

*На правах рукописи*

АРТЕМЕНКО Алексей Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЛИНЗОВЫХ  
АНТЕНН ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ  
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

01.04.03 - радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор ННГУ Мальцев А.А.

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
доцент ННГУ Калинин А.В.  
кандидат технических наук,  
доцент НГТУ Маврычев Е.А.

**Ведущая организация:** ФГБНУ "Научно-исследовательский  
радиофизический институт"

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. \_\_\_, ауд. \_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н., доцент

В.В. Черепенников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В ответ на рост запросов на повышение скорости передачи и улучшение качества сервисов к современным беспроводным системам радиосвязи возникают новые более совершенные стандарты. Развитие современных стандартов беспроводной связи идет по нескольким направлениям. С одной стороны, для систем, работающих в традиционных диапазонах частот от 1 ГГц до 5 ГГц, разрабатываются более эффективные способы и технологии передачи информации, предназначенные для улучшения существующих стандартов. К таким технологиям, в частности, можно отнести технологию множественного приема и передачи (MIMO – Multiple-Input Multiple-Output). С другой стороны, все более устойчивым становится интерес к исследованиям и разработкам систем связи, работающим в миллиметровом диапазоне длин волн, которые предоставляют качественно иные возможности.

Однако длительное время миллиметровый диапазон считался непригодным для широкого практического использования из-за отсутствия недорогих устройств генерации, приема, канализации сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний. Созданию систем связи в миллиметровом диапазоне длин волн предшествовали многочисленные исследования особенностей распространения этих волн в различных окружающих условиях, а также разработка новых средств генерации и приема СВЧ сигналов на частотах выше 30 ГГц. Подтверждением данного факта является прогресс в области создания радиочастотных интегральных схем, обеспечивший возможность изготовления дешевых интегральных микросхем для приема и передачи сигналов миллиметрового диапазона, используя полупроводниковые КМОП технологии с топологическими размерами 90 нм и меньше.

В результате такого бурного развития систем и средств связи за последнее десятилетие стало ясно, что миллиметровые волны – это новый огромный диапазон, намного превышающий по занимаемой полосе частот все то, что использовалось до сих пор в различных системах радиосвязи. Возможность расширения полосы передаваемых сигналов до нескольких ГГц и, следовательно, увеличения скорости передачи информации до нескольких Гбит/с является неоспоримым преимуществом использования миллиметровых волн. Так, например, во многих странах мира доступен свободный от лицензирования диапазон частот 57-66 ГГц, который используется в современных стандартах локальных систем радиосвязи IEEE 802.11ad и WiGig. Диапазон 60 ГГц был сделан свободным для использования из-за наличия в нем спектральной линии поглощения кислорода, приводящей к дополнительным потерям около 11 дБ/км. Такие потери делают неэффективным использование этого диапазона для радиоэлектронных средств, работающих на большие расстояния, но практически не влияют на эффективность беспроводных локальных и

персональных сетей с небольшой расчетной дальностью (порядка 10-100 м). Это делает миллиметровый диапазон длин волн привлекательным для массовых приложений беспроводной связи.

С другой стороны, понятно, что при распространении сигнала миллиметрового диапазона в свободном пространстве уровень принимаемой мощности будет значительно меньшим по сравнению с сигналами используемых сегодня диапазонов частот (при одинаковых расстояниях и коэффициентах усиления антенн). Так, например, на частоте 60 ГГц уровень принимаемой мощности на  $> 20$  дБ меньше, чем для широко используемых сегодня диапазонов 2.4 и 5 ГГц. Поэтому, системы связи миллиметрового диапазона должны будут использовать антенны с высоким коэффициентом усиления даже при работе на небольшие расстояния (~10-50 м). Такие антенны имеют узкую диаграмму направленности с шириной главного лепестка  $< 20^\circ$ .

Еще одной особенностью распространения радиоволн миллиметрового диапазона является практически полное их поглощение различными препятствиями. Таким образом, кроме соответствующего коэффициента усиления, антенны миллиметровых систем связи также должны обладать способностью к быстрому изменению направления луча и нахождению нового направления, в котором возможно продолжение передачи, в случае, если на пути луча возникает препятствие.

Требования высокого коэффициента усиления и способности к электронному сканированию для антенн даны в новых стандартах систем локальной мобильной радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн (IEEE 802.11ad и WiGig).

Понимание всех описанных требований к антеннам миллиметрового диапазона длин волн вызвало интерес ученых и исследователей по всему миру к разработке направленных сканирующих антенн разного типа. Одними из первых были попытки адаптации хорошо известных на значительно меньших частотах фазированных антенных решеток к работе в миллиметровом диапазоне частот. Однако, даже при сегодняшнем уровне науки и техники, разработка фазированной антенной решетки с большим количеством элементов для миллиметрового диапазона длин волн представляется сложной задачей, требующей применения новых более совершенных технологий.

