

На правах рукописи

Книжин Сергей Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛНОВОЙ
ДИАГНОСТИКИ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОМОЩИ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛЯ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2014

Работа выполнена на кафедре радиофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Тинин Михаил Валентинович

Официальные оппоненты: Куницын Вячеслав Евгеньевич,
доктор физико-математических наук,
профессор,
ФГБОУ ВПО МГУ, Москва,
зав. кафедрой

Ильин Николай Викторович,
кандидат физико-математических наук,
доцент,
ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Научно-
исследовательский радиофизический
институт»

Защита состоится _____ в __ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.074.04 в Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Иркутский государственный университет» по адресу: 664001, Иркутск, бул.
Гагарина, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Иркутского
государственного университета по адресу: 664003, г. Иркутск, б. Гагарина, 24.

Отзывы просим отправлять по адресу: 664003, г. Иркутск, б. Гагарина, 20,
физический факультет ИГУ.

Автореферат разослан _____

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

Б. В. Мангазеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Диагностика неоднородной плазмы радиофизическими методами является одной из важнейших и актуальных проблем современной физики. Особый интерес представляют исследования околоземной (ионосферной) и лабораторной плазмы. Изучение процессов, протекающих в данных неоднородных средах, необходимо для решения широкого круга радиофизических задач, таких как глобальное позиционирование при помощи навигационных спутниковых систем, передача радиосигналов на дальние расстояния, геофизический мониторинг, радиолокационные исследования ближнего космоса с Земли, диагностика лабораторной плазмы при помощи радиоволнового излучения и др.

При диагностике неоднородной плазмы по данным о радиосигнале, определяются ее физические характеристики: электронная концентрация, частота соударений частиц и т.д. Тип диагностики напрямую зависит от схемы измерений, задаваемой приемо-передающей системой, методов решения обратной задачи, а также математических методов, определяемых асимптотическим решением волнового уравнения. Существует множество технических средств, используемых в исследованиях неоднородной плазмы, например, для диагностики ионосферы применяют искусственные спутники Земли, на борту которых находятся радиоволновые передатчики. Наибольший интерес в настоящее время представляют такие спутниковые методы диагностики околоземной плазмы, как лучевая и дифракционная радиотомографии, а также радиозатменные методы, позволяющие исследовать разномасштабные неоднородности в ионосфере Земли. Однако, приближенный характер математических методов, используемых при таких видах диагностики, накладывает ограничения на разрешающую способность измерительной системы. Фактически, чем строже методы описания распространения зондирующего радиосигнала в неоднородной ионосферной плазме, тем больше возможностей у исследователя для повышения разрешающей способности диагностической системы.

В рамках диссертационного исследования в качестве метода повышения разрешающей способности волновой диагностики неоднородной плазмы предлагается использовать пространственную обработку поля, основанную на представлении поля волны в виде двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП), выполненного относительно координат источника и приемника. Отличительная особенность данного метода заключается в возможности диагностировать неоднородности с размерами больше и меньше радиуса Френеля при слабых и сильных вариациях фазы и уровня в отсутствие информации о локализации исследуемой неоднородной среды. Такой вид диагностики может быть реализован в задачах дифракционной радиотомографии ионосферы, где рассеянное поле волны измеряет сеть приемников, находящихся на земной поверхности, а передающая антенная система синтезируется движущимся низкоорбитальным или высокоорбитальным искусственным спутником Земли. Аналогичную схему диагностики неоднородной плазмы можно реализовать в лабораторных условиях. Однако, когда физические характеристики неоднородной среды изменяются быстро или пространственная обработка поля возможна только по одной из плоскостей, обработка ДВФП становится не применимой. В таких условиях можно использовать однократную пространственную обработку поля, основанную на модификации метода ДВФП для удаленной неоднородности. Этот подход, так же, как и двукратная обработка ДВФП, позволяет диагностировать разномасштабные неоднородности в условиях сильных и слабых вариаций фазы. Главное отличие данной методики от Френелевской инверсии, которую часто используют при решении задач диагностики неоднородной плазмы, заключается в возможности расположить виртуальный экран не только на выходе из неоднородной среды, но и внутри нее.

Цель работы. Исследовать возможности пространственной обработки поля на основе метода двойного взвешенного Фурье преобразования и его модификаций для задач диагностики неоднородной плазмы в присутствии дифракционных и многолучевых эффектов при распространении радиоволны

через неоднородную среду, вызывающую слабые и сильные вариации фазы и уровня.

Задачи:

1) Исследовать возможности различных асимптотических методов описания поведения радиоволн в неоднородной среде для усовершенствования методов диагностики неоднородной плазмы.

2) Решить задачу повышения разрешающей способности волновой диагностики мелкомасштабной неоднородной плазмы при помощи пространственной обработки поля ДВФП в условиях возникновения сильных вариаций фазы рассеянной волны.

3) Рассмотреть возможность устранения влияния многолучевых эффектов на диагностику неоднородной плазмы при помощи пространственной обработки поля ДВФП для неоднородностей с размерами больше и меньше радиуса Френеля.

4) На базе модификации метода ДВФП для удаленной неоднородности исследовать возможность повышения разрешающей способности диагностики ионосферы путем однократной пространственной обработки поля в условиях слабых и сильных флуктуаций фазы.

