

Илларионов Иван Александрович

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАССЕЙВАЮЩИЕ СВОЙСТВА  
АНТЕНН СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ  
ПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ, В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ**

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2011

Работа выполнена на предприятии: Федеральное государственное унитарное предприятие федеральный научно-производственный центр «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Кашин Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кудрин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент  
Когтева Людмила Владимировна

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие «РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР - Всероссийский научно-  
исследовательский институт экспериментальной  
физики», г. Саров

Защита состоится 30 ноября 2011 г. в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950, г.Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Автореферат разослан \_\_\_\_ октября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

А.В. Назаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Антенны радиотехнических систем часто приходится располагать вблизи поверхностей и объектов, имеющих высокую проводимость, что приводит к появлению вторичного излучения токов на объекте, индуцированных первичным полем антенны. Вторичное излучение, в свою очередь, искажает первичное поле антенны. Кроме того, конструкция самой антенны может включать проводящие элементы, прямо не участвующие в излучении, однако, влияющие на появление вторичного излучения. Очевидно, что искажения характеристик излучения в свободном пространстве особенно сильны для слабонаправленных антенн [Л1, Л2]. В случае бортовых антенн корпус летательного аппарата иногда оказывает решающее влияние на характеристики слабонаправленных антенн [Л2, Л3].

Следовательно, задача разработки методов, позволяющих определять или исключать вторичные источники, искажающие диаграммы направленности (ДН) антенн, является весьма актуальной [Л1, Л4, Л5].

Особенно актуальна данная задача в технике измерений характеристик антенно-фидерных систем (АФС) в ближней зоне, т.к. ограниченные размеры активной измерительной зоны приводят к существенному уровню вторичного сигнала, являющегося результатом отражений прямого сигнала от посторонних проводящих объектов, находящихся вблизи зондовой и испытываемой антенн (ИА) (юстировочные фланцы, элементы конструкции сканера и опорно-поворотного устройства), что в свою очередь, приводит к ошибкам измерения характеристик излучения ИА.

Существующие методы исключения вторичных или внешних источников являются методами обработки результатов измерения параметров испытываемых антенн в ближней или дальней зонах [Л1, Л4, Л5, Л6, Л7]. В данных методах о характеристиках вторичного источника излучения известна, в лучшем случае, его ДН.

Таким образом, для определения положения относительно испытываемой или зондовой антенны, амплитудно-фазового распределения возбуждения вторичных источников излучения, искажающих ДН, необходимо решать задачу анализа влияния отдельных структурных составляющих поверхности объекта вблизи системы токов антенны, проверяя, как сказываются эти составляющие на заданные параметры антенны. Поэтому, разработка моделей излучения используемых при измерениях параметров АФС в ближней зоне зондовых антенн - открытого конца волновода (ОКВ), пирамидальных рупорных излучателей, вблизи проводящих объектов - является важной задачей исследования.

Другой причиной ошибок при измерениях характеристик излучения антенн в ближней зоне является взаимодействие ИА и зондовой антенн. Первичным полем ИА на поверхности зондовой антенны наводятся токи, являющиеся источником не только прямого (полезного) сигнала, но и рассеянного поля. В свою очередь, ИА также является рассеивателем. Как следствие, к прямому сигналу на выходе зондовой антенны добавляется

сигнал, причина появления которого – рассеяние первичного поля излучения ИА на зондовой антенне и на самой ИА. На практике эффектами взаимодействия ИА и зонда часто пренебрегают или исключают их тем или иным эмпирическим способом. Однако методы исключения не универсальны и далеко не всегда применимы на практике. Разработка же теоретических методов затруднена тем, что практическое определение матрицы рассеяния антенн весьма затруднительно и на данный момент отсутствуют общепринятые модели таких матриц [Л6].

Таким образом, определение рассеивающих свойств зондовых антенн, а также разработка методов (экспериментальных или теоретических) учета и исключения эффектов взаимодействия зондовых и испытуемых антенн весьма актуальна.

Изучение характеристик рассеяния объектов в их ближней зоне представляет большой интерес в различных областях техники: в антенных измерениях в ближней и дальней зонах с целью исключения ошибок измерения, обусловленных переотражениями первичного поля от пассивных проводящих объектов [Л8], в дистанционном зондировании сред [Л9], в радарх предупреждения столкновений [Л10, Л11], в радарх систем посадки [Л11]. Другой причиной исследования характеристик рассеяния объектов в их ближней зоне – измерение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объектов на расстояниях, не соответствующих критерию дальней зоны [Л12]. Сказанное определяет актуальность разработки методов измерений характеристик рассеяния объектов в их ближней зоне, а также разработки моделей электродинамических систем, состоящих из приемной и излучающей антенн, расположенных в ближней зоне рассеивающего пассивного объекта.

**Целью** настоящей диссертационной работы является анализ характеристик излучения и рассеяния зондовых слабонаправленных и остронаправленных антенн СВЧ и КВЧ диапазонов в широкой частотной полосе, предназначенных для измерения параметров АФС в ближней зоне и расположенных вблизи проводящих объектов конечных размеров; теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия антенн с проводящими пассивными объектами в их ближней зоне.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. анализ характеристик излучения (ДН, коэффициента усиления (КУ)) зондовой антенны на основе открытого конца прямоугольного волновода (ОКПВ), расположенного вблизи фланца конечных размеров, в приближении физической теории дифракции (ФТД);
2. синтез источников, искажающих диаграмму направленности ОКПВ, рассчитанной в приближении апертурной теории, и учет влияния этих источников на коэффициент усиления ОКПВ в широкой полосе частот;
3. разработка теоретических и экспериментальных методов анализа влияния проводящих объектов на характеристики излучения

- измерительных слабонаправленных антенн с целью уменьшения искажений синтезируемых характеристик излучения;
4. анализ рассеивающих свойств основных типов зондовых антенн – ОКПВ, пирамидальной рупорной антенны в приближении ФТД;
  5. анализ рассеивающих свойств калибровочной проводящей сферы в ближней зоне в приближении ФТД;
  6. разработка теоретической модели электродинамической системы – излучающая антенна, приемная антенна, проводящий облучаемый калибровочный объект; экспериментальная верификация модели системы.

