

УДК 621.372.852.22

На правах рукописи

Комиссарова Елена Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНЫХ ФЕРРИТОВЫХ
ФАРАДЕЕВСКИХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ФАР НА ИХ
ОСНОВЕ ДЛЯ КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА ВОЛН**

Специальность: 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре «Радиоэлектронные системы и устройства».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Крехтунов Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
начальник НИО-630
ПАО «НПО «Алмаз»
Кашин Валерий Акимович

кандидат технических наук, доцент,
доцент ФГБОУ ВПО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)
Овчинникова Елена Викторовна

Ведущая организация: ОАО «Завод Магнетон»,
г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д.9

Защита состоится 17.12.2015 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.11.

Автореферат разослан _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.11

доктор технических наук, профессор



И.Б. Власов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Передающие и приемо-передающие пассивные фазированные антенные решетки (ФАР) СВЧ- и КВЧ-диапазонов в настоящее время, как правило, строятся на основе волноводных ферритовых фазовращателей (ВФФВ), согласуемых со свободным пространством волноводными или волноводно-диэлектрическими излучателями (ВДИ). На основе обзора и анализа российских и зарубежных литературных источников можно сделать вывод о том, что наибольшее практическое применение в ФАР радиотехнических систем (РТС) находят ВФФВ с магнитной памятью трех типов: взаимный фазовращатель Реджиа-Спенсера и невзаимный тороидальный фазовращатель на основе прямоугольного волновода, конструктивно сложные и работающие только на волнах с линейной поляризацией электромагнитного поля, а также взаимный волноводный ферритовый фазовращатель, в котором используется эффект Фарадея (далее «фарадеевский ФВ»).

Фарадеевские ФВ конструктивно просты и широко используются в ФАР РТС диапазонов СВЧ и КВЧ, на их основе создаются фазовращатели, работающие на волнах с круговой, линейной или изменяемой поляризацией поля. В мировой практике накоплен большой опыт разработки и серийного производства ВФФВ, ВДИ и элементов ФАР на их основе, например, в X- и Ka-диапазонах частот.

В настоящее время проявляется повышенный интерес к РТС для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн (ММДВ). Однако при разработке элементной базы таких ФАР возникают специфические проблемы, связанные с рабочей длиной волны. Созданию ВФФВ с такими же характеристиками, как у аналогичных устройств в диапазонах более длинных волн, препятствует ряд конструкторско-технологических факторов, таких как погрешности базирования фазовращателей и излучателей в интегрированных элементах ФАР, а также самих элементов в раскрыве ФАР, возникновение воздушных, клеевых и немагнитных зазоров при сборке ВФФВ, величины которых уже не могут считаться пренебрежимо малыми по сравнению с длиной волны.

ВФФВ X- и Ka-диапазонов, как правило, выполняются на основе ферритовых стержней (ФС) с многослойным токопроводящим покрытием боковой поверхности, вклеиваемых или впаиваемых в волноводную арматуру. Для повышения быстродействия и уменьшения энергопотребления в слое металлизации таких ФВ лазерным лучом прорезается продольный паз с последующим нанесением слоев диэлектрического и проводящего покрытий. При производстве фарадеевских ВФФВ для высокочастотной части КВЧ-диапазона, например W-диапазона, эти технологические процессы труднореализуемы. И ограничена реализация ранее накопленного опыта создания подобных устройств в более длинноволновых диапазонах.

Диссертация посвящена разработке элементной базы ФАР, в том числе ВФФВ, волноводно-диэлектрических излучателей и интегрированных элементов ФАР на их основе для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн, разработка инженерных методов расчета с учетом особенностей конструктивного выполнения устройств в указанном диапазоне волн. Практическая значимость поставленной задачи позволяет считать тему диссертационной работы **актуальной**.

Степень научной разработанности темы. Вопросы теории волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей рассматривались в научных работах таких авторов как Микаэлян А.Л., Никольский В.В., Орлов В.П., Феоктистов В.Г., Веселов

Г.И., Бей Н.А., Бойд С.Р. и др. Созданию конструкций фарадеевских ВФФВ Х- и Ка-диапазонов для серийного производства способствовали работы таких специалистов, как Афанасьев Ю.Н., Леманский А.А., Милевский Н.П., Федоров В.В., Треховицкий Г.В., Порохнюк А.В., и др. В теорию волноводных и волноводно-диэлектрических излучателей для интегрированных элементов ФАР внесли вклад Ильинский А.С., Виниченко Ю.П., Туманская А.Е., Хандамиров В.Л., Русов Ю.С., Скобелев С.П., Амитей Н., Галиндо В., Ву Ч. и др. Интегрированные элементы ФАР с фарадеевскими ФВ и ВДИ для ФАР Х- и Ка-диапазонов частот являлись предметами разработок Леманского А.А., Денисенко В.В., Толкачева А.А., Фирсенкова А.И., Емельченкова Ф.И., Кашина В.А., Доброжанской О.Л., Колесникова В.Л., Батова П.Л. и др.

Объектом исследования диссертационной работы являются волноводные ферритовые фарадеевские фазовращатели с магнитной памятью, работающие на волнах с круговой поляризацией электромагнитного поля и интегрированные элементы с волноводно-диэлектрическими излучателями на их основе для фазированных антенных решеток с электрическим сканированием луча для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Предмет исследования: методы расчета и проектирования волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей коротковолновой части миллиметрового диапазона волн, их конструктивное выполнение и параметры: активность, добротность, быстродействие и энергия перемагничивания, вопросы согласования ВФФВ с волноводно-диэлектрическими излучателями, исследование характеристик последних с учетом взаимного влияния в многоэлементной ФАР.

Цель диссертационной работы:

- создание конструктивно простого, технологичного с высоким быстродействием и низким энергопотреблением волноводного ферритового фарадеевского фазовращателя для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн, работающего на волнах с круговой поляризацией электромагнитного поля;
- создание на основе ВФФВ и ВДИ интегрированного элемента ФАР;
- разработка макета отражательной ФАР с электрическим сканированием луча в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Для достижения поставленной цели фарадеевский ФВ строится на основе ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности.

В работе поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

- теоретическое и численное исследование собственных волн волноводов с поперечно-неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании ферритовой структуры;
- разработка алгоритмов и реализующих их программ для ЭВМ для расчета характеристик собственных волн волноводов со сложным поперечно неоднородным заполнением и их апробация на тестовых задачах;
- анализ потоков мощности и распределения поля в поперечном сечении квадратного двухслойного волновода;
- разработка электродинамических и математических моделей ВФФВ и инженерных методик их расчета с учетом конструкторско-технологических факторов изготовления и сборки устройств;
- расчет и экспериментальные исследования ВФФВ и волноводно-диэлектрических излучателей для интегрированных элементов ФАР с учетом их взаимного влияния в антенной решетке;

– разработка интегрированных элементов ФАР на основе созданных ВФФВ, ВДИ и макета многоэлементной отражательной ФАР (ОФАР), его экспериментальное исследование с целью подтверждения результатов, полученных в диссертации в ходе теоретических исследований и расчета характеристик ВФФВ, ВДИ и макета ФАР в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

Методы исследования. При электродинамическом моделировании фарадеевских ФВ и интегрированных элементов ФАР на их основе реализуется принцип декомпозиции. Задача о собственных волнах волноводов со сложным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании решается методом Галеркина с использованием в процедуре проецирования как дифференциального оператора первого порядка (оператора Максвелла), так и дифференциального магнитного оператора второго порядка.

