

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.396.67

КУДИН
Виктор Пантелеевич

**ПРОВОЛОЧНЫЕ АНТЕННЫ, РЕШЕТКИ И РАССЕЙВАТЕЛИ.
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности
05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Минск 2010

Работа выполнена на Республиканском научно-исследовательском унитарном предприятии «Луч»

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ – УШАКОВ Юрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиофизика и электроники», учреждение образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: ЮРЦЕВ Олег Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Антенны и устройства СВЧ», учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

МИХНЕВ Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией радиоволновых методов контроля, государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси»

ГРИНЧИК Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отделения теплофизики, государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси»

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – государственное учреждение «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Защита состоится 23 декабря 2010 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П.Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автореферат разослан « »ноября 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
к.т.н., доцент

Н.В. Тарченко

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Антенная техника и технология стремительно развиваются в интересах создания перспективных систем радиолокации, радиосвязи, радиовещания, телевидения, передачи данных, как специального назначения, так и широкого применения. При этом расширяется спектр предоставляемых услуг электросвязи, ужесточается конкурентная обстановка и, следовательно, возрастает сложность решаемых задач.

Экспериментальная отработка антенных устройств требует дорогостоящего оборудования и приборов, наличия антенного полигона или безэховых камер, часто больших размеров, занимает много времени и вместе с тем не может дать исчерпывающей информации об исследуемых системах и явлениях.

С другой стороны, растет мощь вычислительной техники, совершенствуются старые и создаются новые методы анализа и синтеза антенн, появляются возможности получить быстро и качественно новые результаты. Роль электродинамического моделирования непрерывно возрастает.

В последнее время в мире появился целый ряд универсальных и достаточно мощных программ для анализа антенных систем – FEKO, HFSS, CST STUDIO, MMANA. Вместе с тем, их возможности ограничены то требованиями к оперативной памяти, то недопустимо большими затратами процессорного времени, то волновыми размерами исследуемых тел. Анализ больших решеток вообще затруднителен. В некоторых случаях результаты, полученные по разным программам, отличаются и довольно существенно. Не следует сбрасывать со счетов и высокую стоимость зарубежных программ и вытекающую из этого задачу импортозамещения.

Поэтому задача создания эффективных, удобных и надежных методов, алгоритмов и вычислительных программ, позволяющих в короткие сроки провести необходимое электродинамическое моделирование требуемых устройств и систем, является актуальной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Исследования проводились в интересах создания антенно-фидерных устройств специального назначения:

- ФАР РЛС «Волга» – высокопотенциальной РЛС для системы предупреждения о ракетном нападении,

- приемной и передающей антенных решеток загоризонтной РЛС поверхностной волны коротковолнового диапазона «Волна»,
- антенны вертикального зондирования ионосферы,
- передислоцируемой загоризонтной РЛС коротковолнового диапазона пространственной волны,
- подстилающих и формирующих рефлекторов для антенных решеток РЛС «Волна»,
- подстилающего рефлектора для антенны станции многопризнакового обнаружителя,
- антенно-фидерных систем по программе 707–403,
- ФАР с плотным расположением элементов в апертуре РЛС «Самара»,
- ФАР модульного построения РЛС «Руза».

С началом конверсии автор занимался разработкой новых перспективных передающих многоканальных телевизионных антенн ДМВ диапазона и антенн для ОВЧ-ЧМ радиовещания, составляющих в настоящее время основную часть продукции РНИУП «Луч» и поставляемых в различные страны.

Цель и задачи исследования

Целью работы является создание эффективных и универсальных методов электродинамического анализа произвольных проволочных антенн и решеток и разработка с их помощью антенных систем различного назначения. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ методов расчета проволочных антенн, рассеивателей и решеток и существующих проблем.
2. Разработать основные положения системного подхода к построению универсального и эффективного метода электродинамического анализа произвольных проволочных антенн и рассеивателей.
3. Разработать методы эффективного анализа многоэлементных фазированных антенных решеток на основе проволочных излучателей.
4. Разработать новые технические решения проволочных антенн и решеток различного назначения.

Объектом исследования являются антенны и рассеиватели произвольной формы, состоящие из тонких проводников, а также антенные решетки, линейные и плоские, для радиотехнических систем различного назначения.

Предметом исследования являются методы численного моделирования проволочных антенн и решеток.

Положения, выносимые на защиту

1. Универсальная система базисных функций для анализа произвольных конструкций из тонких проводников, отличающаяся от известных тем, что приводит к автоматическому выполнению условия Кирхгофа равенства нулю полного тока в узлах, где сходятся несколько проводников, и позволяет использовать минимальное число сегментов на длине волны.

2. Универсальный метод и алгоритм электродинамического анализа произвольных проволочных систем, основанный на решении интегрального уравнения Поклингтона методом Галеркина с использованием предложенной системы базисных функций. Метод дает новое качество – он предоставляет новые возможности для моделирования – позволяет рассмотреть геометрически сложные структуры с общей длиной проводников до 500 длин волн, ранее не поддающиеся электродинамическому анализу. Решение электродинамической задачи полностью формализовано: достаточно задать геометрию системы и стороннее возбуждение и в дальнейшем весь расчет – определение элементов, формирование матричных уравнений, решение, определение выходных параметров – происходит автоматически.

3. Метод расчета характеристик проволочных излучателей произвольной геометрии в составе плоской бесконечной ФАР. Отличительной особенностью метода, во-первых, является то, что он позволяет снять ограничения на класс решаемых задач, поскольку известные методы дают возможность вычислить элементы матрицы взаимных импедансов лишь для токовых гармоник, параллельных плоскости решетки. Во-вторых, для элементов матрицы взаимных импедансов получены быстросходящиеся ряды, что в итоге приводит к уменьшению затрат процессорного времени примерно на порядок или позволяет увеличить волновой размер и сложность исследуемых излучателей при тех же затратах процессорного времени.

4. Методы и алгоритмы исследования проволочных структур, обладающих симметрией определенного вида (поворотной, зеркальной), а также линейной антенной решеткой, в которых между соседними ячейками имеется гальванический контакт, реализуемый в виде общих узлов или проводников, позволяющие сократить как время расчета матричных элементов, так и общее время решения системы уравнений.

5. Интегральные уравнения для решения задачи о возбуждении плоскости с переменным импедансом, моделирующей наземный проволочный рефлектор с изменяющейся густотой ячейки, а также итерационные методы их решения с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье, свободные от трудоемкой процедуры нахождения матричных элементов.

6. Технические решения широкополосных с широкоугольным качанием луча плоских ФАР, разработанные на основе предложенных методов.

Исследование аномальных эффектов логопериодической вибраторной антенны и эффекта ослепления плоских решеток таких антенн. Впервые показано, что причиной запираания данных антенн в составе плоских ФАР является возбуждение на ряде частот синфазных волн в распределительном фидере.

Технические решения широкополосных многоканальных передающих телевизионных антенн дециметрового диапазона цельнометаллической и самонесущей конструкции.

Личный вклад соискателя

Основные результаты и положения диссертации, выносимые на защиту, разработаны и получены лично автором. В работах, которые выполнены в соавторстве, личный вклад автора заключается в постановке задач, проведении исследований, анализе и интерпретации результатов.

В список публикаций по теме диссертации включено 45 работ, из них 32 опубликовано автором самостоятельно, а 13 в соавторстве.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертацию, были доложены на: 24-й и 25-й Всесоюзных научно-технических конференциях по теории и технике антенн в г. Москве в 1985 г. и 1987 г. (8 докладов); международных научно-технических конференциях «Современные проблемы машиноведения» в ГГТУ им. П. О. Сухого (г. Гомель) в 2002 г. и 2006 г. (3 доклада); межвузовских научно-практических конференциях в УО ГФ «МИТСО» (г. Гомель) в 2003 г., 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2008 г. (7 докладов); II-й Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения в г. Минске в 2005 г. (2 доклада); XI-й и XIII-й Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь», (г. Воронеж) в 2005 г. и 2007 г. (2 доклада); 16-й и 17-й Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, Украина) в 2006 г. и 2007г. (2 доклада); 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07) Sevastopol, the Crimea, Ukraine, September 17-21, 2007, (1 report), 7th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'09), Lviv, Ukraine, Oct. 6–9, 2009, (2 reports).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 26 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Общий объем публикаций составляет 14,5 авторских листов. Результаты докладывались на различных конференциях и содержатся в 15 материалах конференций и 4 тезисах докладов.

Результаты работы отражены в 35 отчетах о НИР и НИОКР и использовались при написании 10 эскизных проектов по созданию спецтехники.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка, приложений.

В первой главе проведен аналитический обзор литературы по теме, указаны проблемы и нерешенные задачи, выбрано направление исследований. Во второй главе описывается предложенная автором универсальная система базисных функций и основанные на ней метод и алгоритм для численного анализа произвольных проволочных структур из тонких проводников. В третьей главе рассмотрены недостаточно изученные в литературе случаи симметрии проволочных структур, когда между соседними ячейками имеется гальванический контакт, реализуемый в виде общих узлов или проводников. Исследованы структуры с поворотной и зеркальной симметрией, а также линейная антенная решетка. В четвертой главе представлен новый метод расчета характеристик произвольных проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР с косоугольной ячейкой. В данной главе предложен также метод анализа ФАР модульного построения. Пятая глава посвящена разработке методов строгого электродинамического анализа проволочных рефлекторов. Шестая глава содержит результаты применения разработанных методов и алгоритмов для решения практических задач. Здесь рассмотрено поведение логопериодической вибраторной антенны как одиночной, так и в составе плоской ФАР. Подробно исследована диапазонная ФАР с широкоугольным качанием луча на основе спиральной антенны. Изучены решетки вибраторных антенн, в том числе двухканальные из турникетных излучателей. Проведено исследование в коротковолновом диапазоне волн характеристик рассеяния самолетов и баллистических ракет. Представлены результаты разработки двух широкополосных многоканальных передающих антенн дециметрового диапазона для теле- и радиоцен-

тров.

Общий объем диссертации составляет 267 страниц. В работе 118 рисунков и 6 таблиц на 49 страницах, а также 9 приложений с 7 иллюстрациями и 2 таблицами на 33 страницах. Список использованных библиографических источников насчитывает 440 наименований на 33 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко рассмотрено состояние вопросов по проблемам, связанным с темой диссертации, указывается на нерешенные задачи и имеющиеся трудности, обосновывается актуальность и необходимость проведения дальнейших исследований, развития существующих и создания новых методов электродинамического анализа проволочных антенн и решеток на их основе, обладающих необходимой универсальностью, удобством и эффективностью, достаточными для проведения расчетов различных по топологии и размерам проволочных конструкций в сжатые сроки, что крайне важно при создании новой техники.

В **первой главе** проведен обзор современного состояния и эволюции численных методов решения задач излучения и рассеяния, в частности, проволочных систем. Отмечается фундаментальная роль результатов, полученных в работах отечественных ученых: Г.З. Айзенберга, Л.Д. Бахраха, В.В. Бодрова, Е.Н. Васильева, Д.И. Воскресенского, И.А. Докукова, А.С. Ильинского, Г.Т. Маркова, А.В. Рунова, О.А. Юрцева, В.А. Яцкевича, а также зарубежных: K.G. Balmain, C.H. Butler, A.R. Djordjevic, E. Hallen, R.F. Harrington, R.W.P. King, K.K. Mei, R. Mittra, H. Nakano, E.H. Newman, H.C. Pocklington, V.D. Popovic, J.H. Richmond, J.R. Wait.

Анализ состояния методов исследования антенн и решеток показал, что основным подходом является сведение краевой задачи к интегральным (ИУ) или интегро-дифференциальным уравнениям. В общем случае эти уравнения могут быть решены только численными методами и в целом они достаточно хорошо изучены. Созданы эффективные процедуры их решения, распадающиеся на две большие группы: итерационные и аппроксимационные. Среди последних наиболее используемым является метод моментов. Исследованы вопросы выбора базисных и весовых функций, а также устойчивость, корректность и погрешности получаемых решений.