Поэтому, возникло достаточное количество альтернативных подходов к разработке высоконаправленных сканирующих антенн для систем радиосвязи 60 ГГц диапазона. Одним из наиболее перспективных из этих подходов является разработка интегрированных линзовых антенн. В таких антеннах усиление обусловлено соответствующей формой и размером диэлектрической линзы, на плоскую фокальную поверхность которой интегрирована решетка из переключаемых планарных антенных элементов. При этом каждый антенный элемент, находящийся на различном расстоянии от оси линзы, при подаче на него сигнала, будет засвечивать внутреннюю поверхность линзы по-разному. В результате, узкий луч интегрированной

линзовой антенны будет отклоняться от оси линзы. Ясно, что количество переключаемых антенных элементов в решетке для интегрированной линзовой антенны будет меньшим, чем у эквивалентной фазированной антенной решетки с тем же самым коэффициентом направленного действия (КНД). Кроме того, разработка переключателя в миллиметровом диапазоне длин волн значительно проще, чем разработка фазовращателя. Исследованию и разработке экспериментальных макетов интегрированных линзовых антенн для систем радиосвязи 60 ГГц диапазона частот и посвящена настоящая диссертационная работа.

Разработка экспериментальных макетов интегрированных линзовых антенн подразумевает решение нескольких задач. В первую очередь необходимо определить конкретные требования к сканирующим узконаправленным антеннам для локальных систем радиосвязи 60 ГГц диапазона частот. Для определения требований к коэффициенту усиления антенны локальных систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн можно воспользоваться известной формулой Фрииса. В соответствии с данной формулой принимаемая мощность сигнала прямо пропорциональна квадрату длины волны и коэффициентам усиления приемной и передающей антенн:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1)$$

где  $G_t$ ,  $G_r$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн,  $P_r$ ,  $P_t$  – переданная и принятая мощность,  $\lambda$  – длина волны несущей в свободном пространстве, и  $R$  – расстояние между приемником и передатчиком. Таким образом, понятно, что характеристики 60 ГГц систем радиосвязи будут иметь значительные отличия от систем, работающих на частоте 2.4 ГГц и 5 ГГц.

Исходя из детального исследования характеристик 60 ГГц каналов связи в условиях офисной среды (модели каналов стандарта IEEE 802.11ad) и проведенного в диссертации анализа показано, что каждая антенна должна обладать коэффициентом усиления порядка 16-20 дБ, и обеспечивать диапазон углов сканирования в  $\pm 30^\circ$ - $45^\circ$  в любом направлении от оси линзы.

Для удовлетворения заданных требований интегрированная линзовая антенна должна иметь диаметр более 3-4 длин волн, что позволяет приближенно рассматривать такие антенны как антенны с большой апертурой. Для исследования характеристик и расчета апертурных антенн могут использоваться различные методы. К ним можно отнести методы, основанные на физической оптике, широкополосные “время-импульсные” методы, а также методы, основанные на прямом решении дискретизированных в пространстве и времени уравнений Максвелла. Однако, применительно к исследованию интегрированных линзовых антенн, в структуру которых входят планарные первичные антенные элементы с характерным размером  $\ll \lambda$  и относительно большая диэлектрическая линза, данные методы имеют определенные недостатки, различные для каждого

подхода. Поэтому исследование и сравнительный анализ различных методов расчета характеристик апертурных антенн в применении к анализу интегрированных линзовых антенн является актуальной задачей для разработки экспериментальных макетов таких антенн.

Кроме того, при экспериментальном исследовании макетов сканирующих линзовых антенн возникают другие задачи, связанные с генерацией, подведением, и приемом 60 ГГц сигналов. В частности, наиболее доступными генераторами миллиметрового излучения в настоящее время являются генераторы на диоде Ганна. Однако, такие генераторы (равно как и другие универсальные генераторы сигналов миллиметрового диапазона длин волн) имеют волноводный выходной интерфейс. Поэтому для передачи сигнала из волновода на планарную плату с интегрированными первичными антенными элементами, необходима разработка эффективного волноводно-микроразрывного перехода 60 ГГц диапазона частот. Основными требованиями при разработке волноводно-микроразрывного перехода являются широкая полоса пропускания, малый уровень потерь, нечувствительность к точности изготовления, возможность непосредственного соединения отрезка волновода и планарной структуры без необходимости модификаций в структуре волновода. Разработке таких переходов для различных приложений уделяется значительное внимание в научной литературе.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработка экспериментальных макетов интегрированных линзовых антенн является сложной и актуальной задачей, включающей в себя, определение требований к антенне для локальных систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн, исследование методов расчета характеристик апертурных антенн и интегрированных линзовых антенн, разработку различных 60 ГГц блоков и узлов макетов на печатных платах, включая планарный первичный антенный элемент и волноводно-микроразрывный переход, а также проведение экспериментальных измерений.

