

на правах рукописи

**Лащевский Алексей Романович**



**ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
В ИОНОСФЕРЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ  
ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ  
С РАЗЛИЧНОЙ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТОЙ СПЕКТРА**

**Специальность:** 01.04.03 – Радиоп физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**МОСКВА – 2010**

Работа выполнена на кафедре высшей математики  
Марийского государственного технического университета

- Научный руководитель:** д.ф.-м.н., профессор  
Иванов Дмитрий Владимирович  
МарГТУ, г. Йошкар-Ола
- Официальные оппоненты:** д.ф.-м.н., профессор,  
лауреат Государственной премии СССР  
Крюковский Андрей Сергеевич  
РосНОУ, г. Москва
- д.ф.-м.н., профессор  
Черкашин Юрий Николаевич  
ИЗМИРАН, г. Троицк
- Ведущая организация:** Учреждение Российской академии наук  
Институт радиотехники и электроники  
РАН им. В.А. Котельникова  
(Фрязинский филиал)

Защита состоится «29» декабря 2010 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.156.06 при Московском физико-техническом институте (государственном университете) по адресу: 117393, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, корп. В-2.

Отзывы направлять по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, МФТИ, учёному секретарю

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан «24» ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.156.06  
к.т.н., доцент



Н.П. Чубинский

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Ионосфера Земли является средой распространения сигналов различных радиоэлектронных систем, обеспечивающих службы: погоды, телевидения, связи, навигации, а также решение других важных для обеспечения жизнедеятельности в современных условиях задач. Одними из ключевых свойств этой среды, негативно влияющих на распространяющиеся сигналы, является ее дисперсность, обусловленная зависимостью скорости распространения от частоты, и пространственно-временная изменчивость характеристик, связанная с изменением положения Солнца и его спорадическими излучениями. В связи с этим, большой интерес с научной и практической точек зрения представляет разработка и совершенствование на основе современных достижений радиофизических средств дистанционного зондирования ионосферы, использующих эффекты распространения радиоволн. В различное время в решение данной проблемы большой вклад внесли: В.Л. Гинзбург, А.В. Гуревич, Н.А. Арманд, Л.А. Вайнштейн, Д.С. Лукин, А.С. Крюковский, А.П. Аютин, В.А. Иванов, В.И. Куркин, А.П. Потехин, Ю.Н. Черкашин, Н.В. Рябова, Д.В. Иванов, Л.М. Ерухимов.

В настоящее время одной из актуальных научных задач является развитие радиофизических методик обработки и анализа сигналов для повышения информационной эффективности методов зондирования ионосферы декаметровыми линейно-частотно-модулированными (ЛЧМ) и фазо-кодо-манипулированными (ФКМ) сигналами с учетом их сжатия в приемнике. Ионозонды с такими сигналами обладают рядом преимуществ перед традиционными импульсными. По этой причине их стали широко использовать для определения локальной динамики основных ионосферных параметров в режиме вертикального зондирования и для приема сигналов наклонного распространения с различных направлений. Главной проблемой повышения эффективности является дисперсность распространения, тем большая, чем шире полоса частот спектра сигнала, которая приводит к уменьшению корреляции принимаемых сложных сигналов с излучаемыми сигналами, не позволяя простым способом увеличивать полосу сигнала. Поэтому важно проведение исследований возможности расширения полосы зондирующих сигналов с одновременной компенсацией дисперсности распространения при учете того, что дисперсность распространения, как и сама ионосфера, подвержена изменчивости.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время еще не все возможности ионозондов с ЛЧМ и ФКМ зондирующими сигналами использованы. Необходимо проведение исследований по учету изменчивости дисперсности среды распространения, по развитию теории распространения таких сигналов в ионосфере и развитию радиофизических методик адаптивной обработки их в приемнике. При этом теория должна

учитывать новые возможные (адаптивные) методики обработки. Необходимо разработать методику, обеспечивающую устойчивое получение эффекта без дисперсного распространения широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала при различных состояниях ионосферы.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании особенностей дисперсного распространения в ионосфере декаметровых линейно-частотно-модулированных радиосигналов с различной средней частотой спектра.

**Задачами** данной работы являются:

1. Анализ и классификация широкополосных сигналов, применяемых для зондирования ионосферы; анализ существующих проблем дисперсного распространения.

2. Развитие методики исследования дисперсности распространения для различных средних частот спектров зондирующих ЛЧМ-сигналов со сверхбольшой базой.

3. Численное исследование эффектов фазовой дисперсности распространения для элементов ЛЧМ-сигнала с различными средними частотами спектра.

4. Развитие радиофизических методик натуральных исследований дисперсного распространения в ионосфере широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала с различной средней частотой спектра.

### **Методы исследования**

Решение поставленных теоретических задач базируется на применении методов теории распространения радиоволн в ионосфере, методов математического анализа, вариационного исчисления, математической статистики. Исследование созданных методик проводилось с использованием современного метода численного эксперимента при задании характеристик ионосферы на основе международной модели. Натурные исследования проведены с использованием проверенной в многочисленных экспериментах аппаратуры ЛЧМ-иозонда и созданного автором программного обеспечения. Эксперименты проведены на радиотрассах: Йошкар-Ола – Йошкар-Ола (вертикальное радиозондирование); Нижний Новгород – Йошкар-Ола; Инскип (Англия) – Йошкар-Ола; Иркутск – Йошкар-Ола; Кипр – Йошкар-Ола. При обработке экспериментальных данных использовались спектральные методы, статистические методы анализа данных.

**Достоверность и обоснованность** результатов и выводов диссертационной работы определяются использованием адекватного математического аппарата, достаточным и статистически достоверным набором экспериментальных данных, хорошей согласованностью экспери-

ментальных данных с результатами математического моделирования, повторяемостью результатов. Основные теоретические результаты проверены с помощью натуральных экспериментов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методики: определения частотной зависимости задержки сигнала в ионосфере с применением для зондирования последовательности элементов ЛЧМ-сигнала с различными средними частотами спектра; определения дисперсионных искажений широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала при изменении их длительности сверх критической; компенсации эффекта фазовой дисперсности в ЛЧМ-сигналах с различной средней частотой спектра, отличающейся формированием комплексного сигнала разностной частоты на основе преобразования Гильберта и синтезом комплексного компенсирующего сигнала на основе данных ЛЧМ-зондирования ионосферы.