При анализе тонкопроволочных антенн и решеток на их основе широко используется модель осевого тока, позволяющая свести задачу к одномерным ИУ. В качестве базисных функций часто применяется кусочно-синусоидальный базис, дающий возможность уменьшить на единицу кратность интегралов. Во-

просы устойчивости, корректности и погрешности решений нашли также свое решение.

Проведенный обзор свидетельствует, что в целом в мировой науке на начало 80-х годов прошлого века сложилась определенная методология электродинамического анализа проволочных антенн и рассеивателей. Вместе с тем, потребности практики настоятельно диктовали необходимость разработки таких методов и подходов, которые были бы пригодны для анализа произвольных проволочных конструкций, независимо от их топологии, наличия петель, разветвлений и т. п. Другими словами, чтобы при анализе каждой новой антенны не было необходимости создавать заново алгоритм и новую вычислительную программу, а все происходило лишь на уровне входных данных, описывающих геометрию. Подобная универсальность непременно должна сочетаться с малыми вычислительными затратами. Указанные свойства позволяют достаточно оперативно проводить анализ и оптимизацию различных по топологии и размерам конструкций, что крайне важно при разработке новой техники.

Одним из путей решения данной проблемы является создание такой системы базисных функций, которая бы обладала следующими свойствами:

- 1) единообразно учитывала все особенности структуры (наличие петель, разветвлений и т. п.), в частности, учитывала выполнение условия Кирхгофа равенства полного тока в узлах;
- 2) позволяла использовать минимальное число сегментов на длине волны;
- 3) позволяла эффективно вычислять матричные элементы, что возможно, например, если они выражаются в аналитическом виде.

Следует отметить, что использование кусочно-постоянных (импульсных) функций в качестве базисных приводит к решению, удовлетворяющему условию Кирхгофа. К сожалению, данный базис по сравнению с другими требует значительно большего числа сегментов на длине волны, и, следовательно, порождает системы уравнений намного большей размерности.

Наличие того или иного вида симметрии, особенно при больших размерностях, также должно быть использовано, причем желательно в автоматическом режиме и независимо от особенностей геометрии.

Еще большие проблемы возникают при исследовании характеристик произвольных проволочных излучателей в составе решеток, линейных и плоских. Для больших регулярных решеток положение в определенной степени спасает модель бесконечной решетки. В условиях применимости теоремы Флоке задача сводится к исследованию одного излучателя, так называемого «центрального». Следовательно, по своей размерности задачи о бесконечной ФАР и единичном излучателе эквивалентны (если между соседними излучателями отсутствует

гальванический контакт). С формальной точки зрения различие заключается в используемой функции Грина: по сравнению с одиночным излучателем она выражается в виде одномерного или двойного рядов для линейной или плоской ФАР соответственно.

Для анализа бесконечной ФАР имеются два подхода: поэлементный и спектральный.

В поэлементном подходе взаимная связь между двумя токовыми элементами (базисной и весовой функцией) определяется суммированием вкладов соседних элементов, что для плоской решетки приводит к выражениям в виде двойных рядов. При проведении расчетов двойные ряды усекаются и практически в зависимости от межэлементного расстояния и фазовых сдвигов между соседними излучателями в рядах достаточно сохранить от нескольких десятков до нескольких сотен или даже тысяч членов. В целом это приводит к достаточно серьезным вычислительным затратам. Кроме того, в отдельных случаях сходимость двойных рядов очень медленная. С другой стороны, несомненными достоинствами поэлементного подхода являются простота и непосредственная применимость методов расчета одиночного излучателя, а также возможность вести анализ одновременно нескольких режимов фазирования решетки.

Альтернативой поэлементного метода является спектральный подход к нахождению обобщенной матрицы взаимных импедансов. Однако математический аппарат спектрального анализа хорошо развит лишь для токовых элементов, находящихся в плоскости решетки. В этом случае для плоской решетки элементы матрицы взаимных импедансов выражаются в виде двойных рядов из замкнутых аналитических выражений, что является очевидным достоинством данного подхода. Вместе с тем данный подход дает сравнительно слабо сходящиеся ряды – при редукции в них необходимо удерживать несколько тысяч слагаемых. Что касается произвольно ориентированных токовых гармоник, то соответствующие решения вообще отсутствуют.

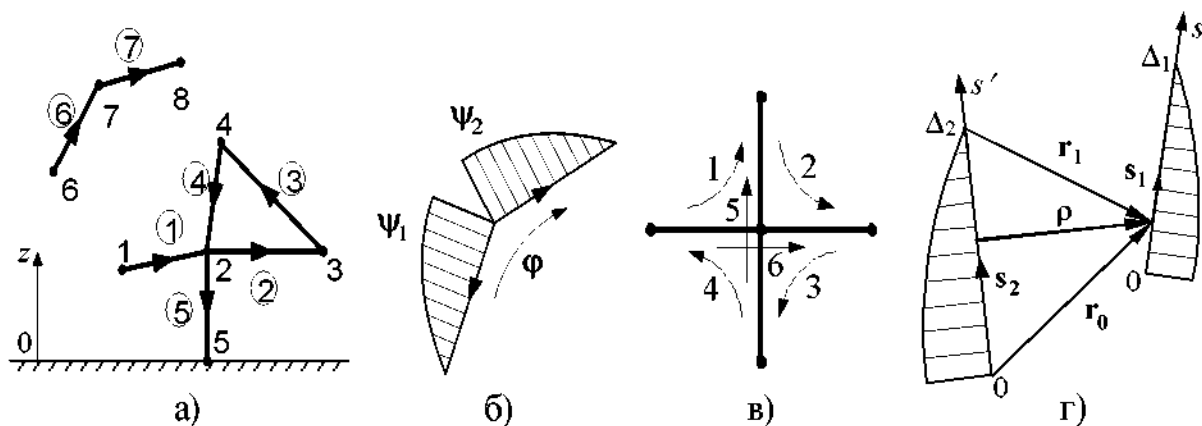
Указанные проблемы требовали своего разрешения.

Во **второй главе** подробно описывается разработанный автором универсальный метод электродинамического анализа произвольных проволочных систем, состоящих из тонких прямолинейных проводников с потерями [5]. Никаких ограничений на геометрию не накладывается: структура может включать в себя набор изолированных проводников, каждый из которых или разомкнут или замкнут (контур), может иметь место соединение нескольких проводников в одном узле (разветвление), а также контакт с экраном бесконечных размеров, если таковой имеется (рисунок 1,а).

Главная трудность анализа структур, где имеются узлы, в которых сходятся несколько проводников, заключается в необходимости выполнения пра-

вила Кирхгофа в таких узлах, что ведет к дополнительным уравнениям, усложняющих проблему. В работе выбран другой путь решения задачи – построена универсальная система непрерывных в узлах базисных функций, автоматически приводящих к равенству нулю полного тока.

С этой целью вводится векторная гармоника тока, состоящая из двух прямолинейных векторных полугармоник, расположенных на смежных ветвях (рисунок 1,б). Амплитуда каждой полугармоники равна единице в общем узле и, следовательно, амплитуда гармоники непрерывна при переходе через узел и равна нулю на противоположных концах.



(а) – пример проволочной структуры; (б) – гармоника, состоящая из двух полугармоник; (в) – возможные гармоники тока на узле; (г) – к вычислению взаимной связи полугармоник

Рисунок 1 – Проволочная структура и гармоники тока

Если в данном узле сходится M ветвей, то на этом узле можно построить $M(M-1)/2$ гармоник (рисунок 1,в). Все они непрерывны при переходе через узел, и, следовательно, непрерывной будет любая линейная комбинация таких гармоник. Поэтому решение, построенное на данной системе функций, будет автоматически удовлетворять условию Кирхгофа и, следовательно, дополнительных уравнений не требуется. Однако линейно независимыми являются только $M-1$ функций. Эта система строится по правилу: из всей совокупности выбираются $M-1$ функций таких, чтобы этими функциями были охвачены все ветви, сходящиеся в данном узле (например, на рисунке 1,в гармоники 1, 2, 3 или гармоники 3, 4, 5). Таким способом можно получить различные системы базисных функций, однако все они связаны друг с другом с помощью линейных преобразований. Указанные свойства предложенных базисных функций в диссертации строго доказаны.

Совокупность указанных гармоник на всей структуре и образует универ-

сальную систему базисных функций. Данная система гармоник используется также в качестве проекционных функций и, таким образом, задача сводится к решению интегрального уравнения Поклингтона методом Галеркина.

Поскольку каждая гармоника состоит из двух полугармоник, «привязанных» к своим ветвям, то совокупность полугармоник на ветвях структуры представляет своего рода базис для гармоник и позволяет выразить все возможные на данной проволочной конструкции гармоники через полугармоники. Поэтому при вычислении элементов матрицы взаимных импедансов «кирпичиком» выступает взаимосвязь двух полугармоник.

На распределение амплитуды полугармоники вдоль ветви не накладываются никаких ограничений, кроме равенства нулю и единице на концах и обычных условий непрерывности и определенной гладкости. В общем случае взаимный импеданс двух произвольных полугармоник будет выражаться в виде двукратного интеграла. Если же распределение амплитуды полугармоники выбрать синусоидальным $\sin k(\Delta - s)/\sin k\Delta$, где k – волновое число, Δ – длина ветви, s – текущая координата вдоль ветви, то поле такого токового элемента будет иметь аналитический вид, а для взаимного импеданса двух произвольных полугармоник получим [5]:

$$Z_{12} = \int_0^{\Delta_1} \mathbf{E}_2(s) \mathbf{s}_1 \sin k(\Delta_1 - s)/\sin k\Delta_1 ds, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_2(s) \mathbf{s}_1 = & \frac{30i}{\sin k\Delta_2} \left\{ \left(-\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2 + \mathbf{s}_2 \mathbf{r}_1 \frac{\rho \mathbf{s}_1}{\rho^2} \right) \frac{\exp(-ikr_1)}{r_1} + \right. \\ & \left. + \left[\mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2 \cos k\Delta_2 + (\mathbf{s}_2 \mathbf{r}_0 \cos k\Delta_2 + i r_0 \sin k\Delta_2) \frac{\rho \mathbf{s}_1}{\rho^2} \right] \frac{\exp(-ikr_0)}{r_0} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

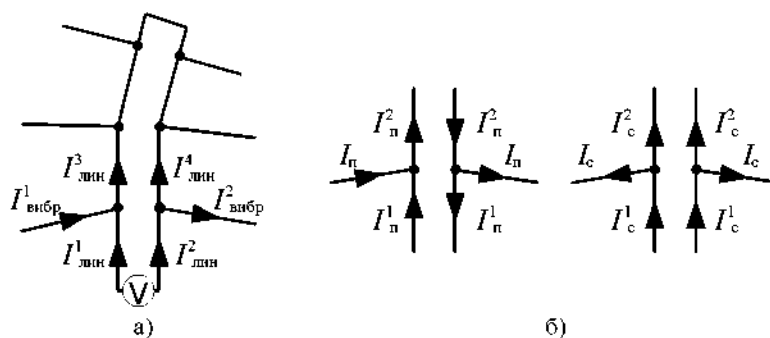
представляет собой проекцию поля $\mathbf{E}_2(s)$ базисной полугармоники на весовую (рисунок 1,г).

Геометрию системы полностью определяют четыре набора параметров: координаты узлов, матрица соединений, задающая топологию структуры (номера ветвей с соответствующими концевыми узлами), радиусы ветвей (проводников), признак наличия экрана. На основе этих входных данных строится специальная структурная матрица, с помощью которой вся проволочная структура покрывается гармониками тока и в дальнейшем все происходит автоматически: вычисление элементов и построение матрицы взаимных импедансов, нахождение столбца правой части, решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), нахождение распределения токов по ветвям и на его основе входного импеданса или проводимости, а также внешних характеристик – диаграмм направленности (ДН) в заданных сечениях, коэффициента усиления и ближних

полей [5, 24].

Разработаны алгоритмы учета потерь в проводниках для различных функций распределения погонного импеданса, как непрерывных, так и дискретных, а также нахождения столбца правой части системы уравнений при возбуждении произвольным сторонним источником: как набором сосредоточенных генераторов напряжения или падающей волны (задача излучения), так и внешним полем произвольной конфигурации (задача рассеяния) [5, 25].