### Цели работы

Основной целью диссертации является моделирование, разработка и экспериментальное исследование макетов интегрированных линзовых антенн для систем радиосвязи 60 ГГц диапазона частот. При этом вся работа может быть разделена на четыре задачи:

1. Определение требований к сканирующим антеннам с высоким коэффициентом усиления для локальных систем радиосвязи 60 ГГц диапазона частот.
2. Исследование различных методов расчета характеристик апертурных антенн и их применимости для разработки интегрированных линзовых антенн.
3. Разработка макетов интегрированных линзовых антенн, включая определение геометрии линзы, разработку первичного антенного

элемента, распределительной и управляющей системы, и волноводно-микрополоскового перехода, для проведения экспериментальных измерений.

4. Экспериментальное исследование разработанных макетов интегрированных линзовых антенн с электронным сканированием луча.

### Методы исследований

При решении поставленных задач использовались математические методы геометрической и физической оптики, аппарат широкополосного “время-импульсного” метода расчета апертурных антенн, а также математические методы компьютерного моделирования. Кроме того, для проведения полного электромагнитного моделирования использовался метод конечных разностей во временной области для решения дискретизированных в пространстве и времени уравнений Максвелла, реализованный в программном продукте CST Microwave Studio.

### Научная новизна

Научная новизна работы заключается как в постановке ряда не решенных ранее задач, так и в полученных оригинальных результатах:

1. Предложен и реализован новый метод исследования характеристик интегрированных линзовых антенн, использующий приближение геометрической оптики для расчета хода лучей внутри тела линзы и определения поля на ее внешней поверхности, и приближение физической оптики для нахождения поля в дальней зоне.
2. Проведен сравнительный анализ расчета характеристик линзовых антенн на основе приближений физической и геометрической оптики и путем применения “время-импульсного” метода. Анализ показал эффективность применения данных методов для первичного приближенного вычисления характеристик проектируемых линзовых антенн.
3. Показано, что полное трехмерное электромагнитное моделирование на основе метода конечных разностей во временной области обеспечивает наиболее точные результаты расчета линзовых антенн с учетом физической структуры первичных антенных элементов и геометрии линзы.
4. Предложена конструкция интегрированной линзовой антенны с электронным сканированием луча, осуществляемым за счет переключения между различными первичными антенными элементами, находящимися в фокальной плоскости на различном расстоянии от оси линзы.

5. Предложены оригинальные структуры планарных волноводно-микрострипковых переходов (используемых для соединения подводящего волновода и интегрированной линзовой антенны), которые обеспечивают широкую полосу пропускания, малый уровень потерь, и могут быть реализованы по стандартной технологии изготовления печатных плат.
6. Созданы макеты кварцевых и кремниевых интегрированных линзовых антенн с линейной и двумерной решетками переключаемых антенных элементов. Результаты экспериментального исследования макетов подтвердили способность таких антенн к электронному сканированию в широком диапазоне углов.

### Научная и практическая значимость результатов

Полученные в работе результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Они могут быть использованы при исследовании характеристик излучения различных апертурных антенн, таких как параболические антенны, антенные решетки, интегрированные линзовые антенны, применяемых как для целей радиосвязи, так и для радиолокации. Представленные в диссертации результаты исследования и измерений макетов интегрированных линзовых антенн, а также непосредственно предложенная конструкция линзовой антенны с электронным сканированием луча, могут быть использованы при проектировании перспективных высокоскоростных локальных систем радиосвязи и беспроводного Интернета, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн.

### Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается их непротиворечивостью с известными в литературе данными, воспроизводимостью результатов при рассмотрении различных математических моделей, в отдельных случаях строгими доказательствами, а также согласованием полученных теоретических оценок и результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод исследования характеристик интегрированных линзовых антенн, использующий приближение геометрической оптики для расчета хода лучей внутри тела линзы и определения поля на ее внешней поверхности, и приближение физической оптики для нахождения поля в дальней зоне.
2. Результаты сравнительного анализа расчета характеристик линзовых антенн на основе приближений физической и геометрической оптики и с помощью “время-импульсного” метода, который показал эффективность



применения данных методов для первичного приближенного вычисления характеристик проектируемых линзовых антенн.

