

На правах рукописи

Суханов Дмитрий Яковлевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ СИНТЕЗИРОВАНИЕ
В ПОДПОВЕРХНОСТНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

Автореферат

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

Томск 2007

Работа выполнена в Томском государственном университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Якубов Владимир Петрович

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, Банах Виктор Арсентьевич
Доктор технических наук, Кашкин Валентин Борисович

Ведущая организация:

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники (ТУСУР)

Защита состоится “15” марта 2007 г. в 14 час. 30 мин. на заседании специализированного совета Д 212.267.04 по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора наук при Томском государственном университете: 634034, Томск, пр. Ленина, 36, ТГУ, ауд. 113.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 36, ТГУ

Автореферат разослан “09” февраля 2007 г.

Учёный секретарь
специализированного совета

Пойзнер Б.Н.

Актуальность

Системы сверхширокополосного (СШП) радиозондирования применяются в различных областях дистанционного исследования сред и объектов в связи с высокой информативностью СШП сигналов. Одной из интенсивно развивающихся областей применения СШП сигналов является подповерхностная радиолокация, которая используется в археологии, в системах обнаружения полезных ископаемых, для исследования и прокладки подземных коммуникаций, для поиска противотанковых и противопехотных мин, включая диэлектрические.

Применение радиоволн для обнаружения объектов под поверхностью земли в настоящее время приобрело широкое распространение в связи со значительным прогрессом в развитии радиоэлектронных средств генерирования и приёма СШП излучения. Благодаря сверхширокополосному импульсному излучению становится возможным определять трёхмерное расположение рассеивающих неоднородностей в среде. Кроме того, существует возможность определения электрофизических свойств фоновой среды и в ряде случаев свойств рассеивающих объектов.

Для зондирования среды возможно использование как направленных, так и ненаправленных антенн. В случае импульсного зондирования с применением узконаправленных антенн распределение рассеивающих неоднородностей будет восстановлено без специальной обработки сразу как результат измерения рассеянного поля. Однако метод с использованием направленных антенн требует использования антенн с большой апертурой и в реальных условиях не способен обеспечить высокое разрешение.

В случае использования ненаправленных антенн для восстановления распределения неоднородностей необходимо проводить специальную обработку данных измерений. Без специальной обработки откликом системы на точечный рассеиватель в среде будет дифракционная гипербола. Существует множество различных методов, основанных на интерпретации формы дифракционных гипербол для определения положения рассеивателей в среде. Также широко применяются методы, основанные на пространственно согласованной фильтрации с численной фокусировкой результатов измерения рас-

сеянного поля последовательно во все точки среды. При этом использование ненаправленных антенн позволяет синтезировать большую апертуру и получить высокое пространственное разрешение.

Большинство из существующих методов используют контактное зондирование среды, что позволяет не учитывать преломление и отражение от поверхности среды и упрощает процедуры обработки данных радиолокационного зондирования.

В некоторых применениях, таких как поиск мин, необходимо бесконтактное зондирование среды. В этом случае требуется учитывать эффекты преломления на границе раздела сред. Использование анализа формы дифракционных гипербол и метода пространственно согласованной фильтрации также возможно, однако задача усложняется требованием априорной информации о коэффициенте преломления среды и необходимостью численного расчета траектории распространения волн через границу раздела сред, что требуют значительных вычислительных ресурсов.

Существует необходимость создания новых эффективных методов обработки данных бесконтактного зондирования ненаправленными антеннами, которые бы работали в реальном масштабе времени и при этом обеспечивали определение коэффициента преломления фоновой среды без использования априорных данных и дополнительных измерений.

Цель работы

Целью работы является разработка математической модели радиозондирования полупространства, учитывающей основные физические механизмы распространения радиоволн через границу раздела сред, а также создание на её основе метода восстановления распределения неоднородностей и определения фонового коэффициента преломления среды по данным бесконтактного локаторного зондирования в реальном масштабе времени.

Основные задачи

1. Решение задачи расчета поля, рассеянного полупространством с некоторым фоновым коэффициентом преломления и рассеивающими неоднородностями при зондировании среды с помощью ненаправленного излучателя сферических волн, работающего в сверхширокой полосе частот.

2. Разработка метода восстановления распределения неоднородностей на основе данных о рассеянном поле и исследование точности метода и его разрешающей способности.
3. Разработка метода бесконтактного определения коэффициента преломления среды.
4. Экспериментальная проверка предложенных методик.

Методы исследования

В работе для решения прямой задачи использовались модель однократного рассеяния в скалярном приближении и разложение сферических волн в спектр по плоским волнам. В решении обратной задачи принято приближение сильного преломления. Для анализа точности решения обратной задачи проводились аналитические и численные расчёты аппаратной функции предложенной системы. Проведены эксперименты по обнаружению тестовых диэлектрических и металлических объектов в песке на глубинах до 20 см, а также эксперименты по определению среднего коэффициента преломления песка.

