

На правах рукописи

Мануилов Михаил Борисович

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНЕЧНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК, ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ И
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ГРЕБНЕВЫХ
И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2007

Работа выполнена на кафедре прикладной электродинамики и компьютерного моделирования Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный Федеральный университет»

Научный консультант:

доктор физико-математических наук,
профессор Синявский Геннадий Петрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Кравченко Виктор Филиппович
доктор физико-математических наук,
профессор Бабичев Рудольф Карпович
доктор технических наук,
профессор Хуторцев Валерий Владимирович

Ведущая организация:

Московский авиационный институт (технический университет) – МАИ

Защита состоится «_____» _____ 2007 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 212.208.10 в Южном Федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге , 5, ЮФУ, физфак, ауд. 247.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 148.

Автореферат разослан «_____» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.208.10,
доктор физико-математических наук,
профессор

Г.Ф. Заргано

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время ведутся интенсивные разработки в области совершенствования известных и создания новых типов антенных решеток (АР), которые все шире применяются как в различных военных, так и в новых коммерческих приложениях [1]. Среди этих приложений важное место занимают различные модификации волноводных и волноводно-щелевых АР [2-6], что связано с их хорошо известными преимуществами.

В частности, для выполнения комплекса предельно высоких требований, предъявляемых к бортовым фазированным АР (ФАР) для истребительной авиации, в [3] были разработаны ФАР волноводных излучателей с волноводной распределительной системой. Для этих антенн характерны высокие значения коэффициента использования поверхности ($KИП > 0.5$), низкий уровень боковых лепестков в широком секторе сканирования, высокая электрическая прочность. Такие многофункциональные решетки, устанавливаемые в носовой части самолета, пришли на смену зеркальным и волноводно-щелевым АР с механическим сканированием. По своей энергетической эффективности ФАР с волноводной распределительной системой вплотную приблизились к зеркальным и волноводно-щелевым антеннам с механическим сканированием, обеспечивая радару радикальные преимущества за счет свойств электронного управления лучом.

Одной из тенденций, наблюдаемых в развитии антенн КВЧ диапазона для коммерческих приложений, является поиск альтернативы зеркальным антеннам. Для этого требуются компактные плоские антенны с высоким коэффициентом усиления, пригодные для массового производства. К числу таких приложений относятся, в частности, высокоскоростные локальные беспроводные сети связи (LAN) (диапазон 60 ГГц), автомобильные радары (диапазон 60-80 ГГц), радиорелейные системы связи диапазона 20 ГГц для соединения базовых станций мобильной связи, системы спутниковой связи и вещания диапазона 20-50 ГГц и др. [6].

В [5] разработаны компактные конструкции остронаправленных несканирующих волноводно-рупорных АР с волноводной схемой питания для систем связи диапазонов 39 ГГц и 58 ГГц. Другим перспективным классом антенн в решении данной проблемы являются волноводно-щелевые АР. Ряд новых конструкций волноводно-щелевых АР рассмотрен в [6]. Еще одно из перспективных применений волноводно-щелевых решеток – это излучатели в составе активных ФАР многофункциональных космических радиолокационных комплексов с синтезированной апертурой [4].

Развитие современных бортовых радиоэлектронных систем приводит к необходимости многолучевой работы, расширения сектора сканирования и рабочей полосы, выполнения ряда функций (совмещенная работа систем связи, радиолокации, госопознавания, радиоэлектронной борьбы и др.). Перспективным с этой точки зрения является разработка различных выпуклых АР, в т.ч. цилиндрических [1]. Реализация многолучевых режимов работы с независимым управлением положением, уровнем и фазой лучей представляет также существенный практический интерес, например, в условиях многолучевого приема одной антенной, в задачах радиоэлектронной борьбы и др.

Разработка волноводных и волноводно-щелевых АР с высокими электрическими параметрами в качестве необходимого этапа включает их электродинамическое моделирование. Анализ волноводных АР строился на основе двух- и трехмерных моделей периодических [7] и конечных решеток [2,8-10]. В настоящее время достаточно хорошо разработаны основанные на теореме Флоке методы решения трехмерных задач для бесконечных периодических АР [7,11,12].

Однако даже для достаточно больших решеток модель бесконечной периодической АР не вполне адекватно описывает происходящие в них физические процессы, пренебрегая краевыми эффектами, которые вносят заметные изменения в характеристики согласования и направленности. Поэтому в последнее время значительные усилия сосредоточены на разработке более адекватных трехмерных методов анализа конечных волноводных антенных решеток, в т.ч. с использованием гибридных подходов, включающих применение теоремы Флоке, формулы суммирования Пуассона, дискретного преобразования Фурье, геометрической теории дифракции и т.д. [13].

Во многих случаях на практике АР имеет диэлектрическое покрытие, которое используется для защиты от внешних воздействий, а также для улучшения согласования при сканировании [2,14]. Как было установлено в [14], применение многослойных обтекателей антенн, в т.ч. с непрерывным изменением показателя преломления, позволяет обеспечить функционирование антенны в широком частотном диапазоне. Однако влияние конечных многослойных диэлектрических покрытий на характеристики волноводных АР пока недостаточно исследовано.

Методам электродинамического анализа различных типов волноводно-щелевых АР посвящено очень много работ. Основы теории щелевых антенн заложены в [15-17] и других работах. Однако большая часть известных подходов основана на использовании тех или иных упрощающих предположений, которые сужают область применения этих моделей и их точность. В последнее время все большее внимание уделяется созданию строгих электродинамических моделей волноводно-щелевых АР.

Таким образом, **актуальной** является разработка строгих электродинамических методов решения трехмерных задач анализа конечных волноводных и волноводно-щелевых АР. Это имеет фундаментальное значение для создания АР рассматриваемого класса с высокими электрическими параметрами. Большой теоретический и практический интерес представляет также создание электродинамических моделей цилиндрических волноводных АР и реализация многолучевых режимов работы АР.

Возросший за последнее время уровень требований к электрическим параметрам разрабатываемых частотно-селективных и распределительных волноводных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов, а также существенный прогресс в области технологий изготовления этих устройств ставит качественно более сложные задачи в области их моделирования.

Большой практический интерес представляют различные компоненты на волноводах сложных сечений и прямоугольных волноводах: волноводные фильтры нижних частот на многогребневых секциях (вафельного типа) для многодиапазонных фидерных трактов наземных станций спутниковой связи; волноводные фильтры квазипланарного типа на гребневых секциях и Е-плоскостных диафрагмах, многощелевые направленные ответвители для систем связи миллиметрового диапазона; многоканальные делители мощности на Е-плоскостных шлейфах для диаграммообразующих устройств антенн с контурной диаграммой направленности; 90-градусные поляризаторы на квадратных волноводах для систем спутниковой связи и др.

При изготовлении пассивных волноводных компонентов для современной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазона используются методы прецизионной механической и электроискровой обработки, элементы планарной технологии, LTCC-технология (применение низкотемпературной керамики), технология инжекционного литья (формовки) из пластмасс с последующей металлизацией и др.

В этой связи обязательным этапом в разработке волноводных устройств является их электродинамическое моделирование. Моделирование таких устройств может быть выполнено на основе универсальных численных методов (метод конечных элементов, конечного интегрирования, конечных разностей во временной области, метод R-функций [18] и др.), численно-аналитических методов, гибридных (комбинированных) методов.

Проигрывая численным методам в универсальности, численно-аналитические методы дают радикальный выигрыш в эффективности, обеспечивая высокую точность результатов при наименьших затратах времени на разработку. В тех случаях, когда построить численно-аналитическое решение невозможно, гибридные методы позволяют добиться наилучшего результата.

Это достигается выбором наиболее эффективных методов решения подзадач, на которые разделяется решение исходной электродинамической задачи.

Исходя из этого, **актуальной** является разработка эффективных комбинированных и численно-аналитических методов электродинамического анализа частотно-селективных и распределительных устройств на гребневых и прямоугольных волноводах для современной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазонов.

Целью диссертационной работы является:

- разработка эффективных электродинамических методов решения трехмерных задач анализа волноводных антенных решеток с конечными многослойными диэлектрическими покрытиями, волноводно-щелевых антенных решеток и решеток продольных щелей на идеально проводящем круговом цилиндре;
- разработка эффективных комбинированных и численно-аналитических методов электродинамического анализа устройств на волноводах сложных сечений, квазипланарных и многоэлементных волноводных устройств на Е- и Н-плоскостных неоднородностях;
- исследование характеристик антенных решеток и разработка рекомендаций для их конструктивного синтеза; электродинамический анализ и оптимизация частотно-селективных и распределительных волноводных устройств с высокими электрическими параметрами для современной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазонов.

Для достижения этой цели решен ряд электродинамических задач, разработаны специальные методы и алгоритмы, проведены численные исследования антенных решеток и волноводных устройств.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработаны строгие методы электродинамического анализа конечных решеток прямоугольных волноводов под невыступающим многослойным диэлектрическим покрытием конечных размеров и многоэлементных волноводно-щелевых антенных решеток с продольными и поперечными щелевыми излучателями, включая неэквидистантные АР. Решение построено на основе метода Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Чебышева и Гегенбауэра, учитывающих асимптотику поля на краях апертур, что обеспечивает быструю сходимость метода. Наряду с выбором базиса высокая эффективность численно-аналитического решения для волноводно-щелевых решеток достигается благодаря примененным оригинальным методам улучшения сходимости двойных рядов и интегралов.

Предложенные методы расчета волноводно-щелевых решеток и волноводных решеток с диэлектрическими покрытиями представляют собой новый методический аппарат для строгого эффективного анализа широкого класса конечных антенных решеток с плоским раскрывом.

2. Разработан эффективный комбинированный электродинамический метод анализа волноводных фильтров на секциях многогребневых волноводов (вафельных фильтров) и фильтров квазипланарного типа на гребневых секциях и индуктивных неоднородностях. Общая эффективность решения обеспечивается выбором наиболее эффективных методов решения отдельных подзадач. Новое решение построено на основе метода Галеркина с учетом краевой особенности поля, метода модового сшивания и метода обобщенных матриц рассеяния.

Разработанный комбинированный метод непосредственно применим к расчету широкого класса пассивных компонентов на различных волноводах сложных сечений при разработке современной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазонов.

3. Предложены новые эффективные численно-аналитические решения задач анализа широкого класса волноводных компонентов СВЧ и КВЧ диапазонов: квазипланарных волноводных фильтров на E-плоскостных диафрагмах, многощелевых и многошлейфных направленных ответвителей, многоэлементных устройств на E- и H-плоскостных ступенчатых неоднородностях (поляризаторы, фильтры и др.). Ключевыми моментами, обеспечивающими высокую эффективность решения, является выбор в качестве базиса взвешенных полиномов Гегенбауэра или Чебышева при реализации метода Галеркина, а также процедура аналитической регуляризации матричного оператора итоговой системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) первого рода.

4. Разработан эффективный комбинированный метод анализа многоканальных волноводных делителей мощности, основанный на методе Галеркина с учетом краевой особенности поля и методе обобщенных матриц рассеяния.

5. Предложен новый способ формирования комплексных многолепестковых ДН антенных решеток произвольной геометрии, основанный на модифицированном матричном методе синтеза. Способ реализован для трехмерной модели решетки щелевых излучателей на круговом идеально проводящем цилиндре. Данный способ позволяет независимо регулировать положения, относительные уровни и фазы формируемых лучей, что создаёт возможность эффективного приёма сигналов при многолучевом распространении радиоволн. При этом сохраняется возможность регулирования локального и общего уровня боковых лепестков.

6. В результате проведенных исследований волноводных решеток с конечными невыступающими диэлектрическими покрытиями показано, что для улучшения согласования АР при широкоугольном сканировании необходимо использовать покрытия с двумя и более слоями. На основе строгого анализа сделаны приближенные оценки электрических размеров конечных двухслойных покрытий, обеспечивающих при сканировании высокое согласование и улучшенные диапазонные свойства. Исследованы характеристики отдельных излучателей и многоэлементных волноводно-щелевых решеток нерезонансного типа. Установленные закономерности формирования этих характеристик могут непосредственно использоваться при конструктивном синтезе данного класса волноводно-щелевых АР.

7. На базе разработанных строгих методов анализа исследованы основные закономерности частотных характеристик широкого класса волноводных устройств и оптимизирован ряд волноводных компонентов СВЧ и КВЧ диапазонов с высокими электрическими параметрами: волноводные фильтры нижних частот вафельного типа, квазипланарные фильтры и диплексеры, многощелевые направленные ответвители, многоканальные делители мощности, 90-градусные поляризаторы на квадратных волноводах.

Научная и практическая значимость диссертационной работы.

Научная значимость работы заключается в создании нового методического аппарата для эффективного электродинамического анализа волноводно-щелевых АР, волноводных АР с конечными покрытиями, применимого также и к расчету других типов конечных АР с плоским раскрытием; эффективных методов анализа широкого класса частотно-селективных и распределительных волноводных устройств для современной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазонов; предложенном способе формирования многолепестковых комплексных ДН антенных решеток произвольной геометрии, основанном на матричном синтезе и электродинамическом анализе АР.