**Методы исследования.** В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Представленные в диссертационной работе теоретические результаты получены на основе метода физической теории дифракции (ФТД), метода эквивалентных краевых токов (ЭКТ), метода физической оптики (ФО), метода геометрической оптики (ГО), метода частичных областей (МЧО), и метода согласования мод.

### **Научная новизна.**

Научная новизна работы определяется полученными оригинальными результатами и заключается в следующем:

1. На основе комбинирования метода наведенных токов и ФТД создана модель излучения слабонаправленной антенны – ОКПВ, находящегося вблизи плоского проводящего фланца конечных размеров. Применением методов ФО и ФТД улучшена модель излучения ОКПВ с фланцем конечных размеров, позволяющая рассчитывать ДН данной антенны до углов  $\pm 90$  градусов в Е и Н сечениях с допустимой для практического применения погрешностью;
2. Разработан метод синтеза вторичных источников, искажающих диаграммы направленности ОКПВ, основанный на решении внутренней задачи анализа, решаемой в приближении ФО и ФТД, который может применяться для любой слабонаправленной антенны, расположенной вблизи проводящего фланца, имеющего конечные размеры, при произвольном расстоянии между антенной и поверхностью фланца;
3. На основе методов ЭКТ и ФТД разработана модель рассеяния ОКПВ и пирамидальной рупорной антенны. Произведен расчет структурной компоненты рассеяния, связанной с особенностями конструкций данных антенн. Произведен расчет переизлученной компоненты рассеянного поля антенн.
4. Рассчитан коэффициент отражения ОКПВ с применением метода сшивания (согласования мод);
5. В рамках ФТД разработана модель рассеяния идеально проводящей сферы, включающая определение рассеянных полей в ближней и дальней зонах сферы при падении на нее плоской электромагнитной

- волны. Показано, что при рассмотрении рассеянных полей в области обратного рассеяния можно пренебречь неоднородной составляющей поверхностного тока на сфере с допустимой погрешностью;
6. Разработана электродинамическая модель системы, состоящей из излучающей и приемной антенн, а также объекта, в качестве которого выступают простейшие рассеиватели: сфера, диск. Данные модели хорошо согласуются с данными измерения экспериментального образца системы.

**Обоснованность и достоверность результатов работы.** Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы определяется использованием апробированных асимптотических и численных методов анализа электродинамических структур, сопоставлением результатов теоретического и экспериментального исследования, а также согласованностью с результатами для частных случаев, полученными другими авторами.

**Научная и практическая значимость результатов работы.** Научная значимость работы состоит в получении результатов, вносящих вклад в решение задач рассеяния электромагнитных волн на антеннах. Полученные с помощью асимптотических методов анализа результаты по взаимодействию антенн с проводящими объектами в ближней зоне предоставляют возможность изучения таких проблем современной антенной теории, как взаимодействие антенн в ближней зоне, синтез слабонаправленных антенн вблизи проводящих объектов.

Практическая значимость работы состоит в разработке методических подходов минимизации ошибок измерения параметров АФС в ближней зоне путем применения разработанных моделей излучения и рассеяния зондовых антенн, а также моделей взаимодействия антенн с проводящими объектами в активной измерительной зоне; расширению диапазона углов восстановления ДН испытываемых антенн в разрабатываемых и существующих планарных стендах измерения параметров АФС в ближней зоне; в разработке методики проектирования зондовых антенн, в том числе сверхширокополосных (СШП) пирамидальных рупорных антенн Н – образного сечения, предназначенных для анализа переотражений в активной измерительной зоне; в разработке моделей анализа рассеивающих свойств объектов в ближней зоне, предназначенных для калибровки радаров в ближней зоне.

Полученные в диссертации результаты могут представлять интерес не только для ФГУП “ФНПЦ НИИС”, но и для следующих научно-исследовательских учреждений: РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИФМ РАН, ИПФ РАН, ФГБНУ НИРФИ, ННИИРТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, а также для коммерческих организаций, занимающихся разработкой оборудования для измерения параметров антенн в ближней и дальней зонах.

**Реализация и внедрение результатов.** Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, проводимых в ФГУП “ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова”. Разработанные зондовые антенны вошли в состав автоматизированного измерительного комплекса (АИК) “Вектор”, предназначенного для измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля на планарной поверхности в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц с целью восстановления характеристик излучения антенн и разработанного в ФГУП “ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова”, ГВАТ.411734.016.

Материалы диссертации, имеющие теоретическую значимость, использованы в учебном процессе при подготовке специалистов и магистров, обучающихся по радиотехническим специальностям, при чтении курса лекций на кафедре “Техника радиосвязи и телевидения” НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанная в приближении ФТД теоретическая модель излучения ОКПВ, находящегося вблизи плоского фланца или фланца конечной толщины, предоставляет возможность решения задачи синтеза вторичных источников излучения для класса слабонаправленных антенн.

2. Разработанные модели рассеяния ОКПВ и пирамидальной рупорной антенны с использованием методов ФТД, ЭКТ, апертурной теории и метода согласования мод позволяют выделять основные составляющие поля рассеяния антенн и поставить задачу синтеза минимально-рассеивающих зондовых антенн.

3. Применение метода согласования мод к структуре, представляющей собой экранированный прямоугольный волновод, позволяет получить частотные зависимости коэффициента отражения ОКПВ в свободном пространстве, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

4. Разработанная в приближении ФО методика расчета рассеивающих свойств простейших проводящих объектов сферы и диска в ближней зоне в области углов обратного рассеяния позволяет осуществлять анализ с достаточной точностью.

5. Разработанная в приближении ФО теоретическая модель электродинамической системы, включающей излучающую и приемную апертурные антенны в ближней зоне калибровочного рассеивателя (сферы, диска) позволяет проводить анализ вторичных источников излучения в активной измерительной зоне.