2. Методики численного определения: частотной зависимости задержки сигнала в среде при вертикальном падении на основе дискретных данных об электронной концентрации и использования метода решения обратной коэффициентной задачи функционального анализа; спектров разностного сигнала в зависимости от средних частот выборочных элементов зондирующего ЛЧМ-сигнала.

3. Установленный эффект уменьшения влияния дисперсионных искажений широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала из-за просачивания их высокочастотных спектральных составляющих в окрестности максимума слоя.

4. Алгоритмы обработки широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала со сверхбольшой базой для исследования дисперсного распространения и влияния компенсации частотной дисперсности фазы.

5. Закономерности: дисперсионных искажений элементов ЛЧМ-сигнала от характеристик сигнала и среды распространения (ионосферы); поведения времени устойчивости компенсации фазовой дисперсности от относительной средней частоты элемента ЛЧМ-сигнала, от порядка луча ионосферного распространения и от протяженности трассы.

### **Научная новизна работы**

1. Разработаны новые методики: определения частотной зависимости задержки сигнала в ионосфере с применением для зондирования последовательности элементов ЛЧМ-сигнала с различными средними частотами спектра; дисперсионных искажений широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала при изменении их длительности сверх критической; компенсации эффекта фазовой дисперсности в ЛЧМ-сигналах с различной средней частотой спектра, отличающейся формированием комплексного сигнала разностной частоты на основе преобразования Гильберта

берта и синтезом комплексного компенсирующего сигнала на основе данных ЛЧМ-зондирования ионосферы.

2. Разработаны новые методики численного определения: частотной зависимости задержки сигнала в среде при вертикальном падении на основе дискретных данных об электронной концентрации и использования метода решения обратной коэффициентной задачи функционального анализа; спектров разностного сигнала в зависимости от средних частот выборочных элементов зондирующего ЛЧМ-сигнала.

3. Впервые выявлен эффект уменьшения влияния дисперсионных искажений широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала из-за просачивания их высокочастотных спектральных составляющих в окрестности максимума слоя.

4. Впервые представлены закономерности: дисперсионных искажений элементов ЛЧМ-сигнала от характеристик сигнала и среды распространения (ионосферы); поведения времени устойчивости компенсации фазовой дисперсности от относительной средней частоты элемента ЛЧМ-сигнала, от порядка луча ионосферного распространения и от протяженности трассы.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

1. Результаты исследования дисперсного распространения широкополосных ЛЧМ-сигналов в зависимости от средней частоты спектра и состояния ионосферы могут быть использованы при создании новых систем передачи информации в декаметровом диапазоне и особенно систем цифрового радиовещания, а также при создании новых систем зондирования ионосферы сложными радиосигналами.

2. Методики и алгоритмы обработки сигналов, обеспечивающей компенсацию фазовой дисперсности широкополосных ЛЧМ-сигналов, могут быть использованы в системах радиосвязи для повышения их помехоустойчивости.

3. Результаты теоретических и натурных исследований дисперсного распространения сложных сигналов с учетом их сжатия могут служить предметом для дальнейшего развития комплексной проблемы распространения радиоволн.

**Личный творческий вклад автора.** Работа носит теоретико-экспериментальный характер. Натурные экспериментальные работы по зондированию ионосферы декаметровыми ЛЧМ-сигналами со сверхбольшой базой, включенные в диссертацию, выполнены при поддержке коллег. Автор принимал непосредственное участие в обработке и анализе данных, а также их интерпретации. Автор разработал методики, алгоритмы и провел численные эксперименты по исследованию дисперсионных искажений элементов ЛЧМ-сигнала в зависимости от средней частоты их спектра, по анализу эффекта компенсации фазовой дисперсии и

влияния на устойчивость компенсации факторов изменчивости ионосферы. Автором получены все выносимые на защиту положения, сформулированы научные выводы и положения.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на XXI и XXII всероссийских научных конференциях "Распространение радиоволн" (Йошкар-Ола, 2005; Ростов-на-Дону, 2008); LXI Научной сессии РНТО РЭС им. А.С. Попова, посвященной Дню радио (Москва, 2006); X-XII Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация и связь – RLNC» (Воронеж, 2004 – 2006); 1-й Международной конференции «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике (Суздаль, 2005), Второй всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации связи и акустике» (Муром, 2006), Байкальских школах по фундаментальной физике (Иркутск, 2003 – 2006); а также на ежегодных конференциях МарГТУ «Итоги научно-исследовательских работ», секция «Радиофизика, техника, локация и связь» (Йошкар-Ола, 2003 - 2006).

По материалам диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Она содержит 145 страниц основного текста, 47 иллюстраций, 8 таблиц, список цитируемой литературы из 111 наименований.

### **Основное содержание диссертации**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследований, приведены краткая характеристика и содержание работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дается критический анализ современного состояния вопроса исследования возможности расширения полосы частот элементов зондирующих ЛЧМ-сигналов путем адаптации их характеристик к изменяющейся дисперсности среды. Ионосфера рассмотрена с позиций среды распространения в ней широкополосных сигналов. Проведен анализ и классификация сложных сигналов, применяемых для зондирования ионосферы. Рассмотрены существующие теории распространения в ионосфере ЛЧМ-сигналов и методики их согласованной обработки. Сформулирована актуальная задача исследования дисперсного распространения элементов ЛЧМ-сигнала в зависимости от средней частоты их спектра. Для ее решения и расширения информационных возможностей ЛЧМ-ионозондов необходимо проведение исследований по учету измен-

чивости дисперсности среды распространения, развитию теории распространения элементов ЛЧМ-сигнала в ионосфере, выявлению особенностей их распространения в зависимости от средней частоты спектра и развитию радиофизических методик адаптивной обработки широкополосных элементов в приемнике.

**Вторая глава** посвящена развитию методики исследования дисперсности распространения элементов зондирующих ЛЧМ-сигналов со сверхбольшой базой с различными средними частотами спектров. Для этого теоретически обоснована методика определения частотной зависимости задержки сигнала в ионосфере с применением для зондирования последовательности элементов ЛЧМ-сигнала с различными средними частотами спектра. Показано, что треки на ионограмме будут разрешаться, если соответствующие парциальные слагаемые в спектрах элементов сигнала разностной частоты сдвинуты между собой на частоту не менее  $\delta F \approx 1,5/T_3$  (где  $T_3$  – длительность элемента).

