многолучевых радиолиний и радиоканалов по данным ЛЧМ ионозонда, таких как структурные характеристики радиоканалов; частотные зависимости отношения сигнал/шум; частотные зависимости памяти каналов, а также полосы прозрачности радиолинии.

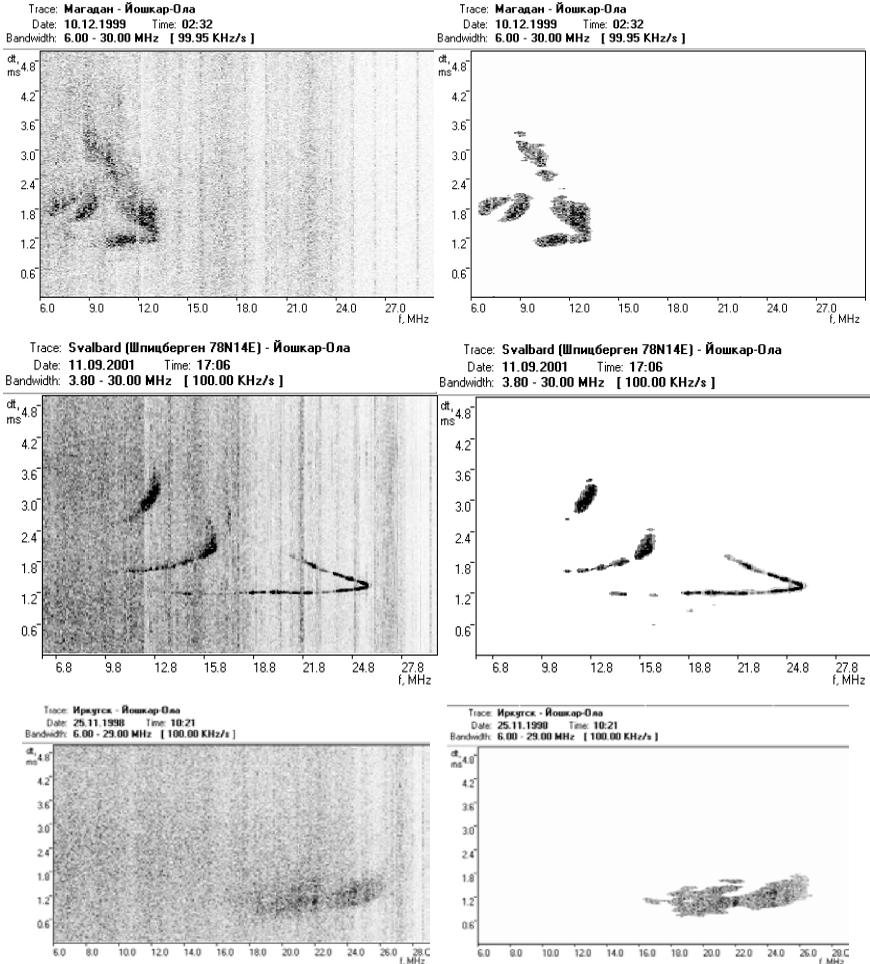


Рис.1. Результаты работы комплексного алгоритма обнаружения и выделения зондирующего сигнала при условии его адаптации

В *третьей главе* на основе решения волнового уравнения методом геометрической оптики развит радиотехнический подход к анализу структурных функций многолучевых ионосферных радиоканалов, основанный на использовании данных, получаемых в результате ЛЧМ зондирования радиолинии. В соответствии с данным подходом построены математические модели передаточной функции (АЧХ и ФЧХ) и импульсной характеристики таких радиоканалов и исследовано влияние на

них многолучевости, а также дано теоретическое обоснование и осуществлена экспериментальная апробация разработанного метода определения с высоким частотным разрешением модуля передаточной функции многолучевых ионосферных радиоканалов по данным ЛЧМ ионозонда, что позволило исследовать такие параметры ионосферных радиоканалов как глубина провалов АЧХ из-за деструктивной интерференции и частотные диапазоны конструктивной интерференции.

Известно, что для условий ионосферы и радиоволн частотой 2-30 МГц электрическое поле (волны) удовлетворяет следующему уравнению:

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2 E = 0, \quad n = n(x, y, z). \quad (8)$$

Для гармонической во времени радиоволны в приближении геометрической оптики для радиолинии (с учетом краевой задачи) решение уравнения является ее передаточной функцией и его можно записать в виде:

$$E(\dot{r}, f, t) = \sum_{j=1}^m u_j(\dot{r}, f, t) e^{-ik_0 \psi_j(\dot{r}, f, t)}; \quad H(f, t) = \sum_{j=1}^m |H_j(f, t)| e^{-i\varphi_j(f, t)}, \quad (9)$$

где $u_j(\dot{r}, f, t)$ – амплитуда поля; $\psi_j(\dot{r}, f, t)$ – эйконал; $k_0 = \omega/c$; c – скорость света; $|H_j(f, t)| = u_j(f, t)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) j -й моды; $\varphi_j(f)$ – фазово-частотная характеристика (ФЧХ) j -й моды (луча).

Показано, что для радиоканала на рабочей частоте f_p АЧХ и ФЧХ парциальной моды можно представить в виде:

$$\begin{aligned} |H_j(f, t)| &\approx |H_j(f_p, F)|, \\ \varphi_j(f, t) &\approx \varphi_j(f_p) + 2\pi \int_{f_p}^{f_p+F} P_{nj}(f) df = \varphi_j(f_p) + 2\pi\tau_j(f_p)\Delta f + \pi\tau_j\Delta f^2 + \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

где $P_{nj}(f)$ – дискретная модель ионограммы в форме многочлена степени n ;

$s = d\tau/df$ – наклон ионограммы и в общем случае функции $|H_j|$, $\varphi_j(f_p, t_0)$, $\tau_j(f)$ содержат регулярную и случайную компоненты.

Рассмотрены импульсные характеристики ионосферных радиоканалов и исследовано влияние на них частотной дисперсии среды распространения, которая в случае одномодового распространения характеризуется полосой когерентности радиоканала, которая обратно пропорциональна корню квадратному из наклона ($d\tau/df$) ионограммы на заданной рабочей частоте. Исследования показали, что полоса когерентности определяет потенциальную разрешающую способность ЛЧМ ионозонда по времени группового запаздывания сигнала. Представлены полученные в диссертации результаты исследования полосы когерентности и потенциальной разрешающей способности для радиолиний различной протяженности. Показано, что полоса когерентности однолучевого канала находится в диапазоне значений 30-500 кГц, уменьшается в 1,5-2 раза с ростом номера моды и растет с увеличением протяженности радиолинии:

$$\Delta f_k = 5,4 \cdot 10^{-4} (D - 800)^{1,5} + 128. \quad (11)$$

Рассмотрено влияние многолучевости на характеристики ионосферного канала на выбранной рабочей частоте, когда передаточная функция представляет собой сумму передаточных функций принимаемых лучей. Поскольку вариации поглощения, фокусировки и дефокусировки связаны с изменением глобальных параметров ионосферы, то изменения H_j во времени очень медленные (десятки минут и более). Многолучевая структура канала приводит к тому, что $H(f, t)$ всегда испытывает быстрые замирания (от долей секунды до десятка секунд) во времени и глубокие провалы АЧХ из-за деструктивной интерференции. Причем поведение АЧХ в частотной области ранее детально в экспериментах не исследовалось.

Теоретически рассмотрено влияние многолучевости на структурные характеристики радиоканалов во временной и частотной областях. Обоснованы модели стохастических ионосферных радиоканалов, которые используются в задачах имитационного моделирования. Обоснована необходимость более детального экспериментального изучения АЧХ радиоканалов на многолучевых радиоприемниках с помощью ЛЧМ ионозонда, а также построения и изучения моделей многолучевости.

