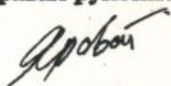


Харьковский государственный университет

На правах рукописи

ЯРОВОЙ Александр Георгиевич



**РАССЕЯНИЕ ВОЛН И РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ ПЛОСКОСЛОИСТОЙ СРЕДЫ**

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 - 1994



00778742 (Z)

Дисертація являється рукописом.

Робота виконана в Харківському державному університеті

Научные консультанти:

- доктор фізико-математических наук, професор ТРЕТЬЯКОВ ОЛЕГ АЛЕКСАНДРОВИЧ;
- доктор фізико-математических наук ЖУК НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ.

Официальные оппоненты:

- доктор фізико-математических наук, професор КИРИЛЕНКО АНАТОЛИЙ АФАНАСЬЕВИЧ;
- доктор фізико-математических наук, професор ЗАГОРОДНИЙ АНАТОЛИЙ ГЛЕБОВИЧ;
- доктор фізико-математических наук, професор НАЗАРЧУК ЗИНОВИЙ ТЕОДОРОВИЧ.

Ведущая организация - Радиоастрономический институт НАН Украины, г. Харьков.

Защита состоится "7" октября 1994 г. в 14⁰⁰ час. на заседании специализированного совета Д02.01.07 Харьковского государственного университета (310077, г. Харьков, пл. Свободы, 4, ауд. III-9).

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

Автореферат разослан "26" сентября 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Чеботарев В.И.

Актуальность темы диссертации. Теоретическое исследование рассеяния акустических и электромагнитных волн на неоднородностях плоскостойких сред представляет значительный интерес для обширного круга прикладных задач современной физики. Учитывая специфику конкретных видов волновых полей и частотных диапазонов, перечислим некоторые из них. Так, в функциональных устройствах миллиметрового, субмиллиметрового и инфракрасного диапазонов электромагнитных волн широко применяются волноводные системы, простейшей моделью которых может служить плоско-слоистая диэлектрическая среда. В связи с этим, исследование рассеяния собственных мод такой среды на неоднородностях различного типа и выявление качественных и количественных закономерностей этого процесса необходимо для совершенствования существующих устройств и разработки новых.

В радиолокации и радиометрии окружающей среды информация о свойствах подстилающей среды извлекается из электромагнитного поля, отраженного от подстилающих покровов или излученного ими. Земные покровы представляют собой весьма разнообразные с электродинамической точки зрения структуры, для которых характерна электрическая и температурная неоднородность по глубине, наличие неровностей поверхности и объемных возмущений материальных параметров среды. Близкой к реальности моделью подстилающих покровов может служить плоскослоистое полупространство со статистически неровными границами и возмущениями диэлектрической проницаемости.

В дефектоскопии при поиске дефектов в покрытиях сложных металлodieлектрических структур, при радиоволновом контроле и толщинометрии полимерных композиционных материалов и в геофизике при поиске рудных аномалий и залежей других полезных ископаемых сталкиваются с необходимостью решения задачи дифракции на телах, погруженных в слоистую среду. Неоднородность вмещающей среды при этом является существенным фактором, т.к. приводит не только к изменению (по сравнению со свободным пространством) возбуждающего поля, но и к изменению самих рассеивающих свойств тела.

В акустике океана при решении проблем дальней подводной связи приходится учитывать рассеяние звуковых волн, распрост-

рающихся в подводном звуковом канале, на подводных течениях, косяках рыб и других объектах. В теоретическом плане подобные задачи сводятся к дифракции скалярных волн на проницаемых телах в слоистой среде. Спецификой данного круга задач является соотношений длины волны звуковых колебаний и характерных размеров рассеивателей и волноведущих каналов.

Задачи интегральной оптики, микроволновой, лазерной техники диктуют необходимость изучения свойств поверхностей конденсированных сред и физических свойств переходного слоя на границе раздела, в частности влияния тонких покрытий на оптические, электротехнические и механические свойства поверхностей твердых тел. В исследованиях поверхности одним из основных методов являются спектроскопия поверхностных поляритонов и метод светорассеяния. При обработке получаемой с помощью первого метода информации необходимо учитывать наличие микронеоднородностей границ твердых тел, т.к. многократные рассеяния поляритона на этих нерегулярностях приводят к изменению его дисперсионной зависимости и увеличению затухания за счет радиационных потерь. Метод светорассеяния, используемый для определения микрорельефа твердых тел, непосредственно основывается на связи характеристик неровной поверхности и рассеянного ею поля.

Таким образом, задача рассеяния волн на неоднородностях плоскостной среды возникает как модельная задача в разнообразных областях прикладной физики. Анализ возможных приложений позволяет выделить следующие основные типы неоднородностей: идеально проводящие (отражающие) тела; проницаемые для волн тела (например, диэлектрическое тело в задаче рассеяния электромагнитных волн); случайные флуктуации материальных параметров среды; детерминированные или случайные неровности границы раздела. Во всех приложениях пространственная неоднородность среды существенно влияет на процесс рассеяния волн на неоднородностях, приводя в ряде случаев (например, в открытых волноводах) к качественно новым (по сравнению с однородной вмещающей средой) явлениям.

Вместе с тем полученные к настоящему времени решения задач дифракции, в основном, относятся к ситуации, когда рассеиватель находится в однородном (свободном) пространстве или на границе раздела двух однородных полупространств. Что же касается рассеяния волн на неоднородностях слоистых сред, то ос-

новые результаты в этой области получены, в основном, для идеально или хорошо проводящих рассеивателей и для флуктуаций материальных параметров среды. Для этого круга задач разработаны численные и аналитические методы решения, созданы эффективные алгоритмы расчета и получены достоверные результаты. Что же касается рассеяния волн на проницаемых телах, расположенных в слоистой среде с малыми омическими потерями, то полученные здесь результаты относятся либо к малым по сравнению с длиной волны телам, либо к круговым цилиндрам.

Рассеяние волн и радиотеплового излучения на статистически неровных границах раздела плоскостойких сред было исследовано с помощью уравнений переноса излучения в сочетании с методом касательной плоскости. Такой подход имеет ограниченную область применимости: среда должна быть, во-первых, кусочно-однородной и, во-вторых, с очень толстыми по сравнению с длиной волны слоями, а неровности должны быть очень пологими. С помощью качественно другого подхода - метода малых возмущений - были получены отдельные результаты для сечений рассеяния статистически неровных идеально отражающих границ и поверхностей раздела в кусочно-однородной среде.

Таким образом, вопросы рассеяния волн и радиотеплового излучения на неоднородностях плоскостойких сред является актуальным как с точки зрения многочисленных приложений, так и в чисто научном плане.

