

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
Иркутский государственный университет

На правах рукописи
УДК 550.388.2

Марков Виталий Павлович

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ
ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МЕТОДОМ
ДЕКАМЕТРОВОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ
С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск 2012

Работа выполнена на кафедре радиофизики
Иркутского государственного университета

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Афанасьев Николай Тихонович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Гивишвили Гиви Васильевич,
ИЗМИРАН, заведующий лабораторией

кандидат физико-математических наук,
доцент Ильин Николай Викторович,
ИСЗФ СО РАН, ведущий научный со-
трудник

Ведущая организация: Институт прикладной геофизики им.
академика Е.К. Федорова

Защита диссертации состоится 20 февраля 2013 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д.212.074.04 при Иркутском государственном университете по адресу: 664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета.

Автореферат разослан 28 декабря 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Б.В. Мангазеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Среди современных методов исследования состояния верхней атмосферы дистанционное радиозондирование с космических аппаратов занимает ведущие позиции [1]. В рамках Федеральной космической программы в ближайшей перспективе планируется организация регулярного мониторинга ионосферы на основе совместного использования станций наземного вертикального радиозондирования и специализированных бортовых ионозондов в диапазоне плазменных частот основных ионосферных слоев [2]. В целях организации ионосферного мониторинга проводится подготовка орбитальной группировки из пяти космических аппаратов, в том числе четырех спутников «Ионосфера» с ионозондами на борту, работающими в декаметровом диапазоне. В связи с этим дальнейшее развитие теоретических основ метода декаметрового радиозондирования с космических аппаратов в целях повышения его оперативности и информативности представляется особенно актуальным.

Существующие методы спутникового радиомониторинга ионосферы предполагают использование различных космических аппаратов, начиная с низкоорбитальных вплоть до высокоорбитальных и геостационарных. В работах [3, 4] был предложен метод диагностики крупномасштабных неоднородностей ионосферы (с горизонтальными масштабами, сравнимыми или превышающими толщину слоя F2) на основе ее многочастотного радиопросвечивания с борта космического аппарата, находящегося на геостационарной или высокоэллиптической орбите. Согласно этому методу проводится анализ декаметровых трансionoсферных радиосигналов, регистрируемых в нескольких наземных приемных пунктах. Отслеживая характеристики сигналов в этих пунктах, можно контролировать состояние среды за счет ее изменений в пространстве сканирования трансionoсферных сигналов. В работах [5-7] предложен альтернативный метод диагностики крупномасштабных неоднородностей ионосферы путем ее просвечивания декаметровыми сигналами с быстро движущихся низкоорбитальных космических аппаратов. При этом организуется один или несколько наземных пунктов наблюдения. Общность обоих методов диагностики заключается в том, что в них используются именно декаметровые радиоволны. Это важное достоинство, поскольку в данном случае просвечивание ионосферы осуществляется на пороге прозрачности, т.е. на частотах близких к критическим частотам слоя F2. Это обеспечивает высокую чувствительность методов к ионосферным неоднородностям и позволяет эффективно восстанавливать тонкую структуру среды. Общим для указанных методов диагностики также является то, что для определения параметров ионосферных неоднородностей в них используют прямой численный синтез возмущенных дистанционно-частотных характеристик радиосигналов (ДЧХ) на трассах “космический аппарат-Земля” [7]. Между тем в реальных условиях численное моделирование ДЧХ для диагностики неоднородности представляет собой довольно длительный и сложный процесс. Особенно это касается пристрелки в пункт наблюдения траекторий

радиосигнала на разных частотах в присутствии в ионосфере локализованной неоднородности. Кроме того, прямое численное моделирование возмущенных ДЧХ не позволяет установить аналитические соотношения между характеристиками ДЧХ и параметрами неоднородности. Указанные трудности в определенной мере можно обойти, если при синтезе возмущенных следов ДЧХ, вызванных неоднородностью, наряду с численными методами использовать асимптотические решения задачи. Дополнительную информацию о внутренней турбулентной структуре крупномасштабных ионосферных неоднородностей можно получить, используя аналитические соотношения между статистическими траекторными характеристиками отраженных сигналов при внешнем или наземном вертикальном зондировании ионосферы и параметрами моделей хаотических неоднородностей.

Цель работы состоит в исследовании траекторных характеристик дециметровых радиосигналов, излученных с борта космического аппарата, численными и асимптотическими методами и разработке методик диагностики крупномасштабных ионосферных неоднородностей по характеристикам дециметровых сигналов с низкоорбитальных и геостационарных космических аппаратов.

Научная новизна:

1. Впервые предложен численно-асимптотический метод синтеза трансionoграмм с деформацией следа, вызванной влиянием локализованной крупномасштабной неоднородности электронной концентрации.

2. На основе результатов численного и асимптотического моделирования вариаций времени группового запаздывания трансionoсферных радиосигналов на различных рабочих частотах показана возможность определения параметров крупномасштабной неоднородности по возмущенным следам на трансionoграммах, полученных при различных положениях космического аппарата относительно наземного пункта наблюдения. Показано, что интенсивность и размеры локализованной неоднородности могут быть уверенно восстановлены по возмущенным участкам серии трансionoграмм, отвечающим вариациям времени группового запаздывания радиосигналов, распространяющихся сквозь ионосферу по наклонным и слабоскользящим вдоль уровня экстремальной ионосферной ионизации траекториям.

3. На основе аналитического преобразования решения уравнения для флуктуаций эйконала впервые получены выражения для дисперсии и пространственного спектра фазовых флуктуаций сигнала внешнего вертикального зондирования случайно-неоднородной ионосферы с произвольным монотонным профилем регулярной диэлектрической проницаемости. Эти формулы, не содержащие особенностей в точке отражения, удобны для численного расчета и положены в основу методики диагностики турбулентных неоднородностей внешней ионосферы по статистическим характеристикам фазы сигнала в условиях полного отражения.

Достоверность результатов:

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением аналитических результатов в предельных частных случаях с известными из литературы, а также использованием для моделирования хорошо апробированных численных схем.

Научная и практическая ценность работы:

1. Предложенные методики определения параметров регулярных и турбулентных неоднородностей ионосферы по характеристикам сигналов внешнего зондирования с космического аппарата могут быть использованы при оценке пропускной способности систем космической связи.

2. Методики детектирования крупномасштабных ионосферных неоднородностей на основе синтеза транзиограмм применимы для контроля сейсмоионосферных возмущений.

3. Численно-асимптотический метод синтеза транзиограмм с деформацией следа применим для идентификации искусственных возмущений, связанных с запусками космических аппаратов, мощным воздействием радиоволн на ионосферу, инъекцией химически активных веществ, а также для контроля несанкционированных воздействий на верхнюю атмосферу Земли.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза транзиограмм с деформацией следа с использованием численных и асимптотических методов расчета.

2. Методики детектирования крупномасштабных ионосферных неоднородностей на основе результатов численно-асимптотического моделирования деформаций дистанционно-частотных характеристик декаметровых радиосигналов, излученных с борта низколетящего и геостационарного космического аппарата.

3. Методики определения параметров регулярных и случайных неоднородностей электронной концентрации, расположенных выше максимума слоя F2, на основе результатов моделирования фазовых характеристик радиосигнала при внешнем вертикальном зондировании ионосферы с использованием аналитического преобразования решения уравнения для вариаций эйконала.

