На правах рукописи

fel

Ветлужский Александр Юрьевич

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В РЕГУЛЯРНЫХ И СЛУЧАЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СРЕДАХ

1.3.4. Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Томск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Фисанов Василий Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиофизики, профессор

Тимофеев Иван Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии лаборатория наvк». фотоники молекулярных систем Института физики Российской им. Л.В. Киренского Сибирского отделения академии наук обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, заведующий лабораторией

Лерер Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», кафедра прикладной электродинамики и компьютерного моделирования, профессор

Белашов Василий Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Научно-исследовательский центр «Центр превосходства киберфизических систем, IoT и IoE», главный научный сотрудник

Защита состоится 16 февраля 2023 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.3.02», созданного на базе радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 11 ТГУ, аудитория 401).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/0062263d-13b0-435b-9b65-d3331cf40f2d

Автореферат разослан « _____ » декабря 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Торгаев Станислав Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности проблемы. Работа любых линий передачи электромагнитных волн связана с перераспределением энергии источников излучения и концентрации ее в ограниченных в одних и протяженных в других направлениях областях пространства – локализацией поля. Несмотря на то, что разработки подобных систем ведутся уже второе столетие, непрерывное освоение все новых частотных диапазонов влечет за собой необходимость использования новых принципов канализации электромагнитного поля, а значит и изучения соответствующих физических механизмов, могущих быть положенными в основу работы таких устройств. Это в полной мере относится к активно исследующимся в последние годы фотонным или электромагнитным кристаллам (ФК) – периодическим структурам, обладающим, наряду с прочими нетривиальными электродинамическими свойствами, способностью подавлять распространение излучения в определенных интервалах частот – «запрещенных зонах», что, в частности, может быть использовано при разработке на их основе волноведущих и резонаторных систем нового типа.

С другой стороны, постоянное увеличение в последнее время числа радиосредств различного назначения, функционирующих в условиях ограниченного частотного и пространственного разнесения, требует разработки все новых методов уменьшения их взаимного помехового влияния. Особенно остро такие проблемы возникают при необходимости минимизации электромагнитного взаимодействия близкорасположенных источников и приемников излучения, примером которых могут служить антенны, размещаемые на борту летательных аппаратов. При этом могут применяться как радиотехнические методы решения подобных задач, предполагающие изменения конструкции антенных устройств либо режимов их функционирования, так и подходы, основывающиеся на перераспределении полей в ограниченных областях, окружающих взаимовлияющие объекты, - пространственной локализации и делокализации излучения.

Существенным изменением распределения интенсивности поля в пространстве может сопровождаться и взаимодействие электромагнитного излучения с реальными природными средами, имеющими слоистую или дискретную структуру.

Примером первого может являться возбуждение боковых волн, распространяющихся вдоль верхней кромки лесной растительности при выполнении условий полного внутреннего отражения для наземного размещения корреспондирующих антенн. Возникновение таких волн ведет к формированию дополнительного канала связи между антеннами наряду с прямым прохождением излучения, а локализация волн в виде такого канала определяет особенности дальнего распространения волн низкочастотной части УКВ диапазона в присутствии растительных покровов земной поверхности. При этом в литературе практически отсутствуют оценки минимальных дистанций и частот, на которых появление боковых волн в естественных условиях становится возможным.

В дискретной среде, состоящей из элементов, случайным образом расположенных в пространстве, либо характеризующихся случайным распределением геометрических и электрофизических параметров, локализация излучения может быть связана с подавлением распространения волн, проявляющемся при определенных условиях и получившем название сильной локализации электромагнитных волн или локализации Андерсона. Несмотря на внешнее сходство с аналогичными эффектами, сопровождающими взаимодействие излучения с регулярными ФК на частотах, соответствующих запрещенным зонам, причины, приводящие к локализации поля в упорядоченных и случайных средах, принципиально разнятся, а физические механизмы, приводящие к локализации в последнем случае, на наш взгляд, требуют дополнительного изучения.

В целом, локализационные явления при прохождении волн через регулярные и случайные дискретные среды, обусловленные различными физическими механизмами, имеют широкое распространение, а всестороннее исследование их проявлений в естественных условиях и возможностей практического применения при разработке устройств, предназначенных для работы от СВЧ до оптического диапазонов, представляется весьма актуальным.

Целью диссертационной работы является изучение локализации классических (без учета квантовых эффектов) электромагнитных волн, заключающейся в пространственном перераспределении энергии поля, формировании условий для распространения отдельных гармонических составляющих широкополосного излучения, изменении скорости распространения волновых пакетов в дискретных средах и структурах (пространственная, частотная и временная локализации соответственно).

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Разработка метода самосогласованных уравнений, позволяющего получать строгие решения электродинамических задач возбуждения заданными источниками двух- и трехмерных систем тел, для каждого из которых соответствующая дифракционная задача имеет решение в аналитическом виде.

2. Теоретическое и экспериментальное изучение дисперсионных характеристик, спектров пропускания и пространственных распределений интенсивностей поля в двух- и трехмерных ФК с различными электрофизическими характеристиками элементов, при наличии и в отсутствие дефектов внутренней кристаллической структуры.

3. Создание электродинамических моделей возбуждения слоистых и дискретных покрытий проводящих поверхностей точечными источниками и разработка на их основе оптимальных методов регулирования приповерхностных полей. 4. Выявление возможностей возникновения локализованных волновых состояний в двумерных случайных средах при различных способах привнесения разупорядоченности в их внутреннюю структуру, и изучение физических механизмов, лежащих в их основе.

5. Экспериментальное исследование распространения электромагнитных волн в лесных средах с целью определения условий формирования и проявления боковых волн как одной из форм локализации излучения в естественных условиях.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались экспериментальные и теоретические методы. К числу первых относились лабораторные измерения по определению уровня СВЧ излучения в присутствии рассматриваемых в работе дискретных и слоистых структур, а также натурные измерения, связанные с изучением прохождения гармонических и импульсных сигналов через лесные покровы земной поверхности. В теоретической части работы использовались три основные метода: метод самосогласованных уравнений, разработка которого являлась одной из решаемых в работе задач, метод разложения по плоским волнам, предназначенный для определения дисперсионных свойств дискретных периодических структур, и метод конечных разностей во временной области, позволяющий выполнять численное моделирование дифракции волн на трехмерных структурах.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые обнаружены и исследованы резонансные свойства двумерных ФК, проявляющиеся в форме локализации излучения во внутренних областях пространственно ограниченных периодических систем рассеивателей на определенных частотах. Выявлены физические механизмы, приводящие к возникновению таких свойств у металлических и диэлектрических ФК. Предложены простые пути достижения оптимальных характеристик резонаторов на основе ФК путем изменения геометрических параметров последних.

2. С использованием различных подходов продемонстрировано наличие у металлических двумерных ФК свойств сильно диспергирующих сред с ультранизкими значениями (от 0 до 1) диэлектрической проницаемости от СВЧ и вплоть до видимого диапазонов частот. Показана возможность выполнения на границах таких сред условий полного внутреннего отражения волн в широком диапазоне углов падения, что открывает большие перспективы для создания на их основе устройств трансформации пространственного распределения излучения.

3. Построена базирующаяся на континуальном переходе модель возбуждения многопроводной системы при облучении ее точечным излучателем, исходя из которой доказано существование поверхностных волн, распространяющихся вдоль элементов и формирующихся за счет их взаимного влияния. Проведены экспериментальные исследования покрытий проводящих поверхностей на основе таких систем, показана их применимость и эффективность для регулирования уровней приповерхностных полей, подтверждены основные положения построенной теории.

4. Проведен анализ распространения в двумерных ФК коротких по сравнению с пространственной протяженностью кристалла волновых пакетов. Обнаружена возможность временной локализации пакетов в пределах ФК, возникающая при их возбуждении на частотах запрещенных зон.

5. Выполнено исследование сильной локализации волн в модельных двумерных средах на основе ФК с различными способами привнесения разупорядоченности в их структуру. С использованием различных критериев определен диапазон параметров задачи, при которых наблюдение такого рода эффектов становится возможным. Впервые обнаружено, что при облучении случайных сред вблизи их границ возникает область относительного увеличения статистически определяемой полной интенсивности поля, что может трактоваться как приграничная локализация излучения. Дана наглядная физическая интерпретация механизма ее возникновения.

6. Экспериментально исследованы условия формирования боковых волн как одной из форм локализации излучения при распространении волн VHF и UHF диапазонов в лесной растительности. Определены минимальные дистанции, на которых их наблюдение становится возможным. Предложен простой метод определения эффективных электрофизических параметров растительности, базирующийся на анализе экспериментальных данных, указывающих на существование боковых волн в лесной среде.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты работы имеют практическое значение для проектирования и создания волноведущих, резонаторных, фокусирующих систем, предназначенных для работы в широкой полосе частот, начиная от СВЧ и вплоть до видимого диапазонов излучения. Разработанные методы регулирования приповерхностных полей могут быть использованы при решении задач электромагнитной совместимости радиосредств. Развиваемый в работе метод самосогласованных уравнений за счет высокой эффективности и малой требовательности к вычислительным ресурсам может служить альтернативой другим современным численным методам при решении некоторых классов дифракционных задач. Полученные в лесных средах экспериментальные результаты, связанные с анализом условий возникновения боковых волн и возможностью резонансного прохождения широкополосных излучений, являются определенным вкладом в решение проблемы распространения волн вблизи земной поверхности, покрытой растительностью.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Пространственно ограниченные двумерные ФК обладают резонансными свойствами, заключающимися в локализации излучения во внутренних областях таких структур и наиболее ярко проявляющимися на частотах, граничных между запрещенными и разрешенными зонами в спектре собственных электромагнитных состояний ФК.

2. Двумерные металлические ФК на частотах первой разрешенной зоны проявляют свойства сплошных сред с ультранизкими значениями диэлектрической проницаемости. Создание дефектных каналов в таких ФК приводит к высокой степени локализации излучения в пределах канала не только на запрещенных, но и на разрешенных для распространения в ФК частотах за счет механизма полного внутреннего отражения волн.

3. Вдоль элементов многопроводной системы – проволочной среды – при возбуждении ее локальным источником электромагнитного поля могут распространяться поверхностные волны, существование которых обусловлено взаимным влиянием составляющих ее элементов.

4. Поверхностные покрытия на основе двумерных ФК, представляющие собой системы коротких по сравнению с длиной волны отрезков цилиндрических проводников – штырьковые структуры, и магнитодиэлектрические слои являются эффективными средствами регулирования уровня приповерхностного поля за счет его пространственного перераспределения. Линейные дефекты в штырьковых структурах способны выступать в качестве поверхностных открытых волноводов, локализация поля в которых достигается сочетанием двух механизмов – полного внутреннего отражения и дифракционного.

5. При возбуждении случайной двумерной дискретной среды имеет место приграничная локализация излучения, заключающаяся в увеличении статистически определяемой полной интенсивности поля вблизи границы. Физическим механизмом, приводящим к такой локализации, является конструктивная интерференция падающих и однократно рассеянных элементами среды волн.

6. При распространении волн VHF и низкочастотной части UHF диапазонов в лесных средах основным механизмом передачи излучения на дистанции свыше нескольких десятков длин волн является его локализация в виде боковых волн, распространяющихся вдоль верхней кромки растительности. В этом случае погонное ослабление как один из основных параметров, характеризующих затухание поля в лесной среде, малоинформативно.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов обусловлена непротиворечивостью использованных моделей общепринятым физическим представлениям, корректностью использованных приближений, статистической обеспеченностью результатов экспериментов, использованием известных численных методов, а при использовании метода самосогласованных уравнений – соответствием полученных результатов как результатам моделирования с применением иных теоретических подходов, так и хорошим согласием расчетных и экспериментальных данных.