3. Конструкция интегрированной линзовой антенны с электронным сканированием луча, осуществляемым за счет переключения между различными первичными антенными элементами, находящимися в фокальной плоскости на различном расстоянии от оси линзы.
4. Оригинальные структуры планарных волноводно-микрорисколовых переходов (используемых для соединения подводящего волновода и интегрированной линзовой антенны), которые обеспечивают широкую полосу пропускания, малый уровень потерь, и могут быть реализованы по стандартной технологии изготовления печатных плат.
5. Результаты моделирования и экспериментального исследования прототипов интегрированных линзовых антенн с электронным сканированием луча в широком диапазоне углов при использовании кремниевых и кварцевых линз с линейной и двумерной решетками переключаемых антенных элементов.

#### Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях. Среди них 6 статей в рецензируемых журналах (Специальное издание трудов Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике “Антенны и распространение в миллиметровом и суб-миллиметровом диапазонах длин волн” [1], “Известия ВУЗов. Радиофизика” [2-3], “Антенны” [4-5], “Вестник ННГУ. Серия Радиофизика” [6]), 8 работ, представляющих собой опубликованные материалы докладов на конференциях [7-14], и 1 патент на изобретение [15].

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

– Международные конференции (2 доклада на 19-й Международной Крымской Конференции “СВЧ Техника и Телекоммуникационные Технологии”, Севастополь, Украина, 2009; 20-й Международной “Конференции по прикладным вопросам электромагнетизма и радиосвязи”, Дубровник, Хорватия, 2010; 5-й Европейской “Конференции по антеннам и распространению”, Рим, Италия, 2011; “Европейской СВЧ конференции 2011”, Манчестер, Великобритания, 2011; “Европейской СВЧ конференции 2012”, Амстердам, Нидерланды, 2012);

– Ежегодные научные конференции по радиофизике (ННГУ, Н. Новгород, май 2011 г. и май 2012 г.).

Работа выполнена при поддержке программы ФЦП 02.740.11.0003.

### Личный вклад автора

Соискатель принимал непосредственное участие как в постановке задачи, так и в расчетах, измерениях, обсуждении и физической интерпретации результатов. Вклад соискателя в приведенные в диссертации результаты является определяющим.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 168 страниц, включая 91 рисунок и список литературы из 116 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** рассмотрена актуальность исследования и разработки сканирующих антенн с высоким коэффициентом усиления для беспроводных локальных систем радиосвязи 60 ГГц диапазона частот. Показано, что разработка стандартных фазированных антенных решеток для миллиметрового диапазона длин волн сопряжена с рядом трудностей и требует применения наиболее передовых и дорогостоящих технологий. Поэтому широкий интерес вызывает разработка альтернативных технологий, таких как интегрированные линзовые антенны. Фокусирование луча в таких антеннах обеспечивается соответствующей формой однородной диэлектрической линзы, которая может быть изготовлена из широкодоступных недорогих материалов. Сканирование достигается за счет переключения между первичными антенными элементами, интегрированными на плоскую заднюю поверхность линзы, и находящимися в различных положениях относительно оси линзы.

**В первой главе** диссертации проведено определение основных требований к антеннам современных систем беспроводной локальной радиосвязи 60 ГГц диапазона частот. Для этого вначале дано краткое описание локальной системы радиосвязи, разработанной Институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике в рамках рабочей группы IEEE 802.11ad. Такая система радиосвязи предполагает работу внутри помещений в частотном диапазоне 57-64 ГГц. При этом в данном частотном диапазоне предусмотрено три канала передачи данных шириной по 2 ГГц, в каждом из которых может достигаться скорость передачи данных до 6.8 Гбит/с.

Непосредственно определение требований к сканирующим антеннам с большим коэффициентом усиления проведено с помощью сравнения характеристик канала связи 60 ГГц диапазона частот и широко используемых сейчас диапазонов 2.4 ГГц и 5 ГГц, а также анализа характеристик модели 60 ГГц канала связи внутри офисных помещений, разработанной и описанной в литературе.

В заключение первой главы дан обзор технологий антенн, способных удовлетворить выработанные требования к сканирующим антеннам 60 ГГц диапазона частот. Показано, что интегрированные линзовые антенны обладают некоторыми преимуществами по сравнению с другими решениями, такими как фазированные антенные решетки, дискретные линзовые антенны, антенные решетки с коммутационным сканированием.

**Вторая глава** настоящей работы посвящена исследованию различных методов моделирования антенн миллиметрового диапазона длин волн с большим коэффициентом усиления. В Разделе 2.1 дан обзор методов моделирования, которые были применены для расчета характеристик рассматриваемых линзовых антенн.