Для анализа проволочных систем с двухпроводными линиями (рисунок 2,а) построена оригинальная модель, основная идея которой заключается в представлении тока в линии в виде суммы противофазной и синфазной составляющих (рисунок 2,б) с последующим использованием развитого во второй главе метода интегральных уравнений. Противофазные токи не излучают и учитываются методами теории цепей, а синфазные токи, которые электродинамически взаимодействуют с токами на остальных элементах конструкции, объединены в единый проводник и включены в общий алгоритм решения. Подобный подход позволяет избежать электродинамического анализа близко расположенных параллельных проводников, когда нарушается модель осевого тока, и в конечном итоге приводит к повышению точности расчетов, снижению размерности матрицы взаимных импедансов и, следовательно, уменьшению времени вычислений, а также значительному повышению устойчивости системы уравнений [4].



(а) – геометрия; (б) – разбиение токов на противофазную и синфазную составляющие
Рисунок 2 – Нагруженная двухпроводная линия

Разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде комплекса программ под общим именем SAPRA на языке Fortran-4 и в системе Mathcad Pro (версий 6 и выше, в которых встроен язык программирования). Алгоритмы и программы прошли тщательное тестирование, как с точки зрения внутренней логики и непротиворечивости, так и сравнения с известными в литературе ре-

зультатами других авторов (в том числе и рассчитанными с помощью современных пакетов MMANA и FEKO). Их достоверность подтверждается также экспериментальными данными и внедренными в производство практическими конструкциями антенн и решеток.

В третьей главе рассмотрены недостаточно изученные в литературе случаи симметрии проволочных структур – поворотной симметрии, зеркальной симметрии, линейной антенной решетки, в которых между соседними ячейками имеется гальванический контакт, реализуемый в виде общих узлов или проводников.

Возникающие при исследовании таких структур трудности методически обусловлены наличием базисных гармоник тока, плечи которых расположены на смежных ячейках структуры (поворотная симметрия или конечные решетки) или на структуре и ее зеркальном изображении – именно через эти гармоники реализуется гальванический контакт. Кроме того, возможное наличие проводников структуры на оси симметрии или в плоскости симметрии приводит к существованию на этих проводниках базисных гармоник тока, которые нельзя отнести к определенной ячейке. Следовательно, эти гармоники порождают дополнительные блоки в матрице взаимных импедансов, что нарушает специфический характер данной матрицы и ведет к невозможности использовать специальные методы решения СЛАУ, развитые для систем с рассматриваемой симметрией.

Общий путь решения данных задач следующий: сначала применяется универсальный подход, предложенный в главе 2, к исходным структурам, затем исследуются свойства матрицы взаимных импедансов, обусловленные наличием того или иного вида симметрии и вышеуказанных особенностей структуры, и, наконец, строится метод решения полученной СЛАУ. В этом состоит отличие от традиционного пути, когда имеет место другая последовательность действий: сначала используются свойства симметрии рассматриваемых структур, на основании которых исходная задача сводится к другим, меньшей размерности, а затем к этим задачам применяется метод моментов.

Для анализа структур с поворотной симметрией предложен метод модификации единичной ячейки, суть которого заключается в таком изменении ее геометрии, что смежные ячейки становятся гальванически изолированными, а решение исходной задачи не меняется. Это сразу ведет к работе с клеточно-циркулянтными матрицами со всеми вытекающими преимуществами.

Кроме того, показано, что при наличии проводников на оси вращения токовые гармоники распадаются на два типа: гармоники типа A , которые при повороте образуют новые гармоники, и гармоники типа B , которые при повороте переходят сами в себя. Поэтому исходная СЛАУ относительно токов I_i^A на i -ой

ячейке и токов \mathbf{I}^B на оси вращения имеет вид [9]

$$\sum_{n=0}^{M-1} \mathbf{Z}_{m-n}^{AA} \mathbf{I}_n^A + (\mathbf{Z}^{BA})^T \mathbf{I}^B = \mathbf{V}_m^A, \quad m = 0, 1, \dots, M-1; \quad \mathbf{Z}^{BA} \sum_{n=0}^{M-1} \mathbf{I}_n^A + \mathbf{Z}^{BB} \mathbf{I}^B = \mathbf{V}^B. \quad (3)$$

После применения дискретного преобразования Фурье уравнения разделяются, и решение принимает явную форму

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{I}}_0^{A_2} &= \left(\tilde{\mathbf{Z}}_0^{A_2 A_2} - M (\mathbf{Z}^{BA_2})^T (\mathbf{Z}^{BB})^{-1} \mathbf{Z}^{BA_2} \right)^{-1} \left(\tilde{\mathbf{V}}_0^{A_2} - M (\mathbf{Z}^{BA_2})^T (\mathbf{Z}^{BB})^{-1} \mathbf{V}^B \right) \\ \tilde{\mathbf{I}}_k^A &= \left(\tilde{\mathbf{Z}}_k^{AA} \right)^{-1} \tilde{\mathbf{V}}_k^A, \quad k = 1, 2, \dots, M-1, \quad \mathbf{I}^B = (\mathbf{Z}^{BB})^{-1} (\mathbf{V}^B - \mathbf{Z}^{BA_2} \tilde{\mathbf{I}}_0^{A_2}), \end{aligned} \quad (4)$$

где знаком « \sim » обозначена операция дискретного преобразования Фурье.

Подобная ситуация имеет место и в системах с зеркальной симметрией. Если в плоскости симметрии имеются узлы, через которые реализуется гальванический контакт между обеими частями структуры (рисунок 3,б) или проводники, полностью лежащие в данной плоскости (рисунок 3,в), то в проволочной системе будут существовать два типа гармоник тока:

- гармоники типа A , которые находятся по одну сторону плоскости симметрии (одно из плеч таких гармоник может лежать в плоскости симметрии – рисунок 3,в); при зеркальном отражении они образуют новые гармоники;
- гармоники типа B , которые либо пересекают плоскость симметрии и являются симметричными (гармоника B_1 на рисунке 3,б), либо полностью лежат в плоскости симметрии (гармоника B_2 на рисунке 3,в); при зеркальном отражении эти гармоники переходят сами в себя.

Фактически гармоники типа A являются токовыми гармониками на структурах с изолированными частями (рисунок 3,а).

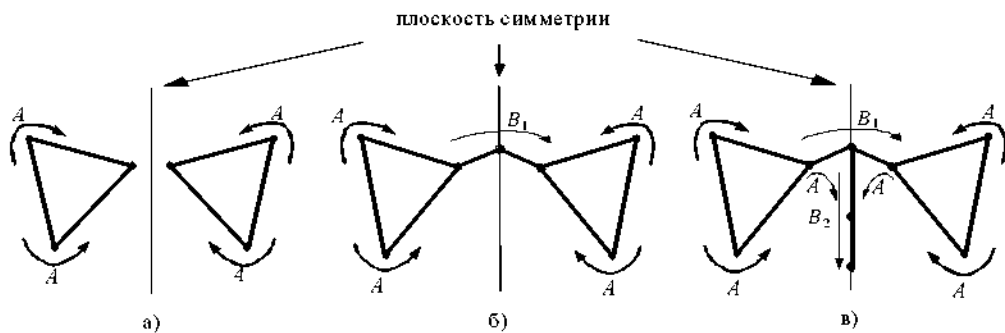


Рисунок 3 – Структуры с зеркальной симметрией

Показано, что решение имеет вид

$$\mathbf{I}_1^A = \mathbf{I}^+ + \mathbf{I}^-, \quad \mathbf{I}_2^A = \mathbf{I}^+ - \mathbf{I}^-, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}^- &= \left[\mathbf{Z}_{11}^{AA} - \mathbf{Z}_{12}^{AA} - 2\mathbf{Z}^{AB_1} (\mathbf{Z}^{B_1 B_1})^{-1} (\mathbf{Z}^{AB_1})^T \right]^{-1} \left[\mathbf{V}^- - \mathbf{Z}^{AB_1} (\mathbf{Z}^{B_1 B_1})^{-1} \mathbf{V}^{B_1} \right] \\ \mathbf{I}^+ &= \left[\mathbf{Z}_{11}^{AA} + \mathbf{Z}_{12}^{AA} - 2\mathbf{Z}^{AB_2} (\mathbf{Z}^{B_2 B_2})^{-1} (\mathbf{Z}^{AB_2})^T \right]^{-1} \left[\mathbf{V}^+ - \mathbf{Z}^{AB_2} (\mathbf{Z}^{B_2 B_2})^{-1} \mathbf{V}^{B_2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}^{B_1} &= (\mathbf{Z}^{B_1 B_1})^{-1} (\mathbf{V}^{B_1} - 2(\mathbf{Z}^{AB_1})^T \mathbf{I}^-) \\ \mathbf{I}^{B_2} &= (\mathbf{Z}^{B_2 B_2})^{-1} (\mathbf{V}^{B_2} - 2(\mathbf{Z}^{AB_2})^T \mathbf{I}^+) \end{aligned} \quad (7)$$

Данный результат, конечно, мог быть получен и с помощью предварительного разбиения исходной задачи на две подзадачи с идеальными электрической или магнитной стенками в плоскости симметрии с последующим применением метода моментов. Однако возникающие при этом трудности учета гальванического контакта преодолеваются далеко не очевидным способом.

Аналогичная ситуация имеет место и для линейной антенной решетки, между излучателями которой существует гальванический контакт, реализуемый в виде общих узлов. В диссертации установлено, что в этом случае базисные гармоники тока распадаются на два типа: гармоники типа A , которые полностью принадлежат одной ячейке и гармоники типа B , плечи которых принадлежат различным (соседним) ячейкам. Именно гармоники типа B обеспечивают гальванический контакт между ячейками. Поэтому матрица взаимных импедансов имеет блочную структуру, причем каждый блок представляет собой клеточно-теплицевую матрицу. Указанные свойства предопределяют экономичный способ расчета и заполнения матрицы взаимных импедансов и экономичный способ решения СЛАУ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{AA} & \mathbf{Z}^{AB} \\ (\mathbf{Z}^{AB})^T & \mathbf{Z}^{BB} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}^A \\ \mathbf{I}^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}^A \\ \mathbf{V}^B \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Решение данной системы имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{I}^A &= \left[\mathbf{Z}^{AA} - \mathbf{Z}^{AB} (\mathbf{Z}^{BB})^{-1} (\mathbf{Z}^{AB})^T \right]^{-1} (\mathbf{V}^A - \mathbf{Z}^{AB} (\mathbf{Z}^{BB})^{-1} \mathbf{V}^B) \\ \mathbf{I}^B &= \left[\mathbf{Z}^{BB} - (\mathbf{Z}^{AB})^T (\mathbf{Z}^{AA})^{-1} \mathbf{Z}^{AB} \right]^{-1} (\mathbf{V}^B - (\mathbf{Z}^{AB})^T (\mathbf{Z}^{AA})^{-1} \mathbf{V}^A) \end{aligned} \quad (9)$$

Приведенные результаты получены впервые.

Для рассмотренных вариантов симметрии разработаны универсальные алгоритмы построения базисных функций, расчета элементов и заполнения матрицы взаимных импедансов. Алгоритмы реализованы в вычислительных программах, тестирование которых проводилось путем сравнения результатов с данными, полученными по общей программе SAPRA.

Четвертая глава посвящена разработке новых методов анализа произвольных проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР с косоугольной сеткой.

