

На правах рукописи



ГУЗЕНКО Константин Викторович

**ВОЛНЫ В МНОГОСЛОЙНОЙ НЕВЗАИМНОЙ
ФЕРРИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ**

Специальность 01.04.03 — Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2003

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет».

Научный руководитель — кандидат технических наук, профессор
Зайцев Эрнст Фёдорович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Симовский Константин Руфович
кандидат физико-математических наук Генералова Юлия Евгеньевна

Ведущая организация — НИИ «Домен»

Защита состоится «___» ноября 2003 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, корп. II, ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан «___» октября 2003 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.229.01

доктор физ.-мат. наук, профессор



Водоватов И.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Многие радиотехнические системы используют в своей работе направленные антенны с электрически управляемым положением луча. Примером таких антенн являются фазированные антенные решетки (ФАР). Классические ФАР выполняются на основе дискретных элементов (излучателей, фазовращателей и т. д.). Такое их построение придаёт им ряд существенных недостатков: достаточно высокая стоимость (порядка 50–100 долларов на элемент при наличии сотен и тысяч элементов в решетке); сложная система управления (необходима мощная ЭВМ); размеры дискретных элементов ФАР должны быть достаточно малы по сравнению с длиной волны, что допускает использование обычных ФАР лишь до сантиметрового диапазона ввиду невозможности дальнейшей миниатюризации элементов. В связи с освоением миллиметрового диапазона волн (ММВ) задача создания антенных систем, обладающих простым электрическим управлением положением луча в этом диапазоне и низкой стоимостью, представляется очень актуальной.

Одним из вариантов реализации электрического сканирования в диапазоне ММВ является использование антенн бегущей волны (АБВ) с электрическим сканированием за счёт управления фазовой скоростью. Перспективным направлением в этой области является использование волноводов, содержащих намагниченные ферриты.

Ферритодиэлектрические структуры (ФДС), исследуемые в диссертационной работе, позволяют разрабатывать на их базе дешевые и простые в управлении сканирующие АБВ практически во всем миллиметровом диапазоне — интегральные фазированные антенные решетки (ИФАР), что и дает возможность сделать заключение об актуальности работы.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование многослойного ферритодиэлектрического волновода,

содержащего поперечно намагниченный феррит.

Задачей теоретического исследования является построение адекватной математической модели волновода, позволяющей исследовать все типы волн, существующих в нём, степень их управляемости при изменении намагниченности ферритовых слоёв, а также осуществлять оптимизацию характеристик структуры с точки зрения, например, максимизации управляемости и минимизации потерь путём подбора количества и параметров слоёв (толщин, ширин, проницаемостей). Наличие такой модели избавит от необходимости в экспериментальном подборе этих параметров, который требует реального изготовления многочисленных образцов. Моделирование волноводного перехода со стандартного питающего волновода на ферритодиэлектрический волновод также входит в цели теоретического исследования. Модель перехода, позволяющая рассчитывать распределение амплитуд возбуждения мод в ФДС, позволит оптимизировать его конструкцию для получения необходимого характера возбуждения.

Целью экспериментального исследования является разработка методики исследования различных свойств волновода, таких как модовый состав, параметры мод, существующих в ФДС (постоянные распространения, коэффициенты затухания), а также, в частности, однородности волновода по длине, что очень важно для технологического контроля в процессе сборки образцов ИФАР, и применение этой методики, в первую очередь, для проверки адекватности построенных теоретических моделей.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

1. Построена простая аналитическая модель ФДС, достаточная для качественного исследования явлений и эффектов в ИФАР и количественных расчетов параметров основной моды ФДС.
2. С применением метода Галеркина создана строгая численная модель исследуемой структуры, адекватная реальной физической системе.

3. Разработаны новые модели, позволяющие исследовать целый класс ферритодиэлектрических структур.
4. Предложена оригинальная методика проведения измерений и обработки результатов для экспериментального исследования открытых волноводов.