Впервые теоретически обоснован метод определения АЧХ многолучевой радиоприемной линии с высоким частотным разрешением (~ 10 Гц) при том, что ЛЧМ ионозонд имеет частотное разрешение (~ 100 кГц). Показано, что спектр сигнала разностной частоты (2) ионозонда связан с импульсной характеристикой радиоканала, образованного принимаемыми лучами и имеющего полосу, равную полосе элемента непрерывного ЛЧМ сигнала, формулой:

$$|S(F)| = 0,5T_3 \sum_{j=1}^m |H_j(f_p)| \sin c[\pi \Delta f_3 (F - f \tau_j) / f] = \sum_{j=1}^m \frac{K}{f} |h_j(\tau - \tau_j)|. \quad (12)$$

Таким образом, в результате наклонного зондирования ионосферы получают точечные оценки функций $\tau_j(f)$ и $|H_j(f)|$, при этом интервал дискретизации по частоте для ЛЧМ зонда составляет 10-100 кГц. Для определения частотной характеристики радиоприемной линии с высоким частотным разрешением (10-100 Гц) по данным ЛЧМ ионозонда возникает задача получения непрерывных моделей для $\tau_j(f)$ и $|H_j(f)|$, используя их дискретные значения. Задача усложняется тем, что дискретные модели (т.е. точечные оценки) содержат как регулярную, так и случайную компоненты. Решение задач в аналогичных ситуациях (например, в задачах автоматического управления) предполагает использование методов математического сглаживания (в терминах радиотехники – фильтрации) исходных отсчетов, т.к. регулярная компонента в нашем случае является низкочастотным процессом, а случайная – высокочастотным. Для получения непрерывной модели $|H_j(f)|$ в работе использовалась кусочно-линейная интерполяция, а для ФЧХ получали аналитические выражения непрерывной модели в виде многочлена. При этом диапазон частот от НПЧ до МПЧ разбивался на интервалы с масштабом 1 МГц.

Задача построения и анализа непрерывной модели $\tau_j(f)$ в диссертации была сведена к минимизации функционала $\min_{\tau \in T_{fp}} J(\tau)$:

$$J(\tau) = \sum_{i=0}^{N_i} [\tau_D(f_i) - \tau(f_i)]^2. \quad (13)$$

Оптимальная степень многочлена определялась на основе критерия Гаусса. В результате теоретических исследований для АЧХ многолучевой радиолинии была получена формула, удобная для практического использования:

$$\left| H(f_p, F, t) \right| = \left| \sum_{j=1}^m H_j(f_p) \right| \times \exp \left[i \left(\varphi_j(f_p, t_0) + 2\pi \cdot \sum_{k=0}^n \frac{a_{jk}}{k+1} \left((f_p + F)^{k+1} - f_p^{k+1} \right) + 2\pi \cdot F_{Дл} \cdot \Delta t \right) \right]. \quad (14)$$

Разработанный автором метод определения АЧХ многолучевой радиолинии с высоким частотным разрешением по результатам наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ сигналами включает в себя следующие шаги: выделение полезного зондирующего сигнала из шумов и разделение его на принимаемые моды; получение точечных оценок $\tau_i(f)$ и $|H_j(f)|$ для каждого луча; их фильтрация; получение непрерывных моделей $\tau_i(f)$ и $|H_j(f)|$; определение с высоким частотным разрешением по (14) АЧХ многолучевой радиолинии.

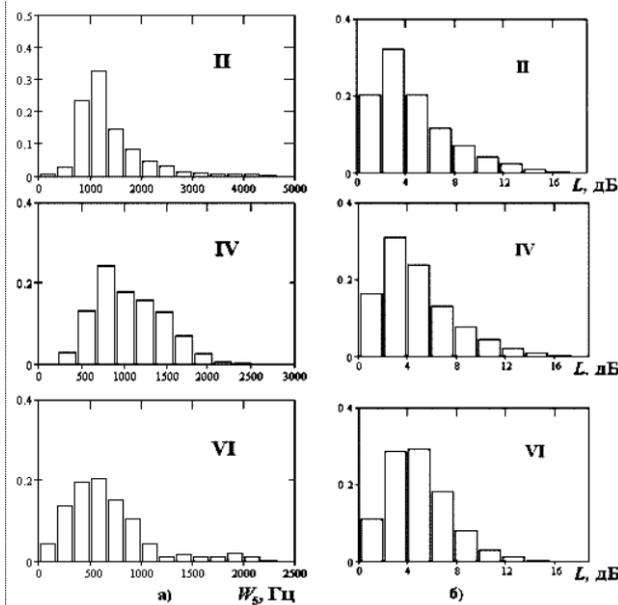


Рис. 2. Гистограммы распределения ширины полос конструктивной интерференции (а) и глубины провалов АЧХ (б) для наиболее вероятных моделей (II, IV, VI) многолучевости

данные о полосах конструктивной интерференции (рис.2а) и глубине провалов АЧХ вследствие действия деструктивной интерференции (рис.2б) на радиолиниях протяженностью 2,6 – 5,7Мм. Модель II образована модами $1F$, $1F_p$ на односкачковых радиолиниях и модами $2F$, $2F_p$ - на двухскачковых; модель IV – соответственно, модами $1F$, $2F$ и $2F$, $3F$; модель VI – модами $1F$, $2F$, $3F$ и $2F$, $3F$, $4F$.

Таким образом, показано, что по результатам радиомониторинга радиолиний можно определять структурные функции многолучевых радиоканалов на произ-

В работе представлены результаты проведенных обширных экспериментальных исследований моделей многолучевости для протяженных одно- и двухскачковых радиолиний (см.табл.1), определена частота выявленных моделей и статистика для межмодовых задержек и соотношений средних значений амплитуд принимаемых лучей для наиболее вероятных моделей (II, IV,VI), исследованы годовые вариации межмодовых задержек. Проведенные экспериментальные исследования позволили впервые получить среднестатистические

вольных рабочих частотах. Для эффективной работы современных декаметровых РТС ПИ важное значение имеет оценка по результатам ЛЧМ зондирования ионосферы таких радиотехнических параметров многолучевых радиоканалов как отношение сигнал/шум, память канала, полоса прозрачности радиолинии. Кроме того, для адаптации РТС необходимо уметь оценивать допустимые информационно-технические характеристики системы связи, работающей на зондируемой радиолинии. Основными ИТХ для систем узкополосной ДКМ радиосвязи являются: коэффициент двоичной ошибки (КДО), характеризующий помехоустойчивость связи, и скорость передачи информации.

В *четвертой главе* приведены результаты решения задачи определения радиотехнических параметров радиоканалов и ИТХ по результатам наклонного ЛЧМ зондирования радиолинии. В результате исследований получено теоретическое обоснование соответствующих методик, которые затем прошли многократную апробацию в экспериментах на сети радиолиний (см. табл. 1). Впервые были получены ряды данных о значениях и вариациях ИТХ для радиолиний различной протяженности и географической ориентации.

Впервые теоретически обоснованы и реализованы методики автоматического измерения частотных зависимостей отношения сигнал/шум для сигналов ЛЧМ ионозонда. Первая методика основана на установленной функциональной зависимости коэффициента асимметрии закона распределения логарифма спектральных амплитуд сигналов разностной частоты от отношения сигнал/шум [см. формулу (6)], а вторая – на оценке мощностей сигнала и шума по очищенным от помех ионограммам наклонного зондирования радиолинии непрерывными ЛЧМ сигналами. Во втором случае формула имеет вид:

$$\eta = 10 \lg(A^2 / 2\sigma^2) = 10 \lg[(\langle \rho_1^2 \rangle - \langle \rho_2^2 \rangle) / \langle \rho_2^2 \rangle], \quad (15)$$

где $\langle \rho_1^2 \rangle = 2\sigma^2 + A^2$ – средний квадрат спектральных отсчетов, содержащих сигнал и шум; $\langle \rho_2^2 \rangle = 2\sigma^2$ – отсчетов, содержащих только шум.

Сопоставление результатов определения отношения по двум методикам показало, что они практически совпадают при $\eta > 5 \text{ дБ}$.

В перспективных системах декаметровой радиосвязи используется суммирование мощностей сигналов отдельных лучей. Для таких систем необходимо оценить отношение сигнал/шум для каждого луча. При этом с помощью обобщенного алгоритма выделения сигнала на фоне комплекса помех выделяются сигналы первого, второго и т.д. принимаемых лучей и для них оценивается отношение сигнал/шум. В диссертации выведены соответствующие этому случаю формулы.

Очевидно, что значения отношений сигнал/шум для ионозонда и РТС ПИ будут отличаться между собой. Поэтому в диссертации была разработана методика оценки по данным ЛЧМ ионозонда мощности излучения и отношения сигнал/шум для сигналов систем декаметровой радиосвязи при различных модах. Показано, что отношение сигнал/шум для системы связи связано с отношением сигнал/шум для ЛЧМ ионозонда формулой:

$$\eta_{ce} = \eta - 10 \lg \frac{P_0 \cdot \Delta f_{ce}}{P_{ce} \cdot \delta F}, \quad (16)$$

где $\Delta f_{св}$ – полоса передачи системы связи; δF – полоса элемента анализатора спектра ЛЧМ ионозонда; $P_{св}$ и P_0 – соответственно, мощности излучения системы связи и передатчика ЛЧМ зонда.