6. Созданные модели излучения зондовых антенн в свободном пространстве и в присутствии проводящих фланцев конечных размеров позволяют разрабатывать методики выполнения измерения параметров АФС в ближней зоне с высокой точностью.

**Публикации и апробация результатов.** Изложенные в диссертации результаты докладывались на XIII, XIV, XV, XVI, XVII Международных научно-технических конференциях “Информационные системы и технологии” (ИСТ) (Нижний Новгород, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011), V, VII, IX, X Международных научно-технических конференциях “Физика и технические приложения волновых процессов” (Самара, 2006; Самара, 2008, Челябинск, 2010; Самара, 2011), 13-й Научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 2009), 14-й Международной Крымской микроволновой конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, Крым, Украина, 2004), 6-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007), 5<sup>th</sup> ESA Workshop on Millimetre Waves Technology and Applications and 31<sup>th</sup> ESA Antenna Workshop (The Netherland, Noordwijk, ESTEC, 2009), а также на семинарах ФГУП “ФНПЦ НИИИС” и кафедры “Техника радиосвязи и телевидения” НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Материалы диссертации опубликованы в 23 печатных работах, из них 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, 14 работ в сборниках трудов международных и российских научных конференций, 3 тезисов докладов.

**Личный вклад автора** Непосредственное участие автора состоит в постановке задач и целей исследований, разработке теоретических моделей, проведении численных расчетов, проведении экспериментальных исследований.

**Структура и объём диссертации** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём диссертации составляет 212 страниц, включая 107 рисунков и 1 таблицу, 2 страницы приложения. Список цитированной литературы содержит 151 наименование.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во Введении** обосновывается актуальность выбранного направления исследований, формулируется цель исследований и кратко излагается содержание диссертационной работы.

**В первой главе** диссертационной работы приведены разработанные модели излучения зондовых антенн вблизи сторонних проводящих объектов.

Эти модели основаны на решении ряда задач, объединенных в решении методическим подходом, называемым в работе методом итерационного синтеза модели излучающих токов. Главное содержание метода – использование экспериментальных результатов (характеристик антенн), полученных для образцов, реализующих АФР, так называемого, первоначального, не модифицированного, синтеза. Несоответствие реализованных характеристик заданным, после их анализа, побуждает к

формированию моделей излучения с учетом влияния окружающих предметов антенны. Алгоритм метода состоит из следующих шагов: 1) начальный синтез, обеспечивающий заданные характеристики в свободном пространстве, 2) изготовление макета антенны, 3) измерение характеристик излучения полученного макета, 4) формирование модели дополнительных источников излучения, 5) исключение дополнительных источников, 6) сравнение с результатами синтеза п.1, 7) формирование методов исключения или ослабления дополнительных источников.

Описаны проблемы и постановка задачи учета влияния проводящих объектов в ближней зоне антенн, в частности в ближней зоне зондовых антенн, применяемых для измерения полей в ближней зоне АФС амплифазометрическим методом. Приведены модели излучения зондовой антенны – ОКПВ в свободном пространстве. Показаны недостатки существующих моделей излучения, основанных на применении интегральных формул Стрэттона-Чу в апертурном приближении (ошибка расчета ДН при больших углах отклонения от максимума может достигать значений 10 – 20 дБ). Теоретически и экспериментально показана необходимость учета в модели излучения ОКПВ токов, текущих по внешней поверхности антенны. Разработана модель излучения ОКПВ, учитывающая дополнительные электрические токи на внешних стенках волновода. Учет токов сводится к введению элементарных и изотропных излучателей, расположенных на узких стенках ОКПВ. Данные токи являются неравномерной частью поверхностного тока в плоскости апертуры ОКПВ в приближении ФТД.

Приведены данные измерений характеристик излучения конструкции зондовой антенны на основе ОКПВ 8-ми миллиметрового диапазона длин волн с юстировочным фланцем (см. рис. 1), которые не описываются моделями первой части главы. Измерения образца антенны-зонда являются реализацией очередного пункта алгоритма метода итерационного синтеза модели излучающих токов.



Рис.1

Приведены результаты исследования характеристик излучения ОКПВ в присутствии проводящего фланца с размерами много больше длины волны. Приведены теоретические модели излучения ОКПВ вблизи проводящего фланца в приближении геометрической оптики и метода изображений. Приведены результаты сравнения данных разработанных моделей с экспериментальными данными, полученными при измерениях параметров антенн в дальней зоне. Представлены угловые зависимости КУ ОКВ стандартного прямоугольного сечения 8-ми миллиметрового диапазона длин волн на нескольких частотах, вычисленные с помощью модели на основе метода изображений и КУ, измеренный в безэховой камере (БЭК). Измерения проводились в рабочей частотной полосе ОКПВ. Наблюдается совпадение форм экспериментальных и теоретических зависимостей КУ. Однако видны и расхождения –

флюктуации в области  $\theta \in (-15^\circ, 15^\circ)$ , отличие диаграмм в Е – плоскости в области углов  $\theta > 80^\circ$ ,  $\theta < -80^\circ$  для  $h = 10$  мм и  $\theta > 60^\circ$ ,  $\theta < -60^\circ$  для  $h = 60$  мм (где  $h$  – расстояние от апертуры ОКПВ до поверхности фланца). Данные эффекты объясняются конечными размерами фланца в эксперименте.

Рассмотрены результаты использования проведенного анализа для уменьшения влияния крепежного фланца на излучающие свойства ОКПВ (заключительный шаг метода итерационного синтеза модели излучающих токов), применяемого в качестве зондовой антенны при измерениях в ближней зоне.

Приведены результаты измерений характеристик излучения системы “ОКПВ – проводящий фланец” при уменьшенных размерах фланца, сравнимых с длиной волны излучения в свободном пространстве. Сделаны выводы о границах применения метода ГО и метода изображений для анализа излучения конструкции зондовой антенны.