Обоснована методика получения информации о дисперсности среды распространения при зондировании ионосферы ЛЧМ-сигналом со сверхбольшой базой. В исследованиях дисперсного распространения для различных средних частот спектров выборок принимаемого сигнала был предложен подход изменения полосы элемента путем изменения длительности выборки сигнала разностной частоты, а средней частоты – путем изменения начала отсчета выборки. Показано, что в первом приближении элемент сигнала разностной частоты из-за частотной дисперсности фазы приобретает линейную частотную модуляцию, а скорость изменения его частоты связана с характеристиками сигнала и дисперсностью среды следующим соотношением:

$$\dot{F}_j = \dot{f}^2 s_j, \quad (1)$$

где  $\dot{f}$  – скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала,  $s_j$  – наклон частотной зависимости задержки для  $j$ -го луча на средней частоте элемента ЛЧМ-сигнала.

Линейная частотная модуляция выборочного сигнала разностной частоты является причиной дисперсионных искажений формы его амплитудного спектра. Например, при  $s_j(\bar{t}_n) \sim 100$  мкс/МГц, где  $\bar{t}_n$  – некоторое время из интервала излучения сигнала, и  $\dot{f} \sim 100$  кГц/с скорость изменения разностной частоты составляет  $\dot{F} \sim 1$  Гц/с. За время, равное 1 с девиация выборочного элемента сигнала разностной частоты будет равна  $\Delta F_j = 1$  Гц, а за время равное 10 с – равна  $\Delta F_j = 10$  Гц. Всякое увеличение наклона  $s_j(f)$  приведет к пропорциональному росту девиации частоты. В обоих случаях такие элементы сигнала разностной частоты являются квазиузкополосными, поскольку для них  $\bar{F}_j(\bar{f}_n) \sim 0,7 - 1,2$  кГц, здесь  $\bar{f}_n$  – средняя частота спектра элемента сигнала, а относительная полоса частот  $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$ . Однако если в первом случае база элемента



$b_j \sim 1$  и спектр выборки имеет форму пиков, то во втором – она составляет  $b_j \sim 100$  и спектр приобретает прямоугольную форму.

Впервые получена формула для спектра сжатого в частотной области широкополосного элемента ЛЧМ-сигнала и его ширины в условиях распространения элемента в радиоканале с амплитудно-фазовой дисперсностью, имеющая вид:

$$|S_j(F)| \approx \begin{cases} \frac{U_0^2 T_\Delta |H_j(\bar{f}_n)|}{4} \cdot \frac{\sqrt{\pi k}}{4\sqrt{k^4 + p^4}} \exp\left[-\frac{\pi^2 T_\Delta^2 k^2 (F - \dot{f}_{T_j})^2}{4(k^4 + p^4)}\right], & \text{если } T_0 \ll T_\Delta \\ \frac{U_0^2 \sqrt{T_\Delta} H_j(\bar{f}_n)}{2 \sqrt{2\Delta F_j}} \{C(z_1) + C(z_2)\}^2 + \{S(z_1) + S(z_2)\}^2\}^{0.5}, & \text{если } T_0 \gg T_\Delta \end{cases}, \quad (2)$$

где  $U_0$  – амплитуда спектра элемента сигнала,  $k = \frac{\Delta f_\Delta}{\Delta f_0} = \frac{T_\Delta}{T_0}$  – коэффициент амплитудной дисперсности,  $p = \frac{\Delta f_\Delta}{\Delta f_{kj}} = \frac{T_\Delta}{T_k}$  – коэффициент фазовой дисперсности,  $T_0$  – масштаб гауссова окна по уровню  $e^{-1}$ ,  $T_k$  – критическая длительность выборки,  $C(z)$ ,  $S(z)$  – интегралы Френеля,  $z_1 = \sqrt{\frac{2T_\Delta}{\Delta F_j}} (F - F_j(\bar{f}_n)) - 2\sqrt{\Delta F_j T_\Delta}$  и  $z_2 = \sqrt{\frac{2T_\Delta}{\Delta F_j}} (F - F_j(\bar{f}_n))$ .

Верхнее равенство соответствует случаю отсутствия амплитудной дисперсности. В отсутствие дисперсности при распространении основным масштабом элемента сигнала во временной области является  $T_\Delta$  и поэтому ширина спектра элемента сигнала разностной частоты пропорциональна  $\sim 1/T_\Delta$ . В отсутствие амплитудной дисперсности может проявляться фазовая дисперсность, когда основным масштабом становится  $T_k$ . Присутствие коэффициента  $k$  в нижнем равенстве обусловлено влиянием на огибающую спектра и ее ширину амплитудной дисперсности.

Решалась задача получения по упорядоченному множеству зашумленных значений частотной зависимости задержки сигнала  $\{\tau(\bar{f}_n)\}$  непрерывных полиномиальных моделей функции  $\tau(f) = P_n(f)$ . Полиномиальная модель экспериментального ряда значений функции предполагала, что он состоит из двух основных компонентов: регулярной и остаточной. Считали, что остаточная компонента – это высокочастотный по сравнению с регулярной компонентой процесс, удовлетворяющий условию случайности, т.е. ее распределение должно быть близко к нормальному, а математическое ожидание отсчетов остаточной компоненты равно нулю. В результате была теоретически обоснована методика определения полиномиальной модели функции частотной зависимости задержки сигнала в широкой полосе частот около произвольной средней частоты с использованием данных зондирования ионосферы ЛЧМ-сигналом со сверхбольшой базой. Получена формула для полиномиальной модели фазовой функции, заданной на интервале частот  $\Delta f$  с серединой на частоте  $\bar{f}$  в виде:

$$\varphi_j(f) = \varphi_j(\bar{f} - \Delta f/2) + 2\pi \cdot \sum_{k=0}^n \frac{a_{jk}}{k+1} (f - \bar{f} + \Delta f/2)^{k+1}. \quad (3)$$

На основе полученных решений предложена методика компенсации эффекта фазовой дисперсности в ЛЧМ-сигналах с различной средней частотой спектра, отличающаяся формированием комплексного сигнала разностной частоты на основе преобразования Гильберта и синтезом комплексного компенсирующего сигнала на основе данных ЛЧМ-зондирования ионосферы. Учитывалось, что элемент сигнала разностной частоты  $A_{jC}(t)$  для  $j$ -го луча распространения, где  $j \in [1, m]$ , является узкополосным низкочастотным действительным сигналом. По нему синтезировалась мнимая часть  $A_{jS}(t)$  и строился комплексный сигнал разностной частоты в виде:

$$\begin{aligned} \check{A}_j(t) &= A_{jC}(t) + iA_{jS}(t) = \\ &= \sqrt{A_{jC}^2(t) + A_{jS}^2(t)} \cdot \exp\left[i\left(\varphi_{pЛ}(t) + \varphi_{pН}(t)\right)\right], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varphi_{pЛ,Н}(t)$  – линейная и нелинейная от частоты составляющая фазы.