Практическая ценность работы определяется созданными программными комплексами для электродинамического моделирования: • волноводных АР с конечными многослойными диэлектрическими покрытиями; • волноводно-щелевых АР; • волноводных фильтров вафельного типа и квазипланарных фильтров на гребневых секциях и продольных диафрагмах; • квазипланарных волноводных фильтров на Е-плоскостных одно- и многоэлементных диафрагмах, диплексеров; • многощелевых и многошлейфных волноводных направленных ответвителей; • многоканальных волноводных делителей мощности на Е-плоскостных шлейфах; • решеток продольных щелевых излучателей на идеально проводящем круговом цилиндре.

Практическую ценность представляет также ряд полученных численных и экспериментальных результатов: сделанные на основе строгого анали-

за оценки электрических размеров двухслойных конечных диэлектрических покрытий, обеспечивающих улучшенное согласование волноводных АР; закономерности частотных характеристик волноводно-щелевых АР; результаты анализа и оптимизации волноводных фильтров нижних частот вафельного типа для фидерных трактов наземных станций спутниковой связи S, C, X, Ku диапазонов; результаты анализа и оптимизации квазипланарных фильтров, диплексеров, направленных ответвителей K и Ka диапазонов, 90-градусных поляризаторов для систем спутниковой связи X и Ku диапазонов.

Поставленные в диссертации задачи решались в ходе выполнения ряда проектов Министерства образования и науки РФ в области фундаментальных и прикладных исследований, совместных НИР в различных отраслевых НИИ, а также госбюджетных и хоздоговорных НИР на кафедре прикладной электродинамики и компьютерного моделирования Южного Федерального университета.

Результаты исследований и программы расчета волноводных антенных решеток, волноводных фильтров на многогребневых секциях, квазипланарных фильтров были использованы в Государственном научном учреждении «Научно-исследовательский институт «Специализированные вычислительные устройства защиты и автоматика» Минобрнауки России. Внедрение результатов подтверждено соответствующими документами.

Достоверность и обоснованность результатов работы определяется применением строгих электродинамических методов, и контролировалась в ходе многоступенчатого тестирования, которое включало проверку внутренней сходимости решения, сравнение с имеющимися экспериментальными данными, сравнение с результатами, полученными другими электродинамическими методами, а также с известными из литературы экспериментальными и теоретическими результатами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Электродинамический метод решения трехмерных задач анализа решеток прямоугольных волноводов с конечными многослойными диэлектрическими покрытиями, не выступающими над идеально проводящим экраном. Численно-аналитический метод решения трехмерных задач анализа широкого класса многоэлементных волноводно-щелевых антенных решеток.

Решение основано на методе тензорных функций Грина и методе Галлеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Чебышева и Гегенбауэра, учитывающих асимптотику поля на краях апертур, что обеспечивает быструю сходимость методов. Эффективность численно-аналитического решения повышена в результате улучшения сходимости двойных рядов и интегралов в итоговой системе линейных алгебраических уравнений.

2. Комбинированный электродинамический метод анализа волноводных фильтров на секциях многогребневых волноводов (вафельных фильтров) и модифицированных конструкций квазипланарных волноводных фильтров на гребневых секциях. Эффективный анализ данного класса трехмерных волноводных структур строится на основе метода Галеркина с учетом краевой особенности поля, метода модового шивания и метода обобщенных матриц рассеяния. Решение основано на декомпозиции исходной структуры и включает расчет спектра собственных волн многогребневого волновода, расчет базовых неоднородностей и рекомпозицию многомодовых матриц рассеяния.

3. Численно-аналитические методы электродинамического анализа волноводных фильтров квазипланарного типа, многощелевых направленных ответвителей, многоэлементных устройств на E- и H-плоскостных неоднородностях. Эффективные решения дифракционных задач строятся на основе метода Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра, учитывающих краевую особенность поля, и процедуре аналитической регуляризации матричного оператора итоговой системы линейных алгебраических уравнений.

Эффективный комбинированный метод анализа многоканальных волноводных делителей мощности, основанный на методе Галеркина с учетом краевой особенности поля и методе обобщенных матриц рассеяния.

4. Способ формирования многолепестковой диаграммы направленности с независимым управлением положением, уровнем и фазой лучей для антенных решеток произвольной геометрии.

Предложенный способ реализован для кольцевой решетки продольных щелей на круговом идеально проводящем цилиндре в виде решения обратной электродинамической задачи, объединяющей матричный метод синтеза и граничную задачу, при решении которой применён базис, учитывающий особенность поля на рёбрах щелей.

5. Совокупность новых физических результатов, полученных при исследовании характеристик согласования и направленности волноводных антенных решеток с конечными многослойными диэлектрическими покрытиями, волноводно-щелевых антенных решеток и решеток щелей на круговом цилиндре.

6. Совокупность новых физических результатов, полученных при анализе характеристик рассеяния и спектров собственных волн структур на многогребневых волноводных секциях (вафельных фильтров), квазипланарных фильтров, многоэлементных структур на E- и H-плоскостных неоднородностях. Результаты оптимизации фильтров нижних частот вафельного типа; волноводных фильтров квазипланарного типа; направленных ответвителей и

многоканальных делителей мощности; 90-градусных диафрагменных поляризаторов на квадратных волноводах.

Личный вклад автора. Автору принадлежит постановка всех рассмотренных задач, разработка электродинамических методов их решения, алгоритмов и программ, проведение численных исследований и интерпретация полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах:

35th European Microwave Conference (EuMC'05), (2005, Paris, France); Mediterranean Microwave Symposium (MMS'06), (2006, Genova, Italy); International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP'2005), (2005, Seoul, Korea); Asia Pacific Microwave Conference (APMC'03) (2003, Seoul, Korea); 25th European Space Agency Antenna Workshop on Satellite Antenna Technology, (2002, Noordwijk, the Netherlands); URSI Int. Symp. on Electromagnetic Theory (1995, St. Petersburg); 16th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2006), (2006, Sevastopol); 28th and 27th Moscow Intern. Conferences on Antenna Theory and Technology (1998, 1994, Moscow); Intern. Seminar on Modern Problems of Computational Electrodynamics (MPCE-04), (2004, St. Petersburg); 4th International Conf. on Antenna Theory and Technique (ICATT'03) (2003, Sevastopol); International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory (MMET'02) (2002, Kiev; 1996, Lviv); Trans Black Sea Region Symp. on Applied Electromagnetism (1996, Metsovo, Greece);

Всерос. науч.-техн. конф. «Информационно-телекоммуникационные технологии». (2004, Сочи); Международная научная конференция "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" (2007, 2005, 2003, Таганрог); 8 Всерос. школа-семинар. "Волновые явления в неоднор. средах" (2002, Красновидово, Моск. обл.); Межд. науч.-техн. конф. "Актуальн. пробл. электрон. приборостроения" (1996, Саратов); 2-я Междун. научн.-техн. конференция "Направления развития систем и средств связи" (1995, Воронеж); Межгос. научн.-техн. конф. "Радиотехнические системы и устройства мм диапазона" (1992, Москва); Межвуз. конф. "Интегральные волноводные и полосковые СВЧ элементы связи" (1987, Куйбышев); Научно-техн. семинар "Электродинамика и радиофизическое приборостроение" (1985, Днепропетровск); Научно-техн. семинар "Волноводные элементы антенно-фидерных устройств" (1985, Ереван); Всесоюзн. семинар. "Решение внутренних краевых задач электродинамики" (1984, Ростов-на-Дону).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 64 печатные работы, в т.ч. в российских журналах из перечня ВАК - 23 статьи, статья в международном журнале *Radio Science*, получен патент РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 8 разделов, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 463 страницы, 147 рисунков, 25 таблиц и список литературы из 371 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены ее цели и задачи, показана практическая значимость и научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения и выводы, выносимые на защиту, а также представлено краткое содержание работы.

В **первом разделе** диссертации изложен электродинамический метод анализа решеток прямоугольных волноводов с диэлектрическим покрытием конечных размеров в бесконечном идеально проводящем экране. Постановка задачи предполагает, что диэлектрическое покрытие имеет прямоугольную форму, состоит из P слоев и не выступает над экраном. Размещенная под слоем диэлектрика АР (рис.1) состоит из M волноводных излучателей, размеры и положение которых в общем случае могут задаваться независимо. В данной постановке модель включает в рассмотрение АР с любой сеткой расположения излучателей, неэквидистантные АР и АР с излучателями разных размеров (например, совмещенные двухчастотные), что представляет интерес для некоторых приложений.

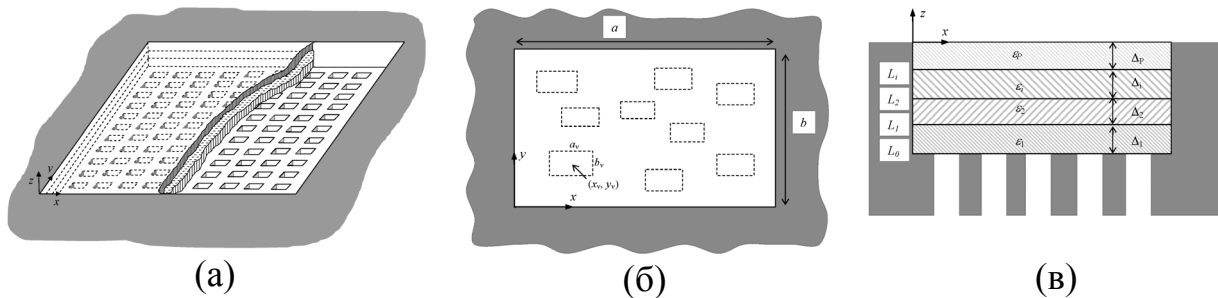


Рис. 1. Волноводная АР с многослойным диэлектрическим покрытием.

В случае однослойного покрытия исходная электродинамическая задача сводится на основе аппарата тензорных функций Грина к системе интегро-дифференциальных уравнений относительно магнитных токов на апертурах волноводов и диэлектрического покрытия. При этом используются модальные разложения для компонент тензорной функции Грина волноводов, и спектральные представления компонент для функции Грина внешнего полупространства. В области однослойного покрытия использовалось представление для функции Грина прямоугольного резонатора, полученное из функции Грина волновода при наложении соответствующих граничных условий типа электрической стенки на открытых поверхностях укрытия.

Для многослойных диэлектрических покрытий использован комбинированный подход к выводу интегро-дифференциальных уравнений, при котором в области конечного многослойного покрытия используются представления полей через электрический и магнитный векторные потенциалы в виде суперпозиции собственных волн. Из условий непрерывности полей на

границах диэлектрических слоев получены компактные рекуррентные соотношения для пересчета комплексных амплитуд волн. Полученные соотношения используются в итоговой системе интегро-дифференциальных уравнений.

Решение интегро-дифференциальных уравнений ищется методом Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Чебышева 1-го и 2-го рода и Гегенбауэра, учитывающих асимптотику поля на краях апертур волноводов и покрытия. Магнитные токи на апертуре покрытия имеют вид:

$$J_{M+1,x}^m(x,y) = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{k=0}^{N_y} u_{ik}^{M+1,x} \cdot X_i^{M+1,x}(x) \cdot Y_k^{M+1,x}(y), \quad J_{M+1,y}^m(x,y) = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{k=0}^{N_y} u_{ik}^{M+1,y} \cdot X_i^{M+1,y}(x) \cdot Y_k^{M+1,y}(y), \quad (1)$$

$$X_i^{M+1,x}(x) = \left(1 - \left(\frac{x-a/2}{a/2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} U_i\left(\frac{x-a/2}{a/2}\right), \quad X_i^{M+1,y}(x) = \left(1 - \left(\frac{x-a/2}{a/2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} T_i\left(\frac{x-a/2}{a/2}\right),$$

$$Y_k^{M+1,x}(y) = \left(1 - \left(\frac{y-b/2}{b/2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} T_k\left(\frac{y-b/2}{b/2}\right), \quad Y_k^{M+1,y}(y) = \left(1 - \left(\frac{y-b/2}{b/2}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} U_k\left(\frac{y-b/2}{b/2}\right),$$

где $T_i(x)$, $U_i(x)$ - полиномы Чебышева 1-го и 2-го рода соответственно, u_{ik} - неизвестные коэффициенты. На раскрывах волноводов:

$$J_{\nu,x}^m(x,y) = \sum_{i=0}^{N_x'} \sum_{k=0}^{N_y'} u_{ik}^{\nu,x} \cdot X_i^{\nu,x}(x) \cdot Y_k^{\nu,x}(y), \quad J_{\nu,y}^m(x,y) = \sum_{i=0}^{N_x'} \sum_{k=0}^{N_y'} u_{ik}^{\nu,y} \cdot X_i^{\nu,y}(x) \cdot Y_k^{\nu,y}(y), \quad (2)$$

$$X_i^{\nu,x}(x) = \left(1 - \left(\frac{2(x-x_\nu)}{a_\nu}\right)^2\right)^{\tau+1/2} C_i^{\tau+1}\left(\frac{2(x-x_\nu)}{a_\nu}\right), \quad X_i^{\nu,y}(x) = \left(1 - \left(\frac{2(x-x_\nu)}{a_\nu}\right)^2\right)^{\tau-1/2} C_i^\tau\left(\frac{2(x-x_\nu)}{a_\nu}\right),$$

$$Y_k^{\nu,x}(y) = \left(1 - \left(\frac{2(y-y_\nu)}{b_\nu}\right)^2\right)^{\tau-1/2} C_k^\tau\left(\frac{2(y-y_\nu)}{b_\nu}\right), \quad Y_k^{\nu,y}(y) = \left(1 - \left(\frac{2(y-y_\nu)}{b_\nu}\right)^2\right)^{\tau+1/2} C_k^{\tau+1}\left(\frac{2(y-y_\nu)}{b_\nu}\right),$$

$$\tau = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{1 + 2\varepsilon/\varepsilon_1} - \frac{1}{2}, \quad \nu = 1, 2, 3, \dots, M,$$

где $C_i^\tau(x)$ - полиномы Гегенбауэра.