При электродинамическом моделировании ВФФВ, представленного в виде многоступенчатого волноводного перехода задача дифракции электромагнитных волн решается методом Трефца.

Научная новизна исследований заключается в следующем.

1. В строгой электродинамической постановке методом Галеркина с использованием дифференциального магнитного оператора второго порядка решена задача о собственных волнах прямоугольного волновода с произвольным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании.

2. Методом Галеркина с использованием дифференциального оператора первого порядка (оператора Максвелла) решена задача о собственных волнах квадратного волновода с системой прямоугольных диэлектрических и продольно намагниченных ферритовых стержней и пластин.

3. На основе решения в строгой электродинамической постановке задачи дифракции электромагнитных волн на ступенчатом волноводном переходе многоволновых волноводов построена математическая модель ВФФВ, в волноводе фазирующей части которого размещены не только продольно намагничиваемый ферритовый стержень, но и ферритовые скобы внешнего магнитопровода, обеспечивающие магнитную память ФВ.

4. Исследованы диаграммы направленности рупорно-диэлектрических излучателей (РДИ) с учетом взаимного влияния в многоэлементной антенной решетке и решена задача формирования ДН с повышенной прямоугольностью главного лепестка.

5. На электродинамическом уровне исследовано влияние на характеристики ВФФВ коротковолновой части ММДВ воздушных и клеевых зазоров между деталями фазовращателя, возникающих в процессе изготовления и сборки устройства.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в следующем.

1. На основе решения методом Галеркина задачи о собственных волнах волновода с феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании разработаны алгоритм и программа расчета характеристик собственных волн.

2. Для квадратного волновода с соосным квадратным диэлектрическим или продольно намагниченным ферритовым стержнем в широком диапазоне изменения параметров структуры (поперечных размеров волновода и стержня, диэлектрических проницаемостей материалов сред, элементов тензора магнитной проницаемости μ_2), рассчитаны дисперсионные характеристики собственных волн.

3. На основе решения методом Трефтца задачи дифракции электромагнитных волн на ступенчатом волноводном переходе разработана инженерный метод расчета ступенчатых переходов, в том числе в многоволновой области фарадеевского ВФФВ.

4. Выполнены электродинамическое моделирование и сравнительный анализ короткозамыкателей для отражательного ВФФВ с ФС без токопроводящего покрытия боковой поверхности.

5. Разработаны рекомендации по допустимым толщинам воздушных и клеевых зазоров, возникающих в конструкции ВФФВ при клеевом соединении деталей.

6. Предложена новая конструкция ВФФВ с высоким быстродействием и низкой энергией перемагничивания, выполненного на основе ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности.

7. Предложена методика обоснованного выбора технологических допусков на изготовление деталей и максимально допустимых воздушных и клеевых зазоров, возникающих при сборке элементов ВФФВ.

8. Исследовано влияние немагнитных зазоров между боковой поверхностью ФС и башмаками ферритовых скоб на величину остаточной магнитной индукции и активность ВФ.

9. Развита методика настройки многоэлементной ФАР с ВФФВ с учетом погрешностей их сборки и базирования в раскрыве ФАР без априорной информации об их электрических характеристиках.

10. Изготовлена и испытана опытная партии ВФФВ на основе ФС без токопроводящего покрытия их боковой поверхности и элементов ФАР на их основе.

11. Разработан и экспериментально исследован макет отражательной ФАР из 151 элемента коротковолновой части ММДВ с электрическим сканированием луча шириной 4° по уровню половинной мощности в секторе углов до $\pm 15^\circ$.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается

- строгой постановкой решаемых задач о собственных волнах волноводов с поперечно-неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением и дифракции электромагнитных волн на ступенчатом волноводном переходе;

- сравнением результатов расчетов с точными результатами для волноводов, имеющих строгое решение задачи о собственных волнах;

- численным исследованием сходимости решения и оценкой точности расчетов с использованием разработанного алгоритма;

- сравнением результатов моделирования ВФФВ и ВДИ с результатами экспериментальных исследований;

- сравнением рассчитанных и экспериментально замеренных характеристик макета отражательной ФАР.

Достоверность результатов экспериментальных исследований ВФФВ, ВДИ и макета отражательной ФАР обеспечивается использованием аттестованных измерительных приборов и проведением измерений диаграмм направленности ВДИ и макета ФАР в безэховой камере.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11-й, 13-й, 14-й, 17-й, 18-й, 21-й, 23-й и 24-й Международной конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2001, 2003, 2004, 2007, 2008, 2011, 2013, 2014); 19-й и 20-й Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2013, 2014); Международном симпозиуме «Образование через науку»

(Москва, 2005); Юбилейной научно-технической конференции, посвященной 60-летию ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л.Минца» и Факультета радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ (Москва, 2006); 15-м Координационном семинаре по СВЧ технике (Нижний Новгород, 2007); 19-й Научно-технической конференции аспирантов и молодых специалистов ОАО «НИИ Приборостроения им. В.В.Тихомирова» (Жуковский, 2008).

Публикации. Содержание диссертации отражено в 25 научных работах, из них 5 работ опубликованы в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ, общим объемом 3,6 п.л.

Внедрение результатов диссертационной работы. Результаты теоретических исследований, разработанные электродинамические модели, алгоритмы и результаты расчета, разработанные новые конструкции волноводных ферритовых фазовращателей и интегрированных элементов ФАР на их основе, макет многоэлементной ФАР, полученные при выполнении диссертационной работы, реализованы в ОАО «Завод «Магнетон» (г. С.-Петербург) и ОАО «КБП» (г. Тула), а также используются в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах НИИ РЛ и НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана и в учебном процессе кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

На разработанный элемент фазированной отражательной антенной решетки получен патент на изобретение №2474018 Россия.

Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования РФ. Шифр гранта: А03-3.15-268.

Структура и объем диссертационной работы. Структура диссертации включает в себя введение, четыре главы, выводы по диссертационной работе, заключение, список источников и приложение. Работа состоит из 223 страниц машинописного текста и содержит 133 рисунка и 7 таблиц. Список источников насчитывает 145 наименований.

Личный вклад автора.

В процессе работы над диссертацией автором лично и при непосредственном участии:

- решена задача о собственных волнах волновода с произвольным поперечно неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании;

- разработаны алгоритмы и реализующие их программы для ЭВМ, рассчитаны дисперсионные характеристики собственных волн для ряда волноводных структур с различным феррито-диэлектрическим заполнением;

- выполнено электродинамическое и математическое моделирование ВФФВ, созданного на основе ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности, разработана конструкция ВФФВ;

- исследовано влияние воздушных, клеевых и немагнитных зазоров в конструкции ВФФВ на его характеристики;

- на специально созданных измерительных стендах экспериментально исследованы: опытная партия ВФФВ, ВДИ и разработанного макета отражательной ФАР для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн;

- разработана методика настройки ФАР.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Решение в строгой электродинамической постановке задачи о собственных волнах волновода с поперечно неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании

2. Методика расчета электродинамических характеристик ВФФВ, дающая возможность оценить влияние конструкторско-технологических аспектов, возникающих при изготовлении ВФФВ, на его характеристики.