Задача определения по результатам радиомониторинга помехоустойчивых радиоканалов требовала теоретического обоснования и экспериментальной апробации методики автоматического определения коэффициента двоичной ошибки (КДО), характеризующего помехоустойчивость, для различных рабочих частот и различных модемов связи (ЧТ, ОФТ, со сложением мощностей парциальных лучей, с разнесенным приемом и для дискретного телефона). По определению КДО связано с вероятностью p ошибочного приема данных формулой: $КДО = -lg(p)$.

В результате проведенного теоретического анализа показано, что для больших отношений сигнал/шум формулы, связывающие КДО с отношением сигнал/шум ЛЧМ ионозонда, имеют вид: $КДО_{ЧТ} \approx 0,1 \cdot (\eta - 13)$ – для ЧТ модема, и $КДО_{ЧТсл} \approx m \cdot КДО_{ЧТ} - mlg m + 0,3$ – для ЧТ модема со сложением мощностей лучей, где m – число принимаемых лучей.

Известно, что при неизменной мощности передатчика увеличение помехоустойчивости происходит с применением метода разнесенного приема. Показано, что при рэлеевских замираниях сигналов КДО при сдвоенном приеме имеет вид: $КДО_{ЧТ}^{сдп} = 2 \cdot КДО_{ЧТ} - 0,54$. Поэтому, если $КДО_{ЧТ} = 2$, то применение сдвоенного приема увеличит его почти до 3,5, а если $КДО_{ЧТ} = 3$, то почти до 5,5. Показано также, что модем с суммированием мощностей парциальных лучей эквивалентен модему с разнесенным приемом. Для них, как известно, характерно свойство существенно улучшать «хорошие» каналы (т.е. чем выше КДО в канале без суммирования, тем больше оно становится в канале с суммированием). При этом число суммируемых лучей совпадает с числом ветвей разнесения.

Память канала влияет на помехоустойчивость РТС ПИ и определяет скорость передачи информации по каналу с заданной помехоустойчивостью. Кроме того, в модемах, использующих защитный временной интервал для борьбы с системными помехами, возникающими из-за запаздывания сигналов по лучам, она определяет величину защитного интервала и при заданной помехоустойчивости – скорость передачи информации. Для максимальной скорости передачи информации при заданной памяти канала $\Delta \tau$ получена формула: $N_u = 1/7 \Delta \tau$ и проведены комплексные исследования составляющих памяти. Экспериментальные исследования с помощью ЛЧМ ионозонда потребовали разработки методики определения памяти, которая включает следующие шаги: на ионограмме выделяется область, содержащая полезный сигнал, и в ней производится усреднение спектральных амплитуд для всех элементов по полосам в 1 МГц. Для каждой новой, полученной в результате усреднения реализации спектра находятся положения максимумов и отбираются доминирующие моды. Для элементов, соответствующих доминирующим модам, берутся по три соседних элемента спектра, которые используются для нахождения дисперсии (разброса) задержек для данной моды (памяти моды). В предположении гауссового распределения разброса задержек доминирующей моды оценивается ее память, равная СКО, по формуле:

$$СКО = \sqrt{\sum_{k=2}^2 (\tau_k - \tau_{\max})^2 \cdot A_k} / \sqrt{\sum_{j=2}^2 A_j}, \quad (17)$$

где τ_{\max} – значение задержки для локального максимума; τ_k – значение задержки для k -го элемента гистограммы в окрестности τ_{\max} ; A_k – величина k -го элемента гистограммы в окрестности τ_{\max} . СКО содержит информацию о составляющих памяти, связанных с частотной дисперсией и рассеянием на неоднородностях, а максимальные межмодовые задержки – с многолучевостью. Экспериментально установлено, что адаптация РТС ПИ по данным о памяти канала позволяет существенно увеличивать в отдельное время суток скорость передачи информации.

Полоса прозрачности радиолинии определяется наименьшей наблюдаемой и максимальной наблюдаемой частотами (ННЧ и МНЧ), испытывает значительные пространственно-временные вариации и является одним из наиболее важных параметров радиолинии. Она определяет принципиальные возможности декаметровый РТС ПИ по числу организуемых частотных радиоканалов, при поиске помехоустойчивых радиоканалов.

В диссертации разработана и апробирована в натуральных экспериментах методика автоматического определения полосы прозрачности радиолинии по результатам наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы. Проведенный статистический анализ отклонений результатов автоматической обработки от эталонных, полученных в результате экспертных оценок (вычисляется как $МНЧ_{\text{авт}} - МНЧ_{\text{эксн}}$), показал, что применение указанных методов очистки на радиолинии (5) (см. табл.1) дает разницу с эталоном со следующими статистическими параметрами: $M = -0,044$ МГц, $СКО = 0,444$ МГц. Для радиолинии (7): $M = -0,121$ МГц, $СКО = 1,713$ МГц. Для радиолинии (4): $M = -0,185$ МГц, $СКО = 0,667$ МГц. При этом для радиолинии (5) отклонения от эталона по модулю не превысили 0,1 МГц в 59% от общего числа измерений, а в 81% случаев отклонение не превысило 0,2 МГц. Для радиолинии (7) эти показатели соответственно равны 58% и 76,7%, а для радиолинии (4) – 52% и 80%. Таким образом, разработанная методика продемонстрировала достаточно высокую точность определения полосы прозрачности ионосферы и возможность работы в автоматическом режиме.

Дальнейшие исследования требуют последовательного рассмотрения одной из основных задач радиомониторинга радиолинии непрерывным ЛЧМ сигналом - задачи определения помехоустойчивых радиоканалов по результатам ЛЧМ зондирования радиолинии для различных модемов, а также оценки оптимальных ИТХ для помехоустойчивых ионосферных радиоканалов.

В *пятой главе* впервые последовательно рассмотрена сформулированная выше основная задача радиомониторинга радиолинии непрерывным ЛЧМ сигналом. Проведены детальные экспериментальные исследования и получены новые данные о диапазонах одномодового распространения (ДОР) декаметровых радиоволн на радиолинии и параметры ИТХ для рабочих частот из этого диапазона.

Проведен анализ используемых критериев и методик определения оптимальных рабочих частот (ОРЧ). Установлено, что в современных условиях наиболее адекватным является критерий максимальной помехоустойчивости, оцениваемой коэффициентом двоичной ошибки (КДО). Для этого случая понятия «помехоустойчивый канал» и ОРЧ являются тождественными. На основе проведенных исследований предложена методика выбора ОРЧ для различных модемов (ЧТ, ОФТ,

ЧТ со сложением мощностей парциальных лучей), а также разработан алгоритм автоматического определения диапазона оптимальных рабочих частот (ДОРЧ) по результатам ЛЧМ зондирования радиолинии. Экспериментально установлено, что ДОРЧ для модема со сложением мощностей лучей в дневное время в среднем в 2-5 раз больше, чем для модема с ЧТ (ОФТ). Поэтому первые в 2-5 раз большем диапазоне, чем вторые, могут работать с минимальными мощностями излучения. Кроме того, эксперименты показали, что их КДО в среднем на 2 единицы превышает КДО для систем с ЧТ(ОФТ). Повышение для них КДО с 2 до 4 требует увеличения мощности связного передатчика на 10 дБ днем и на 17 дБ ночью, в то время как для модема с ЧТ(ОФТ) в обоих случаях требуется увеличить мощность на 20 дБ.

Очевидно, что максимальные скорости передачи можно обеспечить в одно-модовых радиоканалах. Поэтому исследование их характеристик имеет большое научное и практическое значение. Теоретические подходы к изучению данного вопроса обладают низкой точностью, поэтому в диссертации был принят метод экспериментального исследования. Отсутствие в стране мобильных ионозондов для НЗИ и оснащенных ими радиолиний не способствовало до настоящего времени экспериментальному исследованию характеристик распространения радиосигналов в ДОР. Поэтому эта задача является актуальной и обладает новизной.

Известно, что ДОР образуется наименьшей наблюдаемой частотой педерсеновского луча ($HNЧ_p$) и максимальной наблюдаемой частотой моды следующего порядка ($MНЧ_2$). Таким образом, необходимо было исследовать характеристики распространения верхнего луча, характеристики многоскачкового распространения на частотах, близких к МПЧ скачков следующего порядка, и характеристики распространения в ДОР.

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить аналитические модели зависимости диапазона луча Педерсена от длины односкачковой ($D=2000-3500$ км) радиолинии, которые имеют вид:

$$Afr = -2,69D^2 + 15,58D - 18,55 \text{ (день); } Afr = 3,31D^2 - 22,31D + 38,56 \text{ (ночь).}$$

Полученные зависимости говорят о том, что на магистральных радиолиниях Afr в дневное время больше, чем в ночное, и уменьшается с ростом D .