Цель настоящей диссертационной работы - дальнейшее развитие теории рассеяния волн и радиотеплового излучения на проницаемых неоднородностях, расположенных в плоскостойкой среде. Достижение этой цели предполагает решение следующих задач:

-развитие методов аналитического исследования рассматриваемого круга задач и создание на этой базе эффективных средств численного анализа;

-разработка программного обеспечения, основанного на предложенных алгоритмах;

-проведение численного анализа и исследование общих физических закономерностей рассеяния волн и радиотеплового излучения на телах и неровных границах раздела слоистых сред, а также детальный анализ особенностей, характерных для возникающих в приложениях ситуаций.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том,

что автором рассмотрен малоизученный класс задач дифракции, основной чертой которых является плоскостойкий характер среды, вмещающей рассеиватель. При этом последовательно учитывалось влияние пространственной неоднородности среды на рассеивающие свойства препятствия. В диссертации развиты методы исследования этого класса задач, в том числе разработаны прямые численные методы решения двумерных задач дифракции на проницаемых однородных телах с гладким контуром поперечного сечения и трехмерных задач дифракции на поперечно неоднородных цилиндрах с произвольным поперечным сечением; предложен метод регуляризации для системы интегральных уравнений относительно плотностей поверхностных потенциалов простого слоя, возникающей в двумерной задаче рассеяния на проницаемом теле; разработан итерационный метод решения задачи рассеяния волн на детерминированной границе раздела двух однородных сред; построена строгая теория радиотеплового излучения плоскостойкой среды со статистически неровной границей раздела. Получены новые аналитические результаты: решение задачи дифракции волн на детерминированной границе раздела двух однородных сред в виде бесконечного ряда по двум малым параметрам – наклону неровностей и локальной кривизне; в задаче рассеяния электромагнитных волн на статистически неровной поверхности слоистой диэлектрической среды получены эквивалентные граничные условия, содержащие квадратичные по дисперсии высот неровностей члены, коэффициенты когерентного прохождения электромагнитных волн через статистически неровную поверхность слоистой диэлектрической среды, а также доказано выполнение закона сохранения энергии для рассеянного поля в случае среды без омических потерь. Обнаружены и систематически исследованы новые, а также обобщены известные ранее физические закономерности формирования рассеянного поля в слоистых средах, которые позволили автору предложить новые и уточнить известные способы обнаружения неоднородностей в плоскостойких средах. Решены новые конкретные задачи, представляющие практический интерес.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения, полученные лично автором.

1. Разработаны новые и развиты известные методы решения задач рассеяния волн на неоднородностях плоскостойких сред. В том числе:

- обобщен метод механических квадратур на случай систем интегральных уравнений, возникающих в двумерных задачах дифракции волн на однородном проницаемом теле в слоистой среде;
- разработан метод регуляризации систем интегральных уравнений, полученной на основе применения поверхностного потенциала простого слоя к двумерной задаче дифракции волн на однородном проницаемом теле, погруженном в плоскостойкую среду;
- разработан метод прямого численного решения интегральных уравнений для электрического (акустического) поля, возникающей в задачах дифракции волн на поперечно неоднородном цилиндрическом теле, расположенном в плоскостойкой среде;
- разработан итерационный метод решения системы интегральных уравнений, возникающей в задаче рассеяния волн на неровной границе раздела двух сред. С помощью этого метода получено аналитическое решение этой задачи для пологих неровностей;
- развита теория малых возмущений применительно к задачам рассеяния волн на статистически неровной границе раздела. В частности, выведены эквивалентные граничные условия для когерентной компоненты электромагнитного поля на статистически средней границе раздела; получены аналитические выражения для коэффициентов прохождения когерентной компоненты через статистически неровную границу раздела и для средней плотности потока энергии флуктуационной компоненты электромагнитного поля с обеих сторон неровной границы; показано, что полученные выражения удовлетворяют закону сохранения энергии электромагнитного поля в среде без омических потерь;
- развит строгий метод решения задачи о радиотепловом излучении плоскостойкой среды со статистически неровной границей раздела. Получены аналитические выражения для радиояркостного контраста, обусловленного шероховатостями границы раздела, при произвольной поляризации приемной антенны.

2. Созданы алгоритмы и программное обеспечение для численного исследования рассеяния волн и радиотеплового излучения на неоднородностях слоистых сред. В частности, созданы:

- адаптивный алгоритм расчета двумерной функции Грина слоистой среды, учитывающий неограниченность среды и возможное наличие собственных волн;
- алгоритмы и программное обеспечение для расчета рассеяния волн на двумерных проницаемых телах, погруженных в слоистую

среду, которые позволяют рассчитывать на современных ПЭВМ поле, рассеянное на телах с размерами до десяти длин волн;

- программное обеспечение для расчета рассеяния акустических и ТЕ- и ТМ-поляризованных электромагнитных волн на поперечно неоднородных цилиндрических телах, имеющих произвольный контур поперечного сечения и расположенных в кусочно-однородной среде. Универсальность и быстроедействие алгоритма позволяют использовать его для решения обратных задач теории дифракции оптимизационными методами;

- программное обеспечение для расчета характеристик акустических и электромагнитных волн, рассеянных статистически неровной поверхностью раздела в плоскостной среде;

- программное обеспечение для расчета характеристик радиотеплового излучения кусочно-однородного одноосного полупространства с наружной или внутренней статистически шероховатой границей.

Часть разработанного программного обеспечения принята в Фонд алгоритмов и программ Украины.

3. Выполнены численные исследования и проведен физический анализ процессов рассеяния волн и радиотеплового излучения на неоднородностях слоистой среды. Среди прочих рассмотрены следующие задачи:

- рассеяние акустических и электромагнитных ТЕ- и ТМ-поляризованных волн на проницаемых цилиндрических телах, погруженных в кусочно-однородную среду. Возбуждающее поле выбиралось в виде плоской волны, приходящей из однородного полупространства, поля нити с током, собственной волны вмещающей среды. Рассматривались однородные и поперечно неоднородные цилиндрические тела с различными формами поперечного сечения. Обнаружены резонансные явления, возникающие при изменении спектра собственных волн вмещающей среды. Предложены способы восстановления параметров рассеивателя и установления его местоположения по результатам измерений рассеянных полей;

- рассеяние радиотеплового излучения на статистически неровной границе раздела в слоистой среде. Изучены угловые, частотные и поляризационные зависимости радиояркостного контраста, обусловленного шероховатостями, при различных значениях параметров неровностей и для разных профилей диэлектрической проницаемости излучающей среды. Выявленные закономерности могут быть ис-

пользованы для интерпретации данных дистанционного зондирования, создания новых более точных методик дистанционного определения влажности почвы, уровня грунтовых вод, толщины и влажности снежного покрова и т.д.

Разработан новый способ СВЧ-дефектоскопии, защищенный авторским свидетельством.

Таким образом, в диссертации заложены основы нового научного направления в радиофизике – численного исследования рассеяния полей детерминированных источников и радиотеплового излучения на проницаемых неоднородностях плоскостных сред.

Обоснованность основных научных результатов диссертации обеспечивается использованием математически корректных постановок теоретических задач и методов их решения, основанных на теории линейных операторов, теории возмущений, флуктуационно-диссипационной теореме; адекватностью используемых моделей реальным физическим объектам; применением известных методов вычислительной математики для проведения численных исследований на ЭВМ с контролируемой погрешностью. Достоверность результатов следует из их совпадения в предельных случаях с известными ранее аналитическими и численными результатами других авторов. Кроме того, полученные результаты допускают ясное физическое толкование.

Научная и практическая значимость диссертации состоит в том, что развитие в ней методы решения задач рассеяния волн на телах и неровных поверхностях в слоистых средах расширяют используемый математический аппарат радиофизики и позволяют подробно теоретически исследовать широкий круг практически важных задач. К таким задачам следует отнести:

- рассеяние собственных волн открытых волноводов на локальных деформациях границы, разветвлениях волноводов, элементах крепежа и местах сварки волноводных секций и т.д.;
- рассеяние волн на диэлектрических решетках, состоящих из конечного числа элементов и расположенных в плоскостной среде;
- рассеяние волн на участке периодически неровной поверхности слоистой среды.

