

Харьковский государственный университет

на правах рукописи

БАТРАКОВ

Дмитрий Олегович



РАЗРАБОТКА РАДИОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО  
К ПРОБЛЕМЕ ЗОНДИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

01.04.03 – радиофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Харьков – 1995



00761451 (O)

Диссертация является

Работа выполнена в Харь

Научные консультан

профессор Третьяков Олег Иванович

доктор физико-математических наук,

профессор Жук Николай Петрович;

Официальные оппоненты: Академик НАН Украины,

доктор физико-математических наук, профессор

Литвиненко Леонид Николаевич (РИ НАН Украины, г. Харьков);

член-корреспондент НАН Украины,

доктор физико-математических наук, профессор

Назарчук Зиновий Теодорович (ФМИ НАН Украины, г. Львов);

доктор технических наук, профессор

Шифрин Яков Соломонович (ХТУРЭ, г. Харьков).

Ведущая организация: Днепропетровский государственный

университет.

Защита диссертация состоится " 8 " декабря 1995г.

в 14.00 часов на заседании специализированного совета

Д 02.02.07 Харьковского государственного университета.

Адрес: 310077, Харьков, пл. Свободы, 4, ауд. III-9.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Харьковского государственного университета.

Автореферат разослан " 3 " <sup>ноября</sup> ~~декабря~~ 1995г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

В.И. Чеботарев

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации связана с возникающей в чрезвычайно обширном круге физико-технических и инженерных приложений необходимостью математического моделирования распространения волн, электромагнитных или звуковых, в пространственно неоднородной среде и интерпретации экспериментальных данных на предмет восстановления свойств исследуемой среды.

Так, прямые задачи теории волн в слоистонеоднородных средах с объемными или поверхностными возмущениями являются ключевыми для радиоволнового и акустического контроля композитных материалов, при расчете технических элементов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов радиоволн на базе открытых волноводов, а также для физики тонких пленок, диагностики плазмы, геофизики и акустики океана. Необычайное богатство физики рассеяния волн на телах в неоднородных средах проистекает из того очевидного обстоятельства, что результирующее поле формируется под совместным влиянием как неоднородности (регулярной) окружающей среды, так и включения. Эти же факторы приводят к значительным трудностям при численном или аналитическом исследовании таких задач, которые в математическом плане сводятся к уравнениям в частных производных с неоднородными коэффициентами и неразделяющимися переменными. В связи с вышеизложенным весьма насущной является проблема создания эффективных компьютерно-ориентированных методов решения прямых задач рассеяния в неоднородных средах. Эти методы, предъявляя разумные запросы к объему памяти и быстрдействию ЭВМ, должны, в то же время, поддаваться эффективной программной реализации.

Не менее интересной и, вообще говоря, гораздо более сложной является противоположная постановка вопроса — об определении электрофизических или акустических свойств среды распространения по данным взаимодействия с ней электромагнитных или акустических волн. Иными словами, речь идет о нахождении пространственного распределения диэлектрической и магнитной проницаемости, или плотности среды и скорости

звука по измеренным зависимостям информационного параметра, характеризующего отраженное средой поле, от варьируемого параметра, характеризующего падающую - зондирующую волну. Во многих случаях пространственную неоднородность зондируемой среды можно считать одномерной, когда материальные параметры оказываются функциями одной координаты, декартовой или криволинейной. Такая модель, с одной стороны, достаточно хорошо отражает реальность, с другой - позволяет четко сформулировать теоретическую задачу. Она, к примеру, является базовой в неразрушающем контроле материалов и изделий, дистанционном зондировании природных сред, для некоторых методов поиска полезных ископаемых, медицинской диагностики и других приложений. К обратным сводятся, по существу, и задачи синтеза сред с предписанными отражательными или поглощающими свойствами. Одномерно-неоднородная модель синтезируемой среды естественно возникает при разработке антенных обтекателей, поглощающих покрытий, оптических и СВЧ фильтров. В названных выше и других приложениях обратных задач для одномерно-неоднородных сред весьма актуальной является разработка физических и математических методов решения, которые обеспечили бы приемлемую точность восстановления или синтеза в реальном масштабе времени при минимальной априорной информации относительно свойств среды.

Созданные к настоящему времени численные модели рассеяния волн на включениях в неоднородной среде основаны, как правило, на интегральной формулировке задачи рассеяния, в рамках которой рассеянное поле представляется как поле эквивалентных источников, распределенных по поперечному сечению или поверхности тела. Эти уравнения решаются численно методом моментов с использованием локальных базисных функций. В случае рассеивателей больших по сравнению с длиной волны размеров это приводит к необходимости решения систем линейных алгебраических уравнений, размер которых настолько велик, что оказывается серьезным препятствием при компьютерном анализе физических закономерностей. К тому же, их реализация (к примеру, в рамках методов объемных интегральных уравнений) сопряжена с необходимостью многократного

вычисления функций Грина вмещающей среды. Построение этих функций Грина в аналитическом виде недоступно, а их численный расчет сводится к отысканию интегралов Зоммерфельда — операции, требующей значительных затрат компьютерного времени. В свете сказанного выше желательным представляется разработка такой численной модели рассеяния, которая основывалась бы на аппроксимации искомой величины глобальными базисными функциями и использовала бы минимальное количество вычислений функций Грина регулярной среды.

Таким образом, проблемы дифракции электромагнитных волн на включениях в пространственно-неоднородных средах и обратные задачи рассеяния электромагнитных и акустических волн являются актуальными как в чисто научном плане, так и с точки зрения многочисленных практических приложений.

Что касается обратных задач для неоднородных сред, то имеющиеся методы их решения — как спектральные, так и оптимизационные, исходят из предположения о регулярном строении зондируемой среды, т.е. об отсутствии всякого рода возмущений — как детерминированных, так и случайных. Между тем, наличие последних является неотъемлемой чертой многих физико-технических приложений. В качестве одного из примеров можно сослаться на дистанционное зондирование, где информативный сигнал, принятый радиолокационной системой, обязан своим возникновением случайным неровностям рельефа и подповерхностным нерегулярностям. Ясно, что для корректной интерпретации данных дистанционного зондирования необходимо использовать такой метод решения обратной задачи рассеяния, который бы изначально учитывал статистические возмущения в зондируемой среде. Другое важное ограничение в теории обратных задач рассеяния связано с использованием частотных, угловых (пространственных) или временных зависимостей регистрируемых данных для восстановления параметров среды. Очевидно, что частотные и временные методы неприменимы для диагностики диспергирующих сред (такowymi, к примеру, являются плазма и полимерные композиционные материалы). Угловые же методы, хотя и свободны от названного ограничения, но предполагают изменение местоположения приемного и/или передающего зондов, что делает их весьма

громоздкими в экспериментальной реализации. Наконец, соответствующие алгоритмы обращения данных рассеяния используют достаточно сложный или громоздкий математический аппарат и, как следствие, неприменимы для интерпретации данных в реальном масштабе времени.