Методика компенсации связана с решением задачи нахождения комплексного сигнала  $B_j(t)$  вида:

$$B_j(t) = \exp[-i\varphi_{pН}(t)], \quad (5)$$

когда нелинейная составляющая фазы находится на основе полиномиальной модели фазовой функции. В этом случае произведение  $D_j(t) = \check{A}_j(t) \cdot B_j(t)$  не содержит нелинейной составляющей фазы, что и означает компенсацию эффекта фазовой дисперсности при распространении выделенного элемента ЛЧМ-сигнала.

В **третьей главе** представлено исследование эффектов фазовой дисперсности распространения для элементов ЛЧМ-сигнала с различными средними частотами спектра методом численного эксперимента. Блок-схема эксперимента приведена на рис.1.

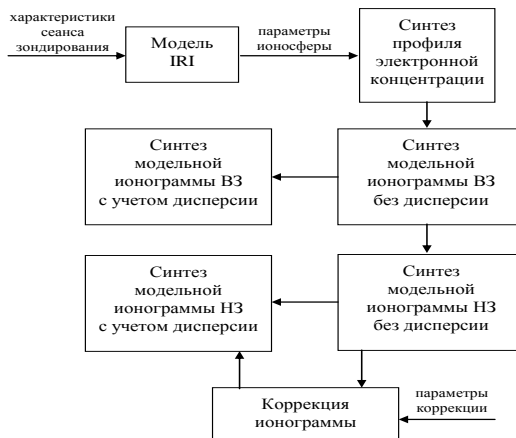


Рис. 1. Блок-схема численного эксперимента по исследованию дисперсного распространения ЛЧМ-сигнала со сверхбольшой базой

Численное исследование требовало задания характеристик среды распространения сигнала с учетом ее пространственно-временной изменчивости. Поэтому для задания регулярного профиля электронной концентрации в эксперименте использовалась Международная справочная модель IRI. Преимущества подхода, основанного на использовании IRI заключаются в том, что он позволяет получать описание электронной плотности в диапазоне высот от 50 км до 2000 км в виде отдельных дискретных значений для заданного места, времени, даты, солнечной и геомагнитной активности (космической погоды).

Нерегулярная часть профиля задавалась в виде волнового возмущения:

$$\delta_N(h) = \frac{\Delta N}{N} \exp(-(h - h_c)^2 / z_m^2) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda} h - \Omega t\right), \quad (6)$$

где  $\frac{\Delta N}{N}$  – вариация электронной концентрации,  $h$  – высота,  $\Lambda$  – длина волны возмущения,  $\Omega$  – угловая частота возмущения,  $h_c$  – высота максимальной амплитуды возмущения,  $z_m$  – диапазон высот, где присутствует возмущение.

Проблема анализа дисперсности среды распространения требует получения для нее непрерывной модели. В связи с этим в диссертации впервые был предложен и развит подход, позволяющий по дискретной модели получить непрерывную модель данной функции.

В этом подходе использовались методы вариационного исчисления, когда задача построения и анализа непрерывной модели ионограммы рассматривалась с позиции минимизации функционала:

$$J(\tau) = \sum_{j=0}^n \left| \frac{\tau_D(f_j) - \tau(f_j)}{n+1} \right|^2, \quad (7)$$

где  $\tau_D$  – дискретная модель ионограммы,  $\tau(f)$  – искомая непрерывная функция, описывающая ионограмму,  $f$  – частота.

Методика численного определения частотной зависимости задержки сигнала в среде при вертикальном падении заключалась в следующем. Функция  $\tau(f)$  задавалась в виде:

$$\tau(f) = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{f}{f_k} \cdot \ln\left(\frac{f_k + f}{f_k - f}\right), \quad (8)$$

где  $f_k$  – критическая частота слоя.

Для нахождения параметров  $\lambda_{1,2}$  решалась обратная коэффициентная задача функционального анализа, которая была сведена к решению дифференциального уравнения вида:

$$f \frac{d\tau}{df} + \lambda_1 - \lambda_2 \frac{2f^2}{f_k^2 - f^2} = \tau. \quad (9)$$

Показано, что решение задачи минимизации функционала приводит к следующим выражениям для параметров  $\lambda_{1,2}$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - f_i \tau'_i)}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \left[ (\tau_i - f_i \tau'_i) \left( n \cdot \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2} - \sum_{j=1}^n \frac{f_j^2}{f_k^2 - f_j^2} \right) \right]}{n \left[ \left( \sum_{i=1}^n \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2} \right)^2 \right]} \sum_{i=1}^n \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2}, \\ \lambda_2 &= \frac{\sum_{i=1}^n \left[ (\tau_i - f_i \tau'_i) \left( n \cdot \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2} - \sum_{j=1}^n \frac{f_j^2}{f_k^2 - f_j^2} \right) \right]}{2 \left[ \left( \sum_{i=1}^n \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_i^2}{f_k^2 - f_i^2} \right)^2 \right]}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

В этом случае фазовая функция будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \varphi_j(f) &= \varphi_j \left( \bar{f} - \frac{\Delta f}{2} \right) + 2\pi \int_{\bar{f} - \frac{\Delta f}{2}}^f F_j(f) df = \\ &= \varphi_j \left( \bar{f} - \frac{\Delta f}{2} \right) + 2\pi \int_{\bar{f} - \frac{\Delta f}{2}}^f \left[ \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{f}{f_k} \cdot \ln \left( \frac{f_k + f}{f_k - f} \right) \right] df. \end{aligned} \quad (11)$$

Методика численного определения спектров разностного сигнала в зависимости от средних частот выборочных элементов зондирующего ЛЧМ-сигнала базируется на полученной формуле для амплитудного спектра сигнала разностной частоты:

$$|S_j(F, \bar{t}_n)| = \frac{U_0^2}{2} \left| \int_{\bar{t}_n - \frac{T_0}{2}}^{\bar{t}_n + \frac{T_0}{2}} |H_j(t)| \cos \left[ \varphi_j \left( \bar{t}_n - \frac{T_0}{2} \right) + 2\pi \int_{\bar{t}_n - \frac{T_0}{2}}^t \left[ \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{ft}{f_k} \cdot \ln \left( \frac{f_k + ft}{f_k - ft} \right) \right] dt \right] \cdot \exp(-i2\pi Ft) dt \right|. \quad (12)$$

Формула (12) позволила для каждого значения текущего времени  $\bar{t}_n$  (средней частоты спектра ЛЧМ-сигнала), получить спектр сигнала разностной частоты.