Итоговая СЛАУ имеет порядок, пропорциональный числу излучателей и числу учитываемых базисных функций в разложениях магнитных токов (1), (2). Матричные элементы СЛАУ содержат двойные ряды и интегралы от произведения функций Бесселя. Поэтому важным моментом численной реализации метода является предложенный эффективный способ вычисления двойных интегралов по спектральным переменным вида

$$I_{i'k'ik}(\alpha, \beta) = \sigma_{i'k'ik} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{J_{i'}(\alpha x_1) J_i(\alpha x_1) J_{k'}(\beta x_2) J_k(\beta x_2)}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 - 1}} dx_1 dx_2, \quad \alpha = \frac{\pi a}{\lambda}, \quad \beta = \frac{\pi b}{\lambda}. \quad (3)$$

Метод основан на разбиении области интегрирования на четыре подобласти и использовании асимптотических представлений для функций Бесселя при больших значениях аргумента.

На основе приведенных данных анализа внутренней сходимости продемонстрирована быстрая сходимость решения. Показано, что при расчете

АР, электрические размеры покрытия у которых достигают 10λ , обычно достаточно учитывать полиномы до 14...17 порядка на апертуре покрытия (1) и полиномы до 2...4 порядка на апертурах излучателей (2).

Приведены результаты детального тестирования метода, включающие примеры сравнения с известными из литературы экспериментальными и теоретическими данными, а также сравнение с методом конечного интегрирования для малоэлементных АР [19]. Во всех случаях демонстрируется графическое совпадение результатов.

Исследовано влияние конструктивных параметров конечного диэлектрического покрытия на характеристики АР. Показано, что однослойное покрытие может приводить к ухудшению согласования при сканировании, что связано с возникновением в диэлектрике волны аналогичной поверхностной. Поэтому для улучшения согласования АР целесообразно использовать покрытия с двумя и более слоями, причем нижний слой должен иметь проницаемость, совпадающую с проницаемостью среды в волноводах или близкую к ней.

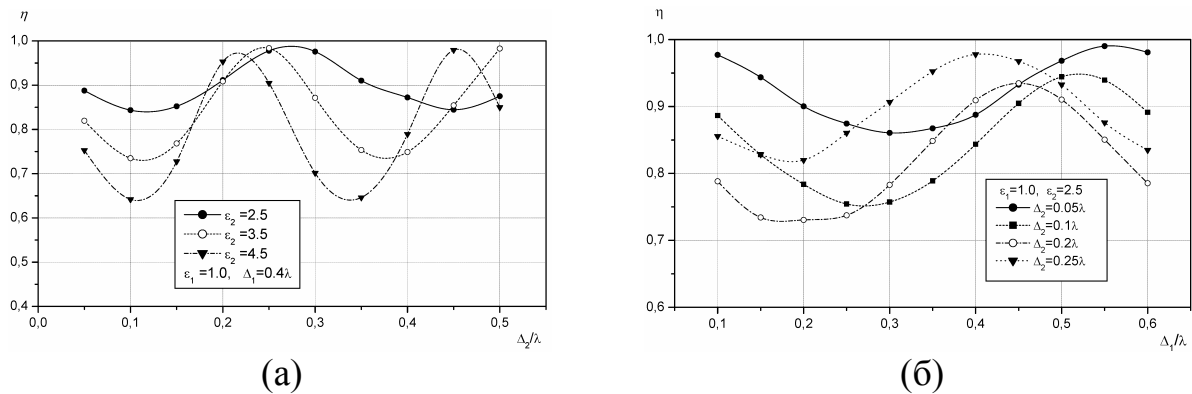


Рис. 2. КПД 64-элементной АР (8×8 излучателей) с двухслойным покрытием.

В результате исследования характеристик АР с двухслойными покрытиями показано, что зависимость КПД от толщины верхнего слоя диэлектрика при неотклоненном луче является периодической функцией с периодом, равным половине длины волны в диэлектрике (рис. 2,а). Установлено, что в качестве оценочных значений для достижения высоких значений КПД могут использоваться следующие параметры двухслойного покрытия: толщина нижнего (воздушного) слоя близка к $\Delta_1 \sim 0.5\lambda$, толщина верхнего слоя равна примерно $\Delta_2 \sim 0.1\lambda$, а его диэлектрическая проницаемость $\epsilon_2 \sim 2.5$ (рис.2).

Приведены результаты расчета КПД, КНД и диаграммы направленности (ДН) 100-элементной АР (10×10 излучателей) с двухслойным покрытием и 240-элементной АР (12×20 излучателей) с трехслойным покрытием. Параметры покрытий этих АР были выбраны с учетом сделанных приближенных оценок. Продемонстрированы высокие электрические характеристики АР при сканировании в широком секторе.

Во **втором разделе** разработан эффективный численно-аналитический метод электродинамического анализа широкого класса волноводно-щелевых АР.

В подробном обзоре литературы рассмотрены новые технические приложения волноводно-щелевых антенных решеток и применяемые методы их расчета. Показана актуальность разработки эффективных алгоритмов расчета многоэлементных волноводно-щелевых АР с плоским раскрывом.

При расчете плоских АР (рис. 3,а) ключевой в методическом отношении является задача анализа линейной волноводно-щелевой АР (рис. 3,б), на примере которой изложен рассматриваемый метод. При постановке задачи предполагается, что щелевые излучатели расположены в верхней стенке волновода, образованной бесконечным идеально проводящим экраном конечной толщины. Размеры и положение каждого излучателя задаются вообще говоря произвольно, что позволяет включить в рассмотрение АР продольных либо поперечных щелей, в т.ч. с неэквилидистантным расположением.

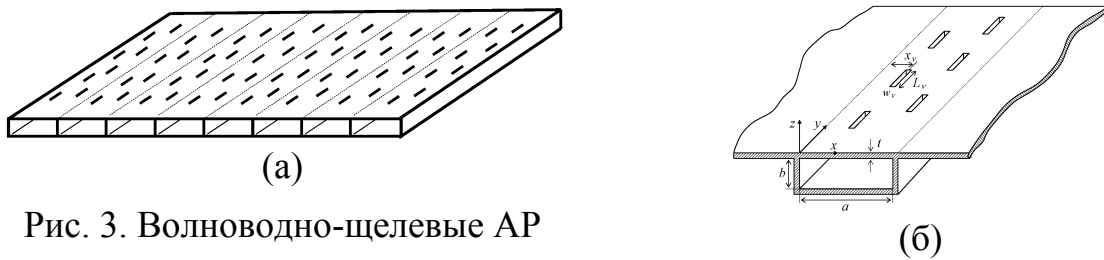


Рис. 3. Волноводно-щелевые АР

Для вывода интегро-дифференциальных уравнений был использован подход, основанный на представлении полей через электрический и магнитный векторные потенциалы, нормальные к раскрыву АР. Во внешней области потенциалы записаны в виде двойного интеграла Фурье, в питающем волноводе – в виде интеграла Фурье по продольной координате и ряда Фурье по поперечной координате, а в области щелей – в виде суперпозиции собственных волн. Используя условия непрерывности на аперттурах щелей, задача была сведена к системе интегро-дифференциальных уравнений относительно магнитных токов на внешних и внутренних аперттурах излучателей.

Решение полученной системы интегро-дифференциальных уравнений ищется методом Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Чебышева 1-го и 2-го рода, учитывающих особенность поля на ребрах щелей. Магнитные токи на внешних (+) и внутренних (-) аперттурах щелей ищутся в виде

$$J_{v,x}^{\pm}(x, y) = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{k=0}^{N_y} u_{ik}^{\pm, vx} \bar{U}_i \left(\frac{2(x - x_v)}{w_v} \right) \bar{T}_k \left(\frac{2(y - y_v)}{L_v} \right), \quad (4)$$

$$J_{v,y}^{\pm}(x, y) = \sum_{i=0}^{N_x} \sum_{k=0}^{N_y} u_{ik}^{\pm, vy} \bar{T}_i \left(\frac{2(x - x_v)}{w_v} \right) \bar{U}_k \left(\frac{2(y - y_v)}{L_v} \right), \quad \nu = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

где $\bar{T}_i(x) = (1-x^2)^{-1/2} T_i(x)$, $\bar{U}_i(x) = (1-x^2)^{1/2} U_i(x)/(i+1)$ - взвешенные полиномы Чебышева 1-го и 2-го рода, $u_{ik}^{\pm, vx}$, $u_{ik}^{\pm, vy}$ - неизвестные коэффициенты, x_v , y_v - координаты центра v -й щели.

Другим ключевым моментом, обеспечивающим высокую эффективность метода, является вычисление матричных элементов итоговой СЛАУ.

Способы вычисления интегралов от произведения базисных функций и компонент тензорных функций Грина определяются положением точек источника и наблюдения. Если точки источника и наблюдения находятся на разных щелях, то спектральное представление для функции Грина внешней области сворачивается с помощью интегральных преобразований, а спектральное представление для функции Грина волновода сворачивается с помощью теории вычетов. Далее применяются квадратурные формулы наивысшей точности. Если точки источника и наблюдения находятся на одной щели, используются спектральные представления для функций Грина. Возникающие при этом двойные ряды и интегралы по спектральному параметру аналогично (3) вычисляются с учетом асимптотических представлений для функций Бесселя при больших значениях аргумента. Спектральные интегралы в области питающего волновода вычисляются по квадратурной формуле из [20].

Анализ внутренней сходимости данного численно-аналитического решения подтверждает его высокую эффективность. Например, при расчете решеток продольных полуволновых щелей достаточно учитывать всего 1...2 полинома в поперечном к щели направлении и 4...5 полиномов – в продольном направлении в (4), (5), что соответствует погрешности менее 1%. Сравнение с известными из литературы экспериментальными и теоретическими данными показало хорошее совпадение с предложенной теорией.

Приведены результаты исследования характеристик отдельных излучателей и решеток продольных щелей нерезонансного типа. На примере 120-элементной линейной решетки с переменнo-фазной связью, соответствующей основным спецификациям АР, применяемых в составе корабельного радионавигационного комплекса (диапазон 9380...9460 ГГц), исследованы закономерности формирования частотных зависимостей КПД и КСВ, а также характеристик направленности АР (рис. 4).

Характеристики АР на рис. 4 в рабочем диапазоне: КПД=95%, КСВ<1.05, ширина луча 0.6°, отклонение луча от нормали к решетке ~3.4°, ориентация луча на крайних частотах диапазона отличается на 0.6°. Для снижения уровня боковых лепестков необходимо использовать ту или иную процедуру синтеза амплитудного распределения. Подтверждено возникновение эффекта резонансного возрастания КСВ на частоте, при которой период

расположения излучателей равен половине длины волны в волноводе (рис.4,а). На основе строгого расчета получена оценка точности ($\sim 0.1^\circ$) определения углового положения луча АР с помощью известных аналитических соотношений [2]. Время счета одной частотной точки для 120-элементной АР составляет около 1 минуты на Pentium-4/2.4 ГГц при погрешности около 1%.

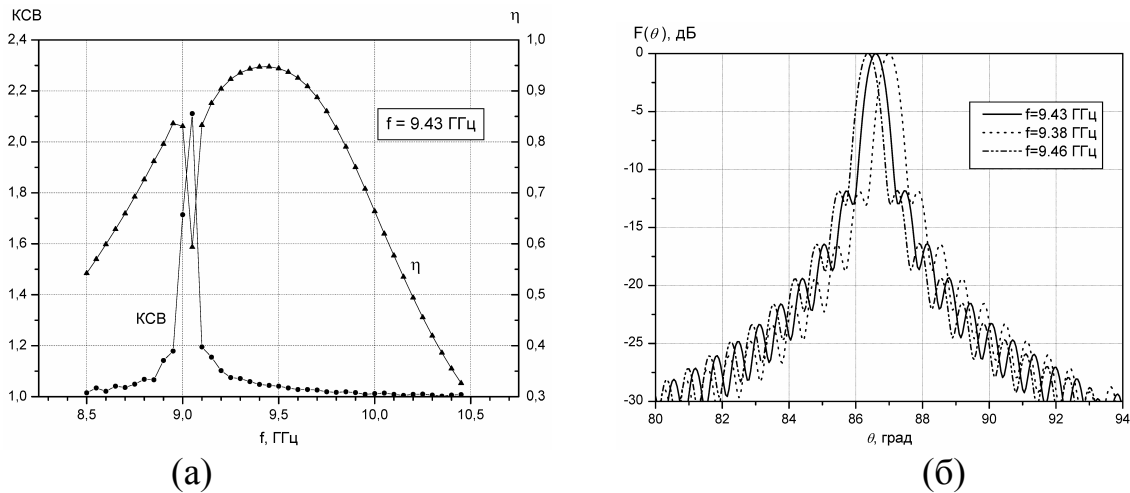


Рис. 4. КСВ, КПД и ДН линейной 120-элементной АР (рис. 3,б). (Размеры в мм: волновод 23×10 , $t=1$, $w=1.5$; $L=15.23$; $x_{2i-1}=10.4$, $x_{2i}=12.6$, $i=1, 2, \dots, 60$; период решетки $d=23.95$).