Отсюда вытекает цель настоящей диссертационной работы — дальнейшее развитие теории и применений радиофизических моделей и методов математической физики к решению прямых и обратных задач теории волн применительно к проблеме зондирования неоднородных сред. Достижение этой цели предусматривает решение следующего цикла задач:

- разработка новых и развитие существующих методов численно — аналитического исследования данного класса задач и создание на этой базе эффективных алгоритмов для численного решения соответствующих задач анализа и синтеза;
- создание программных продуктов, основанных на предложенных алгоритмах;
- проведение вычислительных экспериментов по исследованию общих физических закономерностей рассеяния волны включениями в неоднородных средах и возможностей восстановления свойств неоднородных объектов с помощью дистанционного зондирования;
- детальный анализ ситуаций, возникающих при использовании полученных результатов, и выработка практических рекомендаций применительно к интерпретации данных дистанционного зондирования.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что автором рассмотрен относительно малоизученный класс прямых задач дифракции электромагнитных волн, основной особенностью которых является плоскостной характер среды, вмещающей рассеиватель. В работе предложено развитие известного метода нулевого поля для решения этого класса задач. В том числе разработано несколько вариантов алгоритма численного решения двумерной задачи дифракции на проницаемом рассеивателе, находящемся в плоскостной среде. Предложен метод регуляризации для системы интегральных уравнений относительно компонент полного поля, возникающей в двумерной задаче дифракции электромагнитных волн на проницаемом включении в плоскостной среде, рассмотрен другой подход к реше-

нию этой задачи, основанный на дискретизации непосредственно интегральных уравнений, а не уравнений Эйлера, с последующей регуляризацией по А.Н. Тихонову, показана эквивалентность при определенных условиях обоих подходов.

С другой стороны, в результате проведенных комплексных исследований возможности применения радиофизических моделей объектов и полей в обратных задачах рассеяния с учетом условий физической реализуемости впервые:

- поставлена и решена задача о восстановлении профиля диэлектрической проницаемости плоскостной среды со слабо шероховатой границей по данным некогерентного рассеяния при известной корреляционной функции шероховатостей;

- предложен новый физико-математический принцип дистанционного определения электрофизических параметров неоднородных (в том числе и анизотропных) сред, использующий в качестве информативного параметра поляризационное состояние зондирующего поля;

- предложен новый подход к решению одномерных обратных задач, использующий принцип максимума Понтрягина и на его основе разработаны новые итерационные вычислительные алгоритмы;

- исследован вопрос о возможности совместного\* использования прямых методов (градиентных и метода Гольдфарба) параметрической оптимизации для решения обратных задач рассеяния.

Обоснованность и достоверность полученных в работе научных результатов и выводов основана на том, что при решении прямых задач как вывод основных соотношений так и разработка алгоритма их решения проведены в строгой постановке математически обоснованными методами. Сделанные при этом допущения являются правомерными, а полученные результаты численных экспериментов хорошо согласуются с приведенными в работах других авторов и допускают ясное физическое толкование. При постановке и решении обратных задач были использованы достаточно адекватные реальной физической ситуации модели, а приближенный характер используемых уравнений компенсировался вычислительным контролем сходимости итерационных алгоритмов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке новых и развитии известных радиофизических моделей и методов применительно к проблемам неразрушающего

контроля и дистанционного зондирования различных природных и искусственных объектов. Часть результатов, относящихся к прямым задачам, позволяет в рамках единого подхода, базирующегося на уравнениях метода нулевого поля, изучать свойства полей, рассеянных различными неоднородностями в плоскостных средах. Результаты теоретических и вычислительных исследований, приведенные в работе, помогли глубже познать природу возмущений, вносимых объемлющей средой, физические процессы рассеяния волн проникаемыми телами и выработать практические рекомендации по использованию разработанных алгоритмов и пакетов программ.

Разработанные вспомогательные программы вычисления функции Грина неоднородных сред позволили создать эффективные алгоритмы интерпретации данных дистанционного зондирования и неразрушающего контроля. Полученные с их помощью результаты могут найти применение в биомедицине, океанографии, геофизике и других областях науки и техники.

Диссертация выполнена в рамках комплексной общесоюзной целевой программы ИКИТ СССР по решению научно-технической проблемы "Создать и освоить в производстве комплекс приборов, средств автоматизации повышенной точности, надежности, долговечности" (1986-1990гг. шифр 0.18.01); научно-технической программы "Неразрушающий контроль и диагностика", утвержденной приказом Государственного комитета по народному образованию СССР №773 от 29.09.1989г. и координационного плана научно-технических работ по комплексной проблеме "Распространение радиоволн" АН СССР (шифр 154). Результаты работы вошли в отчеты по 4 госбюджетным НИР (номера госрегистрации 0187.0000262; 01.9.10036888; UA01008654P и 0194U018568), а также в отчеты по 2 хоздоговорным НИР (номера государственной регистрации 0187.0037102 и 01.9.00047189).

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения, полученные лично автором.

1. Обобщение известного метода нулевого поля на случай двумерных задач рассеяния электромагнитных и акустических волн на неоднородном включении в слоистой среде, основанное на учете пространственной неоднородности вмещающей среды

посредством построения надлежащих функций Грина и содержащее:

з) формулировку метода и алгоритм численного решения задачи рассеяния первичного поля общего вида на кусочно-однородном включении произвольного поперечного сечения, находящемся в однородном слое произвольно-слоистой среды;

б) программу для расчета на ЭВМ характеристик рассеяния пространственной гармоник в волны излучения и моды дискретного спектра применительно к однородному включению произвольного сечения в дискретно-слоистой среде;

в) результаты анализа рассеяния плоских электромагнитных линейно поляризованных волн на однородном поглощающем включении эллиптического и прямоугольного сечения в однородном и двухслойном диэлектрическом полупространстве, а так же их возможные практические применения.

2. Новый физико-математический принцип восстановления электрофизических параметров пространственно-неоднородных магнито-диэлектрических сред, основанный на применении зондирующего электромагнитного поля с изменяющимся состоянием поляризации, который включает:

а) постановку и итерационный алгоритм решения обратной задачи рассеяния электромагнитных волн в области значений поляризационных параметров;

б) программы для персональных ЭВМ (ПЭВМ), предназначенные для интерпретации данных радиоволнового зондирования изотропных либо одноосных плоскостойких сред и цилиндрической слоистой изотропной среды;

в) анализ возможностей развитого подхода в сравнении с методами восстановления, привлекающими алгоритмы решения обратных задач в областях изменения частоты или направления распространения зондирующего поля, а также практические рекомендации по его применению в неразрушающем контроле и дистанционном зондировании.

3. Новый метод бесконтактного определения электрофизических свойств плоскостойкой среды по данным некогерентного рассеяния на малых шероховатостях границ, а именно:

а) постановка и решение обратной задачи общего вида о

восстановления распределения комплексной диэлектрической проницаемости плоскостной среды со слабошероховатой границей по измеренным зависимостям сечений обратного рассеяния в частотной, угловой или поляризационной области либо комбинациям названных областей при заданной функции корреляции шероховатостей;

б) алгоритм и пакет программ для ЭЭМ, реализующих упомянутое решение применительно к случаю, когда данные представлены радиолокационными сечениями рассеяния;

в) исследование с использованием смоделированных данных возможностей предложенного метода и его применимости в дистанционном зондировании.