Описано применение метода ФТД для анализа характеристик излучения слабонаправленной антенны вблизи проводящего фланца (плоского или объемного), решена задача синтеза вторичных источников излучения. Токи, текущие на плоскости фланца, разделяются на две составляющие: 1) равномерную, 2) неравномерную. Равномерная компонента определяется методом ФО. Рассеянное поле, обусловленное неравномерной компонентой тока, определяется методами ФТД с использованием функций  $f$  и  $g$  [Л13], используя решение канонической задачи дифракции плоской волны на клине. Получены выражения для поля излучения, обусловленного равномерной компонентой тока. Определен вклад неравномерной компоненты тока, учтенный отдельно в поле в Е и Н плоскостях. Описаны некоторые ограничения предложенной модели излучения системы “ОКПВ - фланец” в приближении ФТД. Приведены результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных в 8-ми миллиметровом диапазоне длин волн. Представлены угловые зависимости КУ ОКПВ на нескольких частотах, вычисленные с помощью разработанной модели и измеренные в БЭК. Наблюдается не только качественное, но и вполне удовлетворительное количественное совпадение экспериментальной и теоретической зависимости КУ. Абсолютная разность между экспериментальными и теоретическими, полученными в приближении ФО или ФТД, диаграммами достигает максимум 1-2 дБ в области больших углов (см. рис. 2).

Отличие между теоретическими зависимостями КУ в угловой области, полученными в приближении ФО и ФТД, заметно только при больших углах при  $\theta \rightarrow \pm 90^\circ$ . Приводятся объяснения и оценки данного эффекта. Показано, что модифицированием полученных выражений построенная модель излучения ОКПВ может использоваться при расстоянии от апертуры до поверхности фланца равным нулю. Сформулированы результаты и сделаны основные выводы к главе.

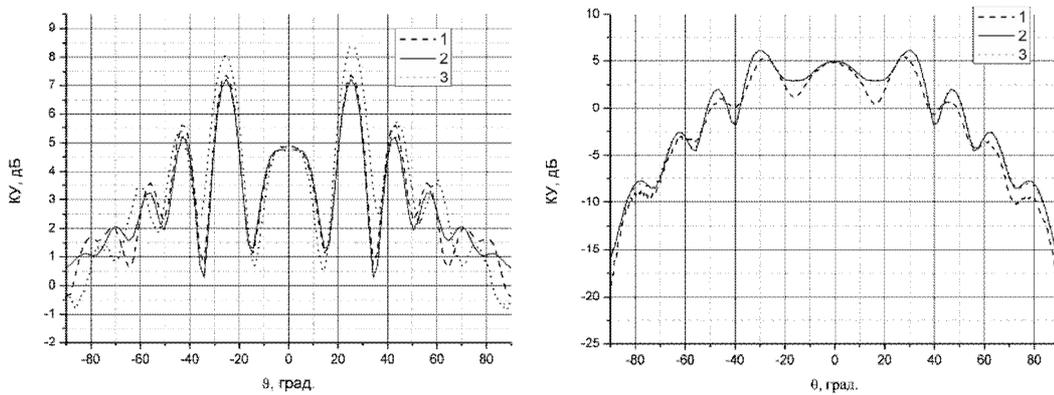


Рис. 2-Угловое распределение КУ на частоте 25,86 ГГц при расстоянии  $h = 30$  мм в E (а) и H (б) плоскостях при размерах фланца 60×60 мм; 1 – экспериментальные данные, 2 – модель на основе ФО, 3 – модель на основе ФТД

**Вторая глава** диссертации посвящена разработке моделей рассеяния зондовой антенны – ОКПВ. В главе показаны проблемы, возникающие при определении рассеивающих свойств антенн, и осуществлена постановка задачи. Описывается решение задачи нахождения аналитических выражений для поля, рассеянного ОКПВ, при падении на его апертуру плоской волны, а также разработка модели, позволяющей выделить в суммарном рассеянном поле структурную и переизлученную компоненты. Описывается решение задачи нахождения структурной составляющей поля, рассеянного ОКПВ, в приближении ФТД. Для определения структурной составляющей рассеяния ОКПВ антенна считается идеально согласованной и рассматривается задача дифракции плоской волны на структуре, представляющей собой трубу прямоугольного сечения с бесконечно тонкими идеально проводящими стенками. Для нахождения выражений для эквивалентных реберных токов используется решение задачи дифракции плоской волны на полуплоскости, для каждого ребра отдельно. В соответствии с методом ЭКТ, рассеянное поле от ребра ОКПВ используется в виде [Л14]:

$$\mathbf{E}^s(\theta, \varphi, R) = \frac{ikZ_0}{4\pi} \int_L \left( I(\mathbf{r}') [\mathbf{s}, [\mathbf{s}, \mathbf{t}]] + \frac{M(\mathbf{r}')}{Z_0} [\mathbf{s}, \mathbf{t}] \right) \cdot G(\mathbf{r}', \mathbf{r}) d\mathbf{l}, \quad \text{где } I(\mathbf{r}'), \quad M(\mathbf{r}') -$$

эквивалентные электрический и магнитный краевые (реберные) токи,  $\mathbf{r}', \mathbf{r}$  - радиус-векторы точки на ребре и точки наблюдения,  $d\mathbf{l} = |d\mathbf{r}'|$  - инкремент вдоль ребра в точке  $\mathbf{r}'$ ,  $\mathbf{s} = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$ ,  $G(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \frac{e^{-iks}}{4\pi s}$  - функция Грина. Для

определения значений эквивалентных краевых токов, возникающих при дифракции плоской волны на проводящей полуплоскости, для любых направлений наблюдения применен метод ФТД.