Если для вычисления спектра используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), то он представляет собой вектор:

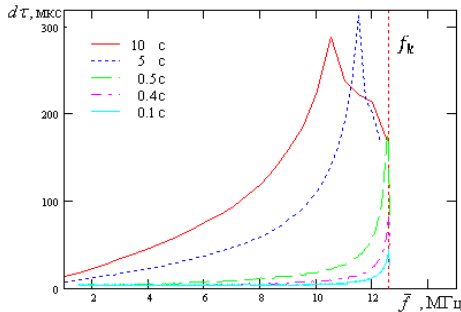
$$\vec{S}_{jn}(F_k, t_n) = \{ |S_j(F_k, t_n)| \}, \quad (13)$$

где  $k = 1, 2, \dots, K$ ,  $F_1 = \dot{f} \tau_1$ , а  $F_K = \dot{f} \tau_K$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $t_1 = \frac{HHЧ}{f}$ , а  $t_N = \frac{MHЧ}{f}$ , ННЧ – наименьшая наблюдаемая частота, МНЧ – максимальная наблюдаемая частота, (ННЧ, МНЧ) – диапазон частот прозрачности для анализируемого луча.

Множество векторов  $\{ \vec{S}_{jn}(F_k, t_n) \}$  на плоскости ( $f = \dot{f}t$ ,  $\tau = F/\dot{f}$ ) отображает зависимость амплитудного спектра от средней частоты сжижаемого элемента сигнала, показывая его дисперсионные искажения. Трехмерное изображение этой зависимости дает представление о дис-

персионных искажениях треков ионограммы вертикального зондирования.

Показано, что адаптивное уменьшение длительности элемента ЛЧМ-сигнала дает такой же эффект на уменьшение мощности сжатого элемента, что и дисперсионное расплывание при неизменной полосе частот элемента.



*Рис. 2. Изменение длительности элемента разностного сигнала в зависимости от длительности элемента ЛЧМ-сигнала при приближении его средней частоты к критической частоте слоя*

Наиболее интересными и неизученными являются эффекты дисперсного уширения амплитудных спектров в окрестности критической частоты, поскольку с приближением к критической частоте растет дисперсность распространения. Однако в непосредственной близости от нее часть спектральных составляющих с частотами больше критической начинают просачиваться через слой и эффективная ширина спектра уменьшается. Это должно приводить к уменьшению эффектов дисперсионного уширения спектра сжатого сигнала. В связи с этим численным методом решалась задача изменения ширины спектра сжатого элемента ЛЧМ-сигнала с приближением его средней частоты  $\bar{f}$  к критической частоте слоя. Результаты решения задачи представлены на рис. 2 в виде ее зависимости от длительности выборочного элемента (или его полосы).

Методика определения спектров разностного сигнала в зависимости от средних частот выборочных элементов зондирующих ЛЧМ-сигналов при наклонном распространении в ионосфере основана на теореме Мартина и методе равных скачков.

В результате численных исследований показано, что: дисперсионные искажения элементов ЛЧМ-сигнала растут с увеличением кратности луча; они меньше при распространении нижними лучами, чем верхними; при ночном распространении дисперсионные искажения выше, чем при дневном; для нижних лучей дисперсионные искажения растут с приближением средней частоты спектра элемента к максимальной применимой частоте (МПЧ) луча.

Исследовалась методика компенсации фазовой дисперсности. Для ее реализации развит алгоритм определения полинома второй степени для частотной зависимости задержки сигнала.

Для трасс Йошкар-Ола – Нижний Новгород (250 км), Иркутск – Йошкар-Ола (3500 км), Кипр – Йошкар-Ола (2600 км) исследованы распределения ширины  $\Delta F$  спектра сигнала разностной частоты до и после компенсации. Они показали, что разработанная в диссертации методика обеспечивает компенсацию дисперсионных искажений элементов ЛЧМ-сигнала с различной средней частотой спектра, что приводит к уменьшению ширины треков ионограмм для трасс различной протяженности. Об этом свидетельствуют данные рис. 3.

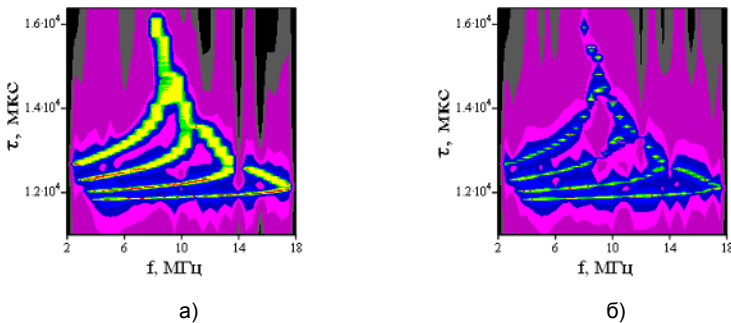


Рис. 3. Ионограммы НЗ, полученные для трассы протяженностью 3500 км с учетом дисперсионных искажений треков (а) и треков, полученных в результате компенсации дисперсности (б).

В **четвертой главе** представлены результаты развития радиофизических методик натуральных исследований дисперсного распространения в ионосфере широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала с различной средней частотой спектра. На рис. 4 приведена использованная в работе структурная схема натуральных экспериментов.