В табл. 2 представлены нормированные к МНЧ радиолинии значения границ ДОР. Было установлено, что среднее за время наблюдения отношение ОРЧ/МНЧ для модемов ЧТ(ОФТ) составляет 0,83, что близко к рекомендованному ИТУ (МККР) значению для узкополосных систем связи. Это означает, что ОРЧ в среднем попадает в ДОР.

Таблица 2

Радиолиния	ДОР
Хабаровск – Йошкар-Ола	(0,88МНЧ; 0,97МНЧ)
Сан Торказ - Йошкар-Ола	(0,74МНЧ; 0,94МНЧ)
Иркутск – Йошкар-Ола	(0,73МНЧ; 0,88МНЧ)
Инскип - Йошкар-Ола	(0,69МНЧ; 0,89МНЧ)
Кипр - Йошкар-Ола	(0,66МНЧ; 0,85МНЧ)

Результаты детальных исследований вероятности попадания ОРЧ в ДОР представлены в табл. 3. Видно, что вероятности для порогового значения КДО=2 находятся в пределах 0,8 для односкачковых радиолиний и 0,6 для двухскачковых.

Таблица 3

Протяженность радиолинии, км	P, при КДО _{порог} =2	P, при КДО _{порог} =3
2000-3500	0,83	0,17
4000-6000	0,6	0,125

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что величина ДОР убывает пропорционально квадрату длины радиолинии, а аналитические модели для ДОР, зависимой от длины односкачковых радиолиний ($D=2000-3500$ км), имеют вид следующих функций:

$$Af_o = -6,12D^2 + 35,6D - 45,39 \text{ (день)}; \quad Af_o = -0,06D^2 - 1,85D + 8,89 \text{ (ночь)}.$$

Экспериментально обнаружено, что для двухскачковых радиолиний от 4,0 до 5,7 Мм при увеличении их длины ДОР также уменьшается от 4,6 МГц до 1,6 МГц, а для всех радиолиний длиной $2,6 < D < 5,7$ Мм величина ДОР днем в 1,5-2 раза больше, чем ночью.

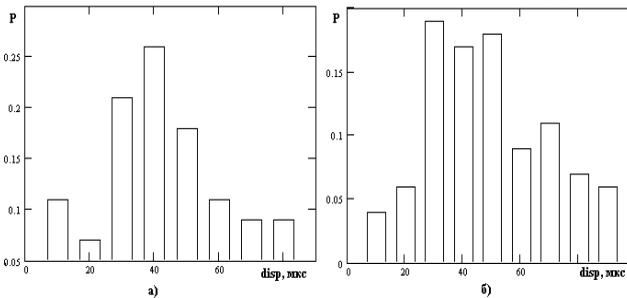


Рис.3. Гистограммы экспериментальных значений дисперсии задержки в ДОР основных мод принимаемых сигналов на радиолиниях Инскип – Йошкар-Ола (а) и Хабаровск – Йошкар-Ола (б)

Память каналов на ОРЧ из ДОР для моделей ЧТ (ОФТ) определяется дисперсией времени группового запаздывания по частоте, т.е. «расплыванием» следа моды по времени группового запаздывания.

На рис. 3а,б приведены экспериментальные данные по дисперсии задержки основных мод принимаемых сигналов на радиолиниях различной протяженности: односкачковой Инскип – Йошкар-Ола (1F2) и двухскачковой Хабаровск – Йошкар-Ола (2F2). Итак, экспериментальные результаты показывают, что в 60-80% случаев на магистральных линиях связи возможно обеспечить работу в телефонной полосе со скоростью 2400 бод (т.е. работу дискретного телефона) при мощности связного передатчика 1кВт.

Таблица 4

Радиолиния	Максимальная скорость ПИ на ОРЧ в одномодовом канале, бод	Скорость ПИ на ННЧ _p в двухмодовом канале, бод
Хабаровск – Йошкар-Ола	6160	484
Сан Торказ - Йошкар-Ола	3320	660
Иркутск – Йошкар-Ола	4060	443
Инскип - Йошкар-Ола	3320	760
Кипр - Йошкар-Ола	3320	760

Однако на рабочих частотах, за пределами верхней границы ДОР (на частотах, равных $ННЧ_p$) возможная скорость передачи падает в 5-10 раз (табл. 4).

Впервые получены экспериментальные данные о значениях КДО при мощности излучения 1 кВт для различных модемов в помехоустойчивых каналах. Для

модемов, работающих в условиях многолучевого приема, результаты исследований приведены на рис. 4, 5.

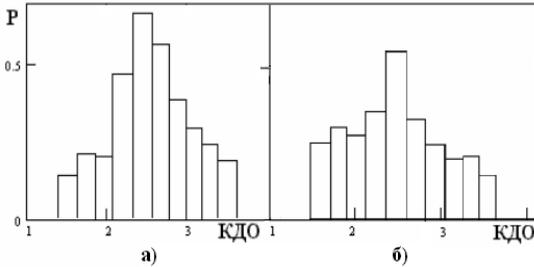


Рис.4. Гистограммы распределений значений КДО на ОРЧ для модемов ЧТ (ОФТ)

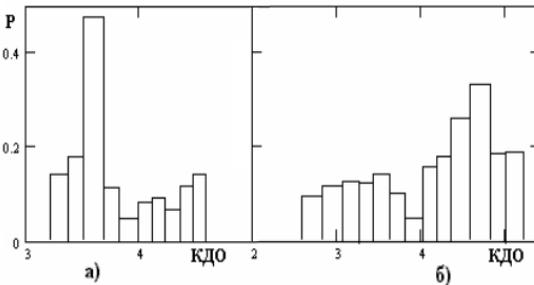


Рис.5. Гистограммы распределений значений КДО на ОРЧ_ЧТСЛ

буемую мощность передатчика системы радиосвязи, обеспечивающую требуемое значение КДО. Для решения этой задачи в диссертации получены следующие формулы:

$$P_{св} = P_0 \cdot \frac{\Delta f_{св}}{\delta F} \cdot 10^{(KDO-0,1)\eta} \text{ — для системы с ЧТ модемом;}$$

$$P_{св} = P_0 \cdot \frac{\Delta f_{св}}{\delta F} \cdot 10^{(KDO/m)-0,1\eta+lg m-(0,3/m)} \text{ — для системы с ЧТ}_{сд} \text{ модемом.}$$

Дальнейшее уменьшение мощности связанного передатчика возможно либо уменьшением порогового значения КДО благодаря применению кодов с исправлением ошибок, либо применением разнесенного приема. В этом случае возможно обеспечить помехоустойчивый прием при мощности связанного передатчика всего в 10-100 Вт.

В главе представлены результаты экспериментальных исследований радиотехнических характеристик для сверхдальних (кругосветных) радиотрасс. Они, в частности, показали, что память радиоканалов на прямых кругосветных (ПКР) радиолниях составляет 0,4-0,8мс со средним значением 0,54мс, а на обратных кругосветных радиолниях (ОКР) – 0,3-0,6мс. Установлено, что в период геомагнитных возмущений полоса прозрачности ПКР (ННЧ- МНЧ) в среднем занимает интервал 18-23 МГц, а ОКР – 14,2-20 МГц.

Эксперименты показали, что для модемов со сложением мощностей парциальных лучей ОРЧ находится преимущественно на частотах, где наблюдаются II, III и IV модели многолучевости и среднее значение отношения $ОРЧ_{ЧТСЛ}/МНЧ=0,54$ для односкачковых радиолний и $ОРЧ_{ЧТСЛ}/МНЧ=0,58$ – для двухскачковых

Гистограмма распределения значений КДО для $ОРЧ_{ЧТСЛ}$ представлена на рис.5а, б соответственно для одно- и двухскачковых радиолний.

На практике часто требуется для выбранных ОРЧ по измеренным для сигналов ЛЧМ ионозонда на этих частотах отношениям сигнал/шум η определить требуемую

В результате комплексных исследований разработан обобщенный алгоритм адаптации ИТХ системы связи по результатам наклонного зондирования радиолинии и сформулированы основные принципы работы системы связи в оптимальном режиме, обеспечиваемом благодаря радиомониторингу радиолинии непрерывными ЛЧМ сигналами.

Поскольку зондирование радиолинии должно создавать как можно меньше помех передаче информации, то оно должно осуществляться за минимальное время и как можно реже. В этом случае важным является использование средств прогнозирования параметров радиоканала для не обеспеченных зондированием промежутков времени, а также при осуществлении длительного (десятки минут, часы) сеанса связи. Роль прогнозирования возрастает при работе в условиях преднамеренных помех.

Шестая глава посвящена развитию и разработке метода и алгоритма краткосрочного прогнозирования характеристик радиолиний для осуществления работы в автоматическом режиме с использованием данных наклонного ЛЧМ ионозонда.