В главе описывается предложенный автором метод вычисления взаимного импеданса произвольных токовых гармоник в случае использования функции Грина бесконечной плоской ФАР. За основу принято следующее выражение для взаимосвязи двух токовых гармоник $\varphi_n(s')$ и $\psi_m(s)$, ориентированных вдоль ортов $\mathbf{s}'_n(s')$ и $\mathbf{s}_m(s)$

$$Z_{mn} = \frac{iW}{k} \iint_{L'L} \left[k^2 \mathbf{s}_m(s) \mathbf{s}'_n(s') \psi_m(s) \varphi_n(s') - \frac{d\psi_m(s)}{ds} \frac{d\varphi_n(s')}{ds'} \right] G^\infty[\mathbf{r}(s), \mathbf{r}'(s')] ds ds'. \quad (10)$$

Данная формула с использованием спектрального представления для функции Грина бесконечной плоской ФАР

$$G^\infty(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2\pi A} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\mathbf{k}_{pq}^2 - k^2} \exp[-i\mathbf{k}_{pq}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')] dk_3 \quad (11)$$

приводится к виду

$$Z_{mn}^\infty = \frac{iW}{k} \frac{1}{2\pi A} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\mathbf{k}_{pq}^2 - k^2} \tilde{Z}_{mn}(\mathbf{k}_{pq}) dk_3, \quad (12)$$

причем

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_{mn}(\mathbf{k}_{pq}) = & k^2 \int_L \mathbf{s}'_m(s') \psi_m(s) \exp[-i\mathbf{k}_{pq} \mathbf{r}(s)] ds \int_{L'} \mathbf{s}'_n(s') \varphi_n(s') \exp[i\mathbf{k}_{pq} \mathbf{r}'(s')] ds' - \\ & - \int_L \frac{d\psi_m(s)}{ds} \exp[-i\mathbf{k}_{pq} \mathbf{r}(s)] ds \int_{L'} \frac{d\varphi_n(s')}{ds'} \exp[i\mathbf{k}_{pq} \mathbf{r}'(s')] ds' \end{aligned} \quad (13)$$

Последняя формула является совершенно общей и справедливой для произвольных токовых гармоник. В случае прямолинейных ветвей и часто используемых токовых распределений типа степенных $\{\varphi_n(s), \psi_m(s) = s^j, j = 0, 1, \dots\}$ или тригонометрических $\{\varphi_n(s), \psi_m(s) = \sin(as + b)\}$ интегралы в (13) вычисляются в аналитическом виде, а интеграл в (12) сводится к комбинации интегралов вида

$$I(a, b, c_1, t_1, c_2, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(iat) \sin(c_1 t - t_1) \sin(c_2 t - t_2)}{t^2 + b^2} dt, \quad (14)$$

для которых в диссертации методами теории функций комплексного переменного получены аналитические выражения.

Следовательно, элементы матрицы взаимных импедансов для произвольно ориентированных токовых гармоник со степенным или тригонометрическим распределением амплитуды представляются в виде двойных спектральных рядов из замкнутых аналитических выражений. В частном случае, когда токовые элементы находятся в плоскости решетки, эти ряды сводятся к хорошо известным.

Применение полученных формул к широко используемым синусоидальным токовым гармоникам $\{\varphi_n(s), \psi_m(s) = \sin[k(\Delta - |s|)]/\sin k\Delta\}$ приводит к тому, что элементы матрицы взаимных импедансов есть

$$\begin{aligned} Z_{mn}^\infty = & -i \frac{15}{k^2 A} \frac{k\Delta_m}{\sin k\Delta_m} \frac{k\Delta_n}{\sin k\Delta_n} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \exp[i\mathbf{k}_{pq}^\perp (\mathbf{r}_n^{\text{cp}} - \mathbf{r}_m^{\text{cp}})_\perp] \times \\ & \times \left\{ (1 + \mathbf{s}_m \mathbf{s}_n) [e^+ \tilde{I}_1 + (e^+)^* \tilde{I}_2] + (1 - \mathbf{s}_m \mathbf{s}_n) [e^- \tilde{I}_3 + (e^-)^* \tilde{I}_4] \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

где вектор $\mathbf{k}_{pq}^\perp = p\mathbf{k}_1 + q\mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_0$ является проекцией пространственного волно-

вого вектора \mathbf{k}_{pq} порядка pq на плоскость волновых чисел, вспомогательные величины есть $e^{\pm} = \exp(ik(\Delta_m \pm \Delta_n)/2)$ и $S_j^{\pm} = \sin[(k \pm \mathbf{k}_{pq} \mathbf{s}_j)\Delta_j/2]/(k \pm \mathbf{k}_{pq} \mathbf{s}_j)$, а \tilde{I}_i суть значения интеграла (14).

Предложенный метод вычисления элементов матрицы взаимных импедансов для произвольно ориентированных токовых гармоник совместно с развитым во второй главе подходом дает универсальный метод анализа проволочных излучателей произвольной конфигурации в составе бесконечной плоской ФАР с косоугольной ячейкой [14, 17, 28, 34, 43].

В спектральном подходе (формула (12) или (15)), а также поэлементном методе анализа излучателей в составе плоских решеток возникают двойные бесконечные ряды, которые обычно вычисляются с помощью редукции, т. е., в расчетах удерживается конечное число слагаемых. Это число в зависимости от параметров задачи может варьироваться в довольно широких пределах и достигать в отдельных случаях десятков тысяч, что ведет в конечном итоге к существенным или даже недопустимым затратам процессорного времени.

В литературе предпринимаются различные попытки ускорения сходимости рядов. Один подход основывается на использовании ρ - или ε -алгоритмов и дает очень хорошие результаты для функции Грина плоской ФАР. К сожалению, данный метод является принципиально численным и не позволяет простым путем от функции Грина перейти к полям и получить необходимые уравнения для нахождения искомого решения.

В данной работе на примере расчета входного импеданса вибраторного излучателя в составе плоской ФАР исследован альтернативный путь, когда сначала находится численное решение задачи для бесконечной решетки при различном числе удерживаемых слагаемых в используемых рядах, а затем к последовательности решений для ускорения сходимости применяется ρ - или ε -алгоритм. Установлено, что ρ -алгоритм дает расходящиеся результаты как для поэлементного, так и для спектрального методов. ε -алгоритм нестабилен для спектрального метода, а для поэлементного позволяет уменьшить число слагаемых в двойных рядах до 25–200 в большинстве случаев [20, 33].

В диссертации разработан другой подход, который основан на известном быстросходящемся представлении функции Грина бесконечной решетки:

$$G^{\infty}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{2A} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \left[\frac{\exp\left(-\sqrt{\mathbf{k}_{pq}^{\perp 2} - k^2} |z - z'|\right)}{\sqrt{\mathbf{k}_{pq}^{\perp 2} - k^2}} - \frac{\exp\left(-\sqrt{\mathbf{k}_{pq}^{\perp 2} + u^2} |z - z'|\right)}{\sqrt{\mathbf{k}_{pq}^{\perp 2} + u^2}} \right] \times (16)$$

$$\times \exp[-i\mathbf{k}_{pq}^{\perp}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')] + \frac{1}{4\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-uR_{mn})}{R_{mn}} \exp(-im\psi_1 - in\psi_2)$$

где u есть некий вещественный параметр, определяющий скорость сходимости рядов (подбирается путем численного эксперимента и в большинстве случаев $u \approx (0,5-1)k$, при этом удовлетворительные результаты получаются при удержании в рядах нескольких десятков слагаемых). Первое слагаемое в (16) есть классическое спектральное представление функции Грина, а второе и третье – соответственно спектральное и поэлементное представления для мнимого волнового числа $k = -iu$.

Элементы матрицы взаимных импедансов для произвольно ориентированных токовых гармоник, порождаемые первыми двумя слагаемыми в (16), определяются на основе формулы (15), которая, как показывает анализ, справедлива и при мнимом волновом числе. Эффективность вычисления матричных элементов, порождаемых третьим рядом в (16), определяется возможностью нахождения полей от этого ряда. В работе показано, что поля направленного вдоль оси Oz линейного тока с распределением $I(z')$ для функции Грина специального вида $G(R) = \exp(-uR)/4\pi R$ при произвольном u имеют компоненты

$$E_z = \frac{i}{\omega \varepsilon'_a} \left[\frac{dI(z')}{dz'} G(R) + I(z') \frac{\partial G(R)}{\partial z} \right]_{z_0}^{z_1}, \quad (17)$$

$$E_\rho = \frac{i}{\omega \varepsilon'_a} \frac{1}{u\rho} \left\{ \left[\frac{dI(z')}{dz'} \frac{\partial g(R)}{\partial z} + I(z') \frac{\partial^2 g(R)}{\partial z^2} \right]_{z_0}^{z_1} + \right. \\ \left. + (k^2 + u^2) \left[-I(z')g(R) \Big|_{z_0}^{z_1} + \int_{z_0}^{z_1} \frac{dI(z')}{dz'} g(R) dz' \right] \right\}, \quad (18)$$

где $g(R) = RG(R) = \exp(-uR)/4\pi$. Продольная составляющая имеет замкнутый вид, а радиальная содержит интеграл от медленно меняющейся функции, что приводит, в свою очередь, при последующем вычислении матричных элементов в сочетании с небольшим количеством слагаемых в третьем ряде в (16) из-за его экспоненциальной сходимости к малым затратам процессорного времени.

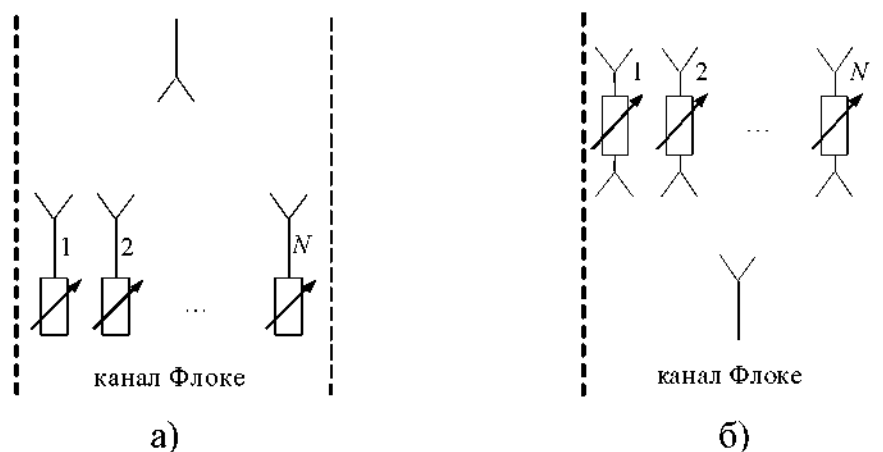
В итоге получен эффективный быстросходящийся метод расчета произвольных проволочных излучателей в составе плоской бесконечной ФАР. Эффективность метода основана на использовании быстросходящихся рядов для функции Грина в сочетании с действенным способом вычисления матричных элементов, когда они определяются аналитически или с помощью однократного интегрирования медленно меняющейся функции. В большинстве случаев в двойных рядах достаточно удерживать несколько десятков слагаемых [22].

Приведенные результаты получены впервые.

Разработанные методы и программы прошли тщательное тестирование, в

частности, на примере расчета V -вибратора с опорными стойками в плоской ФАР и в сравнении с результатами, полученными по программе FEKO.

В четвертой главе также представлен новый метод анализа ФАР модульного построения (рисунок 4). Здесь излучатели решетки образуют регулярную сетку, а модульность образуется системой облучателей.



а) – ФАР отражательного типа; б) – ФАР проходного типа
Рисунок 4. – Структурная схема ФАР модульного построения

Исходная задача сведена к нахождению матрицы рассеяния апертуры бесконечной решетки излучателей, все блоки которой находятся из режима ФАР при возбуждении как из внутренней области (набором падающих волн в питающих фидерах), так и из внешнего пространства (совокупностью плоских волн Флоке – конечным числом распространяющихся мод и некоторым количеством ближайших затухающих). Последняя задача может быть решена известными методами для излучателей заданного класса и диапазона. Метод практически опробован при исследовании многоэлементных решеток отражательного типа [6] и применялся при проектировании ФАР РЛС различного назначения.