Положения, выносимые на защиту

1. Представленная простейшая модель позволяет найти аналитическое решение для упрощённой ферритодиэлектрической структуры. Этой модели достаточно для качественного исследования явлений и эффектов в ИФАР, а также для проведения количественных расчётов параметров основной (рабочей) моды ФДС.
2. Численная модель, построенная с применением метода Галёркина, адекватна реальной физической системе и позволяет определять необходимые характеристики всех мод, существующих в ФДС.
3. Достаточная точность расчётов параметров мод открытой структуры достигается уже при удалении вспомогательных экранов модели на половину длины волны от структуры. При этом не возникает дополнительных мод оболочки с замедлениями больше единицы.
4. Все построенные модели пригодны для структур с произвольным числом слоёв, произвольными комбинациями диэлектрических и ферритовых слоёв, что позволяет моделировать и исследовать целый класс ферритодиэлектрических структур.
5. Разработанная оригинальная методика проведения измерений и обработки их результатов позволяет регистрировать моды, существующие в открытом волноводе, определять их постоянные распространения и оценивать их коэффициенты затухания.

Научная значимость диссертационной работы определяется тем, что в ней построена теоретическая модель сложной ферритодиэлектрической структуры, позволяющая проводить оптимизацию ее параметров.

Разработанная методика проведения экспериментального исследования открытых волноводов позволяет определять параметры мод, существующих в волноводе и производить контроль однородности волновода по длине.

Практическая ценность заключается в том, что построенные модели ФДС и волноводного перехода, а также предложенная методика измерений позволяют совершенствовать существующие и создавать новые модификации ФАР сантиметрового и миллиметрового диапазонов с электрическим управлением положением луча.

Достоверность результатов работы подтверждается строгостью использованных методов расчета, соответствием данных, полученных аналитическими и численными методами, а также соответствием между результатами расчетов и экспериментов.

Внедрение результатов работы

Диссертационная работа выполнялась в СПбГПУ в течение 1996-2003 гг. Результаты, изложенные в диссертации, использованы при выполнении НИР по договорам №№ 901301, 901306, по госбюджетным НИР, гранту РФФИ № 02-02-26663, а также в рамках работ по международным программам Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития (US CRDF) RE1-185, RE1-510, RE1-2067 и TGP-740. В настоящее время результаты работы используются при выполнении НИР по договорам №№ 140901302, 140901303.

Апробация работы

Положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 14 научно-технических конференциях, в том числе на — Всероссийских:

II Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков,
1-3 декабря 1998 года, Санкт-Петербург;

III Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков,
30 ноября-2 декабря 1999 года, Санкт-Петербург;

IV Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков,
5-7 декабря 2000 года, Санкт-Петербург;

«Микроэлектроника и информатика - 2001» Восьмая всероссийская
межвузовская научно-техническая конференция студентов и
аспирантов, 18-19 апреля 2001 года, Москва;

«Фундаментальные исследования в технических университетах»
V Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы,
8-9 июня 2001 года, Санкт-Петербург;

— Международных:

«COMITE 2001» 11th International Conference on Microwave Technique,
September 18-19, 2001, Pardubice, Czech Republic;

«MIKON-2002» 14th International Conference on Microwaves, Radar and
Wireless Communications, May 20-22, 2002, Gdansk, Poland;

2002 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium,
June 16-21, 2002, San Antonio, Texas, USA;

«ICCSC 2002» 1st International Conference on Circuits and Systems for
Communications, June 26-28, 2002, Saint-Petersburg, Russia.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 17 работ.

Объем работы

Диссертация изложена на 89 страницах машинописного текста, основной текст содержит 82 страницы, включая 26 рисунков. Список литературы на 7 страницах содержит 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, показана ее научная значимость и практическая ценность,

изложено краткое содержание работы и положения, выносимые на защиту.

Введение содержит краткое описание ИФАР. Это разновидность антенн бегущей волны (рис. 1).

