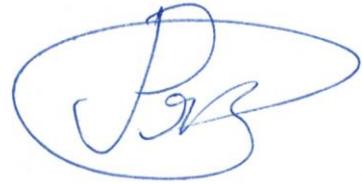


На правах рукописи



Рязанцев Роман Олегович

НЕОДНОРОДНАЯ КВАЗИСФЕРИЧЕСКАЯ ЛИНЗОВАЯ АНТЕННА ИЗ  
ОДНОРОДНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Специальность 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

**Научный руководитель:** **Саломатов Юрий Петрович**, кандидат технических наук, профессор, ФГАОУ ВО СФУ, г. Красноярск

**Официальные оппоненты:** **Калошин Вадим Анатольевич**, доктор физико-математических наук, зав. лаб. электродинамики композиционных сред и структур ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва

**Буянов Юрий Иннокентьевич**, канд. физ.-мат. наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г.Томск

**Ведущая организация:** АО «Научно-Исследовательский Институт «Вектор», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «01» октября 2019 года в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01 созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники <https://postgraduate.tusur.ru/urls/zssdul8m>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.268.01,

доктор физ.-мат. наук, профессор



А. Е. Мандель

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Антенны квазиоптического типа занимают особое место среди антенн СВЧ диапазона. К ним относятся зеркальные антенны (ЗА) и линзовые антенны (ЛА). Применение ЛА, с увеличением рабочих частот приёмо-передающих систем, становится все более актуальным вследствие необходимости использования антенн с высоким коэффициентом усиления с менее жесткими допусками на изготовление.

ЛА из неоднородного диэлектрика обладают уникальными характеристиками, в том числе возможностью простой реализации многолучевой диаграммы направленности (ДН) и работой в широкой полосе частот. В 40х годах XX века R.K. Luneburg\* впервые предложил математическое описание оптической неоднородной линзы со сферической симметрией, которая впоследствии получила название линзы Лüneбургa. Линза представляет собой диэлектрическую сферу с изменяющимся вдоль радиуса коэффициентом преломления. При использовании массива облучателей ЛА Лüneбургa может заменить несколько параболических ЗА, обеспечивая возможность амплитудного сканирования ДН. При этом поперечные размеры ЛА сопоставимы с размерами ЗА с ДН, аналогичной по параметрам.

Широко известно, что задача реализации многолучевых ДН может быть решена с использованием аналоговых многолучевых и цифровых антенных решеток (АР). Среди недостатков аналоговых многолучевых АР можно выделить сложность конструкции и потери в элементах диаграммообразующей схемы (ДОС). Не лишены недостатков и цифровые АР, в настоящее время всё еще имеющие высокую стоимость. В ряде случаев ЛА Лüneбургa может заменять сложные и дорогостоящие фазированные АР.

**Актуальность выбранной темы исследования** определяется вышеуказанными уникальными свойствами ЛА Лüneбургa (работой в широкой полосе частот и возможностью реализации многолучевой ДН), при наличии технической сложности в реализации неоднородной линзы, а именно неоднородного диэлектрика с заданным законом изменения эффективной диэлектрической проницаемости вдоль радиуса.

**Целью** диссертационной работы является исследование неоднородных сферических ЛА, направленное на создание квазисферической неоднородной ЛА из однородных диэлектрических материалов.

**Задачами** исследования являются:

– анализ известных принципов построения и конструкций неоднородных ЛА;

---

\* В русском языке на равных используются различные транскрипции фамилии автора, а именно: Лüneбург и Лüneберг. Считается, что лингвистически более верным вариантом транскрипции, при переводе с немецкого, является вариант «Лüneбург».

– исследование параметров и моделирование искусственных сред из однородных диэлектрических материалов с возможностью задания закона изменения эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{эфф}}$ );

– расчёт параметров структуры и моделирование неоднородных ЛА на основе исследуемых сред;

– разработка и создание квазисферической ЛА, проведение экспериментальных исследований и анализ полученных результатов;

**Объектом исследования** является неоднородная ЛА со сферической симметрией (линза Люнебурга), а **предметом исследования** является реализация антенны – неоднородной квазисферической ЛА из слоистого однородного материала.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись методы матричной алгебры, вычислительной математики, специализированные системы автоматизированного проектирования (САПР) и электродинамического моделирования (основывающиеся на методах конечного интегрирования, а также на методах анализа в частотной области), экспериментальные исследования.

#### **Научная новизна.**

– Разработана методика синтеза квазисферической ЛА из однородного слоистого диэлектрического материала и проведено моделирование линзовых антенн на основе квазисферической неоднородной линзы.

– Показано, что использование облучателя с изломом образующей, повышает эффективность неоднородной квазисферической ЛА в широкой полосе частот.