Проведенный анализ показал, что метод долгосрочного прогнозирования МПЧ, использующий статистическую модель ионосферы, обеспечивает точность прогноза, ограниченную значениями 50-70%. Более высокой точностью обладает линейное краткосрочное прогнозирование. В данной главе представлены исследования по использованию метода для реализации в автоматическом режиме при зондировании радиолинии с помощью ЛЧМ ионозонда. В методе предполагаются известными математическое ожидание, дисперсия и коэффициент автокорреляции для предикторной функции. В работе математическое ожидание и стандартное отклонение рассчитываются после каждого сеанса измерения. Усредненные в течение суток значения относительных ошибок прогноза σ_p / σ (σ – средняя за все периоды прогноза ошибка) показали, что для прогноза на 15мин. относительные ошибки составляют 55% от средних ошибок, а для прогноза на 30мин. они увеличиваются до 69% от среднего.

Недостаток метода линейного краткосрочного прогноза заключается в необходимости накопления данных для нахождения устойчивых оценок для параметров линейного уравнения. Поэтому в диссертации исследуется другой подход, основанный на использовании статистической модели ионосферы, корректируемой к ее текущему состоянию, контролируемому с помощью ЛЧМ ионозонда. Такая задача аналогична задаче оптимального автоматического регулирования, когда регулируется внешний параметр модели, каковым является солнечная активность. При этом в диссертации предлагается оптимальность прогноза достигать за счет подстройки модели к регулярной составляющей суточного хода предикторной функции. Предложенный алгоритм прогнозирования с использованием результатов ЛЧМ зондирования радиолинии включает следующие шаги: автоматическое измерение текущего значения $V(t)$, низкочастотную фильтрацию предикторной функции, численное оценивание параметра $W(t)$ (уровня солнечной активности) модели, определение адекватности модели на заданном шаге по критериям случайности остаточного ряда для V_t , оценку точности адекватной модели, получение точечного и интервального прогнозов, анализ верификации прогноза.

Регулярную и случайную компоненты предикторной функции можно представить в виде суммы соответствующих слагаемых: $V(t) = V_{\Delta F}(t) + \varepsilon_t$. Показано, что если регулярная составляющая отфильтровывается ФНЧ, то величина $\sigma_{\Delta F}$ играет роль эмпирической дисперсии и для ширины частотного окна ΔF равна: $\sigma_{\Delta F} = \frac{1}{(1-2\Delta F)N} \sum_{t=1}^N [V(t) - V_{\Delta F}(t)]^2$. Поскольку критерием качества прогноза является требование выполнения условия $\sigma_{\Delta F} < \sigma_0$, где величина $\sigma_{\Delta F}$ определяется по приведенной формуле и равна корню из средней мощности случайной компоненты предикторной функции, то полоса фильтра должна быть такой, чтобы выполнялось это неравенство. Были выполнены экспериментальные исследования остаточной компоненты на случайный характер. Для этого в соответствии с существующими современными представлениями выработаны критерии случайности временного ряда.

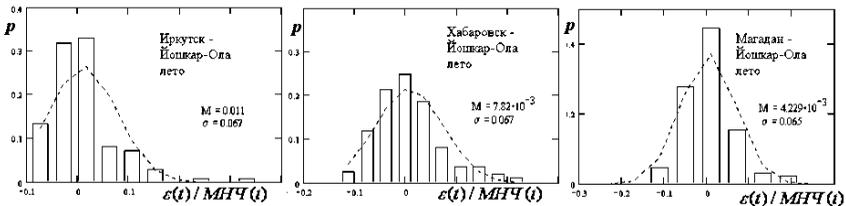


Рис. 6. Экспериментальные законы распределения нормированной к МНЧ остаточной компоненты временных рядов $\varepsilon(t)$ для летнего времени

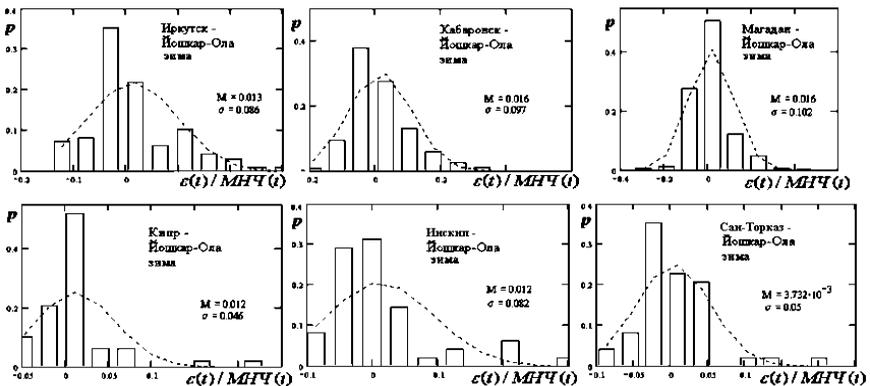


Рис. 7. Экспериментальные законы распределения нормированной к МНЧ остаточной компоненты временных рядов $\varepsilon(t)$ для зимнего времени

На рис.6-7 приведены примеры экспериментальных законов распределения нормированной к МНЧ остаточной компоненты временных рядов $\varepsilon(t)$ для лета, зимы по 6 радиолиниям. Можно заключить, что мощность случайной компоненты летом меньше, чем зимой, и отношение СКО/МНЧ составляет в среднем 6-7% летом и 8-10% зимой.

Расчет ошибок временных прогнозов, полученных для интервалов $T=1-4$ часа, позволил построить экспериментальную модель $CKO=0,254T+0,84$ для одно-

скачковых радиолоний протяженностью 2500-3600км. Экспериментально установлено, что в условиях спокойной ионосферы на радиолониях до 6 тыс. км ошибки краткосрочного прогноза исследуемого метода не превышают 10% при интервале прогноза 3-4 часа.

Получены зависимости ошибок прогнозов МНЧ от протяженности радиолонии. Таким образом, полученные результаты указывают на то, что ошибки оптимальных прогнозов в основном определяются мощностью случайной компоненты суточного хода предикторной функции.

В главе рассмотрена методика применения краткосрочного прогноза для управления рабочими частотами на магистральных радиолониях и методика автоматического краткосрочного прогнозирования МНЧ для радиолоний, не обеспеченных средствами диагностики по данным радиомониторинга других радиолоний региона. Смысл последней заключается в коррекции модели ионосферы по данным зондирования на заданной радиолонии и расчете по скорректированной модели характеристик для требуемой радиолонии.

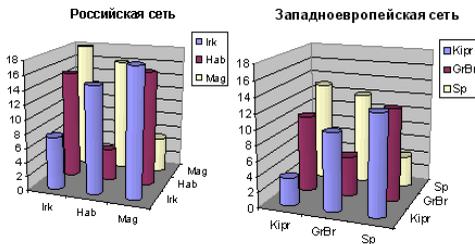


Рис.8. Ошибки пространственного прогноза МПЧ с использованием данных ЛЧМ ионозонда

долгосрочных прогнозов (25-40%), ошибки прогнозов, выполненных по разработанной методике с помощью скорректированной глобальной модели ионосферы, в 2-3 раза меньше. Это означает, что разработанный метод краткосрочного прогнозирования дает привлекательные для практики результаты.

В завершение главы приведены результаты испытаний разработанных методов и алгоритмов в реальных системах связи на магистральных радиолониях, а также при испытаниях перспективных систем связи в системе экспериментально-технологических радиотрасс (СЭТР), показавшие их высокую эффективность.

В *приложении* содержатся дополнительные материалы и документы. *Приложение 1* содержит анализ личного вклада автора в публикации основных результатов диссертации в ведущих научных журналах и изданиях, перечень которых утвержден ВАК РФ. *Приложение 2* содержит акты, подтверждающие внедрение (использование) результатов и выводов работы.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Развiт радиотехнический подход к описанию распространения декаметровых радиоволн на ионосферных радиолониях, учитывающий взаимодействие сигналов со средой распространения - ионосферной плазмой. На его основе впервые разработана математическая модель, следствиями которой являются законы распределения смеси сигнала и помех на выходе системы сжатия непрерывного ЛЧМ сигнала в частотной

На рис.8 приведены полученные диссертантом на сети российских (регион Сибири) и западноевропейских ЛЧМ ионозондов (см. табл. 1) результаты экспериментальных исследований ошибок пространственных прогнозов. Видно, что ошибки прогнозов составили в среднем 12% для западноевропейской и 15% для российской сети.

По сравнению с ошибками

области и критерий его обнаружения, а также впервые получены экспериментальные законы распределения и определены их основные параметры.