4. Итерационный метод решения одномерных обратных задач рассеяния, основанный на использовании принципа максимума Понтрягина либо прямых методов теории оптимизации. В итоге:

а) получено решение исходной задачи Майера со свободным правым концом с помощью предложенной модификации метода Крылова-Черноушко;

б) предложен алгоритм восстановления параметров неоднородных объектов, основанный на применении помимо принципа максимума Понтрягина стабилизирующего функционала общего вида - включающего кроме искомой функции и ее производную.

5. Разработаны алгоритмы решения обратных задач, опирающийся на прямые методы решения задач параметрической оптимизации - градиентные и метод Гольдфарба.

Апробация работы и публикации. Диссертация представляет собой изложение и обобщение ранее опубликованных 47 работ автора, среди которых 27 статей в научных журналах и сборниках трудов международных конференций, 12 тезисов докладов на международных и всесоюзных конференциях, 8 депонированных рукописей.

Полученные в работе результаты были доложены и обсуждены на Московской международной конференции по композитам (Москва 14-16 ноября 1990г.), III и IV международных научных семинарах "Математические методы в электромагнитной теории" (Алушта, 15-21 апреля 1991г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Оптический,

волновой и тепловой методы неразрушающего контроля" (Могилев, 15-16 мая 1989г.), I-ом Украинском симпозиуме "Физика и техника мм. и субмм. радиоволн" (Харьков, 15-17 октября 1991г.), международном симпозиуме "Progress in Electromagnetic Research" (Нордвик, Голландия, 11-15 июля 1994г.), VI-ом Международном симпозиуме "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики" (Харьков, 24-28 мая 1993г.), международной конференции URSI "Mathematical Methods in Electromagnetic Theory" (Харьков, 7-10 сентября 1994г.), IV Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных и вычислительных систем СВЧ и КВЧ на ОИС" (Волгоград, 11-13 сентября 1991г.), Всесоюзных научно-технических конференциях "Методы представления и обработки случайных сигналов и полей" (Туапсе, 10-12 октября 1989г.; 30 сентября - 2 октября 1991г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях радиофизического факультета Харьковского госуниверситета.

Личный вклад диссертанта в работы, выполненные в соавторстве. В работах [1-6] диссертанту принадлежит выработка общего подхода к решению данного класса задач, идея использования поляризационных свойств зондирующего сигнала в качестве информативного параметра, создание численных методов минимизации сглаживающих функционалов применительно к рассматриваемым задачам, разработка вычислительных алгоритмов и программного обеспечения, а также идея и проведение численных экспериментов и участие в физическом анализе полученных результатов. В работе [7] - постановка и решение задачи, получение конкретных результатов и участие в их физическом анализе. В [8-15, 17-21, 26-29] - постановка задачи, разработка вычислительных алгоритмов и программ (кроме [8]), участие в физическом анализе полученных результатов.

В работе [16] диссертанту принадлежит идея использования методов теории оптимизации для восстановления импеданса криволинейных поверхностей, разработка метода и алгоритма решения задачи.

В статьях [22-25] диссертанту принадлежит постановка

задачи, разработка метода решения (только в [22]), проведение вычислительных экспериментов (в [22]) и физический анализ полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 296 страницах машинописного текста, из них основной текст - на 257 страницах и 30 рисунков на 10с. Список литературы на 29с. содержит 228 наименований работ.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении дан краткий обзор имеющихся в данной области результатов, обоснована актуальность темы диссертации, кратко описана программа исследований, проведенных автором, сформулированы рекомендации и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 "Модифицированный метод нулевого поля в двумерных задачах рассеяния волн на произвольном неоднородном теле, расположенном в плоскостной среде" исследованы возможности развития метода нулевого поля для решения задач рассеяния акустических и электромагнитных волн неоднородными телами, погруженными в неоднородные (плоскостные) среды.

В разделе 1.1 на основе использования формул Гельмгольца-Кирхгофа исходная краевая задача сведена к системе интегро-дифференциальных уравнений относительно неизвестных распределений поля и его нормальной производной на границе включения:

$$\int_L \frac{dL'}{\eta(\vec{r}'_L)} \left[ G_0(\vec{r}, \vec{r}'_L) \frac{\partial U_0(\vec{r}'_L)}{\partial N'} - U_0(\vec{r}'_L) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}'_L)}{\partial N'} \right] = -U_{in}(\vec{r}), \quad (\vec{r} \in L_p)$$

$$\int_L \left[ \chi(\vec{r}'_L) \frac{1}{\eta(\vec{r}'_L)} \frac{\partial U_0(\vec{r}'_L)}{\partial N} - U_0(\vec{r}'_L) \frac{1}{\eta_p(\vec{r}'_L)} \frac{\partial \chi(\vec{r}'_L)}{\partial N} \right] dL = 0, \quad (\sigma \in \Sigma).$$

и получены прямые квадратурные формулы для вычисления поля вне и внутри включения:

$$U_{\bullet\bullet}(\vec{r}) = \int_L \frac{dL'}{\eta(\vec{r}'_L)} \left[ G(\vec{r}, \vec{r}'_L) \frac{\partial U_{\bullet}(\vec{r}'_L)}{\partial N'} - U_{\bullet}(\vec{r}'_L) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}'_L)}{\partial N'} \right]; \vec{r} \in S_{\bullet}$$

$$U_p(\vec{r}) = \int_L \left[ -G_p(\vec{r}, \vec{r}'_L) \frac{1}{\eta(\vec{r}'_L)} \frac{\partial U_{\bullet}(\vec{r}'_L)}{\partial N'} + U_{\bullet}(\vec{r}'_L) \frac{1}{\eta_p(\vec{r}'_L)} \frac{\partial G_p(\vec{r}, \vec{r}'_L)}{\partial N'} \right] dL'; \quad (\vec{r} \in S_p)$$

Здесь:  $\eta(\vec{r})$ ,  $\eta_p(\vec{r})$  — значения материальных параметров вне и внутри включения,  $U_{\bullet}(\vec{r})$ ,  $U_{\bullet\bullet}(\vec{r})$  — компоненты электрического либо магнитного поля (индексы  $\bullet$  и  $\bullet\bullet$  соответствуют полному и рассеянному полю);  $\vec{N}$  — нормаль к контуру  $L$  поперечного сечения рассеивателя,  $S_{\bullet}$  и  $S_p$  — область, окружающая объект и его внутреннее пространство соответственно;  $G(\vec{r}, \vec{r}'_L)$  и  $G_p(\vec{r}, \vec{r}'_L)$  — функции Грина окружающей среды и включения соответственно;  $\chi(\vec{r}'_L)$  — определенным образом выбранные вспомогательные функции. Главная задача следующих этапов — разработка эффективного алгоритма и пакета программ для вычисления значений компонент рассеянного поля.

