

На правах рукописи



АБДУЛЛИН Ренат Рашидович

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕНЗОРНЫХ ФУНКЦИЙ ГРИНА
ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ
АНТЕНН ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ СО ЩЕЛЯМИ И
СЛОИСТЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ**

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шабунин Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: **Пастернак Юрий Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», профессор кафедры
радиоэлектронных устройств и систем;

Касьянов Александр Олегович,
доктор технических наук, доцент,
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-
исследовательский институт радиосвязи»,
заместитель начальника лаборатории по науке

Ведущая организация: Акционерное общество «Особое конструкторское
бюро Московского энергетического института»

Защита состоится «30» июня 2017 г. в 15:00 ч на заседании
диссертационного совета Д 212.285.11 на базе ФГАОУ ВО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по
адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (Зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=269357>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зраенко Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современный этап развития средств радиолокации и телекоммуникаций характеризуется достаточно выраженными тенденциями к универсализации антенно-фидерных систем и устройств СВЧ, способствующей значительному расширению областей применения существующих разработок и оптимизации технологий их проектирования.

Отдельным классом в ряду таких систем можно выделить антенны вытекающей волны (АВВ), основанные на использовании плоских волноводных структур, связанных с внешним пространством через непрерывные или периодические элементы. Наряду с антеннами поверхностных волн (АПВ), или импедансными антеннами, и нерезонансными многощелевыми решетками АВВ принадлежат к семейству антенн бегущей волны.

Основная разница между АВВ и АПВ заключается в фазовой скорости возбуждаемых вдоль границы раздела сред поверхностных волн и механизме их излучения. В отличие от импедансных антенн, АВВ основаны на излучении быстрых (вытекающих) волн, фазовая скорость которых выше скорости света, и предназначены для формирования направленного излучения с произвольным наклоном к плоскости антенны, а также осуществления частотного сканирования луча в определенном секторе пространства.

Ключевое отличие между периодическими АВВ и волноводно-щелевыми решетками лежит в подходах к проектированию отдельных излучателей. В то время как при проектировании решеток происходит оценка взаимного влияния отдельных резонансных щелей, АВВ является единым массивом близкорасположенных друг к другу нерезонансных щелей с малым сопротивлением основной волне и, соответственно, малым уровнем излучаемой мощности на отдельном элементе.

Преимущества антенн такого типа связаны с отсутствием дифракционных максимумов, достаточно малым уровнем боковых лепестков, возможностью частотного сканирования вплоть до оси волновода, относительной простотой достижения высоких коэффициентов усиления и т.д. Антенны вытекающей волны, прежде всего, находят применение в системах с наклонным излучением, предъявляющих требования к аэродинамике и конформности антенн, например: радиолокационных системах безопасности транспорта, радиовзрывателях, системах навигации.

История антенн вытекающих волн начинается в ноябре 1940 г. с изобретения Уильямом Хансенем (William W. Hansen) «излучающего электромагнитного волновода» с протяженной продольной щелью в качестве элемента системы автоматической посадки самолетов. Дальнейшие серьезные исследования продолжились лишь в 50-х гг. прошлого столетия, после того, как в 1944 году советским ученым А.А. Пистолькорсом был сформулирован принцип перестановочной двойственности для электромагнитного поля, что послужило мощным толчком к развитию теории щелевых антенн. Одними из первых ее последователями стали

В. Рамси (V. Rumsey) и Р. Хайнман (R. Hyneman), которые путем применения вариационного метода к задачам электродинамики провели полный анализ АВВ на основе волноводов с продольной щелью и близко расположенными поперечными щелями.

Их начинания продолжили такие ученые, как А. Олинер (A. Oliner), Л. Голдстоун (L. Goldstone), К. Уолтер (C. Walter), К. Гупта (K. Gupta), Д. Джексон (D. Jackson), П. Лампариелло (P. Lampariello). Среди отечественных ученых особо следует отметить труды воронежских научных коллективов, членами которых являются А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, В.И. Юдин, Д.Н. Борисов, А.И. Климов, Ю.Б. Нечаев. Среди трудов ближнего зарубежья наиболее известны работы харьковской научной школы, в особенности С.Л. Бердника, В.А. Катрича, А.А. Ляховского, М.В. Нестеренко, Л.П. Яцук.

С течением времени объекты исследований постепенно усложнялись, приобретая разнообразные формы щелей и все более причудливые формы поперечного сечения (например, желобковый волновод, волновод с согласующим шлейфом, ступенчатый волновод), необходимые для получения требуемой поляризации, сужения главного максимума и уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности (ДН). В связи с тем, что АВВ могут быть представлены в качестве линейной системы, положение максимума излучения которой определяется значением коэффициента замедления, цель исследований обычно сводилась к поиску комплексного волнового числа, а также оценке его изменения в зависимости от технологических особенностей предлагаемых конструкций и точности заданных начальных условий.

Достижение этой цели осуществлялось посредством применения комбинаций различных методов, среди которых, например, метод поперечного резонанса, метод возмущения, а также метод частичных областей и вариационные методы. Описанные методы часто дополняются методом наискорейшего спуска (методом стационарной фазы) при аппроксимации интегралов Лапласа и расчете поля в дальней зоне, а также методом Кирхгофа-Гюйгенса для установления взаимосвязи между ближним полем антенны и ее ДН.

Позже, в связи со сложившимися на рубеже тысячелетий тенденциями к переходу телекоммуникационных систем в область более высоких частот, сопровождающемуся миниатюризацией устройств, возросла потребность в легких, низкопрофильных и недорогих антеннах. Это привело к развитию нового направления в антенной технике – микрополосковых излучателей, которые в том числе вводятся в конструкции волноводов с целью повышения стабильности ширины луча при частотном сканировании, а также сами выступают в качестве эквивалентных волноводов, лежащих в основе антенн вытекающих волн. Такие волноводы известны в зарубежной литературе под названием *substrate integrated waveguide*, или *SIW*. Они образуются между рядами проводящих штырей (метализированных отверстий) в печатной плате СВЧ с двусторонней металлизацией. Благодаря *SIW* технологии в конце нулевых годов текущего столетия АВВ обрели новую жизнь, о чем свидетельствует число зарегистрированных патентов, согласно данным Google Patents.

Однако, несмотря на весьма широкий спектр исследований за более чем семидесятилетнюю историю АВВ, представленные решения часто ограничиваются частным случаем однородного заполнения волноводов диэлектриком, что приводит к значительным затруднениям при необходимости решать задачи проектирования антенн с требуемыми характеристиками в условиях ограниченного выбора доступных диэлектрических материалов. Другим фактором, существенно влияющим на характеристики АВВ, является диэлектрическое укрытие, часто применяемое для ее защиты от воздействия внешних факторов, отличающихся друг от друга в зависимости от условий эксплуатации. Оно искажает полевые и частотные характеристики излучающей системы. Исследование этих искажений весьма редко встречается в литературе.

Усложнение конструкций антенно-фидерных систем в результате постоянного ужесточения требований к их характеристикам приводит к увеличению роли компьютерных систем электродинамического анализа в процессе проектирования. Как бы странно это ни звучало, именно благодаря применению компьютерного моделирования наблюдается спад числа изобретений, касающихся АВВ, в последние пять лет. Несмотря на очевидные преимущества, проектирование и оптимизация характеристик волноводно-щелевых АВВ при помощи широко используемых в настоящее время программных пакетов – задача не такая простая, как может показаться на первый взгляд. Во-первых, каждая новая разрабатываемая антенна, хоть сколько-нибудь отличающаяся от известных вариантов, особенно имеющая сложную структуру, требует построения собственной модели и выбора методики ее анализа. Во-вторых, сложность заключается в малом размере излучающих щелей по сравнению с длиной волны, что требует разбиения пространства модели АВВ на значительное число элементов и приводит к колоссальному увеличению затрачиваемых вычислительных и временных ресурсов.

К сожалению, аналитическим подходам в последнее время уделяется меньше внимания. Проверенные временем методы, такие, например, как метод тензорных функций Грина, показали свою высокую эффективность при решении координатных электродинамических задач. За счет основательной аналитической работы, применения асимптотик, реализуемые алгоритмы расчета характеристик микроволновых устройств обеспечивают на порядки меньшие затраты компьютерного времени. Существенно упрощается понимание физических процессов и трактовка результатов исследования, обеспечивается корректность принятия обоснованных технических решений.