Что касается задач рассеяния волн и радиотеплового излучения на статистически неровной поверхности, то наиболее интересные для физического анализа и практических приложений результаты могут быть получены при рассмотрении сред с плавно-

неоднородными профилями диэлектрической проницаемости.

Результаты аналитических и численных исследований, изложенных в диссертации, значительно расширили представления о влиянии пространственной неоднородности окружающей среды на рассеивающие свойства проницаемых тел и неровных границ раздела.

Диссертация выполнена в рамках комплексной общесоюзной целевой программы ГКНТ 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 №73 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 государственной регистрации 0187.0000262; 01.9.10036888; УА01008654Р и 0193U007374), а также в отчеты по 2 хоздоговорным НИР (номера государственной регистрации 0187.0062851 и 01.9.00047189). В Фонд алгоритмов и программ Украины принято разработанное программное обеспечение по расчету характеристик радиотеплового излучения слоистых кусочно-однородных сред со статистически неровными наружной поверхностью [29] или внутренней границей раздела [30], а также по расчету поля, рассеянного проницаемым поперечно-неоднородным цилиндром, погруженным в плоскостроистую среду [13]. Получено авторское свидетельство [14] на новый способ СВЧ-дефектоскопии.

Апробация работы и публикации. Диссертация представляет собой изложение и обобщение ранее опубликованных 55 работ автора, среди которых 21 статья, 26 тезисов докладов, 4 депонированных рукописи.

Изложенные в диссертации результаты были доложены и обсуждены на 18-ой международной конференции по инфракрасным и миллиметровым волнам (Эссекс, Великобритания, 6-10 сентября 1993г.), 7-ой Средиземноморской конференции по электротехнике (Анталия, Турция, 12-14 апреля 1994 г.), Международной конференции "Физика в Украине" (Киев, 22-27 июня 1993г.), 11-ой Международной конференции по гиромагнитной электронике и элек-

тродинамике (Алушта, 16-20 октября 1992г.), Московской международной конференции по композитам (Москва, 14-16 ноября 1990г.), VI-ом Международном симпозиуме "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики" (Харьков, 24-28 мая 1993г.), X-ом Симпозиуме по дифракции и распространению волн (Винница, 18-21 сентября 1990г.), 16-й Всесоюзной и 17-й конференциях по распространению радиоволн (Харьков, 2-5 октября 1990г.; Ульяновск, 21-24 сентября 1993г.), I-ом Украинском симпозиуме "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн" (Харьков, 15-18 октября 1991г.); на Всесоюзных научно-технических конференциях "Метрология в радиоэлектронике" (Москва, 25-27 октября 1988г.), "Методы представления и обработки случайных сигналов и полей" (Туапсе, 10-12 октября 1989г.; 30 сентября - 2 октября 1991г.), "Измерение параметров формы и спектра радиотехнических сигналов" (Харьков, 17-19 октября 1989г.), "Метрологическое обеспечение температурных и теплофизических измерений в области высоких температур" (Харьков, 29-31 мая 1990г.), "Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных и вычислительных систем СВЧ и КВЧ на объемных интегральных схемах (ОИС)" (Волгоград, 11-13 сентября 1991г.), на Харьковских городских семинарах "Проблема статистической радиофизики (22 декабря 1987г.), "Теория и техника представления и обработки случайных сигналов и полей" (21-22 февраля 1989г.). Кроме того, результаты диссертации обсуждались на научных семинарах по статистической радиофизике в Институте физики атмосферы АН СССР (г.Москва), по дистанционному зондированию окружающей среды в Институте космических исследований АН СССР (г.Москва) и в Институте радиотехники и электроники АН СССР (г.Москва), на семинарах в Институте теоретической физики НАН Украины (г.Киев), в Физико-механическом институте НАН Украины (г.Львов), в Радиоастрономическом институте НАН Украины (г.Харьков), на ежегодных научно-технических конференциях радиофизического факультета Харьковского государственного университета.

Личный вклад диссертанта в работы, выполненные в соавторстве. В работах [9-12] диссертанту принадлежит разработка численного метода решения системы интегральных уравнений для электрического поля внутри цилиндрического включения, разработка алгоритма вычислений и программного обеспечения, а также

проведение численных исследований. Кроме того, в [9] диссертанту принадлежит физический анализ полученных результатов, в [10-11] - участие в физическом анализе, а в [12] - участие в физическом анализе и разработке рекомендаций относительно возможности нахождения дефекта. В изобретении нового способа СВЧ-дефектоскопии [14] диссертанту, согласно описанию изобретения, принадлежит исследование физических закономерностей явления, лежащего в основе предложенного способа, и расчетная формула для определения глубины залегания дефекта.

В работе [16] диссертанту принадлежит разработка алгоритма вычислений и программного обеспечения, проведение численных исследований и участие в физическом анализе полученных результатов. В статье [17] диссертанту принадлежат конкретные результаты, иллюстрирующие изложенный общий метод. В работах [18,19,24] диссертанту принадлежат идея получения и аналитические выражения для эквивалентных граничных условий с точностью до членов второго порядка малости по среднеквадратичной высоте неровностей для когерентной компоненты электромагнитного поля на шероховатой поверхности слоистого диэлектрического полупространства, аналитические выражения для коэффициентов прохождения через шероховатую поверхность когерентной компоненты электромагнитного поля. Кроме того, в [24] автору принадлежат аналитические выражения для средней плотности потока энергии флуктуационной компоненты электромагнитного поля, рассеянного на шероховатой поверхности слоистого полупространства, и исследование выполнения закона сохранения энергии электромагнитного поля при рассеянии на статистически шероховатой поверхности раздела в слоистой среде.

В статьях [20-23] диссертанту принадлежит разработка алгоритма вычислений и программного обеспечения (последнее только в [20-21,23]), проведение численных исследований и участие в физическом анализе полученных результатов.

В статьях [25-28] диссертанту принадлежит разработка алгоритма вычислений и программного обеспечения, проведение численных исследований и участие в физическом анализе полученных результатов. Кроме того, диссертанту принадлежат аналитические выражения для радиояркостной температуры на произвольной поляризации однородного полупространства с шероховатой поверхностью при наличии излучения внешних источников ([26]) и аналити-

ческие выражения для излучательной способности на произвольной поляризации плоскостойкого полупространства с шероховатой поверхностью ([27]).

В создании [29] диссертанту принадлежат разработка программного обеспечения и сопровождающей документации, а также участие в разработке алгоритма вычислений. В создании [30] – разработка алгоритма вычислений, базового программного обеспечения и сопровождающей документации.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 280 страницах машинописного текста, из них основной текст – на 202 с. и 78 рисунков на 48с. Список использованной литературы на 28с. содержит 252 наименования работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен обзор литературы, обоснована актуальность темы диссертации, кратко охарактеризована программа проведенных автором исследований и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В главе 1 "Метод поверхностных интегральных уравнений в двумерной задаче рассеяния волн на пронизываемом теле, погруженном в слоистую среду" исследованы двумерные краевые задачи акустики и электродинамики для монохроматического поля в плоскостойкой среде. В качестве рассеивателя рассмотрено пронизываемое однородное тело с гладким контуром поперечного сечения.