3. Рассчитанные с применением разработанных алгоритмов характеристики волноводных ферритовых фазовращателей коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

4. Новое конструктивное исполнение фарадеевских ВФ для коротковолновой части миллиметрового диапазона волн, отличающихся повышенным быстродействием и пониженным энергопотреблением.

5. Результаты экспериментальных исследований опытной партии ВФФВ коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

6. Новая схема построения элемента ОФАР с волноводным фарадеевским ферритовым фазовращателем, отличающаяся простотой конструкции и технологичностью.

7. Конструкция макета и результаты экспериментальных исследований многоэлементной фазированной антенной решетки с электрическим сканированием луча коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели, задачи и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; рассматривается степень ее научной разработанности, область и предмет исследования; приводится информация об апробации работы, личном вкладе автора, подтверждается достоверность и обоснованность полученных результатов, структуре диссертации, внедрении результатов работы; формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор и патентный поиск по тематике исследования. Рассмотрены известные разработки волноводных ферритовых фазовращателей для радиотехнических систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн. Определено, что волноводные ферритовые фарадеевские фазовращатели наиболее пригодны для использования в элементах ФАР ММДВ. Выполнен обзор конструкций элементов ФАР с фарадеевскими ФВ. Определены основные требования, предъявляемые к элементам ФАР ММДВ, указаны основные проблем, возникающие при разработке таких элементов. Анализ ряда серийно выпускаемых элементов ФАР, показал, что при их производстве применяется ряд сложных и дорогостоящих технологических процессов. Поэтому актуально максимальное упрощение конструкции элементов ФАР без ущерба для их технических характеристик. Оптимизация конструкции элементов ФАР требует применения методов расчета, базирующихся на электродинамических моделях высокого уровня.

В связи с этим рассмотрены методы электродинамического моделирования и расчета волноводных ферритовых фазовращателей. Обоснован выбор декомпозиционного подхода при анализе структуры ВФФВ и элемента ФАР, позволяющего на электродинамическом уровне учитывать влияние технологических

зазоров, и других дефектов, возникающих в процессе изготовления отдельных деталей и сборки ВФФВ и интегрированного элемента ФАР. Отмечено, что наиболее эффективным методом исследования собственных волн поперечно неоднородных волноводов является проекционный метод Галеркина, универсальный и математически обоснованный, и при его использовании возможно решение задачи о собственных волнах в строгой электродинамической постановке.

Для исследования и оптимизации диаграмм направленности ВДИ с учетом взаимного влияния в антенной решетке наиболее эффективен метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ Ansoft HFSS.

Во второй главе методом Галеркина в строгой электродинамической постановке решается ключевая для расчета ВФФВ задача о собственных волнах прямоугольного волновода с поперечно-неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании. На Рис. 1 показан ряд исследуемых волноводов, в том числе, на Рис. 1, а – общий случай, когда среда, заполняющая волновод, характеризуется диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon}_a(x, y) = \epsilon(x, y) \cdot \epsilon_0$ и тензором магнитной проницаемости $\tilde{\mu}_a(x, y) = \mu_0 \cdot \tilde{\mu}(x, y)$, где функции $\epsilon(x, y)$ и $\mu_i(x, y)$ – кусочно-непрерывные функции поперечных координат.

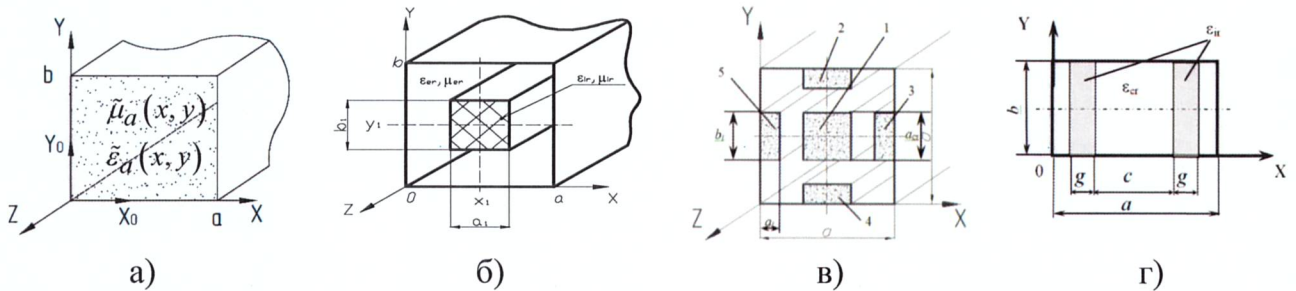


Рис. 1. Волноводы с поперечно-неоднородным заполнением

Для гармонических колебаний решается система уравнений Максвелла

$$\begin{cases} \text{rot} \dot{\vec{H}} = j\omega \epsilon_a \dot{\vec{E}}; & \text{div} \epsilon_a \dot{\vec{E}} = 0; \\ \text{rot} \dot{\vec{E}} = -j\omega \tilde{\mu}_a \dot{\vec{H}}; & \text{div} \tilde{\mu}_a \dot{\vec{H}} = 0. \end{cases}, \quad \tilde{\mu}(x, y) = \begin{vmatrix} \mu_1 & -j\mu_2 & 0 \\ j\mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

После исключения из (1) вектора $\dot{\vec{E}}(x, y)$ и составляющей $\dot{\vec{H}}_z(x, y)$ задача сводится к системе дифференциальных уравнений относительно поперечного вектора $\dot{\vec{H}}_{\perp}(x, y)$

$$L_H^{\mu} \vec{H}_{\perp}(x, y) = p^2 k_0^2 \vec{H}_{\perp}(x, y), \quad (2)$$

где L_H^{μ} – дифференциальный магнитный оператор второго порядка, элементы которого наряду с зависимостями $\epsilon(x, y)$ и $\mu_i(x, y)$, содержат их произведения по поперечным координатам; $p = \gamma/k_0$, $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, γ – коэффициент распространения собственной волны.

Уравнение (2) решается методом Галеркина. Поле $\dot{\vec{H}}_{\perp}(x, y)$ вид

$$\vec{H}_{\perp}(x, y) = \sum_{t=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} M_{tmn} \vec{h}_{tmn}(x, y). \quad (3)$$

Здесь M_{tmn} – коэффициенты разложения полей собственных волн неоднородно заполненного волновода по системе поперечных магнитных векторных функций прямоугольного волновода, индекс $t=1, 2$ соответствует волнам типов H_{mn} и E_{mn}

$$\vec{h}_{tmn}(x, y) = h_{tmn}^x \cdot \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \vec{x}_0 + h_{tmn}^y \cdot \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \vec{y}_0. \quad (4)$$

В соответствии с процедурой Бубнова-Галерника искомое поле (3) подставляется в операторное уравнение

$$L_H^{\mu} \sum_{t=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} M_{tmn} \vec{h}_{tmn}(x, y) = p^2 k_0^2 \sum_{t=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} M_{tmn} \vec{h}_{tmn}(x, y). \quad (5)$$

После проецирования уравнения (5) на систему векторных функций (4) с учетом их ортогональности поставленная задача сводится к решению полной проблемы собственных значений комплексной матрицы

$$AM = p^2 M. \quad (6)$$

Коэффициенты M_{tmn} отождествляются с численными значениями собственных векторов матрицы A , а квадраты коэффициентов замедления волн p^2 – с ее собственными значениями.