В Разделе 2.2 детально разобран метод моделирования интегрированных линзовых антенн, основанный на приближениях геометрической и физической оптики, дано описание созданной программы расчета в среде моделирования Matlab. Данный метод моделирования подразумевает использование аппарата геометрической оптики для описания характеристик излучения первичных антенных элементов и расчета распределения электромагнитного поля на внешней поверхности линзы. В работе рассматривается аналитическая модель излучения первичного антенного элемента, интегрированного на заднюю поверхность диэлектрической линзы. Для расчета полей интегрированной линзовой антенны в дальней зоне проводятся численные вычисления с помощью известных приближений физической оптики. Рассмотрены антенны с кремниевыми линзами различных размеров при их возбуждении первичным антенным элементом, находящимся в различных положениях относительно оси линзы. Показано, что данный метод моделирования может быть эффективно использован для расчета характеристик линзовых антенн произвольного размера, что часто вызывает затруднения при применении других методов. Недостатком данного метода является использование ряда приближений, несколько снижающих точность вычислений.

В Разделе 2.3 данной главы, рассмотрен известный “время-импульсный” метод расчета характеристик апертурных антенн во временной области. Данный метод заключается в расчете импульсной переходной характеристики апертурной антенны во временной области, что позволяет рассматривать антенну сразу в широком диапазоне частот на произвольном расстоянии. Применение данного метода к расчету полей плоских апертур позволяет объяснить многие эффекты, остающиеся необъясненными в рамках классической апертурной теории антенн. В частности, в диссертации показано, что при прямых измерениях апертурных антенн различной формы на расстояниях, меньших классического критерия дальней зоны, ошибка измерения может быть заметно снижена при выборе оптимального размера зонда. В диссертации получены аналитические выражения для импульсного поля антенн с круглой плоской апертурой для различных спадающих амплитудных распределений поля по апертуре как в ближней, так и в дальней зонах. Однако применение “время-импульсного” метода

моделирования для исследования характеристик интегрированных линзовых антенн, требует разработки точной модели первичного антенного элемента, построенной другими методами, и учет во временной области таких эффектов, как внутренние переотражения и прохождение сигнала через границу линза-свободное пространство. Таким образом “время-импульсный” метод может быть применен только в случае, если возможно предварительно рассчитать или оценить распределение электромагнитных полей на некоторой внешней плоской апертуре линзовой антенны.

В Разделе 2.4 дано описание одного из наиболее распространенных методов решения широко круга электродинамических задач – метода конечных разностей во временной области (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD). Это метод численного решения задач электродинамики, основанный на дискретизации уравнений Максвелла во времени и пространстве. Метод конечных разностей во временной области является основой широко распространенной программы трехмерного электромагнитного моделирования CST Microwave Studio, которая применялась при дальнейшей разработке различных элементов макетов интегрированных линзовых антенн. Данный метод моделирования позволяет проводить наиболее точный расчет характеристик интегрированных линзовых антенн с учетом физической структуры первичных антенных элементов. К недостаткам данного метода можно отнести высокую сложность вычислений, особенно, для линз большого размера, что приводит к большим затратам машинного времени.

В Разделе 2.5 проведен сравнительный анализ рассмотренных методов применительно к разработке интегрированных линзовых антенн.

**Третья глава** диссертации посвящена разработке и экспериментальному исследованию макетов интегрированных линзовых антенн. В Разделе 3.1 рассматриваются интегрированные линзовые антенны миллиметрового диапазона длин волн с линзами различной геометрии, выполненными из разных материалов. Проведен анализ фокусирующих свойств диэлектрических линз эллиптической и полусферической с цилиндрическим продолжением форм. Формулируются необходимые условия для обеспечения свойств направленности и сканирования в интегрированных линзовых антеннах. Для приближенного расчета характеристик диаграммы направленности и отклонения луча в интегрированных линзовых антеннах приводятся некоторые простые аналитические выражения, которые позволяют осуществить начальный выбор размеров и материала линзы для дальнейшей оптимизации с помощью специализированных средств электромагнитного моделирования, рассмотренных во второй главе.

В Разделе 3.2 проводится исследование сканирующей способности интегрированной кремниевой линзовой антенны. Проведено аналитическое приближенное рассмотрение характеристик интегрированных линзовых антенн и выбраны начальные параметры кремниевых линз без учета характеристик первичного антенного элемента. Далее приведено описание и

результаты электромагнитного моделирования разработанного микрополоскового антенного элемента, возбуждающего линзовую антенну, изготовленного по технологии Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC). Для дальнейшей оптимизации параметров разрабатываемой антенны выполняется полное электромагнитное моделирование линзы с интегрированными антенными элементами, расположенными на различных расстояниях от оси линзы. Также содержится описание и результаты экспериментальных измерений разработанных макетов кремниевых интегрированных линзовых антенн. Для проведения измерений был разработан планарный волноводно-микрополосковый переход для передачи сигнала от генератора на диоде Ганна, использованного в качестве источника сигнала, на подводящую микрополосковую линию, питающую планарный антенный элемент. С помощью разработанных макетов проведено экспериментальное исследование свойств отклонения луча кремниевыми интегрированными линзовыми антеннами.