Апробация результатов исследования. Диссертационная работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 гг. Приоритетное направление II.12 «Современные проблемы радиофизики и акустики, в том числе фундаментальные основы радиофизических и акустических методов связи, локации и диагностики, изучение нелинейных волновых явлений». Исследования по диссертации были поддержаны грантами РФФИ №№ 05-02-97205 а, 08-02-98003 р a, 12-02-98010 р a, 15-47-04315 р сибирь а.

Результаты работы были представлены на Всероссийских и международных конференциях: «International Symposium on Electromagnetic Compatibility» (Пекин, Китай, 1992), XII конференции по распространению радиоволн (Ульяновск, 1993), XVIII, XX, XXIV Всероссийских конференциях по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 1996; Нижний Новгород, 2002; Иркутск, 2014), IV Международной научно-технической конференции «Распространение и дифракция электромагнитных волн в неоднородных средах». (Вологда, 1994), Всероссийской конференции «Направления развития систем и средств радиосвязи» (Воронеж, 1995), Международном симпозиуме по распространению радиоволн и дистанционному зондированию (Ахмедабад, Индия, 1995), Международной конференции «Физика ионосферы и атмосферы Земли» (Иркутск, 1998), 3-м международном симпозиуме «Sibconvers'99» (Томск, 1999), XII Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению волн (Москва, 2001), Всероссийской конференции «Физика радиоволн» (Томск, 2002), 6-м международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии «ЭМС - 2005» (Санкт-Петербург, 2005), Международном семинаре «Days of diffraction – 2006» (Санкт-Петербург, 2006), XIV, XXIV, XXV Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана» (Бурятия, 2007; Томск, 2018; Новосибирск, 2019), III, V, VI Всероссийских конференциях «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2009, 2011, 2012), III Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (Муром, 2010), Всероссийской конференции «Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой» (Улан-Удэ, 2010), Международной научной конференции «Зондирование земных покровов радарами и радиометрами с синтезированной апертурой» (Улан-Удэ, 2013), 2-й, 3-й, 4-й, 6-й, 7-й, 8-й Международных научнопрактических конференциях «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2008, 2010, 2012, 2015, 2017, 2019).

Материалы диссертации опубликованы в 32 работах, в том числе 26 статьях в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 14 статей в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Scopus), 1 монографии (в том числе в соавторстве), 2 статьях в прочих научных журналах; получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в выборе научного направления исследований, постановке и решении основных задач работы. Основные результаты получены лично автором либо под его руководством. Автором сформулированы основные положения и выводы диссертационной работы.

Идея континуального приближения, использовавшегося в первой главе работы при решении задачи возбуждения многопроводной системы, предложена Ю. Л. Ломухиным, за что автор ему глубоко и искренне признателен.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 2 разделов, 7 глав, заключения и списка литературы из 262 наименований. Общий объем диссертации 233 страницы, включая 104 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Работа включает два раздела, первый из которых освещает круг вопросов, связанных с исследованием локализации электромагнитных волн в упорядоченных дискретных и слоистых средах, второй связан с поиском условий и выявлению механизмов возникновения локализованных волновых состояний в модельных и природных случайных средах.

Глава 1.1 посвящена изучению различных видов локализации излучения в двумерных и трехмерных ФК, проявляющейся в форме пространственной концентрации энергии поля внутри либо за пределами таких структур и возникающей в силу различных физических механизмов.

В параграфе 1.1.1 дан краткий обзор современных представлений о природе, основных свойствах и перспективах использования обширного класса объектов и устройств, подпадающих под определение ФК. Особое внимание уделено так называемым проволочным средам (*wire media*), представляющим собой, с одной стороны, двумерные ФК, образованные хорошо проводящими элементами, а с другой – анизотропные метаматериалы, обладающие необычными электрофизическими характеристиками. В частности, последнее заключается в том, что при определенных условиях они проявляют плазмоподобные свойства, а именно, обладают дисперсией и характеризуются пороговой частотой, ниже которой их эффективная диэлектрическая проницаемость становится отрицательной, а выше – не превышает единицы.

В параграфе 1.1.2 рассмотрены теоретические методы, используемые в работе. Основное внимание уделено методу самосогласованных уравнений, применительно к задаче о дифракции волн на системе тел развиваемого, в том числе, настоящей работой. Суть метода сводится к тому, что поле в системе представляется в виде суммы известного первичного поля и неизвестного вторичного, рассеянного на элементах. Последнее записывается в виде бесконечных рядов по элементарным волновым функциям с неизвестными коэффициентами. В частности, поле, рассеянное на N элементах, ищется в виде суммы

N дифракционных рядов, в которой один из рядов составлен из волновых функций одного тела, а волновые функции в остальных рядах при помощи теорем сложения выражены через собственные волновые функции первого тела. Далее из удовлетворения граничным условиям на поверхности каждого элемента получаются системы неоднородных линейных уравнений относительно неизвестных – искомых коэффициентов разложения, которые разрешаются стандартными методами.

Параграф 1.1.3 посвящен вопросам локализации излучения в ФК на частотах запрещенных зон. Теоретически – с использованием различных численных методов – и экспериментально определены диапазоны частот, соответствующие запрещенным зонам в спектрах пропускания двумерных металлических ФК, представляющих собой квадратные решетки цилиндрических рассеивателей. Изучена зависимость этих спектров от основных параметров ФК. Поскольку локализация поля в данном случае выражается в экспоненциальном убывании его интенсивности, обусловленной как плазмоподобным поведением металлических структур, так и брэгговским отражением волн, отдельно рассмотрены ситуации облучения ФК внешним источником и погружения последнего внутрь ФК (рисунок 1).



а – спектр излучения на выходе из ФК, б – линейный разрез поля вдоль оси x и пространственное распределение поля на частоте 17.4 ГГц, соответствующей второй – неполной – запрещенной зоне.

Рисунок 1 – Спектральное и пространственное распределения поля при погруженном в ФК источнике поля

В последнем случае показано, что на частотах неполной запрещенной зоны подавление волнового распространения в ФК в одном из направлений сопровождается значительной концентрацией излучаемой источником энергии в других направлениях, что может трактоваться как возникновение волноведущих каналов в ФК.

В параграфе 1.1.4 рассматриваются резонансные свойства двумерных металлических ФК, заключающиеся в локализации излучения во внутренних областях таких структур на частотах первой разрешенной зоны. На рисунке 2

показан типичный спектр пропускания пространственно ограниченного ФК в полосе частот разрешенной зоны, демонстрирующий существование нескольких пиков, число которых на единицу меньше числа рядов элементов в ФК в направлении распространения падающей волны.



а – спектр пропускания 121-элементного (11 на 11) металлического ФК в диапазоне частот, соответствующем первой запрещенной зоне, б – спектральное представление интенсивности внутри ФК, в, г – пространственные разрезы поля вдоль оси *x* на частотах 9.16 ГГц и 15.01 ГГц, соответствующих первому и последнему максимумам на рисунке (б). Период *d* = 1 см, радиус цилиндров *a* = 0.2 см. Направление падения волны на ФК на рисунках (в) и (г) – слева направо
 Рисунок 2 – Спектральное и пространственное распределения поля при взаимодействии с ФК

Приведенное здесь же спектральное представление интенсивности поля в центральной области ФК указывает на то, что на частотах, соответствующих первому и последнему пикам пропускания, располагающихся на границах запрещенных и первой разрешенной зон, имеет место максимальная концентрация энергии в ФК. Это же демонстрируют и пространственные разрезы поля на этих частотах, описывающие локализацию излучения в центре ФК.

В целом, полученные данные позволяют утверждать, что любой двумерный металлический ФК способен проявлять резонансные свойства, заключающиеся в локализации излучения внутри кристалла на некоторых частотах разрешенной зоны, и может рассматриваться в качестве эффективного объемного резонатора, способного функционировать в радио- и оптическом диапазонах электромагнитного спектра. Эффективность таких резонаторов следует из оценки величины их добротности, которая даже для рассматриваемых малоэлементных структур на частоте первого резонанса составляет несколько сотен единиц (см. рисунок 2б), что соответствует величинам добротностей традиционных объемных СВЧ резонаторов, и, как установлено, существенно возрастает при увеличении числа и плотности компоновки элементов в ФК.

Физический механизм, приводящий к вышеописанной локализации излучения металлическими ФК, интерпретируется следующим образом. При нормальном распространении волн относительно осей симметрии цилиндрических элементов ФК можно представить в виде метаматериала, описываемого эффективными значениями диэлектрической проницаемости $\varepsilon(\omega) = 1 - 1$ ω_p^2/ω^2 , где ω_p^2 – плазменная частота. На частотах, лежащих вблизи края полной запрещенной зоны, проницаемость такого материала близка к нулю, что приводит к формированию в нем волнового процесса, характеризующегося длиной волны, много большей, чем длина волны излучения в окружающей ФК среде. При этом конечность размеров ФК приводит к возникновению в таком метадиэлектрике, наряду с бегущими, стоячих волн, обусловленных отражениями от его границ. Это, в свою очередь, ведет к появлению характерных пучностей в пространственном распределении поля, линейные размеры которых превосходят длину волны в окружающей среде. Таким образом, двумерный металлический ФК на частотах разрешенной зоны может рассматриваться в качестве открытого резонатора типа Фабри-Перо, способного функционировать в различных диапазонах электромагнитного спектра. Особенностью рассматриваемых структур является их крайне высокая дисперсионность, а следовательно, возможность изменения характера распределения поля в них при незначительном изменении частоты возбуждения.

В ходе обработки данных вычислительных экспериментов в работе получены аппроксимирующие соотношения, связывающие геометрические параметры ФК с частотой первого резонанса, а также величины интенсивности поля на этой частоте в центральных областях структур различной протяженности. В результате предложен простой алгоритм оптимизации параметров двумерных металлических ФК, позволяющий создавать высокоэффективные объемные резонаторы, работающие на заданных частотах и обеспечивающие требуемый уровень локализации излучения.

Основные выводы этой части работы полностью подтверждены экспериментальными исследованиями.

Параграф 1.1.5 посвящен изучению иных способов пространственной локализации поля с помощью металлических ФК, в основе которых лежит

проявление такими структурами свойств метаматериалов (проволочных сред) с крайне низкими значениями эффективной диэлектрической проницаемости.

Рассмотрены различные методы определения электрофизических параметров таких материалов. К их числу в первую очередь может быть отнесен непосредственный анализ спектров пропускания ФК, частоты максимумов которых при сопоставлении с линейными размерами структур могут дать – в соответствии с выводами предыдущей части работы – исчерпывающую информацию о дисперсионных свойствах метаматериала.

Другим методом, могущим быть использованным как при теоретических, так и при экспериментальных исследованиях, является анализ процессов преломления волн на границах ФК. На рисунке 3 представлены интерференционные картины, сформированные в результате падения *E*-поляризованной плоской волны под различными углами на металлический ФК на частоте разрешенной зоны.