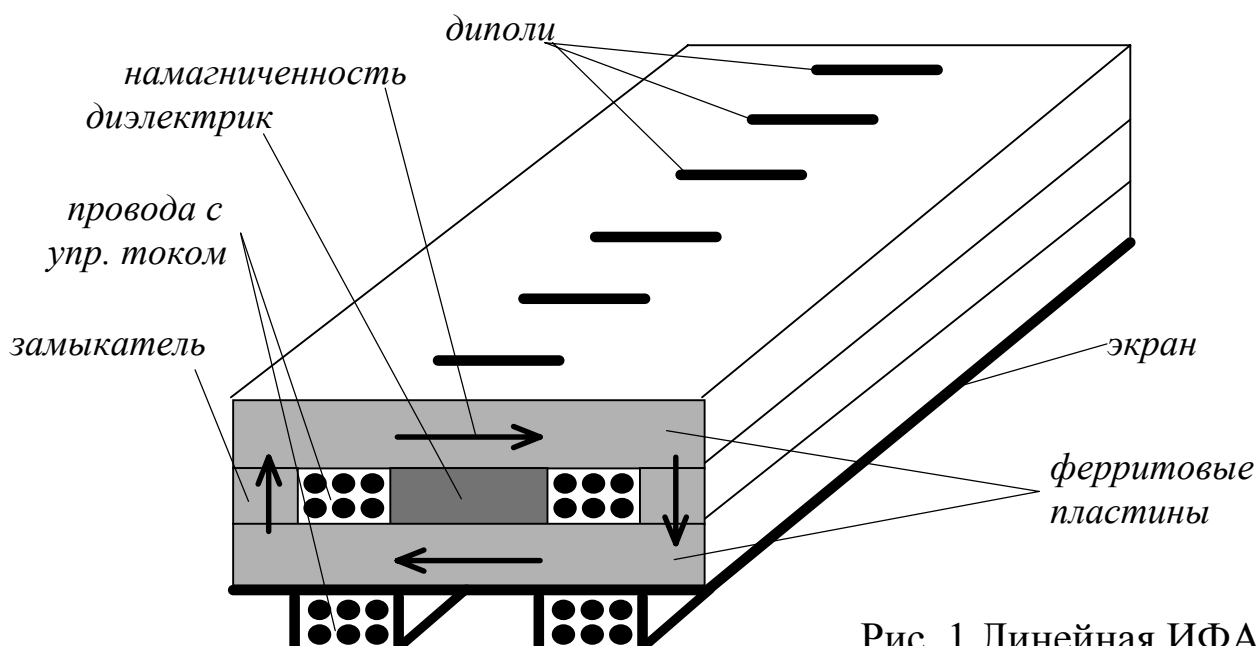


Рис. 1 Линейная ИФАР.

В простейшем варианте линейной ФАР, антенна представляет собой трёхслойный открытый волновод структуры феррит-диэлектрик-феррит, на которую с одной стороны нанесён металлический экран, а с другой — линейка излучателей, выполненных в виде металлических полосок (диполей) и возбуждаемых полем на внешней (открытой) поверхности структуры. Описанная структура с одного конца питается стандартным прямоугольным волноводом, а с другого — нагружена поглотителем. Фазировка решётки (разность фаз между соседними излучателями), определяющая положение луча, зависит от фазовой постоянной распространения волны в структуре, которая изменяется при изменении величины намагниченности феррита. Намагниченность же меняется под действием управляющего тока, провода с которым также входят в структуру. Для замыкания магнитного потока на краях структуры имеются специальные ферритовые замыкатели.

Имеются также варианты построения ИФАР с печатными (patch) излучателями, активных ИФАР, а также двумерных ИФАР, обеспечивающих

сканирование лучом как в одной, так и в двух плоскостях.

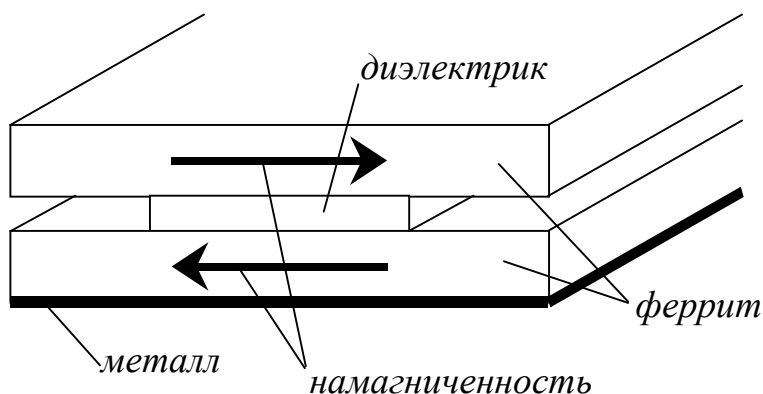
Также во введении кратко описывается общая теоретическая модель ИФАР, основанная на методе поэлементного анализа, составной частью которой является модель ФДС, разрабатываемая в данной работе.

Кроме того, введение содержит описание свойств ферритов на СВЧ и соответствующие формулы, которые используются в основной части работы.