Сказанное выше свидетельствует об актуальности разработки универсального электродинамического метода анализа АВВ на основе прямоугольных волноводов со слоистым заполнением, в том числе при наличии радиопрозрачного укрытия, позволяющего прогнозировать частотные зависимости диаграмм направленности и законы сканирования главного лепестка в пространстве.

Цель и задачи исследования

На основании вышеизложенного была сформулирована **цель** диссертационного исследования: разработать электродинамический метод анализа плоскостойких волноводных структур, лежащих в основе антенны вытекающих волн и поз-

воляющих эффективно решать задачи электронного сканирования диаграммы в соответствии с требуемыми законами управления.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Создать универсальную математическую модель, основанную на применении аппарата тензорных функций Грина стратифицированных сред, позволяющую описывать широкий класс антенн вытекающей волны в волноводно-щелевом исполнении со слоистой структурой поперечного сечения, в том числе с защитным укрытием, и разработать строгий алгоритм составления соответствующих им дисперсионных уравнений.

2. На основе разработанной методики получить и исследовать числовые значения коэффициента замедления основных практически применимых типов волноводных антенн вытекающей волны в зависимости от их конструктивных особенностей и характера структуры поперечного сечения; оценить их влияние на положение и ширину главного лепестка диаграммы направленности.

3. С целью верификации разработанного метода выполнить проверку выводов теоретического анализа и полученных численных данных на соответствие результатам экспериментального исследования, включающего моделирование в среде электродинамического анализа и натурные измерения высокоточным поверенным оборудованием в условиях безэховой камеры, оснащенной системой автоматизированного управления.

Методы исследования

При формировании математической модели антенны вытекающих волн на основе плоских волноводных структур применяется метод тензорных функций Грина, который, основываясь на модели эквивалентных линий передачи, позволяет учесть поперечную неоднородность данной антенны. При составлении дисперсионных уравнений используется метод Галеркина; их упрощение выполняется при помощи методов асимптотического приближения интегралов Лапласа, возникающих при записи выражений для компонент магнитного поля во внешнем полупространстве; решение осуществляется численными методами с применением пакета прикладных программ MATLAB. Корректность представленных теоретических данных подтверждается результатами компьютерного моделирования в среде электродинамического анализа ANSYS HFSS, использующей метод конечных элементов, и результатами экспериментальных исследований, включающих в себя измерение элементов матрицы рассеяния посредством векторного анализатора электрических цепей Rohde&Schwarz ZVA50 и снятие диаграммы направленности антенны в условиях аттестованной безэховой камеры Rainford EMC3.

Основные положения, выносимые на защиту в соответствии с пп. 2 и 9 паспорта специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии:

1. Методика составления и решения дисперсионных уравнений для анализа волноводных АВВ с неоднородным поперечным сечением, основанная на применении аппарата тензорных функций Грина, позволяющая рассчитать постоянные распространения в волноводных излучающих структурах, в том числе при наличии защитного диэлектрического укрытия.

2. В качестве инструмента управления положением максимума диаграммы направленности волноводно-щелевых АВВ может быть применимо слоистое за-

полнение волноводов диэлектриком, способствующее реализации сложных алгоритмов, сочетающих возможности электронного (частотного) и механического сканирования.

2.1. Расположение диэлектрического слоя у противоположных стенок частично заполненного волновода параллельно плоскости отверстий связи имеет различное влияние на характеристики антенны, независимо от выбора излучающей плоскости, вследствие несимметричности излучающих структур и особенностей протекания возбуждающих токов вблизи диэлектрика. Зависимость коэффициента замедления от степени заполнения волновода имеет нелинейную форму.

2.2. Зависимость коэффициента замедления от величины смещения диэлектрического слоя внутри волновода относительно излучающих щелей (независимо от его толщины и диэлектрической проницаемости) имеет экстремумы: для волновода с поперечными щелями в широкой стенке – минимум, с продольной щелью в узкой стенке – максимум.

2.3. Критическая частота прямоугольного волновода обладающего плоскостной структурой поперечного сечения и элементами связи с внешним пространством в одной из стенок, определяется средним значением диэлектрической проницаемости заполнения с учетом толщины слоев. При этом крутизна дисперсионной характеристики в окрестности критической частоты тем выше, чем выше проницаемость слоя, расположенного в непосредственной близости со щелями.

3. Влияние защитного укрытия в виде внешнего диэлектрического слоя на поверхности щелей на полевые и частотные характеристики антенны вытекающих волн не столь велико по сравнению с влиянием внутреннего заполнения, однако позволяет осуществлять более точную настройку антенны для работы в заданном режиме. Сочетание параметров диэлектрического заполнения и защитного укрытия в конструкции антенны вытекающих волн позволяет регулировать форму дисперсионной кривой, обеспечивая стабильность полевых характеристик в заданном диапазоне частот либо сканирование диаграммы направленности в заданном диапазоне углов с требуемой функциональной зависимостью от рабочей частоты.

Достоверность защищаемых положений обусловлена строгостью постановки электродинамической задачи, корректностью упрощающих предположений, применяемых при построении математической модели, качественным и количественным соответствием результатов теоретического и экспериментального исследований. Полученные результаты теоретического анализа проверялись на соответствие известным частным решениям предшествующих исследователей, результатам моделирования в среде электродинамического анализа. Точность экспериментальных результатов обеспечивается использованием поверенного измерительного оборудования и стандартных методов измерений. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Научная новизна:

1. Предложено применение сэндвич структур в качестве заполнения прямоугольных волноводов со щелями, лежащих в основе антенны вытекающих волн, с целью формирования требуемых законов управления положением максимума

диаграммы направленности за счет получения значений эффективной диэлектрической проницаемости, отличных от стандартных значений.

2. В качестве основного инструмента анализа рассматриваемых антенн предложен новый электродинамический метод, основанный на применении аппарата тензорных функций Грина поперечно неоднородных областей при разложении поля по волнам типа E и H и позволяющий анализировать характеристики волноводно-щелевых АВВ с учетом всех типов собственных колебаний.

3. Разработан авторский метод поиска корней трансцендентных уравнений, опирающийся на вероятностное разбиение сетки комплексных волновых чисел и позволяющий предсказать положение корня на каждой последующей частоте, полностью формируя дисперсионную кривую за счет приближенного определения критической частоты системы.

4. Установлены зависимости коэффициента замедления для частично заполненных диэлектриком прямоугольных волноводов со щелями от степени их заполнения, а также от величины смещения диэлектрика относительно щелей, с целью выявления закономерностей в изменении характеристик диаграммы направленности.

5. Установлены частотные зависимости коэффициента замедления для многослойных прямоугольных волноводов со щелями при различных законах изменения толщины и диэлектрической проницаемости заполняющих слоев.

6. Применен комплексный подход к процессу проектирования антенны вытекающих волн в волноводно-щелевом исполнении, рассматривающий внешнее защитное укрытие как неотъемлемую часть антенны. Это позволяет анализировать полевые и частотные свойства антенны в зависимости не только от их конструктивных особенностей, но и от внешних условий эксплуатации.

Теоретическая и прикладная значимость:

1. Выдвигаемая работа способствует обобщению имеющихся наработок в области антенн вытекающих волн посредством формирования универсального математического аппарата, позволяющего описывать поперечно неоднородные волноводно-щелевые структуры, исследование которых ранее осуществлялось преимущественно средствами компьютерного моделирования в пакетах электродинамического анализа.

2. Разработаны алгоритмы расчета дисперсионных характеристик собственных волн АВВ на основе многослойных прямоугольных волноводов:

- с близкорасположенными друг к другу поперечными щелями в широкой стенке,
- с продольной щелью в узкой стенке,
- интегрированных в подложку печатных плат.

3. Созданы компьютерные программы на языке MATLAB для расчета плоскостойких волноводных структур, отличающиеся возможностью регулирования точности получаемых результатов и существенно превосходящие по быстродействию специализированное ПО, например ANSYS HFSS. На их основе были построены САПР волноводно-щелевых антенн.

4. На основе предложенной методики разработаны методические рекомендации по выбору оптимальных параметров плоской многослойной излучающей

структуры, предназначенной для создания новых перспективных видов антенн с требуемыми характеристиками, применяемых, например, в качестве элемента системы бортовой радиолокации бокового обзора.