Научная новизна. Рассмотрены возможности повышения разрешающей способности волновой диагностики неоднородной плазмы. Для этого впервые в качестве модели поля рассеянной волны предложено использовать приближение ДВФП, а также полученную на его основе пространственную обработку поля, позволяющую выйти за рамки френелевского разрешения при диагностике неоднородной плазмы. Впервые предложено использовать в качестве метода диагностики околосредней плазмы модификацию ДВФП, с помощью которой повышение разрешения можно осуществлять путем пространственной обработки только по одной из плоскостей. В отличие от классических методов, применяемых для диагностики мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей, обработка поля ДВФП позволяет устранить влияние дифракционных и многолучевых эффектов не только при

слабых, но и при сильных вариациях фазы без информации о локализации неоднородности, что существенно расширяет границы применимости такой диагностики.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Пространственная обработка поля на базе ДВФП позволяет превзойти разрешающую способность средств диагностики плазменных неоднородностей над френелевским разрешением в присутствии сильных вариаций фазы и амплитуды волны.

2) Пространственная обработка ДВФП устраняет влияние многолучевости на диагностику неоднородной плазмы при фокусировке радиосигнала на локальной неоднородности и при рефракции на нескольких неоднородностях.

3) Однократная пространственная обработка поля, полученная на основе модификации метода ДВФП для удаленной неоднородности, расширяет границы применимости френелевской инверсии, а также повышает разрешающую способность волновой диагностики разномасштабных неоднородностей в околоземной плазме в присутствии как слабых, так и сильных вариаций фазы волны.

Достоверность полученных результатов. Результаты, полученные в ходе исследования, подтверждены численным моделированием и согласуются с результатами, полученными известными методами в условиях их применимости.

Научная и практическая значимость. Полученные данные и предложенные алгоритмы дают возможность существенно расширить границы применимости методов диагностики неоднородной плазмы при помощи пространственной обработки поля методом ДВФП, позволяющей выйти за рамки френелевского разрешения в условиях многолучевого распространения радиосигнала, а также сильных вариаций фазы и уровня. В перспективе данный подход может быть использован в качестве основы для разработки методов диагностики околоземной и лабораторной плазмы нового поколения.

Личный вклад автора. Постановка задач, решаемых в диссертационной работе, формулировалась автором вместе с научным руководителем. Автор лично выполнял все численные расчеты и анализировал полученные результаты. Выводы работы делаются автором на основании полученных данных.

Апробация результатов:

Основные результаты диссертационной работы были представлены и докладывались на научно-практической конференции студентов физического факультета ИГУ (г. Иркутск, 2010 г.); IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные проблемы радиоэлектроники и связи» (г. Иркутск, 2010 г.); Международном симпозиуме по электромагнитной теории «Международного радио союза » (URSI) (г. Берлин, 2010 г.); XXIII Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн (г. Йошкар–Ола, 2011); XXX Генеральной ассамблее и научном симпозиуме международного радио союза (г. Стамбул, 2011 г.); Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (г. Иркутск, 2011 г. и 2013 г.); XVIII Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (г. Иркутск, 2012 г.); X Международной школе молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, 2012 г.), где работа была отмечена дипломом II степени; Международном симпозиуме по развитию электромагнитных исследований (PIERS) (г. Москва, 2012г.); XIX Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (г. Барнаул, 2013 г.); Международном симпозиуме по электромагнитной теории «Международного радио союза » (URSI) (г. Хиросима, 2013 г.); на научных семинарах физического факультета Иркутского государственного университета и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Исследования проводились при поддержке министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.740.11.0078, соглашение № 8388 ФЦП

«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-02-00249 и № 12-05-31169), совета по грантам президента Российской Федерации (грант № СП-5862.2013.3), фонда некоммерческих программ «Династия» (2011, 2012 г.г.) и фонда поддержки исследований молодых ученых Иркутского государственного университета.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 3 в журналах из перечня, утвержденного ВАК: «Радиотехника и электроника», «Известия вузов. Радиофизика» и «Известия Иркутского государственного университета», а также тезисы докладов и статьи в сборниках трудов научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, включающего 73 источника. Общий объем составляет 96 страниц и 30 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается современное состояние проблемы, поясняется актуальность исследуемой темы, сформулированы цели исследования и решаемые задачи, а также излагается краткое содержание работы.

В первой главе диссертации дается анализ различных моделей радиосигнала, распространяющегося в неоднородной среде. Эти модели получаются путем решения волнового уравнения с помощью различных асимптотических методов. Обсуждаются возможности методов описания поведения радиоволн в неоднородной среде для усовершенствования диагностики неоднородной плазмы.

Так как строгое решение волнового уравнения практически невозможно, при описании волн в неоднородных средах приходится использовать асимптотические методы. Характерным для околосредной и лабораторной плазмы является присутствие неоднородностей с различными масштабами. Поэтому при диагностике неоднородной плазмы в качестве модели

зондирующего сигнала используют различные асимптотические методы описания взаимодействия сигнала со средой распространения. В первом пункте главы приводятся основные выражения для поля волны, рассеянной в неоднородной среде, с размерами больше радиуса Френеля в приближении геометрической оптики [1]. В условиях слабого рассеяния волны в неоднородной среде рассмотрены выражения для поля волны в приближении Борна, а также метода плавных возмущений [2]. Для случая, когда неоднородная среда может быть представлена в виде тонкого слоя, на выходе из которого волна претерпевает только фазовую модуляцию, а изменение амплитуды при этом остается незначительным, выполнен анализ решения волнового уравнения на основе метода фазового экрана [3]. Также в качестве модели поля волны, распространяющейся в неоднородной среде, рассматривается суперпозиция парциальных плоских волн относительно координат источника (метод интерференционного интеграла) и относительно координат приемной системы (метод Маслова) [4-5]. Данные приближения позволяют находить волновые поля вблизи каустик. Однако при их использовании для задач рассеяния волн в неоднородных средах обычно не учитывают фокусировку парциальных волн.