Апробация работы:

Результаты диссертации докладывались на V и VI Всероссийских научных конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Институт космических исследований РАН, 2010, 2011 гг.), XXIII Всероссийской конференции по распространению радиоволн (Йошкар-Ола, 2011 г.), Международных Байкальских молодежных научных школах по фундаментальной физике (БШФФ-2009, XI конференция молодых ученых «Гелио- и геофизи-

ческие исследования»; БШФФ-2011, XII конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»), на Всероссийских научно-технических конференциях «Естественные и инженерные науки развитию регионов Сибири» (Братск, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.), на научных семинарах физического факультета Иркутского государственного университета, НИИ Прикладной физики ИГУ, кафедры физики Братского государственного университета, Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Института солнечно-земной физики СО РАН.

Результаты проведенных исследований были поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации - соглашение № 8388, грантами ФЦП №.14.В37.21.0785, №.14.В37.21.1294, грантом РФФИ №.10-02-00222.

Личный вклад автора:

Основные результаты работы получены либо лично самим автором, либо при его непосредственном участии.

Автору принадлежат:

1. Разработка алгоритмов и компьютерных программ расчетов, а также проведение всех модельных расчетов дистанционно-частотных характеристик радиосигналов, излученных с борта низколетящего и геостационарного космического аппарата.

2. Разработка методики определения пространственной локализации и интенсивности крупномасштабной ионосферной неоднородности на основе результатов моделирования возмущенных трансionoграмм.

3. Результаты численного и асимптотического моделирования фазовых флуктуаций радиоволны при малоугловом рассеянии и полном отражении от крупномасштабной неоднородности с тонкой турбулентной структурой.

4. Разработка методик восстановления параметров регулярных и случайных неоднородностей по фазовым характеристикам сигналов внешнего многочастотного вертикального зондирования ионосферы.

Публикации

Результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах в российских и зарубежных изданиях, в том числе четыре статьи в журналах из списка ВАК «Известия вузов. Радиофизика», «Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics», «Геомагнетизм и аэрономия», «The Open Atmospheric Science Journal», а так же в трудах и сборниках докладов международных и российских научных конференций.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 145 наименований. Общий объем диссертации 135 страниц, включая 44 рисунка и 15 страниц списка литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, обозначены цели и задачи работы, сформулированы научная новизна и научно-практическая ценность работы. Перечислены научные положения, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание работы.

Первая глава содержит обзор методов дистанционной радиодиагностики крупномасштабных ионосферных неоднородностей.

В п.1.1. приведены сведения о наблюдаемых крупномасштабных ионосферных неоднородностях различной природы (сейсмоионосферные неоднородности, отклики высотных взрывов, результаты выбросов плазмогасящих и плазмообразующих веществ и др.). Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований по детектированию и диагностике ионосферных неоднородностей.

В п. 1.2. описаны современные методы дистанционной радиодиагностики ионосферных неоднородностей. Приведен обзор методов наземного вертикального, наклонного и трансionoсферного зондирования. Описаны методы лучевой радиотомографии и двухчастотного радиозондирования с помощью спутников глобальных навигационных систем. Рассмотрены основные достоинства указанных методов.

В п. 1.3. сделан обзор современных методов декаметрового радиозондирования с космических аппаратов, таких как метод внешнего вертикального зондирования, метод прямого и обратного трансionoсферного зондирования с низкоорбитальных и геостационарных искусственных спутников Земли, метод радиозондирования из области максимума ионосферного слоя F2. Описаны основные достоинства данных методов при решении задач диагностики неоднородностей верхней атмосферы. Приведены результаты современных исследований с помощью космических аппаратов, оснащенных бортовыми ионозондами. Обозначены основные задачи и перспективы развития метода декаметрового радиозондирования.

Вторая глава посвящена разработке численно-асимптотического метода восстановления параметров крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации по результатам декаметрового зондирования с низкоорбитального космического аппарата.

Известно, что ДЧХ, получаемые при трансionoсферном зондировании, содержат в себе информацию о диэлектрической проницаемости плазмы вдоль траекторий распространения радиоволн. В частности, в работе [7] были представлены трансionoграммы с деформацией следа, зафиксированные в ходе эксперимента «Интеркосмос – 19» (рис. 1). Для интерпретации отдельных участков этих ионограмм авторы [7] выполнили моделирование ДЧХ с использованием метода геометрической оптики [8,9]. Было показано, что некоторые участки ДЧХ могут быть вызваны крупномасштабной неоднородностью электронной концентрации, находящейся в пространстве зондирования.

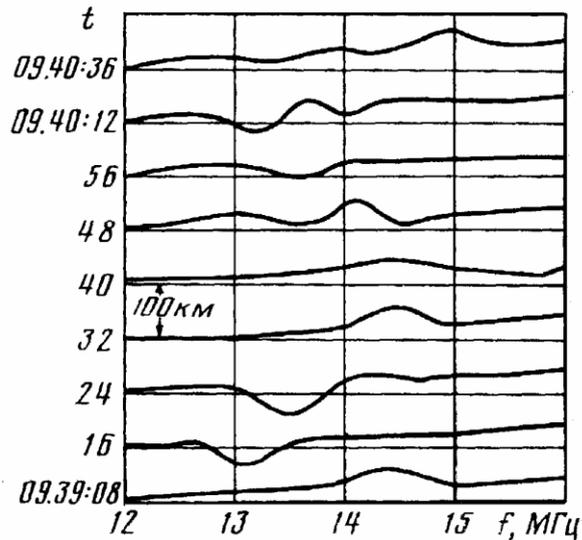


Рис. 1. Пример трансionoграмм с деформациями следа, полученные 3.VI 1979 г [7].

Для интерпретации подобного типа участков трансionoграмм с деформацией следа был разработан численно-асимптотический метод их синтеза. Геометрооптический расчет влияния крупномасштабной неоднородности на деформацию ДЧХ проводился в приближении метода возмущений [10–12]. Была решена траекторная краевая задача распространения радиоволны сквозь возмущенную ионосферу. В изотропном двумерном случае групповое время запаздывания радиоволны на трассе космический аппарат – Земля представляет собой интеграл по траектории [9]:

$$\tau = \frac{1}{c} \int_0^S \frac{dS}{\sqrt{\varepsilon(S)}} = \frac{1}{c} \int_0^{\varphi_k} \frac{R d\varphi}{\sqrt{\varepsilon(R, \varphi) \sin \beta}}, \quad (1)$$

где R – радиальная координата луча, φ – центральный угол (отсчитывается от вертикали, проходящей через точку, где находится наземный наблюдатель), $\varepsilon(R, \varphi)$ – диэлектрическая проницаемость ионосферы, φ_k – угловая координата космического аппарата, β – угол рефракции, c – скорость света в вакууме. Траекторию радиоволны можно определить, решая систему лучевых уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dR}{d\varphi} = R \operatorname{Ctg} \beta \\ \frac{d\beta}{d\varphi} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{Ctg} \beta \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial \varphi} - R \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial R} \right] - 1. \end{cases} \quad (2)$$