Внедрение результатов работы

Результаты работы получены в ходе выполнения проекта №14-19-01396 «Разработка теории и технологии создания устройств микроволнового диапазона с использованием композитных материалов нового поколения», поддержанного Российским Научным Фондом, и работ по госбюджетной теме № Н764.42Б.016/14 «Развитие техники и технологии перспективных средств телекоммуникационных, радиолокационных и навигационных систем».

Научные результаты исследования применяются предприятием АО «ОКБ «Новатор» для разработки перспективных антенн систем регистрации телеметрии с подвижных объектов и антенн траекторных измерений. Получена справка об использовании результатов диссертации.

Также результаты внедрены в учебный процесс ФГАУО ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» в департаменте радиоэлектроники и связи ИРИТ-РТФ, что подтверждается актом внедрения.

Личный вклад

В диссертации представлены те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем д.т.н., доцентом С. Н. Шабуниним. Ряд докладов по теме исследования на конференциях представлены автором единолично. Основная часть работ опубликована с научным руководителем. В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов, при обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 18 работ, среди которых 4 статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК. Материалы 9 докладов проиндексированы международной базой цитирования SCOPUS, 5 из которых также отражены в Web of Science.

Основные результаты работы были представлены диссертантом лично на следующих конференциях: 23-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии» (КрыМиКо'2013), г. Севастополь, 2013; 24-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии» (КрыМиКо'2014), г. Севастополь, 2014; 12-я Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2014), г. Новосибирск, 2014; Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC2014), Loughborough, UK, 2014; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления», г. Екатеринбург, 2014; The Third International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC2015), г. Москва, 2015; The 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Kuta, Indonesia, 2015; 25-я Международная Крымская Конференция «СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии»

(КрыМиКо'2015), г. Севастополь; 2015 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS), Tel-Aviv, Israel, 2015; 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC 2016), Seoul, Korea, 2016.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы. Она изложена на 132 страницах основного текста, содержит 88 рисунков, список литературы из 126 названий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведен краткий обзор существующих вариантов исполнения антенны вытекающей волны в волноводном исполнении и методов их анализа, обоснована актуальность темы исследования. Сформулирована цель работы, поставлены основные задачи исследования, обозначены методы их решения. Сформулированы положения, выносимые на защиту, указаны их новизна и практическая значимость, аргументирована достоверность полученных результатов. Кроме того, отражен личный вклад автора, приведен список конференций, где проводилась апробация работы, приведена структура диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена построению формального аппарата решения задач электромагнитного возбуждения в плоских слоистых магнитоэлектрических средах. Пошагово описывается алгоритм составления дисперсионных уравнений для антенн вытекающих волн на основе прямоугольных волноводов, содержащих сэндвич структуры, слои которых параллельны плоской излучающей поверхности. В качестве последней поочередно рассматриваются два наиболее употребительных на практике случая: продольная щель в узкой стенке волновода и близко расположенные друг к другу поперечные щели в широкой стенке (рисунок 1).

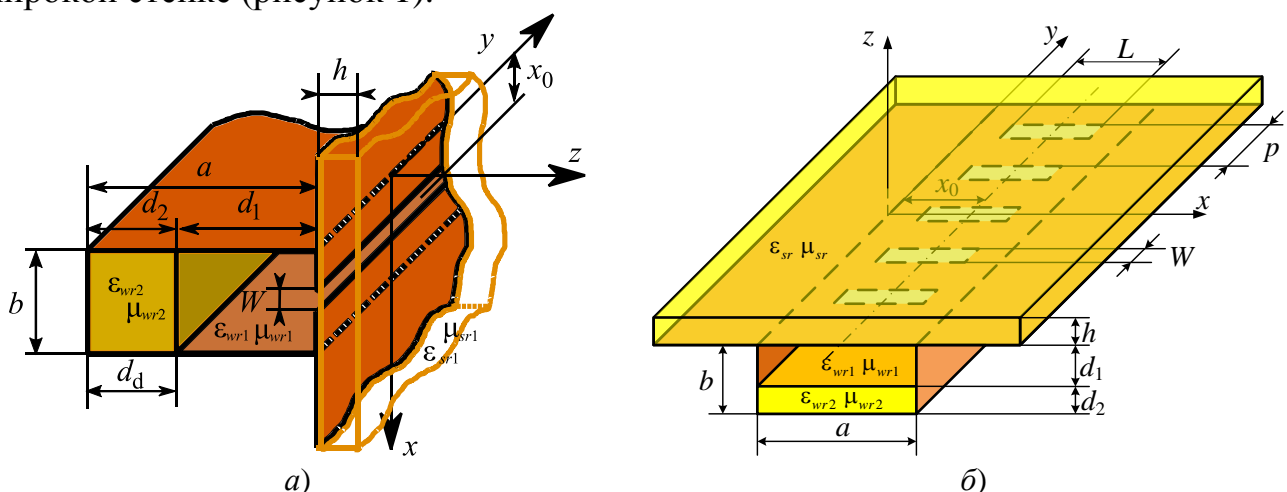


Рисунок 1 – Модель антенны вытекающих волн на основе многослойного прямоугольного волновода с укрытием и: а) продольной щелью в узкой стенке; б) поперечными щелями в широкой стенке

Для удобства анализа предполагается, что стенка волновода со щелями совмещена с бесконечным проводящим экраном; в качестве материала экрана и стенок волновода принят идеальный проводник, толщина которого бесконечно мала.

Искомая продольная постоянная распространения описанной системы определяется из интегрального уравнения, составленного методом частичных областей, основанного на выполнении условия непрерывности касательных составляющих напряженности магнитного поля в щели, являющейся элементом связи волновода с внешним пространством. Полученное уравнение решается прямым вариационным методом Галеркина.

В качестве инструмента расчета компонент магнитного поля в диссертационной работе предлагается применение аппарата тензорных функций Грина при разложении поля по волнам типов H и E относительно оси декартовой системы координат, перпендикулярной границе раздела диэлектриков:

$$H(\vec{r}) = \int_{S'} \overline{\overline{\Gamma}}_{22}(\vec{r}, \vec{r}') \mathbf{J}^M(\vec{r}') dS' \quad (1)$$

где $\overline{\overline{\Gamma}}_{22}$ – магнитная функция Грина, $\mathbf{J}^M(\vec{r}')$ – плотность распределения фиктивного магнитного тока по поверхности щели, рассматриваемой в качестве источника электромагнитного излучения.

Распределение магнитного тока по поверхности щели аппроксимируется одной тригонометрической функцией. Распределение по продольной щели в узкой стенке волновода задается монохроматической волной, бегущей в положительном направлении оси y , ориентированной вдоль оси волновода:

$$\mathbf{J}^M(\vec{r}') = \mathbf{a}_y \frac{M_0}{W} e^{-j\zeta y'}, \quad x_0 - \frac{W}{2} < x' < x_0 + \frac{W}{2}, \quad -\infty < y' < \infty, \quad (2)$$

для поперечной щели – первой гармоникой:

$$\mathbf{J}^M(\vec{r}') = \mathbf{a}_x \frac{M_0}{W} \cos\left[\frac{\pi}{L}(x' - x_0)\right], \quad x_0 - \frac{L}{2} < x' < x_0 + \frac{L}{2}, \quad -\frac{W}{2} < y' < \frac{W}{2}, \quad (3)$$

где \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y – единичные векторы вдоль соответствующих осей системы координат; M_0 – магнитный ток в пучности распределения; ζ – параметр, характеризующий фазовую скорость тока и соответствующий искомой продольной постоянной распространения; x_0 – смещение щели относительно ребра волновода, изменяющееся в пределах $W/2 < x_0 < b - W/2$ для волновода с продольной щелью в узкой стенке, $L/2 < x_0 < a - L/2$ – для волновода с поперечными щелями в широкой стенке; W – ширина щелей; L – длина поперечных щелей.

Функция Грина строится для двух видов поперечного сечения направляющей структуры в декартовой системе координат: многослойный прямоугольный волновод (внутренняя область), многослойный диэлектрик на проводящем экране (внешняя область). При этом спектр волн во внешнем неограниченном пространстве получается непрерывным, а внутри волновода за счет наличия граничных условий на металлических стенках – дискретным.