Для описания поля в неоднородной среде в условиях сильных вариаций фазы и уровня предложено использовать интегральное представление в виде двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП) [6-7]

$$U(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, z_t, z_0) = \frac{-A_0 k^2}{4\pi^3 Z^3} \exp(ik(Z + \frac{(\mathbf{r} + \mathbf{r}_0)^2}{2Z})) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\xi d^2\xi_0 \exp(ik(2(\xi\xi_0 - \xi\mathbf{r}_0 - \xi_0\mathbf{r})/Z + \Phi(\xi, \xi_0, z_t, z_0))), \quad (1)$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, z_t, z_0) = 1/2 \int_{z_0}^{z_t} \tilde{\epsilon}[(\mathbf{r}(z' - z_0) + \mathbf{r}_0(z_t - z'))/Z, z'] dz', \quad (2)$$

где $\mathbf{r}_0 = (z_0, x_0, y_0) = (z_0, \mathbf{r}_0)$ и $\mathbf{r} = (z_t, x, y) = (z_t, \mathbf{r})$ координаты источника и приемника, $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0)$ и $\mathbf{r} = (x, y)$ - двумерные векторы в плоскостях излучения $z = z_0$ и приема $z = z_t$, $Z = z_t - z_0$ расстояние между плоскостями

излучения и приема, A_0 - амплитуда волны, k - волновое число, $\tilde{\epsilon}$ - отклонение возмущенного значения диэлектрической проницаемости среды от невозмущенного [7]. Выражение (1), было получено путем решения параболического уравнения не непосредственно для поля, как функции одной точки излучения и одной точки приема, а для вспомогательной функции двух точек излучения и двух точек приема [6-7]. Также для его вывода использовалось дебаевское разложение, позволившее с помощью уравнений эйконала и переноса определить фазу $\Phi(\mathbf{r})$ и амплитуду $A(\mathbf{r})$ рассеянной волны [6-7]. В отличие от мало-угловых приближений Маслова и интерференционного интеграла, поле в виде ДВФП не содержит, по крайней мере, в первом приближении амплитудных вариаций у парциальных волн.

Вторая глава диссертационной работы посвящена проблеме повышения разрешающей способности волновой диагностики неоднородной плазмы при помощи пространственной обработки поля на основе ДВФП. Рассмотрена возможность выхода за рамки френелевского разрешения при помощи данной обработки в условиях слабых и сильных вариаций фазы.

Часто при решении обратных задач распространения электромагнитных волн в неоднородных средах приходится использовать томографические подходы [8]. Методы томографии позволяют по набору проекционных данных, полученных посредством многократного просвечивания неоднородной среды в различных пересекающихся направлениях, восстанавливать ее физические характеристики. Особый интерес представляет томография неоднородной плазмы с использованием методов радиозондирования. Например, такой вид томографии встречается в задачах спутниковой диагностики ионосферы [9] и при исследованиях лабораторной плазмы [8]. Данный вид томографии характеризуется малым количеством возможных ракурсов наблюдения и угловыми ограничениями при получении проекционных данных. Решать эти проблемы позволяют методы мало-ракурсной томографии. Однако, сложности, возникающие при диагностике плазмы, могут быть связаны не только со спецификой измерительной системы, но и с появлением дифракционных и

многолучевых эффектов при распространении радиоволн в неоднородной среде. Эти явления способны исказить получаемые проекционные данные, ограничивая возможности диагностических методов. Например, лучевая томография не позволяет исследовать неоднородные среды с масштабами, не превышающими радиуса Френеля, т.к. она основана на геометрическом приближении, не учитывающем дифракционные эффекты [9]. Пространственная обработка поля в виде однократного преобразования Френеля, полученная на основе метода плавных возмущений, учитывает влияние дифракционных эффектов на томографические измерения. Главным недостатком данного метода диагностики, является необходимое условие малых вариаций фазы и уровня [9]. Однократное обратное преобразование Френеля позволяет производить дифракционную томографию при сильных вариациях фазы в рамках приближения фазового экрана. Но для такого вида томографии остается существенным ограничение, связанное с предположением о локализации неоднородности в известном интервале дальностей. Все эти факторы существенно затрудняют использование всех возможностей дифракционной томографии. В связи с недостатками данных методов в качестве основы для дифракционной томографии предложено использовать пространственную обработку поля на основе метода ДВФП, выполненную одновременно относительно координат источника и приемника [7]

$$\hat{L}[U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\rho d^2\rho_0 U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0) \times \exp \left\{ -ik \left[Z + \frac{(\mathbf{p} + \mathbf{p}_0)^2}{2(z_t - z_0)} \right] + \frac{2ik}{z_t - z_0} [\mathbf{p} * \mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_0 * \mathbf{p}] \right\}, \quad (3)$$

где $U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)$ - измеряемое поле. Данная обработка поля расширяет границы применимости дифракционной томографии на случай диагностики неоднородных сред, вызывающих сильные вариации фазы, без необходимости в какой-либо априорной информации о локализации неоднородности.