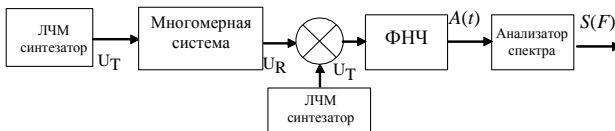


Рис. 4. Структурная схема дисперсного распространения и обработки ЛЧМ-сигнала со сверхбольшой базой:

$U_T$  – излученный сигнал,  $U_R$  – принятый сигнал, ФНЧ – фильтр низких частот,  $A(t)$  – сигнал разностной частоты,  $S(F)$  – спектр сигнала разностной частоты

Кратко описаны созданные алгоритмы обработки широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала со сверхбольшой базой, реализованные в программно-аппаратном комплексе зондирования ионосферы и использо-

ванные на трассах: Йошкар-Ола – Йошкар-Ола; Нижний Новгород – Йошкар-Ола; Инскип (Англия) – Йошкар-Ола; Иркутск – Йошкар-Ола; Кипр – Йошкар-Ола в натуральных экспериментах.

Исследования влияния сезонных условий и протяженности трассы на наклоны регулярной составляющей функции частотной зависимости дали новые результаты. В частности, показано, что значения наклонов функции частотной зависимости задержки сигнала перед восходом Солнца достигают максимума. Они резко уменьшаются после восхода, стабилизируясь к полудню и достигая минимального значения. После заката наклоны резко увеличиваются, а к полуночи скорость роста наклонов уменьшается. Наклоны растут от лета к зиме. Установлено, что суточное поведение наклонов функции частотной зависимости задержки сигнала всех лучей аналогично. Однако с увеличением порядка луча возрастают: скорость изменения наклона в утренние и вечерние часы, а также величина разброса значений наклонов (см. рис. 5).

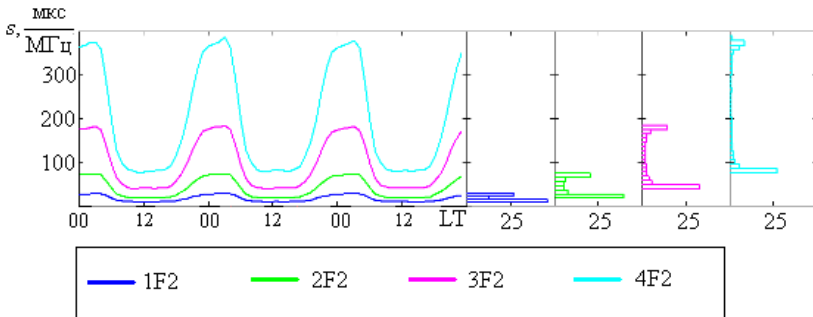


Рис. 5. Изменение наклона ионограммы для различных лучей распространения

Исследовались дисперсионные уширения спектров выборочных элементов сигнала разностной частоты. За ширину спектра  $\delta F$  при дискретных отсчетах принимались значения, рассчитанные с использованием формулы:

$$\delta F = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{k=-3}^3 |S_j(k\Delta F)|^2 \cdot (k\Delta F)^2}{\sum_{k=-3}^3 |S_j(k\Delta F)|^2}}. \quad (14)$$

Установлено, что при распространении на меридиональных трассах дисперсность распространения выше, чем на широтных. Ночью дисперсионная ширина спектра элемента сигнала разностной частоты в 2,5 – 3,5 раза больше, чем днем, и растет в 3 – 5 раз с ростом порядка луча. Она уменьшается с ростом протяженности трассы.

Для проведения натуральных исследований эффекта компенсации частотной дисперсности фазы в диссертации был разработан соответствующий алгоритм. Суть его заключается в следующем:

- на заданной частоте  $\bar{f}$  берется элемент сигнала разностной частоты длительностью  $T_{\Sigma}$  таким образом, чтобы соответствующая ей полоса частот элемента зондирующего сигнала составляла 1МГц;
- данный элемент, в свою очередь, разбивается на  $N$  перекрывающихся на 50 % измерительных элементов длительностью  $T_b$ , меньше критической;
- над каждым выборочным элементом сигнала выполняется БПФ и определяются частоты  $\max F[v]$ , соответствующие максимальным значениям модуля спектра;
- по ним определяются временные зависимости разностной частоты (или частотные зависимости задержки);
- дискретные отсчеты  $\max F[v]$  с помощью метода наименьших квадратов аппроксимируются полиномом степени  $n$  и аналитически задается функция, описывающая регулярную составляющую зависимости разностной частоты от времени в виде:

$$F(t) = P_n(t) = \sum_{r=0}^n a_r \cdot t^r, \text{ где } 0 \leq t \leq T_b, t = f/f';$$

- восстанавливаем фазовую функцию:

$$\varphi(k\Delta t) = 2\pi \sum_{r=0}^n \frac{a_r \cdot [k\Delta t]^{r+1}}{r+1}, t = k\Delta t;$$

- по заданному на интервале  $T_{\Sigma}$  действительному сигналу разностной частоты синтезируем мнимую составляющую:

$$B(k\Delta t) = 2\Delta f \cdot \operatorname{Im} \left[ \sum_{n=1}^{N/2} A(n\Delta F) \cdot \exp\left(\frac{i2\pi kn}{N}\right) \right];$$

- синтезируем сигнал разностной частоты, заданный в комплексной форме:

$$\bar{A}(k\Delta t) = A(k\Delta t) + i B(k\Delta t);$$

- синтезируем комплексный корректирующий множитель:

$$A_K[k\Delta t] = \cos \varphi(k\Delta t) + i \cdot \sin \varphi(k\Delta t);$$

- компенсируем частотную дисперсность фазы путем умножения каждого отсчета данного комплексного сигнала на отсчет комплексного корректирующего множителя:

$$\bar{\bar{A}}(k\Delta t) = \bar{A}(k\Delta t) * A_K[k\Delta t];$$

- новая комплексная последовательность отсчетов дополняется нулями до ближайшего числа  $N_0$ , кратного степени 2 (в нашем случае  $N_0 = 65536$ );

- над последовательностью  $\bar{\bar{A}}(k\Delta t)$  производим БПФ и вычисляем ее спектр  $|\bar{\bar{S}}(n\Delta F)|$ , где  $(0 \leq n \leq N/2)$ ;

- оцениваем эффективность процедуры компенсации частотной дисперсности фазы по изменению ширины спектра на уровне 3 дБ от максимума  $\theta = \Delta F_1 / \Delta F_2$  ( $\Delta F_1$  - ширина спектра до компенсации,  $\Delta F_2$  - ширина спектра после компенсации).