В пятой главе развиты методы строгого электродинамического анализа наземных проволочных рефлекторов с переменной плотностью сетки, применяемых в системах загоризонтной радиолокации для уменьшения энергетических потерь в земле и формирования максимально прижатой к горизонту ДН, необходимой для обеспечения требуемой дальности. Рассмотрены двумерная [1] и трехмерная задачи [23]. Наземный рефлектор, а также поверхность земли моделируются плоскостью, на которой выполняются импедансные граничные условия, причем импеданс плоскости представляется в виде суммы двух слагаемых $\mathbf{Z}(x, y) = \mathbf{Z}_1(x, y) + \mathbf{Z}_0$, где матричная функция $\mathbf{Z}_1(x, y)$ отлична от нуля лишь в пределах рефлектора. Для электрического \mathbf{J}^p , магнитного \mathbf{J}^m поверхностных то-

ков, а также их линейной комбинации $\mathbf{J}\rangle = \mathbf{J}^m\rangle - \Pi\mathbf{Z}_0\mathbf{J}^p\rangle$ получены три двумерных ИУ вида

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{J}}^p\rangle &= \mathbf{K}^p\tilde{\mathbf{H}}^{ст}\rangle - L^pF(\Pi\mathbf{Z}_1\mathbf{J}^p\rangle), & \tilde{\mathbf{J}}^m\rangle &= \mathbf{K}^m\tilde{\mathbf{H}}^{ст}\rangle - L^mF(\Pi\mathbf{Y}_1\Pi^T\mathbf{J}^m\rangle), \\ \mathbf{J}\rangle &= \Pi\mathbf{Z}_1\Pi^TF^{-1}(\mathbf{P}\tilde{\mathbf{H}}^{ст}\rangle - \mathbf{Q}\tilde{\mathbf{J}}\rangle), \end{aligned} \quad (19)$$

причем $\mathbf{K}^{p,m}$, $L^{p,m}$, \mathbf{P} , \mathbf{Q} , Π есть некие квадратные матрицы второго порядка, F обозначает двумерное преобразование Фурье, знак « \sim » – Фурье-образ соответствующей функции.

Для предложенных ИУ развита схема решения с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье. Данный подход оказывается эффективнее метода моментов при больших электрических размерах рефлектора, к тому же здесь отсутствует очень времяземкая, особенно в трехмерном случае, процедура нахождения матричных элементов.

В пятой главе предложен также метод численного анализа систем с сетчатыми экранами криволинейной формы. Сетчатые поверхности моделируются сплошными с непрерывным распределением электрического тока, а сама поверхность характеризуется импедансом, величина которого определяется усредненными граничными условиями. Метод проиллюстрирован на примере исследования несимметричной двухзеркальной антенны Кассегрена с проводочным вспомогательным зеркалом. Показано, что использование плавно разрезающейся к краю зеркала сетки дает возможность значительно ослабить дифракционные эффекты на кромках зеркала [2].

В шестой главе приводятся результаты применения разработанных методов, алгоритмов и программ для решения задач практики. Здесь подробно исследованы аномальные эффекты логопериодической вибраторной антенны (ЛПВА), как одиночной, так и в составе ФАР, приведены результаты разработки диапазонной ФАР с широкоугольным качанием луча на основе цилиндрической спиральной антенны, предназначенной для высокопотенциальной РЛС, рассмотрены различные виды диапазонных вибраторов и плоские ФАР на их основе, в том числе двухканальные из турникетных вибраторов, исследованы решетки из конических вибраторов. В главе приводятся результаты исследования радиолокационного сечения рассеяния самолетов и баллистических ракет в коротковолновой области, а также описываются предложенные автором две передающие широкополосные антенны ДМВ диапазона, которые в настоящее время внедрены в серийное производство на РНИУП «Луч».

Анализ ЛПВА проводится в строгой электродинамической постановке: антенна рассматривается как единая проводочная конструкция без выделения распределительного фидера в отдельное устройство. При этом в фидере возможно существование синфазных токов, которые начинают возбуждаться при

наличии геометрической либо электрической асимметрии. Расчеты показывают, что даже незначительная асимметрия приводит к возникновению заметных аномалий на отдельных частотах: существенно растет кросс-поляризационная составляющая бокового излучения, падает коэффициент направленного действия антенны, резко изменяется входной импеданс. Установлено, что причиной возникновения подобных аномальных эффектов является резонансное возбуждение синфазных токов в распределительном фидере и вибраторах антенны. Плечи соседних вибраторов вместе с соединяющим их отрезком проводника фидера образуют резонансную ячейку, которая интенсивно возбуждается, когда ее длина близка к полуволне. Расчеты показывают, что отношение частот соседних резонансов несколько больше величины, обратной коэффициенту подобию антенны [3]. Эти явления исследовались также и с позиции собственных мод. Численно установлено, что на указанных частотах собственное значение низшей синфазной (паразитной) моды равно нулю, т. е. она также находится в резонансе и отвечает за аномальное поведение антенны.

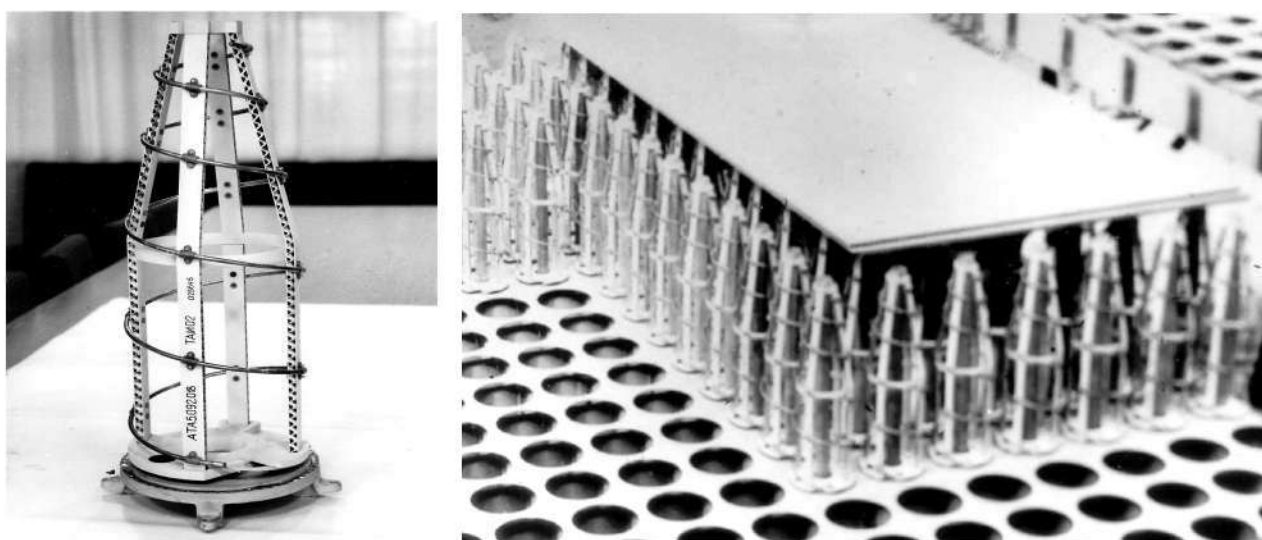
Проведено исследование возможности применения ЛПВА в качестве элемента широкополосной плоской ФАР с широкоугольным качанием луча. Анализ результатов показывает, что при отклонении луча в H -плоскости в целом аномальных эффектов не наблюдается, происходит лишь естественное ухудшение характеристик, выражающееся в увеличении среднего уровня коэффициента отражения и сужении рабочего диапазона частот. При этом в направлениях, близких к нормали, характеристики излучателя в решетке близки к характеристикам одиночного излучателя. Вместе с тем, даже небольшое отклонение луча в E -плоскости приводит к сильной неравномерности входного импеданса и уменьшению действительной части входного импеданса практически до нуля в узких частотных областях, расположенных вблизи точек, где у одиночной антенны проявляются аномалии. Кроме того, при значительных отклонениях луча ($\theta > 55-60^\circ$) во всем диапазоне частот характеристики катастрофически ухудшаются и решетка запирается. Следовательно, ЛПВА не может быть использована как элемент плоской широкополосной ФАР с широкоугольным качанием луча [26].

В диапазонной ФАР с широкоугольным качанием луча ввиду плотного размещения излучателей межэлементные связи достаточно сильны. Это приводит к необходимости учета большого количества излучателей в поэлементном методе, означающей огромные затраты машинного времени. Поэтому для анализа такой ФАР был развит метод асимптотического учета взаимных связей, позволяющий достичь сходимости в поэлементном суммировании для большинства углочастотных точек. Усовершенствование алгоритма с целью его ускорения использовало также идею уменьшения количества точек интегрирова-

ния при вычислении матричных элементов по мере увеличения расстояния между элементами. Кроме того, начиная с некоторого расстояния, при нахождении взаимных связей использовалось приближение дальней зоны относительно каждого прямолинейного отрезка в отдельности [16, 31]. Указанные усовершенствования алгоритма поэтапно контролировались путем сравнения характеристик антенны в решетке с точным расчетом (использование строгих выражений для всех связей и вычисление интегралов с автоматическим выбором шага).

Разработанный метод использовался при проектировании ФАР на основе цилиндроконической спиральной антенны для ныне поставленной на дежурство РЛС. Целью ставилось достижение максимальной рабочей полосы частот и сектора сканирования. Критериями оптимизации являлось требование минимизации уровня коэффициента отражения и максимизации уровня коэффициента эллиптичности [8].

Разработан и внедрен в серийное производство излучатель для ФАР с широкоугольным качанием луча. Заводской образец спиральной антенны, а также фрагмент решетки показаны на рисунке 5.



а)

б)

(а) – спиральная антенна; (б) – фрагмент решетки

Рисунок 5 – Серийные образцы

ФАР метрового диапазона и длинноволновой части дециметрового диапазонов обычно строятся на основе проволочных излучателей различного типа. Простейшим из них является вибраторная антенна – классический, хорошо изученный излучатель. Существуют действующие системы подобного типа, например, американская система раннего обнаружения Pave Paws, в состав кото-

рой входит решетка проволочных вибраторов *V*-типа, а также активно разрабатываемые в последние годы и внедряемые в России РЛС высокой заводской готовности.

В главе приведены результаты подробного электродинамического анализа в составе плоской ФАР вибраторных излучателей *V*-типа, как одноканального, так и двухканального на основе турникетного вибратора, позволяющего обеспечить независимое возбуждение каждого канала и, таким образом, создать произвольный поляризационный режим излучения. Анализ результатов показывает, что без принятия специальных мер по расширению полосы рабочих частот излучателя приемлемый уровень согласования входов как одноканального, так и двухканального излучателей в решетке может быть достигнут в полосе частот до 40 % и секторе углов до 60° от нормали к плоскости решетки. Вместе с тем поляризационные характеристики излучения для различных режимов возбуждения входов турникетного излучателя начинают резко ухудшаться с углов около 50° [13, 21, 32, 45].

В шестой главе рассматривалась также решетка из несимметричных конических вибраторов над металлическим экраном, причем при анализе сплошная антенна аппроксимировалась проволочной моделью, а необходимое количество проводников выбиралось по результатам исследования одиночной антенны. Расчеты показывают, что ДН конического излучателя в составе ФАР имеет почти идеальную воронкообразную форму, а максимум наблюдается в направлении, в котором антенна согласована [7, 29].

Еще одна практически важная задача, рассмотренная в шестой главе, – исследование характеристик рассеяния в коротковолновом диапазоне волн практически интересных объектов: самолета-истребителя, самолета-бомбардировщика В2, баллистической ракеты (в том числе и с работающими двигателями). В коротковолновом диапазоне электрические размеры указанных объектов составляют единицы, реже десятки длин волн и поэтому для их анализа применяется разработанный метод анализа проволочных систем, а сама поверхность тел аппроксимируется проволочной структурой, геометрия ячейки которой и ее размеры подбираются путем численного эксперимента.