а – угол падения 35°, б – угол падения 41°. Параметры структуры соответствуют описанию к рис. 2. Пунктирными линиями обозначены поверхности волновых фронтов падающей и прошедшей в ФК волн

Рисунок 3 – Пространственные картины преломления и отражения электромагнитной волны при взаимодействии с границами металлического ФК на частоте 12 ГГц

Отсутствие локальных неоднородностей поля внутри ФК, связанных с рассеянием на отдельных элементах, подтверждают возможность описания свойств таких структур на частотах разрешенной зоны как однородного метадиэлектрика. Очевидно (рисунок 3а), что диэлектрическая проницаемость такого материала меньше проницаемости окружающего его воздуха, т. е. в среде распространяются быстрые по отношению к окружающему пространству волны. Об этом свидетельствует превышение угла падения углом преломления (~ 66°) волны, а также характер пространственного распределения пучностей поля, возникающих вследствие отражения от границ структуры вне ФК и внутри него. При увеличении угла падения появляются условия для возникновения явления полного внутреннего отражения волн (рисунок 36). Здесь поведение прошедшего в среду поля меняется, оно приобретает затухающий по мере погружения вглубь среды характер, локализуясь вблизи границы ФК в форме распространяющихся вдоль нее поверхностных волн. Анализ углов, при которых возникает полное внутреннее отражение на различных частотах, а также процессов преломления волны на границе сред на углах, меньших критических, позволяют определить эффективную диэлектрическую проницаемость проволочной среды в микроволновом и инфракрасном диапазонах.

В видимой части оптического диапазона, где глубина проникновения поля в элементы ФК и тепловые потери относительно велики, необходимо использовать иные методы определения электрофизических характеристик таких материалов. В частности, возможно прямое сопоставление результатов численного моделирования процессов отражения и прохождения волн при взаимодействии с границами сплошного диэлектрика и металлического ФК, эффективные электрофизические свойства которого описываются в данном случае комплексной величиной показателя преломления. Для описания диэлектрических характеристик элементов ФК в ходе моделирования использовалась дисперсионная модель Друдэ:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}, \qquad \varepsilon''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \omega \gamma^2},$$

где $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$ – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, ω_p – плазменная частота, γ – фактор затухания. На рисунке 4а представлен пример такого сопоставления, демонстрирующий хорошее согласие результатов моделирования поля в присутствии дискретной и однородной структур.

Показатель преломления последней определялся критерием минимизации различий амплитудно-фазового распределения поля между обоими случаями при изменении действительной и мнимой частей показателя преломления диэлектрика в диапазоне значений от нуля до единицы.

На рисунке 46 приведены частотные зависимости действительной и мнимой частей показателя преломления металлического ФК, определенные по данной методике. Отметим, что большие по величине значения мнимой части показателя преломления в низкочастотной части рассматриваемого диапазона связаны, в основном, с формированием запрещенной зоны в спектре собственных состояний такого ФК.

В целом, полученные данные говорят о том, что даже при учете потерь в элементах ФК и его дисперсионных свойств, затухание электромагнитных волн оптического диапазона в метаматериале на основе металлических ФК оказывается значительно ниже, чем в любом однородном металле. Если в металлах в оптическом диапазоне мнимая часть показателя преломления преобладает над действительной, то в проволочных метаматериалах она оказывается почти на два порядка ниже, что делает такие материалы весьма перспективными для создания различных устройств преобразования излучений оптического диапазона.



а – пространственные распределения поля при падении плоской волны на границы проволочной среды (вверху) и однородного диэлектрика с показателем преломления $n = 0.617 + i \ 0.018$ (внизу) на частоте 400 ТГц. ФК состоит из серебряных элементов, d = 200 нм, a = 20 нм. Направление прихода волны – слева направо. б – частотные зависимости действительной и мнимой частей показателя преломления проволочной среды в видимом диапазоне

Рисунок 4 – Картины пространственного распределения поля и спектральное поведение показателя преломления проволочной среды

Уникальные электрофизические свойства металлических ФК на разрешенных частотах могут быть использованы для разнообразных практических приложений. Например, для создания коллиматоров или, другими словами, границ раздела сред, преобразующих расходящийся пучок лучей в параллельный (такие поверхности в антенной технике можно считать поверхностями «синфазной апертуры»). На рисунке 5 представлены результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующего возможность такого использования металлических ФК.



а – концептуальная схема вычислительного эксперимента, б – картина распределения интенсивности излучения на частоте 84 ТГц. Источник излучения – нить синфазного электрического тока. Параметры кристалла: d = 1 мкм, a = 0.05 мкм.

Рисунок 5 – Иллюстрация работы коллиматора

Наблюдаемая на рисунке «делокализация» излучения указывает на возможность и обратного преобразования – энергия падающих на ФК локально плоских волн может, при соответствующем выборе его параметров, локализоваться в ограниченной области пространства внутри него.

В параграфе 1.1.6 обсуждается аналитический метод описания электродинамических свойств пространственно неограниченных металлических ФК (проволочных сред, многопроводных систем). В отличие от большинства подобных методов, в нашем случае в качестве исходной формулировалась строгая задача возбуждения элементарным электрическим вибратором системы цилиндров. Исходное выражение для вектора Герца поля диполя, ориентированного вдоль оси цилиндров, имело вид:

$$\Pi_{z\Sigma} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im\phi_j} \int_{-\infty}^{\infty} \left[A e^{-im\theta_{0j}} \begin{cases} H_m^{(1)}(\vartheta d_{0j}) J_m(\vartheta r_j) \\ H_m^{(1)}(\vartheta r_j) J_m(\vartheta d_{0j}) \end{cases} e^{-i\chi h_0} + L_m \right] e^{i\chi z} d\chi, \quad (1)$$

$$L_m(\vartheta r_j) = H_m^{(1)}(\vartheta r_j) P_{mj}(\chi) + \sum_{\substack{f=1\\f\neq j}}^{F} \sum_{s=-\infty}^{\infty} P_{mf}(\chi) e^{-i(m-s)\theta_{fj}} \times \begin{cases} H_{m-s}^{(1)}(\vartheta r_j) J_m(\vartheta d_{fj}) \\ H_{m-s}^{(1)}(\vartheta d_{fj}) J_m(\vartheta r_j) \end{cases} r_j > d_{fj}. \quad (2)$$

Первое слагаемое в (1) в квадратных скобках – поле источника, второе – поле, переизлученное системой из F элементов; A – амплитуда источника, d_{0j} , θ_{0j} , h_0 ; r_j , φ_j , z_0 – координаты источника поля и точки наблюдения соответственно в цилиндрической системе координат, совмещенной с произвольным j-ым цилиндром; d_{fj} , θ_{fj} в (2) – радиальные и угловые координаты, определяющие взаимное положение элементов; $H_m^{(1)}(x)$ и $J_m(x)$ – функции Ханкеля первого рода и Бесселя m-ого порядка, χ и ϑ – проекции волнового вектора на соответствующие оси координат. Удовлетворяя граничным условиям на поверхности цилиндров, которые для общности получаемых результатов считаем импедансными, получаем следующую систему неоднородных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов P_{mf} :

$$\vartheta \left[A e^{-im\theta_{0j}} H_m^{(1)}(\vartheta d_{0j}) J_m(\vartheta a) e^{-i\chi h_0} + L_m(\vartheta a) \right] =$$

= $i\omega \varepsilon_a Z \left[A e^{-im\theta_{0j}} H_m^{(1)}(\vartheta d_{0j}) J_m'(\vartheta a) e^{-i\chi h_0} + L_m'(\vartheta a) \right],$ (3)

где j = 1, 2..., F, $m = 0, \pm 1, \pm 2..., Z$ – импеданс цилиндров, $J'_m(\vartheta a)$, $L'_m(\vartheta a)$ – производные функций по аргументу в скобках, определяемые при $r_j = a$.

Трудности, обусловленные необходимостью оперировать определителем системы уравнений, имеющем порядок, равный количеству элементов в

структуре, преодолеваются использованием континуального приближения. Математически оно заключается в следующем переходе:

$$\sum_{\substack{f=1\\f\neq j}}^{r}\sum_{s=-\infty}^{\infty}P_{mf}e^{-i(m-s)\theta_{fj}}H_{m-s}^{(1)}(\vartheta d_{fj})J_m(\vartheta r_j) =$$
(4)
$$= J_m(\vartheta r_j)\frac{\alpha}{\vartheta^2} \int_0^{2\pi} \int_d^{\infty}\sum_{s=-\infty}^{\infty} e^{-i(m-s)\theta_{fj}}P_{mf}(x)H_{m-s}^{(1)}(\vartheta x)\vartheta x \,d\theta_{fj}\,d(\vartheta x).$$

Здесь предполагается, что $F \to \infty$, переменная x = fd, $P_{mf}(x)$ - непрерывная функция, зависящая от x, $x \, dx \, d\theta_{fj} = dS$ – элемент площади, α – плотность расположения цилиндров. Полагая для достаточно частой, бесконечно протяженной структуры функцию $P_{mf}(x)$ ограниченной, непрерывной и медленно меняющейся, после выполнения ряда преобразований приходим к следующему представлению выражения (2):

$$L_{mj}(\vartheta r_j) = P_{mj} H_m^{(1)}(\vartheta r_j) - \frac{2\pi\alpha}{\vartheta^2} J_m(\vartheta r_j) P_{mf} H_1^{(1)}(\vartheta d) \,\vartheta d.$$
(5)

Физически суть использованного континуального приближения может трактоваться как переход от исходной структуры к модели, состоящей из элементарной ячейки ФК, помещенной в среду с определенными электродинамическими свойствами. Можно сказать, что в результате таких преобразований сохраняется информация об амплитудно-фазовых соотношениях между полем источника, полем, переизлученным опорным – в данном случае *j*-ым – элементом, и полем, переизлученным остальной частью структуры, причем имеющих место только для *d*-окрестности опорного цилиндра и не зависящих от азимутальной координаты.

Для нахождения неизвестных коэффициентов в (5) формулируется аналогичное уравнение относительно произвольного f-ого цилиндра, расположенного на минимальном расстоянии d от j-ого в исходной структуре. Таким образом, исходная задача возбуждения двумерного бесконечно протяженного ФК сводится к определению двух неизвестных коэффициентов, описывающих возбуждение опорного цилиндра и его ближайшей окрестности.

Данный подход позволил, в частности, проанализировать собственные волны многопроводной системы, определяемые решением дисперсионного уравнения, которое, в свою очередь, формулируется равенством нулю определителя (3). В результате ряда преобразований и в предположении хорошей проводимости цилиндров решение приводится к виду:

$$\chi = k \sqrt{1 + \frac{7.38(2\pi\alpha a - k \operatorname{Im} Z_n)^2}{k^2}} e^{i\frac{ka \operatorname{Re} Z_n}{2\pi\alpha a^2 - ka \operatorname{Im} Z_n}},$$
(6)

где $Z_n = Z/Z_0$, Z_0 – импеданс вакуума.

Таким образом, собственные волны в проволочной среде имеют характер распространяющихся вдоль проводов поверхностных волн, фазовая скорость которых меньше скорости света в окружающей среде. Известно, что формирование волн такого типа определяется индуктивным характером импеданса поверхности (в нашем случае означающем выполнение условия Im Z_n< 0), вблизи которой локализуется энергия поля. Поверхностные волны, будучи возбужденными в рассматриваемой многоэлементной системе, распространяются, локализуясь вдоль цилиндров, ее образующих, не создавая поле излучения в радиальном направлении. При этом важнейшим выводом, следующим из выражения (6), является возможность формирования собственных мод поверхностного типа в многопроводных системах не только за счет электрофизических свойств отдельно взятых элементов, но за счет их взаимного влияния. Это, в свою очередь, означает принципиальную возможность распространения поверхностных электромагнитных волн в многопроводных системах, даже состоящих из идеально проводящих элементов (низкочастотное приближение для металлических проводов).