Представим функцию $\varepsilon(R, \varphi)$ в уравнениях (1),(2) в виде суммы диэлектрической проницаемости невозмущенной ионосферы $\varepsilon_0(R)$ и малой поправки $\varepsilon_1(R, \varphi)$, вносимой неоднородностью, причем $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$. Изменения характеристик трансionoсферного луча также представим в виде малых поправок $R_1, \beta_1, \Delta\tau$ соответственно к координате R_0 , углу рефракции β_0 и

групповому времени запаздывания τ_0 , причем $R_1 \ll R_0$, $\beta_1 \ll \beta_0$, $\Delta\tau \ll \tau_0$. Решая уравнения (1),(2) методом возмущений, в первом приближении для поправок $\Delta\tau$ и $R_1(x)$ получаем:

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \int_0^{\varphi_k} \left(\frac{2\text{Sin}\beta_0}{\sqrt{\varepsilon_0}} R_1 \left(1 + \frac{d\beta_0}{d\varphi} \right) - \frac{R_0}{2\text{Sin}\beta_0} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon_0}} \right) d\varphi, \quad (3)$$

$$R_1(\varphi) = -\frac{1}{Y_1(\varphi_k)} \left[Y_1(\varphi) \int_{\varphi}^{\varphi_k} Q_1 Y_2 \frac{R_k}{R_0} d\varphi + Y_2(\varphi) \int_0^{\varphi} Q_1 Y_1 \frac{R_k}{R_0} d\varphi \right], \quad (4)$$

где $Y_1 = \frac{\partial R_0}{\partial \beta_H}(\varphi)$, $Y_2 = \frac{\partial R_0}{\partial \beta_H}(\varphi_k - \varphi)$, β_H – угол падения радиоволны на ионосферу, R_k - высота орбиты космического аппарата, A - радиус Земли.

$$Q_1 = \frac{1}{2} \left[\text{Ctg}\beta_0 \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right) - R_0 \frac{\partial}{\partial R_0} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right) \right]. \quad (5)$$

Выражения (3), (4) можно использовать для расчета траектории и вариации группового времени запаздывания радиоволны в возмущенной ионосфере на выбранной частоте зондирования. Однако для непосредственного расчета $R_1(\varphi)$ и $\Delta\tau$ необходимо знать значения подынтегральных функций (3), (4) вдоль невозмущенной траектории $R_0(\varphi)$. Поэтому для оперативного синтеза транзиограмм необходимо предварительное преобразование полученных соотношений. Уравнения для определения функций $Y_1(\varphi)$ и $Y_2(\varphi)$ можно получить, дифференцируя по начальному параметру β_H систему лучевых уравнений в невозмущенной ионосфере (систему (2) при $\varepsilon = \varepsilon_0(R)$):

$$\begin{cases} \frac{dY_1}{d\varphi} = Y_1 \text{Ctg}\beta_0 - \frac{R_0}{\text{Sin}^2\beta_0} T_1 \\ \frac{dT_1}{d\varphi} = -\frac{1}{2} Y_1 \left(\frac{\partial \ln \varepsilon_0}{\partial R_0} + R_0 \frac{\partial^2 \ln \varepsilon_0}{\partial R_0^2} \right) \\ \frac{dY_2}{d\varphi} = -Y_2 \text{Ctg}\beta_0 + \frac{R_0}{\text{Sin}^2\beta_0} T_2 \\ \frac{dT_2}{d\varphi} = \frac{1}{2} Y_2 \left(\frac{\partial \ln \varepsilon_0}{\partial R_0} + R_0 \frac{\partial^2 \ln \varepsilon_0}{\partial R_0^2} \right), \end{cases} \quad (6)$$

где $T_1 = \frac{\partial \beta_0}{\partial \beta_H}(\varphi)$, $T_2 = \frac{\partial \beta_0}{\partial \beta_H}(\varphi_k - \varphi)$. Представив поправку к траектории радиоволны в виде суммы $R_1 = \frac{1}{Y_1(\varphi_k)}(P_1 Y_1 + P_2 Y_2)$, систему уравнений для расчета $P_1(\varphi)$ и $P_2(\varphi)$ получим в виде:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{d\varphi} = Q_1 Y_2 \frac{R_k}{R_0} \\ \frac{dP_2}{d\varphi} = -Q_1 Y_1 \frac{R_k}{R_0} \end{cases} \quad (7)$$

Заметим, что теперь при расчете деформаций ДЧХ пристрелка траекторий для различных частот зондирования необходима только в невозмущенной ионосфере, что намного проще пристрелки траекторий в среде с локализованной неоднородностью. Преобразуя (3) к дифференциальному уравнению и решая его совместно с (6),(7) и системой (2) (при $\varepsilon = \varepsilon_0(R)$), можно рассчитать вариации группового времени запаздывания на разных рабочих частотах при распространении радиоволны в присутствии крупномасштабной ионосферной неоднородности. В случае, когда низкоорбитальный космический аппарат находится на расстоянии прямой видимости от наземного наблюдателя, формулы (2)-(7) упрощаются. Вводя в (2)-(7) новые переменные $dx = Ad\varphi$, $R_0 = A + z_0$, и устремляя радиус Земли A к бесконечности, получаем выражения (2)-(7) в декартовой системе координат.

Чтобы применить полученные соотношения для расчета возмущенных ДЧХ, необходимо задать модели невозмущенной ионосферы и крупномасштабной неоднородности. Для описания диэлектрической проницаемости ионосферы использовалась двухслойная гауссова модель вида:

$$\varepsilon_0(z) = 1 - \frac{f_{kp}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{h_m}\right)^2\right) - \frac{f_{kpE}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_{mE}}{h_{mE}}\right)^2\right), \quad (8)$$

где z_m и z_{mE} - высоты максимумов электронной концентрации слоев F2 и E, соответственно, h_m и h_{mE} характеризуют толщины слоев, а величины f_{kp} и f_{kpE} - их критические частоты, f - рабочая частота зондирования. Для представленных ниже примеров выбирались следующие параметры ионосферы: $z_m = 300$ км, $z_{mE} = 125$ км, $h_m = 100$ км, $h_{mE} = 25$ км, $f_{kp} = 8$ МГц, $f_{kpE} = 3$ МГц.

Модель крупномасштабной неоднородности задавалась в виде:

$$\varepsilon_1(x, z) = -\gamma \frac{f_{kp}^2}{f^2} \left(1 - th \left[\frac{(x - x_c)^2}{b^2} + \frac{(z - z_c)^2}{a^2} - r \right] \right), \quad (9)$$

где x_c и z_c – координаты центра неоднородности, параметр γ характеризует ее интенсивность. Параметры a , b и r задают вертикальный и горизонтальный масштабы неоднородности, а также характеризуют градиент диэлектрической проницаемости в граничной области неоднородности. При этом вертикальный и горизонтальный масштабы можно определить как $a\sqrt{r}$ и $b\sqrt{r}$. В отличие от часто используемой модели локализации неоднородности в пространстве в виде гауссовой функции [9] эта модель может описывать как плавные, так и более выраженные края локализации. Увеличивая параметр r можно получать неоднородности с более контрастными границами. Модель (9) соответствует анизотропному эллиптическому облаку. Рис. 2 иллюстрирует поправку к диэлектрической проницаемости среды, вносимую неоднородностью (9). График построен при $x_c = 400$ км, $z_c = 500$ км, $\gamma = 0,02$, $f_{кр} = 8МГц$, $a = 30$ км, $b = 40$ км, $r = 4$.