Поведение полей на границах раздела диэлектриков описывается характеристическими частями функции Грина – $g(z, z')$ для волн типа E и $f(z, z')$ для волн типа H . Каждый слой моделируется отрезком эквивалентной линии электрического или магнитного типа для соответствующих компонент электромагнитного поля:

$$f(z, z') = \frac{\vec{V}(z', z_0) \cdot \vec{V}(z, z_0)}{j\omega\mu_a \vec{Y}(z_0)}, \quad g(z, z') = \frac{\vec{I}(z', z_0) \cdot \vec{I}(z, z_0)}{j\omega\varepsilon_a \vec{Z}(z_0)},$$

где V и I – модальные напряжения и токи эквивалентной схемы (рисунок 2) относительно опорной плоскости z_0 ; $\vec{Y}(z_0)$ – полные эквивалентные проводимости относительно опорной границы, являющиеся суммой входных проводимостей в положительном $\vec{Y}(z_0)$ и отрицательном $\vec{Y}(z_0)$ направлениях вдоль оси z . Опорная плоскость z_0 совпадает с плоскостью расположения щелей. Расчет производится при помощи рекуррентной формулы для входной проводимости каскадно соединенных четырехполюсников, каждому из которых соответствует определенный слой рассматриваемой сэндвич структуры:

$$\vec{Y}^{E,H}(z_p) = Y_{p+1}^{E,H} \frac{\vec{Y}^{E,H}(z_{p+1}) \operatorname{ctg} \gamma_{p+1} d_{p+1} + jY_{p+1}^{E,H}}{Y_{p+1}^{E,H} \operatorname{ctg} \gamma_{p+1} d_{p+1} + j\vec{Y}^{E,H}(z_{p+1})}, \quad (4)$$

где $d_p = z_p - z_{p-1}$ – толщина p -го слоя диэлектрика, $Y_1^H = \gamma_1 / \omega\mu_a$, $Y_1^E = \omega\varepsilon_a / \gamma_1$ – эквивалентные проводимости слоев, соответствующих области наблюдения, γ_i – продольная относительно оси классификации типов волн (оси z) составляющая постоянной распространения, определяемая из условия: $k_i^2 = \gamma_i^2 + k_{\perp}^2$, k_i – волновое число в неограниченной среде, k_{\perp}^2 – поперечное волновое число относительно оси классификации типов волн.

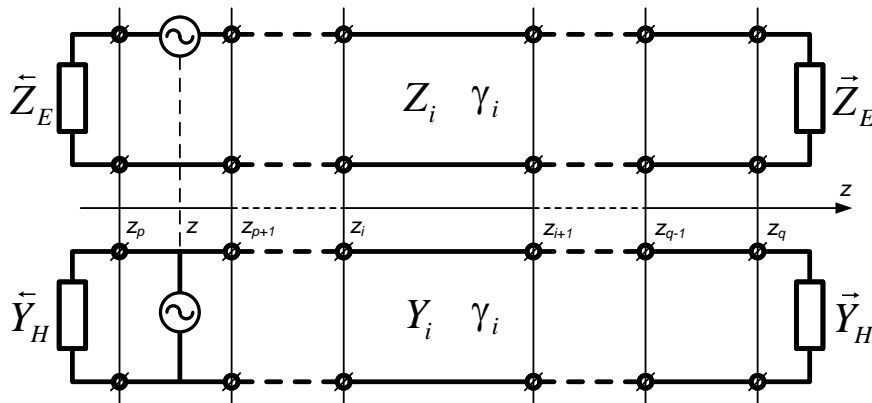


Рисунок 2 – Модель эквивалентных линий при разложении поля по волнам типа E и H относительно оси z

После получения аналитических выражений для расчета магнитного поля в двух областях модели, из них выбирается только часть, соответствующая тангенциальной составляющей, в плоскости щели, ограниченной ее размерами. Финальным действием при решении интегрального уравнения методом Галеркина является проверка выполнения требования ортогональности невязки к базисной функции распределения магнитного тока на всей поверхности сшивания полей. Таким образом, дисперсионное уравнение для антенны вытекающей волны на основе слоистого прямоугольного волновода с укрытием и продольной щелью в узкой стенке принимает вид:

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\infty} \frac{1}{k_x^2 + \zeta^2} \cdot \left[\zeta^2 \vec{Y}_{ext}^H(0) + k_x^2 \vec{Y}_{ext}^E(0) \right] \cdot \left[\frac{\sin k_x \frac{W}{2}}{k_x \frac{W}{2}} \right]^2 dk_x = \\
& = \frac{2\pi}{b} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos^2\left(\frac{\pi n x_0}{b}\right)}{\left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 + \zeta^2} \cdot \left[\zeta^2 \frac{\varepsilon_n}{2} \vec{Y}_{int}^H(0) + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 \vec{Y}_{int}^E(0) \right] \cdot \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi n W}{b 2}\right)}{\frac{\pi n W}{b 2}} \right]^2.
\end{aligned} \tag{5}$$

На последнем шаге составления дисперсионного уравнения для волновода с близко расположенными поперечными щелями в широкой стенке дополнительно учитываются периодические условия Флоке, и производится замена $k_{yn} \rightarrow k_y + 2\pi n/p$, где k_y – продольная постоянная распространения системы, n – номер гармоники Флоке, p – шаг нарезки щелей.

$$\begin{aligned}
& \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{1}{k_x^2 + k_y^2} \left[k_x^2 \vec{Y}_{ext}^H(0) + k_y^2 \vec{Y}_{ext}^E(0) \right] \left[\frac{\cos\left(k_x \frac{L}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 - k_x^2} \right]^2 dk_x = \\
& = \frac{2\pi}{a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + k_y^2} \left[\frac{\varepsilon_m}{2} \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 \vec{Y}_{int}^H(0) + k_y^2 \vec{Y}_{int}^E(0) \right] \left[\frac{\sin \frac{\pi m x_0}{a} \cos \frac{\pi m L}{2a}}{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 - \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2} \right]^2.
\end{aligned} \tag{6}$$

Разработанную методику предложено также использовать при анализе антенн вытекающей волны на основе волноводов, интегрированных в фольгированную диэлектрическую подложку. Такой волновод образован двумя рядами проводящих штырей (металлизированных отверстий), замыкающих плоские металлизированные поверхности, в одной из которых нарезаны щели. При расчете вводится понятие эквивалентной ширины волновода, учитывающей наличие штырей. Рассмотренные структуры представляют интерес для КВЧ диапазона.

Основной задачей **второй главы** является получение численных решений дисперсионных уравнений для рассмотренных антенн вытекающей волны со слоистой структурой поперечного сечения. Отличительной особенностью применяемого подхода является нелинейное разбиение сетки волновых чисел, основанное на преобразовании равномерно распределенной случайной величины в нормально распределенную с последующим уплотнением в окрестности начала локальной системы координат. Использование предложенного распределения показало свою эффективность, как при определении нулевого приближения, так и при последующем итерационном уточнении приближенного значения корня, за счет возможности независимого регулирования математического ожидания и среднеквадратического отклонения при фиксированном числе узлов сетки. Так как в диссертационной работе основной акцент сделан на получении общего вида гладкой кривой

дисперсионной характеристики, позволяющей записать закон изменения диаграммы направленности волноводной АВВ, задача фактически сводится к достоверному определению одной точки на всей частотной кривой и вероятностном определении остальных точек в окрестности значения на соседней частоте (математического ожидания).

В качестве нулевого приближения берется точка в начале координат комплексной плоскости в окрестности критической частоты волновода, однородно заполненного неким материалом с эффективной диэлектрической проницаемостью, рассчитываемой как среднее арифметическое проницаемостей внутренних слоев с учетом их толщины (рисунок 3). Уточнение корней достигается за счет сужения диапазона поиска путем уменьшения среднеквадратического отклонения при одновременной корректировке математического ожидания.