В главе 1 на начальном этапе предлагается модель ФДС в виде планарной бесконечной трёхслойной структуры, экранированной с одной стороны. Изначально структура считается диэлектрической, что соответствует случаю немагнитных ферритовых слоёв. Для такого случая решение может быть найдено точно в аналитическом виде с применением метода эквивалентных длинных линий: каждому слою модели ставится в соответствие участок длинной линии с определёнными параметрами, полученная составная линия нагружается на концах на соответствующие граничным условиям структуры нагрузки. Постоянные распространения мод, существующих в исходной структуре, находятся из условия баланса сопротивлений (равенства нулю сопротивления в произвольном сечении линии). Распределения электрического и магнитного полей в слоях структуры определяются по соответствующим им распределениям напряжения и тока в эквивалентной линии. На следующем шаге безграничная модель модифицируется ограничением структуры по ширине путём установки стенок. Решение для такой модифицированной модели конструируется в виде суперпозиции волн, полученных в неограниченной структуре, распространяющихся под углом к оси волновода. Такое решение заведомо удовлетворяет условиям на границах слоёв. Граничные условия на боковых стенках приводят к появлению зависимости полей от второй поперечной координаты (тригонометрического вида) и изменению значений постоянных распространения (каждая мода безграничной модели порождает семейство мод модели конечной ширины). Использование в дальнейшем метода возмущений позволило

учесть намагниченность феррита и определить поправку к постоянной распространения и соответствующее ей отклонение луча антенны.

Вторая глава посвящена построению более точной модели исследуемой структуры со слоями различной ширины (рис. 2). В виду своей сложности она не допускает аналитического решения, поэтому в качестве метода решения поставленной задачи был избран метод Галёркина. Универсальность этого метода



позволяет точно учесть не только сложную геометрию поперечного сечения волновода, но также и намагниченность ферритовых слоёв. В основе этого метода лежит представление компонент электромагнитного поля искомого решения в виде разложений по

Рис. 2 Модель ФДС со слоями различной ширины.

некоторым системам линейно независимых базисных функций:

$$E_v(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{mn}^{(v)} \varphi_{mn}^{(v)}(x, y), \quad H_v(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M b_{mn}^{(v)} \psi_{mn}^{(v)}(x, y), \quad v = x, y, z. \quad (1)$$

Базисные функции $\varphi_{mn}^{(v)}(x, y)$, $\psi_{mn}^{(v)}(x, y)$ должны точно удовлетворять соответствующим граничным условиям на внешней границе поперечного сечения волновода, и их системы должны обладать необходимой полнотой для представления искомого решения.

Поскольку реальная ФДС является открытой (рис. 2), граничными условиями на границе её поперечного сечения являются условия на бесконечности. Системы базисных функций, удовлетворяющих таким граничным условиям, громоздки и неудобны в вычислениях. Поэтому, для упрощения, построение модели производится для полностью экранированной ФДС: открытая ФДС помещается в большой полый прямоугольный волновод (рис. 3). Вспомогатель-

ные стенки ставятся на таком расстоянии от волновода, на котором поле поверхностных волн структуры, сосредоточенное главным образом внутри и вблизи слоёв и экспоненциально затухающее при удалении от них, можно считать близким к нулю. Далее

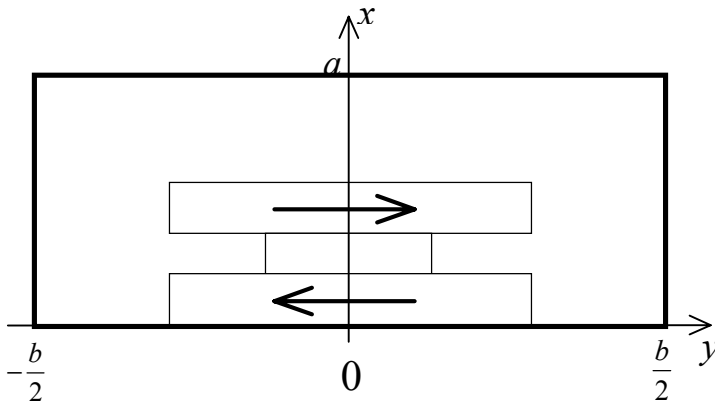


Рис. 3 Замыкание открытой ФДС
вспомогательными экранами.

тат близким к нулю. Далее из-бранный метод Галёркина применяется именно к полностью экранированной ФДС (рис. 3).