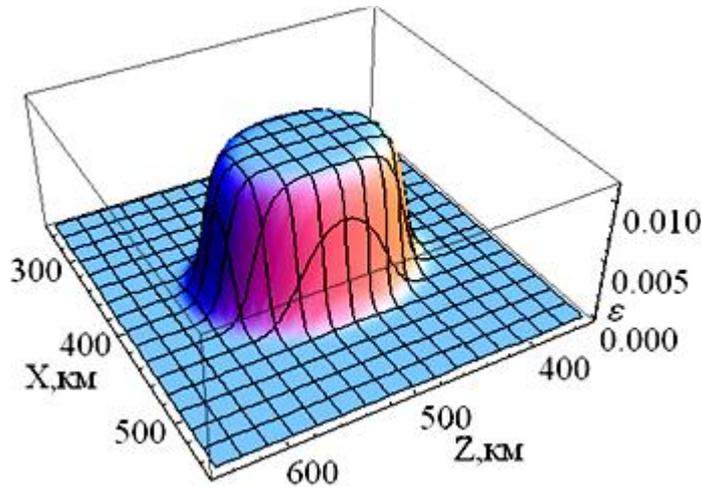


Рис. 2. Модель эллиптической крупномасштабной неоднородности (оси X и Z задают пространственные координаты, по вертикальной оси отложена величина возмущения диэлектрической проницаемости).

Важно отметить, что при лучевом моделировании ДЧХ в возмущенной ионосфере параметры неоднородности следует выбирать так, чтобы выполнялись условия применимости метода геометрической оптики. При этом условие малости изменения параметров среды выполняется за счет малой интенсивности неоднородности, так как $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$. Согласно эвристическим критериям применимости геометрической оптики [9], масштабы неоднородности должны быть намного больше радиуса первой зоны Френеля R_ϕ для конкретных условий задачи. Для случаев, рассматриваемых в данной работе, радиус первой зоны Френеля не превышает 3 км при размерах неоднородностей порядка 100 км. Более того, необходимо, чтобы диэлектрическая проницаемость среды на расстоянии длины волны и в поперечном сечении френелевского объема изменялась незначительно. Для задач, рассматриваемых в

данной работе, $\frac{R_\phi |\nabla_\perp \varepsilon|}{\varepsilon} < 0,1$. Таким образом, необходимое и достаточное условия применимости геометрической оптики выполняются.

Численное моделирование распространения радиоволн в возмущенной ионосфере с использованием соотношений (1), (2) показало, что внесение в ионосферу крупномасштабной неоднородности создает деформацию следа на синтезированных ДЧХ. На рис. 3 представлены примеры деформаций ДЧХ, полученных при внесении в ионосферу неоднородности со следующими параметрами: координаты центра неоднородности $x_c = 400 \text{ км}$, $z_c = 500 \text{ км}$, параметры интенсивности неоднородности $\gamma = 0,02$, $f_{кр} = 8 \text{ МГц}$, параметры масштаба и контрастности $a = 30 \text{ км}$ и $b = 40 \text{ км}$, $r = 4$. Высота орбиты космического аппарата 1000 км , горизонтальные координаты А) 590 км , Б) 740 км , В) 940 км . При этом изменение времени распространения радиоволн обусловлено отклонением трансionoсферных лучей от невозмущенных траекторий (в случаях А и В) или накоплением запаздывания при прохождении лучей без значительных искажений через толщу ионосферной неоднородности (в случае Б). Необходимо отметить, что сильнее отклоняются лучи, проходящие через граничную область неоднородности.

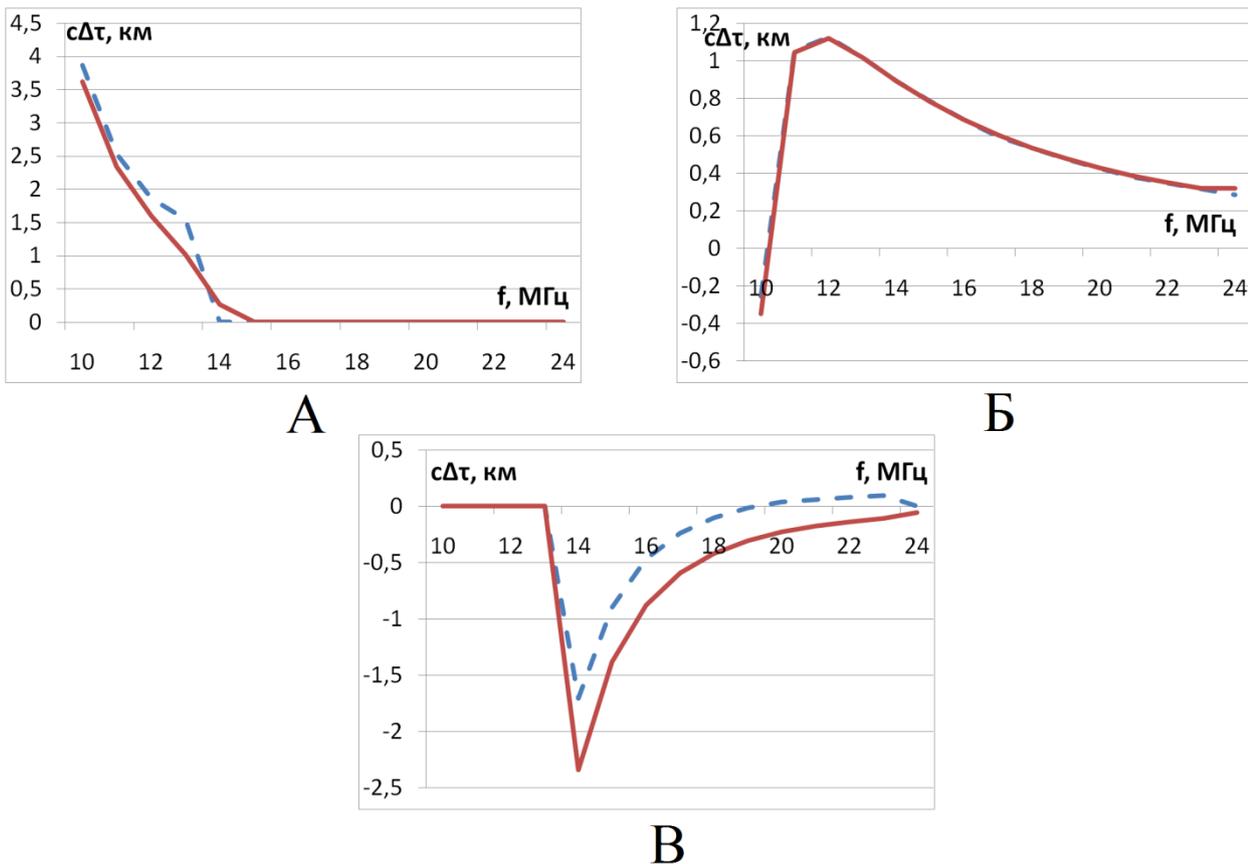


Рис. 3. Сравнение ДЧХ, рассчитанных приближенным и численным методами. Пунктиром изображены графики численного решения, сплошной линией – приближенного.