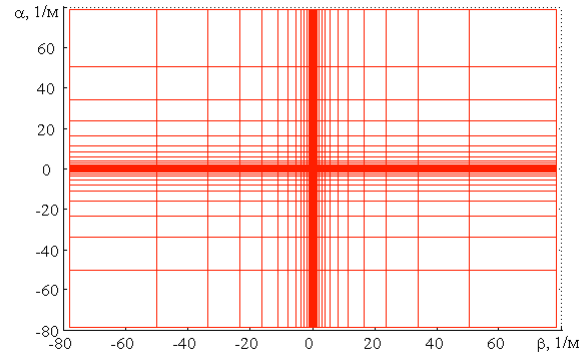


Рисунок 3 – Финальный вариант разбиения сетки комплексных волновых чисел

Основной трудностью при построении в разработанной системе координат поверхностей, заданных дисперсионными уравнениями (5) и (6), является расчет несобственных интегралов, содержащих ряд особых точек, число которых соответствует числу возбуждаемых поверхностных волн и варьируется в зависимости от толщины и диэлектрической проницаемости защитного укрытия. Стандартная процедура вычисления вычетов в окрестности этих полюсов сложна в связи с тем, что знаменатель подынтегральной функции содержит знак радикала. Поэтому в диссертационной работе интегралы, участвующие в записи дисперсионных уравнений, с учетом свойств экспоненты и натурального логарифма преобразуются к интегралам Лапласа и заменяются их асимптотическими разложениями. При анализе антенн с достаточно тонкими укрытиями происходит отбрасывание бесконечно малых слагаемых, а также используется свойство первого замечательного предела. Несмотря на кажущуюся громоздкость финальных формул, их применение позволяет сократить время вычислений машинными методами минимум на порядок по сравнению с расчетом интеграла при помощи встроенных функций MATLAB. Были исследованы модели антенн на основе полого волновода, многослойного волновода, полого волновода с укрытием.

Анализ классического случая однородного заполнения волноводов диэлектриком подтвердил корректность разработанной методики поиска постоянной распространения для двух рассматриваемых вариантов размещения щелей и показал хорошее совпадение результатов с результатами предшествующих исследователей. При построении зависимостей коэффициента замедления ξ плоскостойких волноводов в качестве параметров были использованы диэлектрическая проницаемость, толщина и положение диэлектриков, используемых в структуре антенны (рисунок 4). Были уточнены траектории изменения значения коэффициента за-

медления при перемещении диэлектрика внутри волновода из одного крайнего пристеночного положения в другое (рисунок 5).

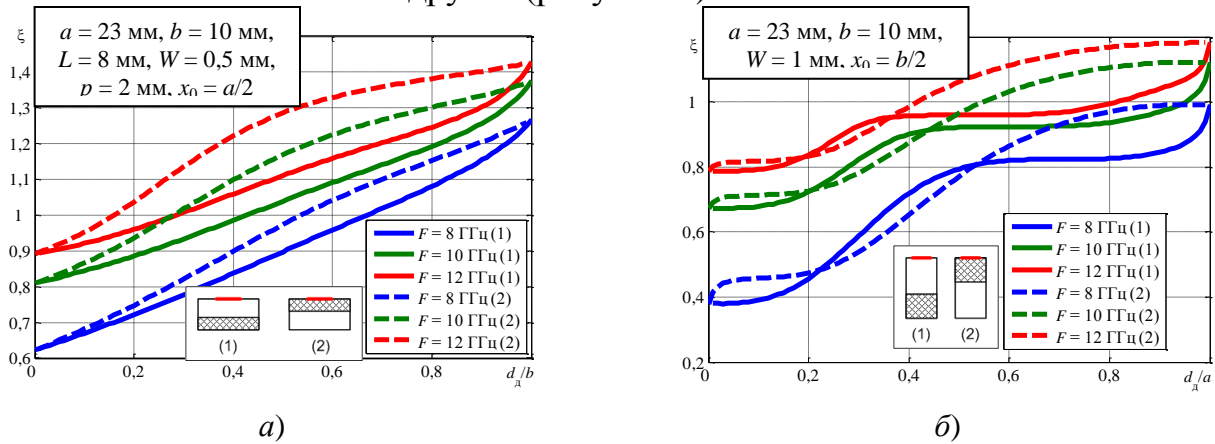


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента замедления от степени заполнения волновода диэлектриком ($\epsilon_{\text{врт}} = 2$): а) волновода с поперечными щелями; б) для волновода с продольной щелью

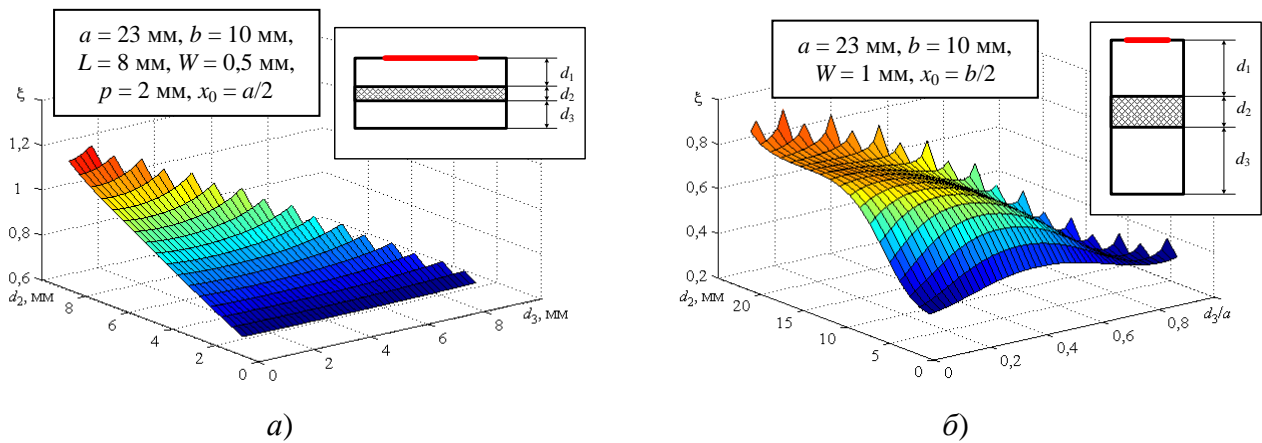


Рисунок 5 – Двумерная зависимость коэффициента замедления на частоте 8 ГГц от толщины и положения фторопластовой пластины в волноводе а) с поперечными щелями; б) с продольной щелью

Исследование антенн вытекающей волны на основе многослойных волноводов показало: чем выше значение средней диэлектрической проницаемости внутри волновода, тем меньше значение критической частоты системы. Крутизна дисперсионной характеристики в окрестности критической частоты тем выше, чем выше диэлектрическая проницаемость слоя, расположенного непосредственно рядом со щелью. Примеры зависимостей коэффициента замедления показаны на рисунке 6. На приведенных графиках большему значению диэлектрической проницаемости соответствует более темная штриховка (изменяется от 1 до 5).

Установлено, что диэлектрическое укрытие имеет незначительное влияние на полевые и частотные характеристики антенны вытекающих волн, однако подбор его параметров (толщины и диэлектрической проницаемости) позволяет осуществлять точную настройку формы дисперсионной кривой. Введение внешнего слоя диэлектрика изменяет дисперсионную характеристику щелевой структуры в сторону приближения к характеристике волновода без щелей.

На основе рассчитанных зависимостей коэффициента замедления в диссертационной работе было рассмотрено влияние параметров слоистой структуры антенны вытекающей волны на характеристики ее диаграммы направленности.

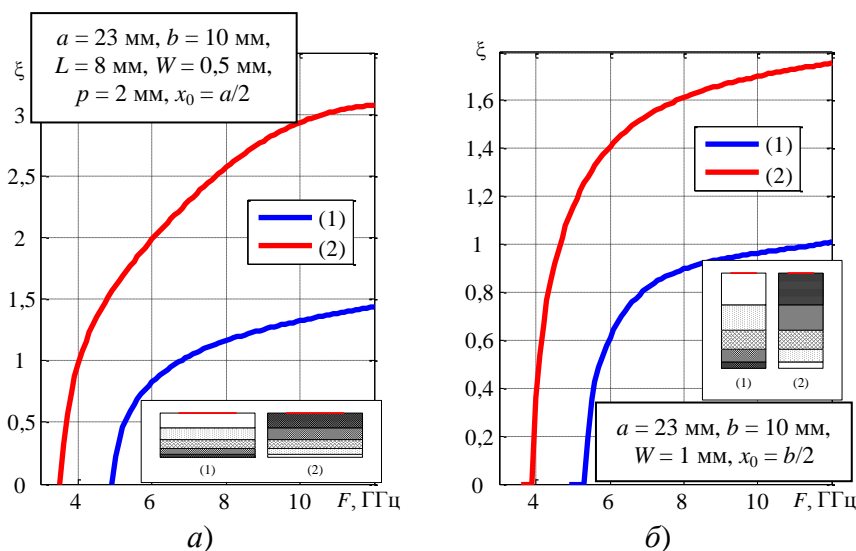


Рисунок 6 – Дисперсионные зависимости многослойных волноводов при линейном уменьшении толщины диэлектриков с увеличением расстояния от элементов связи: а) волновода с поперечными щелями; б) волновода с продольной щелью

Таким образом, увеличение степени заполнения волновода диэлектриком на отдельно взятой частоте приводит к наклону главного лепестка диаграммы направленности к оси антенны, сопровождающееся увеличением его ширины, вплоть до полного изменения режима излучения с поперечного на осевой.