Граничные условия на новой замкнутой границе очень просты, и базисные функции могут быть легко выбраны. В

данной работе системы тригонометрических функций вида $\left\{ \begin{matrix} \sin \\ \cos \end{matrix} \right\} \frac{n\pi x}{a} \cdot \left\{ \begin{matrix} \sin \\ \cos \end{matrix} \right\} \frac{m\pi y}{b}$

были взяты для разложений компонент искомого поля. Подходящая комбинация синуса и косинуса для каждой компоненты поля определяется из соответствующего граничного условия. Эти базисные функции обладают необходимой полнотой (как тригонометрические функции) и очень удобны в вычислениях.

Уравнения Максвелла для решаемой задачи можно записать в общей операторной форме $\hat{L}^{(i)}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 6.$ (2)

В соответствии с процедурой метода Галёркина разложения (1) подставляются в левые части уравнений поля (2), полученные выражения домножаются на соответствующие базисные функции, интегрируются по поперечному сечению волновода и приравниваются нулю. В результате образуется однородная система линейных алгебраических уравнений вида

$$\iint_S \hat{L}^{(i)}(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \varphi_{kl}^{(i)}(x, y) dx dy = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (3)$$

для коэффициентов разложений, содержащая в качестве свободного параметра постоянную распространения. Условие нетривиальности решения этой системы уравнений даёт значения постоянных распространения мод, существующих

в ФДВ (собственные числа), для которых определяются соответствующие наборы коэффициентов разложений (собственные векторы). При известных коэффициентах разложений, используя (1), вычисляется поле в любой точке волновода и, соответственно, любая необходимая характеристика моды.

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию ферритодиэлектрической структуры. Здесь приводится описание использованной измерительной установки, которая позволяет снимать амплитудно-фазовое распределение (АФР) на поверхности исследуемого объекта. Разработана оригинальная методика обработки результатов измерений, с помощью которой возможно экспериментальное определение постоянных распространения и коэффициентов затухания мод ФДС и проведение исследований различных её свойств. Суть разработанной методики заключается в следующем. Из измеренных отсчётов амплитуды и фазы формируются отсчёты полной комплексной амплитуды поля. Далее они подвергаются преобразованию Фурье (в пространственной области). Теория предсказывает, что моды, существующие в ФДВ, имеют дискретные постоянные распространения, и что любая волна в волноводе является суперпозицией этих мод. Таким образом, на Фурье-спектре появляются отдельные пики, соответствующие модам, существующим в данном случае.

Для каждой моды спектр преобразуется таким образом, что остаётся только соответствующий пик: в области этого пика спектр сохраняется, а вне её заменяется нулевыми значениями. То есть производится фильтрация моды в пространственном спектре идеальным полосовым фильтром. Далее новый ("отфильтрованный") спектр подвергается обратному преобразованию Фурье. То есть получается АФР выбранной моды. Оно разделяется на амплитудное и фазовое распределения по отдельности. По амплитудному распределению с помощью линейной (в логарифмическом масштабе) аппроксимации легко определить коэффициент затухания. А по фазовому — также с помощью линейной аппроксимации — постоянную распространения.

С помощью описанной методики также возможно исследование других важных свойств волновода. Распределение уровней пиков мод в спектре может быть использовано для оптимизации входного узла, согласующего ФДС с питающим волноводом. Имеются планы по развитию предложенной методики для измерения коэффициента связи мод ФДС с излучателями. Рассмотрение АФР в различных местах поверхности ФДС позволяет судить о степени её неоднородности по длине, вызванной технологическими ошибками при производстве, что очень важно для контроля в процессе изготовления.

В этой главе также приводятся результаты теоретических расчётов и проведённых измерений. В результате сопоставления выявлено хорошее соответствие между рассчитанными и экспериментальными данными.

В главе 4 проведено моделирование входного волноводного трансформатора ИФАР с применением метода согласования мод (mode matching method). Трансформатор представляется в виде последовательного (каскадного) соединения участков различных волноводов. Основным элементом расчёта в такой конструкции является стык двух волноводов различного поперечного сечения, к которому и применяется упомянутый численный метод. Его суть состоит в том, что поле внутри каждого участка представляется в виде суперпозиции мод этого участка, а соответствующие амплитудные коэффициенты определяются из условия минимума невязки граничного условия в плоскости стыка. Параметры рассеяния каскада в целом рассчитываются последовательным пересчётом матрицы рассеяния от начала к концу последовательности. Построенная модель позволит в дальнейшем искать оптимальную конструкцию волноводного перехода среди большого множества вариантов, варьируя достаточно большое число параметров.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В представленной диссертационной работе проведён анализ много-

слоистых волноведущих структур, содержащих намагниченные ферриты.