Для рассмотренных случаев также был проведен приближенный расчет ДЧХ. Примеры деформаций следа ДЧХ, полученные численным и асимптотическим методами, рассмотрены на рис. 3. Сравнение этих деформаций показало их качественное и количественное соответствие. Наиболее точный результат асимптотического расчета ДЧХ приведен на рис. 3Б. В этом случае траектория транссионферного луча практически не изменяется неоднородностью, а увеличение времени распространения обусловлено, прежде всего, возмущением диэлектрической проницаемости. Однако при уменьшении рабочей частоты траектории радиоволн будут скользить вдоль главного максимума ионизации и отклоняться неоднородностью сильнее, что приведет к дальнейшему расхождению численного и асимптотического решений. Таким образом, метод возмущений применим для расчета ДЧХ при условии наклонного и слабоскользящего распространения радиоволн. Рассмотрим более подробно влияние неоднородности на ДЧХ. В формуле (3) вариацию группового времени запаздывания можно представить в виде суммы, первое слагаемое которой зависит от поправки к траектории, а второе определяется величиной возмущения диэлектрической проницаемости. Интеграл от возмущения диэлектрической проницаемости зависит от длины пути луча внутри неоднородности и меняется плавно с его увеличением. Что касается поправки $R_1(\varphi)$, то из формулы (4) видно, что она зависит от функции Q_1 , которая, в свою очередь, (формула(5)) определяется пространственными градиентами неоднородности. Для модели (9) наибольшие градиенты сосредоточены в граничных областях. Сравнение деформаций ДЧХ, полученных для разных профилей неоднородности (9), показало, что при уменьшении градиента диэлектрической проницаемости в граничной области неоднородности, т.е. при «расплывании» ее границ, деформация ДЧХ так же «расплывается» (возмущение групповой задержки охватывает больший диапазон частот, а максимумы и минимумы запаздывания становятся менее выраженными).

По результатам проведенного исследования была предложена методика восстановления параметров неоднородности, основанная на поэтапном анализе возмущенных трансionoграмм. Вначале для определения местоположения и размеров неоднородности использовался подход, предложенный в [7]. На первом этапе для каждой трансionoграммы выявляются частоты с максимальным изменением времени задержки сигнала. Для выявленных частот проводится построение траекторий радиоволн в невозмущенной ионосфере и определяется потенциальная область локализации неоднородности. Наложение полученных областей, построенных в различных наземных приемных пунктах, позволяет выявить координаты центра неоднородности и оценить ее масштабы. На втором этапе проводится восстановление интенсивности неоднородности. Для этого в расчетные формулы (3)-(7) вводится крупномасштабная неоднородность с полученными геометрическими характеристиками, и по известному возмущению группового времени запаздывания сигнала на ДЧХ определяется интенсивность неоднородности. В работе был проведен численный эксперимент, который показал удовлетворительную точность

восстановления параметров модели крупномасштабной неоднородности по деформации синтезированной ДЧХ.

В случае слоистой неоднородности (в формуле (9) $b \rightarrow \infty$) можно получить дополнительную информацию о некоторых ее параметрах, используя результаты измерений фазы отраженного сигнала при внешнем многочастотном вертикальном зондировании. Согласно [13], для фазы отраженной радиоволны в слоистой среде имеем:

$$\Phi = 2k \int_0^{z_r} \sqrt{\varepsilon} dz, \quad (10)$$

где k – волновое число, z_r – точка отражения радиоволны от ионосферы (здесь ось z направлена вертикально вниз от космического аппарата, точка $z=0$ соответствует началу внешней ионосферы). Для анализа влияния крупномасштабной неоднородности на фазочастотную характеристику (ФЧХ) сигнала в работе рассмотрено решение уравнения (10) в приближении метода возмущений. С помощью аналитического преобразования приближенного решения получено выражение для вариации фазового пути радиоволны при внешнем вертикальном зондировании ионосферы с космического аппарата:

$$\Delta\rho = -2 \int_0^{z_{omp}} \sqrt{\varepsilon_0} \frac{\frac{d\varepsilon_1}{dz} \frac{d\varepsilon_0}{dz} - \varepsilon_1 \frac{d^2\varepsilon_0}{dz^2}}{\left(\frac{d\varepsilon_0}{dz}\right)^2} dz, \quad (11)$$

где z_{omp} – точка отражения в невозмущенной ионосфере.

Формулу (11) можно использовать для расчета вариации фазового пути радиоволны для произвольного монотонного профиля диэлектрической проницаемости невозмущенной ионосферы. С использованием моделей (8) и (9) на основе (11) был сделан расчет фазочастотной характеристики сигнала в однослойной невозмущенной ионосфере с крупномасштабной слоистой неоднородностью. По результатам численного и приближенного решения уравнения (10) были построены ФЧХ для различных параметров ионосферной неоднородности. В качестве примера на рис. 4 приведены ФЧХ, построенные для следующих параметров ионосферы: $z_m = 300$ км, $f_{кр} = 8$ МГц, $h_m = 100$ км, $f_{крE} = 0$. Параметры неоднородности: $\gamma = 0,02$, $f_{кр1} = 8$ МГц, $a = 5$ км, $r = 1$, $z_c = 180$ км. Сравнение полученных результатов показало, что приближенное решение находится в соответствии с численным. Вместе с тем, с ростом интенсивности неоднородности численное и приближенное решения начинают существенно отличаться. Это происходит вследствие различия пределов интегрирования, поскольку интеграл (11) вычисляется по невозмущенной траектории, а при численном расчете с помощью (10) учитывается вклад неоднородности в изменение точки отражения. С ростом интенсивности неоднородности этот вклад будет существенным.

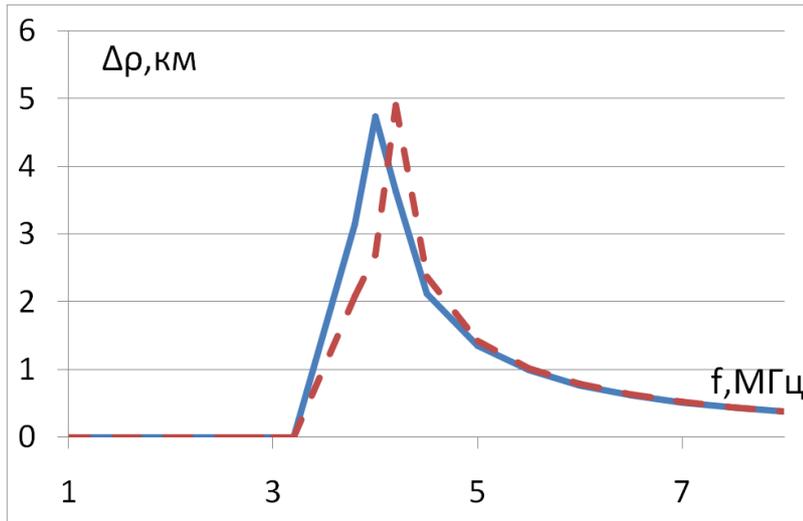


Рис.4. Фазочастотная характеристика, полученная численным (пунктирная линия) и приближенным (сплошная линия) методами.