Поскольку многие практические задачи могут быть сведены к исследованию рассеяния волн на включениях в плоскостойких средах, — для которых, к тому же, удается создать эффективные численно-аналитические алгоритмы вычисления функции Грина и ее производных, — основное внимание в дальнейшем уделено именно такой модели регулярной среды. Особенность такого подхода состоит в сочетании использования известной процедуры построения функции Грина плоскостойкой среды и идей классического метода нулевого поля, разработанных для расчета дифракции электромагнитных волн на неоднородных телах в свободном пространстве. В рамках такого подхода разложение функции Грина объемлющей плоскостойкой среды по цилиндрическим волновым функциям совместно с использованием в качестве базисных функций на контуре включения произведений бesselовых и тригонометрических функций

позволило эффективно сформировать бесконечную СЛАУ (БСЛАУ) относительно неизвестных элементов матрицы рассеяния. Анализ свойств таких систем показывает возможность редукции последних, а их численное решение позволяет определить спектральные амплитуды рассеяния. Затем с помощью метода перевала получаются асимптотические выражения для рассеянного в дальнюю зону поля. В частности, в п. 1.1.2 рассмотрена процедура построения функции Грина произвольной плоскостной структуры, а в п.1.1.3 она же детально разобрана для случая плоского однородного слоя. Одним из основных вопросов проекционных схем решения интегральных уравнений является выбор базиса. Поэтому в п. 1.1.4 рассмотрены вопросы, связанные с разложением функции Грина и падающего поля в слое по цилиндрическим волновым функциям. Представление функции Грина разложением в интеграл Фурье приводит к необходимости вычисления спектральных амплитуд. Связь между последними и коэффициентами разложения первичного поля, определяемая элементами матрицы рассеяния, подробно рассмотрена в п. 1.1.5. В п. 1.1.6 получены "моментные" уравнения для полевых величин на границе включения (1.6.а), которые затем сведены к системам бесконечных линейных алгебраических уравнений (1.6.б), проанализированы возможности метода при частном выборе базисных функций в виде решений определенных краевых задач, что, в принципе, позволило упростить и процедуру решения.

Переформулировка граничных задач теории дифракции акустических и электромагнитных волн в виде интегральных уравнений однозначно разрешимых при любом значении волнового числа может быть осуществлена многими способами.

Поскольку в п.1.1 подробно рассмотрен один из таких вариантов, в п.1.2 в более лаконичной форме рассмотрен другой возможный путь получения модифицированных уравнений метода нулевого поля и их решения, основанного на идеях регуляризации по А.Н. Тихонову. Основной смысл последних состоит в построении так называемого регуляризирующего алгоритма (РА) как способа приближенного решения соответствующей некорректной задачи. В таком случае рассматриваемую проблему можно свести к задаче минимизации с

использованием необходимых условий экстремума. В соответствии с логикой решения исходной задачи о дифракции электромагнитного поля на включении в плоскостной среде в п. 1.2.1 получена система интегро-дифференциальных уравнений модифицированного метода нулевого поля относительно компоненты неизвестного поля и его нормальной производной, включающая функцию Грина неоднородности:

$$\int_L \frac{1}{\eta(\vec{r}_L)} \left( G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial U_0(\vec{r}_L)}{\partial N'} - U_0(\vec{r}_L) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_L)}{\partial N'} \right) dL' \\ = U_{in}(\vec{r}), \quad (\vec{r} \in L_p).$$

$$\int_L \left( \frac{1}{\eta(\vec{r}_L)} G_p(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial U_0(\vec{r}_L)}{\partial N'} - U_0(\vec{r}_L) \frac{1}{\eta(\vec{r}_L)} \frac{\partial G_p(\vec{r}, \vec{r}_L)}{\partial N'} \right) dL' \\ = 0, \quad (\vec{r} \in L_p),$$

которые затем сведены к системе интегральных уравнений типа Фредгольма первого рода относительно некоторых вспомогательных функций. В п. 1.2.2 для отыскания ее решения использован метод регуляризации Тихонова. Уравнения Эйлера для получаемой вариационной задачи приняли форму системы двух интегральных уравнений Фредгольма второго рода. Их дискретизация, проведенная в п. 1.2.3, приводит к системе линейных алгебраических уравнений второго рода (СЛАУ II) либо к СЛАУ I с эрмитовой положительно определенной матрицей коэффициентов, что гарантирует существование и единственность решения этой системы и позволяет использовать для ее численного решения эффективные итерационные методы. В п. 1.2.4 дано описание ключевых моментов вычислительного алгоритма, реализующего предложенную схему решения, а также приведен другой подход к решению задачи, основанный, в отличие от предыдущего, на дискретизации исходных интегральных уравнений, а затем применении к полученной СЛАУ I процедуры регуляризации. Получаемая в итоге СЛАУ II, так же, как и в предыдущем случае, допускает эффективное численное решение.

Наконец, в п. 1.3 отражены вопросы, связанные с

вычислительной реализацией предложенных схем решения, приведены результаты вычислительных экспериментов и физического анализа процессов рассеяния электромагнитных волн двумерными телами, расположенными в слоистых средах.

Полученные результаты представляют интерес для решения проблем микроэлектроники, связанных с разработкой новых узлов мм. и субмм. диапазонов волн на основе открытых волноведущих структур, дальнейшего совершенствования радиоволновых методов дистанционного зондирования в геофизике и дефектоскопии.

В главе 2 "Применение электродинамических моделей объектов и полей для решения обратных задач рассеяния" развит метод решения обратных задач, основанный на использовании модифицированного борновского приближения и итерационной процедуре Ньютона-Канторовича. Ключевым элементом предложенной процедуры является линеаризованное соотношение между значением информативного параметра  $U$  и поправками  $\hat{\eta}$  и  $\hat{\chi}$ , представляющими собой разность между точным и оценочным профилями тензорных диэлектрической и магнитной проницаемостей.

В п. 2.1 дано описание физической модели и соответствующей прямой задачи электродинамики, лежащих в основе предложенной процедуры обращения (п.2.1.1). Преимущество такой обобщенной постановки не только в расширении класса допустимых, к рассмотрению практических задач, но и в возможности продемонстрировать основные особенности предлагаемого метода в наиболее общем виде.