Континуальное приближение позволяет получить аналитическое решение исходной задачи (1) – (2). Полагая $d_0 \gg d$ и рассматривая распространение волн, близкое к радиальному относительно элементов (т. е. tg $\alpha = d_0/|z - h_0| \gg 1$), используя метод перевала для оценки интеграла в (1), получаем:

$$\Pi_{z} = 2A\sqrt{i} \frac{e^{ik\sqrt{d_{0}^{2} + (z-h_{0})^{2}}}}{\sqrt{d_{0}^{2} + (z-h_{0})^{2}}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\phi_{j}-\theta_{0j})} e^{-i\frac{\pi}{2}(m+\frac{1}{2})} W_{m}(kr_{j})$$

$$W_m(kr_j) = J_m(kr_j \sin \alpha) - \frac{J_m(ka \sin \alpha) \left[H_m^{(1)}(kr_j \sin \alpha) - \frac{2\pi}{kd} H_1^{(1)}(kd \sin \alpha) J_m(kr_j \sin \alpha)\right]}{H_m^{(1)}(ka \sin \alpha) - \frac{2\pi}{kd} H_1^{(1)}(kd \sin \alpha) J_m(ka \sin \alpha)}$$

На рисунке 6 изображено типичное поведение относительной интенсивности поля $B = 10 lg W_0 W_0^*$ (* – знак комплексного сопряжения) в зависимости от параметра kd ($\alpha = \pi/2$). Здесь же представлены результаты строгого расчета. В области низких частот, где континуальное приближение является корректным, наблюдается хорошее согласие полученных результатов. Важной представляется возможность с использованием предлагаемого подхода оценки не только пороговой частоты пропускания ФК, но и амплитудных характеристик излучения в низкочастотной области.



1 – аналитический подход, 2 – строгое численное моделирование

Рисунок 6 – Спектры пропускания металлического ФК

 \vec{F} \vec{F}

быть связано не с аномальными дисперсионными свойствами металлических ФК, а с дифракцией на решетке рассеивателей, образующих внешнюю поверхность ФК. Известно, что при рассеянии волн на плоской решетке элементов возможно формирование пространственного спектра волн, распространяющихся под разными углами к плоскости решетки. При определенных условиях одна из отрицательных гармоник спектра становится доминирующей и ее появление можно ошибочно интерпретировать как возникновение отрицательного преломления волн. Данный факт подтвержден результатами численного эксперимента.

Более перспективным с точки зрения формирования условий для отрицательного преломления и, как следствие, использования в разнообразных практических приложениях, на наш взгляд, следует считать наклонное прохождение волн относительно цилиндрических элементов в выше рассмотренных ФК, считая их одноосными анизотропными средами. Подобно магнитоактивной плазме эффективная диэлектрическая проницаемость таких структур может быть описана соотношением:

$$\vec{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_t & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \qquad \varepsilon_z(\omega) = \varepsilon_t (1 - \omega_p^2 / \omega^2),$$

где ε_t – диэлектрическая проницаемость межэлементного пространства, ось *z* ориентирована вдоль оси цилиндров. Тогда дисперсионное уравнение для ТМ-волн, распространяющихся в такой проволочной среде, имеет вид:

$$\frac{k_z^2}{\varepsilon_t} + \frac{k_x^2}{\varepsilon_z} = \frac{\omega^2}{c^2} = k_0^2 \quad \text{или} \quad k_z = \pm \sqrt{k_0^2 \varepsilon_t - k_x^2 \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_z}}, \tag{7}$$

где k_0 – волновое число в свободном пространстве. Очевидно, что имеет место различный характер распространения волн в среде в зависимости от знака ε_z , и, как следствие, различный характер процессов преломления волн на границе кристалла с изотропной средой (в плоскости x0y). Анализ этих процессов

проводился путем построения изочастотных диаграмм в пространстве волновых векторов. Из (7) следует, что на частотах ниже плазменной, при отрицательных значениях ε_z эти диаграммы имеют гиперболический вид. Это свидетельствует о возможности отрицательной рефракции волн на границах таких сред. Более того, анализ (7) показывает, что уравнение для любых действительных k_x будет иметь действительное решение для k_z , а следовательно, такой материал способен поддерживать распространение волн с большими значениями волнового вектора ($k_x > 2\pi/\lambda_0$), являющимися эванесцентными для свободного пространства. Таким образом, проволочные среды могут служить основой для создания «сверхлинз», т. е. оптических устройств, фокусирующая способность которых не ограничена «дифракционным пределом».

Иллюстрацией возможности отрицательного преломления волн оптического диапазона на границе метаматериала на основе металлического ФК служат результаты строгого численного моделирования (рисунок 7).



Рисунок 7 – Отрицательное преломление волн на границе металлического ФК, образованного серебряными цилиндрическими элементами, на частоте 470 ТГц. Направление прихода гауссова пучка – слева направо. Период размещения элементов в структуре, погруженной в диэлектрическую матрицу из оксида алюминия, составлял 110 нм, радиус – 25 нм, длина – 1500 нм. ФК возбуждается плоской волной, сформированной в виде гауссова пучка

Параграф 1.1.8 посвящен теоретическому и экспериментальному изучению возможности наблюдения эффекта Малюжинца при прохождении волн через двумерные ФК. Изначально сформулированная в 30-х гг. прошлого века суть данного эффекта заключалась в полном (без отражения) прохождении плоской Н-поляризованной волны сквозь одномерную дифракционную решетку из элементов произвольного поперечного сечения при выполнении условия: $\phi = \arccos(d_1/d)$, где d_1 – минимальное расстояние между соседними элементами решетки, d – период структуры, ф – угол падения, отсчитываемый от нормали к плоскости решетки. В нашей работе впервые рассмотрена возможность наблюдения данного эффекта в объемных дифракционных структурах. В ходе проведения измерений и численного моделирования показано, что угловые зависимости поля, проходящего через одно-, двух- и трехрядные дифракционные структуры из металлических цилиндров имеют ярко выраженные максимумы при одних и тех же углах падения волны, которые могут трактоваться только как проявления эффекта Малюжинца. Следовательно, данный эффект имеет место не только в плоскостных, но и в объемных решетках, по сути представляющих собой двумерные ФК.

В параграфе 1.1.9 рассматривается эффективность применения метода самосогласованных уравнений для анализа задач возбуждения трехмерных ФК. На примере кубической решетки, состоящей из металлических сферических элементов, демонстрируется методика формулировки системы неоднородных алгебраических уравнений, решение которой позволяет определить соответствующие неизвестные амплитудные коэффициенты, описывающие возбуждение отдельных элементов ФК с учетом их взаимного влияния. С использованием полученных выражений рассчитаны спектры пропускания и пространственные разрезы поля в таких структурах, демонстрирующие возможность локализации излучения в ФК на частотах как запрещенных, так и разрешенных зон. Следует отметить, что позволяя получить корректные результаты в трехмерных задачах, при алгоритмизации их решения метод самосогласованных уравнений требует оперирования достаточно громоздкими выражениями и затрат значительно большего машинного времени при выполнении численного моделирования по сравнению с двумерными ситуациями.

Глава 1.2 работы посвящена анализу проблемы пространственного перераспределения электромагнитных полей вблизи плоских металлических поверхностей, осуществляемого с помощью магнитодиэлектрических покрытий.

В параграфе 1.2.1 дан краткий обзор существующих методов такого регулирования, заключающихся в размещении на указанных поверхностях либо слоя поглотителя, обеспечивающего ослабление приповерхностного поля за счет омических потерь, либо покрытия, обладающего – в зависимости от его геометрических параметров – различным типом поверхностного импеданса. В случае индуктивного его характера имеет место локализация излучения вблизи поверхности за счет формирования замедленных поверхностных волн, распространяющихся вдоль нее, при емкостном импедансе поле вблизи поверхности ослабляется из-за пространственного перераспределения.

В параграфе 1.2.2 в общем виде рассмотрена задача возбуждения магнитодиэлектрического слоя на проводящей поверхности вертикальным электрическим диполем. С использованием спектральных представлений поля вне слоя и внутри него и при удовлетворении граничным условиям на поверхностях раздела сред, определяется неизвестный коэффициент разложения, имеющий смысл спектрального коэффициента отражения. Его вид упрощается в предположении, что показатель преломления материала слоя достаточно велик. В результате поле над слоем при скользящем распространении волн представляется формулой типа Вейля-Ван-дер-Поля:

$$E_{z} = 2Ak_{1}^{2} \exp(ik_{1}r)/r W(\sigma),$$

$$W(\sigma) = 1 \pm 2\sigma \exp(\sigma^{2}) \int_{\mp\sigma}^{\infty} \exp(-t^{2}) dt,$$

$$\sigma = i s_p \sqrt{k_1 r}, \quad s_p = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} n \operatorname{th}(i k_2 d) \frac{exp(i \frac{\pi}{4})}{\sqrt{2}}.$$

Здесь верхние знаки соответствуют условию Im $s_p > 0$, нижние – Im $s_p < 0$, A – амплитудный коэффициент, r – расстояние между диполем и точкой наблюдения, $k_{1,2}$ – волновые числа вне и внутри слоя, $\varepsilon_{1,2}$ – диэлектрические проницаемости среды над слоем и самого магнитодиэлектрика соответственно, d – толщина слоя, ось z ориентирована вдоль диполя.

Входящий в последнее выражение множитель ослабления $W(\sigma)$ имеет различное асимптотическое поведение в зависимости от знака мнимой части полюса коэффициента отражения s_p , а именно, если Im $s_p < 0$

$$W(\sigma) \sim 2i\sqrt{\pi s_p^2 k_1 r} \exp\left(-s_p^2 k_1 r\right) - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{(2s_p^2 k_1 r)^n} - 0\left[\frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{(2s_p^2 k_1 r)^N}\right], \quad (8a)$$

а при Im *s*_p > 0

$$W(\sigma) \sim -\sum_{n=1}^{N-1} \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{(2s_p^2 k_1 r)^n} - 0 \left[\frac{1 \cdot 3 \dots (2n-1)}{(2s_p^2 k_1 r)^N} \right].$$
(86)

В первом случае над слоем распространяются поверхностные волны, во втором – поле оказывается «отжатым» от поверхности, убывая при удалении от источника по закону r^{-2} при $|s_p^2 k_1 r| >> 1$.

Параграф 1.2.3 посвящен анализу выражений (8) с целью поиска условий эффективного ослабления волн на границе слоя. Отдельно рассмотрены случаи локализации поля вблизи слоя за счет формирования поверхностных волн и их отсутствия. В первой ситуации наряду с поверхностными над магнитодиэлектриком присутствуют так называемые «пространственные» волны (второе слагаемое в (8а)). Показано, что при определенных условиях интерференция этих волн может приводить к полному подавлению приповерхностного поля на определенных частотах.

Если параметры слоя таковы, что Im $s_p > 0$, приповерхностное поле ослаблено по сравнению со случаем распространения над проводящей подложкой. Уровень дополнительного ослабления может варьироваться в зависимости от параметров магнитодиэлектрического покрытия. В частности, анализ (86) позволил установить, что при выполнении условия

$$kd\sqrt{|\varepsilon\mu|}\cos\left(\frac{\varphi_{\varepsilon}+\varphi_{\mu}}{2}\right) = \pi/2$$

ослабление поля на границе слой – окружающая среда максимально и оценивается (в дБ) выражением

$$B = 10 \lg (W(s_p)W^*(s_p)) = -20 \lg \left\{ \frac{|Z|^2 kr}{\ln^2 \left[\frac{\pi}{2} \lg (\varphi_{\varepsilon} + \varphi_{\mu}/2) \right]} \right\},$$

где k – волновое число в пустоте, ε и μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости слоя, $\varphi_{\varepsilon}, \varphi_{\mu}$ – соответствующие углы потерь, Z –

импеданс слоя. Определено, что зависимость ослабления поля от толщины слоя имеет осциллирующий характер с уменьшающейся амплитудой колебаний, появление которых связано с отражениями от проводящей подложки (рисунок 8). Даны рекомендации по синтезу слоев, обладающих максимальными ослабляющими способностями в заданной полосе частот.