В заключительных пунктах второй главы с помощью численного моделирования исследованы возможности пространственной обработки поля

ДВФП в условиях распространения волны в неоднородной плазме. Приводятся результаты численных расчетов фазы волны, рассеянной на нескольких неоднородностях, в условиях слабых и сильных вариации фазы, с применением обработки ДВФП и без нее. Выполнен учет ограниченности областей пространственной обработки ДВФП в передающей и приемной плоскостях. Для этого в подынтегральном выражении (3) использовались весовые гауссовские множители, учитывающие ограниченность апертур D_0 и D передающих и приемных антенн. В качестве модели диэлектрической проницаемости неоднородной среды была выбрана функция Гаусса

$$\tilde{\varepsilon}(\mathbf{\rho}, z) = \varepsilon_m \exp\left\{-\left[(\mathbf{\rho} - \mathbf{\rho}_m)^2 + (z - z_m)^2\right]/(2l^2)\right\}. \quad (4)$$

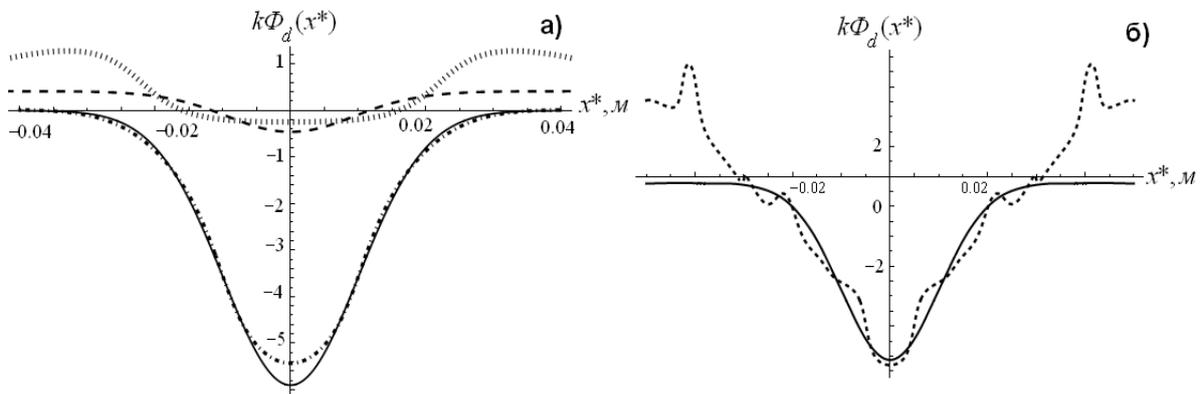


Рис. 1. Изменение фазы $k\tilde{\Phi}_d(x^*) = k\tilde{\Phi}_d(x^*, x^*, 0, 0)$ волны, рассеянной на гауссовой неоднородности а) без обработки ДВФП (пунктирная линия) и после обработки ДВФП при $D = D_0 = 3\text{см}$ (штриховая линия), $D = D_0 = 15\text{см}$ (штрихпунктирная линия), $D = D_0 \sim Z$ (сплошная линия) б) при дискретных измерениях для $Nx = Nx_0 = 15$ и $\Delta x = \Delta x_0 = 4,6\text{см}$ (штриховая линия) и $Nx = Nx_0 = 100$ и $\Delta x = \Delta x_0 = 0,7\text{см}$ (сплошная линия).

На рис. 1 приведены результаты расчетов изменения фазы $k\tilde{\Phi}_d(x^*)$ рассеянной волны в сечении $y^* = y_0^* = 0$ при $x^* = x_0^*$ и следующих параметрах $x_m = z_m = 0$, $\varepsilon_m = -0,15$, $l = 1\text{см}$, $z_l = -3\text{м}$, $z_0 = 3\text{м}$, $\lambda = 2\text{мм}$, $z_m = 0\text{м}$. В этом случае радиус Френеля $a_f = 5,4\text{см}$ превышает размеры неоднородности. На рис. 1а пунктирной линией изображена фаза без обработки. Обработке при $D = D_0 = 3\text{см}$ соответствует штриховая линия, при $D = D_0 = 15\text{см}$ - штрихпунктирная линия, а сплошной линией изображен идеальный случай,

когда $D = D_0 \sim Z$. На рис. 1б приведен расчет фазы при дискретном распределении элементов в приемно-передающей системе для разного количества элементов $Nx = Nx_0$ и разных расстояний между элементами $\Delta x = \Delta x_0$: пунктирная линия соответствует, $Nx = Nx_0 = 15$ и $\Delta x = \Delta x_0 = 4,6 \text{ см}$, сплошная линия изображает случай $Nx = Nx_0 = 100$ и $\Delta x = \Delta x_0 = 0,7 \text{ см}$.

В третьей главе диссертации при помощи пространственной обработки поля ДВФП предлагается устранять влияние многолучевых эффектов на диагностику неоднородной плазмы.

При распространении электромагнитных волн в неоднородных средах в областях, где имеют место сильные вариации амплитуды волны, возникает эффект многолучевости [10]. В этом случае сигнал распространяется по различным траекториям, соединяющим точки излучения и приема. Многолучевость бывает различных типов, в данной главе рассмотрено появление многолучевых эффектов при распространении волны через линзоподобную плазменную неоднородность, в которой показатель преломления превышает показатель преломления окружающей среды. Также исследован случай возникновения многолучевости при рефракции волны на нескольких локальных неоднородностях с пониженным показателем преломления.

Поиск волновых полей в области появления многолучевости в рамках той или иной математической модели сигнала, представляет достаточно сложную задачу. Например, в данных условиях амплитуда волны в приближении ГО резко возрастает на каустиках [1]. Это указывает на то, что необходимо использовать обобщения ГО приближения, учитывающие дифракционные эффекты каустического типа. В качестве таких приближений можно использовать метод Маслова, метод интерференционного интеграла и т.д. [5]. Однако эти приближения требуют априорное знание лучевой структуры, что в задачах диагностики редко представляется возможным. Кроме того, многолучевость и сопровождающие ее интерференция и сильные вариации амплитуды, даже в областях применимости ГО приближения, где поле

принимает вид суммы парциальных ГО волн, сильно затрудняют измерения фазы и их интерпретацию. Метод плавных возмущений и приближение Борна не позволяют описывать поля в условиях сильных вариаций амплитуды, что соответственно делает неприменимым данные методы для описания полей в условиях многолучевости [2]. Приближение фазового экрана, описывает поля в области многолучевости и каустик, однако слабой стороной этой модели является необходимость задавать параметры экрана [3].