Предложенная простейшая модель ФДС в виде многослойной структуры, экранированной с одной стороны и ограниченной по ширине магнитными стенками, хоть и являясь весьма грубой, позволяет качественно исследовать целый ряд явлений и эффектов в ИФАР: управляемость луча антенны, частотное сканирование, влияние возбуждения высших мод на ДН. Также она позволяет проводить достаточно точные количественные расчёты параметров основной (рабочей) моды ФДС: постоянной распространения, коэффициента затухания и параметра связи с излучателями. Существенными достоинствами простейшей модели являются возможность построения аналитического решения для неё (с помощью метода эквивалентных длинных линий), а также скорость расчётов и низкое потребление вычислительных ресурсов.

Для более детального и глубокого исследования свойств ФДС, в частности высших типов колебаний, существующих в ней, была построена более точная модель со слоями различной ширины. Ввиду своей сложности она не допускает аналитического решения, поэтому в качестве метода решения поставленной задачи был избран метод Галёркина. В результате вычислений с достаточно высокой точностью определяются необходимые характеристики мод, существующих в волноводе. Результаты вычислений устойчивы по отношению к изменению чисто модельных параметров (расстояния до вспомогательных экранов, количество функций разложения) и хорошо согласуются с результатами измерений, что свидетельствует об адекватности построенной модели реальной физической системе.

Расчёты по моделям реализованы в виде достаточно универсальных компьютерных программ, пригодных для моделирования структур с произвольным числом слоёв, произвольными комбинациями диэлектрических и ферритовых слоёв, что позволяет исследовать целый класс феррито-диэлектрических структур.

С применением амплифазометрического комплекса был поставлен эксперимент по исследованию ферритодиэлектрической волноведущей структуры. Разработана оригинальная методика обработки результатов измерений, с помощью которой возможно экспериментальное определение параметров каждой моды волновода. Проведено сравнение полученных результатов расчётов с данными эксперимента. Выявлено хорошее соответствие. С помощью описанной методики также возможно исследование других важных свойств волновода, в частности его однородности по длине, что очень важно для технологического контроля в процессе сборки образцов ФДС и ИФАР.

Представленная экспериментальная методика применима к достаточно широкому классу открытых волноводов. Она реализована в виде пакета программ для обработки результатов измерений и проведения исследований различных видов.

С применением метода согласования мод (mode matching method) проведено моделирование входного волноводного трансформатора ИФАР с целью получения возможности расчёта амплитуд возбуждения мод на входе ФДВ. Предложенная модель и соответствующая расчётная программа в силу своей достаточно широкой универсальности позволяет моделировать различные волноводные соединения и каскады и искать оптимальную конструкцию волноводного перехода среди большого множества вариантов, варьируя достаточно большое число параметров.

Главными результатами работы являются расчётные программы моделирования ферритодиэлектрического волновода и входного трансформатора со стандартного волновода на него, а также методика проведения экспериментальных исследований и обработки результатов измерений. Модели позволяют рассчитывать важнейшие характеристики ФДВ: постоянные распространения, коэффициенты затухания, параметры связи с излучателями и амплитуды возбуждения мод, существующих в нём.

Разработанная экспериментальная методика позволяет проводить исследования целого ряда свойств волновода, а также осуществлять технологический контроль при его сборке. В дальнейшем предполагается использование этих инструментов для детального исследования свойств ФДФ-волновода и оптимизации его конструкции с точки зрения антенных характеристик ИФАР.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Гузенко К.В., Щербаков Я.Ю. Моделирование многослойного ферритодиэлектрического волновода с электрически управляемым замедлением // II Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тезисы докладов. 1-3 декабря 1998 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. СС. 35-37.

2. Гузенко К.В., Зайцев Э.Ф. Многослойный ферритодиэлектрический волновод с электрически управляемым коэффициентом замедления // XXVII Неделя науки СПбГТУ, Ч. V: Материалы межвузовской научной конференции. 7-12 декабря 1998 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. СС. 6-7.