Описывается решение задачи нахождения переизлученной компоненты поля, рассеянного антенной, с применением метода, разработанного в [Л16]. Показано, что для определения переизлученной компоненты рассеянного поля ОКВ необходимо знать следующие характеристики: ДН, КУ,

коэффициент отражения (КО). Описан метод вычисления частотной зависимости КО ОКПВ. Суть этого метода в том, что исследуемый полубесконечный прямоугольный волновод помещается внутрь вспомогательного волновода с такой же формой поперечного сечения параллельно стенкам (см. рис.3). В результате дифракции моды  $H_{10}$  1-го (исследуемого) волновода возникает поле, которое состоит из полного набора мод волновода 3 при  $z > 0$ , полного набора мод 1-го волновода при  $z < 0$  и  $|x| < a, |y| < b$ , где  $a$  – размер широкой стенки 1-го волновода,  $b$  – размер узкой стенки 1-го волновода, полного набора мод прямоугольного коаксиального волновода (О – волновода), внутренним проводником которого является 1-й волновод, при  $z < 0$  и  $|x| > a, |y| > b$ . Таким образом, задача сводится к нахождению коэффициентов возбуждения мод 1-го волновода, мод прямоугольного коаксиального волновода и мод 3-го волновода. Размеры экранирующего волновода, начиная с которых коэффициент отражения моды  $H_{10}$  достигает устойчивого значения  $a_1 \times b_1 = 30a \times 30b$ .

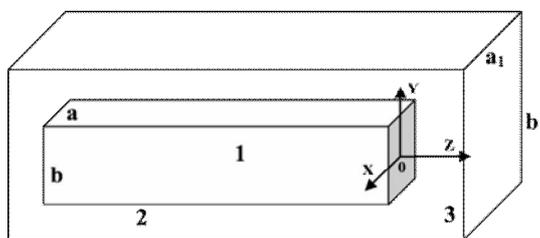


Рис. 3 1 – исследуемый волновод, 2 – прямоугольный коаксиальный волновод, 3 – вспомогательный волновод;  $a, b$  – размеры исследуемого волновода

Для расчета высших типов мод прямоугольного коаксиального волновода используется метод частичных областей (МЧО) [Л15]. Результаты расчета КО моды  $H_{10}$  ОКПВ приведены на рис. 4, для волновода сечением  $a_1 \times b_1 = 7.2 \times 3.4 \text{ мм}$ . Полученные численные результаты хорошо согласуются с данными эксперимента и данными других моделей, реализованных с помощью готового программного обеспечения, использующего один из конечно-разностных методов расчета.

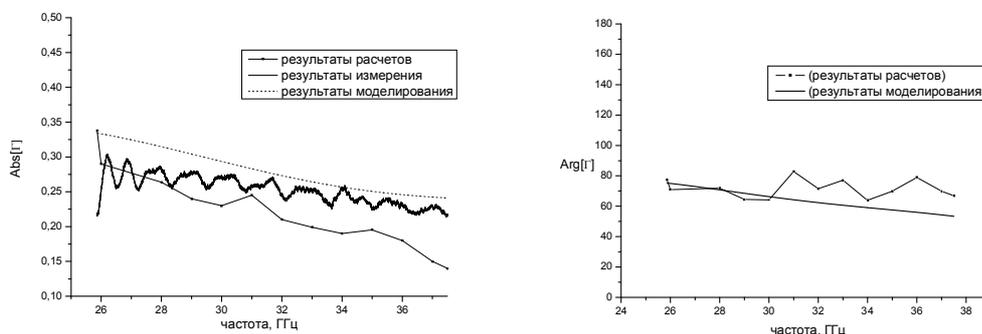


Рис. 4 (а) модуль КО  $H_{10}$  ОКПВ, (б) фаза КО  $H_{10}$  ОКПВ. Волновод сечением  $7.2 \times 3.4 \text{ мм}$  (стандартный волновод диапазона 8 мм).

Приведены результаты расчетов рассеивающих свойств (ЭПР) зондовой антенны – ОКВ прямоугольного стандартного сечения 8-ми миллиметрового диапазона длин волн. Сформулированы результаты и сделаны основные выводы к главе 2.

**В третьей главе** диссертации приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований рассеяния электромагнитных волн на апертурных антеннах СВЧ и КВЧ диапазонов и идеально проводящих пассивных объектах.

В главе приводятся результаты разработки моделей рассеяния пирамидальных рупорных антенн, используемых при измерениях в ближней зоне АФС СВЧ и КВЧ диапазонов. Для определения структурной составляющей рассеяния пирамидальной рупорной антенны, обусловленной наведенными токами на ребрах антенны, был применен метод, предложенный во второй главе. Однако помимо реберных токов вклад в структурную составляющую рассеянного поля антенны вносит так называемое модовое рассеяние. Получены аналитические выражения для структурной компоненты рассеяния, обусловленной модовым рассеянием в приближении апертурной теории. Для иллюстрации подхода к проблеме рассеивающих свойств пирамидальной рупорной антенны численно рассмотрены рассеивающие свойства конструкции антенны 8-ми миллиметрового диапазона длин волн при падении плоской волны с согласованной поляризацией нормально к ее апертуре. На рис. 5 изображены частотные зависимости ЭПР в направлении обратном направлению падения плоской волны, полученные в разных приближениях. Исследована технология расчета рассеянных полей апертурной антенны (многомодовой структуры) – открытого конца сверхразмерного волновода.

Приведены результаты разработки математической модели излучения, рассеяния и приема апертурными антеннами электромагнитных волн СВЧ и КВЧ диапазонов в ближней зоне рассеивателя. Описаны результаты определения рассеивающих свойств идеально проводящей сферы в ее ближней и дальней зоне. Для расчетов рассеянного поля идеально проводящей сферы использован метод ФТД, где для нахождения неоднородной составляющей рассеянного поля на сфере используется решение, предложенное Фоком и основанное на принципе локального поля, вспомогательной задачи дифракции плоской волны на бесконечном идеально проводящем цилиндре.