В третьем разделе рассмотрена задача расчета критических частот и полей волноводов сложных сечений с произвольным количеством гребней (рис.5). Постановка данной задачи связана с решением задачи электродинамического анализа волноводных компонентов, содержащих секции волноводов сложных сечений (в частности, фильтров вафельного типа). Решение задачи на собственные значения для многогребневого волновода входит в комбинированный метод анализа волноводных фильтров вафельного типа и других устройств на волноводах сложных сечений.

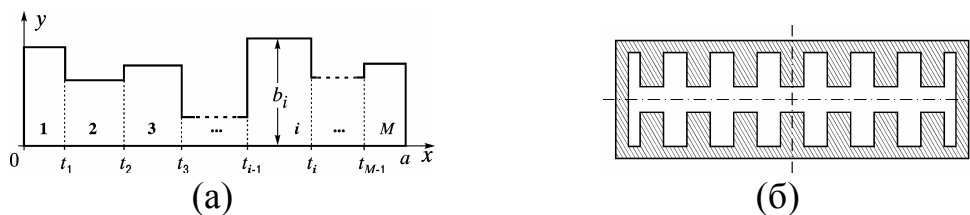


Рис. 5. Поперечные сечения многогребневых волноводов

Одним из наиболее эффективных методов решения данного класса задач является метод Галеркина с учетом краевой особенности поля, который в данном разделе обобщен и реализован применительно к расчету волноводов с произвольным количеством гребней в поперечном сечении и различным типом симметрии (граничные условия типа e , m -стенки при $x=0$, $y=0$, рис.5,а).

Исходная краевая задача для однородного уравнения Гельмгольца формулируется для собственных Н- и Е-волн многогребневого волновода и сводится к системе связанных интегральных уравнений первого рода относительно тангенциальных компонент электрического поля на границах регулярных областей в поперечном сечении структуры (рис. 5,а). При решении системы методом Галеркина используется базис в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра или Чебышева, учитывающих особенность поля на ребрах гребней.

В результате задача вычисления критических частот и полей Н- и Е-волн многогребневого волновода сводится к решению однородных СЛАУ. Необходимым условием существования нетривиальных решений однородной системы линейных алгебраических уравнений является условие равенства нулю ее определителя. Решая численно трансцендентное уравнение, находим спектр собственных значений волновых чисел для Н- и Е-волн. После отыскания заданного количества корней этого уравнения для каждого типа волн, уже при известных критических волновых числах находятся коэффициенты в представлениях полей в поперечном сечении волновода.

Проведенный анализ внутренней сходимости метода показал, что при расчете спектров, содержащих до 100 и более волн, достаточно учитывать 3...4 базисных функции. При этом в значениях критических частот стабилизируется четыре значащих цифры, что соответствует погрешности порядка сотых долей процента. Таким образом, необходимая точность обеспечивается при решении СЛАУ малых порядков, что существенно при решении дифракционных задач для структур, содержащих секции многогребневых волноводов, т.к. в этом случае необходимо учитывать несколько десятков типов волн.

Приведены результаты расчета спектров критических частот пяти- и десятигребневых волноводов, применяемых в составе волноводных фильтров вафельного типа. Показано, что критические волновые числа первых трех типов волн монотонно растут при увеличении зазора между верхними и нижними гребнями (рис. 6). При этом с ростом b_1/b происходит некоторое расширение полосы одномодового режима пятигребневого волновода.

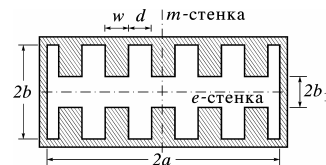
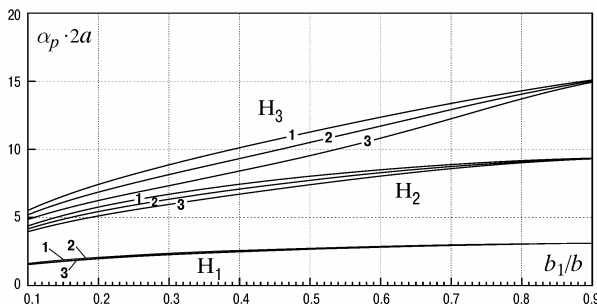


Рис. 6. Критические волновые числа α_p низших типов волн пятигребневого волновода (1 — $b/a=0.2$; 2 — $b/a=0.3$; 3 — $b/a=0.4$; $2a=61$ мм, $w=d=6.1$ мм).

Критические частоты первых трех типов волн относительно мало зависят от количества гребней в поперечном сечении волновода и от ширины гребней для исследованных структур, содержащих 5 или 10 гребней (различие около 1...10%). В то же время, спектр высших типов волн более существенно зависит от количества гребней в поперечном сечении волновода и размеров гребней. В частности, на рис. 7 критические частоты всех рассмотренных волн E -типа у десятигребневого волновода выше, чем критические частоты соответствующих волн пятигребневого волновода с аналогичными размерами.

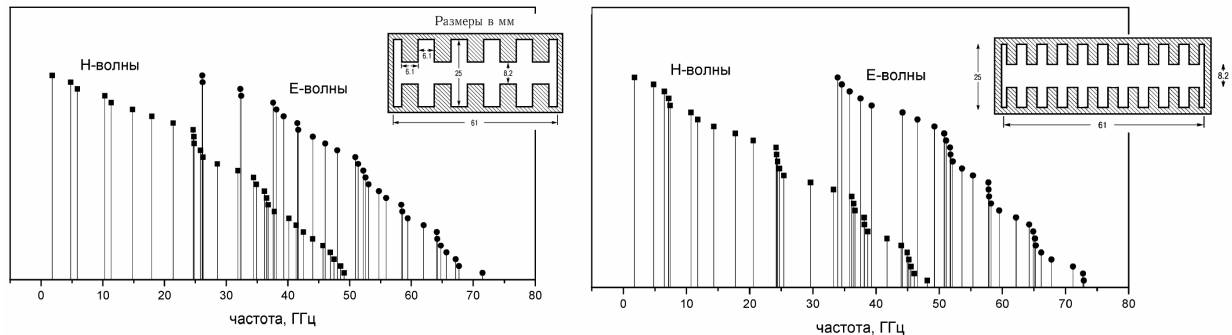


Рис. 7. Спектры 5- и 10-гребневого волноводов в составе вафельных фильтров ($x = 0$ - m -стенка; $y = 0$ - e -стенка).

Четвертый раздел посвящен разработке комбинированного метода электродинамического анализа широкого класса волноводных компонентов на многогребневых секциях, включая фильтры вафельного типа (рис. 8,а), фильтры квазипланарного типа на гребневых секциях (рис. 8,б), а также модифицированные конструкции квазипланарных фильтров на гребневых секциях и продольных индуктивных полосках (рис. 8,в) [21].

При постановке задачи предполагается, что рассматриваемая структура содержит произвольное число многогребневых секций, а также имеет входной и выходной согласующие ступенчатые переходы с произвольным числом звеньев. Решение задачи анализа включает декомпозицию исходной структуры на базовые блоки (неоднородности); расчет критических частот и полей многогребневых волноводных секций; вычисление многомодовых матриц рассеяния базовых блоков; вычисление матрицы рассеяния фильтра путем рекомпозиции многомодовых матриц рассеяния отдельных блоков.

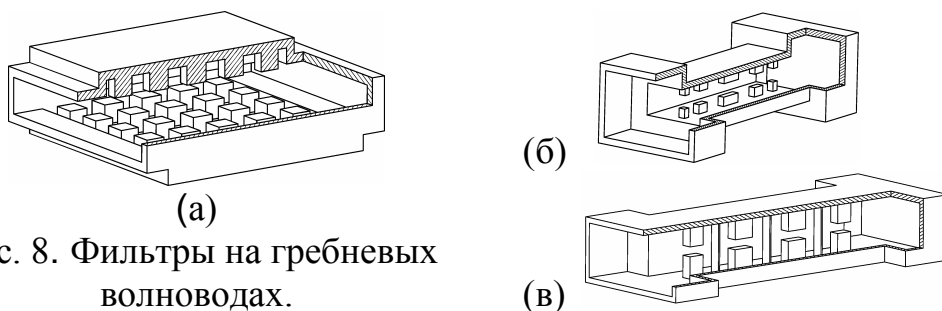


Рис. 8. Фильтры на гребневых волноводах.

В результате декомпозиции для рассматриваемого класса фильтров выделяется три базовых блока: сочленение прямоугольного и многогребневого волноводов, сочленение прямоугольных волноводов, разветвление прямоугольного волновода. Решение задачи на собственные значения для многогребневых секций изложено в разделе 3 диссертации. Ключевые задачи рассеяния для всех неоднородностей решены методом модового сшивания и методом Галеркина. При этом поля в волноводах представлялись в виде разложений по падающим и отраженным Н- и Е-волнам.

При расчете сочленения прямоугольного и многогребневого волноводов наиболее эффективен метод модового сшивания, т.к. в этом случае порядок решаемых систем уравнений не зависит от количества гребней в поперечном сечении многогребневого волновода. Собственные функции многогребневого волновода записываются в соответствии с методом поперечного резонанса в виде разложений поля в регулярных областях поперечного сечения. Эти разложения аналогичны разложениям полей в задаче на собственные значения и содержат найденные ранее критические частоты и амплитуды полей. Далее в результате сшивания полей на стыке волноводов и применения стандартных процедур получаем выражения для многомодовой матрицы рассеяния неоднородности.

Эффективное решение дифракционных задач для сочленения прямоугольных волноводов и волноводного разветвления получено методом Галеркина с учетом краевой особенности поля. Решение обеих задач сводится к решению системы интегро-дифференциальных уравнений относительно тангенциальных компонент электрического поля на апертуре неоднородности. В качестве базисных функций используются взвешенные полиномы Гегенбауэра, что обеспечивает быструю сходимость решения.

Итоговая матрица рассеяния фильтра находится с помощью эффективных рекомпозиционных процедур, учитывающих симметрию структуры. Высокая точность и эффективность предложенного решения подтверждена сравнением с имеющимися теоретическими и экспериментальными результатами для вафельных фильтров и фильтров на гребневых секциях.

На основе строгого анализа частотных характеристик волноводных структур вафельного типа исследованы основные закономерности их формирования и сделаны приближенные оценки по выбору начальных геометрических размеров для оптимизации фильтров нижних частот вафельного типа.

На рис. 9 приведены характеристики изготовленного макета вафельного фильтра. Максимальное расчетное значение КСВ в полосе пропускания составляет 1.19, экспериментальное – 1.22, экспериментальный уровень заглушения в полосе запираания выше 34 дБ, что соответствует расчетным

данным. Разброс экспериментальных значений КСВ объясняется наличием технологических допусков при изготовлении фильтра.

Разработанный эффективный алгоритм анализа является ядром процедуры многопараметрической оптимизации данного класса фильтров. На основе созданного алгоритма оптимизирован ряд конструкций ФНЧ вафельного типа для двух- и трехдиапазонных фидерных трактов наземных станций спутниковой связи, работающих в диапазонах S, C, X, Ku. Одна из конструкций приведена на рис. 10. Заштрихованные прямоугольники показывают полосы запираания, незаштрихованный – полосу пропускания. Все синтезированные конструкции ФНЧ характеризуются высоким уровнем согласования в полосе пропускания и низкими вносимыми потерями. Достигнутый уровень загораждения в полосах запираания во всех случаях существенно выше 30 дБ. Высокие электрические параметры фильтров достигнуты при минимальных габаритах и максимальной простоте конструкций.

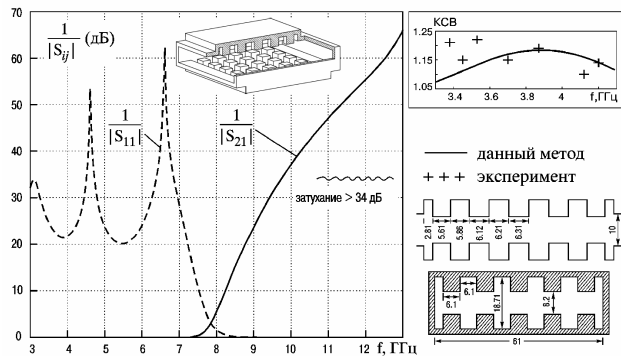


Рис. 9. Вафельный фильтр на волноводе 61×10 мм.

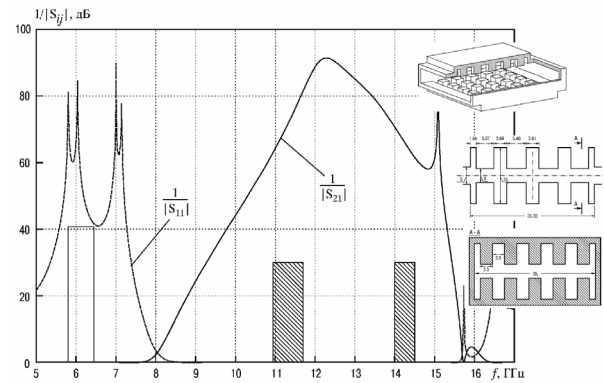


Рис. 10. Вафельный фильтр на волноводе 35×5 мм.

В пятом разделе диссертации разработаны методы электродинамического анализа полосно-пропускающих волноводных фильтров и диплексеров квазипланарного типа, широко применяемых в различных системах связи сантиметрового и миллиметрового диапазонов (рис. 11), а также исследованы квазипланарные конструкции на гребневых секциях (рис. 8, б, в).