Предложенный автором алгоритм компенсации, отличается тем, что, во-первых, компенсации подвергается комплексный сигнал. Во-вторых, для синтеза его мнимой части используется преобразование Гильберта, являющееся регулярным методом получения мнимой составляющей при дискретном задании функции. Кроме того, было учтено, что преобразование Гильберта аналоговых сигналов целесообразно выполнять не по формулам линейной свертки с оператором  $1/\pi t$ , а через спектр исходной действительной функции.

Таблица 1

Трасса	Уровень от максимального значения спектра					
	-3дБ		-6дБ		-10дБ	
	$\Delta F_1$	$\Delta F_2$	$\Delta F_1$	$\Delta F_2$	$\Delta F_1$	$\Delta F_2$
Йошкар-Ола – Йошкар-Ола	1,0 Гц	0,1 Гц	1,5 Гц	0,6 Гц	3,0 Гц	2,0 Гц
Нижний Новгород – Йошкар-Ола	1,0 Гц	0,1 Гц	1,5 Гц	0,4 Гц	2,0 Гц	0,6 Гц
Инскип – Йошкар-Ола	0,2 Гц	0,1 Гц	0,3 Гц	0,15 Гц	0,4 Гц	0,2 Гц
Иркутск – Йошкар-Ола	0,15 Гц	0,1 Гц	0,25 Гц	0,15 Гц	0,4 Гц	0,2 Гц

Использование данного алгоритма позволило провести натурные исследования ширины  $\Delta F$  спектра при компенсации дисперсности фазы, когда в качестве компенсирующего использовался многочлен второй степени. Полученные результаты обобщены в таблице 1. В ней приведены средние по диапазону от 0,3 МПЧ до 0,85 МПЧ средних частот ЛЧМ элементов с полосой 1 МГц значения ширины спектра сигнала разностной частоты на уровнях -3 дБ, -6 дБ, -10 дБ от максимума. Цифрой 1 обозначена ширина до ( $\Delta F_1$ ), цифрой 2 – после ( $\Delta F_2$ ) компенсации фазовой дисперсности.

Полученные данные показывают, что на всех трассах и для всех средних частот элементов ЛЧМ-сигнала после применения процедуры компенсации ширина спектра сигнала разностной частоты уменьшалась до не искаженного дисперсностью уровня. Эффективность компенсации оценивалась изменением ширины сжатого в частотной области элемента ЛЧМ-сигнала с различной средней частотой спектра.

Натурные исследования эффективности компенсации дисперсности для ЛЧМ элементов с различной средней частотой спектра и полосой 1 МГц были проведены на всех указанных выше трассах. Эффективность оценивалась в децибелах. Результаты исследований представлены в таблице 2. Они показывают, что эффективность компенсации фазовой дисперсности тем выше, чем короче радиотрасса.

Таблица 2

Трасса	Йошкар-Ола – Йошкар-Ола	Нижний Новгород – Йошкар-Ола	Инскип – Йошкар-Ола	Иркутск – Йошкар-Ола
Эффективность компенсации, дБ	9,81	8,6	3,43	2,55

Было замечено, что компенсация фазовой дисперсности «действует» определенное время, а затем из-за изменений среды распространения она деградирует. Поэтому в диссертации были проведены исследования времени устойчивости компенсации частотной дисперсности фазы широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала.

В начале изучалось влияние суточных изменений ионосферы. Считалось, что в случае фазовой дисперсности причиной уширения треков ионограммы являются суточные вариации наклона частотной зависимости задержки. Разность наклонов  $\gamma(t)$  функций  $F(f, t)$  и  $P_n(f)$  рассматривалась в виде:

$$\gamma(t) = \frac{s_{крj}}{t_s} \cdot t, \quad (15)$$

где  $s_{крj}$  – критический наклон ионограммы,  $t_s$  – время устойчивости компенсации фазовой дисперсности распространения, равное времени, за которое функция  $\gamma(t)$  изменяется на критическую величину.

В результате натуральных и численных экспериментов установлено, что время устойчивости компенсации фазовой дисперсности уменьшается с ростом относительной средней частоты элемента ЛЧМ-сигнала, а также с ростом порядка луча ионосферного распространения и с уменьшением протяженности трассы.

Далее были проведены исследования влияния на время устойчивости компенсации фактора нерегулярной изменчивости ионосферы, вызванной волновыми возмущениями. Для этих случаев установлено, что возмущения в большей степени, чем суточные вариации ионосферы, влияют на время устойчивости компенсации. При этом оно становится близким к периоду возмущения.

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

1. Теоретически обоснованы методики: определения частотной зависимости задержки сигнала в ионосфере с применением для зондирования последовательности элементов ЛЧМ-сигнала с различными средними частотами спектра; дисперсионных искажений широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала при изменении их длительности сверх критической; компенсации эффекта фазовой дисперсности в ЛЧМ-сигналах с различной средней частотой спектра, отличающихся формированием комплексного сигнала разностной частоты на основе преобразования

Гильберта и синтезом комплексного компенсирующего сигнала на основе данных ЛЧМ-зондирования ионосферы.

2. Впервые получены формулы для ширины спектра сжатого в частотной области широкополосного элемента ЛЧМ-сигнала в условиях его распространения в радиоканале с амплитудно-фазовой дисперсностью.

3. Впервые созданы методики численного определения: частотной зависимости задержки сигнала в среде при вертикальном падении на основе дискретных данных об электронной концентрации и использования метода решения обратной коэффициентной задачи функционального анализа; спектров разностного сигнала в зависимости от средних частот выборочных элементов зондирующего ЛЧМ-сигнала.

4. Для вертикального распространения: установлен эффект уменьшения влияния дисперсионных искажений широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала из-за просачивания их высокочастотных спектральных составляющих в окрестности максимума слоя, получена формула связи оптимальной полосы элементов зондирующего ЛЧМ-сигнала и характеристик ионосферного слоя.

5. Показано, что: дисперсионные искажения элементов ЛЧМ-сигнала растут с увеличением кратности луча; они меньше при распространении нижними лучами, чем верхними; при ночном распространении дисперсионные искажения выше, чем при дневном; для нижних лучей дисперсионные искажения растут с приближением средней частоты спектра элемента к МПЧ луча.