Задачей **третьей главы** является верификация предложенной методики определения постоянной распространения вытекающих волн для прямоугольных волноводов со щелями и слоистым заполнением путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами натуральных измерений, выполненных с использованием высокоточного поверенного оборудования. Описываются конструкции опытных образцов антенн, используемое оборудование и применяемые методики измерения полевых и частотных характеристик исследуемых антенн. Приведены экспериментальные значения элементов матрицы рассеяния, диаграммы направленности, измеренные в условиях безэховой камеры, и рассчитанные на их основе зависимости коэффициента замедления.

Для проведения экспериментальных исследований антенны вытекающих волн были изготовлены два опытных образца на основе прямоугольного волновода со стандартными размерами поперечного сечения 23 мм × 10 мм (рисунок 7). Выбор суммарной длины излучающей поверхности ($L_A = 210$ мм) predetermined критерием дальней зоны для условий измерений.

В результате опыта дисперсионные характеристики антенн получены двумя методами:

1. Измерение значений элементов матрицы

Оценка положения главного максимума и его ширины проводилась при условии представления АВВ в качестве идеальных линейных излучателей. Угол наклона главного лепестка θ_0 , отсчитываемого от оси системы, в данном случае рассчитывается как $\theta_0 = \arccos \xi$, а его ширина определяется соотношением: $\Delta\theta = 51^\circ \lambda / (L_A \sin \theta_0)$, где L_A – линейный размер антенны.

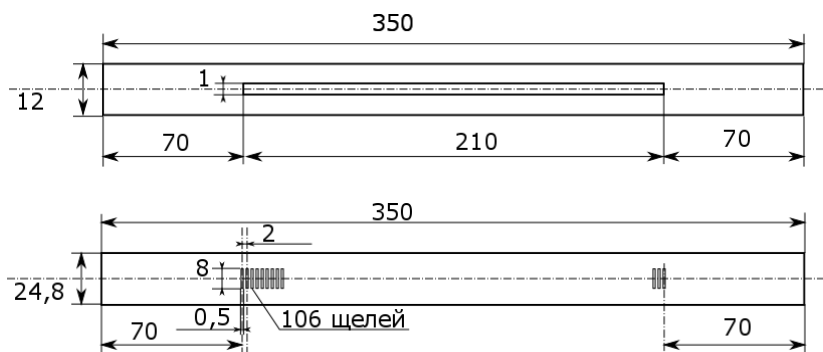


Рисунок 7 – Эскизы экспериментальных образцов

рассеяния помощи векторного анализатора электрических цепей Rohde & Schwarz ZVA50 и последующий расчет коэффициента замедления на основе величины фазового набега $\Delta\varphi$ коэффициента передачи между входами антенны из условия $\Delta\varphi = \beta l$, где l – длина линии передачи. Теоретические формы зависимостей коэффициента замедления опытных образцов при численном моделировании были получены путем расчета суммарного набега фаз в щелевой структуре и отрезках закрытого волновода с учетом их длин: $\xi_{\Sigma} = 0,4 \cdot \xi_w + 0,6 \cdot \xi_s$, где ξ_s – коэффициент замедления в области со щелями, ξ_w – коэффициент замедления в волноводе без щелей.

2. Измерение ДН исследуемых образцов в аттестованной безэховой камере Rainford EMC3, оборудованной системой автоматизированного управления процессом измерения, с применением поверенного оборудования Rohde&Schwartz, и последующее определение значения коэффициента замедления по положению главного максимума ДН в режиме наклонного излучения.

Для моделирования неоднородного заполнения прямоугольного волновода использовались пластины диэлектрика толщиной 2 мм. В качестве диэлектрика использованы фторопласт (ФФ-4) и поликарбонат, наполненный двуокисью титана (ПКТ-5), имеющие относительные диэлектрические проницаемости, равные 2 и 5 соответственно. При проведении экспериментов частичное заполнение волновода было реализовано на всей длине исследуемого образца с целью минимизации возмущения поля при переходе от закрытого волновода к волноводу со щелями. Дополнительно, для уменьшения коэффициента отражения торцы диэлектрических пластин были скошены под углом 45° . Диэлектрики поочередно прижимались к одной из стенок волновода посредством отрезков пенопласта, диэлектрическая проницаемость которого близка к проницаемости воздуха. Для каждого диэлектрика были рассмотрены случаи единичной и удвоенной толщины (2 и 4 мм), при расположении у противоположной стенки от щелей, непосредственно у стенки со щелями и в качестве защитного слоя с внешней стороны волновода.

Эксперименты показали, что характер изменения диаграмм направленности антенн при изменении их внутренней и внешней структуры полностью соответствует ожидаемому, как в случае частичного заполнения

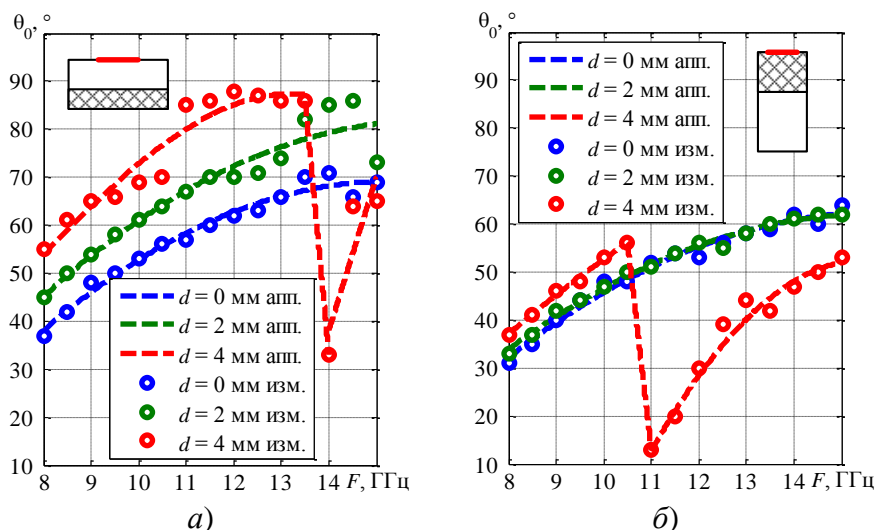


Рисунок 8 – Частотная зависимость положения главного максимума ДН АВВ на основе: а) волновода с поперечными щелями, частично заполненного фторопластом ($\epsilon = 2$), расположенным у противоположной стенки от щелей; б) волновода с продольной щелью, частично заполненного ПКТ-5 ($\epsilon = 5$), расположенного у щели

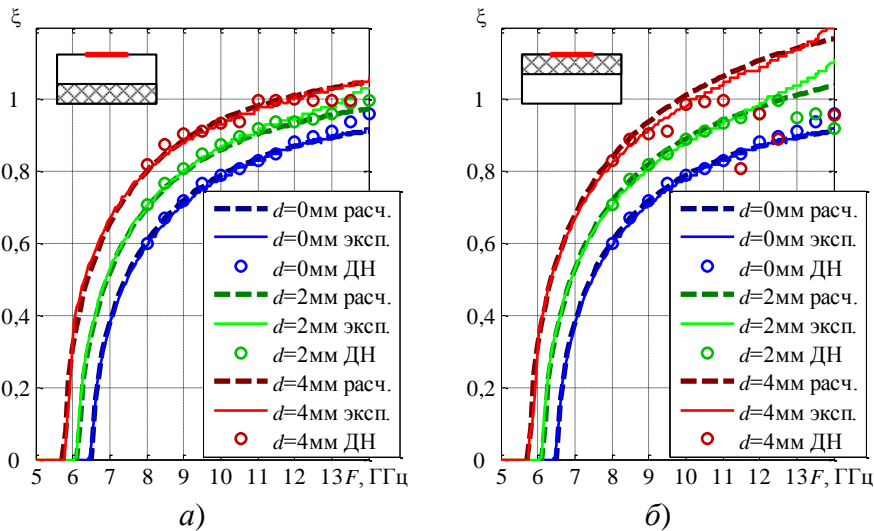


Рисунок 9 – Сравнение расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых для прямоугольного волновода с поперечными щелями, частично заполненного фторопластом: а) диэлектрик у противоположной стенки от щелей; б) диэлектрик у щелей

ния фазовой скорости возбуждения является переход антенны из наклонного режима излучения в осевой (рисунок 8), когда главный лепесток ДН начинает выходить за границу области видимости, и первый боковой лепесток становится соизмерим с ним по уровню, а при дальнейшем увеличении частоты становится главным.