В параграфе 1.2.4 рассмотрена взаимосвязь между отражательными и ослабляющими свойствами магнитодиэлектрических покрытий. Указывается, что несмотря на принципиальную разницу в механизмах взаимодействия поля с веществом, обеспечивающих максимально полезный эффект при нормаль-



 результат численного моделирования, 2 – экспериментально полученная кривая. Электрофизические параметры слоя

 $\varepsilon = 14.8 + i0.22, \mu = 1.36 + i0.816$ Рисунок 8 – Зависимость уровня ослабления поля от относительной толщины магнитодиэлектрического слоя

ном и скользящем распространении волн, влияние слоя как такового аналогично в обоих случаях. То есть оптимальный с точки зрения ослабления приповерхностного поля слой обладает минимальной – для заданных электрофизических параметров – отражательной способностью при нормальном падении

плоской волны. В основе этого лежит общий физический механизм, заключающийся в противофазном сложении волн, прошедших через слой, и волн на его поверхности.

В главе 1.3 представлены результаты изучения методов пространственной локализации приповерхностных полей с помощью покрытий, состоящих из дискретных проводящих элементов – штырьковых и спиральных слоев.

В параграфе 1.3.1 в импедансном приближении решена задача возбуждения вертикальным диполем системы коротких по сравнению с длиной волны отрезков тонких металлических цилиндров, установленных вертикально на проводящую подложку, получивших в англоязычной литературе название «fakir's bed-of-nails». В терминах, использованных в главе 1.1, описанные структуры – это двумерные металлические ФК конечной высоты, установленные на проводящее основание.

Поле в среде над штырьковым слоем представляется в виде спектрального разложения по азимутальным гармоникам с неизвестными коэффициентами. Внутри слоя при достаточно частом расположении элементов структура поля совпадает с полем двумерного металлического ФК. Это означает, как показано в главе 1.1, что волны не распространяются в радиальном направлении – «запрещенная зона», а имеет место формирование движущихся вдоль элементов поверхностных волн. Это, в свою очередь, позволяет, используя спектральное представление поля в слое, с использованием теоремы Коши выразить его через полюс подынтегрального выражения, соответствующего поверхностной волне. В результате в явном виде определяется характеристический импеданс межэлементной среды, и при допущении, что верхняя граница покрытия обладает изотропными свойствами, полагается равенство этого импеданса поверхностному сопротивлению штырькового слоя.

Итогом описанных преобразований является аналитическое представление коэффициента отражения поля над слоем, указывающее на то, что исходное подынтегральное выражение имеет особые точки типа точек ветвления и полюса. Последнее говорит о том, что на границе слоя при определенных условиях возникает поверхностная волна. Соответствующий интеграл вычисляется с использованием модифицированного метода перевала. Полученное в результате выражение состоит из трех слагаемых, описывающих поле прямой, отраженной и поверхностной волн. Последняя формируется при выполнении условия tg (χh) > 0, где χ определяется выражением (6), h – высота элементов, что, как и для слоя магнитодиэлектрика на проводящем основании, означает индуктивный характер поверхностного импеданса. Пример расчета поля над штырьковым слоем приведен на рисунке 9а. Полученные аналитические выводы подтверждены результатами строго численного моделирования.



 а – результаты расчета, б – эксперимент.
 На рис. (б) кривая 1 относится к структуре из 1 ряда элементов, расположенных
 между антеннами (см. вставку), кривая 2 – из 5 рядов
 Рисунок 9 – Зависимости уровня поля над штырьковым слоем от его толщины



В параграфе 1.3.2 приведены результаты экспериментальных исследований электродинамических свойств штырьковых слоев на проводящем основании. Получены зависимости интенсивности приповерхностного поля от высоты элементов, находящиеся в хорошем согласии с результатами моделирования (рисунок 9б). Указывается на высокую степень локализации поля вблизи слоя при распространении поверхностных волн и эффективное ослабление его при емкостном характере импеданса поверхности. Изучено влияние протяженности слоя как в поперечном, так и в продольном относительно линии связи антенн направлении и плотности компоновки элементов в структуре на уровень приповерхностного поля. Определены оптимальные для ослабления поля параметры штырькового покрытия, в частности, периода расположения элементов. Обнаружен эффект «насыщения» ослабления при увеличении длины структуры, заключающийся в прекращении его нарастания при определенной протяженности слоя.

Исследовано пространственное распределение поля над штырьковой структурой. Выявлены области локализации излучения при различном характере импеданса поверхности.

Параграф 1.3.3 посвящен экспериментальному изучению свойств спиральных монослоев – одиночных спиральных проводников или различным образом ориентированных отрезков спиральных линий, расположенных в один ряд на проводящем основании. Обнаружено, что при подобном способе формирования покрытий, спиральные проводники не проявляют свойств киральности. Однако такие монослои могут рассматриваться как эффективные широкополосные волноводные и ослабляющие структуры, электродинамические свойства которых близки к свойствам штырьковых слоев.

В главе 1.4 речь идет о локализации поля в кристаллах при наличии дефектов их внутренней структуры.

В параграфе 1.4.1 рассмотрены особенности локализации излучения в точечных и линейных дефектах двумерных ФК. В результате численного моделирования в первом случае установлено, что дефектные моды, обогащающие спектр пропускания кристалла и формирующиеся при взаимодействии поля с дефектом, создаваемым удалением элемента, возникают во *всех* запрещенных зонах ФК. При этом механизм формирования запрещенной зоны (брэгговское отражение либо проявление плазмоподобных свойств ФК) значения не имеет. Продемонстрировано, что наличие точечных дефектов структуры на частотах, соответствующих резонансам в ФК, описанным в параграфе 1.1.4, легко выявляется в ходе моделирования, что делает возможным использования такого подхода для дефектоскопии кристаллических структур.

Известно, что наличие линейных дефектов в ФК может быть использовано, в частности, для канализации излучения как альтернатива традиционным волноведущим устройствам в оптическом диапазоне частот. При этом работа подобных волноводов предполагается в диапазонах запрещенных частот, что исключает проникновение поля вглубь ФК за пределы волноводного канала. В настоящей работе нами показано, что для металлических ФК эффективные волноведущие свойства могут проявляться и на частотах первой разрешенной зоны, где уходу энергии из дефектного канала препятствует полное внутреннее отражение волн на его границах.

На рисунке 10 представлены результаты моделирования подобной ситуации. Видно, что на разрешенной частоте поле свободно проникает в ФК. Затем, по мере распространения происходит перераспределение излучения – рассеиваясь элементами, часть его проникает в дефектную область и далее уже не покидает ее. В результате на выходе из структуры поле оказывается в основном сосредоточено в пределах волноведущего канала.



 а – на частоте запрещенной
 зоны, б – на частоте разрешенной
 зоны
 Рисунок 10 – Структура поля в металлическом ФК с линейным дефектом

Параграф 1.4.2 посвящен изучению эффективности волноведущих дефектных каналов, создаваемых в металлических ФК, образованных элементами конечной длины и рассматривавшихся в главе 1.3 в качестве штырьковых покрытий. Теоретически и экспериментально установлено, что в данном случае наряду с распространением излучения по волноведущему каналу при вышеопределенных соотношениях между высотой элементов и длиной волны над структурой формируются поверхностные волны. Как следствие, по мере распространения эта составляющая излучения из-за дифракционных эффектов частично проникает в канал, что приводит к существенному увеличению локализации поля. Таким образом, открытые волноводы на основе металлических ФК с линейными дефектами, в которых концентрация излучения в дефектных каналах достигается сочетанием двух механизмов – за счет дифракционного затекания поверхностных волн и за счет полного внутреннего отражения – могут служить эффективной альтернативой традиционным волноводам вплоть до видимого диапазона электромагнитного спектра.

Глава 1.5 представляет результаты изучения прохождения импульсных сигналов через ФК. На примере численного моделирования взаимодействия одиночного гауссова импульса с двумерным диэлектрическим ФК ($\varepsilon = 13 - GaAs$), показано, что если частота заполнения импульса соответствует разрешенной зоне, то формируются одиночный отраженный и одиночный прошедший через ФК импульсы. Длительность последнего значительно превышает длительность исходного из-за различных скоростей прохождения через структуру отдельных гармоник волнового пакета.

Если частота возбуждения импульса находится в пределах запрещенной зоны ФК, но ширина его спектра превышает ширину этой зоны, а пространственная протяженность сопоставима с периодом расположения элементов, картина принципиально меняется. Прошедший через ФК сигнал приобретает вид последовательности колоколообразных импульсов весьма малой амплитуды, имеющих экспоненциальную огибающую. Анализ пространственных разрезов поля и временных диаграмм сигнала, полученных внутри ФК, показал, что излучение при этом в течение длительного (по сравнению с предыдущим случаем) времени оказывается локализовано внутри структуры, претерпевая переотражения от ее границ. При этом амплитуда импульса при прохождении через ФК меняется незначительно, что является нехарактерным для волновых процессов, частота которых строго укладывается в границы запрещенной зоны.

В целом, такая картина позволяет говорить об обнаруженной временной локализации волнового пакета с частотой возбуждения, соответствующей полной запрещенной зоне, в пространственно ограниченном ФК, т. е. о замедлении прохождения сигнала через ФК по сравнению с импульсами с другими частотами возбуждения.

Также в главе представлены результаты анализа взаимодействия импульсного излучения с дефектными ФК. На примере двумерного ФК показано, что создание одиночного точечного дефекта, приводит к формированию пика пропускания в запрещенной зоне. При прохождении через ФК одиночного гауссова импульса, спектр которого соответствует запрещенной зоне структуры, на выходе из ФК получаем сигнал, в спектре которого присутствуют лишь колебания из узкого диапазона частот, соответствующих указанному пику пропускания. Таким образом, наблюдаемая картина может быть интерпретирована как локализация излучения в дефектной моде двумерного ФК.

Глава 2.1, относящаяся ко второму разделу работы, посвящена изучению локализации электромагнитных волн в случайных дискретных средах.

В параграфе 2.1.1 дан краткий обзор истории исследований сильной локализации излучения (локализации Андерсона), описана суть явления и перечислены критерии, которые позволяют выявить наступление такого типа локализации. Указывается, что изначально сформулированная как идея о полном подавлении диффузионного движения электронов в случайном потенциале, впоследствии концепция этого явления была перенесена в оптику и электродинамику. В настоящее время применительно к классической (без учета квантовых эффектов) теории электромагнитных процессов сильная локализация трактуется как подавление волнового распространения излучения в случайной среде, заключающееся в экспоненциальном уменьшении интенсивности поля. Общепринято, что физически локализация Андерсона является крайним проявлением эффекта усиления обратного рассеяния волн в случайных средах и возникает в одно- и двухмерных средах любой степени разупорядоченности при достаточной их протяженности.