Матрица A имеет блочную структуру с индексами блоков t' и t , а ее элементы $A_{tmn}^{t'm'n'}$ определяются выражением

$$A_{tmn}^{t'm'n'} = (1/k_0^2) \cdot \left\{ (L_{11} h_{tmn}^x, h_{t'm'n'}^x) + (L_{12} h_{tmn}^y, h_{t'm'n'}^x) + (L_{21} h_{tmn}^x, h_{t'm'n'}^y) + (L_{22} h_{tmn}^y, h_{t'm'n'}^y) \right\} \quad (7)$$

Для частных случаев заполнения волновода, показанных на Рис. 1, т.е. при заданных функциях $\varepsilon(x, y)$ и $\mu(x, y)$, интегралы, входящие в (7), сводятся к табличным, и формулы для расчета элементов матрицы $A_{tmn}^{t'm'n'}$ найдены в явном виде.

Алгоритм расчета характеристик собственных волн волноводов реализован в виде пакета прикладных программ на языке DELPHI. Эффективность алгоритма проверена на примере расчета характеристик волн волноводов с диэлектрическими пластинами (Рис. 1, г), допускающих строгое решение задачи. Численно исследована сходимость решения и точность расчета коэффициента замедления волны типа $k-H_{10}$ в зависимости от числа Q волн в разложении поля (5) для пластин с $\varepsilon_r=2, 4, 9, 16$.

На Рис. 2, а приведены рассчитанные зависимости $p(Q)$: штриховая линия – строгое решение, пунктирная линия – с использованием оператора первого порядка, сплошная линия – расчет с использованием оператора второго порядка, обеспечивающего более быструю сходимость решений. Для волны типа HE_1 численно исследованы зависимости $p(\lambda/a)$ соосно расположенного диэлектрического стержня (Рис. 2, б) для СВЧ материалов, используемых при производстве ВФФВ: полистирола, композитных материалов и ферритов маркок 1СЧ4 и 1СЧ12. В качестве примера на Рис. 2, б приведены дисперсионные характеристики $p(\lambda/a)$ для $\varepsilon_{ir}=15,2$. Коэффициент замедления волны типа HE_1 изменяется очевидным образом от $p = \sqrt{\varepsilon_{ir}}$ при $\lambda/a=0$ до $p=0$ при значении λ/a .

В связи с проектированием ВФФВ на основе металлизированного ФС рассчитаны приведенные на Рис. 2, в дисперсионные характеристики для квадратного

волновода, полностью и однородно заполненного продольно намагниченной ферритовой средой (Рис. 1, а).

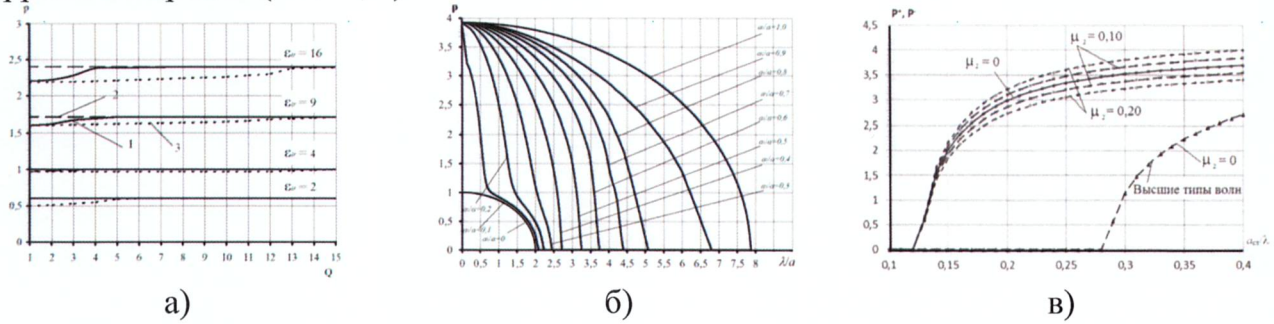


Рис. 2. Зависимости коэффициентов замедления волн от параметров структуры

В таком волноводе распространяются низшие кругополяризованные волны типов $k\text{-}H_{10}^{(+)}$ и $k\text{-}H_{10}^{(-)}$. Зависимости $p^{(+)}$ и $p^{(-)}$ от $a_{\text{ст}}/\lambda$ рассчитаны для $\epsilon_{\text{ит}}=15,2$ при недиагональной компоненте тензора магнитной проницаемости $\mu_2=0; 0,1; 0,2$. При неограниченном увеличении $a_{\text{ст}}/\lambda$ эти волны вырождаются в плоские кругополяризованные волны. Их коэффициенты распространения точно совпадают с рассчитанными по формуле

$$p_{1,2} = \sqrt{\epsilon_r (\mu_1 \pm \mu_2)}. \quad (8)$$

В разделе 2.4 главы 2 для квадратного волновода со стержнем и скобами (Рис. 1, в) исследовано распределение поля волны $k\text{-}H_{10}$ в поперечном сечении волновода и потоки мощности, переносимые этой волной. При расчете принято $a_{\text{ск}}=a_{\text{ст}}$, $b_{\text{ск}}=a_{\text{ст}}/4$, $\epsilon_{\text{ст}}=\epsilon_{\text{ск}}=15,2$. Показано, что при увеличении размера стержня доля потока мощности $P_{\text{ст}}$ увеличивается и достигает максимального значения $P_{\text{ст макс}}=0,94$ при $a_{\text{ст}}/\lambda \approx 0,25$. При этом доля потока мощности, распространяющаяся в ферритовых скобах, пренебрежимо мала ($P_{\text{ск}} < 0,02 \cdot P_{\text{ст}}$).

В третьей главе диссертации выполнены теоретические и экспериментальные исследования, целью которых является разработка инженерных методов расчета ВФФВ с учетом погрешностей, возникающих при изготовлении и сборке устройств.

Рассматривается две схемы построения ВФФВ: традиционная с использованием ФС с токопроводящим покрытием боковой поверхности и предлагаемая к практической реализации – на основе ФС, не содержащего такого покрытия (Рис. 3). Особенностью ВФФВ является то, что обмотка намагничивания 2 и ферритовые скобы 4 магнитопровода находятся в поле электромагнитной волны, направляемой ферритовым стержнем. При проектировании ВФФВ рассчитываются:

- фазирующая часть, включающая ФС и ферритовые скобы;
- ступенчатые переходы, согласующего многоволновый волновод ФВ;
- короткозамыкатель для отражательного ВФФВ элемента ОФАР.