На рисунках 9 и 10 представлены дисперсионные кривые, рассчитанные в соответствии с предложенной методикой, а также полученные двумя указанными ранее экспериментальными способами. В случае волновода с поперечными щелями наблюдается практически идеальное соответствие результатов во всем рассматриваемом диапазоне частот (рисунок 9). Для волновода с продольной щелью соответствие достигается в диапазоне от 7,5 ГГц (рисунок 10). Причиной расхождения характеристик на более низких частотах является различие в критических длинах волн щелевого участка и участка закрытого волновода: критическая частота щелевой части оказывается выше критической частоты закрытого волновода. Поэтому при переходе из одной области в другую возникает переходный процесс и частичное отражение мощности, для учета которых разработанная методика не предназначена.

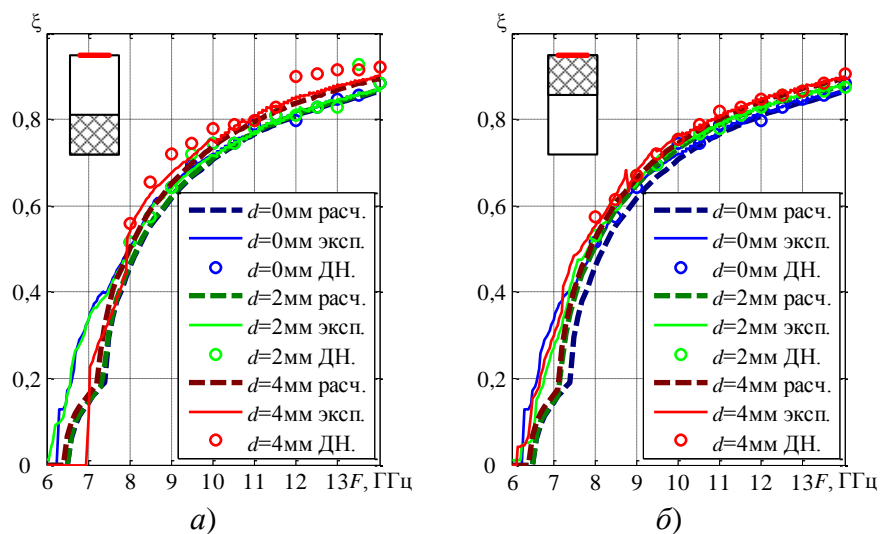


Рисунок 10 – Сравнение расчетных и экспериментальных дисперсионных кривых для прямоугольного волновода с продольной щелью, частично заполненного фторопластом: а) диэлектрик у противоположной стенки от щели; б) диэлектрик у щели

волновода диэлектриком, так и в случае волновода с защитным укрытием. С увеличением значения диэлектрической проницаемости заполнения волновода или внешнего слоя, равно как с увеличением их толщины, наблюдаемые тенденции изменения коэффициента замедления и отклонения луча ДН становятся более выраженными. Предельным случаем замедле-

Рисунки 9 и 10 подтверждают адекватность применения моделей идеально-го линейного излучателя и равномерной линейной антенной решетки при анализе непрерывной и периодической антенн вытекающих волн в режиме наклонного излучения.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В качестве способа обеспечения требуемых законов частотного сканирования ДН предложено использование антенны вытекающих волн на основе прямоугольных волноводов с поперечными щелями в широкой стенке или продольными щелями в узкой стенке, имеющими внутри слоистую структуру диэлектрика. Применение поперечно неоднородной структуры заполнения позволяет варьировать значение эффективной диэлектрической проницаемости, а соответственно, и постоянной распространения в волноводе в широком диапазоне значений при ограниченном наборе используемых для этой цели материалов с фиксированной диэлектрической проницаемостью.

2. Разработана обобщенная математическая модель волноводно-щелевой антенны на основе аппарата тензорных функций Грина для стратифицированных сред в декартовой системе координат, отличающаяся универсальностью с точки зрения возможного количества слоев и вида рассматриваемой области: прямоугольный волновод, плоский волновод или открытое полупространство. Предложенная модель позволяет определить все компоненты электромагнитного поля в любой точке пространства, в том числе в дальней зоне при расчете диаграмм направленности. Данная модель позволяет в едином цикле учесть слоистую структуру внутреннего заполнения прямоугольного волновода, а также возможное наличие внешнего защитного диэлектрического укрытия антенны. Кроме того, модель позволяет учесть внешнее воздействие на антенну, например, наличие водяной пленки.

3. Разработана методика составления дисперсионных уравнений для излучающих плоскостойких волноводов различных конфигураций поперечного сечения. Получены выражения, позволяющие определить постоянную распространения в структуре, слои которой параллельны плоскости излучения. На основе полученных расчетных соотношений созданы быстродействующие программы расчета дисперсионных характеристик собственных волн многослойных волноводных структур в виде прямоугольного волновода с продольной щелью в узкой стенке, прямоугольного волновода с поперечными щелями в широкой стенке, волновода с поперечными щелями, интегрированного в многослойную печатную плату. Основные новые результаты состоят в следующем.

3.1. Разработан новый алгоритм численного решения трансцендентных уравнений, облегчающий задачу поиска нулевого приближения корней на каждой частоте за счет применения методов статистической обработки данных, что существенно повышает точность и быстродействие программных комплексов, по сути,

ограничиваясь задачей точного определения одного единственного корня в окрестности критической частоты системы.

3.2. Наличие излучающих щелей на стенках полого прямоугольного волновода сказывается на фазовой скорости распространяющейся в нем волны по-разному в зависимости от выбора плоскости размещения элементов связи с внешним пространством. При этом зависимости коэффициента замедления от положения щелей относительно стенок волновода обладают осевой симметрией. Зависимость фазовой скорости от длины поперечных щелей в широкой стенке имеет минимум, когда длина щелей является резонансной.

3.3. Частичное заполнение волноводов диэлектриком приводит к уменьшению фазовой скорости возбуждения независимо от ориентации силовых линий электрического поля основной волны относительно излучающей плоскости, положения диэлектрика внутри волновода, его проницаемости и степени заполнения. Однако, зависимости коэффициента замедления от коэффициента заполнения при прилегании диэлектрика к стенкам волновода, параллельным плоскости излучения, описываются кривыми разных порядков и определяются именно ориентацией векторов напряженности поля внутри волновода.

3.4. Смещение диэлектрика от стенок волновода к его середине приводит к противоположным направлениям изменения фазовой скорости в структуре с поперечными щелями и структуре с продольной щелью: повышению и понижению, соответственно.

3.5. Установлено, что критическая частота системы определяется эффективной диэлектрической проницаемостью внутри волновода, а крутизна дисперсионной характеристики тем выше, чем больше значение диэлектрической проницаемости слоя, расположенного непосредственно у щелей. При одних и тех же размерах волноводов и одинаковых соотношениях между слоями заполняющей волновода сэндвич структуры для двух рассмотренных вариантов расположения щелей, превышение значений коэффициента замедления в волноводе с поперечными щелями достигает 100% при одинаковых значениях рабочей частоты. Однако, с учетом того, что практическую значимость имеет лишь изменение коэффициента замедления от 0 до 1, повышение крутизны дисперсионной характеристики способствует уменьшению диапазона частот, необходимого для переориентации основного максимума диаграммы направленности между крайними положениями.

3.6. Менее резкое изменение дисперсионной характеристики прямоугольного волновода с продольной щелью в узкой стенке способствует более точному позиционированию луча в пространстве, однако требует сложных алгоритмов управления вследствие нелинейности угло-частотной характеристики. Линейную зависимость проще получить при частичном заполнении волновода с поперечными щелями.