Установлено, что на нижней частоте различие между значениями сечения обратного рассеяния для горизонтальной и вертикальной поляризаций составляет около 30 дБ. По мере увеличения частоты кривые становятся все более осциллирующими, различие между ними уменьшается, а на верхней частоте они «в среднем» совпадают. Для баллистической ракеты работающие двигатели повышают сечение обратного рассеяния примерно на 10 дБ, т. е., наиболее благоприятным моментом для обнаружения баллистических ракет средствами дальней радиолокации является начальный участок полета, когда работают двигатели

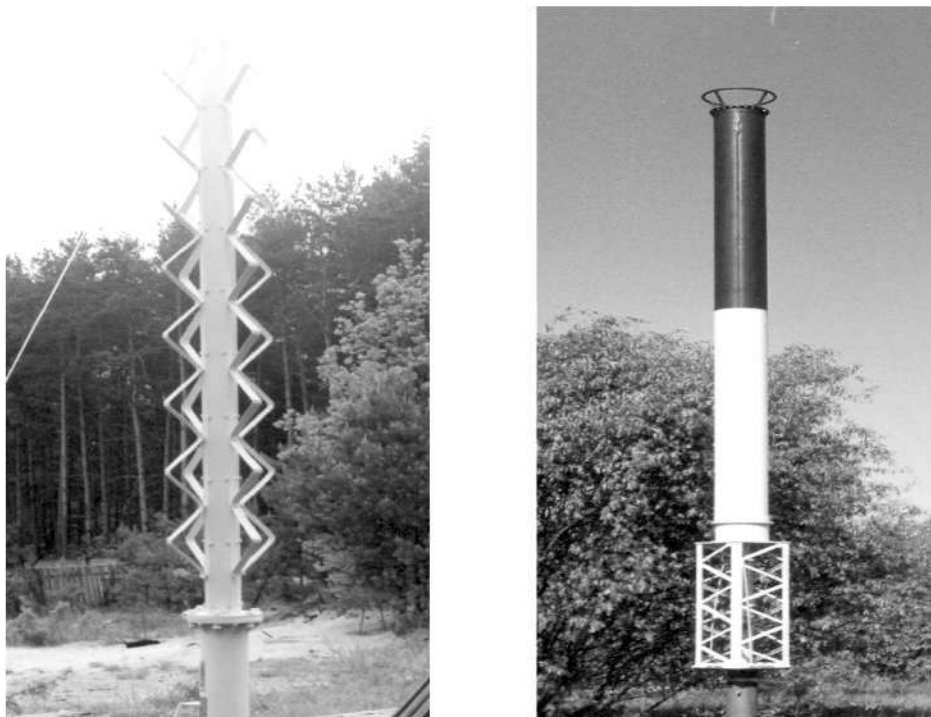
ли и создают столб ионизированной плазмы. Исследовалась также возможность уменьшения радиовидимости летательных аппаратов. С этой целью рассматривалось рассеяние на самолете-бомбардировщике В2, проволочная модель которой выполнена из проводников с заданным погонным импедансом. Исследовались случаи чисто активного и чисто реактивного импеданса – индуктивного и емкостного, а его величина изменялась в широких пределах – от 0 до 1000 Ом/м. Расчеты показывают, что при чисто активном погонном импедансе возрастание его величины ведет к уменьшению сечения обратного рассеяния на всех частотах и углах. Уменьшения сечения обратного рассеяния можно добиться и с помощью реактивного погонного импеданса, однако это имеет место лишь на отдельных частотах и углах, кроме того, здесь нет ярко выраженных закономерностей [11, 12, 30, 42].

В последние два десятилетия в связи с интенсивным освоением дециметрового диапазона для нужд телевидения и диапазона ОВЧ-ЧМ для местного радиовещания возникла потребность в новых достаточно простых, надежных и, самое главное, широкополосных (точнее, многоканальных) передающих антенных устройствах. Как правило, на существующих башнях и мачтах свободного места мало или вовсе нет, поэтому с учетом проблемы электромагнитной совместимости каждая новая антенна фактически должна иметь индивидуальный «покрой». Разработка подобного рода изделий является достаточно трудоемкой процедурой. Следовательно, очень важно иметь возможность оперативно и с минимальными затратами провести электродинамическую отработку устройств. С другой стороны, весьма желательно, чтобы антенна состояла из достаточно независимых универсальных конструктивных блоков, каждый из которых может быть настроен или путем небольшой доработки подогнан под требования конкретного заказчика.

В главе приведены результаты разработки двух широкополосных передающих телевизионных антенн ДМВ диапазона: зигзагообразной и из вибраторов шунтового типа. Антенны освоены в серийном производстве на РНИУП «Луч» и поставляются в различные страны (промышленные образцы приведены на рисунке 6).

Общий подход при разработке данных антенн следующий. Поскольку для передающих телевизионных антенн предъявляются очень жесткие требования к уровню согласования – КСВ должен быть не хуже, чем 1,1 на рабочих частотах, то была выбрана следующая стратегия конструирования антенны. Излучающая структура проектируется так, чтобы обеспечить во всем дециметровом диапазоне (470–860 МГц) требуемую ДН и уровень согласования по КСВ не хуже 1,2–1,3. В дальнейшем для конкретных рабочих каналов, которых может быть до 4–5, и располагаться они могут довольно произвольно по ДМВ диапазону,

необходимый уровень согласования достигается с помощью настраиваемого согласующего устройства. Для получения равномерного по азимуту излучения используется питаемая в квадратуре турникетная антенна из двух ортогональных полотен.



а)

б)

(а) – зигзагообразная; (б) – из вибраторов шунтового типа

Рисунок 6 – Промышленные образцы телевизионных антенн

Чтобы получить достаточно узкую ДН в вертикальной плоскости, используются решетки проволочных элементов. Принципиально, что между элементами (ячейками) решеток в обеих предлагаемых антеннах имеется гальванический контакт, что делает антенны чрезвычайно удобными с конструктивной точки зрения. Во-первых, вся конструкция становится цельнометаллической и самонесущей. Во-вторых, антенны могут быть выполнены из трубок, внутри которых размещаются фидеры питания [15, 18, 35, 36].

В **Приложениях** приводится вывод различных формул и соотношений, излагаются подробности разработанных алгоритмов, помещены листинги отдельных модулей разработанных программ, а также копии восьми актов о практическом использовании результатов исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложена универсальная система базисных функций для анализа произвольных конструкций из тонких проводников, отличающаяся от известных тем, что приводит к автоматическому выполнению условия Кирхгофа равенства нулю полного тока в узлах, где сходятся несколько проводников, и позволяет использовать минимальное число сегментов на длине волны [5, 24].

2. Разработаны метод и алгоритм электродинамического анализа произвольных проволочных систем, основанные на решении интегрального уравнения Поклингтона методом Галеркина с использованием предложенной системы базисных функций. Метод дает новое качество – он предоставляет новые возможности для моделирования – позволяет рассмотреть геометрически сложные структуры с общей длиной проводников до 500 длин волн, ранее не поддающиеся электродинамическому анализу. Решение электродинамической задачи полностью формализовано: достаточно задать геометрию системы и стороннее возбуждение и в дальнейшем весь расчет – определение элементов, формирование матричных уравнений, решение, определение выходных параметров – происходит автоматически [5, 24].

Разработанные алгоритмы позволяют решать задачи возбуждения проволочных систем произвольным сторонним источником: как набором сосредоточенных генераторов напряжения или генераторов падающей волны (задача излучения), так и внешним полем произвольной конфигурации (задача рассеяния), а также учитывать проводники с различными законами распределения погонного импеданса, как непрерывными, так и дискретными [25].

Создан комплекс программ, который прошел тщательное тестирование, как с точки зрения внутренней логики и непротиворечивости, так и сравнения с известными в литературе результатами (в том числе и рассчитанными с помощью современных пакетов MMANA и FEKO). Достоверность метода и программ подтверждается также экспериментальными данными и внедренными в производство практическими конструкциями антенн и решеток.

3. Рассмотрены недостаточно исследованные в литературе случаи симметрии проволочных структур – поворотной симметрии, зеркальной симметрии, линейной антенной решетки, в которых между соседними ячейками имеется гальванический контакт, реализуемый в виде общих узлов или проводников.

Для структур с поворотной симметрией разработан метод модификации единичной ячейки, который заключается в таком изменении ее геометрии, что соседние ячейки становятся изолированными друг от друга, а решение электро-

динамической задачи остается прежним. Это ведет к простым и хорошо разработанным методам работы с клеточно-циркулянтной матрицей взаимных импедансов.

Установлено, что для систем с зеркальной симметрией различных порядков базисные функции распадаются на два типа: гармоники типа A , которые находятся по одну сторону плоскости симметрии и фактически являются токовыми гармониками на структурах с изолированными частями, и гармоники типа B , которые либо пересекают плоскость симметрии, либо полностью лежат в плоскости симметрии.

Аналогичная ситуация имеет место и в линейной антенной решетке, между излучателями которой имеется гальванический контакт, реализуемый в виде общих узлов. Здесь гармоники типа A полностью принадлежат одному излучателю, а у гармоник типа B плечи принадлежат различным (соседним) излучателям и физически обеспечивают гальванический контакт между ними.

Указанные свойства гармоник в каждом случае порождают матрицы взаимных импедансов блочного вида, что позволило разработать экономичные способы расчета и заполнения этих матриц, а также экономичные методы решения СЛАУ.

Для всех рассмотренных случаев симметрии проволочных систем с ячейками произвольной конфигурации, между которыми имеется гальванический контакт, разработаны алгоритмы построения базисных функций, расчета элементов, заполнения матрицы взаимных импедансов и решения СЛАУ, а также созданы универсальные вычислительные программы [9].

4. Разработан новый метод расчета характеристик проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР с косоугольной сеткой. Каждый излучатель может состоять из набора произвольным образом ориентированных в пространстве проволочных отрезков, включая разветвления, петли и т. д. [37, 28, 17, 14, 34]. Для вычисления элементов матрицы взаимных импедансов в работе получены спектральные ряды из замкнутых аналитических выражений. Это позволяет снять ограничения на класс решаемых задач, поскольку известные в литературе методы, основанные на спектральном подходе, дают возможность вычислить элементы матрицы взаимных импедансов лишь для токовых гармоник, параллельных плоскости решетки.

Исследована возможность ускорения сходимости спектральных рядов с помощью ρ - и ε -алгоритмов. Установлено, что ρ -алгоритм дает расходящиеся результаты, а ε -алгоритм позволяет уменьшить число слагаемых в двойных рядах до 25–200 в большинстве случаев [20, 33].

На основе быстросходящихся рядов для функции Грина получены быстросходящиеся ряды для элементов матрицы взаимных импедансов, содержащие

лишь несколько десятков слагаемых, что в итоге приводит к уменьшению затрат процессорного времени примерно на порядок или позволяет увеличить волновой размер и сложность исследуемых излучателей при тех же затратах процессорного времени [43, 22, 40].

5. Разработан метод анализа ФАР модульного построения, отличающийся тем, что задача сводится к нахождению матрицы рассеяния апертуры бесконечной решетки, все блоки которой находятся из режима ФАР при возбуждении как из внутренней области набором падающих волн в питающих фидерах, так и из внешнего пространства совокупностью плоских волн Флоке. Метод практически опробован при исследовании многоэлементных решеток отражательного типа [6].

6. Получил дальнейшее развитие поэлементный метод анализа произвольных проволочных излучателей в составе плоской ФАР, существенным достоинством которого является одновременный расчет характеристик для множества положений луча. Высокая работоспособность метода достигнута за счет применения поэлементной процедуры расчета матрицы взаимных импедансов в сочетании с асимптотическим учетом дальних взаимных связей, использования адаптивных методов численного интегрирования, физически обоснованной аппроксимации криволинейного проводника ломаной линией, а также разумного выбора функций разложения искомого тока [16].

7. Предложены три вида интегральных уравнений для решения задачи о возбуждении плоскости с переменным импедансом, моделирующей наземный проволочный рефлектор с изменяющейся густотой ячейки, а также итерационные методы их решения с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье, свободные от трудоемкой процедуры нахождения матричных элементов. В качестве неизвестных функций рассматриваются электрический поверхностный ток, магнитный поверхностный ток и комбинация электрического и магнитного токов [23, 1, 38].

Предложен метод анализа систем с сетчатыми экранами или рефлекторами криволинейной формы [2].

8. Проведены обширные численные исследования различных излучателей, как одиночных, так и в составе решеток: логопериодических, вибраторных (одноканальных и двухканальных), спиральных.

Впервые установлены и объяснены аномальные эффекты в поведении входного импеданса и излучения одиночной логопериодической вибраторной антенны [3]. При этом антенна рассматривалась как единая проволочная конструкция. Применялась также оригинальная модель, разработанная для проволочных систем с двухпроводными линиями [4]. Показано, что причиной аномального поведения является резонансное возбуждение синфазной составляю-

щей токов распределительной линии. Установлено, что логопериодическая вибраторная антенна не может быть использована как элемент широкополосной плоской ФАР с широкоугольным качанием луча [26].