Рассматриваются квазипланарные фильтры без несущей диэлектрической подложки, у которых резонансные элементы (диафрагмы, гребневые резонаторы) выполнены на тонкой металлической вставке из фольги, помещаемой в E-плоскости прямоугольного волновода. Данный класс устройств характеризуется меньшим уровнем вносимых потерь, что играет существенную роль, особенно, в миллиметровом диапазоне волн.

В сделанном обзоре литературы рассмотрены достоинства и недостатки известных конструкций квазипланарных волноводных фильтров, а также некоторые новые модифицированные конструкции с улучшенными характе-

ристиками. Показана актуальность разработки эффективных строгих методов расчета данного класса квазипланарных фильтров.

Предложены эффективные методы анализа фильтров на продольных Е-плоскостных диафрагмах и многоэлементных продольных или поперечных диафрагмах.

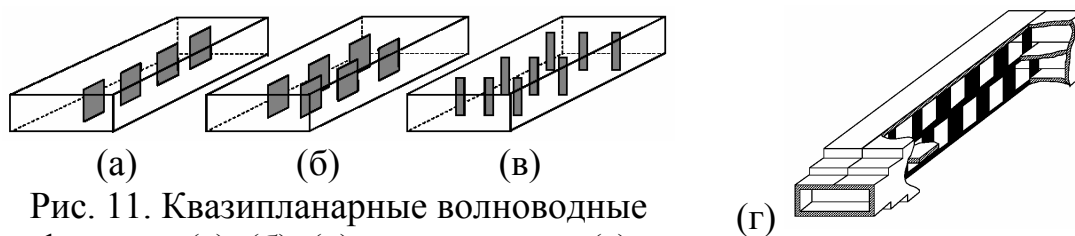


Рис. 11. Квазипланарные волноводные фильтры (а), (б), (в) и диплексеры (г).

Эффективное численно-аналитическое решение для фильтров на продольных Е-плоскостных диафрагмах (рис. 11,а) построено на основе метода Галеркина с учетом краевой особенности поля. При решении дифракционной задачи рассматриваемая структура разделяется в продольном направлении на регулярные области, в которых поля записываются в виде суперпозиции падающих и отраженных волн. Затем задача сводится к системе связанных интегральных уравнений первого рода относительно тангенциальных компонент электрического поля на границах областей. Применяя метод Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра или Чебышева, приходим к итоговой СЛАУ первого рода.

Наряду с выбором базиса, другим ключевым моментом решения является процедура аналитической регуляризации СЛАУ. Матричный оператор разделяется на статическую (сингулярную) и вполне непрерывную часть. Статическая часть соответствует логарифмической особенности ядер интегральных уравнений. Ряды функций Бесселя, входящие в статическую часть, сворачиваются с помощью интегральных преобразований и теории вычетов. Оставшиеся ряды, входящие в матричные элементы СЛАУ, являются быстро сходящимися и вычисляются непосредственно.

Задача анализа фильтров на многоэлементных диафрагмах (рис. 11,б,в) и диплексеров с каналными фильтрами на Е-плоскостных диафрагмах (рис. 11,г) решается на основе декомпозиционного подхода. Матрицы рассеяния базовых неоднородностей рассчитываются методом Галеркина по схеме, изложенной выше. Затем в результате рекомпозиции находится матрица рассеяния всего устройства.

Эффективность рассмотренных методик подтверждена анализом сходимости. При реализации метода Галеркина в рассмотренных задачах достаточно учитывать 3 базисных функции, что соответствует погрешности порядка десятых долей процента. Приведено сравнение с известными экспери-

ментальными данными для фильтров и диплексеров, подтверждающее высокую точность результатов (рис. 12).

Показано хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов для изготовленного пятирезонаторного фильтра на Е-плоскостных диафрагмах с однопроцентной полосой пропускания в К диапазоне (рис. 13). Оптимизированы конструкции диплексеров для стандартных связных диапазонов миллиметровых волн.

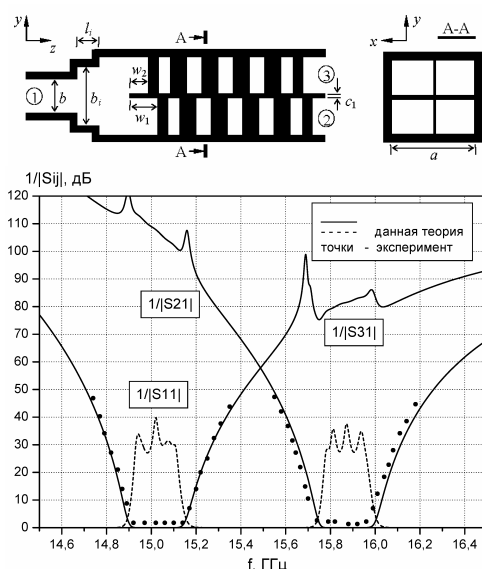


Рис. 12. Характеристики диплексера (точки - эксперимент [22]).

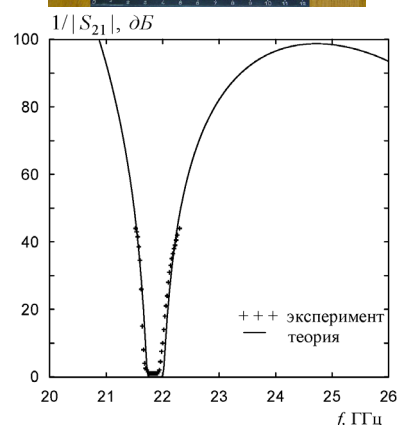
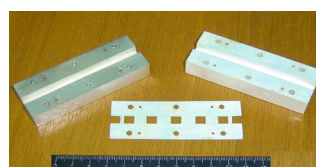
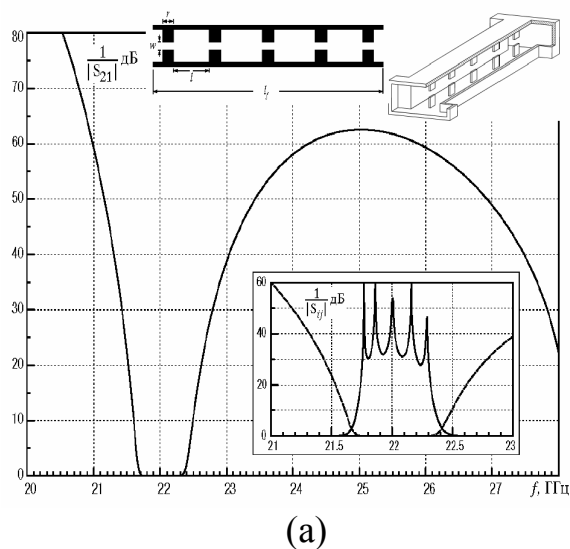
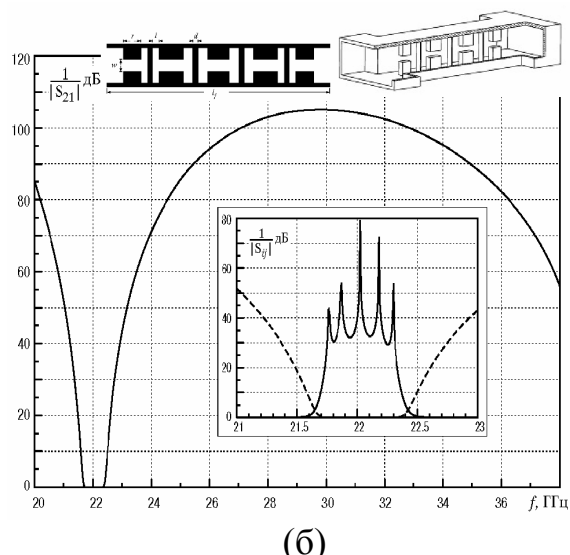


Рис. 13. Характеристики изготовленного фильтра К диапазона.



(а)



(б)

Рис. 14. Характеристики 5-резонаторных фильтров.

На основе комбинированной методики расчета, предложенной в разделе 4, исследованы модифицированные конструкции квазипланарных фильтров на гребневых секциях и индуктивных полосках (рис. 14,б). Изучены закономерности формирования частотных характеристик, позволяющие оценить потенциал этих конструкций. Проведенный анализ подтверждает воз-

возможность существенного расширения верхней полосы заграждения фильтров, повышения их частотной избирательности, сокращения продольных размеров. Приведены результаты оптимизации ряда модифицированных четырех- и пятирезонаторных полосно-пропускающих фильтров К и Ка диапазонов. На рис. 14 приведено сравнение характеристик двух конструкций 5-резонаторных фильтров на гребневых секциях. Верхняя полоса заграждения фильтра с индуктивными полосками (рис. 14,б) увеличивается до 38 ГГц (по уровню 50 дБ) против 27 ГГц у фильтра на рис. 14,а. При этом продольный размер фильтра на рис. 14,б сократился до 35 мм, в сравнении с 57 мм у фильтра на рис. 14,а.

Шестой раздел диссертации посвящен анализу многощелевых волноводных направленных ответвителей и многоэлементных волноводных устройств на Е- и Н-плоскостных неоднородностях.

Рассматриваемый класс направленных ответвителей включает структуры с многощелевой областью связи по широкой либо по узкой стенке, а также структуры с областью связи в виде системы четвертьволновых шлейфов в общей широкой стенке волноводов. Многошлейфные ответвители нашли применение в составе диаграммообразующих устройств (ДОУ) антенн с контурной ДН. Ответвители с щелевой областью связи представляют собой перспективную конструкцию для миллиметрового диапазона, поскольку область связи может быть реализована на тонкой металлической фольге с применением прецизионной планарной технологии.

К числу волноводных компонентов на Е- и Н-плоскостных ступенчатых неоднородностях относятся различные типы полосно-пропускающих, режекторных, фильтров нижних частот, фиксированных фазосдвигателей, согласующих элементов, поляризаторов. В настоящее время из-за возросшего уровня требований разработка подобных устройств СВЧ и КВЧ диапазонов в качестве обязательного этапа включает их электродинамическое моделирование.

Высокоэффективные численно-аналитические решения задач анализа для рассматриваемых классов устройств построены в рамках единого подхода. Постановка дифракционной задачи для направленных ответвителей предполагает, что структура содержит произвольное количество прямоугольных щелей на всю ширину общей широкой либо узкой стенки волноводов, причем толщина общей стенки между разными щелями может варьироваться, что позволяет улучшить согласование при расчете многошлейфных ответвителей. При анализе каскадного соединения Е- или Н-плоскостных ступенчатых неоднородностей учитывается тип симметрии в продольной плоскости путем задания граничного условия типа электрической или магнитной стенки.

Анализируемые структуры разделяются в продольном направлении на регулярные области, поля в которых записываются в виде суперпозиции собственных падающих и отраженных волн. Далее задача сводится к системе связанных интегральных уравнений относительно тангенциальных компонент электрического поля на границах областей. Решение полученных систем интегральных уравнений с логарифмической особенностью ядра ищется методом Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра.

Итоговая СЛАУ преобразуется путем выделения статической части матричного оператора, соответствующей логарифмической особенности ядер интегральных уравнений. Ряды функций Бесселя, входящие в статическую часть матричного оператора вычисляются аналитически. Предложенная процедура улучшения сходимости рядов сокращает время счета в 2-3 раза. При проведении практических расчетов для достижения точности порядка десятых долей процента достаточно учитывать 3...4 базисных функции.

Приведено сравнение с экспериментальными и расчетными характеристиками для многощелевых ответвителей со связью по широкой и узкой стенке, демонстрирующее совпадение с предложенной теорией.

Разработана и изготовлена конструкция пятищелевого направленного ответвителя К диапазона с 20-децибелльной связью (рис.15,в) в составе волноводного устройства ввода контрольных сигналов (рис. 15,а,б). Устройство обеспечивает оперативное подключение генератора контрольных сигналов и генератора шума на вход приемного тракта. В одно из плеч направленного ответвителя вводятся контрольные сигналы, которые поступают в сторону антенны ослабленными на 40...60 дБ за счет направленности ответвителя. Выбор слабой 20-децибелльной связи первичного волноводного канала со вторичным позволяет реализовать малые вносимые потери во входной тракт радиоприемного устройства. Теоретическое значение вносимых потерь в рабочем диапазоне составляет в среднем 0.06 дБ, а экспериментальное лежит в пределах $0.06 \div 0.1$ дБ. Приведено сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик, демонстрирующее их хорошее совпадение.

