

На правах рукописи



Ларюнин Олег Альбертович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ПРИ ПОЛНОМ ВНУТРЕННЕМ ОТРАЖЕНИИ
ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ОТ ИОНОСФЕРЫ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2009

Работа выполнена на кафедре радиофизики Иркутского государственного университета.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Урядов Валерий Павлович
кандидат физико-математических наук,
с.н.с. Кулижский Андрей Владимирович

Ведущая организация: Институт солнечно-земной физики СО РАН

Защита диссертации состоится 17 июня 2009 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д.212.074.04 при Иркутском государственном университете по адресу: 664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского государственного университета.

Автореферат разослан «___» апреля 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



Мангазеев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Задача восстановления структуры и параметров неоднородностей электронной концентрации по характеристикам отраженных от ионосферы радиосигналов, является одной из актуальных задач общей проблемы распространения радиоволн в околоземном космическом пространстве [1,2]. В диапазоне радиоволн, используемых для дистанционного зондирования ионосферы, особый интерес представляют волны, частоты которых близки к собственным частотам ионосферной плазмы (декаметровые радиоволны). Большая чувствительность декаметровых радиоволн к изменчивым параметрам распределения электронной концентрации делает довольно привлекательным использование этого диапазона для диагностики ионосферных неоднородностей не только в спокойных, но и возмущенных геофизических условиях.

Существующие методы наземной дистанционной диагностики неоднородностей базируются прежде всего на вертикальном зондировании ионосферы (ВЗ). Однако, вследствие ограниченного числа измеряемых характеристик радиосигналов, станции ВЗ может оказаться недостаточно для определения параметров неоднородностей. Более полные сведения о неоднородностях можно получить, благодаря использованию цифровых ионозондов нового поколения (дигизондов [3]), позволяющих, в отличие от традиционных систем зондирования, проводить совместные измерения средних значений и дисперсий ряда характеристик радиосигнала. Имея одновременную информацию об этих характеристиках на разных частотах, можно переходить к решению обратной задачи восстановления ионосферных неоднородностей по параметрам отраженного радиосигнала. Дополнительные сведения о неоднородностях можно получить, проводя одновременные измерения средних и флуктуационных характеристик декаметровых сигналов на короткой наклонной радиотрассе, проходящей над исследуемым районом. Объединяя результаты измерений траекторных характеристик сигналов при вертикальном и слабонаклонном зондировании, можно более полно и однозначно определить параметры и структуру неоднородностей в спокойной и возмущенной ионосфере. Вместе с тем для успешного решения этих задач, прежде всего, необходимо получить функциональные соотношения, связывающие измеряемые характеристики отраженных от ионосферы радиосигналов и параметры математических моделей, описывающих ионосферные неоднородности.

Цель работы состоит в исследовании влияния тонкой структуры ионосферы на траекторные характеристики декаметровых радиоволн при полном внутреннем отражении и в разработке радиофизических методик

определения параметров неоднородностей электронной концентрации по средним и флуктуационным траекторным характеристикам сигналов вертикального и слабонаклонного зондирования.

Научная новизна состоит в следующем:

1. В приближении метода возмущений впервые предложена методика, позволяющая рассчитать влияние облака случайных неоднородностей электронной плотности на статистические траекторные характеристики радиоволн в различных областях пространства, включая область отражения при вертикальном зондировании ионосферы.

2. Впервые получена совместная алгебраическая система уравнений для определения параметров облака случайных неоднородностей по флуктуациям траекторных характеристик радиоволн при многочастотном вертикальном и слабонаклонном зондировании.

3. Разработан математический аппарат для определения параметров локализованной регулярной неоднородности электронной плотности по вариациям траекторных характеристик отраженных от ионосферы радиоволн.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением аналитических результатов в предельных частных случаях с результатами, известными из литературы.

Научная и практическая ценность:

Приближенный способ вычисления дисперсий траекторных характеристик радиоволн при полном внутреннем отражении от ионосферы может быть использован для расчета других статистических моментов. Предложенные методики определения параметров ионосферных неоднородностей могут быть применены при прогнозировании ионосферных радиотрасс, а также в качестве эффективного инструмента контроля изменений состояния атмосферы и литосферы. Одной из важных практических целей этого контроля является предсказание возможных сейсмических событий в данном географическом регионе [4,5]. Предложенные методики позволяют восстанавливать параметры как регулярных, так и случайных неоднородностей электронной плотности по данным вертикального и наклонного зондирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Приближенный метод расчета статистических траекторных характеристик дециметровых радиоволн, позволяющий учесть рефракционные эффекты случайных неоднородностей электронной плотности в различных областях ионосферы, включая уровень отражения при вертикальном и наклонном зондировании.