Эффективный расчет и оптимизация такого ВФФВ могут быть выполнены только при реализации алгоритмов, разработанных на основе электродинамических моделей высокого уровня. В связи с этим методом Трефтца решена задача дифракции электромагнитных волн на ступенчатом волноводном переходе, включающем многоволновые волноводы (Рис. 1в).

В каждой n -й частичной области поля представляются в виде разложений по поперечным векторным функциям $\bar{e}_{q_n}(x, y)$ и $\bar{h}_{q_n}(x, y)$ собственных волн соответствующих поперечно неоднородных волноводов:

$$\begin{cases} \bar{E}_{\perp n}(x, y, z_n) = \sum_{q_n=1}^{\infty} \left\{ A_{\tilde{q}_1} \cdot \delta_{\tilde{q}_1 q_n} \cdot e^{-i\beta_{\tilde{q}_1} z_1} + \left(A_{q_n} \cdot e^{-i\beta_{q_n} z_n} \cdot (1 - \delta_{1n}) + B_{q_n} \cdot e^{i\beta_{q_n} z_n} \cdot (1 - \delta_{4n}) \right) \right\} \cdot \bar{e}_{q_n}(x, y); \\ \bar{H}_{\perp n}(x, y, z_n) = \sum_{q_n=1}^{\infty} \left\{ A_{\tilde{q}_1} \cdot \delta_{\tilde{q}_1 q_n} \cdot e^{-i\beta_{\tilde{q}_1} z_1} + \left(A_{q_n} \cdot e^{-i\beta_{q_n} z_n} \cdot (1 - \delta_{1n}) - B_{q_n} \cdot e^{i\beta_{q_n} z_n} \cdot (1 - \delta_{4n}) \right) \right\} \cdot \bar{h}_{q_n}(x, y). \end{cases} \quad (9)$$

Здесь A_{q_n} и B_{q_n} – комплексные амплитуды волн с номером q_n в области n ; β_{q_n} – коэффициент фазы волн; δ_{pq} – символ Кронекера; $\tilde{q}_1$ – номер падающей волны в области 1, z_n – локальная координата в области n .

После удовлетворения условий непрерывности полей в плоскостях стыков областей и выполнения процедуры проекционного сшивания полей задача расчета коэффициентов B_{q_1} и A_{q_N} сведена к решению неоднородной системы линейных алгебраических уравнений порядка $Q = Q_1 + \sum_{n=2}^{N-1} Q_n + Q_N$, определяемого числом волн, учитываемых в областях, которое уточняется в процессе расчета. В частном случае рассчитываются элементы матриц рассеяния отдельных стыков $\|S_{n,n+1}\|$, и перебором параметров решается задача инженерного синтеза переходов.

Основным узлом ВФФВ является фазирующий блок, в котором рассчитываются и оптимизируются размеры ферритового стержня: длина $l_{ст}$ и размер $a_{ст}$ для ϵ_{Φ} ; ферритовых скоб магнитопровода с пластинами $a_{ск} \times b_{ск}$ с башмаками площадью $S_6 = a_6 \cdot t_6$. При этом выбор размеров определяется из условий минимизации поперечного размера ВФФВ с магнитной памятью и длины ФС, обеспечивающей создание требуемого вносимого фазового сдвига $\Delta\varphi_{макс}$, а также магнитопровода ФВ с малыми полями рассеяния. Расчеты выполнены для ферритов марок 1СЧ4 и 1СЧ12, используемых в КВЧ-диапазоне. Длина активной части ФС и полная длина ФС, рассчитывается по формулам

$$l_{\Phi_{мин}} = \frac{\Delta\varphi_{макс}}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_0}{\Delta p}; \quad l_{ст} = l_{\Phi_{мин}} + 2t_{\delta}. \quad (10)$$

где $\Delta p = p^{(+)} - p^{(-)}$; $p^{(+)}$ и $p^{(-)}$ – коэффициенты замедления кругополяризованных волн, направленных ФС. Для двух марок феррита по их параметрам рассчитаны значения μ_2 , дисперсионные характеристики собственных волн в широком диапазоне изменения параметров $a_{ст}/\lambda$, $a_{в}/\lambda$; $a_{ст}/a_{в}$. По найденным значениям $p^{(+)}$ и $p^{(-)}$ рассчитаны приведенные на Рис. 4 зависимости $\Delta p(a_{ст}/\lambda)$ и $l_{ст}(a_{ст}/\lambda)$.

Из приведенных на Рис. 4, а данных следует, что активность ФВ на основе ФС без металлизации боковой поверхности (линии 2 и 3) при $a_{ст}/\lambda \leq 0,25$ в 1,5 раза превышает активность ФВ с металлизированным ФС (линия 1).

Как правило, детали ВФФВ соединяются клеевым способом и для обеспечения условия собираемости устройства предусматриваются технологические воздушные зазоры. В W-диапазоне частот эти зазоры не являются пренебрежимо малыми.

Рассчитаны зависимости коэффициента отражения волны от относительной толщины слоя клея δ/λ , соединяющего торец ферритового стержня с $\epsilon_{\Phi}=15,2$ и диэлектрическую вставку 3 с $\epsilon=10$. Расчет выполнен для 1 – $\epsilon_{к}=1,0$; 2 – $\epsilon_{к}=2,5$; 3 – $\epsilon_{к}=3,8$; 4 – $\epsilon_{к}=5,0$. Показано, что при увеличении толщины слоя клея до $\delta/\lambda=0,05$ и уменьшении его диэлектрической проницаемости $\epsilon_{к}$ коэффициент отражения волны рабочего типа увеличивается до $R=0,3$. При клеевом соединении деталей ВФФВ необходимо минимизировать толщину слоя клея до практически реализуемой из технологических соображений. Для разработанных ВФФВ проведена оценка

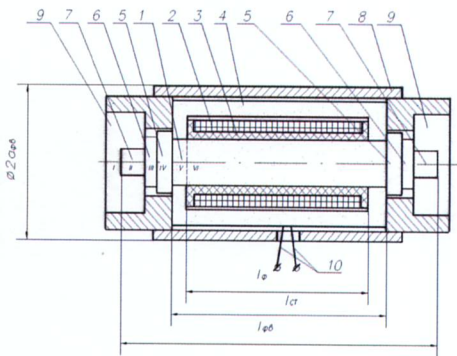
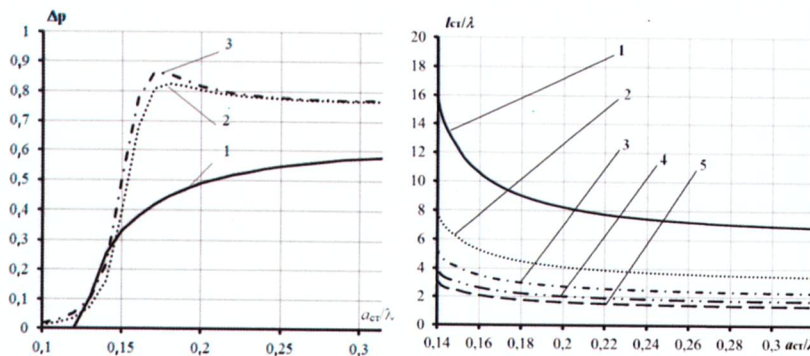


Рис. 3. ВФФВ



а)

б)

Рис. 4. Зависимость $\Delta p(a_{\text{сг}}/\lambda)$ при $\mu_2=0,15$ (а) и длины $l_{\text{сг}}(a_{\text{сг}}/\lambda)$ при разных μ_2 (б)

быстродействия и энергопотребления. Полный цикл перемагничивания ФВ на основе ФС без токопроводящего покрытия боковой поверхности, ограничивается только индуктивностью обмотки намагничивания и для ФВ W-диапазона не превышает 10 мкс, а энергия, затрачиваемая на перемагничивание ферритового блока ограничивается только потерями на гистерезис и составляет порядка 10 мкДж. Установлено, что наличие немагнитных зазоров между башмаками ферритовых скоб и боковой поверхностью ФС толщиной более 3 мкм снижает остаточную индукцию ФС, а следовательно и активность ФВ на 10%. Следствием этого является увеличение длины ФС и потерь, вносимых ФВ и энергии, затрачиваемой на перемагничивание.