В разделе 1.1 на основе представления полного поля внутри рассеивателя и рассеянного поля снаружи последнего в виде суперпозиции поверхностных потенциалов простого и двойного слоев выведено семейство систем интегральных (в ряде случаев – интегро-дифференциальных) уравнений по контуру поперечного сечения рассеивателя. Система интегральных уравнений аналогичного типа получена также с помощью формулы Грина. Проведен сравнительный анализ полученных систем уравнений с точки зрения эффективности их численной реализации. Показано, что система, содержащая в ядрах интегральных уравнений минимальное число производных функции Грина вмещающей среды, оказывается наиболее предпочтительной для численного решения из всего семейства, т.к. требует минимального процессорного времени для вычисления матричных элементов. В разделе 1.2

методом механических квадратур выполнены дискретизация систем и сведение их к конечной системе линейных алгебраических уравнений [1]. Преимуществом этого прямого численного метода является универсальность: метод позволяет дискретизировать произвольную систему исходных уравнений, включая те из них, которые содержат интегро-дифференциальные уравнения [7]. Однако доказать сходимость получаемого таким способом решения к решению исходной системы интегральных уравнений и (или) получить аналитические оценки скорости сходимости не представляется возможным. Поэтому, наиболее обоснованным представляется применение этого метода к системам интегральных уравнений второго рода.

Для дискретизации систем уравнений, имеющих ядра с особенностью не выше логарифмической, в разделе 1.3 предположен иной метод, основанный на преобразовании Фурье [2-6]. Кроме того, на основании этого метода проведена регуляризация системы интегральных уравнений, полученной с применением поверхностных потенциалов простого слоя [3-6]. Эта система состоит из уравнений разного рода, что осложняет применение к ней метода механических квадратур. Для решения такой системы интегральных уравнений разработан метод регуляризации, сводящий исходную систему к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида: $(\hat{I} + \hat{A})y = B$. Показано, что для матричного оператора A_{mn} этой системы выполняется оценка [6]

$$\sum_n \sum_{mn} n^2 m^2 |A_{mn}|^2 < \infty,$$

т.е. оператор \hat{A} является вполне непрерывным в пространстве l^2 . Следовательно, полученная система представляет собой систему Фредгольма 2-го рода. Правая часть B СЛАУ в интересных для приложений случаях (при возбуждении цилиндра плоской волной, собственной волной слоистой среды, точечным источником и т.д.) принадлежит пространству l^2 . Поэтому, в соответствии с теорией линейных операторов СЛАУ разрешима методом редукции с последующим применением одного из стандартных методов обращения усеченной матрицы. Нетрудно показать, что аналитическая оценка скорости сходимости метода усечений для системы по норме пространства l^2 имеет вид [6]

$$\|y^{(N)} - y\|_2^2 = CN^{-2},$$

где $y^{(N)}$ - решение усеченной системы из N уравнений с N неизвестными; y - точное решение бесконечной системы уравнений; C - константа, определяемая параметрами задачи.

В разделе 1.4 разработан эффективный адаптивный алгоритм вычисления функции Грина произвольной плоскостростой среды, необходимый для нахождения матричных элементов СЛАУ [1]. Как известно, функция Грина ввещающей среды в рассматриваемом случае может быть представлена в виде интегралов типа Зоммерфельда. Трудности в вычислении этих интегралов состоят в наличии полюсов фурье-образа функции Грина вблизи пути интегрирования, связанных с существованием поверхностных волн в такой среде и играющими наиболее существенную роль в случае сред с малыми омическими потерями; осциллирующим поведением подинтегрального выражения, обусловленного ядром обратного фурье-преобразования, и, наконец, медленным убыванием на бесконечности фурье-образа функции Грина из-за логарифмической особенности функции Грина в точке источника.

Для преодоления этих трудностей было предложено, во-первых, выделить из подинтегрального выражения фурье-образы функций Ханкеля, что существенно улучшает сходимость интеграла. Такое выделение приводит к представлению функции Грина слоистой среды в виде суммы функции (функций) Грина однородной среды с такими же материальными параметрами, как в окрестности точек источника и наблюдения, и некоторого интегрального слагаемого, которое не имеет особенностей в точке источника и физически описывает поле, многократно переотраженное от границ слоистой среды. Если точки источника и наблюдения находятся в одном и том же слое ввещающей среды, причем вдали от границ этого слоя, то выделяется только одна функция Ханкеля. Если точки источника и наблюдения находятся вблизи границы слоя, то выделяется две функции Ханкеля, соответствующие функциям Грина однородных сред с материальными параметрами слоистой среды над и под границей раздела. Во-вторых, контур интегрирования деформировался в комплексной плоскости спектрального параметра k . Предлагаемый нами способ вычисления интегралов основан на том, что особые точки

подинтегрального выражения, лежащие на или вблизи пути интегрирования в комплексной плоскости z , имеют реальную часть, заключенную в интервале $[k_0, k_m]$, $k_m = \max_{b < y < 0} k_s(y)$, а мнимая часть особых точек неотрицательна (Шевченко В.В., 1979). Здесь k_0 , k_s - волновое число в вакууме и локальное волновое число слоистой среды. Такое расположение особенностей позволяет перейти к интегрированию по контуру, состоящему из отрезков прямых, соединяющих точки: 1- $z=0$; 2- $z=-ik_0 T_a$; 3- $z=k_0(k_m/k_0+1-it_a)$; 4- $z=k_m+k_0$; 5- $z=k_0 T_b$. Участок контура между точками 1-4 позволяет обойти сразу все особые точки, не вычисляя их конкретного расположения. Кроме того, подинтегральное выражение на этом участке контура представляет собой гладкую, медленно меняющуюся функцию. Интегралы на участках 1-2, 2-3, 3-4 быстро и точно вычисляются с помощью адаптивного интегрирования по формуле Гаусса с четырьмя узлами. Наличие быстроосциллирующего множителя $\cos(z(x-x'))$ на участке 4-5 контура при определенных значениях параметров среды и расположения точек источника и наблюдения может потребовать специальных методов интегрирования. В частности, была разработана процедура разбиения всего участка интегрирования на сегменты, соответствующие полупериодам функции $\cos(z(x-x'))$, вычисления интервала по каждому из полупериодов по формуле Гаусса с 8-ю узлами и применения преобразования Эйлера для суммирования этого ряда. Однако в большинстве случаев соответствующий интеграл эффективно вычисляется с помощью адаптивного интегрирования по формуле Симпсона. Подбором констант T_a, T_b осуществляется "привязка" контура интегрирования к конкретному профилю материальных параметров среды. Предложен алгоритм определения оптимального значения этих констант по критериям "точность вычислений" - "затрачиваемое время" для произвольного профиля материальных параметров вмещающей среды.

Процедура и результаты тестирования разработанных алгоритмов описаны в разделе 1.5. В частности, было проведено исследование устойчивости и сходимости СЛАУ, полученных на основе описания полного поля внутри тела и рассеянного поля вне тела с помощью комбинации плотностей поверхностных потенциалов простого (ψ) и двойного (ϕ) слоев с дополнительным условием вида $\phi^i/\eta_p = \phi^e/\eta_s$, $\psi^i = \psi^e$ (алгоритм А) и на основе

формул Грина (алгоритм В) для задачи рассеяния Е- и Н-поляризованных плоских волн на круговом цилиндре. Относительная погрешность Δ (модуль разности результатов расчетов при данном N и $N=64$, деленный на модуль результата при $N=64$) вычисления амплитуды Е-поляризованного рассеянного поля в дальней зоне цилиндра в верхнем полупространстве для обоих алгоритмов была примерно одинакова и составила $\Delta \approx 0.2$ (при $N=4$), $\Delta \approx 8 \cdot 10^{-3}$ ($N=16$), $\Delta \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ($N=32$). На Н-поляризации относительная погрешность алгоритма (А) составила $\Delta \approx 0.5$ (при $N=4$), $\Delta \approx 0.013$ ($N=16$), $\Delta \approx 3 \cdot 10^{-3}$ ($N=32$), а для алгоритма (В) составила $\Delta \approx 0.03$ ($N=16$), $\Delta \approx 6 \cdot 10^{-3}$ ($N=32$) [1]. Таким образом, при соответствующем подборе дополнительных соотношений на поверхностные потенциалы алгоритм А позволяет получить решение при меньшем числе точек аппроксимации неизвестных функций на контуре поперчного сечения рассеивателя и, в конечном счете, построить более эффективный численный алгоритм.