2. Методика определения параметров регулярной локализованной неоднородности электронной плотности по вариациям траекторных характеристик отраженных от ионосферы радиоволн.

3. Методика восстановления параметров случайных неоднородностей, локализованных в пространстве, по статистическим траекторным характеристикам сигналов вертикального и слабонаклонного зондирования ионосферы.

Личный вклад автора

Выводы основных теоретических зависимостей, представленных в диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор лично участвовал в разработке методик определения параметров различного вида неоднородностей электронной плотности.

Апробация результатов и публикации

Результаты диссертации докладывались на Всероссийской научной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, Институт космических исследований РАН, 2009), Всероссийской Научной Конференции Студентов Физиков (ВНКСФ, Москва, 2004), Международных Байкальских Школах по Фундаментальной Физике (БШФФ-2003, VI сессия молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды»; БШФФ-2004, VII сессия молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»; БШФФ-2007, X сессия молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы»), на Всероссийских научно-технических конференциях «Естественные и инженерные науки развитию регионов Сибири» (Братск, 2007, 2008), на научных семинарах Физического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Физического факультета Иркутского государственного университета, кафедры физики Братского государственного университета, отдела физики атмосферы, ионосферы и распространения радиоволн Института солнечно-земной физики СО РАН и лаборатории распространения радиоволн НИИПФ ИГУ. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 2 работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 113 наименований. Общий объем диссертации составляет 100 страниц, включая 13 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертации, обсуждается актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, отмечается новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Приведено краткое содержание работы и перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена теоретическому анализу траекторных характеристик декаметровых радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы и разработке методик определения параметров случайных неоднородностей электронной плотности с учетом особенностей рассеяния радиоволн в точке отражения.

В приближении метода малого параметра решена статистическая траекторная задача при вертикальном падении радиоволн на ионосферу. Для расчета флуктуаций направления распространения ионосферной радиоволны в качестве исходной использована система стохастических лучевых уравнений, в которой независимой переменной выступает время группового запаздывания [6]. Расчет флуктуаций фазы и доплеровского смещения частоты радиоволны проводится путем решения уравнения эйконала методом возмущений. В результате получены интегралы для флуктуаций направления распространения, фазы и доплеровского смещения частоты радиоволны. При вертикальном зондировании ионосферы, когда реализуются условия полного внутреннего отражения, непосредственное использование полученных интегралов для построения статистических моментов траекторных характеристик связано с большими вычислительными трудностями. Это вызвано тем, что подынтегральные функции имеют особенности в точке отражения. Для расчета статистических моментов в этих условиях ранее в работах [7-9] были сделаны различные асимптотические разложения. Впервые анализ особенностей рассеяния радиоволны в точке отражения был выполнен в работе [7], где получено приближенное выражение для дисперсии фазы, а в качестве модели регулярной ионосферы рассматривался линейный слой плазмы. Другой подход для расчета дисперсии фазы в линейном слое был предложен в последующей работе [8].

В отличие от [7-9] для построения статистических моментов фазы, доплеровского смещения частоты и направления распространения радиоволны в настоящей работе предварительно, с помощью интегрирования по частям, сделано преобразование интегралов для флуктуаций траекторных характеристик к виду, позволяющему корректно учесть особенности подынтегральных функций в точке отражения.

В частности в приближении метода возмущений для флуктуаций фазы отраженной радиоволны имеем [7]:

$$\Phi_1 = k \int_0^{z_{om}} \frac{\tilde{\varepsilon}_1}{\sqrt{\varepsilon_0}} dz, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0(z)$ – регулярная, $\tilde{\varepsilon}_1(x, y, z, t) \ll \varepsilon_0$ – флуктуационная части диэлектрической проницаемости ионосферы, z_{om} – высота отражения радиоволны, k – волновое число.

Как видно из (1), подынтегральная функция имеет особенность в точке отражения ($\varepsilon_0(z) = 0$ при $z = z_{om}$). Записывая знаменатель в формуле (1) под знаком дифференциала и интегрируя полученное выражение по частям, эту особенность можно устранить:

$$\Phi_1 = -2k \frac{\tilde{\varepsilon}_1(0)}{\partial \varepsilon_0(0)/\partial z} - 2k \int_0^{z_{om}} \sqrt{\varepsilon_0} \left(\frac{\partial \tilde{\varepsilon}_1 / \partial z}{\partial \varepsilon_0 / \partial z} - \frac{\tilde{\varepsilon}_1 \cdot \partial^2 \varepsilon_0 / \partial z^2}{(\partial \varepsilon_0 / \partial z)^2} \right) dz, \quad (2)$$

где учтено, что

$$\varepsilon_0(z = z_{om}) = 0. \quad (3)$$

Полученное соотношение (2) не содержит особенности при условии, что отражение радиоволны происходит вдали от уровней экстремальной ионизации ионосферы, где $\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z} = 0$.