Зондируемое тело определено достаточно общим образом и может быть неоднородно, анизотропно, иметь достаточно общую форму и обладать потерями. Оно занимает трехмерную область  $V_p$  и характеризуется распределениями тензоров диэлектрической и магнитной проницаемостей;  $\hat{\epsilon}_p(\vec{R})$  и  $\hat{\mu}_p(\vec{R})$ ,  $\vec{R} = (x, y, z)$ . Внешняя область  $V_e$  заполнена изотропным неоднородным пространством (с потерями или без), характеризуемым скалярными функциями:  $\epsilon(\vec{R})$ ,  $\mu(\vec{R})$ , и, возможно, частично ограниченным идеально проводящей поверхностью  $S_e$ . Эта поверхность может представлять стенки волноводной структуры, содержащей

зондируемое тело; в частности,  $S_e$  может отсутствовать, тогда граница  $V_e$  совпадает с границей  $V_p$ . Зависимость  $\epsilon$ ,  $\mu$  от  $\vec{R}$  предполагается соответствующей некоторым объектам с известными свойствами (например, элементы экспериментального оборудования), влияние которых не может не учитываться, или объектам, представляющим собой некоторую неоднородность окружающего пространства. В том случае, если последние объекты однородны, функции  $\epsilon(\vec{R})$ ,  $\mu(\vec{R})$  принимают постоянные значения. Источники зондирующей волны расположены в области  $V_e$  на конечном или бесконечном расстоянии.

Следующий этап (п. 2.1.2) представляет собой выведение ключевого соотношения, дающего зависимость базовых физических параметров зондируемого тела от информативного параметра рассеянного поля, который измеряется в процессе эксперимента. Эта зависимость вообще говоря, нелинейна и имеет вид:

$$\vec{E}^{sc}(\vec{R}) = \vec{E}_a^{sc}(\vec{R}) - (1/k_0 c / 4\pi) \int_{V_p} \{ \hat{G}_{ee}(\vec{R}, \vec{R}') \hat{\eta}(\vec{R}') \vec{E}(\vec{R}') + G_{em}(\vec{R}, \vec{R}') \hat{\chi}(\vec{R}') \vec{H}(\vec{R}') \} d\vec{R}'.$$

Однако, если  $\hat{\chi}$  и  $\hat{\eta}$  достаточно малы, последняя зависимость может быть приведена к линейному виду [1,9]:

$$U = U_a - L\hat{\eta} - M\hat{\chi}.$$

Здесь  $L, M$  - линейные функционалы в пространстве тензорных функций определенные как:

$$L\hat{\eta} = \int_{V_p} \vec{S}(\vec{R}') \cdot \hat{\eta}(\vec{R}') \cdot \vec{E}_a(\vec{R}') dV'$$

$$M\hat{\chi} = \int_{V_p} \vec{T}(\vec{R}') \cdot \hat{\chi}(\vec{R}') \cdot \vec{H}_a(\vec{R}') dV'$$

$$U_a = \phi E_a^{sc}(\vec{R}),$$

$V_p$  - область пространства, занимаемая исследуемым объектом,

$\vec{S}, \vec{T}$  - векторные функции, определяемые выражениями:

$$\frac{4\pi}{ik_0 c} \vec{S}(\vec{R}') = \phi \hat{G}_{ee}(\vec{R}, \vec{R}') = \sum_{p, q=1}^3 \hat{\alpha}_q \phi [ \hat{\alpha}_p \cdot \hat{G}_{ee}^{pq}(\vec{R}, \vec{R}') ],$$

$$\frac{4\pi}{ik^2 c} \vec{T}(\vec{R}') = \Phi \hat{G}_{em}(\vec{R}, \vec{R}') = \sum_{p,q=1}^3 \vec{e}_q \Phi(\vec{e}_p \cdot G_{em}^{pq}(\vec{R}, \vec{R}')),$$

$\vec{e}_p$  и  $\vec{e}_q$  ( $p, q=1, 2, 3$ ) обозначают множество базисных векторов координатной системы  $x, y, z$ .  $G_{e\beta}^{pq}$  ( $\beta=e, m$ ) — компоненты тензора Грина  $G_{e\beta}$  в базисе  $(\vec{e}_p)_{p=1}^3$ :

$$G_{e\beta}^{pq}(\vec{R}, \vec{R}') = \vec{e}_p \cdot \hat{G}_{e\beta}(\vec{R}, \vec{R}') \cdot \vec{e}_q.$$

Далее в п. 2.1.3 описан общий вид процедуры восстановления неизвестных функций.

Поскольку в любом эксперименте присутствуют ошибки измерений, процедура обращения построена на основе метода регуляризации А.Н. Тихонова. В соответствии с этим, исходная задача сведена к отысканию минимума сглаживающего функционала

$$F(\hat{\eta}, \hat{\chi}) = f(\hat{\eta}, \hat{\chi}) + \alpha \Omega(\hat{\eta}, \hat{\chi}),$$

где:

$$f(\hat{\eta}, \hat{\chi}) = \sum_{j=1}^N w_j |U_a^{(j)} - U_a^{(j)} + L^{(j)} \hat{\eta} + M^{(j)} \hat{\chi}|^2,$$

$$\Omega(\hat{\eta}, \hat{\chi})$$

$$= \sum_{m,n=1}^3 \int_V w_{mn}(\vec{R}) |\eta_{mn}(\vec{R})|^2 dV + \sum_{m,n=1}^3 \int_V v_{mn}(\vec{R}) |\chi_{mn}(\vec{R})|^2 dV,$$

$w_j$  и  $w_{mn}$ ,  $v_{mn}$  — некоторые положительные весовые коэффициенты и функции соответственно,  $\alpha > 0$  — параметр регуляризации, который играет роль неопределенного множителя Лагранжа.  $L^{(j)}, M^{(j)}$ ,  $U_a^{(j)}$  относятся к условиям  $j$ -го эксперимента. Функционал  $f$  дает отклонение смоделированного множества значений информативных параметров  $((U_a^{(j)} + L^{(j)} \hat{\eta} + M^{(j)} \hat{\chi})_{j=1}^N)$  от экспериментально зарегистрированных, в то время как стабилизирующий функционал  $\Omega(\hat{\eta}, \hat{\chi})$  отражает тот факт, что неизвестные функции  $\hat{\eta}, \hat{\chi}$  должны варьироваться в определенных пределах. Фундаментальная задача, состоящая в минимизации функционала  $F(\hat{\eta}, \hat{\chi})$  в таком случае может быть решена аналитически. Это связано с тем, что уравнения Эйлера сводятся к системе интегральных уравнений Фредгольма второго рода с

вырожденными ядрами, решение которой единственно и может быть найдено в явном виде. Тогда процедура Ньютона-Канторовича по восстановлению  $h(\vec{R}) = \text{col}[\hat{\epsilon}_p(\vec{R}), \hat{\mu}_p(\vec{R})]$  будет выглядеть следующим образом:

$$h^{(0)} = h_a,$$

$$h^{(l+1)} = h^{(l)} + A h^{(l)}, \quad l=0,1,2,\dots$$

где  $h^{(l)} = \text{col}[\hat{\epsilon}_p^{(l)}, \hat{\mu}_p^{(l)}]$ ,  $l$  - номер итерации и  $h^{(0)}$  первое приближение для тензорных параметров материала зондируемого тела.