3.7. Применение диэлектрического укрытия позволяет не только защитить антенну от воздействия внешних дестабилизирующих факторов, но и скорректировать форму дисперсионной кривой согласно требованиям решаемых задач. Причем, наличие защитного слоя над продольной щелью способствует отклонению луча в сторону оси антенны; над поперечными щелями – к нормали.

4. Выполненные экспериментальные исследования образцов антенн вытекающих волн в условиях аттестованной безэховой камеры и поверенной измерительной аппаратуры подтвердили корректность разработанной методики анализа и полученных численных результатов. Доказана возможность существования быстрых волн в щелевой структуре. Доказана справедливость представления антенны вытекающих волн в волноводно-щелевом исполнении в качестве линейной антенны.

Рекомендации по итогам диссертационного исследования

Приведенные результаты показывают, что разработанная модель является универсальной, так как с ее помощью возможно анализировать структуры, природа изменения характеристик которых различна. Метод тензорных функций Грина является наиболее универсальным способом решения координатных задач электромагнитного возбуждения, отличающимся прозрачностью алгоритма использования и позволяющим анализировать плоские слоистые структуры, в том числе имеющие в своем составе материалы с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Исследования, проводимые по теме диссертации, позволят отработать методы анализа антенн, работающих, например, в автомобильной радарной технике, где требуется высокое разрешение по измерению расстояний между объектами и их взаимному местоположению в пространстве. Рассмотренные антенны по своей конструкции являются конформными, обладают хорошей аэродинамикой и могут быть использованы на автономных объектах в качестве направленных телекоммуникационных антенн.

Перспективы развития темы исследования

В качестве дальнейших направлений исследования автор рассматривает два пути: экстенсивное – наращивание функционала разработанных программ; и интенсивное – доработка алгоритмов с целью дальнейшего повышения быстродействия создаваемых на их основе программ.

К первому направлению относится увеличение числа слоев (как внутреннего заполнения, так и укрытия), применение нелинейных законов изменения толщины и диэлектрической проницаемости между слоями, анализ антенны с укрытием из композитного материала с отрицательным коэффициентом рефракции (метаматериала). Также может быть разработана методика расчета характеристик антенны вытекающих волн на основе волноводов, обладающих сложной формой элементов связи, что позволит формировать направленное излучение требуемой поляризации и, соответственно, повысить вероятность обнаружения сигналов, отраженных от объектов наблюдения при использовании данных антенн в составе систем бортовой радиолокации бокового обзора.

Увеличение быстродействия программного продукта может быть достигнуто за счет изменения принципов расчета интегралов, например, применения теории вычетов, асимптотических приближений, и т. п., а также дальнейшей оптимизации сетки комплексных волновых чисел и применения вероятностного подхода с возможным применением нелинейной фильтрации.

Отдельной задачей стоит задача синтеза антенн с требуемой крутизной дисперсионной характеристики в заданном диапазоне частот с учетом набора суще-

ствующих диэлектриков и их толщины. В рамках ее решения может быть осуществлен вывод эмпирической формулы методами регрессионного анализа, позволяющей определить форму дисперсионной кривой в явном виде.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК

1. Абдуллин Р.Р. Анализ антенны вытекающей волны на основе частично заполненного прямоугольного волновода / Р.Р. Абдуллин, С.Н. Шабунин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. № 1. С. 12-17 (0,4 п.л./ 0,2 п.л.).

2. Абдуллин Р.Р. Анализ антенны вытекающей волны на основе частично заполненного прямоугольного волновода с продольной щелью / Р.Р. Абдуллин // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2015. № 8. (1,1 п.л.).

3. Абдуллин Р.Р. Экспериментальное исследование антенны вытекающих волн на основе частично заполненного прямоугольного волновода с поперечными щелями / Р.Р. Абдуллин // Антенны. 2016. № 3. С. 46-54 (0,6 п.л.).

4. Абдуллин Р.Р. Экспериментальное исследование антенны вытекающих волн на основе частично заполненного прямоугольного волновода с продольной щелью / Р.Р. Абдуллин // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 2. С. 3-8 (0,4 п.л.).

Доклады и тезисы, опубликованные в сборниках материалов конференций

5. Абдуллин Р.Р. Применение метода функций Грина слоистых структур для анализа антенны вытекающей волны на основе волновода с поперечными щелями / Р.Р. Абдуллин, С.Т. Князев, С.Н. Шабунин // Физика и технические приложения волновых процессов. Екатеринбург. 2012. С. 98-99. (0,15 п.л / 0,05 п.л.).

6. Abdullin R.R. Analysis of Partially Dielectric-Filled Rectangular Waveguide with Transverse Slots Using Green's Function Method / R.R. Abdullin, S.T. Knyazev, L.L. Lesnaya, S.N. Shabunin // 7th European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2013. Gothenburg, Sweden. 2013. pp. 3453-3457. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.).

7. Абдуллин Р.Р. Применение тензорных функций Грина для анализа антенны вытекающих волн на основе частично заполненного диэлектриком прямоугольного волновода с поперечными щелями / Р.Р. Абдуллин, С.Т. Князев, С.Н. Шабунин // 23-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии" (КрыМиКо'2013). Севастополь. 2013. С. 580-581. (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

8. Абдуллин Р.Р. Применение частично-заполненного прямоугольного волновода в конструкции антенны вытекающей волны / Р.Р. Абдуллин, Ю.Е. Мительман // 24-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2014). Севастополь. 2014. С. 543-544. (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

9. Abdullin R.R. Velocity Factor of Leaky-Wave Antenna Based on Partially Filled Rectangular Waveguide / R.R. Abdullin, Y.E. Mitelman, S.N. Shabunin // 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia. 2014. Vol. 1. pp. 406-409. (0,25 п.л. / 0,1 п.л.).

10. Abdullin R.R. Radiation Pattern of Leaky-Wave Antenna Based on Partially-Filled Rectangular Waveguide / R.R. Abdullin, Y.E. Mitelman, S.N. Shabunin // 2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC). Loughborough, UK. 2014. pp. 516-518. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

11. Abdullin R.R. Using Green's Function Method for Leaky-Wave Antenna Analysis Based on Partially-Filled Slitted Rectangular Waveguide / R.R. Abdullin, S.N. Shabunin // The Third International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC2015). Moscow, Russia. 2015. pp. 180-183. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

12. Abdullin R.R. Velocity Factor of Leaky-Wave Antenna Based on Partially Filled Slitted Rectangular Waveguide / R.R. Abdullin, S.N. Shabunin // The 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Kuta, Indonesia. 2015. pp. 83-85. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

13. Абдуллин Р.Р. Анализ антенны вытекающей волны на основе частично заполненного прямоугольного волновода с продольной щелью в узкой стенке / Р.Р. Абдуллин, С.Н. Шабунин // 25-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии" (КрыМиКо'2015). Севастополь. 2015. С. 481-482. (0,15 п.л. / 0,08 п.л.).

14. Абдуллин Р.Р. Антенна вытекающей волны на основе прямоугольного волновода с укрытием / Р.Р. Абдуллин, С.Н. Шабунин // 25-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии" (КрыМиКо'2015). Севастополь. 2015. С. 483-484. (0,15 п.л. / 0,08 п.л.).

15. Abdullin R.R. Performance calculation of leaky-wave antenna based on substrate integrated waveguide with transverse slots / R.R. Abdullin, S.N. Shabunin // 2015 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS). Tel-Aviv, Israel. 2015. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

16. Abdullin R.R. Experimental Research of Leaky-Wave Antenna Based on Covered Rectangular Waveguide with Transverse Slots / R.R. Abdullin, R.I. Sokolov // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC 2016). Seoul, Korea. 2016. pp. 1578-1581. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

17. Abdullin R.R. Experimental Research into Leaky-Wave Antenna Based on Layered Rectangular Waveguide with Transverse Slots / R.R. Abdullin, R.I. Sokolov // 24th Telecommunications forum TELFOR 2016. Belgrade, Serbia. 2016. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

18. Абдуллин Р.Р. Антенна вытекающих волн на основе многослойных волноводов / Р.Р. Абдуллин // 26-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и Телекоммуникационные Технологии" (КрыМиКо'2016). Севастополь. 2016. С. 1037-1043. (0,8 п.л.).