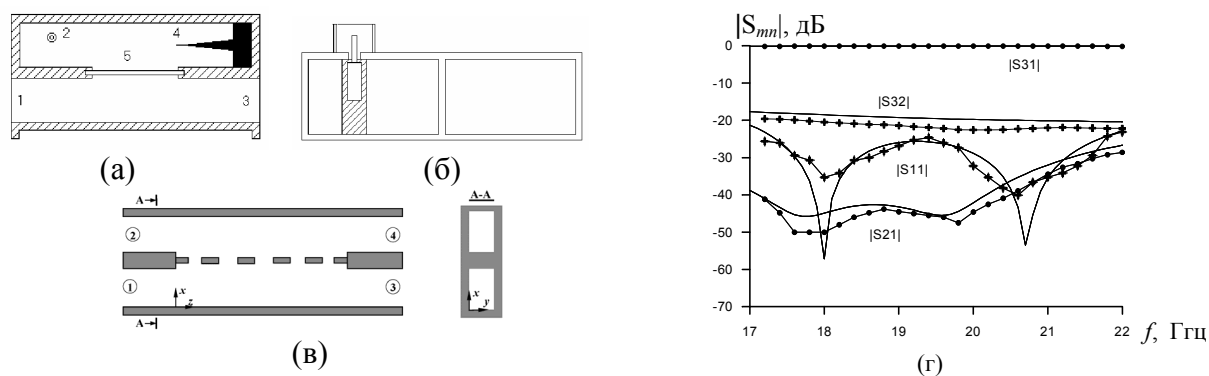


Рис. 15. Конструкция и характеристики устройства ввода контрольных сигналов (крестики и точки - эксперимент, сплошные линии – данная теория).

Исследованы 90-градусные диафрагменные полярзаторы на квадратных волноводах. Данный класс устройств применяется в бортовых и наземных станциях космической связи для преобразования линейно поляризованных волн в волны круговой поляризации и обратно. На основе анализа частотных характеристик базовых неоднородностей в составе поляризаторов сформулированы приближенные оценки, необходимые для выбора исходной геометрии поляризатора при оптимизации. Продемонстрировано совпадение предложенной теории с известными экспериментальными данными. Оптимизированы конструкции 90-градусных поляризаторов для работы в стандартных спутниковых диапазонах. Поляризатор на рис. 16 обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг с точностью 1.2° в выделенных диапазонах, при КСВ < 1.037 . При этом в расширенном диапазоне 11.5...14.8 ГГц (перекрытие $f_2 / f_1 = 1.29$) погрешность реализации дифференциального фазового сдвига не превышает 1.5° при КСВ < 1.045 .

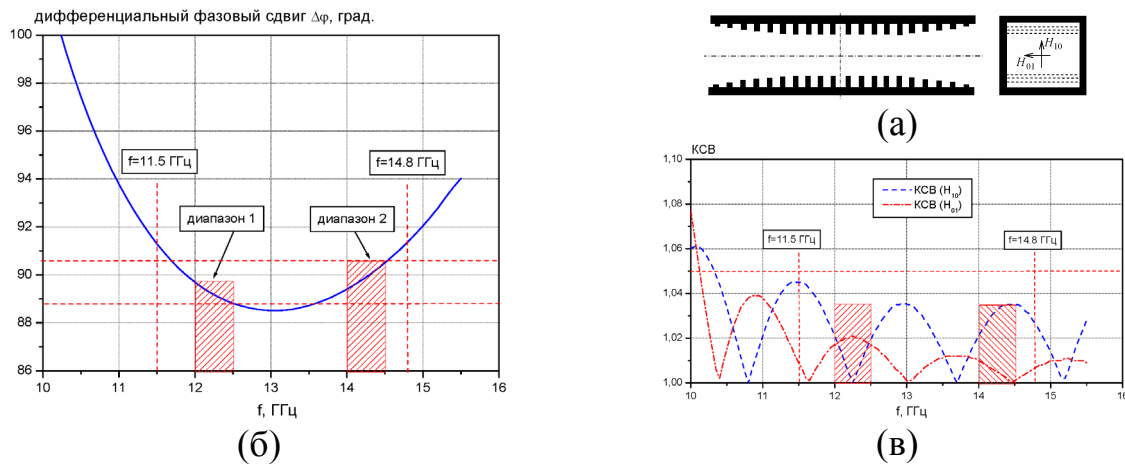


Рис. 16. Характеристики и конструкция 90° поляризатора на 20 диафрагмах.

В седьмом разделе диссертации изложена электродинамическая теория многоканальных волноводных делителей мощности (ДМ) на Е-плоскостных шлейфах. Рассматриваемые делители мощности, реализованные в виде N -канальных направленных ответвителей (рис. 17,а,б), применяются в диаграммообразующих устройствах антенн с контурной диаграммой направленности. Такие делители существенно компактнее традиционной многоуровневой схемы деления мощности в составе ДОУ, которая строится на основе двухканальных многошлейфных направленных ответвителей.

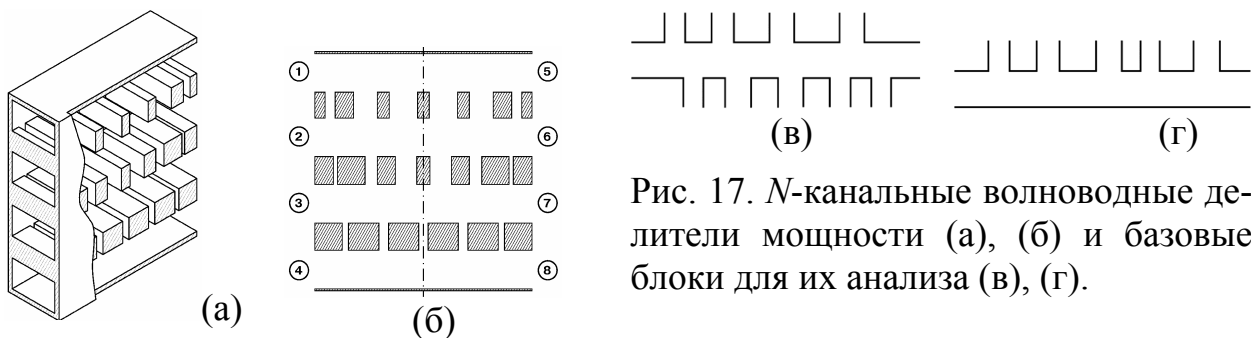


Рис. 17. N -канальные волноводные делители мощности (а), (б) и базовые блоки для их анализа (в), (г).

При постановке задачи предполагается, что рассматриваемая структура делителя содержит произвольное число одинаковых волноводных каналов, связанных между собой системой щелей (четвертьволновых шлейфов) в широких стенках прямоугольных волноводов. Количество щелей в каждой стенке, их продольные размеры, расстояния между ними, а также толщины общих стенок могут задаваться произвольно. При возбуждении структуры с заданного входа волной основного типа на ее выходах должно быть получено требуемое амплитудное распределение при минимальном уровне отраженных волн во всех каналах.

Высокоэффективный комбинированный метод анализа делителей основан на методе Галеркина с учетом краевой особенности поля и методе обобщенных матриц рассеяния. В результате декомпозиции выделяются два типа базовых блоков (рис. 17, в, г), для которых вычисляются многомодовые матрицы рассеяния: каскад двух- и односторонних Т-образных волноводных сочленений в Е-плоскости. Соответствующие ключевые задачи рассеяния решаются для этих блоков непосредственно, т.е. без разбиения на более простые элементы, что позволяет существенно сократить общее число решаемых дифракционных задач.

При решении дифракционных задач для базовых блоков поля во входном и выходном волноводах, а также в шлейфах связи представлялись в виде суперпозиции падающих и отраженных волн LE -типа, а в области питающего волновода между первым и последним шлейфом – в виде суперпозиции стоячих волн. Задача сводилась к системе связанных интегральных уравнений для тангенциальных компонент электрического поля на границах областей. Полученная система решалась методом Галеркина с взвешенными полиномами Гегенбауэра и Чебышева, учитывающими особенность поля на ребрах структуры.

После вычисления многомодовых матриц рассеяния всех блоков для вычисления итоговой матрицы рассеяния использовалась эффективная рекомпозиционная процедура, разработанная для данного класса многополюсных устройств. После перенумерации входов каждого из базовых блоков, процедура их объединения сводится к рекомпозиции матриц рассеяния каскадного соединения многополюсных блоков.

На основе исследования сходимости метода показано, что при проведении практических расчетов достаточно учитывать 3...4 базисных функции, что соответствует погрешности порядка сотых долей процента и времени счета одной частотной точки порядка сотых долей секунды на Pentium 4/2.4 ГГц. Высокая точность результатов подтверждена сравнением с известными экспериментальными данными.

Приведены результаты оптимизации четырех- и пятиканальных делителей Ку диапазона, обеспечивающих в рабочей полосе 10.95-12.75 ГГц (~15%) формирование заданного амплитудного распределения с погрешностью менее ± 0.5 дБ при высоком уровне согласования и изоляции входов ($-30... -35$ дБ). Высокие электрические характеристики достигаются в относительно простых конструкциях синтезированных делителей с областями связи, содержащими 5-6 шлейфов. Приведенные результаты демонстрируют высокий потенциал данного класса многоканальных волноводных делителей мощности с точки зрения реализации различных типов амплитудных распределений. Например, 4-канальный делитель на рис.18 при возбуждении входа 1 обеспечивает заданное амплитудное распределение с погрешностью около 0.5 дБ при коэффициенте отражения и изоляции -35 дБ.

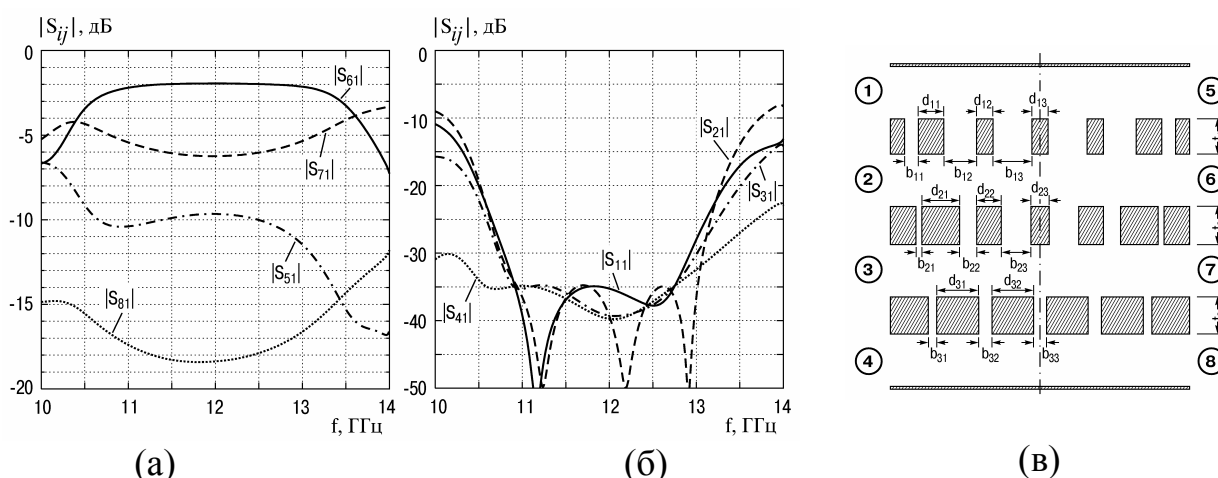


Рис. 18. Частотные характеристики (а),(б) и геометрия (в) четырехканального ДМ с несимметричным делением мощности для диапазона 10.95÷12.75 ГГц.

В восьмом разделе диссертации изложена методика электродинамического анализа и параметрического синтеза решеток продольных щелей на бесконечном идеально проводящем круговом цилиндре.

Предложен способ формирования комплексных многолучевых диаграмм направленности антенных решеток произвольной геометрии, который реализован в данном разделе для трехмерной модели решетки щелевых излучателей на круговом цилиндре. Предложенный способ обеспечивает возможность независимого управления положением, уровнем и фазой лучей, что представляет интерес для ряда приложений, например, при работе в условиях многолучевого распространения сигналов, принимаемых одной антенной.

Для реализации задач синтеза была разработана эффективная трехмерная электродинамическая модель решетки продольных щелей на цилиндре (рис. 19). При постановке задачи предполагалось, что излучатели являются раскрытыми прямоугольных волноводов, возбуждаемых волной основного типа. Положение излучателей может задаваться произвольно. В частности,

при рассмотрении цилиндрических АР полагаем, что решетка состоит из N колец, каждое из которых содержит M излучателей.

Поскольку для решаемых задач синтеза необходима быстрая и достаточно точная оценка характеристик АР, при анализе использовались некоторые упрощающие предположения. Задача анализа решалась в предположении узких щелей, что позволило ограничиться учетом только продольной компоненты магнитных токов на раскрывах щелей, а также пренебречь высшими затухающими типами волн в волноводах.

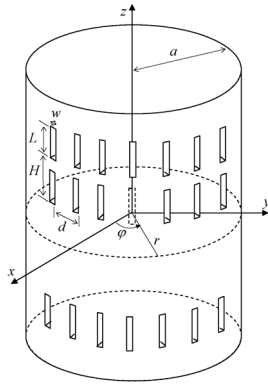
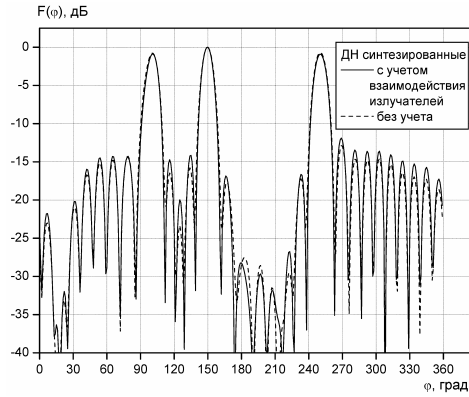
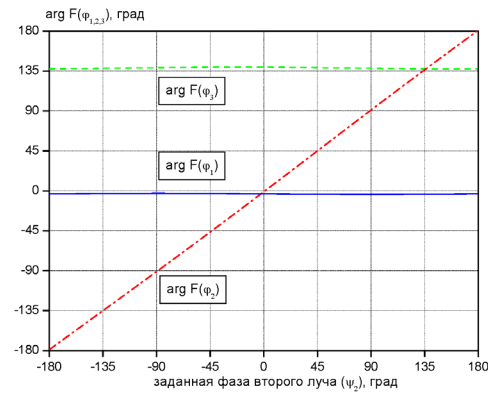


Рис. 19. АР продольных щелей на круговом цилиндре.