Защищаемые положения

1. Процедура пространственной фокусировки в приповерхностную точку среды рассеянного полупространством излучения методом синтезирования, в приближении сильного преломления, приводит к выделению локальных взаимодействий излучения с подповерхностными неоднородностями среды в пределах примыкающей к границе поперечно локализованной под точкой фокусировки и ориентированной по нормали к поверхности квазицилиндрической области, поперечный размер которой оценивается рабочей длиной волны, а продольный размер ограничен глубиной затухания волны в среде. Реализация этой процедуры в виде свертки зарегистрированного распределения рассеянного поля с фокусирующей функцией позволяет синтезировать эффект фокусировки в каждой точке границы раздела сред.
2. Процедура временной фокусировки монохроматического излучения в сверхширокой полосе частот с использованием преобразования Фурье в сочетании с процедурой пространственной фокусировки рассеянного полупространством из-

лучения позволяет в приближении однократного рассеяния восстановить трехмерное распределение подповерхностных неоднородностей. При этом точность восстановления по глубине сравнима с пространственной протяженностью синтезируемого импульса, обратно пропорциональной ширине полосы используемых частот и коэффициенту преломления фоновой среды. Совместная пространственно-временная фокусировка СШП излучения позволяет реализовать полную томографическую обработку многочастотных и многопозиционных данных радиозондирования с использованием трехмерного быстрого преобразования Фурье.

3. Введение управляемой пространственно-временной фазировки при обработке данных методом синтеза позволяет реализовать наклонную фокусировку излучения и визуализировать негоризонтальные участки рассеивающих подповерхностных объектов. Линейное искажение изображения, получаемого при наклонной фокусировке относительно изображения, полученного при вертикальной фокусировке, зависит от фонового коэффициента преломления среды. Фоновый коэффициент преломления определяется методом наименьших квадратов при совмещении изображений путём обратного линейного преобразования, устраняющего искажение.

Научная новизна

1. Впервые для обработки данных многопозиционного широкополосного радиозондирования подповерхностных неоднородностей использовано приближение сильного преломления, которое, при сохранении разрешения по горизонтали позволило ограничиться фокусировкой обратно рассеянного излучения в приповерхностные точки среды и не использовать последовательное погружение точки фокусировки.
2. Впервые для восстановления трехмерного распределения подповерхностных неоднородностей по пространственно-частотному распределению рассеянного поля над границей зондируемого полупространства предложено использовать алгоритм трехмерного быстрого преобразования Фурье. Предложен новый метод численного моделирования аппа-

ратных функций в частотной и временной областях для сверхширокополосных радиозондирующих систем, использующих метод синтезирования.

3. Предложен метод наклонного зондирования среды и метод определения на его основе коэффициента преломления фоновой среды. Дана оценка потенциальной точности метода.

Достоверность всех защищаемых положений подтверждается согласием полученных теоретических результатов с данными разносторонних численных моделей и результатами обработки прямых экспериментов по зондированию различных диэлектрических и металлических тестовых объектов, скрытых под поверхностью влажного песка. Экспериментально подтверждено, что при использовании полосы частот от 0,5 до 17 ГГц обеспечивается совпадение формы тестовых объектов и восстановленного изображения с точностью до 1 см.

Метод определения коэффициента преломления с помощью наклона линии фокусировки был применён к результатам численных и натуральных экспериментов и получено точное соответствие полученного значения коэффициента преломления и смоделированного в численном эксперименте. Коэффициент преломления, определённый по результатам натуральных измерений для сухого песка составил 1.5 ± 0.1 , что согласуется с результатами других методов для той же среды.

Все принятые приближения (однократного рассеяния, сильного преломления) физически и математически обоснованы и находятся в полном согласии с известными положениями теории распространения радиоволн в неоднородных средах.

Научная ценность

Установлено влияние сильно преломляющей среды на результат фокусировки обратно рассеянного поля в приповерхностные точки среды. Предложенные методы расчета аппаратных функций системы позволяют оценить разрешающую способность и пределы применимости приближения сильного преломления для сред с конечным значением коэффициента преломления.

Предложена методика решения задачи восстановления распределения неоднородностей в среде на основе данных СШП многопозиционного радиозондирования.

Разработаны аналитические и численные методы анализа аппаратной функции рассмотренной системы подповерхностной СШП радиолокации в частотной и временной областях.

Предложена и исследована методика наклонного сканирования среды при обработке данных СШП радиозондирования, которая позволяет реализовать эквивалентное зондирование среды квазиплоскими волнами, распространяющимися не вертикально.

Практическая значимость

Разработанный метод восстановления распределения рассеивающих неоднородностей в среде позволяет создать системы подповерхностного зондирования, работающие в реальном времени.

Метод наклонной фокусировки, реализуемый на основе трёхмерного быстрого преобразования Фурье, позволяет получать дополнительную информацию о рассеивающих объектах, в частности визуализировать невидимые сверху участки этих объектов. При использовании излучения с полосой 0.5-17 ГГц обеспечивается реальное пространственное разрешение порядка 1 см.

Предложен метод бесконтактного определения коэффициента преломления фоновой среды, не требующий априорной информации о расположении рассеивающих неоднородностей. Данный метод не требует каких-либо дополнительных измерений и использует те же данные СШП зондирования, что и в методе восстановления распределения неоднородностей.

Продемонстрирована возможность обобщения разработанного метода синтезирования для немонахроматических сигналов, в частности для сигналов с линейной частотной модуляцией для восстановления распределения пространственно протяженных неоднородностей. Это позволяет использовать предложенные методы пространственно-временного синтезирования для СШП систем радиозондирования, использующих различные типы модуляции сигнала.