Устойчивая сходимость алгоритма А подтверждается стабильностью меры обусловленности матрицы системы, которая с ростом N от 4 до 32 менялась не более чем на 3.0% (на Е-поляризации) и 5% (на Н-поляризации). При $N=32$ сама мера обусловленности равнялась 3.225 и 7.762 на Е- и Н-поляризации соответственно [1].

В разделе 1.6 изложены результаты численных исследований и физического анализа процессов рассеяния волн на двумерных телах в слоистых средах. Здесь, в частности, рассмотрено рассеяния Е- и Н-поляризованных плоских волн и собственных волн дискретного спектра диэлектрического слоя на телах различной формы. Показано, что в окрестности критических частот, когда одна из собственных мод слоя находится в режиме отсечки, наблюдается резкое увеличение амплитуды поля, рассеянного под скользящими углами из слоя в окружающее пространство [3-6]. Этот эффект связан с "прозрачностью" границы слоя, находящегося в критическом режиме, для плоских волн при скользящем падении и, наоборот, для выходящих из слоя под скользящими углами волн (коэффициент отражения плоской волны при скользящем падении на слой, находящемся в критическом режиме, обращается в ноль).

Другой обнаруженный эффект связан со скачком скорости изменения коэффициентов трансформации мод при появлении новой

моды слоя [3-5]. При образовании новой моды энергия, переносимая последней, квазискачкообразно возрастает от 0 (в докритическом режиме) до некоторого значения, характерного для распространяющихся мод. Энергия уже распространяющихся мод не претерпевает существенных изменений с изменением спектра собственных колебаний. В результате полная энергия, переносимая модами слоя, резко увеличивается.

Было также исследовано рассеяние акустических волн, распространяющихся в подводном звуковом канале, на проницаемых неоднородностях [2]. Этот случай интересен тем, что подводный звуковой канал представляет собой сверхразмерный волновод. На примерах индикатрис рассеяния и коэффициентов трансформации мод проиллюстрированы особенности явлений рассеяния в такой структуре.

Полученные результаты представляют интерес для разработки новых узлов электроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, создающихся на базе открытых волноведущих структур, совершенствования радиоволновых методов подповерхностного зондирования и дефектоскопии а так же совершенствования подводной акустической связи в океане.

В главе 2 "Метод интегрального уравнения для электрического поля в задаче рассеяния волн на поперечно неоднородном цилиндре в плоскостной среде" рассмотрено рассеяние волн на трехмерном аксиально однородном цилиндре произвольного поперечного сечения. Полагалось, что образующая цилиндра параллельна оси Oz , а падающее поле периодически вдоль оси Oz и его зависимость от координаты z описывается функцией $\exp(i\gamma_z z)$, где γ_z - некоторая константа. Считалось также, что цилиндр полностью находится в однородном слое вмещающей среды. При таких предположениях исходная задача дифракции сводится к системе из трех скалярных сингулярных интегральных уравнений относительно распределения напряженности электрического поля по поперечному сечению цилиндра. В главе разработан новый метод численного решения этой системы.

Интегральные уравнения для задач рассеяния акустических и электромагнитных волн на аксиально однородном цилиндрическом теле, погруженном в произвольную плоскостную среду, приведены в разделе 2.1 [8-12]. Дискретизация исходных интегральных уравнений проведена в разделе 2.2 методом моментов. Здесь же

рассмотрены приближенный и точные способы вычисления матричных элементов получаемой СЛАУ. Приближенный способ вычисления может быть применен для Е-поляризованных волн и основан на замене интегрирования по элементарной ячейке прямоугольной формы интегрированием тех же функций, но по кругу той же площади (Richmond J.H., 1965). Предложен эффективный метод точного вычисления матричных элементов, основанный на теории обобщенных функций и сводящий интеграл по элементарной ячейке от двумерной функции Грина к интегралу по контуру этой ячейки [8]. Прообраз этого метода для задачи рассеяния в однородной среде был предложен С.С.Су.

Неотъемлемой составной частью метода является разработанный автором способ численного решения получающихся СЛАУ [8-12]. Способ существенно использует тот факт, что вмещающая рассеиватель среда является однородной по координатам x, z , причем ось Ox лежит в плоскости области интегрирования. Поэтому двумерная функция Грина, фигурирующая в ядрах интегральных уравнений, зависит от разности x -вых координат обоих своих аргументов. Как следствие, полученные СЛАУ имеют блочно-теплицеву матрицу коэффициентов. Учет этого обстоятельства позволяет существенно сократить как число вычисляемых матричных элементов, так и требуемый объем машинной памяти для хранения самой матрицы. Кроме того, для решения полученной СЛАУ был применен итерационный метод сопряженного градиента, который позволил существенно сократить процессорное время, требуемое для получения приближенного решения СЛАУ с достаточной для приложений точностью. Двухкратно выполняемые на каждой итерации метода сопряженного градиента умножения матриц на вектор-столбец были реализованы с учетом блочно-теплицевой структуры матрицы с помощью одномерного быстрого преобразования Фурье.

Результаты тестирования разработанного алгоритма и исследования его эффективности описаны в разделе 2.3. Там, в частности показано, что величина относительной ошибки Δ , допускаемую при использовании приближенных формул для расчета матричных коэффициентов СЛАУ, зависит от размеров элементарной ячейки, ее формы и расстоянием между аргументами функции Грина. Для Е-поляризованных волн и одном из размеров элементарной ячейки, умноженном на волновое число в свободном пространстве, равном $k_0 a = 0,3$, для диагональных элементов

величина ошибки составляет $\Delta=10\%$ (при втором размере ячейки $k_0\eta=0,1$), $\Delta=2,5\%$ ($k_0\eta=0,2$), $\Delta=1,0\%$ ($k_0\eta=0,3$), $\Delta=2\%$ ($k_0\eta=0,4$), $\Delta=5\%$ ($k_0\eta=0,5$), $\Delta=10\%$ ($k_0\eta=0,6$) [10]. При увеличении расстояния между ячейками, в которых находятся штрихованный и нештрихованный аргументы функции Грина, величина относительной ошибки заметно снижается. При разбиении поперечного сечения тела на элементарные ячейки квадратной формы относительная ошибка нахождения полного поля внутри рассеивателя с использованием приближенных формул вычисления матричных элементов составит от нескольких процентов до нескольких десятков процентов. Поэтому, возможность применения приближенных выражений для расчета матричных коэффициентов СЛАУ требует дополнительного исследования в каждом конкретном случае.

Применение предложенных формул для расчета матричных элементов, позволяющая избежать вычисления двумерных интегралов от функций Ханкеля, приводит к сокращению времени вычислений матрицы СЛАУ примерно в два раза [8]. При этом основное время расходуется уже на вычисление интегралов по спектральному параметру, описывающих вклад неоднородности среды.