(а)



(б)

Рис. 20. Синтезированная амплитудная ДН (а) и фазовая ДН в направлениях лучей (б) для кольцевой АР.

($M = 32$, $d = 0.5\lambda$, $ka = 16$, $L = 0.6\lambda$, $w = 0.1\lambda$). 1-й луч ($\psi_1 = 0^\circ$), 2-й луч ($-180^\circ \leq \psi_2 \leq 180^\circ$), 3-й луч ($\psi_3 = 135^\circ$).

Исходная электродинамическая задача анализа была сведена к системе интегральных уравнений относительно магнитных токов на раскрывах щелей. При этом для функции Грина свободного пространства использовалось представление в виде бесконечного спектра цилиндрических волн, распространяющихся в радиальном направлении и модулированных по оси z . Полученная система решалась методом Галеркина с тригонометрическим базисом, учитывающим асимптотику поля на ребрах щелей. Магнитные токи на щелях ищутся в виде

$$J_{z\mu l}(\varphi, z) = u_{\mu l} \frac{\cos[\pi(z - z_l)/L]}{\sqrt{1 - [2a(\varphi - \varphi_\mu)/w]^2}}, \quad \mu = 1, 2, \dots, M, \quad l = 1, 2, \dots, N,$$

где $u_{\mu l}$ - неизвестные коэффициенты, φ_μ, z_l - координаты центра излучателя с номером μl . Итоговая СЛАУ имеет вид $\mathbf{DT} = 2\mathbf{A}$, где $A_{\mu l}$ - комплексные амплитуды возбуждающих волн, $T_{\mu l} = u_{\mu l} L/2 = A_{\mu l} + B_{\mu l}$ - комплексные амплитуды магнитных токов на раскрывах излучателей (с учетом взаимодействия). ДН решётки продольных щелей на бесконечном идеально проводящем цилиндре $F(\theta, \varphi) = \sum_{\mu=1}^M \sum_{l=1}^N T_{\mu l} f_{\mu l}(\theta, \varphi) = \mathbf{T}^T \mathbf{f}$, где $f_{\mu l}(\theta, \varphi)$ ДН щели на цилиндре.

Точность данной методики анализа подтверждена сравнением с известными из литературы данными.

Рассмотрен способ формирования комплексных многолепестковых ДН применительно к кольцевой решётке продольных щелей на бесконечном идеально проводящем круговом цилиндре. Предложенный способ основан на применении матричного метода синтеза и обеспечивает возможность независимого управления фазовыми ДН отдельных лучей для синфазного приема сигналов при многолучевом распространении. Метод основан на поиске вектора токов в элементах решетки, максимизирующего функционал в виде нормированного квадрата модуля взвешенной суммы значений ДН в направлениях формируемых лепестков. Данный функционал представляет собой аналог КНД в случае многолучевой ДН.

Для формирования в диаграмме направленности $F(\theta, \varphi)$ в направлениях (θ_s, φ_s) , $s=1, 2, \dots, S$ лучей с относительной амплитудой W_s и фазой ψ_s будем искать вектор-столбец $\hat{\mathbf{T}}$ комплексных амплитуд токов в излучателях, максимизирующий следующий энергетический функционал, представляющий собой отношение эрмитовых форм $K(\mathbf{T}) = \frac{\mathbf{T}^* \mathbf{Q} \mathbf{T}}{\mathbf{T}^* \mathbf{G} \mathbf{T}}$. Здесь \mathbf{Q}, \mathbf{G} - эрмитовы

матрицы, а звездочка обозначает операцию эрмитова сопряжения матрицы и комплексного сопряжения скалярной величины. Элементы эрмитовых матриц определены выражениями: $Q_{\mu l, \mu' l'} = f_{S, \mu l}^* f_{S, \mu' l'}$, где

$f_{S, \mu l} = \sum_{s=1}^S W_s \cdot e^{-j\psi_s} \cdot f_{\mu l}(\theta_s, \varphi_s)$, $f_{\mu l}(\theta_s, \varphi_s)$ - значение ненормированной ДН элемента с номером μl в направлении (θ_s, φ_s) ,

$$G_{\mu l, \mu' l'} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f_{\mu l}^*(\theta, \varphi) f_{\mu' l'}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi.$$

Вектор токов, обеспечивающий максимум функционала $K(\mathbf{T})$, находится *аналитически*: $\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{G}^{-1} (\mathbf{f}_S^*)^T$.

Возможности предложенной методики продемонстрированы на примере кольцевой АР из 32 щелей с трехлепестковой ДН (рис. 20). На основе приведенных численных результатов показано, что при использовании предложенного метода синтеза изменение значения фазовой ДН в одном из лепестков практически не влияет на значения ДН в других лепестках. Фазы первого и третьего лепестков задавались фиксированными и равными $\psi_1 = 0^\circ$ и $\psi_3 = 135^\circ$ соответственно, в то время как фаза второго лепестка варьировалась в пределах $-180^\circ \leq \psi_2 \leq 180^\circ$ с шагом 1° (рис. 20,б). В регулируемом лепестке (втором) значение фазовой ДН практически линейно зависит от фазы весового множителя (максимальная погрешность не превышает 1.4°).

Максимальная погрешность реализации заданных значений фазы в первом и третьем лепестках не превышает 4° . Регулирование фаз лепестков не приводит к существенным изменениям амплитудной ДН.

На основе исследования различных методов управления решётками щелей на круговом цилиндре показано, что лучшие характеристики АР достигаются при фазировании по методу кольцевых гармоник и применении матричного метода синтеза. Причем матричный метод синтеза обладает большими возможностями: позволяет формировать несколько лучей с требуемыми уровнями, регулировать не только общий, но и локальный уровень боковых лепестков, в однолучевом режиме обеспечивает более высокий КНД. Однако для реализации каждого из этих методов необходимо управлять не только фазой, но и амплитудой тока в щелях.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **приложениях** приведены методики вычисления интегралов и рядов для разделов 4-7.

Основные результаты работы

1. В строгой электродинамической постановке решена трехмерная задача анализа решеток прямоугольных волноводов под конечным многослойным диэлектрическим покрытием, не выступающим над бесконечным идеально проводящим экраном. С помощью аппарата тензорных функций Грина исходная электродинамическая задача сведена к системе интегродифференциальных уравнений. Для решения полученной системы применен метод Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра и Чебышева, учитывающих особенность поля на краях апертур, что обеспечивает быструю сходимость метода.

2. Исследовано влияние конструктивных параметров конечных многослойных диэлектрических покрытий на характеристики согласования, направленности и диапазонные свойства АР. Показано, что при широкоугольном сканировании улучшить согласование и диапазонные свойства конечных АР можно, применяя покрытия с числом слоев два и более. При этом диэлектрическая проницаемость нижнего слоя должна совпадать с проницаемостью среды, заполняющей волноводы (или быть близкой к этой величине). Получены количественные оценки электрических размеров слоев двухслойных покрытий, обеспечивающих высокое согласование и улучшенные диапазонные свойства.

3. Предложен эффективный электродинамический метод анализа широкого класса многоэлементных волноводно-щелевых антенных решеток с

излучателями в виде продольных либо поперечных щелей. Численно-аналитическое решение трехмерной задачи построено на основе метода Галеркина с учетом краевой особенности поля. В качестве базиса при решении полученной системы интегро-дифференциальных уравнений использовались взвешенные полиномы Чебышева 1-го и 2-го рода, учитывающие асимптотику поля на краях щелей. Выбранный базис обеспечивает быструю сходимость результатов. Эффективность решения была существенно повышена в результате улучшения сходимости двойных рядов и интегралов, входящих в матричные элементы итоговой СЛАУ.

4. Установлены закономерности формирования частотных характеристик КПД и КСВ волноводно-щелевых АР нерезонансного типа, которые могут непосредственно использоваться при конструктивном синтезе АР. На примере линейной 120-элементной АР X-диапазона продемонстрировано возникновение резонансного роста КСВ на частоте, при которой период АР равен половине длины волны в волноводе. На основе строгого анализа характеристик направленности многоэлементных АР определена точность существующих аналитических оценок для нахождения углового положения луча.

5. Предложен эффективный комбинированный электродинамический метод анализа волноводных фильтров на многогребневых секциях (фильтров вафельного типа) и модифицированных квазипланарных волноводных фильтров на гребневых секциях и индуктивных полосках. Анализ трехмерных волноводных структур выполнен на основе метода Галеркина с учетом краевой особенности поля, метода модового сшивания и метода обобщенных матриц рассеяния. Комбинированное решение включает расчет критических частот и полей многогребневого волновода, расчет базовых неоднородностей в составе фильтра и рекомпозицию многомодовых матриц рассеяния неоднородностей.

Эффективность комбинированного решения достигнута за счет выбора наиболее подходящих методов для каждой из перечисленных задач. Решение задачи на собственные значения выполнено методом Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра или Чебышева, задача о сочленении прямоугольного и гребневого волноводов эффективно решается методом модового сшивания, а матрицы рассеяния стыка прямоугольных волноводов и волноводного разветвления рассчитываются методом Галеркина с учетом краевой особенности поля или методом модового сшивания.

6. Исследованы частотные характеристики волноводных структур вафельного типа, установлены основные закономерности формирования этих характеристик и сформулированы оценки для выбора начальных геометрических размеров фильтров. На основе разработанного метода оптимизирован

ряд конструкций волноводных фильтров нижних частот для двух- и трехдиапазонных фидерных трактов в составе наземных станций спутниковой связи, работающих в диапазонах S, C, X, Ku. Все синтезированные конструкции ФНЧ характеризуются высоким уровнем согласования в полосе пропускания, низкими вносимыми потерями при минимальных габаритах и максимальной простоте конструкции.

7. Предложены эффективные численно-аналитические методы анализа широкого класса волноводных фильтров на E-плоскостных диафрагмах, многощелевых и многошлейфных направленных ответвителей, многоэлементных волноводных устройств на основе E- и H-плоскостных ступенчатых неоднородностей. Решение соответствующих дифракционных задач построено на основе метода Галеркина с базисом в виде взвешенных полиномов Гегенбауэра, учитывающих особенность поля на ребрах неоднородностей, что обеспечивает быструю сходимость метода.

Другой ключевой момент решения, обеспечивающий его высокую эффективность, заключается в аналитическом преобразовании матричного оператора итоговой СЛАУ. В матричном операторе выделяется и аналитически вычисляется статическая (сингулярная) часть, соответствующая логарифмической особенности ядер интегральных уравнений. Оставшаяся (вполне непрерывная) часть матричного оператора содержит быстро сходящиеся ряды и вычисляется непосредственно. Данная процедура аналитической регуляризации сокращает время счета в 2-3 раза.

8. На основе разработанных алгоритмов анализа исследованы основные закономерности формирования частотных характеристик модифицированных конструкций квазипланарных фильтров на гребневых секциях и индуктивных диафрагмах, что позволяет на основе данных анализа сформировать начальный вектор параметров для оптимизации. Показано, что добавление в конструкцию индуктивных E-плоскостных диафрагм позволяет расширить верхнюю полосу заграждения фильтра, улучшить его избирательность и сократить габариты. Оптимизирован ряд модифицированных конструкций квазипланарных фильтров с улучшенными характеристиками для K и Ka диапазонов.

Приведены экспериментальные данные для разработанного и изготовленного квазипланарного фильтра на E-плоскостных диафрагмах, подтверждающие эффективность предложенной теории.

9. На основе предложенной методики расчета разработан и изготовлен волноводный направленный ответвитель квазипланарного типа со слабой 20-децибелльной связью для волноводного устройства ввода контрольных сигналов. Экспериментально подтверждены низкие вносимые потери, высокое согласование и изоляция ответвителя. Оптимизированы конструкции 90-

градусных поляризаторов на квадратных волноводах с высоким согласованием и малой погрешностью реализации дифференциального фазового сдвига в заданных стандартных спутниковых диапазонах.

10. Предложен высокоэффективный комбинированный метод электродинамического анализа многоканальных волноводных делителей мощности на Е-плоскостных шлейфах. Рассматриваемый класс устройств применяется в диаграммообразующих схемах антенн с контурной ДН. Эффективность решения, основанного на методе Галеркина и методе обобщенных матриц рассеяния, достигнута в результате применения в качестве базиса взвешенных полиномов Гегенбауэра и Чебышева и оригинальной схемы рекомпозиции.

11. Предложен способ формирования комплексных многолепестковых ДН антенных решеток произвольной геометрии. Способ реализован для кольцевых антенных решеток продольных щелей на идеально проводящем бесконечном круговом цилиндре. Данный способ основан на применении разработанной трехмерной электродинамической модели цилиндрической АР и матричном методе синтеза ДН. Предложенная новая модификация матричного метода синтеза позволяет сформировать несколько лучей с требуемыми уровнями, регулировать не только общий, но и локальный уровень боковых лепестков, а также позволяет регулировать значения фазовой диаграммы в направлениях максимумов формируемых лучей, что создаёт возможность эффективного приёма сигналов при многолучевом распространении радиоволн.