Многолучевость сигнала существенно затрудняет поиск решения обратной задачи распространения электромагнитных волн в неоднородных средах: искажает проекционные данные при томографических измерениях, не позволяет корректно оценивать углы прихода и местоположение источников излучения при радиозатменных исследованиях и т.д.

Так как при небольшой протяженности случайно неоднородного слоя интегральное представление ДВФП переходит в результаты метода фазового экрана в мало-угловом приближении [7], то с его помощью можно описать поле в области многолучевости, включая окрестности каустик. Обратное ДВФП (3) позволяет устранять влияние не только дифракционных эффектов френелевского типа, но и многолучевость и дифракционные эффекты каустического типа.

В представленной главе с помощью численного моделирования исследована возможность устранения влияния многолучевости на диагностику неоднородных сред с использованием обратного ДВФП.

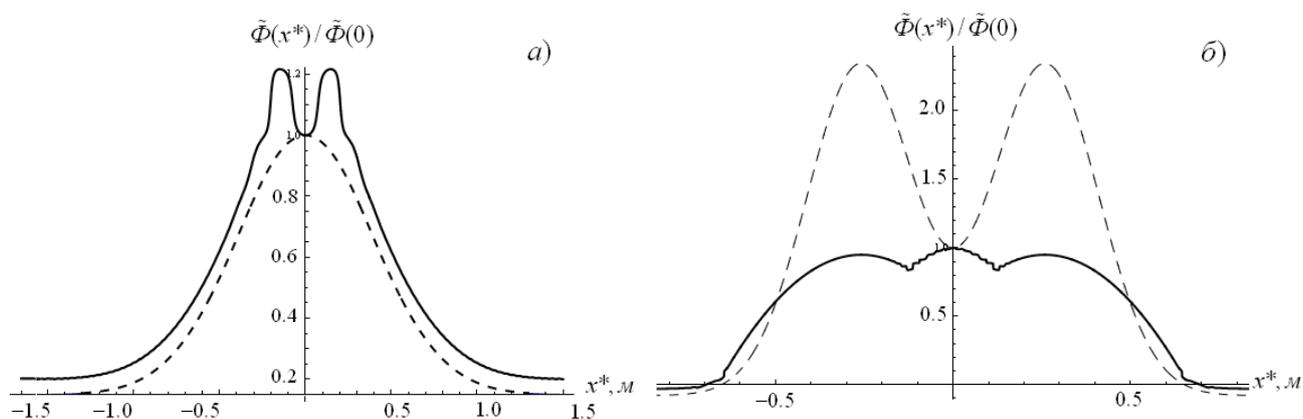


Рис. 2. Нормированная фаза $\tilde{\Phi}(x^*)/\tilde{\Phi}(0) = \tilde{\Phi}(x^*, x^*, 0, 0)/\tilde{\Phi}(0, 0)$ в сечении $y^* = y_0^* = 0$ (без обработки - сплошная линия и после обработки ДВФП - штриховая линия) для случаев: а) одной фокусирующей гауссовой неоднородности с размерами больше радиуса Френеля $a_F = 31\text{см}$ при следующих параметрах: $y = 0$, $x_m = z_m = 0$, $\varepsilon_m = 0,14$, $l = 40\text{см}$, $z_t = -8\text{м}$, $z_0 = 8\text{м}$ и б) рефракции на двух локальных гауссовых неоднородностях с размерами больше радиуса Френеля $a_F = 7,2\text{см}$ при следующих параметрах: $z_{m1,2} = y = 0$, $\varepsilon_{m1} = \varepsilon_{m2} = -0,17$, $x_{m1} = -26\text{см}$, $x_{m2} = 26\text{см}$, $l_1 = l_2 = 15\text{см}$, $z_t = -5\text{м}$, $z_0 = 5\text{м}$.

На рис. 2а приведены результаты расчетов фазы $\tilde{\Phi}(x^*)/\tilde{\Phi}(0) = \tilde{\Phi}(x^*, x^*, 0, 0)/\tilde{\Phi}(0, 0)$ в сечении $y^* = y_0^* = 0$, как функции $x^* = x_0^*$ для случая фокусировки волны на линзе при следующих параметрах моделирования $\lambda = 2,5\text{см}$, $x_m = z_m = 0$, $\varepsilon_m = 0,14$, $l = 40\text{см}$, $z_t = -8\text{м}$, $z_0 = 8\text{м}$, $a_F = 31\text{см}$ - не превышает размеры неоднородности. Из рис. 2а видно, что до пространственной обработки (сплошная кривая) неоднородность дает более широкий отклик с двумя максимумами, что затрудняет определение параметров исследуемой неоднородности. Применение обработки ДВФП (штриховая линия) позволило устранить влияние многолучевости и определить истинный профиль неоднородности. На рис. 2б изображена фаза для случая рефракции на двух локальных неоднородностях при $\lambda = 2\text{мм}$, $\varepsilon_{m1} = \varepsilon_{m2} = -0,17$, $x_{m1} = -26\text{см}$, $x_{m2} = 26\text{см}$, $l_1 = l_2 = 15\text{см}$, $z_t = -5\text{м}$, $z_0 = 5\text{м}$. В этом случае радиус Френеля $a_F = 7,2\text{см}$ также не превышает размеры неоднородности. Проекция фазы без обработки (сплошная линия), не позволяет выявить две гауссовые неоднородности из-за возникновения эффекта многолучевости. Использование пространственной обработки ДВФП (штриховая линия) позволило устранить влияние многолучевости.