Раздел 3.3 посвящен разработке макета кварцевой интегрированной линзовой антенны с электронным сканированием луча в одной плоскости. Вначале приводится общее описание структуры разработанной линзовой антенны, включая выбранные геометрии кварцевых линз, приближенный расчет их характеристик. Затем проводится разработка первичного микрополоскового антенного элемента, реализованного на стандартной высокочастотной печатной плате, приводятся его характеристики, полученные в ходе полного электромагнитного моделирования. Также рассматривается структура печатной платы с четырьмя микрополосковыми антенными элементами и распределительной системой, реализованной с помощью высокочастотных переключателей диапазона 60 ГГц. Приводятся результаты моделирования кварцевых интегрированных линзовых антенн для четырех выбранных положений микрополосковых антенных элементов относительно оси линзы. Для возбуждения микрополосковых антенн с помощью генератора на диоде Ганна был также разработан специальный волноводно-микрополосковый переход, основанный на прямом электромагнитном взаимодействии излучающего элемента и микрополосковой линии передачи. В заключение демонстрируются результаты измерений разработанных линзовых антенн с электронным сканированием луча, подтверждающие возможность применения интегрированных линзовых антенн в локальных системах радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн.

В Разделе 3.4 рассмотрены результаты разработки и экспериментальных исследований макетов кварцевых интегрированных линзовых антенн с двумерным электронным сканированием между 16-ю положениями луча, предназначенных для диапазона частот 73-94 ГГц. Полученные в рамках настоящей работы результаты являются одними из первых в мире по практическим измерениям линзовых антенн с двумерным электронным сканированием. Приведены результаты моделирования разработанных макетов интегрированных линзовых антенн в среде полного

электромагнитного моделирования CST Microwave Studio. Описаны разработанные топологии печатных плат, результаты измерения диаграмм направленности и КНД для линзовых антенн радиусом 7.5 мм и 12.5 мм. Показано, что все расчетные характеристики интегрированных линзовых антенн подтверждаются экспериментальными результатами.

В Разделе 3.5 приведены результаты сравнения характеристик различных интегрированных линзовых антенн. Рассмотрены линзы из кремния, кварца, и фторопласта, имеющие полусферическую форму с цилиндрическим продолжением, равного размера. В заключение сделан вывод, что интегрированные линзовые антенны позволяют обеспечить очень большое разнообразие характеристик за счет применения различных материалов линз, оптимизации геометрических параметров линзы, и применения различных технологий для реализации подложки интегрированных антенных элементов. Кроме того, показано, что характеристики интегрированных линзовых антенн удовлетворяют необходимым требованиям к антеннам различных систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и следующие из них выводы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

Основные результаты диссертационной работы и следующие из них теоретические и практические выводы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Проведен анализ основных требований к антеннам современных систем беспроводной локальной радиосвязи 60 ГГц диапазона частот на примере системы, разработанной Институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике в рамках рабочей группы IEEE 802.11ad, и предназначенной для передачи сигналов внутри помещений со скоростями до нескольких Гбит/с. Показано, что для приложений стандарта IEEE 802.11ad для передачи внутри офисных помещений, каждая антенна должна обладать коэффициентом усиления в диапазоне 16-20 дБ, и обеспечивать диапазон углов сканирования в  $\pm 30-45^\circ$  в любом направлении от оси линзы.
2. Предложен и реализован в среде моделирования Matlab гибридный метод моделирования интегрированных линзовых антенн, использующий приближения геометрической оптики для расчета хода лучей от первичного антенного элемента и расчета распределения полей на внешней поверхности линзы и приближения физической оптики для расчета поля линзовых антенн в дальней зоне. С помощью данного метода ГО/ФО проведено исследование сканирующих свойств антенн с кремниевыми эллиптическими линзами различных размеров. Показано, что данный метод может быть использован для расчета линзовых антенн произвольного размера.