Индикатором наступления локализации в отсутствие поглощения следует считать экспоненциальное убывание коэффициента прохождения интенсивности излучения через случайную дискретную среду с расстоянием, пройденным волной в среде: $T \sim \exp(-L/l_{loc})$. Здесь L – протяженность среды, l_{loc} – локализационная длина, являющаяся основным параметром, характеризующим данный эффект. Очевидно, что минимизация величины l_{loc} является фактором, обеспечивающим возможность выявления локализованных волновых состояний как в экспериментах, так и в ходе численного анализа. Часто для уменьшения l_{loc} используют подход, заключающийся в привнесении случайности в расположение элементов периодических структур, обладающих запрещенными зонами в спектре собственных состояний, т. е. ФК. При этом предполагается, что на границах и внутри запрещенных зон при разупорядоченности кристалла возможно наиболее сильное проявление локализационных эффектов.

О возникновении сильной локализации излучения можно также судить исходя из критерия Иоффе-Регеля: $kl_t \leq 1$, где l_t – длина свободного пробега волны при распространении (*transport mean free path*), определяющая дистанцию, на которой фаза распространяющейся в дискретной среде волны (направление момента фотонов) становится случайной. Физически это означает, что рассеивающие свойства и плотность компоновки частиц в случайной среде таковы, что на данной частоте рассеянная на какой-либо частице волна не может выполнить следующую осцилляцию перед рассеянием на соседней частице, т. е. волновое распространение излучения прекращается.

В параграфе 2.1.2 представлены численные и экспериментальные результаты изучения сильной локализации излучения в двумерных случайных средах, образованных цилиндрическими элементами, т. е. аналогичных в этом двумерным ФК, рассматривавшимся, в основном, в первом разделе работы.

В данном случае привнесение разупорядоченности в ФК возможно тремя путями: за счет случайности в расположении элементов (наиболее часто используемой в работах данной проблематики), в их электрофизических и геометрических параметрах. Однако для получения корректных результатов, направленных на выявление сильной локализации в пространственно ограниченных средах, ни один из этих способов, используемый в отдельности, на наш взгляд, не может считаться приемлемым. Несмотря на то, что в двумерной случайной среде все волновые состояния локализованы, это верно только при бесконечной протяженности такой среды. В среде конечных размеров с любой степенью разупорядоченности в расположении элементов, но с фиксированной или близкой к таковой плотностью компоновки создаваемого кластера всегда будут присутствовать квазипериодически расположенные совокупности рассеивателей. В диапазонах запрещенных зон присутствие таких областей будет приводить к дополнительному ослаблению поля, падающего на структуру, из-за брэгговского рассеяния, что выразится в появлении характерных провалов на частотных зависимостях коэффициента пропускания, совпадающих с положением стоп-зон на характеристиках соответствующих ФК (рисунок 11а).



а – неупорядоченность создается за счет изменения местоположения элементов: (1) – распределение равномерно-случайное в пределах заданной площади, (2) – цилиндры равномерно-случайно смещены на дистанции Δd_x и Δd_y в интервале [-d/2, d/2] относительно положения в регулярном ФК, (3) – аналогично (2), при этом Δd_x и $\Delta d_y \in [-d/4, d/4]$, (4) – спектр пропускания периодического ФК; б – спектры пропускания абсолютон еупорядоченных структур: (1) – цилиндры располагаются равномерно-случайно с возможностью наложения элементов друг на друга, $a = 0.2 \mp 0.08$ см, $\varepsilon = 9 \mp 3.6$, (2) - цилиндры распределены в пространстве по закону Пуассона, $a = 0.2 \mp 0.08$ см, $\varepsilon = 9 \mp 3.6$, (3) – спектр пропускания ФК с одинаковыми геометрическими и электрофизическими параметрами элементов. Точками на рис. (а) изображены результаты экспериментов. На вставке в рис. (а) изображена концептуальная схема рассматриваемой в работе системы: 1 – источник поля, 2 – точка наблюдения, 3 – рассеива-

тели

Рисунок 11 – Нормированная полная интенсивность поля $I = \langle |E|^2 \rangle$, прошедшего через случайные двумерные дискретные диэлектрические структуры ($\varepsilon = 9 - Al_2O_3$)

Поэтому, на наш взгляд, наиболее адекватным путем привнесения случайности в дискретную двумерную структуру как для самого факта выявления волновой локализации, так и для количественной оценки локализационной длины, является комбинация всех трех вышеописанных способов. Наложение случайности в поперечных размерах цилиндров и их диэлектрических проницаемостях на неупорядоченность расположения элементов позволит компенсировать когерентные эффекты, обусловленные конечной протяженностью структуры (рисунок 11б). Именно такой подход позволяет создать модель *абсолютно* случайной дискретной среды с использованием структур, состоящих из конечного числа элементов, располагающихся в ограниченной области пространства.

Для выявления сильной локализации излучения в полученной модели случайной среды в работе исследован спектр ее пропускания в широкой полосе частот. Полученная зависимость (рисунок 12а) имеет три характерных участка. Это – низкочастотная область, демонстрирующая минимальные уровни ослабления изучения, поскольку с увеличением длины волны случайная дискретная структура начинает вести себя как сплошная среда, при этом влияние эффектов рассеяния на результирующее поле минимизируется. Второй – область максимального ослабления излучения, располагающаяся в диапазоне 10÷25 ГГц, и, наконец, высокочастотная часть зависимости, характеризующаяся практически неизменной величиной ослабления. Физически ослабление поля в отсутствие поглощения может быть связано только с рассеянием на элементах среды. Поскольку в работе показано, что рассеяние «в стороны» при заданных параметрах случайной структуры несущественно, предполагается, что причина такого ослабления связана с проявлением некоторых физических эффектов, приводящих, например, к усилению обратного рассеяния, к числу которых и относится сильная локализация излучения.



а – спектральная зависимость полной интенсивности излучения, прошедшего через случайную двумерную структуру с плотностью $\rho = 1 \text{ см}^{-2}$; б – спектральное поведение длины свободного пробега при рассеянии (1) и при распространении (2), а также рассчитанной в соответствии с положениями теории эффективной среды локализационной длины (3), отнесенных к среднему расстоянию между элементами среды *d*.

Пунктиром 4 ограничена область параметров задачи, удовлетворяющих критерию Иоффе-Регеля

Рисунок 12 – Спектр пропускания случайной среды и частотные зависимости параметров, характеризующих свободный пробег волн в такой среде

Рассеивающие свойства ансамбля частиц могут быть охарактеризованы длиной свободного пробега волны при рассеянии (scattering mean free path) в случайной среде l_s , определяющейся средней дистанцией между двумя последовательными актами рассеяния и зависящей как от рассеивающих свойств отдельного элемента, так и от их концентрации, либо – длиной свободного пробега при распространении l_t , учитывающей, кроме того, анизотропию процессов рассеяния в среде.

Оба указанных параметра могут быть выражены через поперечники рассеяния отдельных элементов. Результаты их расчета представлены на рисунке 12б. Из них следует, что на низких частотах, где длина волны значительно превышает поперечные размеры цилиндров, а значит, процессы рассеяния не зависят от направления, обе длины свободного пробега совпадают. В целом, полученные зависимости хорошо коррелируют со спектральным поведением коэффициента пропускания. Здесь же указана область параметров, удовлетворяющих критерию локализации Иоффе-Регеля. Очевидно, что в диапазоне 8÷20 ГГц этот критерий удовлетворяется, что свидетельствует о наступлении сильной локализации излучения.

Локализационная длина – основной параметр локализации – может быть определена аналитически, исходя из приближений теории эффективной среды. В рамках этой теории убывание когерентной составляющей интенсивности поля при распространении в случайной среде может быть описано в виде:

$$|\langle E \rangle|^2 \sim e^{i2\kappa_{3}\phi\phi'} \sim e^{-i/\tau_s},$$

где эффективное волновое число $k_{\mathfrak{s}\phi\phi}$ может быть определено как

$$k_{\mathrm{s}\phi\phi} = k'_{\mathrm{s}\phi\phi} + \frac{i}{2l_s} = k + \sqrt{\frac{2\pi}{ik}\rho f(0)},$$

т. е. действительная часть волнового числа $k'_{3\phi\phi}$ связана с функцией рассеяния вперед f(0) одиночного цилиндра, в свою очередь выражаемой в виде:

$$f(0) = \sqrt{\frac{2}{\pi k}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{n J_m(ka) J'_m(nka) - J'_m(ka) J_m(nka)}{J_m(nka) H_m^{(1)'}(ka) - n H_m^{(1)}(ka) J'_m(nka)} e^{i(m\pi/2 + \pi/4)}.$$

(*n* – показатель преломления материала элементов). С использованием данных понятий локализационная длина в двумерной ситуации в диапазоне частот, где длина волны излучения превышает среднее расстояние между частицами в среде, может быть представлена в виде:

$$l_{loc} = l_s \exp\left[\frac{\pi}{2} k_{\mathrm{s}\phi\phi}' l_s\right].$$

Учитывая, что длина свободного пробега при рассеянии может быть определена как $l_s = 1/\rho\sigma_t$, где σ_t – полный поперечник рассеяния цилиндра в двумерной задаче, установлено, что частотная зависимость l_{loc} имеет минимальные значения в диапазоне, согласующимся с «границами подвижности» волновых процессов, установленными исходя из критерия Иоффе-Регеля.

Таким образом, в работе доказана возможность выявления сильной локализации Андерсона в простейших двумерных пространственно ограниченных структурах, являющихся моделями абсолютно случайных дискретных сред.

В параграфе 2.1.3 излагается анализ возможности наступления локализации излучения в случайной дискретной среде за пределами условий возникновения локализации Андерсона. В частности, отмечается, что исследования зависимости коэффициента прохождения от протяженности рассматриваемых моделей продемонстрировали экспоненциальное его убывание не только в частотном диапазоне, соответствующем сильной локализации и определенном во второй части главы, но и вне его, что представляется нетривиальным.

Для выявления приводящих к этому физических процессов выполнены численные исследования пространственного распределения поля в рассматриваемых случайных структурах (рисунок 13). На разных частотах, как относящихся к диапазону возникновения сильной локализации, так и находящихся за его пределами, имеет место предсказуемое поведение когерентной составляющей интенсивности, заключающееся в интерференционных осцилляциях с облучаемой стороны структур, связанных с наложением падающих и отраженных волн, и последующем экспоненциальном убывании при погружении в случайную систему рассеивателей.



Рисунок 13 – Линейные разрезы поля, демонстрирующие поведение полной (1) и когерентной (2) интенсивностей излучения в абсолютно случайной структуре, параметры которой соответствуют описанию к рисунку 12. Вертикальные линии указывают границы структуры

Распределение полной интенсивности имеет более сложное поведение. Если вне структуры характер ее пространственного изменения полностью совпадает с изменениями когерентной интенсивности, то внутри структуры наблюдается располагающаяся вблизи границы область нарастания полной интенсивности, а лишь затем имеет место ее постепенное убывание. Такое поведение сохраняется и при изменении линейной протяженности структуры, свидетельствуя об отсутствии связи данного эффекта с переотражениями от границ, и при изменении электрофизических параметров элементов.

Наличие области локализации поля вблизи облучаемой границы структуры и постоянство ее размеров при различной протяженности среды указывают на то, что в основе наблюдаемого увеличения полной интенсивности поля лежат процессы однократного рассеяния волн на элементах. Это следует и из сравнения рисунка 13 с рисунком 12б, показывающего, что максимум интенсивности возникает на глубине проникновения излучения в структуру, сопоставимой с длиной свободного пробега волн. На таких дистанциях когерентные эффекты, связанные с многократным рассеянием на элементах случайной среды, подобные конструктивной интерференции волн, идущих встречными траекториями, приводящей к усилению обратного рассеяния, а в предельном случае – к локализации Андерсона, еще не проявляются.