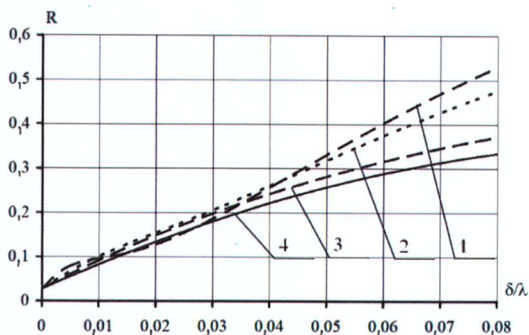


Рис. 5. Зависимость R от толщины δ/λ

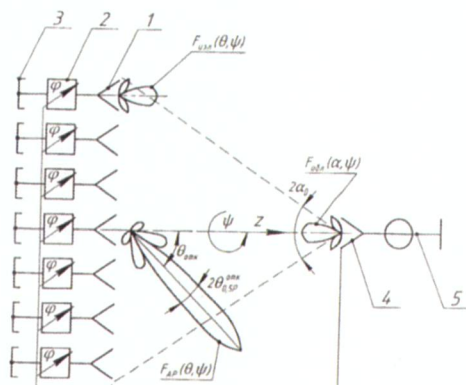


Рис. 6. Схема ОФАР

На основе приведенных исследований разработаны ВФФВ для W-диапазона частот, изготовлена опытная партия фазовращателей и проведены их экспериментальные исследования. Контролировались параметры: начальная фаза $\varphi_{\text{нач}}$, крутизна фазовой характеристики, максимальный регулируемый фазовый сдвиг $\Delta\varphi_{\text{макс}}=360^\circ$, КСВН $K_{\text{сгУ}} \leq 1,4$ и вносимые потери $L \leq 3$ дБ. ВФФВ с неметаллизированным ФС имеет диаметр $1,22\lambda$ и длину $3,6\lambda$, а при металлизации ФС диаметр уменьшается до $0,7\lambda$, а длина увеличивается до $4,2\lambda$ для элемента ОФАР.

В четвертой главе приводятся результаты разработки и экспериментальных исследований интегрированных элементов ФАР, построенных на основе описанных в главе 3 фарадеевских ФВ, и макета ФАР коротковолновой части ММДВ. Обосновано применение в указанном диапазоне частот отражательной схемы построения ФАР. В ОФАР (Рис. 6) СУЛ размещается на тыльной стороне антенной решетки, а элементы могут располагаться вплотную друг к другу.

Для подтверждения правильности полученных теоретических и численных результатов макет ОФАР спроектирован с целью формирования ДН с шириной главного лепестка $2\theta_{0,sp}=4^\circ$ с уровнем боковых лепестков не выше минус 20 дБ и со сканированием луча в секторе $-15^\circ \leq \theta \leq +15^\circ$. Антенная решетка должна иметь диаметр круглого раскрыва $2R \approx 17,5\lambda$ и при плотном расположении - не менее $N_{мин}=150$ излучателей диаметром $d_s=1,25\lambda$ в узлах сетки с гексагональной ячейкой. Поскольку при таком шаге АР неизбежно возникновение в ее ДН побочных главных лепестков, то для их подавления решена задача синтеза диаграммы направленности рупорно-диэлектрических излучателей с учетом их взаимного влияния в АР.

На Рис. 7 представлена схема построения элемента ОФАР, выполненного на основе ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности [6].

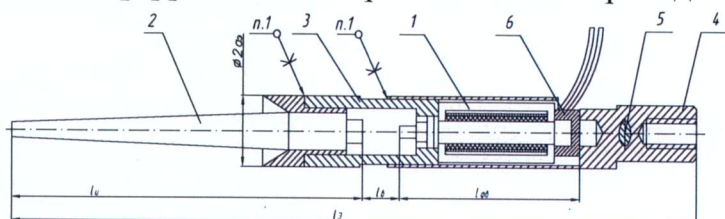


Рис. 7. Элемент ОФАР

Элемент включает ВФФВ 1, РДИ 2, волновод 3 и короткозамыкатель 6. Элемент ОФАР (патент РФ №2474018, п.1) отличается простотой сборки клеевым способом в п. 1, возможностью до сборки независимо решать задачи

согласования РДИ и ВФФВ с волноводом 3. В качестве излучателя для интегрированного элемента ОФАР выбрана диэлектрическая стержневая антенна, возбуждаемая коническим рупором. Моделирование РДИ выполнено на основе метода конечных элементов с использованием вычислительного пакета Ansoft HFSS. При диэлектрической проницаемости материала $\epsilon_n=2,56$ длина излучателей варьировалась в пределах $l_n=(1-7)\lambda$. Установлено, что для подавления побочного главного лепестка ДН антенной решетки с шагом $d_\Delta=1,25\lambda$ до уровня минус 20 дБ диэлектрический излучатель должен иметь длину конической части $L_k=(4-5)\lambda$. На

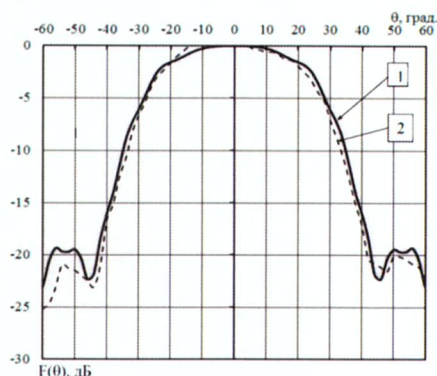


Рис. 8. ДН излучателя в АР

Рис. 8 для сравнения приведены 1 – расчетная и 2 – экспериментальная ДН РДИ с учетом взаимного влияния в АР, показывающие хорошее совпадение в области главного лепестка. На Рис. 9 показан макет интегрированного элемента ОФАР, построенного по схеме Рис. 7 на основе ВФФВ Рис. 3. По результатам проведенных исследований изготовлена партия интегрированных элементов, из которых был собран макет ОФАР (Рис. 10), включающий 151 элемент, передающий и приемный волноводные тракты, селектор поляризации, $\pi/2$ -поляризатор и рупорный облучатель.