3. Реализован “время-импульсный” метод расчета характеристик апертурных антенн, заключающийся в расчете импульсной переходной характеристики апертурной антенны во временной области, что позволяет рассматривать антенну сразу в широком диапазоне частот на произвольном расстоянии. С помощью данного метода объяснены некоторые эффекты, остающиеся необъясненными в рамках классической апертурной теории антенн. В частности, получены аналитические выражения для импульсного поля антенн с круглой плоской апертурой для различных спадающих амплитудных распределений поля по апертуре как в ближней, так и в дальней зонах. Выявлено ограничение по применению “время-импульсного” метода моделирования применительно к интегрированным линзовым антеннам, заключающееся в требовании предварительного расчета или оценки другими методами распределения электромагнитного поля на внешней плоской апертуре линзы.
4. Предложена конструкция интегрированной линзовой антенны с электронным сканированием за счет переключения между различными первичными антенными элементами, находящимися на различном расстоянии от оси линзы. Проведено исследование фокусирующих свойств диэлектрических линз эллиптической и полусферической с цилиндрическим продолжением форм. Сформулированы необходимые условия для обеспечения свойств направленности и сканирования в интегрированных линзовых антеннах.
5. Предложены оригинальные структуры планарных волноводно-микрострипных переходов (используемых для соединения подводящего волновода и интегрированной линзовой антенны), которые обеспечивают широкую полосу пропускания, малый уровень потерь, и могут быть реализованы по стандартным технологиям изготовления печатных плат.
6. Проведено экспериментальное исследование разработанных макетов интегрированных линзовых антенн с электронным сканированием в широком диапазоне углов при использовании кремниевых и кварцевых линз полусферической формы с цилиндрическим продолжением. Показано, что такие линзовые антенны позволяют обеспечить большое разнообразие характеристик за счет применения различных материалов линзы, оптимизации геометрических параметров линзы, и применения различных технологий для реализации первичных антенных элементов.

Таким образом, полученные в работе результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. Они могут быть использованы при исследовании характеристик излучения различных апертурных антенн, и в частности интегрированных линзовых антенн. Представленные в диссертации результаты теоретических исследований и экспериментальных измерений интегрированных линзовых антенн могут быть использованы при проектировании перспективных высокоскоростных

локальных систем радиосвязи и беспроводного Интернета, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн.



## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. A. Artemenko, A. Maltsev, A. Mozharovskiy, A. Sevastyanov, V. Ssorin, and R. Maslennikov, Millimeter Wave Electronically Steerable Integrated Lens Antennas for WLAN/WPAN Applications, // Special Issue of IEEE Transactions on Antennas and Propagation on "Antennas and Propagation at mm- and sub mm-waves", Vol. 61, No. 04, Pt II, April 2013.
2. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Масленников Р.О., Севастьянов А.Г., Сорин В.В., Исследование кремниевых интегрированных линзовых антенн для систем радиосвязи частотного диапазона 60 ГГц, // Известия ВУЗов. Радиофизика. том LV, № 8, 2012 г., С. 565-575.
3. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Турчин В.И., Особенности прямых измерений диаграмм направленности широкополосных антенн с учетом размеров апертуры измерительной антенны, // Известия ВУЗов. Радиофизика, том 54, № 11, 2011 г., С. 819-828.
4. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Турчин В.И., Анализ критерия дальней зоны для больших антенн с использованием их переходных характеристик, // Антенны, Изд. Радиотехника, № 2 (165), 2011, С. 47-53.
5. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Импульсное дальнее поле при разных распределениях поля по апертуре антенны, // Антенны, Изд. Радиотехника, № 6 (169), 2011, С. 35-38.
6. Артеменко А.А., Скулкин С.П., Анализ ближнего монохроматического поля при разных распределениях поля по апертуре антенны, // Вестник ННГУ, серия: Радиофизика. № 1(1), 2012, С. 56-61.
7. Artemenko, A. Mozharovskiy, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin, "2D Electronically Beam Steerable Integrated Lens Antennas for mmWave Applications," Proceedings of the 42<sup>nd</sup> European Microwave Conference 2012, Amsterdam, The Netherlands, October 28 –November 02, 2012, pp. 213-216.
8. A. Artemenko, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin, "Beam Steerable Quartz Integrated Lens Antenna For 60 GHz Frequency Band," Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, Rome, Italy, 11-15 April 2011, pp. 758 - 762.
9. Artemenko, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin, "Design of Silicon Integrated Lens Antenna for 60 GHz Indoor Wireless Communications," 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, September 20-23, 2010, Dubrovnik, 4 p.
10. Artemenko, A. Maltsev, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, V. Ssorin, "Design of Wideband Waveguide to Microstrip Transition for 60 GHz Frequency Band", Accepted to the European Microwave Conference 2011, Manchester, UK, 9-14 October, 2011.
11. Артеменко А.А., Масленников Р.О., Севастьянов А.Г., Ссорин В.Н. "Волноводно-микроразветвляющийся переход в частотном диапазоне 60 ГГц,"