Полученные результаты численного анализа позволяют сделать вывод о том, что при вычислении рассеянных полей в ближней или дальней зонах идеально проводящей сферы в направлениях обратного рассеяния с приемлемой точностью можно использовать метод ФО, при рассмотрении направлений прямого рассеяния необходимо учесть неоднородную составляющую поверхностного тока на сфере (в области тени). На основании выводов предыдущего параграфа о возможности применения метода ФО в исследуемых задачах приведены результаты разработки математической модели системы, состоящей из приемной и излучающей апертурных антенн в

ближней зоне проводящего, зондируемого объекта. В качестве модели антенн выбирается система излучателей – набор (решетка) электрических диполей. Приведено сравнение экспериментальных и численных результатов. Приведено пространственное ослабление принятого сигнала (отношение мощности на приемной антенне к поданной мощности на излучающую антенну), полученное экспериментально и вычисленное с использованием модели, где в качестве объекта выступает идеально проводящая сфера с радиусом  $R = 15\lambda$ .

Данные модели хорошо согласуются с данными измерений экспериментального образца описанной системы. Приведены экспериментальные и расчетные данные по определению так называемой “квази-ЭПР” (пространственное ослабление, умноженное на значение расстояния между объектом и антеннами в четвертой степени) простейших объектов: сферы и диска.

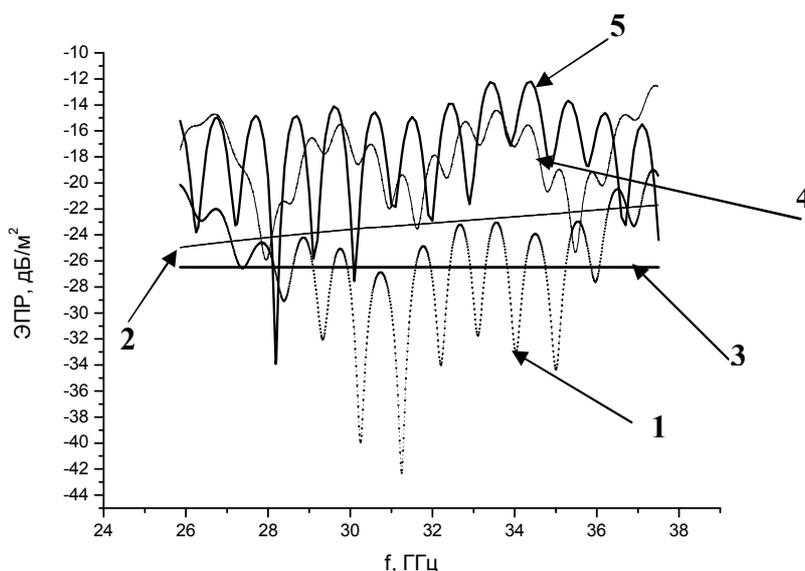


Рис. 5 ЭПР пирамидальной рупорной антенны в направлении обратном направлению падения плоской волны.

1 – ЭПР с учетом только переизлученной составляющей, расчет выполнен с учетом экспериментально измеренного КО входа антенны (переизлученная компонента и модовое рассеяние);

2 – ЭПР с учетом только структурной составляющей, обусловленной модовым рассеянием;

3 – ЭПР с учетом только структурной составляющей, обусловленной излучением реберных токов;

4 – ЭПР с учетом всех составляющих (разработанная в диссертации модель);

5 – ЭПР, рассчитанная с помощью конечно – разностного метода.

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследования и разработки зондовых антенн. В рамках диссертации были разработаны технологические антенны (зонды), которые устанавливаются на планарный сканер, предназначенные для приема сигнала от исследуемой антенны и передачи его в измерительный тракт. Модели зондовых антенн, разработанные в главе 1, вошли в методику выполнения измерений (МВИ)

сконструированного в НИИИС автоматизированного измерительного комплекса “Вектор”, предназначенного для измерения амплитудно-фазового распределения (АФР) электромагнитного поля на планарной поверхности в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц с целью восстановления характеристик излучения антенн. Разработанные в диссертации зондовые антенны являются составной частью АИК “Вектор”. Приведены результаты разработки и исследования СШП зондовых антенн СВЧ диапазона на примере пирамидальной рупорной антенны Н – образного сечения, применяемых для многочастотного анализа переотражений в активной измерительной зоне. Идентификация посторонних объектов в активной измерительной зоне может производиться по результатам измерения эталонных СШП антенн во временной области или в частотной с последующей операцией синтеза временного сигнала. В главе описана методика проектирования СШП пирамидальной рупорной антенны Н – образного сечения, включающая три связанных этапа (расчет КВП, рупорного излучателя и формы ребер), обеспечивающая получение широкой полосы при заданном минимальном значении частоты рабочего диапазона.

Приведенные результаты численного моделирования структуры антенны хорошо согласуются с результатами экспериментального исследования макета антенны, рассчитанного по предложенной методике.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ**

1 Разработаны принципы методического подхода, который в диссертации представлен как метод итерационного синтеза модели излучающих токов. Главное содержание метода – использование экспериментальных результатов (характеристик антенн), полученных для образцов антенн, реализующих АФР, так называемого, первоначального, не модифицированного, синтеза. Метод реализован для конструкции зондовой антенны на основе ОКПВ для измерения полей в ближней зоне АФС. На основе комбинирования метода итерационного синтеза модели излучающих токов, метода наведенных токов и ФТД создана модель излучения слабонаправленной антенны – ОКПВ, находящегося вблизи плоского проводящего фланца. Проведен анализ источников, искажающих ДН и учет влияния этих источников на КУ в широком диапазоне частот.

2 Применение методов ФО и ФТД позволило улучшить модель излучения ОКПВ с фланцем конечных размеров, рассчитать ДН данной антенны до углов  $\pm 90$  градусов в Е и Н сечениях с допустимой для практического применения точностью.

3 Разработан метод итерационного синтеза модели излучающих токов, искажающих ДН ОКПВ, основанный на решении внутренней задачи анализа, решаемой в приближении ФО и ФТД, который представляет собой аппарат анализа класса слабонаправленных антенн, расположенных вблизи проводящего фланца, имеющего конечные размеры, при произвольном расстоянии между антенной и поверхностью фланца.