Внедрение результатов диссертации и рекомендации по дальнейшему использованию

Результаты работы использованы на кафедре радиофизики при выполнении грантов РФФИ № 01-02-17233, по программе «Университеты России» № УР.01.01.395 и лота ФАНИ РФ по проекту ФЦНТП - госконтракт № 02.438.11.7008 от 19 августа 2005 г. шифр РИ-16.0/013 “Научно-организационное, методическое и техническое обеспечение организации и поддержки научно-образовательных центров в области технологий безопасности и осуществление на основе комплексного использования материально-технических и кадровых возможностей совместных исследований и разработок”. Результаты работы используются в учебном процессе при постановке и выполнении курсовых работ по радиоволновой томографии. Предложенные методы обработки данных многочастотного зондирования применяются в Магдебургском университете (IESK HF), Германия. Проведена обработка данных радиозондирования сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), предоставленных институтом неразрушающих методов контроля (IZFP), г. Саарбрюккен, Германия, где в дальнейшем предполагается применение предложенных методов.

Предложенные методы могут применяться в геолокации, археологии, для обнаружения различных скрытых объектов, для поиска противопехотных мин, для подповерхностного зондирования коммунальных сооружений, для разработки перспективных систем безопасности. Разработанные методы обладают высоким быстродействием, и позволяют проводить обработку данных радиозондирования в реальном масштабе времени.

Апробация работы

Результаты работы опубликованы в виде 5 статей и докладывались на следующих конференциях: Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, The Netherlands; VII Международная научно-техническая конференция “Актуальные проблемы электронного приборостроения” АПЭП-2004, 21-24 сентября, 2004, Новосибирск; 11-th international conference “Modern technique and technologies”, IEEE, 29 march – 2 april, 2005; Третья Международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления” 12-14

октября, 2005, Томск; Вторая всероссийская научная конференция - семинар “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике” СРСА - 2006, 4 - 7 июля, 2006, Муром; Международная научно-практическая конференция “Актуальные проблемы радиофизики АПР-2006”, 21-23 сентября 2006 года, Томск.

Личный вклад автора

Постановка и решение задач диссертации проведены автором под руководством профессора В.П. Якубова, который является основным соавтором публикаций. Предложенный ранее научным руководителем метод синтезирования пространственно-временной фокусировки в диссертации был всесторонне - аналитически, численно и экспериментально исследован автором. Автором были определены границы применимости метода и дано его обобщение на случай наклонной фокусировки, на основе чего им были предложены новые методы дистанционного определения усредненного коэффициента преломления и обнаружения негоризонтальных поверхностей скрытых объектов и объектов за пределами области перемещения антенн. Кроме того, данный метод обобщен автором для случая использования модулированного излучения. Автором разработано программное обеспечение для всех предложенных методов. Основные тестовые экспериментальные исследования проведены на установке, созданной в Магдебургском университете (Германия) под руководством профессора В.П. Якубова и с использованием антенных разработок доцента Ю.И. Буянова. Измерения с корпусами диэлектрических мин проведены профессором В.П. Якубовым совместно с сотрудниками Магдебургского университета с использованием, принадлежащего им высокоточного векторного анализатора цепей. Все измерения по наклонной фокусировке проведены на упомянутой установке лично автором в ходе годичной стажировки в Германии по гранту Президента РФ при выполнении магистерской программы. Экспериментальные данные по зондированию скрытых объектов частотно модулированным излучением были любезно предоставлены автору для тестовой обработки в рамках договора о сотрудничестве с Фраунгоферовским институтом неразрушающих методов контроля (IZFP, Саарбрюккен, Германия). Автор диссертации выражает

свою искреннюю благодарность всем упомянутым выше лицам и организациям за поддержку и помощь в выполнении работы.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. В работе содержится 122 страницы, 91 рисунок, 1 таблица, список литературы, насчитывающий 73 наименования, приложение.

Краткое содержание диссертации

Во введении приводятся общая характеристика работы, актуальность выбранной темы, цель и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены основные математические модели распространения радиоволн, использующиеся в диссертации. Рассмотрены основные физические процессы, которые необходимо принимать во внимание, среди них преломление плоских волн на границе раздела сред, описываемое законом преломления Снеллиуса и формулами Френеля.

С помощью разложения сферической волны по плоским волнам описано прохождение излучения от изотропного источника в среду, с учётом преломления. Функция Грина, описывающая прохождение излучения от точечного источника через границу раздела сред записывается следующим образом:

$$G(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{i T(\mathbf{k}_0) \exp(i \mathbf{k}_{0\perp} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) - i k_{0z} z_0 + i k_{1z} z_1)}{2(2\pi)^2 k_{0z}} d^2 \mathbf{k}_{0\perp}, \quad (1)$$

где \mathbf{r}_0 - координата точечного источника в верхнем полупространстве; \mathbf{r}_1 - точка измерения значения поля в нижнем полупространстве; \mathbf{p} - вектор горизонтальной плоскости; $T(\mathbf{k}_0)$ - коэффициент прохождения границы раздела сред; \mathbf{k}_0 - волновой вектор в верхнем полупространстве; \mathbf{k}_1 - волновой вектор в нижнем полупространстве; $k_{0z} = \sqrt{k_0^2 - \mathbf{k}_{0\perp}^2}$, $k_{1z} = \sqrt{k_1^2 - \mathbf{k}_{0\perp}^2}$. Поверхность среды описывается уравнением $z = 0$.