Предложен, теоретически обоснован и апробирован на основе обширных экспериментальных данных новый метод обнаружения непрерывного ЛЧМ сигнала в спектрах разностной частоты, который позволил решить радиотехническую задачу обнаружения в автоматическом режиме зондирующих сигналов со сверхбольшой базой из комплекса помех на выходе системы сжатия в частотной области.

Предложен, реализован в комплексном алгоритме и апробирован новый метод выделения зондирующего сигнала со сверхбольшой базой из комплекса помех на выходе системы сжатия в частотной области, использующий подходы теории распознавания образов мод ионосферного распространения на ионограммах наклонного зондирования ионосферы.

2. Разработан радиотехнический метод определения структурных функций многолучевых каналов по результатам наклонного зондирования ионосферных радиолиний непрерывным ЛЧМ сигналом и экспериментально исследованы их основные параметры:

- развита математическая модель передаточных функций и импульсных характеристик многолучевых ионосферных радиоканалов и установлены связи между данными наклонного зондирования радиолинии непрерывными ЛЧМ сигналами и радиотехническими характеристиками декаметровых ионосферных радиолиний и радиоканалов;
- получены аналитические функциональные зависимости для определения системных характеристик многолучевых ионосферных ДКМ радиоканалов и их основных параметров;
- построены экспериментальные модели многолучевости и определены их частотные диапазоны для магистральных среднеширотных радиолиний;
- впервые теоретически обоснован способ определения с высоким частотным разрешением модуля передаточной функции на произвольных рабочих частотах из диапазона от ННЧ до МНЧ радиолинии по данным ее зондирования непрерывным ЛЧМ сигналом. На основе обширных экспериментальных исследований получена статистика параметров передаточной функции для различных моделей многолучевости.

3. Теоретически обоснованы и реализованы в экспериментальных исследованиях следующие методики определения радиотехнических характеристик многолучевых ионосферных каналов и оценки оптимальных ИТХ РТС ПИ по результатам панорамного зондирования радиолинии непрерывными ЛЧМ сигналами:

- автоматического определения частотной зависимости отношения сигнал/шум для ЛЧМ ионозонда;
- оценки отношения сигнал/шум для РТС ПИ;
- мощности сигнала для РТС ПИ;
- коэффициента двоичной ошибки для рабочих частот различных модемов РТС ПИ;
- автоматического определения максимальной скорости передачи информации;
- автоматического определения диапазона рабочих частот.

Впервые получены и систематизированы экспериментальные данные о вариациях ИТХ в помехоустойчивых радиоканалах на радиоприемах западноевропейского и сибирского регионов земного шара.

4. Разработаны методики, позволяющие впервые по результатам наклонного зондирования радиоприема непрерывным ЛЧМ сигналом выбрать помехоустойчивые радиоканалы для декаметровых РТС ПИ с различными модемами и определить для них оптимальные ИТХ. Впервые экспериментально получены важные для практики характеристики диапазонов одномодового распространения (ДОР), а также соответствующие им ИТХ декаметровых РТС ПИ:

- значения КДО для различных модемов в помехоустойчивых каналах;
- память каналов и скорость передачи информации в помехоустойчивых каналах;
- вероятность попадания помехоустойчивого канала с заданным КДО в ДОР;
- ИТХ кругосветных радиоприемов.

5. Предложен и теоретически обоснован новый метод решения задачи краткосрочного прогнозирования, основанный на управлении моделью ионосферы по отфильтрованным экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ сигналом. Представлен теоретический анализ результатов фильтрации экспериментальных значений предикторной функции для выделения регулярной компоненты и получены аналитические соотношения для статистических характеристик остаточной компоненты в случае, когда она удовлетворяет критериям случайности. Экспериментальным путем получены аналитические зависимости точности автоматического краткосрочного прогноза от времени упреждения и от протяженности среднеширотных радиоприемов в интервале 2500 – 6000 км, а также получены точностные характеристики прогнозов для радиоприемов, не обеспеченных диагностикой.

Таким образом, в работе исследованы новые явления и процессы в РТС ДКМВ диапазона с ионосферной линией связи, обусловленные существенным влиянием эффектов распространения радиоволн на характеристики сигналов на выходе радиоканала, исследовано и учтено влияние этих эффектов на ИТХ систем дальней радиосвязи. В целом, совокупность разработанных автором теоретических положений, полученных результатов и рекомендаций для практики декаметровой радиосвязи, позволивших повысить эффективность радиотехнических систем связи ДКМВ диапазона, можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

Основные публикации по теме диссертации

1. *Рябова, Н.В.* Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Научное издание (Монография) // *Н.В.Рябова.* – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. -292с.
2. *Рябова, Н.В.* Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона: Учеб. пособие / *В.А.Иванов, Н.В.Рябова, В.В.Шумаев.* – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с. (рек-но Минобразования РФ).
3. *Рябова, Н.В.* Использование ЛЧМ-ионозонда в адаптивной системе КВ-радиосвязи / *Н.В.Рябова, Р.М.Богута, В.А.Иванов, и др.* // *Радиотехника.* – 1993. – №4. – С. 77-79.

4. *Рябова, Н.В.* Аппаратура частотного обеспечения в адаптивной системе КВ-радиосвязи / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* // Электросвязь. – 1995. – № 11. – С. 30-32.

5. *Рябова, Н.В.* Прогнозирование и экстраполяция параметров КВ-радиоканала по данным наклонного зондирования ионосферы / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* // Радиотехника. – 1997. – № 7. – С. 28-30.

6. *Ryabova, N. V.* Forecasting and updating HF channel parameters on the basis of oblique chirp sounding / *N.V.Ryabova, V.A.Ivanov, V.P.Uryadov, V.V.Shumaev* // Radio Science(USA). – 1997. – V. 32, № 3. – P. 983-988.

7. *Рябова, Н.В.* Первые результаты сверхдальнего зондирования ионосферных неоднородностей с использованием волноводной моды / *Н.В.Рябова, А.А.Понятов, В.П.Урядов, и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, № 6. – С. 1136-1144.

8. *Рябова, Н.В.* Моделирование трансэкваториального распространения радиоволн / *Н.В.Рябова, И.Ю.Игнатьева, В.А.Угриновский, В.П.Урядов* // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1993. – Т. 33, № 6. – С. 126-131.

9. *Рябова, Н.В.* Управление волноводным распространением коротких радиоволн за счет модификации ионосферы мощным радиоизлучением / *Н.В.Рябова, Л.М.Ерухимов, В.Д.Костромин и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. – 1993. – Т. 36, №5. – С. 390-397.

10. *Рябова, Н.В.* Эффект солнечного затмения 22 июня 1990 г. на среднеширотных трассах протяженностью 4 Мм / *Н.В.Рябова, Н.Г.Брынько, В.А.Иванов и др.* // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1992. – Т.32, № 1. – С. 164-166.

11. *Рябова, Н.В.* Особенности распространения кругосветных сигналов на трассах российской сети ЛЧМ-ионозондов в годы низкой и средней солнечной активности / *Н.В.Рябова, В.И.Куркин, В.А.Иванов и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. XLIII, № 10. – С. 843-853.

12. *Ryabova, N. V.* The investigation of long-distance HF propagation on the basis of chirp sounder / *N.V.Ryabova, V.P.Uryadov, V.A.Ivanov, V.V.Shumaev* // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. New York. USA. – 1995. – V. 57, № 11. – P. 1263-1271.

13. *Ryabova, N. V.* Pedersen mode ducting in randomly-stratified ionosphere / *N.V.Ryabova, V.A.Eremenko, L.M.Erukhimov a. o.* // Journal waves in Random Media. – 1997. – V. 7, № 4. – P. 531-544.

14. *Ryabova, N. V.* Modelling of transequatorial propagation of HF radio waves / *N.V.Ryabova, I.Yu.Ignatieva, V.A.Ugrinovskiy, V.P.Uryadov* // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. New York. USA. – 1995. – V. 57, № 7. – P. 743-747.

15. *Ryabova, N. V.* Russian – Australian Experiment on Oblique Ionospheric Sounding. / *N.V.Ryabova, V.P.Uryadov, S.J.Anderson, a.o.* // Millennium Conference on Antennas and Propagation AP2000 (9-14 April 2000). – Davos, Switzerland, 2000. - P.27.

16. *Ryabova, N. V.* HF ducting control due to modification of the ionosphere by powerful radiation / *N.V.Ryabova, V.A.Ivanov, V.P.Uryadov, V.V.Shumaev* // International Symposium on Antennas and Propagation. Hokkaido University, Sapporo, Japan. – Sapporo, 1992. – P. 4.

17. *Рябова, Н.В.* Распространение верхнего луча в возмущенной ионосфере / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1995. – Т. 35, № 5. – С. 131-135.