4 Исследована частотная зависимость коэффициента отражения входа ОКПВ с применением метода сшивания (согласования мод) к структуре, представляющей собой экранированный волновод.

5 Теоретическая модель излучения ОКПВ позволяет эффективно проектировать антенны-зонды и анализировать погрешности измерений характеристик антенн, проводимых с их помощью.

6 Проведен анализ структурной компоненты рассеяния ОКПВ и пирамидальной рупорной антенны, связанные с особенностями конструкции этих антенны с помощью аналитических выражений, полученных на основе методов ЭКТ и ФТД. Проведен анализ переизлученной компоненты рассеянного поля антенн. Выделены основные составляющие поля рассеяния антенны, вносящие основной вклад в ЭПР зондовых антенн.

7 Данные, полученные на основе разработанной модели системы, состоящей из излучающей и приемной антенн, расположенных в ближней зоне простейших рассеивателей: сферы, диска, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Разработанная модель может быть использована как для калибровки радаров ближней зоны, так и для анализа вторичных источников излучения в активных измерительных зонах.

8 Разработаны конструкции зондовых антенн на основе ОКПВ и пирамидальной рупорной антенны в диапазоне от 1 ГГц до 37.5 ГГц, входящие в состав комплекса измерения характеристик излучения антенн в ближней зоне ГВАТ.411734.016. Модели излучения разработанных антенн-зондов, полученные на основе результатов диссертации, входят в МВИ данного комплекса.

9 Предложена методика проектирования зондовой СШП пирамидальной рупорной антенны Н – образного сечения, включающая три связанных этапа (расчет КВП, рупорного излучателя и формы ребер), обеспечивающая получение широкой полосы. Применение разработанных СШП антенн позволит повысить разрешающую способность определения вторичных источников излучения при построении портретов активных измерительных зон БЭК и дальнейшее их исключение. Создан и экспериментально исследован макет зондовой антенны, входящей в состав измерительного комплекса, – рупор Н – образного сечения с рабочей частотной полосой 3.3-15.2 ГГц.

### **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Белов, Ю.И. Экспериментальное исследование излучающих свойств открытого конца волновода прямоугольного сечения вблизи проводящих объектов / Ю.И.Белов, Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // Антенны. – 2009. - Вып. 12 (151) - С. 18-27.
2. Илларионов, И.А. Исследование частотной зависимости коэффициента отражения входа открытого конца волновода прямоугольного сечения / И.А. Илларионов // Антенны. – 2010. - Вып. 7 (158) - С. 49-56.

3. Варенцов, Е.Л. Исследование излучающих свойств пирамидальной рупорной антенны Н – образного сечения /Е.Л. Варенцов, А.А. Данилов, И.А. Илларионов, А.В. Кашин // Антенны. – 2010. - Вып. 7 (158) - С. 33-37.
4. Варенцов, Е.Л. Экспериментальное исследование излучающих свойств антенн на основе симметричной щелевой линии /Е.Л. Варенцов, А.А. Данилов, И.А. Илларионов // Антенны. – 2010. - Вып. 7 (158) - С. 26-32.
5. Шорохова, Е.А. Исследование свойств волноводно-щелевой антенной решетки во временной области / Е.А. Шорохова, И.А. Илларионов, А.В. Кашин // Радиотехника и электроника. – 2009. -№4. - С. 55-62.
6. Шорохова, Е.А. Исследование направленных свойств радиального вибратора вблизи корпуса летательного аппарата в виде конечного цилиндра / Е.А. Шорохова, Н.Н. Сергеева, И.А. Илларионов // Антенны. – 2006. - Вып. 8 (111). - С. 31-38.
7. Белов, Ю.И. Экспериментальное исследование коэффициента усиления пирамидального рупора в широкой полосе частот / Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // XIII Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 20 апреля 2007 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2007.- С.74.
8. Варенцов, Е.Л. К задаче вычисления переходной характеристики пирамидальной рупорной антенны / Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // V Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”: тезисы докладов (Самара, 11-17 сентября 2006 г.).- Самара, Россия, 2006.- С.189-190.
9. Шорохова, Е.А. Моделирование рассеяния миллиметровых радиоволн на статистически неровных поверхностях / Е.А. Шорохова, И.А. Илларионов, А. Н. Клянчин // 14-я Международная Крымская микроволновая конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”: труды конференции (Севастополь, Крым, Украина, 13-17 сентября 2004). – Севастополь, Украина, 2004. –С. 779-780.
10. Shorokhova, E.A. Study on the transient properties of waveguide slotted antenna arrays/ E.A. Shorokhova, I.A. Illarionov // 6-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves: proceedings (Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007). - Kharkov, Ukraine, 2007. - P. 693-695.
11. Белов, Ю.И. Экспериментальное и теоретическое исследование излучающих свойств открытого конца прямоугольного волновода / Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // XIV Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, апрель 2008 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2008.- С.69.