На основе формулы (11) предложена методика восстановления высотной локализации крупномасштабной слоистой неоднородности и ее интенсивности по деформации ФЧХ отраженного сигнала при внешнем вертикальном зондировании.

Третья глава посвящена исследованию влияния крупномасштабной неоднородности на ДЧХ сигнала при трансионосферном зондировании с геостационарного космического аппарата.

Задача восстановления параметров неоднородности в случае расположения космического аппарата на геостационарной орбите имеет ряд особенностей. В данном случае координаты космического аппарата фиксированы и построение ограничивающих неоднородность областей для разных положений искусственного спутника невозможно. Однако, использование геостационарного спутника имеет и очень важное достоинство. Передавая сигнал с геостационарной орбиты, такой спутник может быть связан с большим количеством наземных пунктов приема, образуя своеобразную лучевую решетку. Такая решетка позволит отследить перемещение неоднородности в плоскости расположения пунктов приема и определить ее интенсивность по величине изменения трансionoграмм. Более того, при наличии большого количества наземных пунктов и нескольких геостационарных спутников зондирующими лучами будут контролироваться обширные области пространства. С помощью сети, образованной трансionoсферными траекториями можно детектировать неоднородности, масштабы которых сопоставимы с «ячейкой» такой сети. При этом разрешающая способность системы мониторинга будет зависеть от количества наземных станций.

Для расчета ДЧХ были использованы выражения (2)-(7). На основе численного расчета траекторий радиоволн в невозмущенной ионосфере и приближенного определения времени группового запаздывания сигнала предложена методика детектирования ионосферных неоднородностей. Проведенное моделирование ДЧХ с деформацией следа при внесении в ионосфе-

ру неоднородности показало, что ДЧХ, восстановленные в приближении метода малого параметра, можно применять для расчета интенсивности неоднородности. Однако при этом необходимо определить масштабы и область пространственной локализации неоднородности другим способом.

Четвертая глава посвящена разработке методики определения параметров тонкой структуры крупномасштабной неоднородности по фазовым характеристикам сигнала внешнего вертикального зондирования.

Хорошо известно [14], что крупномасштабные ионосферные неоднородности могут иметь тонкую структуру в виде случайных неоднородностей более мелких масштабов. Для изучения этой структуры в работе предложена методика диагностики, основанная на построении статистических характеристик радиосигнала, отраженного от крупномасштабной неоднородности. В качестве одной из таких характеристик может выступать дисперсия фазы отраженной радиоволны. Ранее явление малоуглового рассеяния в средах без отражения было достаточно хорошо изучено (см, например, [14]). Однако проблема рассеяния волн в условиях отражения изучена в меньшей степени. В частности, в работах [15–18] для линейного слоя плазмы с флуктуациями диэлектрической проницаемости исследовано влияние области отражения на флуктуации фазы. В результате проведенных расчетов был сделан вывод о преобладающем влиянии на флуктуации фазы случайных неоднородностей, расположенных в окрестности точки отражения радиоволны. Представляет интерес оценить флуктуации фазы радиоволны в слое с нелинейным профилем диэлектрической проницаемости.

В приближении метода возмущений была рассчитана дисперсия фазы радиоволны при внешнем вертикальном зондировании крупномасштабной слоистой неоднородности с тонкой турбулентной структурой, заданной спектром неоднородностей. На основе аналитического преобразования решения уравнения для флуктуаций эйконала было получено выражение для дисперсии фазы, справедливое для крупномасштабной неоднородности с монотонным профилем диэлектрической проницаемости $\varepsilon_n(z)$:

$$\sigma_{\Phi}^2 = -\sqrt{\pi}k^2 \langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle l_H \left(\frac{\partial \varepsilon_n(z_{omp})}{\partial z} \right)^{-1} \left[\ln \left(-\frac{8}{l_H} \left(\frac{\partial \varepsilon_n(z_{omp})}{\partial z} \right)^{-1} \right) + \frac{C}{2} \right] +$$

$$+ 4k^2 \sqrt{\pi} l_H \langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle \int_0^{z_{omp}} \varepsilon_n(z) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_n}{\partial z^2} \right)^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_n}{\partial z} \right)^{-4} dz. \quad (12)$$

где l_H – эффективный продольный (вдоль направления распространения радиоволны) внешний масштаб турбулентности, $\langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle$ – интенсивность случайных неоднородностей, C – постоянная Эйлера.

В работе определены условия применимости соотношения (12). Показано, что флуктуациями точки отражения радиоволны можно пренебречь, ес-

ли градиенты случайной компоненты диэлектрической проницаемости не превышают среднего градиента, обеспечивающего регулярную рефракцию радиоволны в крупномасштабной неоднородности, что согласуется с [17].

С помощью (12) можно оценить относительный вклад влияния на флуктуации фазы области отражения и формы вышележащего регулярного профиля диэлектрической проницаемости. Представим (12) в виде суммы $\sigma_{\phi}^2 = A + B$, где вклад от первого слагаемого обусловлен рассеянием радиоволны в области отражения, а второе слагаемое характеризует рассеяние волны в остальной толще неоднородности. Зададим крупномасштабную слоистую неоднородность с размерами порядка ионосферного слоя F2 зависимостью (8), полагая $f_{крE} = 0$. На рис.5 показана частотная зависимость процентного отношения B/A . При этом параметры модели неоднородности составляли $z_m = 300$ км, $f_{кр} = 10$ МГц, $h_m = 200$ км (А), $h_m = 150$ км (Б), $h_m = 100$ км (В).

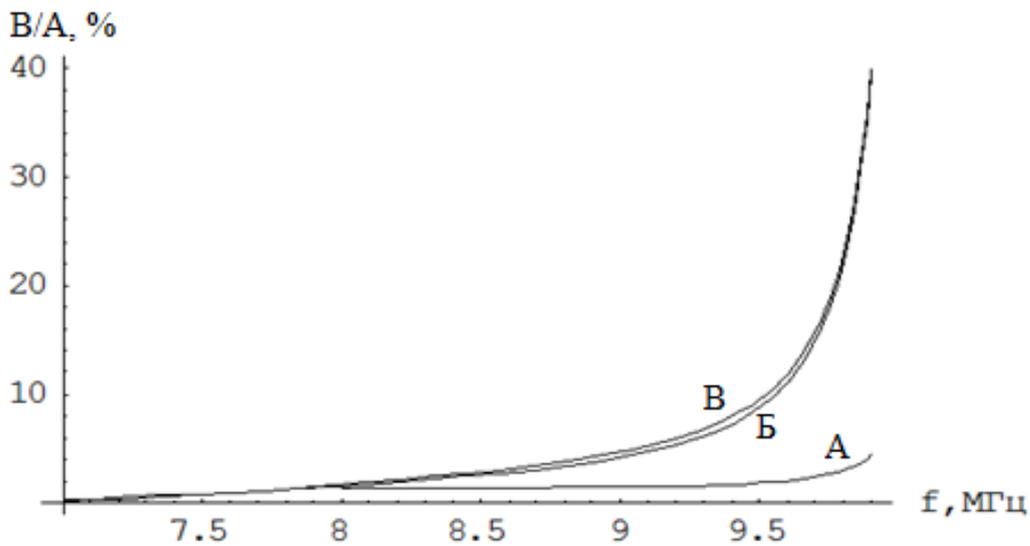


Рис.5. Частотная зависимость B/A .