18. *Рябова, Н.В.* Новый механизм каналирования декаметровых радиоволн в ионосферной плазме / *Н.В.Рябова, В.А.Еременко, Л.М.Ерухимов и др.* // Доклады РАН. – 1997. – Т. 357, № 1. – С. 35-37.

19. *Ryabova, N. V.* Formation of the fluctuation waveguide in the vicinity of F-layer Maximum During Ionospheric Disturbances / *N.V.Ryabova, V.A.Ivanov, V.P.Uryadov, V.V.Shumaev* // International Conference on Electromagnetic in Advanced Applications (ICE-AA 95). – Torino. Italy, 1995. – P. 471-474.

20. *Ryabova, N. V.* HF Guidance in the Vicinity of F Layer Maximum During Ionosphere Disturbances / *N.V.Ryabova, V.A.Eremenco, L.M.Eruhimov a.o.* // Tenth International Conference on Antennas and Propagation. – Venue, 1997. - № 436. – P. 2265-2268.

21. *Рябова, Н.В.* Диагностика кольцевого ионосферного КВ-канала с помощью ЛЧМ-иозонда / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.С.Максимов и др.* // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1993. – Т. 33, № 4. – С. 184-188.

22. *Ryabova, N. V.* Effect of the solar eclipse of 22 Juli at mid-latitude path of HF propagation / *N.V.Ryabova, V.A.Ivanov, V.V.Shumaev a.o.* // Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics. New York. USA. – 1998. – V. 60, № 11. – P. 1013-1016.

23. *Рябова, Н.В.* Частотное обеспечение КВ-радиосвязи на базе автоматизированного ЛЧМ-иозонда / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Колчев, В.В.Шумаев* // Проблемы распространения и дифракции электромагнитных волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1995. – С. 110-121.

24. *Рябова, Н.В.* Исследование искажений сигналов с расширенным спектром на выходе свозного радиоканала с дисперсией / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Колчев, В.В.Шумаев* // Проблемы дифракции и распространение волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1994. – С. 62-72.

25. *Рябова, Н.В.* О механизмах распространения мод Педерсена в спокойной и возмущенной ионосфере / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев.* // Проблемы распространения и дифракции электромагнитных волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1995. – С. 132-139.

26. *Рябова, Н.В.* Аппаратно-программный комплекс для определения передаточной функции широкополосного КВ-радиоканала / *В.А.Иванов, Н.В.Рябова и др.* // Проблемы распространения и дифракции электромагнитных волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1995. – С. 103-109.

27. *Рябова, Н.В.* Исследование аномальных мод распространения КВ на сети трасс наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Понятов, В.П.Урядов* // Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1996. – С. 95-103.

28. *Рябова, Н.В.* Информационно-измерительная сеть для исследования в области ионосферы распространения КВ / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Колчев и др.* // Вопросы дифракции и распространения электромагнитных волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1998. – С. 130-139.

29. *Рябова, Н.В.* Вариации ионосферы в период солнечного затмения 22 июня 1990 года / *В.А.Иванов, Н.В.Рябова и др.* // Проблемы распространения и дифракции электромагнитных волн: Междувед. сб. ст. / МФТИ. – М., 1996. – С. 104-110.

30. *Рябова, Н.В.* Диагностика ионосферы с помощью сети станций наклонного ЛЧМ-зондирования / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.С.Максимов, и др.* // Распространение радиоволн в авроральной ионосфере: Сб. науч. тр. / Поляр. геофиз. ин-т. – Апатиты: КНЦ РАН, 1992. – С.69-80.

31. *Рябова, Н.В.* Оперативное моделирование работы систем КВ-связи / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.Б.Егошин и др.* // Радиолокация, навигация и связь: Сб. ст. V междунар. конф. – Воронеж, 1999. – Т. 3. – С. 1711-1716.

32. *Рябова, Н.В.* Частотное обеспечение для систем КВ радиосвязи с ЧКМ сигналами / *В.А.Иванов, Д.В.Иванов, Н.В.Рябова и др.* // Радиолокация, навигация и связь: Сб. ст. VII междунар. конф. – Воронеж, 2001. – Т.2. – С.937-947.

33. *Рябова, Н.В.* Автоматическое определение скорости передачи информации по КВ радиоканалам / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.Б.Егошин* // Радиолокация, навигация, связь: Сб. ст. VII междунар. конф. – Воронеж, 2001. – Т.2. – С.896-903.

34. *Рябова, Н.В.* Автоматизация прогноза МПЧ КВ радиосвязи по данным ЛЧМ зонда / *Рябова Н.В., Иванов В.А.* // Радиолокация, навигация, связь: Сб. ст. VII междунар. конф. – Воронеж, 2001. – Т.2. – С.915-924.

35. *Рябова, Н.В.* Натурное моделирование работы средств и фрагментов систем связи в Системе Экспериментально-Технологических Радиотрасс (СЭТР) / *Н.В.Рябова, В.Ф.Брянцев, В.А.Валов и др.* // Радиолокация, навигация, связь: Сб. ст. VII междунар. конф. – Воронеж, 2001. – Т.2. – С.1172-1179.

36. *Рябова, Н.В.* Радиоканалы однолучевого распространения КВ и его основные характеристики / *Н.В.Рябова* // Радиолокация, навигация, связь: Сб. ст. VIII междунар. научно-технич. конф. – Воронеж, 2002. – Т.2. – С. 955-964.

37. *Рябова, Н.В.* Математические модели ЛЧМ ионозонда. / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, Д.В.Иванов* // Радиолокация, навигация и связь: Сб. ст. IX междунар. конф. – Воронеж, 2003. – Т.2. – С.916-927.

38. *Рябова, Н.В.* Автоматизированная радиотехническая система частотного обеспечения с возможностью передачи информации сигналами с расширенным спектром для систем и сетей КВ-связи / *Н.В.Рябова, В.И.Батухтин, В.А.Иванов и др.* // Радиолокация, навигация и связь: Сб. ст. V междунар. конф. – Воронеж, 1999. – Т. 1. – С.470-481.

39. *Рябова, Н.В.* Автоматическое обнаружение сигнала на выходе системы сжатия ЛЧМ ионозонда / *Н.В.Рябова, А.Б.Егошин* // Радиолокация, навигация и связь: Сб. ст. IX междунар. конф. – Воронеж, 2003. – Т.2. – С.940-950.

40. *Рябова, Н.В.* Экспериментальные исследования моделей многолучевости на КВ радиолиниях протяженностью 2,6 – 5,7Мм / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.О.Щирый* // Радиолокация, навигация, связь: Сб. статей XX междунар. конф. – Воронеж, 2004. – Т.2. – С.1087-1098.

41. *Рябова, Н.В.* Результаты измерения ключевых характеристик АЧХ многолучевых ионосферных КВ радиолиний / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.О.Щирый* // Радиолокация, навигация, связь: Сб. статей XX междунар. конф. – Воронеж, 2004. – Т.2. – С.1099-1107.

42. *Рябова, Н.В.* Цифровой синтезатор частот / *Н.В.Рябова, И.В.Рябов, В.П.Урядов* // Авт. свид-во №1774464 СССР, МКИ Н 03 В 19/00, 1993г.

43. *Рябова, Н.В.* Экспериментальные исследования характеристик однолучевого распространения КВ на среднеширотных радиолиниях 2,6 – 5,7 Мм / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов* // Распространение радиоволн: Сб. докл. XX Всерос. науч. конф. – Н.Новгород, 2002. – С.113-114.

44. *Рябова, Н.В.* Результаты использования ЛЧМ-ионозонда в адаптивной среднеширотной ДКМВ-радиолинии протяженностью 3 Мм / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов,*

В.П.Урядов и др. //Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ-диапазона: Сб. докл. – Н.Новгород, 1991. – С.23.

45. *Рябова, Н.В.* Сверхдальнее ЛЧМ-зондирование как метод диагностики кольцевого ионосферного КВ-радиоканала / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.С.Максимов и др.* //Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ-диапазона: Сб. докл.– Н.Новгород, 1991. – С.24.

46. *Рябова, Н.В.* Сеть станций НЗ ионосферы. Сетевой ЛЧМ-ионозонд / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов и др.* //Распространение радиоволн и проблемы радиосвязи ДКМВ-диапазона: Сб. докл.– Н.Новгород, 1991. – С. 26-27.

47. *Рябова, Н.В.* Автоматизированный ЛЧМ-ионозонд в адаптивной системе КВ-связи / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //XVII Всеросс. конференция по распространению радиоволн: Сб. докл. – Ульяновск, 1993. – С. 35.