Таким образом, разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в развитии радиофизики – разработка электродинамических методов анализа и исследование конечных волноводных и волноводно-щелевых антенных решеток, частотно-селективных и распределительных устройств на волноводах сложных сечений и прямоугольных волноводах для современной элементной базы СВЧ и КВЧ диапазонов.

Основные публикации по теме диссертации

1. Ляпин В.П., Мануилов М.Б., Синявский Г.П. О сходимости метода частичных областей при расчете ступенчатых неоднородностей в прямоугольных волноводах// Изв. вузов. Радиофизика. 1984, Т.27, N. 2, с.203-29.
2. Ляпин В.П., Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Расчет диафрагм и диэлектрических окон в многомодовых прямоугольных волноводах// Радиотехника и электроника, 1985, т.30, N 2, с.230-238.
3. Ляпин В.П., Мануилов М.Б., Синявский Г.П., Черникова Т.Ю. Электродинамический анализ волноводно-диэлектрических фильтров// Изв. вузов. Радиофизика, 1986, Т.29, N 7, с.809-815.

4. Мануилов М.Б. Метод расчета волноводных диэлектрических фильтров// Изв. СКНЦ ВШ. Естеств. науки, 1986, N. 3, с.78-81.
5. Ляпин В.П., Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Дифракция Н-волн в прямоугольном волноводе с протяженными диафрагмами// Радиотехника и электроника, 1987, т.32, N. 9, с.1828-1836.
6. Ляпин В.П., Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Двухканальные волноводно-диэлектрические фильтры// Радиотехника и электроника, 1990, Т.35, N 6, с.1196-1200.
7. Manuilov B.D., Manuilov M.B. Side-lobe radiation minimization of a waveguide ring array with a matrix exciting circuit// Proc. of 27th Scientific Conf. on Antennas Theory and Technology, Moscow, 23-25 Aug., 1994, pp. 169-172.
8. Lyapin V.P., Manuilov M.B., Sinyavsky G.P. Field theory method for the analysis of the multi-section waveguide structures with step discontinuities// Proc. of URSI Int. Symp. on Electromagnetic Theory, St. Petersburg, May 23-26, 1995, pp. 30-32.
9. Manuilov M.B., Sinyavsky G.P., Shvedov V.N. Rigorous theory of rectangular waveguide multiple-slot couplers// Proc. of 6th Int. Conf. on Mathemat. Methods in Electromagnetic Theory, Lviv, Sept. 10-12, 1996, pp. 112-115.
10. Lyapin V.P., Manuilov M.B., Sinyavsky G.P. Quasi-analytical method for analysis of multisection waveguide structures with step discontinuities// Radio Science, Nov.-Dec. 1996, vol.31, N.6, pp. 1761-1772.
11. Мануилов М.Б., Шведов В.Н., Синявский Г.П. Рассеяние волн на системе щелей в общей стенке волноводов// Радиотехника и электроника, 1998, т. 43, N. 6, с. 661- 667.
12. Manuilov M.B. Rigorous field-theory design of low-loss low-pass waveguide filters// Proc. of 28th Moscow Intern. Conference on Antenna Theory and Technology, 22-24 September, 1998, pp. 531-534.
13. Мануилов М.Б. Волноводные фильтры нижних частот на Е-плоскостных резонаторах и диафрагмах// Радиотехника и электроника, 2000, том 45, N. 1, с. 55- 61.
14. Мануилов М.Б. Электродинамическая теория волноводных фильтров на продольных Е-плоскостных диафрагмах// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР, Вып. 17, 1997, с. 57-66.
15. Мануилов М.Б., Синельников Ю.М., Тихов Ю.И. Волноводное устройство ввода контрольных сигналов// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР, Вып. 17, 1997, с. 67- 74.
16. Мануилов М.Б. Волноводные фильтры нижних частот с низким уровнем потерь// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР, Вып. 18, 1998, с. 97-109.
17. Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Волноводные фильтры с расширенной полосой заграждения и мультиплексеры// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР, Вып. 19, 2000, с. 84-95.
18. Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Рассеяние волн многоэлементными неоднородностями в составе волноводных фильтров и мультиплексеров// Радиотехника и электроника, 2001, т. 46, N. 2, с. 141- 147.

19. Manuilov M.B. Rigorous theory of rectangular waveguide arrays with finite flush mounted dielectric cover// Proc. of International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory (MMET'02), Kiev, Ukraine, September 10-13, 2002, pp.322-324.
20. Manuilov M.B. Field theory analysis of rectangular waveguide arrays with finite flush mounted dielectric cover// Proc. of 25th European Space Agency Antenna Workshop on Satellite Antenna Technology, Sept. 18-20, 2002, Noordwijk, the Netherlands, pp.601-607.
21. Мануилов М.Б. Электродинамическая теория волноводных антенных решеток с невыступающими диэлектрическими покрытиями конечных размеров// Вопросы радиоэлектроники, сер. ОВР, 2002, вып. 1 (20), с. 46-60.
22. Мануилов М.Б. Численно-аналитическая реализация метода Галеркина при анализе ступенчатых рупорных антенн// Изв. вузов. Радиофизика, 2003, т. 46, № 2, с. 91-103.
23. Мануилов М.Б. Электродинамический метод анализа решеток прямоугольных волноводов с конечными диэлектрическими покрытиями// Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, № 6, с. 664-672.
24. Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Метод Галеркина с учетом краевой особенности поля в задачах анализа пассивных волноводных устройств и антенных решеток// Труды Междун. научн. конф. "Излучение и рассеяние электромагнитных волн", г. Таганрог, 2003, с. 11-14.
25. Kobrin K.V., Manuilov M.B., Sinyavsky G.P. Field theory analysis and design of multi-port branch-guide couplers for contoured beam antennas// Proc. of 4th International Conf. on Antenna Theory and Technique (ICATT'03), 9-12 September, 2003, Sevastopol, Ukraine, pp. 769-771.
26. Kobrin K.V., Manuilov M.B., Sinyavsky G.P. Full wave analysis and design of multi-port branch-guide couplers for contoured beam antennas// Proc. of Asia Pacific Microwave Conference (APMC'03), 4-7 November, 2003, Seoul, Korea, vol. 3, pp. 1592-1595.
27. Кобрин К.В., Мануилов М.Б., Синявский Г.П. Волноводные делители мощности для антенн с контурной диаграммой направленности// Антенны, вып. 6(85), 2004, с. 36-42.
28. Мануилов М.Б. Волноводные антенные решетки с невыступающими диэлектрическими покрытиями// Электромагнитные волны и электронные системы, 2005, т.10, №5, с.63-66.
29. Мануилов М.Б., Кобрин К.В. Собственные волны многогребневых волноводов// Электромагнитные волны и электронные системы, 2005, т.10, № 6, с. 21-28.
30. Manuilov M.B., Kobrin K.V. Field theory CAD of waffle-iron filters// Proc. of 35th European Microwave Conference, (EuMC'05), 3-7 October, 2005, Paris, France, pp. 1227-1230.
31. Manuilov M.B., Kobrin K.V. Low-loss waffle-iron filters for multiband feeders of reflector antennas// Proc. of 2005 International symposium on antennas and propagation (ISAP'2005), August 3-5, 2005, Seoul, Korea, vol. 1, pp. 93-96.

32. Синявский Г.П., Мануилов М.Б., Кобрин К.В. Волноводные фильтры квазипланарного типа с улучшенными характеристиками// Успехи современной радиоэлектроники, № 4, 2006, с. 5-26.
33. Мануилов М.Б., Кобрин К.В. Волноводные фильтры нижних частот для многодиапазонных фидерных трактов зеркальных антенн// Успехи современной радиоэлектроники, № 4, 2006, с. 46-51.
34. Manuilov M.B., Kobrin K.V. Hybrid EM-Simulator Based CAD of Ridge Waveguide Filters with Improved Performance// Proc. of Mediterranean Microwave Symposium 2006 (MMS'06), 19-21 Sept. 2006, Genova, Italy, pp.309-402.
35. Мануилов М.Б., Лерер В.А., Синявский Г.П. Методы расчета и новые применения волноводно-щелевых антенных решеток// Успехи современной радиоэлектроники, № 5, 2007, с. 3-28.
36. Мануилов М.Б., Лерер В.А., Синявский Г.П. Электродинамический метод расчета многоэлементных волноводно-щелевых антенных решеток// Труды международной научной конференции “Излучение и рассеяние электромагнитных волн”, (ИРЭМВ-2007), Таганрог, июнь 25-30, т.1, 2007, с.283-287.
37. Мануилов М.Б., Мануилов Б.Д., Башлы П.Н., Безуглов Ю.Д. Синтез комплексных многолучевых диаграмм направленности кольцевых решеток продольных щелей на круговом цилиндре// Труды международной научной конференции “Излучение и рассеяние электромагнитных волн”, (ИРЭМВ-2007), Таганрог, июнь 25-30, т. 1, 2007, с.288-292.
38. Патент № 2302061 Россия. Способ формирования многолепестковых диаграмм направленности антенной решётки/ Мануилов М.Б., Мануилов Б.Д., Башлы П.Н., Безуглов Ю.Д. // Открытия, изобретения. – Бюл. № 18, 27.06.2007.
39. Мануилов М.Б., Лерер В.А., Синявский Г.П. Эффективный метод электродинамического анализа волноводно-щелевых антенных решеток// Радиотехника и электроника, 2007, т. 52, (принята к печати).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воскресенский Д.И., Котов Ю.В., Харланов Ю.Я., Овчинникова Е.В. Многофункциональные полотна антенных решеток//Антенны, вып.9(112), 2006, с.5-23.
2. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток. / Под ред. Воскресенского Д.И. – М.: Радио и связь, 1994, 592 с.
3. Синани А.И. Антенные и волноводные системы в НИИП им. В.В.Тихомирова//Антенны, вып. 2(93), 2005, с.6-11.
4. Курочкин А.П., Андрианов В.И., Вербя В.С., Козлов К.В., Крицкий С.В., Рыков В.В., Якубень Л.М. Вопросы построения АФАР для авиационных и космических радиолокационных комплексов наблюдения//Антенны, вып. 8-9 (87-88), 2004, с. 56-64.
5. Sehm T., Lehto A., Raeisänen A.V. A Large Planar 39-GHz Antenna Array of Waveguide-Fed Horns. // IEEE Trans. on Antennas and Prop., 1998, vol. AP-46, N. 8, pp. 1189-1193.

6. Ando M., Hirokawa J., Yamamoto T., Akiyama A., Kimura Y., Goto N. Novel Single-Layer Waveguides for High-Efficiency Millimeter-Wave Arrays//IEEE Microwave Theory and Techn., v.46, N. 6, June 1998, pp.792-799.
7. Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток. – М.: Мир, 1974, 45 с.
8. Гостюхин В.Л., Гринева К.И., Трусов В.Н. Вопросы проектирования активных ФАР с использованием ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1983, 248 с.
9. Антенные решетки//Под. ред. Чавдарова С.С. – Ростов-на-Дону: Изд. Ростовского ун-та, 1971, 184 с.
10. Мануилов Б.Д., Борисов Б.Г., Сариев К.Э., Шабловский В.М. Сравнение интегральных характеристик двумерных и трехмерных моделей волноводных решеток с покрытиями конечных размеров//Радиотехника, 1991, № 4, с.60-62.
11. Воскресенский Д.И., Кременецкий С.Д., Гринев А.Ю., Котов Ю.В. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
12. Ильинский А.С., Гринев А.Ю., Котов Ю.В. Численные методы решения задачи излучения антенных решеток// Вычислительные методы и программирование, вып.32. – М.: Изд-во МГУ, 1980, с.104-130.
13. Cucini A., Albani M., Maci S. Truncated Floquet Wave Full-Wave (T(FW)²) Analysis of Large Periodic Arrays of Rectangular Waveguides// IEEE Trans. on Antennas and Propag., v. 51, N.6, June 2003, pp. 1373-1385.
14. Каплун В.А. Радиопрозрачные обтекатели//Антенны, №8-9(87-88), 2004, с 109-116.
15. Пистолькорс А.А. Общая теория дифракционных антенн//Журнал технической физики, 1944, т. 14, №12, с.693-702.
16. Фельд Я.Н. Основы теории щелевых антенн. – М.: Советское радио, 1948, 160 с.
17. Бахрах Л.Д., Ершов Л.И., Кременецкий С.Д., Лось В.Ф. Электродинамические факторы взаимовлияния и расчет волноводно-щелевых решеток//ДАН СССР, 1978, том 243, №2, с. 314-317.
18. Кравченко В.И., Басараб М.А. Булева алгебра и методы аппроксимации в краевых задачах электродинамики. – М.: Физматлит, 2004, 308 с.
19. CST Microwave Studio. <http://www.cst.com>
20. Lerer A.M., Schuchinsky A.G. Full-wave analysis of three-dimensional planar structures// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1993, vol. 41. N. 11, p. 2002-2015.
21. Kirilenko A., Rud L., Tkachenko V., Kulic D. Evanescent-mode ridged waveguide band-pass filters with improved performance// IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech., 2002, vol. MTT.50, N.5, p. 1324-1328.
22. Dittloff J., Arndt F. Rigorous Field Theory Design of Millimeter-Wave E-plane Integrated Circuit Multiplexers// IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech., 1989, vol. MTT-37, N.2, p. 340-350.