Число итераций, необходимых для решения СЛАУ, определяется размерностью системы, мерой обусловленности матрицы коэффициентов СЛАУ, начальным приближением для искомого поля и требуемой точностью. Если в качестве начального приближения выбирать падающее поле, то приближенное решение с невязкой, равной 10^{-8} , обычно достигается не более чем за $m_1 \times m_2 / 10$ итераций (здесь под невязкой приближенного решения и уравнения $\tilde{U}u=f$ понимается норма вектора $\tilde{U}u-f$). Эффективность используемой процедуры решения СЛАУ характеризуется следующими показателями: решение СЛАУ методом Гаусса требует $C_t(m_1 m_2)^3$ сек. процессорного времени и $C_p(m_1 m_2)^2$ Кбайт памяти (m_1, m_2 - число точек дискретизации искомого поля внутри рассеивателя вдоль осей Ox и Oy соответственно; C_t, C_p - некоторые константы), в то время как использованный метод требует не более $\tilde{C}_t m_1^2 m_2^3 \log_2 m_1$ секунд и $\tilde{C}_p m_1 m_2^2$ Кбайт ($\tilde{C}_t \approx C_t, \tilde{C}_p \approx C_p$). В целом быстроедействие разработанного автором алгоритма [13] по сравнению с существующими (Hohmann G.W., 1971; Дмитриев В.И., Мерщикова Н.А., 1984) возросло за счет сокращения времени на решение СЛАУ в $(m_1 / \log_2 m_1)$ раз, а потребности в оперативной памяти ЭВМ сокращены в m_1 раз. Разработанные программы позволяют рассчитывать на совре-

менных отечественных ЭВМ задачи рассеяния на телах, размеры которых могут достигать десятка длин волн. Последнее обстоятельство свидетельствует о высокой эффективности алгоритмов и их пригодности для использования при решении обратных задач методами оптимизации.

В разделе 2.4 описаны результаты численных исследований рассеяния акустических, а так же ТЕ- и ТМ-поляризованных электромагнитных волн на поперечно неоднородных цилиндрических телах. Рассматривалось возбуждение тел плоской волной, приходящей из однородного полупространства, полем точечного источника и собственной волной вмещающей среды. Исследовалось поле в дальней зоне рассеивателя, пространственное распределение полного поля в ближней зоне рассеивателя и комплексные амплитуды возбуждаемых собственных волн вмещающей среды. Изучено влияние расположения тела, его формы, размеров и внутренней структуры на характеристики рассеянного и полного полей. Выработаны рекомендации по определению месторасположения и размеров включения по измеренному полю в дальней зоне и полному полю на поверхности слоистой среды.

Детальный физический анализ рассеяния собственной волны слоя на малом включении, расположенном вне слоя, и полученные в этой задаче асимптотические выражения для рассеянного поля позволили предложить способ определения глубины залегания тел в проницаемой для электромагнитных волн среде [14]. На способ получено авторское свидетельство. Способ предполагает много-частотное зондирование среды поверхностными электромагнитными волнами. Способ основан на конкуренции двух процессов, происходящих при рассеянии поверхностной волны на диэлектрическом теле: с увеличением длины волны наблюдается уменьшение эффективного поперечника рассеяния включения и увеличение амплитуды возбуждающего поля поверхностной волны в месте расположения включения. Предложены простые аналитические выражения, которые позволяют по измеренному на двух частотах затуханию поверхностной волны вычислить глубину залегания включения.

В главе 3 "Дифракция волн на неровной границе раздела сред" рассмотрен принципиально отличный от предыдущих двух глав тип рассеивателя - детерминированная или статистически неровная проницаемая граница раздела в плоскостройной среде. В разделе 3.1 рассмотрено рассеяние скалярных волн на

детерминированной неровной границе раздела двух однородных полупространств [15]. Исходная трехмерная задача дифракции с помощью метода поверхностных потенциалов сведена к системе двух интегральных уравнений по неровной поверхности, одно из которых второго рода, а другое - первого. Из ядер интегральных уравнений выделена разностная часть и показано, что дополнительная к разностной части составляющая ядер может быть рассмотрена как малая добавка для пологих поверхностей с малой локальной кривизной. Для этого класса поверхностей путем применения к системе уравнений метода малых возмущений получено аналитическое решение в квадратурах исходной задачи рассеяния в виде ряда теории возмущений по двум малым параметрам: наклону неровностей и их локальной кривизне. В предельном случае очень пологих неровностей первый член этого ряда (соответствующий нулевой локальной кривизне неровностей) переходит в известный результат метода касательной плоскости. В другом предельном случае малых по сравнению с длиной волны неровностей сумма первых двух членов ряда переходит в классический результат метода малых возмущений.

Случай статистически неровной границы раздела рассмотрен в разделе 3.2, где методом статистической теории возмущений решены задачи о рассеянии электромагнитных волн на статистически неровной поверхности слоистого диэлектрического полупространства [18-19,24]. Методом статистической теории возмущений выведены эквивалентные граничные условия для когерентной компоненты электромагнитного поля на статистически неровной поверхности диэлектрического полупространства, корректно учитывающие квадратичные по дисперсии высот неровностей слагаемые. На их основе получены новые аналитические выражения для: а) коэффициентов прохождения когерентной компоненты электромагнитного поля через статистически неровную границу раздела. С помощью классической схемы метода малых возмущений впервые получены аналитические выражения для средней плотности потока энергии флуктуационной компоненты электромагнитного поля с обеих сторон статистически неровной границы раздела в плоско-слоистой диэлектрической среде. Исследовано выполнение закона сохранения энергии электромагнитного поля при рассеянии на статистически неровной границе раздела сред. Показано, что для горизонтально поляризованных волн полученные автором выражения

для коэффициентов прохождения когерентной компоненты и плотностей потоков энергии некогерентной компоненты удовлетворяют закону сохранения энергии рассеянного поля с точностью до квадратичных по дисперсии высот неровностей членов включительно, если в тонком слое среды, содержащем все реализации неровной поверхности отсутствуют омические потери. Для вертикально поляризованных волн закон сохранения энергии выполняется с той же точностью, если омические потери отсутствуют во всей среде. Совокупность полученных результатов представляет существенное развитие теории малых возмущений применительно к задачам рассеяния волн на статистически неровной границе раздела.

В разделе 3.3 проведен численный анализ влияния пространственной неоднородности окружающей среды на рассеивающие свойства неровной поверхности [20-23]. Рассмотрены среды с кусочно-однородными и кусочно-непрерывным профилями диэлектрической проницаемости. Обнаружены резонансные явления при изменении спектра собственных волн окружающей среды. Исследовано влияние покрывающего слоя на рассеивающие свойства статистически неровной границы раздела. В частности показано, что наличие переходного слоя с толщиной от $1/6$ до $1/3$ длины волны (в среде) над шероховатой поверхностью приводит к увеличению обратного рассеяния горизонтально поляризованных волн при всех углах падения и вертикально поляризованных - при углах падения $\alpha \leq 30^\circ$. При толщине переходного слоя близкой к половине длины волны излучения в слое влияние промежуточного слоя на рассеивающие свойства неровностей крайне слабо зависит от угла наблюдения. Результаты проведенных численных исследований хорошо согласуются с зависимостями передаточных функций слоя F_j от угла падения и от толщины слоя в предельном случае идеально проводящего нижнего полупространства, которые были описаны в нашей работе [20]. Полученные результаты существенно уточняют и дополняют вывод работы (Elachi Ch. et al, 1984), в которой рассеяние волн на шероховатой границе раздела в слоистой среде рассмотрено для частного случая оптически очень толстых слоев.