В главе также приводятся основные положения теории однократного рассеяния, используемые в диссертации.

Представлены обзор литературы и основные методы зондирования среды и методы восстановления распределения неоднородностей, предложенные ранее другими исследователями.

Во второй главе представлена схема зондирования полупространства (рис. 1). Излучающая **1** и приемная **2** антенны перемещаются в горизонтальной плоскости на фиксированной высоте. С определённым шагом производится зондирование среды **3** сверхширокополосным излучением.

Приведено решение прямой задачи рассеяния радиоволн на полупространстве с рассеивающими неоднородностями в скалярном приближении однократного рассеяния.

Пользуясь борновским приближением однократного рассеяния, можно записать поле в точке приёма \mathbf{r}'_0 , рассеянное объёмом среды при условии, что среда облучается точечным источником, расположенным над средой в точке \mathbf{r}_0 :

$$E(\mathbf{r}'_0, \mathbf{r}_0) = k_1^2 \iiint_{V_1} \Delta \varepsilon(\mathbf{r}_1) G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_0) G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}'_0) d^3 \mathbf{r}_1, \quad (2)$$

где $\Delta \varepsilon$ - характеризует распределение рассеивающих неоднородностей в объёме среды; V_1 - нижнее полупространство, вмещающее рассеивающие неоднородности; функция Грина G определяется согласно формуле (1).

Предлагается решение обратной задачи восстановления распределения неоднородностей на основе информации о рассеянном поле, в приближении сильно преломляющей среды с помощью фокусировки сверхширокополосного излучения в приповерхностные точки среды на каждой частоте:

$$\Delta \varepsilon(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i4\pi f n z / c} \iint_S \tilde{E}(x', y', f) M(x - x', y - y') dx' dy' df, \quad (3)$$

где $M(\mathbf{p}) = e^{-ik_0 \left(\sqrt{(x-d/2)^2 + y^2 + h^2} + \sqrt{(x+d/2)^2 + y^2 + h^2} \right)}$ - функция, обеспечивающая фокусировку излучения в приповерхностные точки среды; $\Delta \varepsilon(x, y, z)$ - распределение рассеивающих неоднородностей в среде; d - расстояние между антеннами. Обратное преоб-

разование Фурье в (3) обеспечивает разрешение по дальности, а свёртка с фокусирующей функцией разрешение по горизонтали.

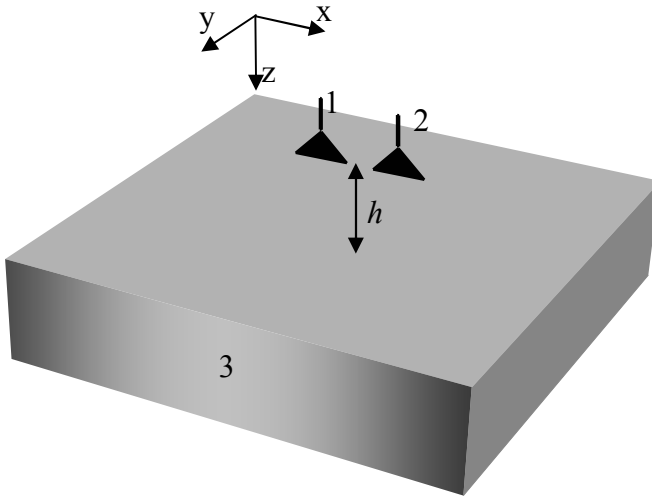


Рис. 1. Схема проведения измерений

Программно выражение (3) реализуется на основе операций быстрого преобразования Фурье, при этом фокусировка проводится только в приповерхностные точки, а не во всём объёме среды, что позволяет создать алгоритм для восстановления распределения неоднородностей в реальном времени.

Далее в главе приводится численное и аналитическое исследование точности предложенного метода восстановления распределения неоднородностей.

Приводятся результаты аналитических расчетов и численного моделирования аппаратной функции системы, то есть отклика системы на точечный рассеиватель в частотной и временной областях. Получено, что при сильном преломлении высокая локализация аппаратной функции, достигнутая на поверхности среды благодаря фокусировке, сохраняется и на глубине.

На рис. 2 а представлен результат расчёта аппаратной функции для частоты 10 ГГц, размера синтезируемой апертуры 50 см и коэффициента преломления $n = 3$. На рис. 2 б показана

аппаратная функция системы во временной области при полосе частот 20 ГГц.