Как указывалось ранее, применяемая модель зондируемого тела имеет достаточно общий характер в том смысле, что предполагает тензорный характер магнитной и электрической проницаемостей, которые характеризуются в этом случае девятью неизвестными компонентами. Когда же доступна какая-либо априорная информация о виде этих тензоров, она может быть использована для сокращения количества вычислений в процессе обращения. Формально, эта информация вводит дополнительные ограничения на класс допустимых тензорных функций, в котором мы ищем минимум сглаживающего функционала; кроме этого соответствующим образом необходимо будет изменить стабилизирующий функционал. В таком случае необходимы некоторые модификации вышеописанной процедуры. Принципиальные особенности и изменения, которые необходимо внести в общую схему, для нескольких частных случаев, имеющих практический интерес, приведены в п.2.1.4, где сначала рассмотрен случай, когда некоторые из компонент тензоров  $\hat{\epsilon}_p$ ,  $\hat{\mu}_p$  принимают постоянные, причем известные, значения. Затем рассмотрен случай изотропного зондируемого тела и, наконец, ситуация, когда один из материальных параметров изотропного зондируемого тела, а именно  $\hat{\mu}_p(\vec{R})$ , известен. Наконец, в п. 2.1.5 рассмотрены физические и математические аспекты процедуры обращения данных для скалярного акустического поля и некоторые возможности использования скалярной задачи.

В п. 2.2 предложенный подход развит применительно к задаче восстановления электрофизических свойств плоскострои-

той структуры со статистически неровной поверхностью. Такая задача имеет важное прикладное значение в лазерной оптике, физике тонких пленок, дистанционном зондировании. Известно, что электромагнитное излучение, рассеянное средой с шероховатой границей, несет в себе информацию не только о статистических свойствах шероховатостей, но и о внутренней структуре подстилающей среды. Этот факт и составляет физический базис для создания алгоритма восстановления. В п.2.2.1 представлена постановка базовой прямой задачи, а в п.2.2.2 исходная проблема сведена к задаче для бистатистических сечений рассеяния — безразмерных величин, определяющих среднюю мощность, переносимую соответствующим образом поляризованной компонентой некогерентной составляющей рассеяного поля. В п.2.2.3 подробно рассмотрена предлагаемая итерационная процедура обращения данных рассеяния при зондировании в частотной области. Здесь, так же как и в предыдущих случаях существенным образом используется квадратичный характер сглаживающего функционала, что позволяет провести его минимизацию аналитически. В п.2.2.4 приведены некоторые результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие работоспособность предложенной схемы, а также рекомендации по ее практическому использованию.

Предложенная выше схема восстановления профиля диэлектрической и магнитной проницаемостей неоднородных объектов может быть с успехом использована и в случае, когда информативным параметром служит поляризационное состояние падающей волны. Поскольку общая схема восстановления была достаточно подробно описана выше, в п.2.3 основное внимание уделено особенностям, связанным с использованием поляризационных параметров. В п.2.3.1 подробно описана формальная постановка исходной обратной задачи, когда в качестве модели зондируемого тела выбран неоднородный в одном направлении слой. Основная цель состоит в разработке эффективного алгоритма восстановления параметров изотропного слоя с помощью поляризационного зондирования. Главное отличие предлагаемого подхода заключается в том, что именно изменяющееся состояние поляризации падающего поля является источником исходной информации для процедуры восстановления.

Такая постановка обратной задачи представляется весьма важной с практической точки зрения, поскольку все измерения могут быть проведены на одной частоте. Другое преимущество состоит в относительной простоте и высокой эффективности алгоритма, что позволяет использовать его в реальном масштабе времени. В п. 2.3.2. рассмотрено решение вспомогательной прямой задачи и алгоритм обращения данных рассеяния, а в п. 2.3.3 предложенная общая схема использована для двух моделей зондируемых сред - радиально неоднородного кругового цилиндра и плоского неоднородного слоя, лежащего на однородной подложке. В п.2.3.4 приведены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие работоспособность разработанного алгоритма.

Основная цель п.2.4 - проиллюстрировать возможность использования предложенной общей схемы восстановления, основанной на использовании модифицированного борновского приближения и итерационном методе Ньютона-Канторовича, для восстановления неизвестного профиля диэлектрической проницаемости анизотропных объектов. Поскольку постановка такой задачи в общем случае была подробно рассмотрена в п.2.1, главное внимание теперь уделено вопросам практической реализации предложенной схемы для случая одноосной среды.

Многие, как прямые, так и обратные задачи радиофизики, антенной техники, радиолокации имеют одну общую черту - речь идет об исследовании взаимодействия электромагнитных полей с различными объектами в предположении, что проникновением поля внутрь рассеивателя можно пренебречь. Поэтому встает вопрос о разумном упрощении постановки задачи. Одним из эффективных методов упрощения краевой задачи для электромагнитного поля в случае хорошо проводящих поверхностей является метод эквивалентных граничных условий. Во внешних задачах такой подход позволяет исключить из рассмотрения внутреннюю область рассеивателя заданием на его поверхности соответствующих граничных условий, классическим примером которых служит условие Шукина-Леонтовича. Понятие импеданса в граничных условиях такого типа имеет весьма широкий физический смысл, поскольку описывает связь между компонентами полей на границе тела, позволяя тем самым с

помощью относительно простых математических моделей решать задачи анализа и синтеза сложных электродинамических систем.

Импедансное граничное условие может быть вполне строго выведено лишь для случая падения плоской волны на плоскую поверхность хорошего проводника. Однако, при выполнении определенных ограничений, накладываемых на параметры задачи, это условие с достаточной точностью может быть использовано и для криволинейных поверхностей, а также для волн с неплоским фазовым фронтом. Результаты работ [7,10,22] послужили отправным пунктом дальнейших исследований. При этом оказалось, что моделирование электрических свойств поверхностей различных материальных сред с помощью эквивалентного импеданса позволяет весьма эффективно найти решение многих задач. Аппарат эквивалентных граничных условий был с успехом использован в задачах о распространении волн над поверхностью Земли, низкотемпературной радиофизике, задачах о взаимодействии электромагнитного поля с диэлектриками, периодическими структурами и дифракционными решетками. В статистической радиофизике широкое распространение получили обобщенные импедансные граничные условия, дающие нелокальную связь тангенциальных компонент электрического и магнитного полей. Полученные в этих направлениях результаты послужили основой для построения решения качественно новых и, соответственно, более сложных электродинамических задач, относящихся к дистанционному определению свойств криволинейных поверхностей. Поэтому в п. 2.5 предложено решение задачи восстановления поверхностного импеданса объектов с криволинейными границами. Основу численного алгоритма решения задачи, как и ранее, составила итерационная схема Ньютона-Канторовича. Основные особенности предложенной схемы восстановления продемонстрированы на примере обратной задачи восстановления углового распределения эквивалентного поверхностного импеданса эллиптического цилиндра.

Полученные на основе разработанных алгоритмов результаты вычислительных экспериментов проанализированы с точки зрения возможности их практического использования в различных областях науки и технических приложениях.

В главе 3 основные идеи принципа максимума Понтрягина обобщены и перенесены на новую физическую проблему — восстановления неизвестного профиля диэлектрической проницаемости неоднородных сред.