Используя (2), можно строить различные статистические моменты фазовых флуктуаций.

В качестве модели тонкой структуры ионосферы, как и в [10,11], в настоящей работе были использованы представления о гауссовом корреляционном эллипсоиде, а движение случайных неоднородностей учтено в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности. В результате были получены выражения для дисперсий фазы, доплеровского смещения частоты и направления распространения радиоволны. В частности, из (2) следует асимптотическое выражение для дисперсии фазы радиоволны:

$$\begin{aligned} \sigma_\Phi^2 = & -\sqrt{\pi} k^2 \langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle l_z \left(\frac{\partial \varepsilon_0(z_{om})}{\partial z} \right)^{-1} \left[\ln \left(-\frac{8}{l_z} \left(\frac{\partial \varepsilon_0(z_{om})}{\partial z} \right)^{-1} \right) + \frac{C}{2} \right] + \\ & + 4k^2 \sqrt{\pi} l_z \langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle \int_0^{z_{om}} \varepsilon_0(z) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon_0}{\partial z^2} \right)^2 \left(\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial z} \right)^{-4} dz \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $C = 0,577$ – постоянная Эйлера, l_z – вертикальный масштаб корреляционного эллипсоида, $\langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle$ – интенсивность неоднородностей, а для описания диэлектрической проницаемости невозмущенной ионосферы в точке отражения использована аппроксимация линейным слоем плазмы с вертикальным градиентом $\frac{\partial \varepsilon_0(z_{om})}{\partial z}$.

Выражение для дисперсии фазы (4) в частном случае линейного слоя $\varepsilon_0(z) = -\frac{z}{L}$, (когда толщина z_{om} слоя с неоднородностями размером $l_z = l$ равна L) переходит в формулу, полученную в работе [7]:

$$\sigma_\Phi^2 = k^2 \langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle \sqrt{\pi} l L \left(\ln \frac{8L}{l} + \frac{C}{2} \right) \quad (5)$$

Между тем, из работы [8], следует:

$$\sigma_\Phi^2 = k^2 \langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle \sqrt{\pi} l L \left(\ln \frac{L}{l} \right) \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что в приближении $\frac{L}{l} \gg 1$ данные результаты совпадают. Далее было проведено численное моделирование, которое показало корректность асимптотического выражения (5).

Поскольку полученные статистические моменты радиоволны могут быть измерены экспериментально, соответствующие им формулы можно рассматривать в качестве системы уравнений для определения параметров тонкой структуры ионосферы: интенсивности $\langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle$, масштаба l , и скорости движения неоднородностей V . Отслеживая дисперсии траекторных характеристик во времени, можно контролировать динамику параметров неоднородностей V , l , и $\langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle$ с учетом особенностей рассеяния радиоволны в точке отражения.

Необходимо сказать о правомерности использования модели гауссова корреляционного эллипсоида при решении задачи диагностики тонкой структуры ионосферы. В последнее время в целях диагностики широко используются представления о степенном спектре неоднородностей [1]. Что касается гауссовой модели, то она зарекомендовала себя также весьма полезной в задачах распространения радиоволн [11,12], хотя и описывает тонкую структуру ионосферы более эффективно (т.е., более при-

ближенно). Между тем, в рассмотренном случае благодаря применению гауссовой модели корреляционного эллипсоида удается получить относительно простые асимптотические формулы, позволяющие проводить диагностику параметров неоднородностей даже в условиях полного внутреннего отражения, когда влияние точки отражения весьма существенно и традиционные методики диагностики не точны.

Тем не менее, вопрос об истинном виде корреляционной функции ионосферных неоднородностей в конкретных геофизических условиях всегда требует дополнительного анализа. Поэтому в заключении главы на основе решения интегрального уравнения Абеля предложена методика восстановления функции пространственной корреляции флуктуаций электронной плотности по функциям взаимной корреляции фазы и доплеровского смещения частоты на разных частотах при многочастотном вертикальном зондировании.

Во второй главе рассмотрены возможности определения параметров случайных и регулярных неоднородностей электронной плотности, локализованных в ограниченной области пространства, на основе анализа результатов вертикального и слабонаклонного многочастотного зондирования ионосферы.