Из рис.5 следует, что в случае профиля диэлектрической проницаемости крупномасштабной неоднородности, отличного от линейного, учет второго слагаемого в сумме (12) вносит заметную поправку в дисперсию фазы сигнала. При этом роль рассеяния на турбулентных неоднородностях, расположенных выше точки отражения, становится значительной при уменьшении толщины крупномасштабной неоднородности (кривые Б, В). Также был проведен расчет пространственного спектра фазовых флуктуаций при полном внутреннем отражении от крупномасштабной неоднородности. Получено аналитическое соотношение, позволяющее рассчитать спектр фазовых флуктуаций в зависимости от трехмерного пространственного спектра неоднородностей:

$$\begin{aligned}
W_\phi(\kappa_x, \kappa_y) = & 2k^2/\pi^2 \left(\int_0^{z_{omp}} d\eta_z \int_{-\infty}^{+\infty} S(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z) \exp(i\kappa_z \eta_z) d\kappa_z \int_{\eta_z/2}^{z_{omp}-\eta_z/2} \frac{(\partial^2 \varepsilon_n / \partial z^2)^2}{(\partial \varepsilon_n / \partial z)^4} dz + \right. \\
& \left. + \int_0^{z_{omp}} d\eta_z \int_{-\infty}^{+\infty} \kappa_z^2 S(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z) \exp(i\kappa_z \eta_z) d\kappa_z \int_{\eta_z/2}^{z_{omp}-\eta_z/2} \frac{\sqrt{\varepsilon_n^2(z) - (\partial \varepsilon_n / \partial z)^2 \eta_z^2 / 4}}{(\partial \varepsilon_n / \partial z)^2} dz \right), \quad (13)
\end{aligned}$$

где $S(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z)$ – спектр случайных неоднородностей.

Подставляя в формулу (13) различные модели спектров неоднородностей, можно рассчитать спектр фазовых флуктуаций отраженных радиоволн. Важно отметить, что в выражении (13) отсутствуют особенности в знаменателях подинтегральных функций при условии $\partial \varepsilon_n / \partial z \neq 0$, поэтому эта формула особенно эффективна при численных расчетах спектров фазовых флуктуаций для произвольных монотонных профилей регулярной диэлектрической проницаемости крупномасштабной неоднородности, когда (13) невозможно вычислить аналитически.

Восстановить некоторые параметры тонкой структуры крупномасштабной неоднородности при внешнем вертикальном зондировании можно с помощью анализа дисперсии фазы на различных частотах. В частности, используя выражение (12), учитывающее эффекты рассеяния в области отражения и во всей толще неоднородности составим отношение дисперсий фазы сигналов на двух различных частотах. Решив полученное уравнение относительно внешнего масштаба турбулентности l_H , получим:

$$l_H = \exp\left(\frac{VA_2 - A_1}{VB_2 - B_1}\right), \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned}
A_j = & f_j^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_n(z_{ompj})}{\partial z} \right)^{-1} \left[\ln \left(-8 \left(\frac{\partial \varepsilon_n(z_{ompj})}{\partial z} \right)^{-1} \right) + \frac{C}{2} \right] - 4f_j^2 \int_0^{z_{ompj}} \varepsilon_n(z) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_n}{\partial z^2} \right)^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_n}{\partial z} \right)^{-4} dz, \\
B_j = & f_j^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_n(z_{ompj})}{\partial z} \right)^{-1}, \quad V = \frac{\sigma_{\Phi_1}^2}{\sigma_{\Phi_2}^2}, \quad z_{ompj} - \text{высота отражения радиоволны с частотой}
\end{aligned}$$

f_j в невозмущенной ионосфере, j принимает значения 1 и 2.

Подставляя полученное значение l_H в (12) нетрудно определить интенсивность турбулентных неоднородностей. Таким образом, задача определения некоторых параметров турбулентных неоднородностей по статистическим моментам фазы радиосигнала при внешнем вертикальном зондировании крупномасштабной неоднородности может быть эффективно решена с применением аналитического преобразования решения уравнения эйконала, полученного в приближении метода возмущений.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

1. Получены приближенные функциональные соотношения для расчета деформации дистанционно-частотной характеристики трансионосферного декаметрового радиосигнала, вызванной воздействием локализованной крупномасштабной неоднородности электронной концентрации. Путем сравнения результатов численного и приближенного моделирования возмущенных трансionoграмм определены границы применимости полученных формул для расчета деформации ДЧХ. Проведено численно-асимптотическое моделирование возмущенных трансionoграмм при различных положениях космического аппарата относительно наземного пункта наблюдения.

2. Предложены методики детектирования крупномасштабной неоднородности на основе численно-асимптотического синтеза возмущенных дистанционно-частотных характеристик декаметровых трансionoсферных радиосигналов, излученных с борта низколетящего или геостационарного космического аппарата. С помощью численного моделирования показана возможность определения размеров и интенсивности крупномасштабной неоднородности по возмущенным участкам серии ДЧХ, полученных на трассах космический аппарат-Земля. Показано, что интенсивность и размеры одиночной крупномасштабной неоднородности могут быть уверенно восстановлены по возмущенным участкам трансionoграмм, отвечающим вариациям групповой задержки радиосигнала, распространяющегося сквозь ионосферу по наклонным и слабоскользящим вдоль уровня экстремальной ионосферной ионизации траекториям.

3. При построении статистических моментов фазы радиоволны при внешнем вертикальном падении на крупномасштабную неоднородность с тонкой турбулентной структурой использовано аналитическое преобразование решения уравнения эйконала, полученного в приближении метода возмущений. Такое преобразование для флуктуаций эйконала позволяет рассчитать рассеяние радиоволны при отражении от крупномасштабной неоднородности с произвольным монотонным профилем диэлектрической проницаемости. Получены аналитические выражения для дисперсии и пространственного спектра фазовых флуктуаций отраженного сигнала. На их основе проведены исследования флуктуаций фазы для степенного спектра случайных неоднородностей и различных монотонных профилей регулярной крупномасштабной неоднородности. Показано, что роль рассеяния на турбулентных неоднородностях, расположенных выше точки отражения, возрастает с уменьшением толщины крупномасштабной неоднородности.

4. Определены условия применимости полученных формул для расчета статистических моментов фазы. Показано, что флуктуациями точки отражения радиоволны можно пренебречь, если градиенты случайной компоненты диэлектрической проницаемости не превышают среднего градиента, обеспечивающего регулярную рефракцию радиоволны в крупномасштабной неоднородности. Сделанная оценка находится в соответствии с ранее полученными результатами других авторов.