Для экспериментального исследования макета ОФАР разработан и создан измерительный стенд, схема которого показана на Рис. 11. Стенд включает макет ОФАР с СУЛ и облучателем 2, опорно-поворотное устройство ОПУ, персональный компьютер РС, автоматический измеритель ослабления АИО и передающий рупор 1. Измерения проводились в безэховой камере.

В связи с наличием погрешностей базирования ВФФВ, ВДИ и интегрированных элементов, приводящих к ошибкам фазового распределения по излучателям разработана методика поэлементной настройки ФАР, не требующая

предварительной информации о характеристиках ВФФВ. Установлено, что при динамическом диапазоне аппаратуры АИО Г (0-25) дБ максимальное число элементов ФАР, допускающее ее автоматическую настройку, составляет порядка $N=2 \cdot 10^2$.

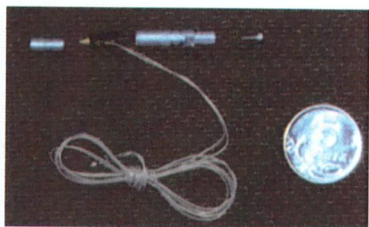


Рис. 9. Макет элемента ФАР



Рис. 10. Модель ОФАР

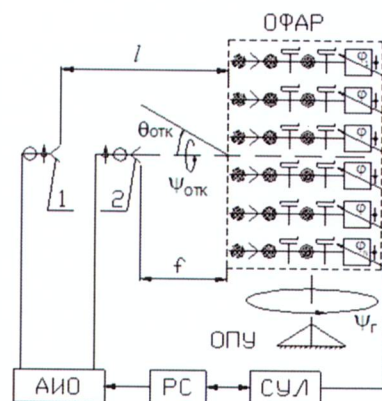
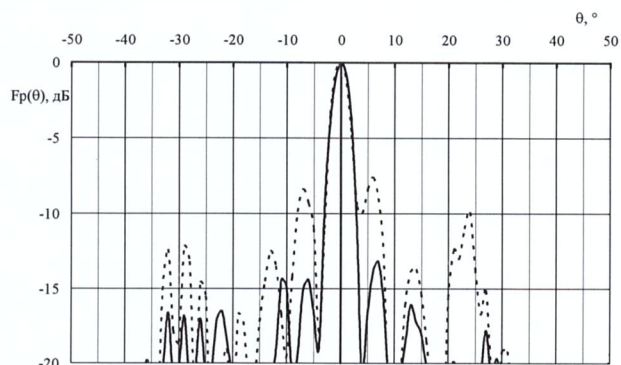
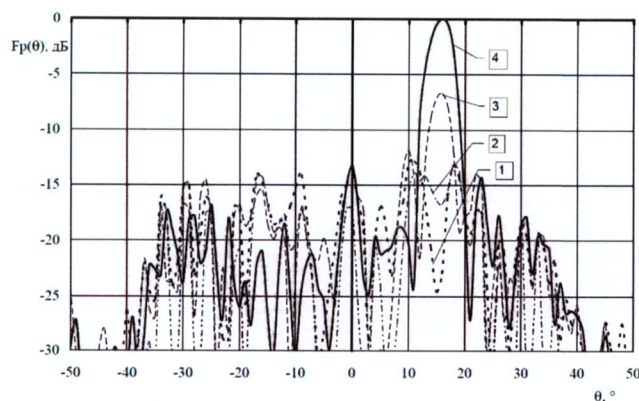


Рис. 11. Измерительный стенд

Эффективность применения методики настройки ОФАР иллюстрируется на Рис. 12, где приведены экспериментальные диаграммы направленности синфазной ОФАР. Штриховой линией обозначена ДН, измеренная при фазировании элементов ОФАР в соответствии с характеристиками ВФФВ. Высокий уровень боковых лепестков является следствием влияния погрешностей сборки макета ОФАР. Сплошной линией показана ДН синфазной ОФАР, сфазированной в соответствии с разработанной методикой поэлементной настройки. Ширина главного лепестка $2\theta_{0,5P}=4^\circ$ точно соответствует расчетному значению. Повышенный уровень боковых лепестков является следствием затенения апертуры ОФАР облучателем и его трактом. На Рис. 12, б приведены диаграммы направленности ОФАР при отклонении главного лепестка на угол $\theta_{ск}=16^\circ$: 1 – расфазированная ФАР; 2 и 3 – частично сфазированная ФАР; 4 – ФАР, сфазированная в заданном направлении.



а)



б)

Рис. 12. Экспериментальные ДН ОФАР в неотклоненном положении луча (а) и при отклонении на угол $\theta=16^\circ$ (б)

Наряду с измерением ДН ОФАР было проведено измерение ее коэффициента усиления методом замещения ее эталонным рупором с диаметром раскрытия 10λ . Экспериментально определенный КУ макета ОФАР составил $G_{\text{ОФАР}}^\Sigma=26,1$ дБ. За вычетом известных потерь, вносимых трактом облучателя, селектором поляризации и

$\pi/2$ -поляризатором собственный коэффициент усиления синфазной ОФАР составил $G_{0\text{ ФАР}}=28,1$ дБ, что соответствует коэффициенту эффективности синфазной ФАР $\mu_{\text{ФАР}}$, рассчитываемый по формуле $\mu_{\text{ФАР}} = G_{0\text{ ФАР}}/D_0$, где D_0 – КНД синфазно и равноамплитудно возбужденного круглого раскрыва диаметром, равным диаметру раскрыва ФАР $17,5\lambda$, составляет $\mu_{\text{ФАР}}=0,25$, что является хорошей характеристикой для ОФАР W-диапазона с фарадеевскими ФВ и РДИ.

В общих выводах и заключении сформулированы следующие основные результаты работы.

1. Выполненный в главе 1 обзор и патентный поиск существующих конструкций волноводных ферритовых фазовращателей, интегрированных элементов на их основе и ФАР подтвердил актуальность проблемы исследования и разработки фазовращателей коротковолновой части миллиметрового диапазона волн и необходимость создания метода расчета, позволяющего решать конструкторские и технологические проблемы, возникающие в процессе разработки волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей рассматриваемого диапазона волн.

2. В строгой электродинамической постановке методом Галеркина решена ключевая для разработки ВФФВ задача о собственных волнах волновода с поперечно-неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании с использованием в процедуре проецирования как дифференциального магнитного оператора второго порядка (глава 2), так и оператора первого порядка (оператора Максвелла) (приложение).

3. Задача нахождения полей собственных волн волновода, адекватного исследуемому ВФФВ, сведена к решению полной проблемы собственных значений комплексной матрицы общего вида. Вычислительный алгоритм решения, реализованный в виде программы для ЭВМ на языке DELPHI, в одной процедуре дает численные значения как коэффициентов разложения полей в виде собственных векторов матрицы, так и коэффициентов распространения волн в виде ее собственных значений.

4. Выполненный анализ частных случаев волноводов с поперечно-неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением, сравнение с известными решениями, исследование сходимости решения и оценка точности расчетов подтвердили высокую эффективность разработанного вычислительного алгоритма.

5. В широком диапазоне изменения параметров волноводов (размеров сечения, длины волны, диэлектрической проницаемости, элементов тензора магнитной проницаемости) рассчитаны дисперсионные характеристики волн волновода квадратного сечения с соосным диэлектрическим и продольно намагниченым ферритовым стрежнем, а также волновода, полностью заполненного продольно намагниченной ферритовой средой.