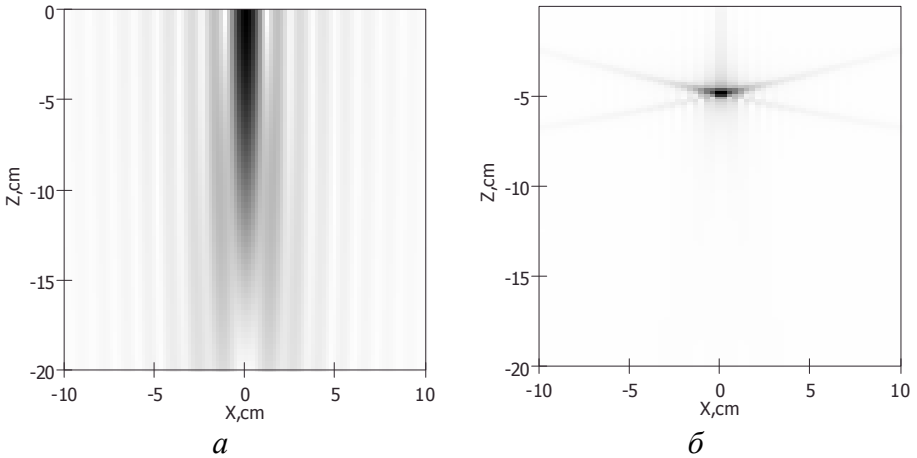


Рис. 2. Аппаратная функция системы

По аппаратной функции рис. 2а видно, что фокусировка излучения на поверхность среды выделяет квазицилиндрическую область взаимодействия излучения с веществом, что обеспечивает разрешение по горизонтали. Аппаратная функция во временной области рис. 2б показывает, что временная фокусировка с использованием преобразования Фурье по частоте обеспечивает разрешение системы по вертикальной оси.

Численный расчет аппаратных функций позволяет оценить разрешающую способность системы. В главе приводятся аналитические оценки разрешающей способности системы для заданного диапазона частот и области перемещения приёмопередающей антенны.

В главе предлагается метод наклонной фокусировки рассеянного излучения, позволяющий сканировать среду под разными углами и обнаруживать негоризонтальные участки рассеивающих объектов. Суть метода заключается в фокусировке рассеянного поля в приповерхностную точку среды, смещённую относительно центра апертуры. Проведено численное моделирование аппаратной функции системы при наклонной фокусировке (рис. 3).

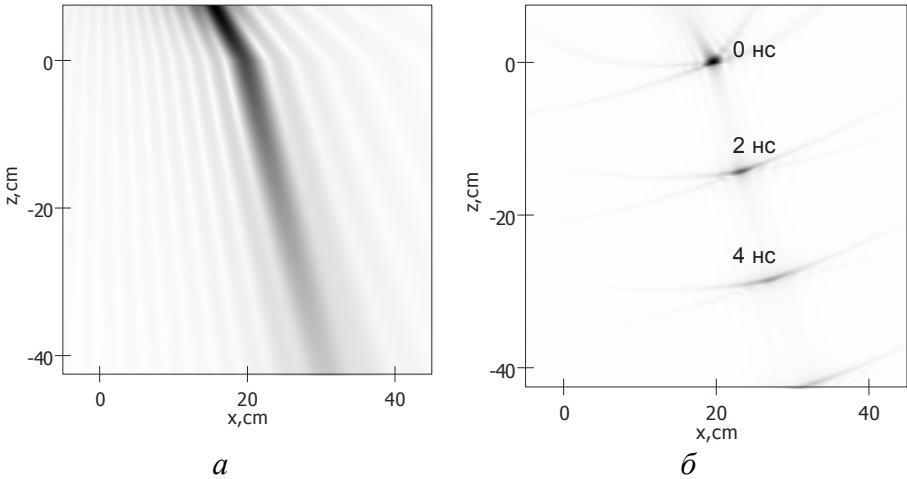


Рис. 3. Аппаратная функция системы при наклонной фокусировке для среды с $n=2$: *a* - в частотной области на частоте 10 ГГц; *б* - во временной области при полосе частот 20 ГГц

В главе описывается возможность фокусировки и восстановления распределения неоднородностей за пределами области перемещения антенн.

Рассматривается случай применения предложенного метода при неподвижной передающей антенне и использовании приёмной антенной решётки.

Также описана возможность применения фокусировки в случае использования сигналов с линейной частотной модуляцией.

В третьей главе предложены методы бесконтактного определения коэффициента преломления среды.

Излагается возможность определения фонового коэффициента преломления среды на основе метода наклонной фокусировки. Основная идея метода заключается в том, что преломление на границе раздела сред приводит к изменению угла сканирования среды. Это изменение можно определить по линейному искажению восстанавливаемого изображения рассеивающих неоднородностей относительно изображения, полученного при вертикальной фокусировке.

Пространственно-временное изображение, полученное при наклонном сканировании среды с учётом преломления, приближённо можно записать в виде:

$$\tilde{F}(x, y, t, \alpha) \approx \Delta \varepsilon(x - ct \cdot \sin \beta / 2n, y, ct \cdot \cos \beta / 2n). \quad (4)$$

Угол наклонного сканирования среды β можно связать с углом падения α , который не будет зависеть от коэффициента преломления среды, а будет определяться только расположением апертуры и сдвигом точки фокусировки от центра апертуры. Угол падения α является углом наклонной фокусировки.