48. *Рябова, Н.В.* Исследование пространственной корреляции МНЧ на среднеширотных трассах / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //XVII Всеросс. конференция по распространению радиоволн: Сб. докл.– Ульяновск, 1993. – С. 37.

49. *Рябова, Н.В.* Сверхдальнее ЛЧМ-зондирование кольцевого ионосферного КВ-канала / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //XVII Всеросс. конференция по распространению радиоволн: Сб. докл. – Ульяновск, 1993. – С. 53.

50. *Рябова, Н.В.* Работа ЛЧМ-ионозонда в адаптивной системе КВ-связи /*В.А.Иванов, Н.В.Рябова, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //48-я науч. сес., посвящ. Дню радио: Сб. докл. – М., 1993. – С. 94-95.

51. *Рябова, Н.В.* Экстраполяция на соседние КВ-радиополосы максимально наблюдаемых частот по данным сети станций НЗИ / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //48-я науч. сес., посвящ. Дню радио: Сб. докл. – М., 1993. – С. 93-94.

52. *Рябова, Н.В.* Влияние возмущения магнитного поля Земли на дальнейшее распространение КВ лучом Педерсена / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах: Сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – М., 1994. – Ч. 1. – С. 153-155.

53. *Рябова, Н.В.* Исследование разрешающей способности ионозондов с различными видами сигналов / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Колчев, В.В.Шумаев* //Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах: Сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – М., 1994. – Ч. 2. – С 158-160.

54. *Рябова, Н.В.* Экспериментальные результаты определения полосы когерентности ионосферного КВ-канала /*Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Колчев, В.В.Шумаев* //Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах: Сб. докл. IV междунар. науч.-техн. конф. – М., 1994. – Ч. 2. – С. 179-181.

55. *Рябова, Н.В.* Распространение моды Педерсена в спокойной и возмущенной ионосфере / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //50-я науч. сес., посвящ. Дню радио: Сб. докл. – М., 1995. – С. 42-43.

56. *Рябова, Н.В.* Эффект усиления моды Педерсена в периоды ионосферных возмущений /*Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики: Сб. докл. междунар. симпоз., посвящ. 60-летию регулярных ионосферных исследований в России. – Томск, 1996. – С. 61-62.

57. *Рябова, Н.В.* Влияние изменений распределения электронной концентрации на дальнейшее распространение КВ лучом Педерсена / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов,*

Д.В.Иванов и др. //XVIII Всеросс. конф. по распространению радиоволн: Сб. докл. – М., 1996. – Т. 1. – С. 216-217.

58. *Рябова, Н.В.* Обнаружение флуктуационного волновода в окрестности максимума F-слоя ионосферы / *Н.В.Рябова, В.А.Еременко, Л.М.Ерухимов и др.* //XVIII Всеросс. конф. по распространению радиоволн: Сб. докл. – М., 1996. – Т. 2. – С. 358-359.

59. *Рябова, Н.В.* Влияние магнитных возмущений на дальнейшее распространение КВ на трансполярных радиотрассах / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, В.П.Урядов, В.В.Шумаев* //Физика авроральных явлений: Сб. докл. XIX Апатитского семинара.– Апатиты, 1996. – С. 43. – (Препринт РАН; Полярн. геофиз. ин-т; 96-01-99).

60. *Ryabova N. V.* The longdistance HF propagation in conditions of ionospheric disturbances of natural and artificial origin / *N.V.Ryabova, L.M.Erukhimov, V.P.Uryadov a o* //Third Volga International Summer School on Spase Plasma Physis (ISS 97). – N.Novgorod, 1997 – P. 20-21.

61. *Рябова, Н.В.* Одновременное измерение кругосветных сигналов на сети трасс ЛЧМ-зондирования / *Н.В.Рябова, В.И.Батухтин, В.А.Иванов, и др.* //Физика ионосферы и атмосферы Земли: Сб. докл. междунар. конф., посвящ. 50-летию ионосферных исследований в Иркутске. – Иркутск, 1998. – С. 76-77.

62. *Рябова, Н.В.* Моделирование влияния условий распространения коротких радиоволн на основные параметры различных систем связи / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.А.Колчев* //Тр. XI Всерос. шк.-конф. по дифракции и распространению волн, г. Москва, 12-15 янв. 1998 г. – М.: МГУ, 1998. – С. 211-212.

63. *Рябова, Н.В.* Суточный ход ОРЧ для радиолиний дальнего распространения / *Н.В.Рябова, А.Б.Егошин, В.А.Иванов и др.* //Распространение радиоволн: Сб. докл. XIX Всерос. науч. конф. – Казань, 1999. – С. 94-95.

64. *Рябова, Н.В.* О характеристиках верхнего луча на среднеширотной трассе Иркутск – Йошкар-Ола /*Н.В.Рябова, В.А.Иванов, Д.В.Иванов и др.* //Распространение радиоволн: Сб. докл. XIX Всерос. науч. конф. – Казань, 1999. – С. 96-97.

65. *Рябова, Н.В.* Моделирование характеристик различных систем КВ-связи при ионосферном распространении радиоволн / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, Д.В.Иванов и др.* //Распространение радиоволн: Сб. докл. XIX Всерос. науч. конф. – Казань, 1999. – С. 114-115.

66. *Рябова, Н.В.* Программные средства для определения ключевых параметров и характеристик КВ линии связи по данным наклонного ЛЧМ зондирования. /*Н.В.Рябова, А.Б.Егошин, В.А.Иванов* // Информационные технологии и радиосети. ИНФОРРАДИО'2000: Сб. докл. 2-й междунар. научно-практич. конф. – Омск: Омск.гос.ун-т, 2000. – С.134-137.

67. *Ryabova, N. V.* Researches of time-and-frequency characteristics of Pedersen modes on the Russian oblique chirp sounders network / *N.V.Ryabova, V.A.Ivanov, D.V.Skvortsov a.o.* // Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. VIII Joint International Symposium. – Irkutsk, 2001. – P.238, D4-06.

68. *Рябова, Н.В.* Измерение памяти канала по данным наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы /*Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.Б.Егошин* // LVI науч. сессия, посвящ. Дню радио: Сб. докл. – М., 2001. – Т.2. – С.273-275.

69. *Рябова, Н.В.* Автоматизация краткосрочного прогнозирования МПЧ КВ радиосвязи с использованием ЛЧМ зонда и компактной модели ионосферы /

Н.В.Рябова, В.А.Иванов // LVI науч. сессия, посвящ Дню радио: Сб докл. – М., 2001. – Т.2. – С.270-272.

70. *Рябова, Н.В.* Особенности обработки ЛЧМ сигналов при наклонном зондировании ионосферы в период солнечного затмения /Н.В.Рябова //Информационные технологии в электронике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2002): Сб. докл. IV Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2002. – С. 327-328.

71. *Рябова, Н.В.* Влияние космической погоды на диапазон однолучевого распространения КВ / Н.В.Рябова // Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: IX Joint International Symposium. –Tomsk, 2002.

72. *Рябова, Н.В.* Исследование ионосферы непрерывными сигналами с линейной частотной модуляцией / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, Д.В.Иванов и др.* // Распространение радиоволн: Сб. докл. XX Всерос. науч. конф. – Н.Новгород, 2002.

73. *Рябова, Н.В.* Временной и пространственный краткосрочный прогноз МПЧ / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов* // Распространение радиоволн: Сб. докл. XX Всерос. науч. конф. – Н.Новгород, 2002.

74. *Рябова, Н.В.* Методика и результаты измерений тонкой структуры АЧХ многолучевого КВ-радиоканала / *Н.В.Рябова, В.А.Иванов, А.О.Щирый* // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Сб. докл. Всерос. научно-практич. конф., посвящ. 40-летию Томского гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – Томск, 2002. – С.208-210.

75. *Рябова, Н.В.* Экспериментальное исследование многолучевости на КВ радиолиниях протяженностью 2500 – 5700 км / *Н.В.Рябова* // LVII науч. сессия, посвящ Дню радио: Сб докл. – М., 2003. – Т.1. – С.205-207.

76. *Рябова, Н.В.* Исследование динамических характеристик глобальных ионосферных возмущений по данным западноевропейской сети ЛЧМ-зондов / *Н.В.Рябова* // Научная сессия МИФИ-2003: Сб. докл. – М., 2003. – Т.5. – С. 91-92.

77. *Рябова, Н.В.* Автоматизированный комплекс для измерения АЧХ многолучевых ионосферных КВ радиолиний на основе ЛЧМ-ионозонда / *В.А.Иванов, Н.В.Рябова, А.О.Щирый* // Научная сессия МИФИ-2003: Сб. докл. – М., 2003. – Т.1.– С.209-210.