Для описания пространственной локализации облака случайных неоднородностей использована гауссова зависимость с двумя характерными параметрами: пространственным масштабом облака a , и высотой его центра z_a ($\langle \tilde{\varepsilon}_1^2 \rangle_0$ – интенсивность неоднородностей в центре облака):

$$\langle \varepsilon_1^2 \rangle = \langle \varepsilon_1^2 \rangle_0 \exp \left[- \left(\frac{z - z_a}{a} \right)^2 \right] \quad (7)$$

В случае модели (7) получено асимптотическое выражение для дисперсии доплеровского смещения частоты:

$$\sigma_f^2 = 6\sqrt{\pi} \langle \varepsilon_1^2 \rangle_0 \frac{f^2}{c^2} V^2 l^{-3} a \cdot \varepsilon_0(z_a) \left(\frac{\partial \varepsilon_0(z_a)}{\partial z} \right)^{-2} \quad (8)$$

позволяющее при многочастотных измерениях определять высоту центра облака.

Затем рассмотрена возможность диагностики регулярной локализованной неоднородности электронной плотности по вариациям фазы и доплеровского смещения частоты радиоволны, отраженной от ионосферы. Получены аналитические зависимости вариаций доплеровского смещения частоты и фазового пути радиоволны от высоты локализации неоднородности. Использована гауссова модель возмущения диэлектрической проницаемости вида

$$\varepsilon_1(z) = E \exp \left[- \left(\frac{z - z_b}{b} \right)^2 \right] \quad (9)$$

где $z_b = z_b(t)$ – описывает изменение во времени центра локализации неоднородности.

При вертикальном зондировании были получены выражения для вариаций доплеровского смещения частоты и фазового пути радиоволны (в случае $z_b < z_{om}$, когда облако неоднородности находится ниже точки отражения). В частности, для фазового пути, в модели линейного слоя ионосферы $\varepsilon_0 = 1 - \alpha z$ оно имеет вид:

$$\Delta P = Eb \sqrt{\pi} \frac{1}{\sqrt{1 - \alpha z_b}} \quad (10)$$

В случае наклонного зондирования для вариаций фазового пути получены асимптотические формулы, соответствующие различным положениям облака неоднородности относительно точки отражения. В частности, при $z_b < z_p$ (где z_p – точка поворота радиоволны в линейном слое плазмы) имеет место выражение:

$$\Delta P = \frac{\sqrt{\pi} Eb}{\sqrt{\cos^2 \varphi_n - \alpha z_b}} \quad (11)$$

которое в предельном случае вертикального зондирования $\varphi_n = 0$ переходит в полученное ранее соотношение (10).

При обратном условии, $z_b > z_p$ имеем:

$$\Delta P = \sqrt{\frac{\pi}{2}} Eb \exp \left[- \left(\frac{\alpha z_b - \cos^2 \varphi_n}{\alpha b} \right)^2 \right] \frac{1}{\sqrt{\alpha z_b - \cos^2 \varphi_n}} \quad (12)$$

Выражение (12) является убывающей функцией аргумента z_b , поскольку неоднородность здесь начинает выходить из зоны радиопросвечивания.

Для вариации фазового пути в точке $z_b = z_p$ имеем: $\Delta P(z_p) = I \cdot E \sqrt{\frac{b}{\alpha}}$, где

I выражается через гамма-функцию следующим образом $I = 2\Gamma\left(\frac{1}{4}\right) \approx 1,81$

Сделанные асимптотические оценки позволяют построить график функции $\Delta P(z_b)$ для любых значений аргумента.

В частном случае $\varphi_n = 0$ он имеет вид, представленный на рис 1.