6. Разработанная эффективная методика расчета характеристик волноводного ферритового фазовращателя с учетом влияния ряда факторов, возникающих при изготовлении деталей ВФФВ и его сборки, например, воздушных и клеевых зазоров.

7. Впервые разработан волноводный ферритовый фарадеевский фазовращатель W-диапазона частот с магнитной памятью для интегрированных элементов как проходных так и отражательных ФАР.

8. ВФФВ, выполненный на основе ферритового стержня без токопроводящего покрытия боковой поверхности конструктивно прост, технологичен, для изготовления его деталей и их сборки нет необходимости использовать сложные

технологические операции, обычно необходимые при производстве ВФФВ с металлизированным ферритовым стержнем.

9. Фазовращатель отличается улучшенными энергетическими характеристиками: полный цикл его перемагничивания составляет 10 мкс, а затрачиваемая при этом энергия не превышает 10 мкДж.

10. По разработанной технической документации изготовлена опытная партия ВФФВ в количестве 170 шт., испытания которой показали хорошую повторяемость характеристик устройств по согласованию ($K_{ст\alpha} \leq 1,4$), вносимому фазовому сдвигу ($\Delta\varphi \geq 400^\circ$) и вносимому ослаблению ($L \leq 3$ дБ).

11. Предложена новая схема построения интегрированного элемента отражательной ФАР, включающего независимо тестируемые ВДИ, ВФФВ и короткозамыкатель в виде закороченного на торце отрезка запредельного волновода (патент РФ №2474018, п.2 формулы).

12. Экспериментальные исследования макета отражательной ФАР из 151 интегрированного элемента показали хорошее совпадение по форме и ширине главного лепестка ДН как в нормальном положении луча шириной $2\theta_{0,5P} = 4^\circ$, так и при отклонении его на угол $\theta_{ск} = 16^\circ$. Измеренное значение коэффициента усиления равно $G_0 = 28,1$ дБ свидетельствует о хорошей эффективности ОФАР (коэффициент эффективности $\mu_3 = 0,25$).

13. Приведенные в главах 3 и 4 результаты экспериментальных исследований подтвердили достоверность полученных в главах 2, 3 и 4 расчетов и доказали практическую реализуемость волноводных ферритовых фарадеевских фазовращателей, интегрированных элементов ФАР на их основе и фазированных антенных решеток коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

В приложении представлен алгоритм расчета характеристик собственных волн волновода с поперечно неоднородным феррито-диэлектрическим заполнением при продольном намагничивании методом Галеркина с использованием оператора первого порядка.

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Крехтунов В.М., Андропов Е.В., Комиссарова Е.В. Волноводный ферритовый фазовращатель для ФАР на частоту 94 ГГц // Антенны. 2001. №8. С. 28-33. (0,72 п.л. / 0,24 п.л.).

2. Комиссарова Е.В., Крехтунов В.М. Обобщение опыта разработки элементной базы фазированных антенных решеток коротковолновой части миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями // Антенны. 2014. №4. С. 38-42. (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).

3. Исследование быстродействующих отражательных волноводных ферритовых фазовращателей КВЧ диапазона / Комиссарова Е.В.[и др.] // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/248297.html> (дата обращения 27.11.2011). (0,56 п.л. / 0,14 п.л.).

4. Комиссарова Е.В., Крехтунов В.М. Оптимизация волноводных ферритовых фазовращателей трехмиллиметрового диапазона волн // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. С. 98-105. (0,7 п.л. / 0,35 п.л.).

5. Разработка элементов проходной и отражательной фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона волн с ферритовыми фазовращателями //

Комиссарова Е.В. [и др.] / Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. Спец. вып. Антенны и устройства радио- и оптического диапазонов. С. 105-117. (1,2 п.л. / 0,24 п.л.).

6. Элемент фазированной отражательной антенной решетки: пат. 2474018. Россия / Е.В. Комиссарова, В.М. Крехтунов. Заявл. 30.12.2010; Опубл. 27.01.2013. Бюл. №3 // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Федеральной службы по интел. собств.

7. Элемент фазированной антенной решетки W-диапазона / Комиссарова Е.В. [и др.] // 11-я Междунар. конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. Севастополь (Украина), 2001. С. 333-335. (0,33 п.л. / 0,08 п.л.).

8. Волноводный ферритовый фазовращатель миллиметрового диапазона волн / Комиссарова Е.В. [и др.] // 11-я Междунар. конф. СВЧ техника и коммуникационные технологии: Материалы конф. Севастополь (Украина), 2001. С. 336-338. (0,33 п.л. / 0,08 п.л.).

9. Крехтунов В.М., Комиссарова Е.В., Яковлев И.А. Исследование ФАР W-диапазона с ферритовыми фазовращателями // 13-я Междунар. конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. Севастополь (Украина), 2003. С. 32-34. (0,33 п.л. / 0,11 п.л.).

10. Крехтунов В.М., Комиссарова Е.В., Русов Ю.С. Методика настройки фазированной антенной решетки КВЧ диапазона // 14-я Международная конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. Севастополь (Украина), 2004. С. 329-330. (0,23 п.л. / 0,08 п.л.).

11. Комиссарова Е.В., Крехтунов В.М. Элементы фазированных антенных решеток с ферритовыми фазовращателями W-диапазона // 17-я Междунар. конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. Севастополь (Украина), 2007. С. 380-381. (0,23 п.л. / 0,12 п.л.).

12. Исследование ферритовых фазовращателей W-диапазона высокого уровня мощности / Комиссарова Е.В. [и др.] // 18-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. в 2-х т. Севастополь (Украина), 2008. Т.2. С. 451-453. (0,23 п.л. / 0,06 п.л.).

13. Быстродействующий отражательный волноводный ферритовый фазовращатель / Комиссарова Е.В. [и др.] // 21-я Междунар. конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. в 2-х т. Севастополь (Украина), 2011. Т.2. С. 637-638. (0,23 п.л. / 0,06 п.л.).

14. Комиссарова Е.В. Разработка элементов ФАР КВЧ диапазона с повышенным быстродействием и пониженным энергопотреблением // 23-я Междунар. конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. в 2-х т. Севастополь (Украина), 2013. Т.2. С. 576-578. (0,23 п.л.).

15. Крехтунов В.М., Будкин А.А., Комиссарова Е.В. Дифракция электромагнитных волн на двумерно-периодической антенной решетке волноводно-диэлектрических излучателей // 24-я Междунар. конф. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: Материалы конф. в 2-х т. Севастополь (Россия), 2014. Т.1. С. 535-536. (0,23 п.л. / 0,08 п.л.).

16. Комиссарова Е.В., Будкин А.А., Крехтунов В.М. Электродинамическое моделирование элемента фазированной антенной решетки W-диапазона // 19-я Междунар. конф. Радиолокация, навигация, связь: Материалы конф. Воронеж (Россия), 2013. С. 4143-4150. (0,69 п.л. / 0,23 п.л.).

Полный список работ представлен в диссертации.