5. Предложены методики определения параметров крупномасштабной неоднородности и ее тонкой турбулентной структуры, основанные на результатах численно-асимптотического моделирования фазовых характеристик сигналов внешнего вертикального зондирования ионосферы на различных частотах.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. Afanasiev N. T., Laryunin O. A., Markov V. P. Phase fluctuations of a radio wave in the case of total internal reflection from a randomly inhomogeneous ionosphere // Radiophysics and Quantum Electronics, ISSN: 0033-8443.-2010. Vol. 52, Issue: 10. P. 699–705.
2. Phase fluctuations of radio waves experiencing total reflection from a randomly inhomogeneous plasma layer / N.T. Afanasiev, A.N. Afanasiev, O.A. Larunin, V.P. Markov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2010. Vol. 72, issue 7-8. P. 583–587.
3. Afanasiev N.T., Markov V.P. Diagnostics of a Large_Scale Irregularity in the Electron Density near the Boundary of the Radio Transparency Frequency Range of the Ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. Vol. 51, N 4. P. 564–570.
4. Afanasiev N.T., Afanasiev A.N., Markov V.P. Detecting a Large-Scale Upper Atmospheric Plasma Inhomogeneity Using the Method of Multifrequency Radio Sounding in the Decametric Wavelength Range // The Open Atmosperic Science Journal. 2011. № 5. P. 43-49.
5. Афанасьев Н.Т., Марков В.П. Определение параметров крупномасштабной неоднородности электронной концентрации вблизи граничной частоты просвечивания ионосферы [Электронный ресурс] // Материалы Всероссийской научной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”. Москва, Институт космических исследований РАН, 2010. URL: <http://solarwind.cosmos.ru/news.htm>.
6. Фазовые флуктуации радиоволн при рассеянии в случайно-неоднородном отражающем слое плазмы / Н.Т. Афанасьев, А.Н. Афанасьев, О.А. Ларюнин, Марков В.П. // Материалы Всероссийской научной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”. Москва, Институт космических исследований РАН, 2011. URL: <http://solarwind.cosmos.ru/news.htm>.
7. Афанасьев Н.Т., Афанасьев А.Н., Марков В.П. Численно-аналитический метод моделирования дистанционно-частотных характеристик декаметровых сигналов на транзионосферных радиотрассах // Материалы Всероссийской научной конференции “Физика плазмы в солнечной системе”. Москва, Институт космических исследований РАН, 2011. URL: <http://solarwind.cosmos.ru/news.htm>.
8. Афанасьев Н.Т., Афанасьев А.Н., Марков В.П. Детектирование крупномасштабной неоднородности электронной плотности методом декаметрового транзионосферного зондирования // Труды XXIII Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 1. С. 173-176.

9. Фазовые флуктуации радиоволны при полном внутреннем отражении от турбулентного слоя плазмы / Н.Т. Афанасьев, А.Н. Афанасьев, О.А. Ларюнин, В.П. Марков // Труды XXIII Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 3. С. 292-295.
10. Диагностика интенсивности регулярной ионосферной неоднородности методом трансionoсферного зондирования / Е.Т. Агеева, Н.Т. Афанасьев, Д.Ч. Ким, О.А. Ларюнин, В.П. Марков // Труды Братского государственного университета. Братск : БрГУ, 2008. С. 122-125.
11. Определение параметров корреляционного эллипсоида флуктуаций электронной плотности на трассе наклонного зондирования ионосферы / Н.Т. Афанасьев, О.А. Ларюнин, В.П. Марков, Е.Т. Агеева, Д.Б. Ким // Труды Братского государственного университета. Братск : Изд-во БрГУ, 2009. С. 53-56.
12. Алгоритм быстрого расчета вариаций ДЧХ информационного канала с возмущенными параметрами / Н.Т. Афанасьев, В.П. Марков, Е.Т. Агеева, Д.Б. Ким // Труды Братского государственного университета. Братск : Изд-во БрГУ, 2010. С. 97-102.
13. Оперативный алгоритм расчета деформаций ДЧХ сигналов с учетом конечной кривизны информационного канала / Н.Т. Афанасьев, В.П. Марков, Е.Т. Агеева, Д.Б. Ким // Труды Братского государственного университета. Братск : Изд-во БрГУ, 2011. С. 97-102.
14. Марков В.П., Афанасьев Н.Т. Восстановление структуры крупномасштабной электронной неоднородности по данным многочастотного трансionoсферного зондирования // Труды XI конференции молодых ученых «Гелио и геофизические исследования». Иркутск, 2009. С. 144-146.
15. Фазовые флуктуации радиоволн при полном отражении от слоя плазмы со случайными неоднородностями / Н.Т. Афанасьев, А.Н. Афанасьев, О.А. Ларюнин, В.П. Марков, // Труды XII конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2011. С. 219-221.

Список использованной литературы

1. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. М. : Ленанд, 2009. 496 с.
2. Перспективы развития российской ионосферной службы на основе сети станций наземного радиозондирования и специализированных спутников с ионозондами / В.Б. Лапшин, С.А. Пулинец, В.И. Денисова, Г.В. Гивишвили, Н.П. Данилкин // Труды XXIII Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2011. Т. 1. С. 71-75.
3. Гивишвили Г.В. Многочастотное просвечивание ионосферы – новый метод глобальной диагностики ионосферы в реальном времени // Космические исследования. 1994. Т. 32, № 4-5. С. 142-149.
4. Гивишвили Г.В., Мигулин В.В. Метод многочастотного радиопросвечивания ионосферы как средство индикации литосферно-ионосферных возмуще-

- ний в реальном времени // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 5. С. 95-98.
5. Данилкин Н.П. Просвечивание ионосферы на границе диапазона ее радиопрозрачности // Радиотехника. 1985. № 9. С. 3-12.
6. Данилкин Н.П. Трансионосферное зондирование как средство контроля состояния ионосферы // Ионосферно-магнитная служба. Л. : Гидрометеиздат, 1987. С. 79-110.
7. Влияние ионосферных неоднородностей на трансионосферные сигналы / С.И. Авдюшин, Н.П. Данилкин, И.И. Иванов, С.В. Ковалев, Ю.В. Кушнеревский, В.В. Мигулин, В.И. Стасевич // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28, № 4. С. 691-693.
8. Лукин Д.С. Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах // Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. М. : Наука, 1971. С. 265-279.
9. Кравцов Ю.А. Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М. : Наука, 1980. 304 с.
10. Баранов В.А., Кравцов Ю.А. Метод возмущений для лучей в неоднородной среде // Известия вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 1. С. 52-62.
11. Тинин М.В. О вариациях углов прихода ионосферных радиоволн // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М. : Наука, 1977. С. 40-45.
12. Афанасьев Н.Т., Тинин М.В. Об использовании метода возмущений для определения вариации луча в неоднородной ионосфере // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1979. Вып. 45. С. 187-192.
13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М. : Изд-во АН СССР, 1957. 500 с.
14. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М. : Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 392 с.
15. Денисов Н.Г., Ерухимов Л.М. Статистические свойства фазовых флуктуаций при полном отражении от ионосферного слоя // Геомагнетизм и аэрономия. 1966. Т. 6, № 4. С. 695-702.
16. Алимов В.А. О частотной корреляции флуктуаций радиоволн, отраженных от ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12, № 3. С. 548-551.
17. Фукс И.М. Флуктуации фазы при полном внутреннем отражении от слоисто-неоднородной среды // Известия вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 1. С.84-93.
18. Гусев В.Д., Раджабов Т.С. Дисперсия флуктуации фазы радиосигнала при нормальном зондировании ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23, № 5. С. 856-857.