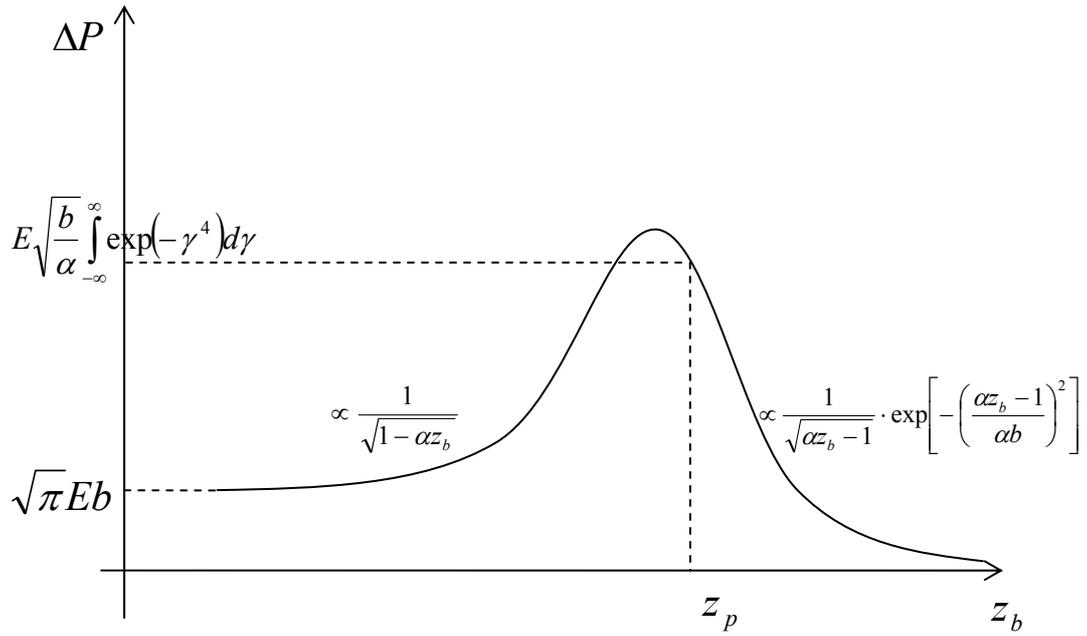


Рис.1. Зависимость вариации фазового пути от высоты неоднородности

Далее рассмотрена задача определения параметров одиночной неоднородности: высоты z_b , скорости движения V , масштаба b и интенсивности E .

Для определения параметра z_b при вертикальном зондировании достаточно определить вариации фазы $k\Delta P_1 = k\Delta P(f_1)$ и $k\Delta P_2 = k\Delta P(f_2)$ для двух различных частот f_1 и f_2 . В результате нетрудно получить соотношение:

$$z_b = \frac{f_1^4 \Delta P_1^2 - f_2^4 \Delta P_2^2}{\alpha_1 f_1^4 \Delta P_1^2 - \alpha_2 f_2^4 \Delta P_2^2} \quad (13)$$

где α_1 и α_2 – «наклоны» линейного слоя, соответствующие частотам f_1 и f_2 .

Для восстановления остальных трех параметров одиночной неоднородности предлагается проводить совместные измерения вариаций доплеровского смещения частоты и фазы при вертикальном зондировании и на слабонаклонной трассе, проходящей над исследуемым районом. В результате искомые соотношения будут иметь вид:

$$b = \left(\frac{\Delta P I}{\Delta P(z_b)} \right)^2 \frac{1 - \alpha z_b}{\pi \alpha_p} \frac{f^2}{f_p^2}; \quad E = \frac{\Delta P^2(z_b)}{\Delta P} \frac{\sqrt{\pi} \alpha_p}{I^2 \sqrt{1 - \alpha z_b}} \frac{f_p^4}{f^4}$$

$$V = -\Delta f_1 \frac{\Delta P^3}{\Delta P^4(z_b)} \frac{c \alpha (1 - \alpha z_b) I^4}{4 \pi^2 \alpha_p^2} \frac{f^5}{f_p^6}$$

где α – наклон линейного слоя, для рабочей частоты f , α_p – соответствует частоте f_p , отраженной на уровне z_b (см. (13)); ΔP и Δf_1 – вариации фазового пути и доплеровского смещения частоты радиоволны, определяемые из данных вертикального зондирования, а $\Delta P(z_b)$ находится из данных наклонного зондирования ионосферы.

Таким образом, многочастотные измерения вариаций фазы и доплеровского смещения частоты радиоволны при вертикальном зондировании и на слабонаклонной трассе, проходящей над исследуемым районом, позволяют восстановить параметры локализованного ионосферного возмущения. Предложенная методика решения обратной задачи наиболее эффективна в случае значительных возмущений электронной плотности по сравнению с фоновым состоянием среды. В частности, она может быть применена для определения и контроля параметров интенсивных неоднородностей электронной плотности, которые в средних широтах могут выступать в качестве одного из возможных ионосферных предвестников сейсмических событий. Для Байкальского сейсмически-активного региона создание пункта непрерывного мониторинга возмущенного состояния неоднородной структуры ионосферы может быть реализовано на базе цифрового дигизонда DPS-4, расположенного в г. Иркутске. Дополнительную информацию о специфических ионосферных неоднородностях над пунктом слежения можно получить из данных измерений характеристик сигнала на короткой односкачковой трассе, например, Улан-Удэ – Иркутск.

В третьей главе предложена методика определения параметров объемной структуры случайных неоднородностей электронной плотности по статистическим траекторным характеристикам радиоволн на трассе наклонного зондирования, проходящей над исследуемым районом.

В отличие от случая вертикального зондирования, восстановление тонкой структуры ионосферы по данным наклонного зондирования намного сложнее, поскольку здесь возникает проблема, связанная с присутствием неоднородностей в широкой области пространства распространения радиоволн. Вследствие наложения эффектов сильной регулярной рефракции радиоволн и рассеяния их на неоднородностях, в пункте наблюдения формируется сложная интерференционная структура волнового поля, интерпретация и обращение которой требуют значительных усилий. Важный шаг в решении задачи диагностики случайных неоднородностей по данным наклонного зондирования был сделан благодаря введению модели неоднородностей в виде пространственного анизотропного корреляционного эллипсоида [12]. В результате были получены функциональные соотношения, связывающие статистические характеристики

радиоволны на трассе наклонного зондирования с параметрами тонкой структуры ионосферы [12-14]. Однако даже для такой простой модели неоднородностей обратить функциональные соотношения относительно полного набора параметров корреляционного эллипсоида оказалось далеко не просто. В связи с этим в работе [14] был предложен приближенный способ определения эффективных параметров пространственного корреляционного эллипсоида: степени продольной и поперечной анизотропии и удельной интенсивности. При этом в качестве измеряемых статистических характеристик радиоволны на трассе наклонного зондирования использовался лишь ограниченный их набор.