На примере вибратора со стойками исследован вопрос об управлении характеристиками излучателей. Найдено, что с помощью оптимизирующих нагрузок реактивного типа может быть расширена полоса рабочих частот данного излучателя [10, 27].

Показана возможность создания диапазонной ФАР с широкоугольным качанием луча на основе спиральных излучателей. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными данными. Результаты использованы при разработке многоэлементной ФАР для ныне действующей высокопотенциальной РЛС системы предупреждения о ракетном нападении «Волга» [8, 31].

Установлено, что на основе *V*-вибраторов различной конструкции может быть создана плоская многоэлементная ФАР, работающая в полосе частот до 40 % и секторе углов до 60° от нормали к плоскости решетки [13, 21, 32, 45].

Исследование двухканального турникетного вибратора *V*-типа в плоской ФАР, находящего применение в создаваемых перспективных РЛС высокой заводской готовности, показало, что приемлемый уровень характеристик достигается в полосе частот до 40 % и секторе углов сканирования до 50–60° от нормали к плоскости решетки [19].

Установлено, что диаграмма направленности несимметричного конического вибратора в составе плоской ФАР имеет почти идеальную воронкообразную форму с управляемым максимумом излучения, что важно в ряде практических приложений [29, 7].

9. В интересах создания загоризонтных РЛС исследованы радиолокационные характеристики рассеяния в коротковолновом диапазоне волн летательных аппаратов: самолета-истребителя, самолета-бомбардировщика В2, баллистической ракеты (в том числе и с работающими двигателями). Показано, что при изменении частоты от 5 МГц до 50 МГц различие между значениями сечения обратного рассеяния самолетов для горизонтальной и вертикальной поляризаций изменяется от 30 дБ до нуля. Установлено, что для баллистической ракеты работающие двигатели повышают сечение обратного рассеяния примерно на 10 дБ.

Исследована возможность уменьшения радиовидимости летательных аппаратов. С этой целью объекты моделировались проводниками с погонным импедансом. Установлено, что при чисто активном погонном импедансе возрастание величины импеданса ведет к уменьшению сечения обратного рассеяния на всех частотах и углах. Показано, что эффекта уменьшения сечения обратного рассеяния можно добиться и с помощью реактивного погонного импеданса, хо-

тя здесь нет ярко выраженных закономерностей [12, 42, 30, 11].

10. Разработаны две широкополосные многоканальные передающие телевизионные антенны ДМВ-диапазона: зигзагообразная и из вибраторов шунтового типа. Антенны обладают почти равномерной диаграммой направленности в азимутальной плоскости и узконаправленной в вертикальной плоскости. Отличительной особенностью антенн является цельнометаллическая самонесущая конструкция [41, 18, 35, 39, 15, 36].

Предложена антенна для устройства дистанционного получения информации с компьютера [44].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Методы и алгоритмы реализованы в виде комплекса программ под общим именем SAPRA на языке Fortran-4 и в системе MathCad Pro.

Программы используются на протяжении более 25 лет в РНИУП «Луч» при исследовании и проектировании антенных устройств различного назначения по заказам и договорам с предприятиями и организациями Беларуси, России, Украины, Казахстана, Молдовы.

Применение данных программ позволяет РНИУП «Луч» отказаться от покупки зарубежного лицензионного программного обеспечения (импортозамещение), а также в значительной степени заменить дорогостоящее экспериментальное моделирование численным экспериментом и тем самым существенно сократить сроки и удешевить разработку антенно-фидерных устройств и систем (имеется акт о практическом использовании результатов исследования).

2. На основе результатов диссертации было проведено всестороннее теоретическое исследование, оптимизация параметров и разработка излучателя, а также фазированной антенной решетки для высокопотенциальной РЛС системы предупреждения о ракетном нападении «Волга». Это позволило создать ФАР с предельными требованиями по ширине полосы и сектору обзора.

Результаты работ вошли составной частью в Эскизный и Технический проекты по станции, на основании которых была разработана и согласована с Заказчиком рабочая конструкторская документация и освоен в производстве излучатель для ФАР.

В настоящее время РЛС «Волга» введена в строй Российской Федерацией на территории Республики Беларусь и находится на дежурстве (имеется акт о практическом использовании результатов исследования).

3. На основе результатов диссертации было проведено теоретическое исследование и оптимизация параметров подстилающего и формирующего

рефлекторов загоризонтной РЛС коротковолнового диапазона «Волна». Целью работ являлось получение максимально прижатой к горизонту диаграммы направленности, напрямую определяющей дальность действия системы, при одновременном требовании уменьшения металлоемкости рефлекторов. В итоге путем оптимизации геометрии и размеров ячейки вдоль рефлектора удалось снизить затраты дорогого и дефицитного биметаллического провода примерно на 20%.

Результаты работ вошли составной частью в Эскизный и Технический проекты по станции, на основании которых была разработана и согласована с Заказчиком рабочая конструкторская документация, изготовлено, смонтировано на объекте, настроено и поставлено на боевое дежурство изделие «Волна» (имеется акт о практическом использовании результатов исследования).

4. Результаты диссертационной работы в части анализа ФАР модульного построения использовались в программе 707–403 и при проектировании модулей пассивной ФАР РЛС «Руза», а также ФАР с плотным расположением элементов в апертуре РЛС «Самара» – была проведена численная оптимизация параметров излучателя и всего модуля. РЛС «Руза» была введена в строй в составе двухдиапазонного комплекса, на котором был выполнен большой объем экспериментальных работ по наблюдениям объектов в ближнем околоземном Космосе (имеется акт о практическом использовании результатов исследования).

5. Предложены и подробно численно исследованы два типа перспективных широкополосных многоканальных передающих антенн дециметрового диапазона. Антенны освоены на РНИУП «Луч» в серийном производстве и поставляются на телецентры Беларуси, России, Украины, Казахстана, Молдовы. К настоящему времени в общей сложности поставлено более 70 антенн на сумму около 740 000 долларов США (имеется 2 акта о практическом использовании результатов исследования).

6. Методы, алгоритмы и программы используются в ГГУ им. Ф. Скорины и ГГТУ им. П.О. Сухого в учебном процессе при проведении лабораторных работ, выполнении курсовых и дипломных работ, подготовке магистрантов, а также выполнении НИР и НИОКР по хозяйственной тематике (имеется 2 акта о практическом использовании результатов исследования).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1. Кудин, В.П. Итерационный метод расчета поля, рассеянного плоской поверхностью с переменным импедансом / В.П. Кудин, Ю.С. Ушаков // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1981. – Т. 24, № 2. – С. 97–101.
2. Вяхирев, Н.И. Анализ дифракционных эффектов в антенне Кассегрена с проволочным вспомогательным зеркалом / Н.И. Вяхирев, В.П. Кудин // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1983. – Т. 26, № 8. – С. 79–81.
3. Кудин, В.П. Аномальные эффекты логопериодической вибраторной антенны / В.П. Кудин, Н.И. Шлык, А.П. Рубан // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1985. – Т. 28, № 3. – С. 61–64.
4. Кудин, В.П. Электродинамический анализ двухпроводной линии, нагруженной системой вибраторов / В.П. Кудин // Радиотехника. – 1986. – № 3. – С. 89–90.
5. Кудин, В.П. Алгоритмизация задач возбуждения проволочных структур / В.П. Кудин, А.П. Рубан // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1986. – Т. 29, № 8. – С. 10–15.
6. Кудин, В.П. Анализ отражательной ФАР модульного построения / В.П. Кудин, И.И. Луханин, Ю.С. Ушаков // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1989. – Т. 32, № 2. – С. 78–80.
7. Кудин, В.П. Фазированная антенная решетка из конических вибраторов / В.П. Кудин // Докл. БГУИР. – 2005. – № 1 (9). – С. 43–47.
8. Кудин, В.П. Диапазонная ФАР с широкоугольным качанием луча на основе спиральной антенны / В.П. Кудин // Антенны. – 2005. – Вып. 4 (95). – С. 3–6.
9. Кудин, В.П. Алгоритмизация задач возбуждения проволочных структур с симметрией вращения / В.П. Кудин // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48, № 5. – С. 33–40.
10. Кудин, В.П. Собственные функции вибраторного излучателя с опорными стойками и управление его диапазоном / В.П. Кудин // Доклады БГУИР. – 2005. – № 2 (10). – С. 144–149.
11. Кудин, В.П. Характеристики рассеяния самолета-бомбардировщика В2 в коротковолновой области / В.П. Кудин // Антенны. – 2005. – Вып. 7–8 (98–99). – С. 38–40.
12. Кудин, В.П. Радиолокационное сечение рассеяния баллистической ракеты / В.П. Кудин // Вестн. ВА РБ. – 2005. – № 3. – С. 69–71.

13. Кудин, В.П. Диапазонный вибратор с плоскими плечами / В.П. Кудин // Антенны. – 2006. – Вып. 2 (105). – С. 40–41.
14. Кудин, В.П. Метод анализа проволочных излучателей произвольной формы в составе бесконечной плоской фазированной антенной решетки / В.П. Кудин // Антенны. – 2006. – Вып. 4 (107). – С. 22–28.
15. Кудин, В.П. Широкополосная передающая телевизионная антенна дециметрового диапазона из вибраторов шунтового типа / В.П. Кудин, Н.Е. Санников // Доклады БГУИР. – 2006. – № 2 (14). – С. 17–22.
16. Кудин, В.П. Электродинамические характеристики цилиндрической спиральной антенны в составе плоской ФАР / В.П. Кудин // Вестн. ВА РБ. – 2006. – № 2. – С. 47–51.
17. Кудин, В.П. Анализ проволочных излучателей в составе бесконечной плоской фазированной антенной решетки / В.П. Кудин // Антенны. – 2006. – Вып. 6 (109). – С. 20–25.
18. Кудин, В.П. Широкополосная зигзагообразная передающая телевизионная антенна дециметрового диапазона / В.П. Кудин, Н.Е. Санников // Антенны. – 2006. – Вып. 6 (109). – С. 26–29.
19. Кудин, В.П. Двухканальная плоская ФАР из турникетных вибраторов *V*-типа / В.П. Кудин // Антенны. – 2006. – Вып. 11 (114). – С. 56–62.
20. Кудин, В.П. Использование ρ - и ε -алгоритмов для ускорения сходимости характеристик излучателей бесконечной плоской ФАР / В.П. Кудин // Антенны. – 2006. – Вып. 12 (115). – С. 18–23.
21. Кудин, В.П. Плоская фазированная антенная решетка из вибраторов *V*-типа / В.П. Кудин // Доклады БГУИР. – 2007. – № 1 (17). – С. 42–48.
22. Кудин, В.П. Метод анализа проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 7 (122). – С. 13–17.
23. Кудин, В.П. Итерационные алгоритмы численного решения задачи возбуждения плоскости с переменным импедансом / В.П. Кудин, Б.А. Верига // Наукоемкие технологии. – 2007. – Т. 8, № 8. – С. 15–20.
24. Кудин, В.П. Анализ произвольных проволочных структур из прямолинейных проводников. Часть 1: Вычисление матрицы взаимных импедансов / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 9 (124). – С. 6–11.
25. Кудин, В.П. Анализ произвольных проволочных структур из прямолинейных проводников. Часть 2: Учет потерь в проводниках и произвольного падающего поля / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 9 (124). – С. 12–16.
26. Кудин, В.П. Ослепление плоской ФАР из логопериодических вибраторных антенн / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 12 (127). – С. 58–62.

Материалы конференций

27. Кудин, В.П. Управление диапазоном вибраторного излучателя с опорными стойками / В.П. Кудин // Материалы IX Межвузов. науч.-практ. конф., Гомель, 3 февр. 2005 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: В.С. Решетько [и др.]. – Гомель, 2005. – Ч. 2. – С. 110–112.

28. Кудин, В.П. Анализ бесконечной плоской фазированной антенной решетки из проволочных излучателей / В.П. Кудин // Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2005): материалы XI Междунар. науч.-тех. конф., Воронеж, 12–14 апр. 2005 г.: в 3 т. / Воронеж. гос. ун-т; редкол.: Б.Я. Осипов [и др.]. – Воронеж, 2005. – Т. 3. – С. 1851–1857.