В четвертой главе для повышения разрешающей способности диагностики околосредней плазмы предлагается использовать однократную пространственную обработку поля, полученную на основе интегрального представления поля в виде двойного взвешенного Фурье преобразования для удаленной неоднородной среды [11].

Схема измерений, определяемая пространственной обработкой поля ДВФП, предполагает наличие двух плоскостей обработки (рис. 3 а)

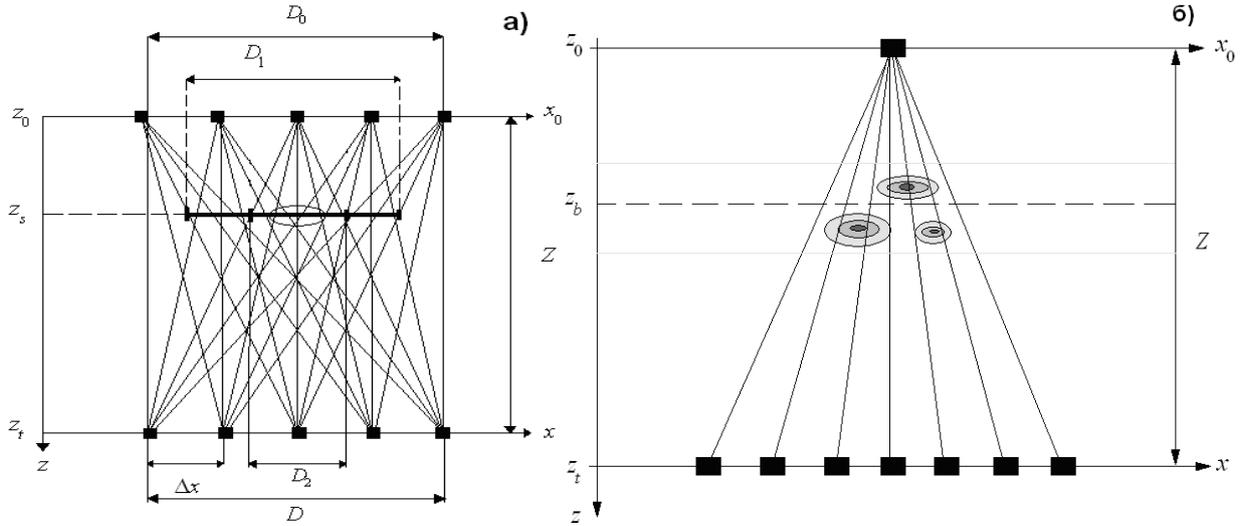


Рис. 3 а) двукратная обработка поля б) однократная обработка поля.

Линейка источников на плоскости $z = z_0$ излучает сигналы, приемная система на плоскости $z = z_t$ измеряет рассеянное поле для каждого источника. Между приемной и передающей системами располагаются неоднородности, физические характеристики которых необходимо найти. Такой вид измерений удобно осуществлять при диагностике плазмы в лабораторных условиях. Также гипотетически обработку ДВФП возможно использовать для спутниковой томографии ионосферы, где передающая решетка синтезируется движущимся искусственным спутником Земли. Однако, часто диагностика ионосферы предполагает несколько иную схему измерений (рис. 3 б), в которой радиосигнал меряют только по одной из плоскостей, например, плоскости приема $z = z_t$, как в радиозатменных исследованиях [12].

В таких условиях с помощью модификации метода ДВФП для удаленной неоднородности [11]

$$U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0) = \frac{-A_0 k^2}{4\pi^3 Z} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \rho_b \exp \left[ik \left(Z + \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_b)^2}{2(z_t - z_b)} + \frac{(\mathbf{p}_b - \mathbf{p}_0)^2}{2(z_b - z_0)} \right) \right] V_s(\mathbf{p}_b), \quad (5)$$

где

$$V_s(\mathbf{p}_b) = \int_{-\infty}^{\infty} d^2 p_s \exp\left[-ik2(\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_{sc})^2(z_t - z_b)(z_b - z_0)/Z + ik\varphi_b(\mathbf{p}_b, \mathbf{p}_s)\right], \quad (6)$$

$$\varphi_b(\mathbf{p}_b, \mathbf{p}_s) = 1/2 \int_{z_0}^{z_t} \tilde{\varepsilon}[\mathbf{p}_b + \mathbf{p}_s(z_b - z'), z'] dz', \quad (7)$$

$$\mathbf{p}_{sc} = [(\mathbf{p}_b - \mathbf{p})/(z_t - z_b) - (\mathbf{p}_b - \mathbf{p}_0)/(z_b - z_0)]/2, \quad (8)$$

$z = z_b$ – некоторая виртуальная плоскость в окрестности плоскости $z = z_m$, где расположена неоднородность, A_0 – начальное значение амплитуды волны, предложено использовать пространственную обработку поля только по одной плоскости [11]

$$\tilde{U}(\mathbf{p}^*, \mathbf{p}_0) = \hat{L}_b[U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0)] = C_0 \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \rho U(\mathbf{p}, \mathbf{p}_0) \exp\left\{-ik \frac{(\mathbf{p}^* - \mathbf{p})^2}{2(z_t - z_b)} - ikZ\right\}. \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет получать сверхфренелевское разрешение для случая, когда масштаб неоднородности не превосходит радиуса Френеля. В отличие от обработки ДВФП, обработка (9) выполняется только по плоскости приема.

В последнем пункте главы приводится алгоритм выбора координат виртуального экрана $z = z_b$ при котором разрешение максимально [11].