12. Белов, Ю.И. Исследование излучающих свойств открытого конца прямоугольного волновода в присутствии посторонних предметов / Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // VII Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”: тезисы докладов (Самара, 15-21 сентября 2008 г.).- Самара, Россия, 2008.- С.181-182.
13. Варенцов, Е.Л. Экспериментальное исследование амплитудного и фазового распределений возбуждения системы щелей магистральных волноводов волноводно-щелевой антенной решетки / Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов // XV Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 17 апреля 2009 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2009.- С.69.
14. Belov, Yu.I An experimental study of radiation and scattering patterns of the open-end rectangular waveguide placed near conductive objects / Yu.I. Belov, I.A. Illarionov, A.V. Kashin, E.L. Varentzov // 5<sup>th</sup> ESA Workshop on Millimetre Waves Technology and Applications and 31<sup>th</sup> ESA Antenna Workshop (The Netherland, Noordwijk, ESTEC, 2009). - Noordwijk The Netherland, 2009. - P. 802-805.
15. Белов, Ю.И. Автоматизация процессов измерения полей АФС в ближней зоне и их обработки для получения параметров АФС /Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, И.А. Илларионов, А.Е. Шулындин // Тринадцатая научная конференция по радиофизике: труды конференции (Нижний Новгород, 7 мая 2009 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2009.- С.99.
16. Илларионов, И.А. Частотная зависимости коэффициента отражения входа открытого конца волновода прямоугольного сечения / И.А. Илларионов // XVI Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 23 апреля 2010 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2010.- С.74.
17. Варенцов, Е.Л. Экспериментальное исследование излучающих свойств пирамидальной рупорной антенны Н – образного сечения / Е.Л. Варенцов, А.А. Данилов, И.А. Илларионов, А.В. Кашин // XVI Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 23 апреля 2010 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2010.- С.69.
18. Варенцов, Е.Л. Излучающие свойства антенн на основе симметричной щелевой линии / Е.Л. Варенцов, А.А. Данилов, И.А. Илларионов // XVI Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 23 апреля 2010 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2010.- С.73.
19. Варенцов, Е.Л. Экспериментальное исследование частотной зависимости характеристик излучения двух типов сверхширокополосных антенн / Е.Л. Варенцов, А.А. Данилов, И.А.

Илларионов // IX Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”: тезисы докладов (Челябинск, 13-17 сентября 2010 г.).- Челябинск, Россия, 2010.- С.57-58.

20. Белов, Ю.И. Теоретическое исследование характеристик рассеяния открытого конца прямоугольного волновода и пирамидальной рупорной антенны / Ю.И. Белов, И.А. Илларионов // XVII Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 22 апреля 2011 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2011.- С.98.
21. Белов, Ю.И. Экспериментальное и теоретическое исследование излучающих свойств открытого конца прямоугольного волновода вблизи проводящего фланца конечных размеров / Ю.И. Белов, И.А. Илларионов // XVII Международная научно-техническая конференция “Информационные системы и технологии”: труды конференции (Нижний Новгород, 22 апреля 2011 г.).- Нижний Новгород, Россия, 2011.- С.99.
22. Белов, Ю.И. Характеристики рассеяния открытого конца прямоугольного волновода и пирамидальной рупорной антенны / Ю.И. Белов, И.А. Илларионов // X Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”: материалы конференции (Самара, 11-17 сентября 2011 г.).- Самара, Россия, 2011.- С.86-87.
23. Белов, Ю.И. Теоретическое и экспериментальное исследование рассеивающих свойств объектов в их ближней зоне / Ю.И. Белов, И.А. Илларионов, В. Д. Кротиков // X Международная научно-техническая конференция “Физика и технические приложения волновых процессов”: материалы конференции (Самара, 11-17 сентября 2011 г.).- Самара, Россия, 2011.- С.66-67.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ**

- Л1. Hess, Doren W. The IsoFilter™ Technique: A Method of isolating the pattern of an individual radiator from data measured in a contaminated environment / Doren W. Hess // Antennas and propagation magazine. -2010. - Vol. 52, No.1. - P. 174-181.
- Л2. Резников, Г. Б. Антенны летательных аппаратов / Г. Б. Резников. – М.: Советское радио, 1967. – 416 с.
- Л3. Васильев, Е.Н. Возбуждение тел вращения / Е.Н. Васильев. - М.:”Радио и связь”, 1987. - 270 с.
- Л4. Leatherwood, Daniel. A. Plane Wave, Pattern Subtraction, Range Compensation / Daniel. A. Leatherwood, Edward B. Joy // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 2001. - Vol. AP-49, № 12. - P.1843-1851.
- Л5. Black, Donald N. Jr. A Test zone field compensation / Donald N. Black Jr., Edward B. Joy // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. – 1995. -

- Vol. AP-43, №4. - P.362-368.
- Л6. Bennett, J.C. Removal of environmental effects from antenna radiation pattern by deconvolution processing / J.C. Bennett, A. Griziotis // Institute Electrical Engineer Conference. - Pub. 219, 1983. - P.224-228.
- Л7. Leon, Loredo G. Measurements of low-gain antennas in non-anechoic test sites through wideband channel characterization and echo cancellation / Loredo G. Leon, S. Zapatero, F. Las-Heras // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2009. - Vol. 51, №2. - P.128-135.
- Л8. Методы измерения характеристик антенн СВЧ, под ред. Н.М. Цейтлина. М.: «Радио и связь», 1985 г. - 368 с.
- Л9. Radar Handbook / editor-in-chief M.I. Skolnik, 2-d ed. - Mc Graw-Hill, 1990. – 847 p.
- Л10. Kowalenko, K. Keeping cars from crashing / K. Kowalenko // The Institute. – 2010. - Vol. 34, no.3. - P.5.
- Л11. Bates, R.N. Millimeter-wave radar / R.N. Bates, A.G. Stove // Philips J. Res. – 1986. - Vol. 41, no.3. - P. 206-218.
- Л12. LaHaie, I.J.. Overview of an Image-based Technique for Predicting far-Field RCS from Near-Field Measurements // IEEE Antennas and propagation magazine. – 2003. - No.6. - P. 159 – 169.
- Л13. Уфимцев, П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике / П.Я. Уфимцев. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 366 с.
- Л14. Antenna handbook, vol.1 Fundamental and mathematician techniques / Ed. by Y.T. Lo, S.W. Lee. - New York: Chapman and Hall, 1993. - 416 p.
- Л15. Заргано, Г.Ф. Волноводы сложных сечений / Г.Ф. Заргано, В.П. Ляпин, В.С. Михалевский [и др.].-М.: Радио и связь, 1986.-124с.
- Л16. Сазонов, Д.М. Рассеяние электромагнитных волн нагруженной антенной решеткой / Д.М. Сазонов, А.М. Школьников // Радиотехника и электроника. - 1974. - Т.19, №4. - С. 679.

Подписано в печать 20.10.11. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Уч.- изд. л.1,0. Тираж 100 экз. Заказ 726.

---

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева.  
Типография НГТУ.  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.