3. Гузенко К.В. Анализ невзаимной многомодовой волноведущей структуры с электрически управляемым замедлением методом Галёркина // III Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тезисы докладов. 30 ноября-2 декабря 1999 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. СС. 36-38.

4. Гузенко К.В., Зайцев Э.Ф. Анализ волн, распространяющихся в трёхслойном ферритодиэлектрическом волноводе, методом Галёркина // XXVIII неделя науки СПбГТУ, Ч. V: Материалы межвузовской научной конференции. 6-11 декабря 1999 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. СС. 8-10.

5. Гузенко К.В. Расчёт волн, распространяющихся в трёхслойной

невзаимной многомодовой волноведущей структуре, методом Галёркина // Итоговый семинар по физике и астрономии по результатам конкурса грантов 1999 года для молодых учёных Санкт-Петербурга: Тезисы докладов. 15 февраля 2000 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во ФТИ, 2000. СС. 39-40.

6. Гузенко К.В., Зайцев Э.Ф. Моделирование многослойного невзаимного волновода // На рубеже веков: итоги и перспективы: Материалы XXXIV научной студенческой конференции ЧувГУ. 16-24 марта 2000 года, Чебоксары. Чебоксары: Чуваш. ун-т, 2000. СС. 154-156.

7. Гузенко К.В. Методика экспериментального исследования открытых волноводов // IV Всероссийская научная конференция студентов-радио-физиков: Тезисы докладов. 5-7 декабря 2000 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. СС. 32-34.

8. Гузенко К.В. Сканирующая антенная решётка миллиметрового диапазона волн // Микроэлектроника и информатика - 2001. Восьмая всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. 18-19 апреля 2001 года, Москва. М.: МИЭТ, 2001. С. 54.

9. Гузенко К.В., Гуськов А.Б. Учёт дисперсии материалов при численном анализе ферритодиэлектрического волновода // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. 8-9 июня 2001 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. СС. 128-129.

10. Guzenko K.V., Zaitsev E.F., Guskov A.B. Theoretical and Experimental Research of Layered Non-Reciprocal Ferrite-Dielectric Waveguide // Proc. COMITE 2001, Pardubice, Czech Republic, September 18-19, 2001, pp. 167-170.

11. Гузенко К.В. Анализ неточностей стыковки участков ферритодиэлектрического волновода в интегральной фазированной антенной решётке (ФАР) для систем ближней радиолокации и связи // Итоговый семинар по

физике и астрономии по результатам конкурса грантов 2001 года для молодых учёных Санкт-Петербурга: Тезисы докладов. 7 февраля 2002 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во ФТИ, 2002. СС. 37-38.

12. Гузенко К.В., Зайцев Э.Ф. Сканирующая интегральная фара миллиметрового диапазона волн // II Политехнический симпозиум "Молодые ученые — промышленности Северо-Западного региона", Конференция "Технические науки — промышленности региона". Тезисы докладов. 22 февраля 2002 года, Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002.

13. K.V. Guzenko, E.F. Zaitsev Numerical Model of Complex Waveguide Transducer // Proc. MIKON-2002, Gdansk, Poland, May 20-22, 2002, vol. 2, pp. 488-491.

14. K.V. Guzenko, E.F. Zaitsev Modeling of a Complex Waveguide Transducer // 2002 IEEE AP-S International Symposium Digest, San Antonio, Texas, USA, June 16-21, 2002, vol. 1, pp. 180-183.

15. E.F. Zaitsev, A.B. Guskov, A.S. Cherepanov, K.V. Guzenko Perspectives of Use of Three-Layer Ferrite-Dielectric Waveguides for Creation of Integrated Antennas with Narrow Beam // Proc. ICCSC 2002, Saint-Petersburg, Russia, June 26-28, 2002, pp. 354-357.

16. Гузенко К.В. Численная модель сложного волноводного перехода в интегральной фазированной антенной решётке для систем ближней радиолокации и связи // VII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых учёных и специалистов. Аннотации работ по грантам Санкт-Петербургского конкурса 2002 г. для студентов, аспирантов и молодых специалистов. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. С. 84.

17. К.В. Гузенко, Э.Ф. Зайцев Волны в многослойном ферритодиэлектрическом поперечно намагниченном волноводе с электрически управляемым коэффициентом замедления // Журнал Технической Физики, т. 73, №9, 2003. СС. 95-100.