Возможность выбора в качестве информативных параметров различных физических величин (частотных либо угломестных зависимостей комплексной амплитуды либо мощности рассеянного поля) и необходимость решения разнообразных в физическом плане (а, следовательно, и в математической постановке) задач потребовали создания нескольких базовых алгоритмов в рамках общей идеи принципа максимума. Поэтому в первом разделе на примере цилиндрического рассеивателя рассмотрены возможности использования принципа максимума для минимизации функционала "невязки". Сам функционал выбран таким же, как и в задачах второй главы. Возникающая при этом задача в теории оптимального управления классифицируется как задача Майера со свободным правым концом. Для решения возникающей далее задачи Коши существует достаточно много методов, среди которых следует выделить метод Крылова-Черноусько. Итерационный характер этого метода и преимущества, связанные с удобством машинной реализации, позволили создать его модификацию, ориентированную на решение данного класса задач, и вычислительный алгоритм, ее реализующий.

Случай использования функционала невязки общего вида, содержащего помимо искомой функции и ее первую производную,

$$\Phi(\eta) = \Phi_0(\eta) + \lambda \Phi_c(\eta) + \Phi_\beta(\eta).$$

рассмотрен в п. 3.2.

Здесь:

$$\Phi_0(\eta) = \sum_{k=1}^N W_k (|z_k|^2 - a_k^2)^2;$$

$$\Phi_c(\eta) = \int_0^a (W_\alpha |\eta(r)|^2 + W_\beta |\eta'(r)|^2) dr;$$

$W_k, W_\alpha, W_\beta$  — неотрицательные, весовые коэффициенты, параметр  $\lambda > 0$ . Диэлектрическая проницаемость, как правило, удовлетворяет естественным ограничениям. В рамках теории оптимального управления последние могут трактоваться как

ограничения на "фазовые траектории". Для преодоления трудностей, связанных с наличием этих ограничений, в рассмотрение введены функции и функционал штрафа -  $\Phi[\eta]$ . Известно, что диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$  удовлетворяет естественным физическим ограничениям;  $\epsilon' = \text{Re } \epsilon \geq 1$ ;  $\epsilon'' = \text{Im } \epsilon \geq 0$ . Поскольку диэлектрическая проницаемость исследуемого тела представляется в виде  $\epsilon(\Gamma) = \epsilon^0(\Gamma) + \eta(\Gamma)$ , то имеем:

$$\epsilon^0(\Gamma) + \eta(\Gamma) - 1 \geq 0,$$

$$\epsilon''(\Gamma) + \eta''(\Gamma) \geq 0,$$

где  $\epsilon^0(\Gamma) = \epsilon^0(\Gamma) + j\epsilon''(\Gamma)$  - диэлектрическая проницаемость "пробного" тела. В терминах теории оптимального управления, методами которой решается задача, последние неравенства являются ограничениями на "фазовые траектории" - какими в данном случае являются функции  $\eta'(\Gamma)$ ,  $\eta''(\Gamma)$ . Для снятия данных ограничений введены функции штрафа  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  и соответственно функционал штрафа  $\Phi[\eta]$  по формулам:

$$f_1(x) = \begin{cases} W_1(x-1)^2, & \text{при } x < 1 \\ 0, & \text{при } x \geq 1. \end{cases} \quad f_2(x) = \begin{cases} W_2 x^2, & \text{при } x < 0 \\ 0, & \text{при } x \geq 0. \end{cases}$$

где  $W_1, W_2$  - положительные константы,

$$\Phi[\eta] = \int_0^1 [f_1(\epsilon^0 + \eta(\Gamma)) + f_2(\epsilon'' + \eta''(\Gamma))] d\Gamma.$$

Используемые в этих разделах в качестве информативных параметров частотные либо угловые зависимости мощности рассеянного в дальнюю зону поля несколько усложняя процедуру решения, в то же время, существенно расширяют возможности практической реализации алгоритма. Обеспечивая корректность задачи минимизации по Тихонову, наличие производной вносит, тем не менее, существенные осложнения в алгоритм решения. Для преодоления этих осложнений предложено отыскивать вместо неизвестной функции ее первую производную. Разработанный

подход послужил основой для создания итерационного вычислительного алгоритма.

Наконец, п. 3.3 посвящен исследованию возможностей прямых методов теории оптимизации для решения обратных задач. В итоге предложен адаптивный численный алгоритм, опирающийся на использование классических градиентных методов и метода Гольдфарба. Особенность последнего заключается в использовании изменяющейся метрики. Приведены результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие богатые возможности применения методов теории оптимизации для решения обратных задач.

Заключение содержит итоговые результаты исследований: дифракции волн на неоднородностях в плоскослоистых средах; возможностей развитых автором методов и алгоритмов решения обратных задач рассеяния, а также рекомендации относительно перспектив дальнейших исследований.

Таким образом, в диссертации заложены основы нового научного направления - использования численно-аналитических методов радиофизики, а также новых радиофизических моделей объектов и полей для решения прикладных задач неразрушающего контроля промышленных изделий и дистанционного зондирования природных сред.

Список основных публикаций автора, отражающих содержание диссертации

1. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique. Inverse Problems, vol.10, N1, pp.39-54, Feb. 1994.
2. Zhuck N.P., Batrakov D.O. Inverse Scattering Problem in the Polarization Parameters Domain for Isotropic Layered Media: Solution via Newton-Kantorovich Iterative Technique// Journal of Electromagnetic Waves and Applications.-June 1994.- Vol. 8.- No 6.- pp.759-779.
3. Батраков Д.О., Жук Н.П. Итерационное решение обратной задачи зондирования неоднородных сред в области значений поляризационных параметров// Радиотехника и электроника. - 1993.- т.38.-№6.- с.1106-1114.
4. Батраков Д.О., Будко Н.В., Жук Н.П. Интерпретация данных зондирования слоистых структур на основе решения обратной задачи рассеяния электромагнитных волн I.// Журнал технической физики.- 1994.- т.64, N1, сс. 152-161.
5. Zhuck N. P.; Batrakov D. O. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method// Physical Review B. - 1995.- Vol.51. - N 23.- June 15.- PP. 17073-17080.
6. Батраков Д.О., Жук Н.П. Метод радиоволнового контроля слоистонеоднородных диэлектриков, использующий численное решение обратной задачи рассеяния в области значений поляризационных параметров// Дефектоскопия.-1994.- N 6.- с.82-87.
7. Батраков Д.О., Звягинцев А.А. Дифракция на эллиптическом импедансном цилиндре.//Известия высших учебных заведений, Радиофизика.- 1989.- т.32.-№9.-с.1125-1131.
8. Батраков Д.О., Шульга С.Н., Васильев А.Б., Мякинкова Л.В. Применение E-импульса для зондирования тела под поверхностью среды.// Радиотехника и электроника.-М.- 1991.- Т.36.- №2.- с.303-307.
9. Batrakov D. O., Zhuck N.P. Remote Sensing Problem Solution Via the Newton-Kantorovich Iterative Technique.//

Turkish Journal of PHYSICS.- 1995. - Vol. 19.- N. 8.-  
PP.952-957.