6. Созданы и реализованы в программно-аппаратном комплексе зондирования ионосферы алгоритмы обработки широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала со сверхбольшой базой для исследования дисперсного распространения, а также для исследования влияния компенсации частотной дисперсности фазы широкополосных элементов ЛЧМ-сигнала.

7. В натурных экспериментах на трассах: Йошкар-Ола – Йошкар-Ола; Нижний Новгород – Йошкар-Ола; Инскип (Англия) – Йошкар-Ола; Иркутск – Йошкар-Ола; Кипр-Йошкар-Ола установлено сезонно-суточное поведение наклонов ионограмм на разных относительных частотах; показано, что при распространении на меридиональных трассах дисперсность при распространении нижним лучом выше, чем на широтных; эффективность компенсации фазовой дисперсности тем выше, чем короче радиотрасса.

8. Установлено, что: время устойчивости компенсации фазовой дисперсности уменьшается с ростом относительной средней частоты элемента ЛЧМ-сигнала, а также с ростом порядка луча ионосферного распространения и с уменьшением протяженности трассы; на время устойчивости в большей степени, чем суточные вариации ионосферы, влияют ионосферные возмущения, связанные с волновыми процессами.

**Основные публикации по теме диссертации**

1. Влияние пространственной неоднородности и нестационарности ионосферы на дисперсионные искажения широкополосных декаметровых радиоканалов / *Иванов Д.В., Иванов В.А., Лащевский А.Р.* // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т.12. – №8. – С.55-62.
2. Исследование коррекции дисперсионных искажений, возникающих в ионосферных радиоканалах с полосой 1 МГц / *Иванов Д.В., Иванов В.А., Лащевский А.Р., Рябова М.И.* // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – т.13. – №8. – С.58-66.
3. Гигармонические свойства среднемасштабной искусственной ионосферной турбулентности, проявляющиеся при нагреве F2-области ионосферы мощной радиоволной О-поляризации / *Фролов В.Л., Недзвецкий Д.И., Урядов В.П., Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р., Рябова Н.В.* // Известия вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. LI. – №5. – С.367-375.
4. Влияние дисперсности ионосферы на разрешающую способность ЛЧМ-иозондов / *Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р., Рябова М.И.* // Вестник МарГТУ: серия Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2008. – Т. 4. – № 3. – С. 3-16.
5. Моделирование ионограмм вертикального и наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы с учетом регулярной и нерегулярной дисперсии среды распространения / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // Сборник трудов VI международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике «Волновые процессы в проблеме космической погоды». – Иркутск . – 2003. – С.90-93.
6. Моделирование влияния частотной дисперсии на импульсные характеристики широкополосных КВ каналов / *Лащевский А.Р.* // Сборник статей студентов, аспирантов, докторантов по итогам научно-технической конференции МарГТУ. – Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2004. – с.165–171.
7. Влияние перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на результаты коррекции дисперсионных искажений импульсных характеристик широкополосных радиоканалов / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // Сборник тезисов докладов студентов, аспирантов, докторантов по итогам научно-технической конференции МарГТУ. – Йошкар-Ола: МарГТУ. – 2004. – С.105–106.
8. Исследование влияния ПИВ на распространение широкополосных и сверхширокополосных сигналов / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // Сборник докладов молодежной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки в XXI веке», посвященной 200-летию КГУ. – Зеленодольск. – 2004. – С.34–35.
9. Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений с использованием эффекта сверхразрешения / *Иванов В.А.,*

*Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // Сборник трудов VII международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике «Взаимодействие полей и излучения с веществом». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН – 2004., с.94-95

10. Влияние перемещающихся ионосферных возмущений и магнитонного расщепления на импульсные характеристики широкополосных и сверхширокополосных радиоканалов / *Иванов В.А., Иванов Д.В., Лаптев М.П., Лащевский А.Р.* // X междунар. науч. техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». RLNC`2004. – Воронеж. – 2004. – Т.2. – С.1117-1128.

11. Новый подход к диагностике широкополосными сигналами перемещающихся ионосферных возмущений / *Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // 1-я Международная конференция «Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике – USUIRCA – 2005». – Суздаль. – 2005. – С.28-36

12. Новый радиофизический метод исследования слабых перемещающихся ионосферных возмущений / *Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // Сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн МарГТУ. – Йошкар-Ола: МарГТУ – 2005. – Т.1. – С.207–210.

13. Исследование слабых перемещающихся ионосферных возмущений. / *Д.В.Иванов, В.А. Иванов, А.Р. Лащевский* //Труды VIII конференции молодых ученых «Астрофизика и физика околоземного космического пространства». – Иркутск. – 2005. – С.73-75.

14. Исследование дисперсионных характеристик сверхширокополосных декаметровых радиоканалов / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // XII междунар. науч. техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». RLNC`2006. – Воронеж. – 2006. – Т.1. – С.582-590.

15. Распространение сигналов со случайной рабочей частотой в ионосфере / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // LXI Науч. сес., посвящ. Дню радио: Тр. /РНТО РЭС им. А.С. Попова. – М., 2006. - С. 270-273.

16. Исследование дисперсионных характеристик СШП декаметровых радиоканалов / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // Вторая всерос. науч. конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации связи и акустике». – Муром. – 2006. – С.187-192.

17. Вариации ионизированной компоненты верхней атмосферы в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. В Западно-Сибирском и Восточно-Европейском регионах Земли / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р., Лаптев М.П. [и др.]* //Труды IX конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». – Иркутск: ИСЗФ СО РАН. – 2006. – С. 132-135.

18. Коррекция амплитудно-фазовых дисперсионных искажений в ионосферных радиоканалах с полосой 1 МГц / *Иванов Д.В., Лащевский А.Р., Рябова М.И.* // Тр. XXII Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». – Ростов н/Д. – 2008, т.3, С.182-186.

19. Информационная система для исследования дисперсности широкополосных декаметровых радиоканалов [эл. ресурс] / *Егошин А. Б., Иванов В. А., Иванов Д. В., Лащевский А. Р., Рябова Н. В., Рябова М. И.* // Электроника и информационные технологии. - 2009». – выпуск 2 (6) - 2009. - [http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/dispersion\\_broadband\\_radio.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2009-2/pdf/dispersion_broadband_radio.pdf)

20. Исследование дисперсности сверхширокополосных декаметровых радиоканалов и коррекции дисперсионных искажений / *Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р.* // III Всерос. науч. конф. «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации связи и акустике». – Муром. – 2010. – С.7-16.