Обозначим $z = ct/2$, тогда с учётом закона преломления плоских волн на границе сред $\sin \alpha = n \sin \beta$, в приближении (4) можно записать:

$$\tilde{F}(x, y, 2z/c, \alpha) \approx \Delta \varepsilon(x', y', z'),$$

$$\text{где } x' = x - z \sin \alpha / n^2, \quad y' = y, \quad z' = z \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} / n^2 \quad (5)$$

- истинные координаты положения неоднородностей зондируемой среды. Угол наклонной фокусировки α задается при обработке данных и может быть выбран произвольно. Обратное к (5) преобразование координат

$$x = x' + z' \sin \alpha / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}, \quad y = y', \quad z = z' n^2 / \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \quad (6)$$

позволяет сопоставить результатам обработки данных (4) истинное распределение неоднородностей $\Delta \varepsilon(x', y', z')$, которое уже не должно зависеть от α , и, следовательно, $\tilde{F}(x, y, 2z/c, \alpha)$ совпадет с пространственно-временным изображением, полученным при вертикальной фокусировке:

$$\Delta \varepsilon(x', y', z') = \tilde{F}(x, y, 2z/c, \alpha \neq 0) = \tilde{F}(x', y', 2z'n/c, \alpha = 0). \quad (7)$$

Соотношение (7) становится тождеством, если входящий в него параметр n совпадает с коэффициентом преломления зондируемой среды. Поэтому соотношение (7) можно рассматривать как неявное уравнение для нахождения n , которое должно удовлетворяться для всех точек нижнего полупространства (x', y', z') . Поскольку в экспериментальных данных всегда присутствуют шумы измерений, то при использовании метода наименьших

квадратов задача для оценки n сводится к минимизации функционала

$$\Phi[n] = \sum_{(x', y', z') \in V} \left| \tilde{F}(x_\alpha, y_\alpha, 2z_\alpha / c, \alpha) - \tilde{F}(x', y', 2z' n / c, \alpha = 0) \right|^2. \quad (8)$$

При этом в определенной степени будут компенсироваться и погрешности принятых приближений модели явления.

В главе также приводится оценка точности метода (своего рода доверительного интервала), которая выражается следующим образом:

$$\Delta n \approx \frac{n^2}{\sin \alpha} \frac{\Delta x}{z'},$$

где Δx - доверительный интервал определения координаты цели по горизонтали.

В главе также описана методика определения коэффициента преломления по дифракционным гиперболам при бесконтактном зондировании. С помощью аналитических расчетов в различных приближениях показана возможность применения данного метода.

В четвертой главе представлена экспериментальная установка и методика измерений. Приводится описание проведенных экспериментов. Представлены результаты обработки экспериментальных данных, результаты, подтверждающие работоспособность предложенных методов.

На рис. 4 представлен результат восстановления изображения двух уголкового отражателей, расположенных на глубинах 9 см и 10 см. При зондировании использовался диапазон частот 0,5-17 ГГц при размере апертуры 50 см. Для обработки результатов измерений рассеянного поля использовался алгоритм, основанный на формуле (3).

Из восстановленного изображения видно, что рассеивающие объекты можно однозначно различить по горизонтали и вертикали. Сопоставление временного запаздывания сигналов и реальной глубины закладки отражателей позволило уточнить коэффициент преломления песка $n = 1.5$.

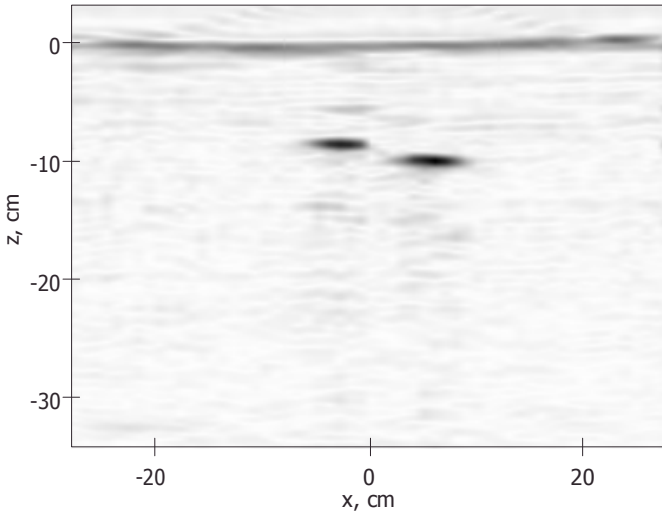


Рис. 4. Радиотомограмма уголковых отражателей

В песок на глубины от 1 до 25 см были помещены три корпуса пластиковых противопехотных мин и ступенчатый объект из вспененного полистирола с размером ступенек 5 см, фотография которых в плане представлена на рис. 5. Объект **1** был заложен на глубину 2 см, объект **2** на глубину 7 см, объект **3** на глубину 11 см. В ходе измерений использовался диапазон частот 0,5-17 ГГц. Система из приемной и передающей антенн, закрепленных между собой на расстоянии 14 см, перемещалась шагом 1 см в горизонтальной плоскости по квадрату 50x50 см, на высоте 30 см над поверхностью песка.

Результат восстановления формы тестовых объектов и их глубины залегания приведены на рис. 6. Для улучшения визуального качества изображений использовалась линейная фильтрация сигнала с увеличением амплитуды на высоких частотах.

Из представленных рисунков видно, что предложенный метод для описанной установки имеет разрешение по горизонтали около 1 см до глубины 11 см.