10. Батраков Д.О. Анализ волновых процессов в присутствии импедансных цилиндрических поверхностей. / Препринт №6.- ИРЭ АН УССР.- Харьков.-1986. - с.7-11.

11. Batrakov D. O., Zhuck N. P., Raport D. A., M'akin'kova L.V. Inverse Problems of Scattering: capabilities and prospects in defectoscopy and technology. // Proceedings of MICC-90, ELSEVIER Applied Science, London and New-York.- 1990.- pp.1211- 1216.

12. Batrakov D.O., Shulga S.N., Yarovoy A.G., Vasil'ev A.B., M'akin'kova L. V., Rapoport D.A. Models of microwave scattering by buried bodies in multilayered structures and their application to nondestructive testing. // Proceedings of MICC-90, ELSEVIER Applied Science, London and New-York.- 1990.- pp.1353-1357.

13. Batrakov D.O., Zhuck N.P. The inverse scattering problem in the polarization parameters domain: solution via Newton-Kantorovich iterative technique. // Proceedings of the IEEE-Anten. and Propag. Society International Symposium. vol.2, IEEE Catalog N 92 CH. 3178-1, Library of Congress N 90-640 397.- pp. 841-844.

14. Batrakov D. O., Budko N. V., Zhuck N. P. Iterative inversion methods in the frequency, angular and polarization parameter domains: comparison of the numerical effectiveness // Proceedings of URSI International Symposium on Electromagnetic theory, Russia. -1995. -PP.139-142.

15. Batrakov D.O., Tretyakov O.A., Zhuck N.P. Variational method for material parameters reconstruction. // Proceedings of International semin. MMET 90, Alushta. - 1990.- p.180-182.

16. Batrakov D.O., Zvyagintzev A.A. Direct and Inverse Scattering Problems for Impedance Bodies. // Proceedings of IY International Seminar MMET'91, Test-Radio, Kharkov.- 1991.- pp.268-274.

17. Batrakov D.O., Zhuck N.P. The Solution of Inverse Scattering Problems Using Polarisation Measurements. // Proceedings of IY International Seminar MMET'91, Test-

- Radio, Kharkov.- 1991.- pp.264-267.
18. Батраков Д.О., Звягинцев А.А. Численный анализ поляризационных свойств полей, рассеянных импедансными цилиндрическими поверхностями. // Радиотехника. -г. Харьков. - вып.82.- 1987.- с.92-96.
19. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Inverse Problem for a Multilayered Slab with Corrugated Bound. // URSI-MMET 94 Conference Proceedings.- 7-10 Sept.- 1994, Kharkov, Ukraine.- pp.44-49.
20. Batrakov D.O., Bagatskaya O.V., Shulga S.N., Zhuck N.P. Scattering of Electromagnetic Waves from an Anisotropic Inclusion Embedded in the Hyrotropic Halfspace. // URSI - MMET 94 Conference Proceedings, 7-10 Sept.- 1994.- Kharkov, Ukraine.- pp.30-35.
21. Batrakov D.O., Zhuck N.P. Inversion Method for Layered Medium with a Rough Boundary. / Progress In Electromagnetic Research Symposium, Abstracts, 11-15 July 1994, Huis ter Duin, Noordwijk, the Netherlands., p.521, также опубликовано под тем же названием в трудах симпозиума на CD-ROM, pp. 115-121.
22. Батраков Д.О., Звягинцев А.А. Расчет полей в дальней зоне; рассеянных криволинейными импедансными поверхностями // Вест. ХГУ.-1986.- №285, Радиопизика и электроника.-с.83-86.
23. Батраков Д.О., Жук Н.П. Двумерная задача рассеяния на включении в плоскостной среде: решение методом нулевого поля. // Депонирована в ГНТБ Украины, 22.02.1994, No 381 - Ук 94.- 32с.
24. Батраков Д.О., Тарасов М.М. Об одном алгоритме решения обратной задачи рассеяния, основанном на использовании принципа максимума Понтрягина. // Депонирована в ГНТБ Украины 16.02.1995, No373-Ук95.- 15с.
25. Батраков Д.О., Тарасов М.М. Решение обратной задачи рассеяния, основанное на использовании полного стабилизирующего функционала // Депонирована в ГНТБ Украины, 11.05.95, N1135-Ук 95, 12с.
26. Батраков Д.О., Жук Н.П. Вариационный метод восстановления параметров неоднородных объектов. Деп. в ВИНТИ, 08.05.90.- N 2476-B90.- 16с.

27. Батраков Д. О., Жук Н. П. Восстановление параметров радиально-неоднородного кругового цилиндра./Деп. в ВИНТИ, 16.01.91.- N 281-В91.-16с.
28. Батраков Д. О., Будко Н.В., Жук Н. П. Численный анализ решения двумерной задачи рассеяния на включениях в плоскостной среде модифицированным методом нулевого поля / Деп. в ГНТБ Украины, 26.05.95, N1282-Ук 95, 21с.
29. Batrakov D.O., Budko N.V., Zhuck N.P. The inverse scattering problem for a radially inhomogeneous slab: solution via the Newton-Kantorovich technique// Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, Taiwan, China.- 1993,- Rep.No.FTS-OV7R-08,- PP. 1-5.

115521

Батраков Д.О. Розробка радіофізичних моделей стосовно до проблеми зондування неоднорідних середовищ.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика, Харківський державний університет, Харків, 1995.

Захищається 47 наукових праць, які вміщують результати теоретичних та чисельних досліджень електродинамічних властивостей полів, розсіяних вкрапленнями у плоскошаруватих середовищах, а також методи та обчислювальні алгоритми для рішення обернених задач розсіяння. Встановлена можливість використання нового фізико-математичного принципу відновлення параметрів неоднорідних середовищ за допомогою зондуючого поля із змінним поляризаційним станом. Запропоновано новий метод позаконтактного відновлення властивостей плоскошаруватого середовища на основі даних некогерентного розсіяння.

Ключові слова:

обернені задачі, дифракція, теорія розсіяння, поляризація.

Batrakov D.O. Development of the radiophysics models according to the problem of remote sensing of inhomogeneous medium.

Dissertation for receiving the doctor of science degree in the field of 01.04.03 – radiophysics, Kharkov state university, Kharkov, 1995.

The results of 47 scientific papers are discussed. Last ones include theoretical and numerical investigations of the electrodynamic properties of fields scattered by inclusions in the plane-layered medium, and also methods and numerical algorithms for inverse problem solving. Possibility of employment the new principle of the material parameter reconstruction via sensing field with the varying polarization state is established. A new method of the noncontact evaluation of the plane-layered structure properties via the non-coherent scattered data set is proposed.

Подп. к печ. 23.10.95. Формат 60 x 84 I/16.  
Объем 2,0 уч.-изд.л. Тираж 100. Заказ 472.

---

Участок оперативной печати Харьковского ГАУ.

446021

AB 33.327