В отличие от упрощенной модели [14], для определения параметров случайных неоднородностей в настоящей работе используется более полная модель пространственно-временного анизотропного корреляционного эллипсоида. За счет привлечения данных измерений широкого круга статистических моментов радиоволны на трассе наклонного зондирования и использования асимптотических разложений в полученных функциональных соотношениях, в ряде случаев удается восстановить интенсивность, масштабы и скорость движения случайных неоднородностей.

Для восстановления параметров случайных неоднородностей на трассе наклонного зондирования в работе предварительно была решена в приближении метода малого параметра статистическая траекторная задача с одноточечными краевыми условиями. В качестве исходной была взята система лучевых уравнений с независимой переменной – x - координатой луча. Введенное преобразование решения одноточечной траекторной задачи позволяет также рассчитать флуктуационные характеристики радиоволны в траекторной задаче с двухточечными краевыми условиями.

В качестве модели случайных неоднородностей рассматривалась пространственно-временная гауссова корреляционная функция в предположении, что скорость движения неоднородностей в вертикальном направлении существенно превышает горизонтальные составляющие:

$$K_t = \left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle (1 - \varepsilon_0)^2 \exp \left[- \left(\frac{x_1 - x_2}{l_x} \right)^2 - \left(\frac{y_1 - y_2}{l_y} \right)^2 - \left(\frac{z_1 - z_2 - V(t_1 - t_2)}{l_z} \right)^2 \right] \quad (14)$$

С использованием (14) для дисперсии азимутального и вертикального углов прихода радиоволны были получены следующие соотношения:

$$\sigma^2_\psi = \frac{\rho}{2x_t^2 \sin^4 \varphi_n} \frac{1}{l_y^2} \sqrt{\pi} l_z \int_0^{x_t} \left[\left(\frac{l_z}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{dz_0}{dx} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} (1 - \varepsilon_0)^2 x^2 dx \quad (15)$$

$$\sigma^2_{\varphi} = \frac{\rho\sqrt{\pi}}{2l_x^2 l_z^2} \left[\frac{\partial z_0}{\partial \varphi_n}(x_t) \right]^{-2} \int_0^{x_t} (1 - \varepsilon_0)^2 \left[\frac{\partial z_0(x)}{\partial \varphi_n} \right]^2 \varepsilon_0^{-2} \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_z^2} \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} dx \quad (16)$$

Соответственно, для дисперсии фазы и доплеровского смещения частоты имеем:

$$\sigma_p^2 = \frac{\rho\sqrt{\pi}}{4 \sin^2 \varphi_n} \int_0^{x_t} (1 - \varepsilon_0)^2 \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_z^2} \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} dx \quad (17)$$

$$\sigma_f^2 = \frac{\pi^{\frac{5}{2}} f^2}{c^2 \sin^2 \varphi_n} \frac{2\rho V^2}{l_z^2 l_x^2} \int_0^{x_t} (1 - \varepsilon_0)^2 \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_z^2} \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} dx \quad (18)$$

Наконец, для взаимнокорреляционной функции вертикального угла прихода и доплеровского смещения частоты можно получить:

$$\Gamma_{\varphi \Delta f} = \left(\frac{\partial z_0(x_t)}{\partial \varphi_n} \right)^{-1} \frac{\pi^{\frac{3}{2}} f}{c \sin \varphi_n} \frac{V\rho}{l_z^2} \times \int_0^{x_t} \frac{\partial z_0(x)}{\partial \varphi_n} \frac{\partial z_0}{\partial x} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0} \left(\operatorname{ctg} \varphi_0 \frac{1}{l_x^2} - \frac{1}{l_z^2} \frac{\partial z_0}{\partial x} \right) \left[\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_z^2} \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} dx \quad (19)$$

где φ_n – начальный угол падения радиоволны на ионосферу,

$\rho = \left\langle \left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 \right\rangle$ интенсивность флуктуаций электронной концентрации, x_t

– дальность радиотрассы.