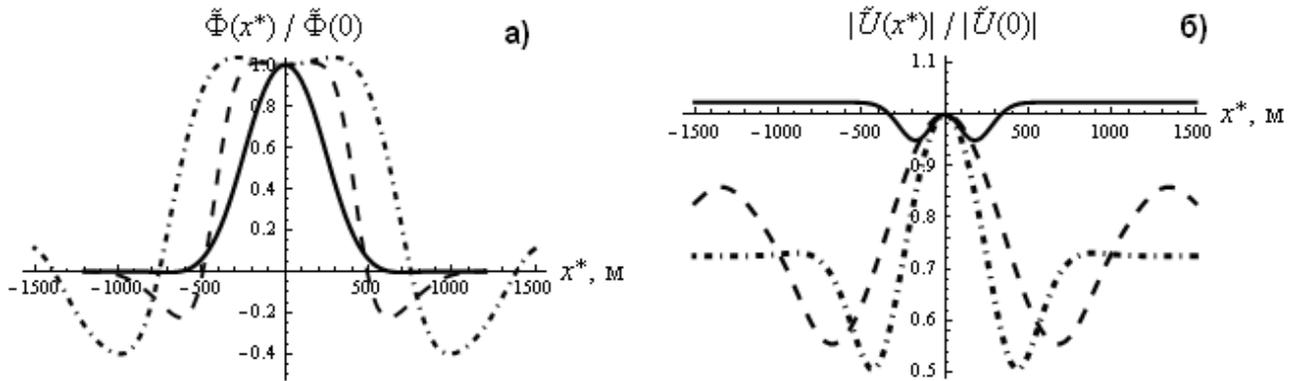


Рис. 4. Зависимости приращения нормированной фазы $\tilde{\Phi}(x^*)/\tilde{\Phi}(0)$ (а) и амплитуды $|\tilde{U}(x^*)|/|\tilde{U}(0)|$ (б) после пространственной обработки (9) при расположении гауссовой неоднородности в начале координат ($z_m = x_m = y_m = 0$), для $z_b = 0$ м, когда нет дифракционного уширения (сплошная линия), $z_b = 200$ км (штриховая линия), $z_b = 500$ км (штрих-пунктирная линия)

На рис. 4 показаны нормированная фаза и амплитуда волны для различных значений z_b при $x^* = x_0^*$, в сечении $y^* = y_0^* = 0$, для следующих параметров: $x_m = z_m = 0$, $\varepsilon_m = -0,002$, $l = 150\text{м}$, $z_t = -1000\text{км}$, $z_0 = 1000\text{км}$, $\lambda = 2\text{м}$, $z_m = 0\text{м}$. В этом случае радиус Френеля $a_F \approx 1\text{км}$ превышает размеры неоднородности. Штрих-пунктирной линией изображен случай, когда $z_b = 200\text{км}$, штриховая линия соответствует случаю при котором $z_b = 500\text{км}$, сплошная линия при $z_b = 0$. Из рис. 4 видно, что при перемещении виртуального экрана z_b амплитудные вариации обработанного сигнала изменяются в следующей зависимости: чем ближе виртуальный экран z_b к месту локализации неоднородности z_m , тем меньше вариации амплитуды сигнала и ширина фазовой проекции.

Как видно из рис. 4 в результате обработки (9) при расположении виртуального экрана внутри неоднородности, волна имеет минимальные амплитудные вариации, а вся информация о неоднородности заключена в фазе волны и мы получаем высокое разрешение в условиях дифракции, многолучевости и сильных вариаций фазы. В отличие от обычной Френелевской инверсии, приближение ДВФП для удаленной неоднородности позволяет исследовать однократную пространственную обработку поля (9) для случая, когда экран помещен в неоднородную область, а не за ней.

В **заклучении** диссертационной работы изложены основные результаты, полученные в ходе исследований:

1. Проведенный анализ асимптотических методов решения уравнения Гельмгольца при распространении волн в неоднородной среде, показал, что метод двойного взвешенного Фурье преобразования имеет более широкую область применения, чем мало-угловые приближения ГО, Борна, Рытова, фазовые приближения методов Маслова и интерференционного интеграла, а также фазового экрана. Было установлено, что при определенных условиях метод ДВФП переходит в результаты мало-угловых приближений ГО, Борна и фазового экрана.

2. Для диагностики неоднородной плазмы с размерами, не превышающими радиуса Френеля, можно использовать пространственную обработку поля, получаемую с помощью обратного ДВФП. В отличие от однократного преобразования Френеля, такая обработка не требует информации о местонахождении исследуемой неоднородности, с ее помощью можно осуществлять дифракционную томографию без условия о слабых вариациях фазы. Тем самым можно добиться сверхфренелевского разрешения для неоднородностей, вызывающих сильные вариации фазы, когда появляются многолучевость и сильные вариации амплитуды. Возможности такой диагностики, определяются количеством элементов приемо-передающей системы и размерами областей обработки в передающей и приемной плоскостях.

3. При помощи результатов численного моделирования удалось показать, что влияние многолучевых эффектов, вызванных фокусировкой волны на локальной неоднородности, а также рефракцией волны на нескольких локальных неоднородностях, на результаты измерений рассеянного поля, устраняются дополнительной пространственной обработкой поля ДВФП. Также полученные результаты свидетельствуют о том, что применение обработки поля ДВФП даже при сильных вариациях фазы позволяет превысить френелевский порог разрешения в условиях многолучевости, что может значительно упростить определение физических характеристик неоднородных сред в данных условиях.