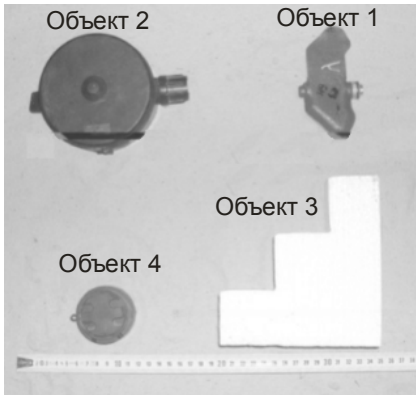


Рис. 5. Тестовые объекты

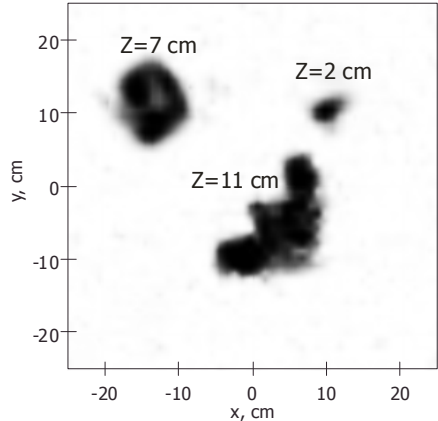


Рис.6. Восстановление распределения неоднородностей

Для проверки метода наклонной фокусировки при синтезировании апертуры, был проведён эксперимент с наклонной металлической пластиной, помещённой в песок.

После обработки данных зондирования с помощью алгоритма наклонной фокусировки были получены изображения рис. 7 и рис. 8 при наклоне фокусировки соответственно 0 и 30 градусов. Координате по оси z соответствует время прохождения зондирующего импульса до рассеивателя, умноженное на скорость света в вакууме.

Как видно из представленных рисунков, заложенный объект наиболее отчётливо выделяется при наклоне фокусировки в 30 градусов, то есть когда направление падения волны на пластину наиболее близко к нормальному. Таким образом, проводя сканирование среды под разными углами методом наклонной фокусировки можно определить все горизонтальные и негоризонтальные участки объекта скрытого под землёй и восстановить его форму.

В главе приводятся результаты экспериментов по определению коэффициента преломления песка. Результат определения коэффициента преломления методом наклонной фокусировки согласуется с результатами, полученными в ранее описанном эксперименте с уголковыми отражателями.

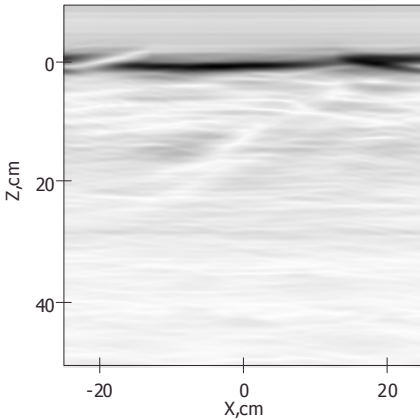


Рис. 7. Восстановленное изображение без наклона фокусировки

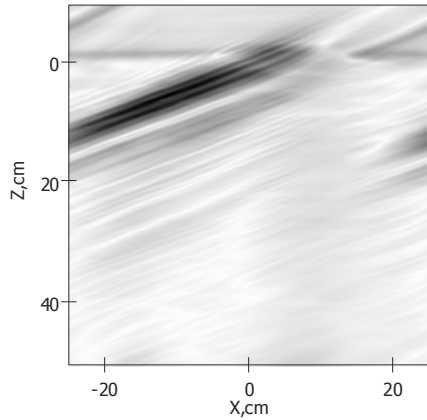


Рис.8. Восстановленное изображение при наклоне фокусировки на 30°

Описывается программное обеспечение, разработанное на основе предложенных алгоритмов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

В приближении однократного рассеяния и сильного преломления предложено решение задачи восстановления распределения неоднородностей, скрытых под плоской границей раздела сред по результатам многопозиционного сверхширокополосного радиозондирования на основе фокусировки измеренного рассеянного поля в приповерхностные точки среды.

Численные и аналитические расчеты аппаратной функции показали, что приближение сильного преломления применимо и для сред с конечным коэффициентом преломления до некоторой глубины. Предложенный метод восстановления распределения неоднородностей в частотной области эквивалентен зондированию среды узким лучом. Во временной области предложенный метод эквивалентен зондированию среды пространственно локализованным радио импульсом, распространяющимся в пределах квазицилиндрической области.

Разрешающая способность системы главным образом определяется полосой частот зондирующего сигнала и размером синтезируемой апертуры.

Приведённые результаты обработки экспериментальных данных с помощью предложенного метода подтверждают его способность восстанавливать распределение неоднородностей в среде. Программная реализация предложенного метода на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье позволяет проводить обработку данных зондирования в реальном масштабе времени.

Предложен метод наклонной фокусировки, позволяющий проводить невертикальное сканирование среды. Наклонная фокусировка обеспечивается благодаря смещению точки фокусировки относительно синтезируемой апертуры. Экспериментально подтверждена возможность визуализации негоризонтальных поверхностей рассеивающих объектов путем обработки данных методом наклонной фокусировки. Также рассмотрены возможность восстановления распределения неоднородностей за пределами области перемещения антенн и возможность применения фокусировки в случае использования неподвижной передающей антенны.