Проведен сравнительный анализ рассеивающих свойств наружной поверхности и внутренней границы раздела в двухслойной среде. Показано, что в случае монотонно возрастающего с глубиной профиля диэлектрической проницаемости среды наиболее сильно рассеивают в свободное верхнее

полупространство шероховатости наружной границы. В случае, когда по обе стороны слоя с шероховатой границей находится свободное пространство, обратное рассеяние дальней (по отношению к падающей волне) шероховатой границы превосходит обратное рассеяние ближней шероховатой границы. Применительно к задачам дистанционного зондирования полученные результаты позволяют утверждать, что в случае покровов с малыми омическими потерями (сухой снег, лед, сухой песок) радиолокационный сигнал от нижней поверхности покрова будет сравним по величине с сигналом от верхней поверхности (при условии одинаковой степени неровности обеих границ и одинакового модуля скачка диэлектрической проницаемости на границах). Величина отношения амплитуд сигналов, отраженных от обеих границ, зависит от толщины слоя. Поэтому многочастотные измерения радиолокационных сечений рассеяния открывают принципиальную возможность определения толщины проницаемого покрова. Для подобных исследований целесообразно применять горизонтально поляризованные волны, поскольку на горизонтальной поляризации зависимость от толщины слоя проявляется наиболее сильно и в то же время имеет простой характер.

Исследовано влияние величины градиента профиля диэлектрической проницаемости на рассеивающие свойства неровной границы раздела в плавно-неоднородной среде. Обнаружено, что рассеивающие свойства статистически нерегулярной поверхности плавно-неоднородной среды чувствительны не столько к абсолютным изменениям диэлектрической проницаемости, сколько к величине градиента $\epsilon(z)$. Выявленные закономерности позволяют ограничить тот круг задач рассеяния на шероховатой поверхности, в которых для получения результатов с достаточной для приложений точностью необходимо учитывать неоднородность диэлектрической проницаемости подстилающей среды. Результаты расчетов могут быть использованы для интерпретации данных дистанционного зондирования ледников и морских льдов.

Полученные в результате численных исследований результаты проанализированы с точки зрения возможного их применения в задачах дистанционного зондирования.

В главе 4 "Радиотепловое излучение плоскостистой среды со статистически неровной границей раздела" рассмотрено рассеяние

ние радиотеплового излучения плоскостойкой среды на статистически неровной границе раздела. Радиотепловое излучение представляет собой чисто флуктуационное электромагнитное поле. Поэтому для изучения процессов рассеяния этого поля на различных неоднородностях приходится использовать методы анализа, отличные от рассмотренных выше. В данной главе развит строгий метод решения задачи о радиотепловом излучении плоскостойкой среды со статистически неровной границей раздела [25-28].

В разделе 4.1 рассмотрена задача о радиотепловом излучении произвольной среды в общей постановке. С помощью флуктуационно-диссипационной теоремы найдены вторые моменты напряженностей электрической и магнитной компонент флуктуационного поля. Исходная задача о плотности потока энергии радиотеплового излучения среды сведена к задаче дифракции детерминированного электромагнитного поля, которое возбуждается определенным образом ориентированным электрическим диполем, расположенным в точке наблюдения, на поверхности рассматриваемой среды. В разделе 4.2 полученные соотношения применены к плоскостойкой статистически нерегулярной среде путем усреднения полученных ранее соотношений по ансамблю реализаций случайного фактора. В качестве последнего могут выступать, например, неровности границы раздела.

Введенные выражения для радиояростной температуры позволяют определять как среднюю интенсивность радиотеплового излучения, так и его поляризационные характеристики. Достоинствами данного подхода по сравнению с уже известными являются его строгость (в разработанном методе не используется закон сохранения энергии электромагнитного поля при рассеянии последнего на неровной границе раздела, который не выполняется с достаточной точностью ни для одного из известных приближенных решений) и общность, т.к. в рамках данного метода возможно рассмотрение плоскостойких сред с произвольным профилем диэлектрической проницаемости (например, непрерывным или кусочно-однородным, но содержащим оптически тонкие слои).

Для слоистого диэлектрического полупространства с шероховатой границей раздела получены точные вплоть до членов порядка $(k_0)^2$ включительно аналитические выражения для радиояростного контраста, обусловленного неровностями [27]. Показано,

что известные ранее аналогичные соотношения [25] справедливы лишь при условии отсутствия омических потерь в излучающей среде. Последнее условие противоречит сути флуктуационно-диссипационной теоремы и является неприемлимым для приложений.

Отдельно исследован вклад излучения внешних (по отношению к излучающей среде) источников радиотеплового излучения. Выведены формулы для "кажущейся" радиояркой температуры слоистого полупространства при произвольной поляризации приемной антенны [26].

В разделе 4.3 описаны алгоритмы вычислений излучательной способности и радиояркой температуры плоскостроеного полупространства со статистически шероховатой наружной поверхностью [29] и внутренней границей раздела [30], а также результаты проведенных автором обширных численных исследований и физического анализа процесса рассеяния радиотеплового излучения на статистически неровной наружной поверхности или внутренней границе раздела кусочно-однородной среды [25-28]. Изучены угловые, частотные и поляризационные зависимости радиояркого контраста, обусловленного шероховатостями, при различных значениях параметров неровностей и для разных профилей диэлектрической проницаемости излучающей среды. Под радиоярким контрастом ΔT_{μ} , обусловленным шероховатостями, понимается разница между радиояркими температурами сред с неровной ($\sigma \neq 0$) и ровной ($\sigma = 0$) поверхностями.

В частности установлено, что если пренебречь частотной дисперсией диэлектрической проницаемости среды и радиояркой температурой внешних источников, то частотная зависимость радиояркого контраста для однородного полупространства имеет один максимум при модуле диэлектрической проницаемости среды $|\epsilon| \leq 40$ и два максимума при $|\epsilon| \geq 60$. На частотах, соответствующих максимумам, волновое число радиосвлучения в свободном пространстве или в среде примерно равно волновому числу, при котором пространственный спектр шероховатостей имеет максимум. Уменьшение $|\epsilon|$ ведет к сближению этих частот, и при $|\epsilon| \leq 40$, оба максимума совпадают.

Исследовано влияние внешних источников радиотеплового излучения на величину радиояркого контраста. Обнаружено, что для углов визирования в интервале $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$, излучение внешних источников уменьшает величину радиояркого

контраста для однородного полупространства, если произведение волнового числа k на интервал корреляции l удовлетворяет условию $kl \leq 1$, и увеличивает ее, если $2 \leq kl \leq 5$. На основе анализа рассеяния собственного и отраженного радиотеплового излучения на статистически неровной поверхности среды дано физическое объяснение этому явлению.

Выявленные закономерности могут быть использованы для интерпретации данных дистанционного зондирования, создания новых более точных методик дистанционного определения влажности почвы, уровня грунтовых вод, толщины и влажности снежного покрова и т.д.

Заключение содержит итоговые результаты проведенного исследования закономерностей рассеяния волн и радиотеплового излучения проникаемыми телами и шероховатой поверхностью раздела в диэлектрическом полупространстве, а также перспективные направления его дальнейшего развития.