4. Для получения сверх-френелевского разрешения при диагностике околосредней плазмы в условиях слабых и сильных вариациях фазы можно использовать пространственную обработку поля, основанную на френелевской инверсии. Результаты численного моделирования с использованием приближения ДВФП для удаленной неоднородности показали, что для получения наилучшего разрешения при помощи данного метода виртуальный экран необходимо располагать в области локализации неоднородности. При

таком расположении виртуального экрана амплитудные вариации малы и вся информация о неоднородности содержится в фазе.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцов Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. - М.: Наука, 1980. – 304 с.
2. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. - М.: Наука, 1978. – 464 с.
3. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. - М.: Наука, 1967. – 548 с.
4. Кравцов Ю. А. О двух новых асимптотических методах в теории распространения волн в неоднородных средах / Ю. А. Кравцов // Акустический журнал. – 1968. – Т. XIV. - №1. – С. 1-24.
5. Kravtsov Yu. A. Caustics, catastrophes and wave fields / Yu. A. Kravtsov, Yu. I. Orlov. - New York: Springer Verlag, 1999. – 217 p.
6. Kravtsov Y.A. Representation of wave field in a randomly inhomogeneous medium in the form of the double – weighted Fourier transform / Y.A. Kravtsov, M.V. Tinin // Radio Science.-2000.-V.35, № 6. – P. 1315-1322.
7. Tinin M. V. Super – Fresnel resolution of plasma in homogeneities by electromagnetic sounding / M. V. Tinin, Y. A. Kravtsov // Plasma Phys. Control. Fusion. -2008. - Vol. 50. - P. 1-12.
8. Пикалов В.В. Томография плазмы / В.В. Пикалов, Т.С. Мельникова // - Новосибирск: Наука. - 1995. – 229с.
9. Куницын В. Е. Томография ионосферы / В. Е. Куницын, Е. Д. Терещенко. – М: Наука, 1991. – 176 с.
10. Кравцов Ю. А. Сильные вариации амплитуды световой волны и вероятность образования каустик / Ю. А. Кравцов // ЖЭТФ. - 1968. - Т. 55. - № 9. - С. 798-801.

11. Тинин М. В. Интегральное представление для поля волны, распространяющейся в крупномасштабной неоднородной среде / М. В. Тинин // Известия вузов. Радиофизика. - 2012. – Т. 55. - № 6. - С. 431-439.
12. Павельев А. Г. Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы / А. Г. Павельев, С. С. Матюгов, О. И. Яковлев // Радиотехника и электроника.- 2008. - Т. 53. - №9. - С. 1081-1093.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кравцов Ю. А. Дифракционная томография неоднородной среды при сильных вариациях фазы / Ю. А. Кравцов, М. В. Тинин, С. И. Книжин // Радиотехника и Электроника. - 2011. - Т 26. - №7. - С. 1-7.
2. Тинин М. В. Устранение влияния многолучевого распространения сигнала в плавно неоднородной среде / М. В. Тинин. С. И. Книжин // Известия вузов. Радиофизика . - 2013. – Т.56. - №7. – С. 458-467.
3. Тинин М. В. Применение квазиоптимальной обработки поля для диагностики околоземной плазмы / М. В. Тинин, С. И. Книжин // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2013. - Т. 6. - №2. - С. 175-186.
4. Kravtsov Y. A. Diffraction tomography of inhomogeneous media with higher resolvability: the case of strong phase variations / Y. A. Kravtsov, M. V. Tinin, S. I. Knizhin // 20th URSI International Symposium on Electromagnetic Theory. - Berlin, Germany. – 2010. – P. 601-604.
5. Kravtsov Y. A. Double weighted Fourier transform for the wave field in inhomogeneous medium: some results and prospects / Y. A. Kravtsov, M. V. Tinin, A. V. Kulizhsky, S. I. Knizhin // 30 General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science. - Istanbul, Turkey. – 2011. – P. 1-4.
6. Knizhin S. I. Using spatial field processing based on the double weighted Fourier transform for eliminating the multipath effect / S. I. Knizhin, M. V. Tinin, Yu. A. Kravtsov // URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory. - Hiroshima, Japan. -2013. – P. 923-925.

7. Tinin M. V. Some Problems of Diagnostics of Inhomogeneous Media / M. V. Tinin, S. I. Knizhin // URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory. - Hiroshima, Japan. -2013. – P. 280-283.
8. Кравцов Ю. А. Моделирование сверх-френелевского разрешения для задач диагностики неоднородных сред: случай сильных вариаций фазы / Ю. А. Кравцов, М. В. Тинин, С. И. Книжин // Современные проблемы радиоэлектроники и связи : материалы IX Всерос науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Иркутск. - 2010. – С. 129-135.
9. Кравцов Ю. А. О повышении разрешающей способности лучевой томографии / Ю. А. Кравцов, М. В. Тинин, С. И. Книжин // Вестн. Иркут. ун-та: материалы ежегод. науч.-теорет. конф. аспирантов и студентов. – Иркутск. - 2010. – С. 377-379.
10. Книжин С. И. Моделирование пространственной обработки фазовых измерений при диагностике неоднородных сред со сверхфренелевским разрешением / С. И. Книжин, М. В. Тинин, Ю.А. Кравцов // материалы XXIII Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн. - Йошкар-Ола. - 2011. – С. 349-352.
11. Книжин С. И. Получение изображений мелкомасштабных неоднородностей с помощью двойного – взвешенного Фурье преобразования / С. И. Книжин, М.В. Тинин, Ю. А. Кравцов // Сборник трудов международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. – Иркутск. - 2011. - С. 292-293.
12. Тинин М. В. Квазиоптимальная обработка для повышения разрешения диагностики удаленных неоднородностей / М. В. Тинин, С. И. Книжин // Сборник трудов международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. – Иркутск. - 2013. - С. 233-235.
13. Книжин С. И. Устранение эффекта многолучевости с помощью двойного взвешенного Фурье преобразования / С. И. Книжин, М. В. Тинин // Материалы XIX Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". Секция В. – Барнаул. - 2013. – С. 108-111.