Нетрудно видеть, что пять перечисленных уравнений являются независимыми относительно пяти неизвестных параметров неоднородностей: интенсивности ρ , масштабов l_x , l_y , l_z и скорости движения V . Рассматривая в совокупности асимптотические формулы (15)–(19), имеем систему интегральных уравнений для определения объемных параметров случайных неоднородностей, в которой в качестве входных величин используются результаты измерений на трассе наклонного зондирования дисперсий фазы, углов прихода, доплеровского смещения частоты радиоволны и коэффициентов их взаимной корреляции. Как показал анализ, аналитическое решение полученной системы уравнений возможно в нескольких важных предельных случаях, в частности, таких как $l_z \ll l_x$ и $l_z \gg l_x$.

В заключении сформулированы **основные результаты** диссертации.

1. В приближении метода малого параметра решена статистическая траекторная задача при вертикальном зондировании ионосферы. В интегральных формулах для флуктуаций траекторных характеристик введено преобразование, позволяющее учесть особенность подынтегральных функций в точке отражения при построении статистических моментов отраженной радиоволны. Показано соответствие полученных результатов для дисперсий траекторных характеристик радиоволны, в частном случае отражения от линейного слоя плазмы, с результатами, известными из литературы. Предложенный метод расчета дисперсий траекторных характеристик позволяет оценить эффекты случайной рефракции радиоволны в окрестности точки отражения и в случае других высотных профилей электронной плотности ионосферы.

2. Получена система уравнений для определения параметров случайных неоднородностей электронной плотности по статистическим траекторным характеристикам отраженной радиоволны. Предложена методика определения параметров тонкой структуры ионосферы по данным вертикального зондирования. Апробация методики выполнена путем сравнения полученных теоретических результатов с экспериментальными данными ионозонда DPS-4.

3. На основе решения интегрального уравнения Абеля предложена методика восстановления функции пространственной корреляции флуктуаций электронной плотности по функциям взаимной корреляции фазы и доплеровского смещения частоты на разных рабочих частотах.

4. В приближении метода геометрической оптики исследовано влияние случайных неоднородностей электронной плотности, сосредоточенных в ограниченной области пространства, на траекторные характеристики декаметровых радиоволн. Предложена методика определения высоты локализации облака случайных неоднородностей по статистическим характеристикам доплеровского смещения частоты радиоволны при многочастотном вертикальном зондировании.

5. Проведен анализ влияния регулярной локализованной неоднородности электронной плотности на траекторные характеристики отраженной радиоволны. Выявлены области пространства, где эффект воздействия неоднородности максимальный. Предложена методика определения параметров локализованной электронной неоднородности по многочастотным измерениям вариаций фазы и доплеровского смещения частоты радиоволны при вертикальном и слабонаклонном зондировании ионосферы.

6. Предложена методика восстановления параметров объемной структуры случайных неоднородностей электронной плотности, заданных моделью трехмерного пространственно-временного корреляционного эллипсоида, по статистическим траекторным характеристикам радиоволн на трассе наклонного зондирования.

Основные публикации автора по теме диссертации:

1. *Афанасьев Н. Т.* Флуктуации траекторных характеристик радиоволн при полном внутреннем отражении от слоя плазмы [Электронный ресурс] / *Н. Т. Афанасьев, О. А. Ларюнин* // Физика плазмы в солнечной системе : материалы Всерос. науч. конф. (Москва, Институт космических исследований РАН, 2009). – Режим доступа: <http://solarwind.cosmos.ru/news.htm>

2. Диагностика интенсивности регулярной ионосферной неоднородности методом трансionoсферного зондирования / *Е. Т. Агеева, Д. Ч. Ким, Н. Т. Афанасьев, О. А. Ларюнин, В. П. Марков* // Естественные и инженерные науки развитию регионов Сибири : материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Братск : БрГУ, 2008. – С. 54–55.

3. *Ларюнин О. А.* Вариации углов прихода декаметровых радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы / *О. А. Ларюнин, Н. Т. Афанасьев* // Взаимодействие полей и излучения с веществом : тр. VII Междунар. Байкал. молодеж. науч. школы по фундам. физике – Иркутск, 2004. – С. 129–131.

4. *Ларюнин О. А.* Влияние облака случайных неоднородностей на характеристики радиоволн, отраженных от ионосферы / *О. А. Ларюнин, Н. Т. Афанасьев* // Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы : тр. X Междунар. Байкал. молодеж. науч. школы по фундам. физике – Иркутск, 2007. – С. 149–152.

5. *Ларюнин О. А.* Диагностика случайных неоднородностей электронной плотности при вертикальном зондировании ионосферы / *О. А. Ларюнин, Е. Т. Агеева, Н. Т. Афанасьев* // Вестник ИрГТУ. – 2008. – № 1. – С. 92–98.