Поскольку межэлементные взаимодействия в данном случае не существенны, описываемый эффект должен проявляться при любой концентрации рассеивателей. В частности, в предельном случае, когда в однородной среде имеется единственный диэлектрический цилиндр, равномерно-случайно размещаемый в пределах некоторой площади ограниченных размеров, поведение полной интенсивности аналогично вышеописанному: имеет место локализация излучения вблизи границы области, в пределах которой располагается рассеиватель, со стороны прихода падающей волны (рисунок 14). Физически данный эффект может быть объяснен из анализа векторных диаграмм, описывающих суперпозицию падающих и рассеянных волн. Если фаза последних случайна, то, очевидно, вероятность усиления суммарного поля в каждой отдельной реализации размещения цилиндра всегда будет превышать вероятность его ослабления (от 1/2 при исчезающе малой амплитуде рассеянного поля до 2/3 при стремлении его величины к поля падающему). То есть случайно располагаемый в пространстве одиночный рассеиватель в среднем может рассматриваться как своеобразный «концентратор» электромагнитного излучения.



Рисунок 14 – Пространственное распределение полной (сплошная кривая) и когерентной (пунктир) интенсивностей излучения при случайном расположении в пространстве одиночного рассеивающего элемента. Вертикальные линии ограничивают область, в пределах которой находился рассеиватель

Таким образом, обнаружен эффект приграничной локализации излучения, по-видимому, имеющий место в любой случайной дискретной среде. Теоретически и экспериментально показано, что такая локализация имеет место не только при облучении среды внешним по отношению к ней источником поля, но и при его погружении в саму среду. Представляется важным, что данный эффект делает затруднительным обнаружение локализации Андерсона при анализе зависимости коэффициентов прохождения от протяженности случайной среды.

Глава 2.2 посвящена изучению возможности локализации излучения в лесных покровах земной поверхности.

В параграфе 2.2.1 рассматривается проблема, связанная с формированием боковых волн, распространяющихся над верхней кромкой лесных сред и выступающих в качестве основного механизма распространения излучения метрового диапазона в присутствии лесного покрова. Являясь дифракционными, боковые волны имеют иной характер дистанционной зависимости и претерпевают меньшее ослабление из-за взаимодействия с элементами растительности, чем волны прямого прохождения. В целом, возникновение боковой волны может, на наш взгляд, интерпретироваться как локализация поля источника в одной из альтернативных траекторий распространения волн в лесной среде.

Несмотря на важность механизма боковой волны для понимания процессов распространения волн вблизи земной поверхности, в литературе даются неоднозначные оценки частот и минимальных дистанций, на которых возможно проявление волн такого типа. В данной части работы приведены результаты экспериментальных исследований, проводившихся в лесах различного видового состава и структуры, позволяющие дать ответы на эти вопросы.

Типичная усредненная дистанционная зависимость поля в лесах со средней плотностью древостоя 0.12÷0.25 м⁻² позволяет выделить три участка, соответствующих разному характеру взаимодействия излучения с растительностью (рисунок 15).



Рисунок 15 – Зависимость уровня поля от расстояния в хвойном лесу со средней плотностью древостоя 0.14 м⁻² на частоте 150 МГц

Первый – интенсивного спадания поля – описывает распространение в пределах прямой видимости первичного излучения, убывающего из-за рассеяния на элементах среды. На втором ослабление поля определяется процессами многократного рассеяния и поглощения. Третий, характеризующийся минимальным наклоном линии тренда, на наш взгляд, описывает распространение излучения за счет формирования боковой волны, проявляющейся уже на дистанциях порядка 100 м между антеннами, погруженными в лесную среду.

В работе приводится ряд аргументов в пользу такой интерпретации результатов измерений. Прежде всего, аппроксимация полученных зависимостей экспоненциальными и степенными функциями позволила установить, что на начальных участках их поведение описывается функциями вида $\exp(-\alpha R)/R$, где R – дистанция между антеннами, α – коэффициент экстинкции, характерными для поля, создаваемого точечным источником в поглощающей среде. На последнем участке поведение поля соответствует функции вида – β/R^2 , где β – некоторый коэффициент, типичной для боковых волн. Кроме того, выполнен статистический анализ полученных данных, показавший, что дисперсия измеренных уровней поля на начальных участках зависимостей значительно превосходит дисперсию на дистанциях, где преобладает боковая волна. Это, очевидно, связано с тем, что при прямом распространении через растительность поле претерпевает значительные флуктуации из-за взаимодействия с ее элементами, в то время как для боковых волн, скользящих вдоль верхней кромки леса, такие флуктуации оказываются значительно менее выраженными.

В работе предложена методика, позволяющая определять эффективную диэлектрическую проницаемость «лесослоя» в низкочастотной части УКВ диапазона, используя экспериментальные данные, дающие информацию о дистанциях проявления боковых волн на фоне волн прямого прохождения.

В заключение данной части работы приводятся результаты экспериментов по изучению относительного ослабляющего действия лесного покрова по сравнению с уровнем поля на открытой местности. Это позволяет в явном виде оценить вклад в ослабление поля в лесу именно самой растительности, с учетом как прямого прохождения излучения через лес, так и формирования локализованных в виде боковых волн компонент поля.

Установлено, что вплоть до 300 МГц в большинстве типов леса при пространственном разносе антенн, достаточном для проявления боковых волн, дистанционные зависимости поля в лесу и на открытой местности ведут себя аналогично. Это очевидно связано с дифракционным характером земных и боковых волн в лесной среде, и вытекающим отсюда подобием в законе изменения их амплитуды, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Отсюда следует, например, что понятие погонного ослабления, как параметра, характеризующего интенсивность затухания волн в лесной среде, на частотах и дистанциях существования боковых волн не имеет смысла.

В параграфе 2.2.2 представлены результаты экспериментов по выявлению «приграничной» локализации излучения в лесных средах. Показано, что при возбуждении кромки лесного массива наблюдается область локализации поля, аналогичная описанной в параграфе 2.1.3.

Заключительный *параграф* 2.2.3 посвящен изложению результатов натурных экспериментов по радиопросвечиванию лесных покровов земной поверхности СШП сигналами на малых дистанциях, не предполагающих возникновения боковых волн. Целью исследований являлось изучение влияния лесов с различной растительностью на амплитудный спектр излучения. Рассматривалось прохождение через лесную среду последовательностей наносекундных видеоимпульсов, тем самым задействовался диапазон частот, в котором длина волны основных спектральных составляющих была сопоставима с расстоянием между основными элементами лесной среды.

Обнаружен резонансный характер взаимодействия отдельных гармонических составляющих исходного сигнала с лесной средой, заключающийся в минимальном их ослаблении при прохождении через среду и проявляющийся при близости соответствующей им длины волны и среднего расстояния между деревьями. Такая ситуация, на наш взгляд, может быть интерпретирована как локализация излучения в резонансных модах при распространении в лесной растительности. Поскольку основным фактором ослабления излучения на малых дистанциях между антеннами является рассеяние, физический механизм, приводящий к наблюдаемым эффектам, по-видимому, заключается во взаимной компенсации однократно и двукратно рассеянных стволами компонент поля. Представлены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающих сделанные выводы.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Теоретически и экспериментально определены условия возникновения и особенности проявления локализации электромагнитных волн при возбуждении двумерных и трехмерных ФК на частотах запрещенных зон в спектре их собственных электромагнитных состояний.

2. Впервые исследованы резонансные свойства металлических двумерных ФК, заключающиеся в локализации излучения во внутренних областях таких структур и наиболее ярко проявляющиеся на частотах, граничных между запрещенными и разрешенными зонами. Установлена связь между параметрами ФК и степенью локализации поля. Предложены простые алгоритмы оптимизации геометрии ФК для достижения требуемой добротности резонатора.

3. Построена электродинамическая модель взаимодействия излучения с металлическими ФК, базирующаяся на строгой постановке задачи возбуждения многопроводной среды электрическим диполем. Обнаружена возможность существования поверхностных волн, распространяющихся вдоль цилиндрических элементов и возникающих из-за взаимного влияния последних.

4. Рассмотрены особенности, методы определения и пути практического использования электрофизических характеристик двумерных металлических ФК на частотах первой разрешенной зоны как дисперсионных сред с ультранизкими значениями эффективной диэлектрической проницаемости.

5. Развит способ регулировки уровня поля вблизи проводящей поверхности с помощью магнитодиэлектрических покрытий. Определены геометрические и электрофизические параметры покрытий, обеспечивающих локализацию излучения вблизи поверхности в форме распространяющихся вдоль нее поверхностных волн или подавление приповерхностного поля. Установлена связь между экстремальными отражающими и ослабляющими свойствами таких покрытий.

6. Разработана электродинамическая теория возбуждения слоя металлических штырьковых элементов на проводящем основании. Теоретически и экспериментально определены параметры проволочных слоев, отвечающие условиям максимальной локализации и делокализации излучения вблизи образуемых ими поверхностей.

7. Установлена способность линейных дефектов двумерных металлических ФК, формируемых удалением совокупностей соседних элементов из регулярных структур, выступать в качестве волноведущих систем не только в диапазонах запрещенных, но и разрешенных зон ФК. Доказано, что при трансформации указанных ФК в трехмерные структуры ограничением длины входящих в их состав цилиндрических элементов возникает дополнительная возможность локализации излучения в дефектном канале за счет формирующихся на границе ФК поверхностных волн.

8. При распространении через регулярные двумерные ФК одиночных радиоимпульсов, пространственная протяженность которых сопоставима с периодом расположения элементов в структуре, обнаружена возможность временной локализации излучения в пределах ФК. Показано, что наличие в ФК точечных дефектов создает возможность для локализации широкополосного излучения в дефектных модах таких структур.

9. При взаимодействии излучения со случайными двумерными средами определены условия и особенности проявления локализации Андерсона – сильной локализации классических электромагнитных волн. С использованием различных критериев дана оценка диапазонов частот, соответствующих возникновению локализованных волновых состояний в средах с разными электрофизическими параметрами элементов.

10. Теоретически обнаружено и экспериментально подтверждено существование нового типа локализации излучения в случайных дискретных средах – приграничной локализации, заключающейся в относительном увеличении полной интенсивности излучения (концентрации энергии) вблизи границы среды при падении на нее электромагнитной волны либо вблизи источника поля, если таковой погружен в среду. Показано, что физический механизм, лежащий в основе данного эффекта, заключается в конструктивной интерференции прямых и однократно рассеянных на элементах среды волн.

11. На основе обобщения экспериментальных данных установлены условия возникновения и проявления в лесной среде боковых волн, распространяющихся вдоль верхней кромки леса, не претерпевающих существенного ослабления из-за взаимодействия с элементами растительности по сравнению с волнами прямого прохождения и рассматривающихся в данной работе как локализация излучения в одной из альтернативных траекторий распространения. Показано, что один из основных параметров, описывающих распространение электромагнитных волн УКВ диапазона, – погонное ослабление – теряет смысл при формировании боковых волн. Разработан новый метод определения эффективных диэлектрических свойств растительных сред в низкочастотной части УКВ диапазона, базирующийся на эмпирических данных, указывающих на существование боковых волн в лесной среде. Таким образом, в работе теоретически и экспериментально исследовано явление локализации электромагнитного поля в различных средах и системах, выражающееся в пространственном перераспределении энергии поля (пространственная локализация), замедлении времени прохождения сигналов через структуры (временная локализация) и формировании частотных диапазонов, в которых регулярные и случайные дискретные системы обладают минимальным ослаблением (частотная локализация).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Ветлужский А. Ю. Эффект прозрачности объемных решеток / А. Ю. Ветлужский, Ю. Л. Ломухин, О. Г. Михайлова // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 7. – С. 797–799. – 0,45 / 0,18 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Transparency Effect of Bulk Gratings / A. Yu. Vetluzhskii, Yu. L. Lomukhin, O. G. Mikhailova // Journal of Communications Technology and Electronics. – 1998. – Vol. 43, № 7. – P. 739– 741.