29. Кудин, В.П. Плоская фазированная антенная решетка из конических вибраторов / В.П. Кудин // II Междунар. науч. конф. по военно-тех. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 18–19 мая 2005 г. / Гос. военно-пром. комитет РБ, Бел. ин-т системного анализа и информ. обесп. науч.-тех. сферы; редкомитет: В.Е. Кратенок [и др.]. – Минск, 2005. – С. 93–94.

30. Кудин, В.П. Радиолокационное сечение рассеяния самолетов и ракет в коротковолновом диапазоне / В.П. Кудин // II Междунар. науч. конф. по военно-тех. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 18–19 мая 2005 г. / Гос. военно-пром. комитет РБ, Бел. ин-т системного анализа и информ. обесп. науч.-тех. сферы; редкомитет: В.Е. Кратенок [и др.]. – Минск, 2005. – С. 95–96.

31. Кудин, В.П. Плоская фазированная антенная решетка из спиральных антенн / В.П. Кудин // Материалы X Межвуз. науч.-практ. конф., Гомель, 1 февр. 2006 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: В.С. Решетько [и др.]. – Гомель, 2006. – Ч. 2. – С. 127–129.

32. Кудин, В.П. Плоская фазированная антенная решетка из вибраторов *V*-типа / В.П. Кудин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 16 Междунар. Крымской конф. КрыМиКо`2006, Севастополь, 11–15 сент. 2006 г.: в 2 т. / Севастопол. нац. тех. ун-т, редкол.: П.П. Ермолов [и др.]. – Севастополь, 2006. – Т. 2. – С. 433–434.

33. Кудин, В.П. Ускорение сходимости характеристик излучателей бесконечной плоской ФАР с помощью ρ - и ε -алгоритмов / В.П. Кудин // Материалы XI Межвуз. науч.-практ. конф., Гомель, 1–2 февр. 2007 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: В.С. Решетько [и др.]. – Гомель, 2007. – Ч. 2. – С. 186–189.

34. Кудин, В.П. Метод анализа проволочных излучателей произвольной формы в составе бесконечной плоской фазированной антенной решетки / В.П. Кудин // Материалы XI Межвуз. науч.-практ. конф., Гомель, 1–2 февр. 2007 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: В.С. Решетько [и др.]. – Гомель, 2007. – Ч. 2. – С. 189–192.

35. Кудин, В.П. Широкополосная зигзагообразная передающая телевизионная антенна дециметрового диапазона / В.П. Кудин, Н.Е. Санников // Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2007): материалы XIII Междунар. науч.-тех. конф., Воронеж, 17–19 апр. 2007 г.: в 3 т. / Воронеж. гос. ун-т; редкол.: Б.Я. Осипов [и др.]. – Воронеж, 2007. – Т. 1. – С. 475–480.

36. Кудин, В.П. Широкополосная передающая телевизионная антенна ДМВ-диапазона из вибраторов шунтового типа / В.П. Кудин, Н.Е. Санников // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 17 Междунар. Крымской конф. КрыМиКо'2007, Севастополь, 10–14 сент. 2007 г. / Севастопол. нац. тех. ун-т, редкол.: П.П. Ермолов [и др.]. – Севастополь, 2007. – С. 425–426.

37. Kudzin, V.P. The method for wire radiators analysis in infinite planar phased array / V.P. Kudzin // 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07) Sevastopol, the Crimea, Ukraine, Sept. 17–21, 2007 / Sevastopol, 2007. – P. 412–414.

38. Кудин, В.П. Итерационный метод численного решения задачи возбуждения плоскости с переменным импедансом / В.П. Кудин // Материалы XII Межвуз. науч.-практ. конф., Гомель, 5 февр. 2008 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: В.С. Решетько [и др.]. – Гомель, 2008. – Ч. 2. – С. 3–5.

39. Кудин, В.П. Широкополосная передающая ТВ-антенна ДМВ-диапазона из вибраторов шунтового типа / В.П. Кудин, Н.Е. Санников // Материалы XII Межвуз. науч.-практ. конф., Гомель, 5 февр. 2008 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: В.С. Решетько [и др.]. – Гомель, 2008. – Ч. 2. – С. 19–20.

40. Kudzin, V.P. The fast converging method of calculation of wire radiators in infinite planar phased antenna array / V.P. Kudzin // 7th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'09), Lviv, Ukraine, Oct. 6–9, 2009 / Lviv, 2009. – P. 143–144.

41. Kudzin, V.P. The broadband multichannel UHF transmitting TV antenna / V.P. Kudzin, N.J. Sannikov // 7th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'09), Lviv, Ukraine, Oct. 6–9, 2009 / Lviv, 2009 – P. 193–194.

Тезисы докладов

42. Кудин, В.П. Радиолокационное сечение рассеяния летательных аппаратов / В.П. Кудин, Б.А. Верига // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 4–6 июля 2002 г. / Гомел. гос. техн. ун-т, АООТ «ОКБ Сухого»; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. – Гомель, 2002. – С. 74–75.

43. Кудин, В.П. Анализ проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР / В.П. Кудин // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 4–6 июля 2002 г. / Гомел. гос. техн. ун-т, АООТ «ОКБ Сухого»; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. – Гомель, 2002. – С. 75–76.

44. Кудин, В.П. Антенна для устройства дистанционного получения информации с компьютера / В.П. Кудин // Тезисы докл. науч.-практ. конф., Гомель, 4 февр. 2003 г.: в 2 ч. / Гомел. фил-л Междунар. ин-та трудовых и социальных отношений; редкол.: С.И. Лях [и др.]. – Гомель, 2003. – Ч. 2. – С. 10–12.

45. Кудин, В.П. Характеристики вибраторов V -типа с опорными стойками в составе плоской фазированной антенной решетки / В.П. Кудин // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. VI Междунар. науч.-тех. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому), Гомель, 19–20 окт. 2006 г. / Гомел. гос. техн. ун-т, АООТ «ОКБ Сухого»; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. – Гомель, 2006. – С. 110–111.

РЭЗІЮМЭ

Кудзін Віктар Панцялеевіч

Драцяныя антэны, краты і рассейнікі. Лікавае мадэляванне і новыя канструкцыі

Ключавыя словы: драцяныя антэны, фазаваныя антэнныя краты, метады інтэгральных раўнанняў, лікавыя метады.

Аб'ект даследавання: драцяныя антэны і рассейнікі адвольнай формы, а таксама антэнныя краты, лінейныя і плоскія, на іх аснове.

Прадмет даследавання: метады лікавага мадэлявання драцяных антэн і кратаў, якія дазваляюць пабудаваць універсальныя і эфектыўныя алгарытмы і праграмы для аналізу і распрацоўкі новых антэнных сістэм.

Мэта працы: стварэнне эфектыўных і універсальных метадаў электрадынамічнага аналізу адвольных драцяных антэн і фазаваных антэнных кратаў (ФАК) на іх аснове і распрацоўка пры іх дапамозе антэн і кратаў разнастайнага прызначэння.

Даследаванні праведзены з выкарыстаннем метаду інтэгральных раўнанняў (ІР), тэорыі абагульненых уласных функцый, спектральнага і паэлементнага метадаў аналізу ФАК.

Атрыманыя вынікі. У дысертацыйнай працы былі атрыманы наступныя вынікі:

- распрацаваны універсальны метады электрадынамічнага аналізу адвольных драцяных сістэм, пабудавана мадэль драцяных сістэм з двухправаднымі лініямі, прапанаваны метады ўліку гальванічнага кантакту паміж суседнімі ячэямі, які рэалізуецца ў выглядзе агульных вузлоў ці праваднікоў, у структурах з люстраной і паваротнай сіметрыяй, а таксама ў лінейнай і плоскай кратых, распрацаваны два метады разліку характарыстык адвольных драцяных выпраменнікаў у складзе бясконцай плоскай ФАК з косавугольнай сеткай, прапанаваны тры віды ІР для аналізу наземнага рэфлектара са зменнай гушчыней ячэй і распрацавана ітэрацыйная схема іх развязання;

- распрацаваны і ўкаранены новыя тэхнічныя вырашэнні: выпраменнік і ФАК для перспектыўнай РЛС “Волга”, драцяныя рэфлектары для загарызонтнай РЛС кароткахвалевага дыяпазона “Волна”, дзве шырокапалосныя шматканальныя перадавальныя тэлевізійныя антэны дэцыметравага дыяпазону, асвоеныя ў серыйнай вытворчасці.

РЕЗЮМЕ

Кудин Виктор Пантелеевич

Проволочные антенны, решетки и рассеиватели. Численное моделирование и новые конструкции

Ключевые слова: проволочные антенны, фазированные антенные решетки, метод интегральных уравнений, численные методы.

Объект исследования: проволочные антенны и рассеиватели произвольной формы, а также антенные решетки, линейные и плоские, на их основе.

Предмет исследования: методы численного моделирования проволочных антенн и решеток, позволяющие построить универсальные и эффективные алгоритмы и программы для анализа и разработки новых антенных систем.

Цель работы: создание эффективных и универсальных методов электродинамического анализа произвольных проволочных антенн и фазированных антенных решеток (ФАР) на их основе и разработка с их помощью антенн и решеток различного назначения.

Исследования проведены с использованием метода интегральных уравнений (ИУ), теории обобщенных собственных функций, спектрального и поэлементного методов анализа ФАР.

Полученные результаты. В диссертационной работе были получены следующие результаты:

- разработан универсальный метод электродинамического анализа произвольных проволочных систем, построена модель проволочных систем с двухпроводными линиями, предложены методы учета гальванического контакта между соседними ячейками, реализуемого в виде общих узлов или проводников, в структурах с зеркальной и поворотной симметрией, а также в линейной и плоской решетках, разработаны два метода расчета характеристик произвольных проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР с косоугольной сеткой, предложены три вида ИУ для анализа наземного рефлектора с изменяющейся густотой ячейки и развита итерационная схема их решения;

- разработаны и внедрены новые технические решения: излучатель и ФАР для перспективной РЛС «Волга», проволочные рефлекторы для загоризонтной РЛС коротковолнового диапазона «Волна», две широкополосные многоканальные передающие телевизионные антенны дециметрового диапазона, освоены в серийном производстве.

SUMMARY

Viktar Kudzin

The Wire Antennas, Arrays and Scatterers. Numerical Investigation and New Designs

Keywords: wire antennas, phased antenna arrays, integral equation method, numerical methods.

The object of investigation: the arbitrary shaped wire antennas and scatterers, linear and planar antenna arrays on their basis.

The subject of investigation: numerical methods for investigation of wire antennas and arrays, allowing to create the universal and effective algorithms and programs for analysis and new antenna systems design.

The goal of the work: creation of the effective and universal methods of electrodynamic analysis of arbitrary shaped wire antennas and phased antenna arrays and design with their help antennas and arrays for various purposes.

Research has been carried out with the use of integral equation method, the theory of generalized eigenfunctions, the spectral and element-by-element methods of phased antenna array analysis.

Results. The following results have been achieved in dissertational work:

- the universal method of the electrodynamic analysis of arbitrary wire systems is developed, the model of wire systems with two-wire lines is constructed, methods of the account of galvanic contact between the adjacent cells, sold as the common nodes or conductors, in structures with mirror and rotation symmetry, and also in linear and planar arrays are offered, two methods of characteristics calculation of arbitrary wire radiators in structure of infinite planar phased antenna array with an oblique grid are developed, three kinds of integral equations for the analysis of a ground reflector with varying density of a cell are offered and the iterative procedure of their solution is advanced;

- new technical solutions are developed: the radiator and phased antenna array for the radar «Volga», wire reflectors for the short-wave range over-the-horizon radar «Volna», two broadband multichannel transmitting television UHF antennas mastered in a batch production.

Научное издание

**Кудин
Виктор Пантелеевич**

**ПРОВОЛОЧНЫЕ АНТЕННЫ, РЕШЕТКИ И РАССЕЙВАТЕЛИ.
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

Специальность 05.12.07 – Антенны,
СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровки, 6