6. *Ларюнин О. А.* О флуктуациях доплеровского смещения частоты при вертикальном зондировании ионосферы / *О. А. Ларюнин, Н. Т. Афанасьев* // Волновые процессы в проблеме космической погоды : тр. VI Междунар. Байкал. молодеж. науч. школы по фундам. физике. – Иркутск, 2003. – С. 138–139.

7. *Ларюнин О. А.* Радиофизический мониторинг тонкой структуры ионосферной плазмы над заданным регионом / *О. А. Ларюнин, Н. Т. Афанасьев* // Сб. тез. X Всерос. науч. конф. студентов-физиков и мол. ученых. – Екатеринбург ; М. : Изд. АСФ России, 2004. – Т. 2. – С. 901–902.

8. Мониторинг тонкой структуры ионосферы над сейсмически активным регионом / *О. А. Ларюнин, Н. Т. Афанасьев, Е. Т. Агеева, Д. Ч. Ким* // Тр. Братского гос. ун-та. – Братск : БрГУ, 2007. – С. 20–23.

9. Радиофизический мониторинг ионосферных неоднородностей над сейсмически-активным регионом / *О. А. Ларюнин, Е. Т. Агеева, Н. Т. Афанасьев, В. В. Демьянов, В. В. Филоненко* // Вестник СибГАУ. – 2008. – № 2. – С. 14–18.

10. Численно-асимптотический метод моделирования состояния информационного канала с хаотическими параметрами / *Н. Т. Афанасьев, О. А. Ларюнин, Е. Т. Агеева, Д. Ч. Ким* // Естественные и инженерные науки развитию регионов Сибири : материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Братск : БрГУ, 2008. – С. 53–54.

Список цитируемой литературы

1. *Гершман Б. Н.* Волновые явления в ионосфере и космической плазме / *Б. Н. Гершман, Л. М. Ерухимов, Ю. Я. Яшин.* – М. : Наука, 1984. – 392 с.

2. *Афраймович Э. Л.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / *Э. Л. Афраймович, Н. П. Перевалова.* – Иркутск : ГУ НИЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.

3. http://ulcar.uml.edu/digisonde_dps.html Digisonde DPS

4. *Липеровский В. А.* Ионосферные предвестники землетрясений / *В. А. Липеровский, О.А. Похотелов, С.Л. Шалимов.* – М. : Наука, 1992. – 304 с.

5. *Бондур В. Г.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами / *В. Г. Бондур, В. М. Смирнов* // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 402, № 5. – С. 675–679.

6. *Кравцов Ю. А.* Геометрическая оптика неоднородных сред / *Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов.* – М. : Наука, 1980. – С. 304.

7. *Денисов Н. Г.* Статистические свойства фазовых флуктуаций при полном отражении от ионосферного слоя / *Н. Г. Денисов, Л. М. Ерухимов* // Геомагнетизм и аэрономия. – 1966. – Т. VI, №4. – С. 695–702.

8. *Гусев В. Д.* Дисперсия флуктуации фазы радиосигнала при нормальном зондировании ионосферы / *В. Д. Гусев, Т. С. Раджабов* // Геомагнетизм и аэрономия. – 1983. – Т. 23, № 5. – С. 856–857.

9. *Гусев В. Д.* Определение флуктуаций углов прихода и доплеровского смещения частоты при вертикальном зондировании ионосферы / *В. Д. Гусев, М. Б. Виноградова* // Геомагнетизм и аэрономия. – 1987. – Т. 27, № 2. – С. 322–323.

10. *Гусев В. Д.* Объемная структура неоднородностей ионосферы. Ионосферные исследования / *В. Д. Гусев* // Советское радио. – М., 1980. – № 30. – С. 53–56.

11. *Гусев В.Д.* Модельное определение объемных характеристик неоднородностей ионосферы / *В. Д. Гусев, Н. П. Овчинникова* // Геомагнетизм и аэрономия. – 1980. – Т. 20, № 4. – С. 626–631.

12. *Гусев В.Д.* Влияние неоднородностей ионосферы на распространение радиоволн : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.Д. Гусев. – М. : МГУ, 1976. – 307 с.

13. *Афанасьев Н.Т.* Влияние случайных неоднородностей ионосферы на флуктуации угловых характеристик коротких радиоволн на наклонных трассах / Н.Т. Афанасьев, А.А. Жжених // Тр. XXI Всерос. конф. по распространению радиоволн. – Йошкар-Ола, 2005. – С.15–18.

14. Diagnosing the effective parameters of the ionospheric fine structure from statistical characteristics of radio waves in the vicinity of a regular caustic / N.T.Afanasiev [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2001. – V. 63, №18. – P. 1967–1972.

Подписано в печать 22.04.09. Формат 60x84 1/16. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 36.

Издательство Иркутского государственного университета
664003, Иркутск, бульвар Гагарина, 36; тел. (3952) 24–14–36