- 19-я Междунар. Крымская Конф. СВЧ Техника и Телекоммуникационные Технологии, Сентябрь 2009, С. 505-506.
12. Ссорин В. Н., Севастьянов А. Г., Масленников Р. О., Артеменко А. А., “Разработка широкополосной микрополосковой антенны для частотного диапазона 5 ГГц,” 19-я Междунар. Крымская Конф. СВЧ Техника и Телекоммуникационные Технологии, Сентябрь 2009, С. 454-456.
  13. Можаровский А.В., Артеменко А.А., “Гибридный метод расчета характеристик интегрированных линзовых антенн,” Труды пятнадцатой научной конференции по радиофизике 12 мая 2011 г., ННГУ, Нижний Новгород.
  14. Можаровский А.В., Артеменко А.А., Мальцев А.А.,” Экспериментальное исследование кварцевых интегрированных линзовых антенн диапазона 60 ГГц,” Труды шестнадцатой научной конференции по радиофизике 18 мая 2012 г., ННГУ, Нижний Новгород.
  15. S. Alamouti, A. Maltsev, N. Chistyakov, A. Artemenko “mmWave scanning antenna,” US patent № 7,683,844, March 23, 2010.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение.....	5
<b>ГЛАВА 1. Требования к антеннам беспроводных локальных систем радиосвязи миллиметрового диапазона длин волн .....</b>	<b>20</b>
1.1. Современные беспроводные локальные системы связи миллиметрового диапазона длин волн.....	20
1.2. Постановка требований к антеннам беспроводных локальных систем связи миллиметрового диапазона.....	22
1.3. Примеры существующих антенных систем с электронным сканированием луча.....	24
<b>ГЛАВА 2. Методы расчета и моделирования антенн миллиметрового диапазона длин волн.....</b>	<b>29</b>
2.1. Обзор существующих методов расчета .....	30
2.2. Метод расчета антенн на основе физической оптики .....	32
2.3. Расчет импульсных полей апертурных антенн.....	51
2.4. Метод конечных разностей во временной области .....	74
2.5. Сравнительный анализ рассмотренных методов расчета антенн .....	79
<b>ГЛАВА 3. Разработка и экспериментальное исследование макетов интегрированных линзовых антенн.....</b>	<b>82</b>
3.1. Концепция интегрированных линзовых антенн .....	82
3.1.1. <i>Эллиптические линзовые антенны.....</i>	<i>83</i>
3.1.2. <i>Полусферические линзовые антенны с цилиндрическим продолжением.....</i>	<i>86</i>
3.1.3. <i>Приближенный аналитический расчет характеристик интегрированной линзовой антенны .....</i>	<i>88</i>
3.2. Исследование сканирующей способности интегрированной кремниевой линзовой антенны.....	91
3.2.1. <i>Определение геометрических параметров линз.....</i>	<i>91</i>
3.2.2. <i>Разработка планарного антенного элемента для макетов кремниевых интегрированных линзовых антенн .....</i>	<i>92</i>
3.2.3. <i>Электромагнитное моделирование макетов кремниевых интегрированных линзовых антенн.....</i>	<i>96</i>
3.2.4. <i>Разработка LTCC волноводно-микророскового перехода для диапазона частот 60 ГГц.....</i>	<i>100</i>

3.2.5. Экспериментальные измерения характеристик макетов кремниевых интегрированных линзовых антенн .....	106
3.3. Кварцевая интегрированная линзовая антенна с электронным сканированием между 4-мя положениями луча .....	109
3.3.1. Определение геометрических параметров линз.....	110
3.3.2. Разработка планарного антенного элемента.....	111
3.3.3. Разработка распределительной системы для решетки из четырех переключаемых антенных элементов.....	115
3.3.4. Электромагнитное моделирование кварцевых интегрированных линзовых антенн .....	118
3.3.5. Разработка волноводно-микророскокового перехода .....	123
3.3.6. Экспериментальное исследование характеристик макетов кварцевых интегрированных линзовых антенн с 4-х позиционным электронным сканированием .....	131
3.4. Кварцевая интегрированная линзовая антенна с двумерным электронным сканированием между 16-ю положениями луча .....	134
3.4.1. Структура первичного микророскокового антенного элемента. ....	135
3.4.2. Разработка распределительной системы на 16 антенных элементов.....	137
3.4.3. Подведение сигнала с помощью СВЧ коаксиального коннектора .....	140
3.4.4. Топологии разработанных печатных плат и результаты электромагнитного моделирования .....	143
3.4.5. Результаты экспериментального исследования макетов линзовых антенн с электронным сканированием луча .....	145
3.5. Сравнение характеристик различных линзовых антенн .....	149
<b>Заключение .....</b>	<b>156</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>159</b>