2. Ветлужский А. Ю. Дифракция электромагнитных волн на двумерной системе периодически расположенных круговых цилиндров / А. Ю. Ветлужский, Ю. Л. Ломухин // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 6. – С. 686–689. – 0,4 / 0,2 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Diffraction of Electromagnetic Waves by a Two-Dimensional System of Periodically Located Circular Cylinders / A. Yu. Vetluzhskii, Yu. L. Lomukhin // Journal of Communications Technology and Electronics. -2000. - Vol. 45, No 6. -P. 620-623.

3. Ветлужский А. Ю. Особенности распределения интенсивности электромагнитного поля вблизи источника в случайной дискретной среде/ А. Ю. Ветлужский // Письма в Журнал технической физики. – 2002. – Т. 28, № 14. – С. 43–47. – 0,38 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Features in the Electromagnetic Field Intensity Distributions near the Source in a Stochastic Discrete Medium / A. Yu. Vetluzhskii // Technical Physics Letters. -2002. - Vol. 28, $N \circ 7. - P. 597-598$.

4. Ветлужский А. Ю. Интерференционные эффекты в двумернопериодических дифракционных решетках [Электронный ресурс] / А. Ю. Ветлужский // Журнал радиоэлектроники. – 2002. – № 6. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/jun02/3/text.html (дата обращения 24.01.2022). – 0,25 а.л.

5. Ветлужский А. Ю. Возбуждение штыревого слоя / А. Ю. Ветлужский, Ю. Л. Ломухин // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 3. – С. 308–313. – 0,7 / 0,35 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Excitation of a Pin Layer / A. Yu. Vetluzhskii, Yu. L. Lomukhin // Journal of Communications Technology and Electronics – 2004. – Vol. 49, N 3. – P. 282–287.

6. Басанов Б. В. Исследование волноводных структур на основе двумерных фотонных кристаллов / Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский // Письма в Журнал технической физики. – 2008. – Т. 34, № 13. – С. 1–7. – 0,45 / 0,25 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Basanov B. V. Waveguide Structures Based on Two-Dimensional Photonic Crystals / B. V. Basanov, **A. Yu. Vetluzhskiĭ** // Technical Physics Letters. – 2008. – Vol. 34, № 7. – P. 543–545. – DOI: 10.1134/S1063785008070018.

7. Басанов Б. В. Исследование боковых волн в лесных покровах / Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, № 6. – С. 54–58. – 0,55 / 0,3 а.л.

8. Ветлужский А. Ю. Локализация излучения в двумерных случайных средах конечной протяженности / А. Ю. Ветлужский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 136, № 2. – С. 356–361. –0,55 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhsky A. Yu. Localization of Radiation in Two-Dimensional Random Media of Finite Extent / A. Yu. Vetluzhsky // Journal of Experimental and Theoretical Physics – 2009. – Vol. 109, N_{2} 2. – P. 302–306. – DOI: 10.1134/S1063776109080160.

9. Ветлужский А. Ю. О резонансных свойствах двумерных фотонных кристаллов / А. Ю. Ветлужский // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36, № 12. – С. 78–85. – 0,5 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskiĭ A. Yu. Resonance Properties of Two-Dimensional Photonic Crystals / A. Yu. Vetluzhskiĭ // Technical Physics Letters. – 2010. – Vol. 36, № 6. – P. 577–579. – DOI: 10.1134/S106378501006026X.

10. Басанов Б. В. Метод определения эффективной диэлектрической проницаемости лесного полога [Электронный ресурс] / Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников // Журнал радиоэлектроники. – 2010. – № 4. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/apr10/3/text.html (дата обращения 24.01.2022). – 0,85 / 0,45 а.л.

11. Басанов Б. В. Эффект Малюжинца в многослойных дифракционных решетках / Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский // Электромагнитные волны и

электронные системы. – 2010. – № 6. – С. 48–51. – 0,42 / 0,25 а.л.

12. Ветлужский А. Ю. Локализация электромагнитных волн в случайных дискретных средствах: два метода определения параметров локализации / А. Ю. Ветлужский, Т. Д. Ширапова // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – Т. 16, № 12. – С. 11–15. – 0,45 / 0,25 а.л.

13. Ветлужский А. Ю. Оптимизация резонансных свойств металлических фотонных кристаллов [Электронный ресурс] / А. Ю. Ветлужский, Г. Ю. Лизунов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 1. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/jan13/2/text.html_(дата обращения 24.01.2022). – 0,75 / 0,38 а.л.

14. Ветлужский А. Ю. Экспериментальное изучение условий формирования боковых волн в лесных покровах / А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 4. – С. 99–103. – 0,6 / 0,3 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Experimental Investigation of Side Wave Formation in Forest Covers / A. Yu. Vetluzhskii, V. P. Kalashnikov // Technical Physics. – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 563–567. – DOI: 10.1134/S1063784213040269.

15. Ветлужский А. Ю. Широкополосное радиопросвечивание растительных покровов земной поверхности / А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. – 2013. – № 5 (51). – С. 126–128. – 0,25 / 0,13 а.л.

16. Ветлужский А. Ю. Влияние неупорядоченности электромагнитных кристаллов на их электродинамические свойства / А. Ю. Ветлужский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, №8/2. – С. 55–56. – 0,3 а.л.

17. Ветлужский А. Ю. Исследование влияния лесной растительности на распространение широкополосных сигналов [Электронный ресурс] / А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 8. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/aug14/2/text.html (дата обращения 24.01.2022). – 0,55 / 0,28 а.л.

18. Ветлужский А. Ю. Собственные волны многопроводной среды / А. Ю. Ветлужский, Ю. Л. Ломухин // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41, № 19. – С. 38–45. – 0,45 / 0,22 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Eigenwaves of Multiwire Medium / A. Yu. Vetluzhskii, Yu. L. Lomukhin // Technical Physics Letters. – 2015. – Vol. 41, № 10. – P. 938– 941. – DOI: 10.1134/S1063785015100156.

19. Ветлужский А.Ю. Эффективные электрофизические свойства металлических электромагнитных кристаллов [Электронный ресурс] /

А. Ю. Ветлужский // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 1. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/jan15/18/text.html (дата обращения 24.01.2022). – 0,3 а.л.

20. Ветлужский А. Ю. Отрицательное преломление или резонанс отрицательной пространственной гармоники? [Электронный ресурс] / А. Ю. Ветлужский // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 12. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/dec15/17/text.html (дата обращения 24.01.2022). – 0,22 а.л.

21. Ветлужский А. Ю. Взаимодействие импульсного излучения с фотонным кристаллом [Электронный ресурс] / А. Ю. Ветлужский // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – URL: http://jre.cplire.ru/jre/nov16/10/text.pdf (дата обращения 24.01.2022). – 0,4 а.л.

22. Ветлужский А. Ю. Волноводные устройства на основе линейных дефектов в металлических электромагнитных кристаллах // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, № 1. – С. 150–154. – 0,6 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Waveguides Based on Linear Defects in Metal Electromagnetic Crystals / A. Yu. Vetluzhskii // Technical Physics. -2017. - Vol. 62, N 1. - P. 178–182. - DOI: 10.1134/S106378421701025X.

23. Ветлужский А. Ю. Аналитическое описание электродинамических свойств металлических фотонных кристаллов / А. Ю. Ветлужский, Ю. Л. Ломухин // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 123, № 2. – С. 269–275. – 0,75 / 0,37 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskii A. Yu. Analytical Description of the Electrodynamic Properties of Metallic Photonic Crystals / A. Yu. Vetluzhskii, Yu. L. Lomukhin // Optics and Spectroscopy. – 2017. – Vol. 123, № 2. – P. 294–299. – DOI: 10.1134/S0030400X17080240.

24. Ветлужский А. Ю. Метод самосогласованных уравнений при решении задач рассеяния волн на системах цилиндрических тел / А. Ю. Ветлужский // Компьютерные исследования и моделирование. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 725–733. – 0,42 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhsky A. Yu. Method of Self-Consistent Equations in Solving Problems of Wave Scattering on Systems of Cylindrical Bodies / A. Yu. Vetluzhsky // Computer Research and Modeling. – 2021. – Vol. 13, № 4. – P. 725–733. – DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-4-725-733.

25. Ветлужский А. Ю. Фокусировка оптического излучения системами на основе фотонных кристаллов / А. Ю. Ветлужский // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88, № 8. – С. 32–39. – DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-08-32-39. – 0,62 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhskiĭ A. Yu. Focusing the Optical Radiation Emitted by Systems Based on Photonic Crystals / A. Yu. Vetluzhsky // Journal of Optical Technology. – 2021.

- Vol. 88, № 8. - P. 429-434. - DOI: 10.1364/JOT.88.000429.

26. Ветлужский А. Ю. Фокусирующие системы на основе двумерных фотонных кристаллов / А. Ю. Ветлужский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64, № 9 (766). – С. 49–54. – DOI: 10.17223/00213411/64/9/49. – 0,55 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Vetluzhsky A. Yu. Focusing Systems Based on Two-Dimensional Photonic Crystals / A. Yu. Vetluzhsky // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 64, № 9. – P. 1637–1643. – DOI: 10.1007/s11182-022-02500-z.

Публикации в прочих научных изданиях:

27. Ветлужский А. Ю. О локализации излучения в фотонных кристаллах / А. Ю. Ветлужский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2016. – № 8 (140). – С. 46–48. – 0,35 а.л.

28. Ветлужский А. Ю. Локализация импульсного излучения в фотонном кристалле / А. Ю. Ветлужский // Фотоника. – 2017. – № 1 (61). – С. 102–107. – 0,45 а.л.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614551. Частотный спектр пропускания излучения двумерного фотонного кристалла / Ветлужский А. Ю.; правообладатель: Ветлужский А. Ю. (RU). Заявка № 2011612850, дата поступления – 22.04.2011; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 08.06.2011.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660752. Спектр пропускания импульсного излучения фотонным кристаллом / Ветлужский А. Ю.; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (RU). Заявка № 2013618470, дата поступления – 20.09.2013; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ – 18.11.2013.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614656. Программа расчета зонной структуры двумерного фотонного кристалла / Ветлужский А. Ю.; правообладатель: Ветлужский А. Ю. (RU). Заявка № 2019611717, дата поступления – 14.02.2019, дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ – 10.04.2019.

Монография:

32. Ломухин Ю. Л. Методы дополнительного ослабления электромагнитных полей / Ю. Л. Ломухин, А. Ю. Ветлужский. – Новосибирск: Наука, 2003. – 139 с. – 8,5 / 4,25 а.л.

Свидетельство государственной регистрации № 2670 от 11 августа 2017 г.

Подписано в печать 08.12.2022. Формат 60х84 1/16. Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100. Заказ № 175.

Отпечатано в типографии Изд-ва Бурятского госуниверситета 670000, г. Улан-Удэ, ул. Сухэ-Батора, За rio@bsu.ru