Предложен новый метод бесконтактного определения коэффициента преломления среды на основе метода наклонной фокусировки. Приводятся результаты определения коэффициента преломления на численных моделях и натуральных экспериментах. Предложена оценка погрешности определения коэффициента преломления.

Бесконтактный метод определения среднего коэффициента преломления среды не требует априорной информации о расположении рассеивающих объектов в среде, но для его работы необходимо наличие как минимум двух рассеивателей на различных глубинах, либо одного рассеивателя при известной высоте антенн над поверхностью среды.

Также рассмотрен метод определения коэффициента преломления по форме дифракционных гипербол. Получены аналитические соотношения для определения коэффициента преломления в случае контактного и бесконтактного зондирования в приближении большого и малого удаления положения антенны от рассеивателя.

Публикации по теме диссертации

1. Д.Я. Суханов, В.П. Якубов. Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации // Журн. техн. физики. – 2006. - Т. 76. № 7. -С. 64-68.
2. V.P. Yakubov, A.S. Omar, D.Y. Sukhanov, V.P. Kutov, N.G. Spiliotis. New Fast SAR Method for 3-D Subsurface Radiotomography // Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, The Netherlands. –P. 103-106.
3. Д.Я. Суханов, В.П. Якубов. Бесконтактный метод измерения электрофизических свойств грунта с использованием сверхширокополосного излучения // Изв. вузов. Физика. - 2006. - №9. Приложение. - С. 58-61.
4. Д.Я. Суханов, В.П. Якубов, А.С. Омар. Метод дифракционных гипербола для бесконтактного определения коэффициента преломления среды // Изв. вузов. Физика. - 2006. - №9. Приложение. - С. 62-66.
5. В.П. Якубов, Е.Д. Тельпуховский, Г.М. Цепелёв, В.В. Белов, А.В. Клоков, Н.А. Моисеенко, С.Н. Новик, Д.Я. Суханов, О.В. Якубова. Радиоволновая томография неоднородных сред // Изв. вузов. Физика. - 2006. - №9. - С. 20-24.
6. В.П. Якубов, Е.Д. Тельпуховский, Г.М. Цепелёв, А.В. Клоков, Н.А. Моисеенко, С.Н. Новик, Д.Я. Суханов, О.В. Якубова. Радиолокационная томография // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т.19. №12.- С.1081-1086.
7. В.П. Якубов, Д.Я. Суханов. Метод фокусировки в подповерхностной локации // VII Международная научно-техническая конференция “Актуальные проблемы электронного приборостроения” АПЭП-2004. 21-24 сентября, 2004. Новосибирск.– С.13-17.
8. В.П. Якубов, Д.Я. Суханов. Многочастотная подповерхностная радиотомография диэлектрических объектов // Вторая всероссийская научная конференция - семинар “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике” СРСА 2006, Муром, 4-7 июля, 2006. - С.210-214.

9. D.Y. Sukhanov. Reconstruction of the heterogeneity distribution outside of the scanning region in subsurface radiotomography based on the synthetic aperture radar // 11th international conference “Modern technique and technologies”. IEEE. 29 march–2 april, 2005. - Tomsk - P. 46-47.
10. Д.Я. Суханов. Фокусировка радара с синтезированной апертурой в подповерхностной радиотомографии при использовании неподвижной передающей антенны // Третья международная научно-практическая конференция “Электронные средства и системы управления” 12-14 октября 2005 г. Томск, Ч.1, - 2005. - С 32-33.
11. Д.Я. Суханов, В.П. Якубов. Оценка разрешающей способности в подповерхностной радиотомографии // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. №4 (12). - 2005. –С. 84-89.
12. Д.Я. Суханов, А.Я. Суханов. Модель распространения радиоволн для сверхширокополосной радиолокации лесной среды // Труды региональной научно-технической Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых учённых “Современные проблемы радиотехники” СПР 2003. 26-28 ноября, 2003.- Новосибирск. - С 27-28.
13. Д.Я. Суханов. Моделирование оптической системы с линзой // Межрегиональная научно-техническая конференция студентов и молодых ученых “Научная сессия ТУСУР”. 14-16 мая, 2002. -Томск. - С. 48-50.
14. Д.Я. Суханов, А.Я. Суханов. Повышение разрешения изображений, полученных в условиях расфокусированной оптической системы // Материалы конгресса “Практикующий врач”. Сочи. Академия естествознания, 1- 4 октября, 2002. - С. 112.
15. Д.Я. Суханов, Н.А. Моисеенко. Моделирование рассеяния сверхширокополосного излучения в лесу // XLI Международная научная студенческая конференция “Студент и научно-технический прогресс”. Физика / Новосиб. гос. Ун-т. Новосибирск, 2003. - С. 106.

16. Д.Я. Суханов. Алгоритм повышения разрешения и геометрической коррекции изображений поверхности земли // Тезисы докладов региональной научно-технической конференции “Радиотехнические устройства, информационные технологии и системы управления”. 15-18 мая, 2001. - Томск, Россия, Ч.2. - С .30-32.
17. Д.Я. Суханов. Дифференциальные методы обработки изображений // Труды региональной научно-технической школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные проблемы радиотехники СПР-2001”. 26-30 ноября, 2001. - Новосибирск. - С.55-56.