1. Яровой А.Г. Метод поверхностных потенциалов в задаче дифракции волн на проникаемом цилиндре произвольного сечения в слоистой среде // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. - 1992. - Т. 35, N1. - С. 67-78.
2. Яровой А.Г. Рассеяние волн на проникаемых неоднородностях в открытых акустических волноводах // Акуст. ж. - 1992. - Т. 38, N4. - С. 756-763.
3. Яровой А.Г. Рассеяние электромагнитных волн на магнито-диэлектрической вставке в диэлектрическом волноводе // Доклады АН Украины. Сер. Физические и естественные науки. - 1992. - N11. - С. 71-75.
4. Yarovoy A.G. Scattering from an internal penetrable inhomogeneity of a dielectric slab waveguide // Microwave and Optical Technology Letters. - 1994. - Vol. 7. - No 4. - P. 178-182.
5. Yarovoy A.G. Electromagnetic wave scattering from a penetrable cylinder embedded into a stratified medium // Proceedings Int. Conf. "Physics in Ukraine". - Kiev, 1993. - Contributed papers. Radiophysics and Electronics. - P. 279-282.
6. Yarovoy A.G. Electromagnetic wave scattering from a penetrable cylinder embedded into a stratified medium // Proc. 7th Mediterranean Electrotechnical Conference. Turkey. April 12-14, 1994. Vol. II. - P. 439-441.
7. Яровой А.Г. Применение поверхностных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции волн на проникаемых телах в пространственно неоднородных средах / Харьковский госуниверситет. - Харьков, 1990. - Деп. в ВИНТИ 13.11.90, N5681-B90.
8. Яровой А.Г. Двумерная задача дифракции звуковых волн на неоднородном теле в полупространстве // Акуст. ж. - 1991. - Т. 37, N5. - С. 1047-1050.
9. Жук Н.П., Яровой А.Г. Двумерная задача дифракции на диэлектрическом цилиндре произвольного сечения в плоскостлой среде. Случай Н-поляризации // ЖТФ. - 1992. - Т. 62. - N7. - С. 1-11.
10. Zhuck N.P., Yarovoy A.G. Two-dimensional scattering from an inhomogeneous dielectric cylinder embedded in a stratified medium. Case of TM polarization // IEEE Trans. on Antennas and Propag. - 1994. - Vol. AP-42. - No 1. - P. 16-21.
11. Двумерная задача дифракции на диэлектрическом цилиндре

произвольного сечения в плоскостой среде/ А.Б.Васильев, Н.П.Жук, Д.А.Рапопорт, А.Г.Яровой//Изв.вузов.Сер.Радиофизика.- 1991- Т.34.-N10.-С.1180-1191.

12. Рассеяние Е-поляризованных электромагнитных волн на изделии из полимерного композиционного материала с дефектом/ А.Б.Васильев, Н.П.Жук, Д.А.Рапопорт, А.Г.Яровой//Дефектоскопия.- 1992-N7.- С.62-69.

13. Яровой А.Г. Программа расчета электромагнитного поля внутри цилиндрического тела, погруженного в слоистую среду и возбуждаемого Е-поляризованной плоской волной. Принята в ФАП Украины 23.06.93, НП6409.

14. Способ определения глубины залегания дефекта/Н.П.Жук, Н.Н.Колчигин, О.А.Третьяков, А.Г.Яровой.-А.с. 1748029. Выдано в апреле 1991. Изобретения, открытия.-1992.-N 26.

15. Яровой А.Г. Характеристики рассеяния неровной поверхности в слоистой среде//Радиотехника. Респ. междувед. научно-техн. сб. Вып. 79, -Харьков: Выща школа, 1986.-С.73-78.

16. Жук Н.П., Яровой А.Г. Закономерности отражения электромагнитных волн шероховатой границей раздела//Оптика и спектроскопия- 1989.-Т.67, N6.-С.1121-1126.

17. Жук Н.П., Третьяков О.А., Яровой А.Г. Рассеяние волн на пологих неровностях границы слоистой среды//Акуст.ж.-1990.- Т.36, N3.- С.440-446.

18. Жук Н.П., Третьяков О.А., Яровой А.Г. Статистическая теория возмущений для электромагнитного поля в среде с неровной границей//Журнал экспериментальной и теоретической физики.-1990.-Т.98, N5.-С.1520-1530.

19. Жук Н.П., Третьяков О.А., Яровой А.Г. Статистическая теория возмущений для электромагнитного поля в среде с неровной границей//Волны и дифракция-90.-М.:Физическое общество, 1990.- Т.2, С.179-182.

20. Жук Н.П., Шульга С.Н., Яровой А.Г. Обратное рассеяние волн шероховатой проводящей подложкой, покрытой однородным диэлектрическим слоем//Радиотехника и электроника.-1990.- Т.35, N10.-С.2205-2207.

21. Жук Н.П., Шульга С.Н., Яровой А.Г. Обратное рассеяние волн шероховатой поверхностью однородного слоя на проводящей подложке//Известия вузов. Сер.Радиофизика.- 1990.-Т.33, N10.- С.1189- 1190.

22. Жук Н.П., Франков А.В., Яровой А.Г. Обратное рассеяние электромагнитных волн шероховатой поверхностью среды с экспоненциальным профилем диэлектрической проницаемости// Радиотехника и электроника.-1993.-Т.38,№6.-С.994-998.

23. Определение диэлектрической проницаемости среды со слабошероховатой границей амплитудным методом/А.Б.Васильев, Н.П. Жук, Л.В.Мякиньюкова, Д.А.Рапопорт, А.Г.Яровой// Дефектоскопия.- 1990.-№4.-С.59-62.

24. Жук Н.П., Яровой А.Г. Прохождение электромагнитных волн через статистически неровную границу раздела в слоистой среде/ Харьковский госуниверситет.-Харьков, 1989.-Деп. в ВИНТИ 29.06.89, N4314-B89.

25. Тепловое радиоизлучение однородного полупространства с шероховатой границей/Н.П.Жук Н.П, О.А.Третьяков, И.М.Фукс, А.Г.Яровой//Изв.вузов.Радиофизика.-1989.-Т.32,№8.-С.927-932.

26. Радиоизлучение однородного полупространства со слабошероховатой границей/Н.П.Жук Н.П, А.А.Пузенко, О.А.Третьяков, И.М.Фукс, А.Г.Яровой//Известия АН СССР.Физика атмосферы и океана.- 1989.-Т.25,№7.-С.710-716.

27. Жук Н.П., Третьяков О.А., Яровой А.Г. Радиоизлучение слоистого полупространства со слабошероховатой поверхностью// ЖТФ.-1991.- Т.61,№2.-С.123-130.

28. Жук Н.П., Третьяков О.А., Яровой А.Г. Определение диэлектрической проницаемости однородной среды со слабошероховатой границей по ее радиотепловому излучению//ЖТФ.-1990.-Т.60, №5.- С.140-143.

29. Яровой А.Г., Жук Н.П. Программа расчета излучательной способности и радиояркостной температуры плоскостлоистого кусочно-однородного полупространства с шероховатой поверхностью. Принята в ФАП Украины 30.12.88, НГР 50890000692.

30. Яровой А.Г., Борискина С.В. Программа расчета характеристик теплового излучения плоскостлоистого кусочно-однородного полупространства с внутренней шероховатой поверхностью раздела. Принята в ФАП Украины 23.06.93, НП6411.

Подписано в печать 23.06.94. Формат 60x84/16. Оффсетн.печать
Усл.п.л. 2,0. Уч.-изд.л. 2,0. Тираж 100. Заказ 156.

Харьков- 108, ротاپронт ННЦ ХФТИ

AB 30.731

AB 30.731