– Получены зависимости антенных характеристик квазисферической ЛА из слоёв дискретно-переменной толщины от параметров пространственной дискретизации линзы и установлены критерии выбора параметров дискретизации.

– Предложен способ получения поля с круговой поляризацией с учётом анизотропных свойств слоистой диэлектрической структуры квазисферической ЛА.

#### **Прикладная ценность результатов:**

– Разработаны конструкции антенн с неоднородной квазисферической линзой из однородного диэлектрического материала;

– Созданы макросы формирования геометрии ЛА для САПР, позволяющие создавать модели квазисферических линз из слоёв дискретно-переменной толщины различных размеров в автоматизированном режиме;

– Разработана конструкция облучателя для повышения коэффициента использования поверхности (КИП) ЛА на 20% в широкой полосе частот по сравнению с использованием простых рупорных облучателей с аналогичным уровнем облучения края апертуры;

– Использование слоистой структуры в квазисферической линзе позволяет уменьшить габариты ЛА при транспортировке в  $\approx 1,5$  раза по объёму;

– Изготовлена и исследована ЛА с квазисферической линзой диаметром  $20\lambda_0$ , работающая в диапазоне частот с коэффициентом перекрытия 1,5, с возможностью амплитудного сканирования.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) Характеристики квазисферической линзовой антенны, состоящей из коаксиального набора расположенных с периодом  $d$  радиально-симметричных диэлектрических элементов переменной толщины, соответствуют характеристикам сферической линзы Люнебурга из неоднородного диэлектрического материала при условии расположения элементов структуры с периодом  $d < \lambda_0 / (2 \cdot \sqrt{\epsilon_{эфф}})$  и выбора диаметров и толщин диэлектрических элементов такими, чтобы обеспечить аналогичное распределение эффективной диэлектрической проницаемости.

2) Использование рупорного облучателя с изломом образующей повышает КИП неоднородной сферической ЛА на 20%, по сравнению с использованием простого рупорного облучателя при одинаковых уровнях облучения края линзы на нижней частоте рабочего диапазона при коэффициенте перекрытия не менее 1,4.

3) Квазисферическая ЛА из слоёв дискретно-переменной толщины обеспечивает коэффициент эллиптичности (КЭ)  $\geq 0,8$  поля э-м волны в полосе частот не менее 20% при введении дополнительного фазового сдвига между ортогональными компонентами поля в облучателе. При этом, величина дополнительного фазового сдвига зависит от угла облучения и диаметра линзы.

**Достоверность результатов,** основывается на корректном применении численных и аналитических методов, на использовании современных САПР, апробированных экспериментальных методик и высокоточного оборудования. Результаты работы являются воспроизводимыми и проверяемыми, наблюдается количественное и качественное совпадения результатов моделирования, экспериментальных исследований и данных, известных из литературы.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», Томск, 2012 г.;
- X Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2013, Красноярск, 2013 г.;
- X Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2014 г.;
- XXIV Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 2014 г.;
- VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики», Томск, 2015 г.;

- XII Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2016, Москва, 2016 г.;
- Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн», Краснодарский край, пос. Дивноморское, 2017 г.;
- Всероссийская конференция «Антенны и Распространение Радиоволн», Санкт-Петербург, 2018 г.

**Публикации.** Материалы диссертационного исследования опубликованы в 10 научных работах, из них 5 в журналах из перечня ВАК, 4 в сборниках публикаций, индексируемых в наукометрической базе Scopus. Получен патент на изобретение.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы внедрены в НИОКР СФУ, СПбГЭТУ (ЛЭТИ).

**Личный вклад автора заключается в следующем:**

- созданы макросы для автоматизированного синтеза геометрии квазисферической линзы из слоёв дискретно-переменной толщины;
- разработаны модели для электродинамического расчета как параметров слоистой среды, так и ЛА на основе квазисферической линзы из слоёв дискретно-переменной толщины в САПР;
- проведены исследования зависимости характеристик ЛА от параметров пространственной дискретизации квазисферической линзы.
- проведены исследования зависимости коэффициента эллиптичности поля в апертуре квазисферической ЛА из слоёв дискретно-переменной толщины от параметров ЛА и параметров поляризации поля в облучателе;
- выполнены экспериментальные исследования и проведена обработка экспериментальных данных.

**Структура и объём диссертации.** Структурно диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, Выводов и Заключения, списка источников и Приложения. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста и содержит 137 рисунков и 7 таблиц. Список использованных источников насчитывает 69 наименований. Приложение с актами использования результатов исследований и патентов на изобретения и дополнительными материалами изложено на 10 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В соответствии с целями и задачами исследования, предполагалось создание неоднородной линзовой антенны с использованием однородного диэлектрического материала. Одним из возможных подходов, в данном случае, является создание искусственной среды с неоднородной эффективной диэлектрической проницаемостью.

**Глава 1** содержит анализ информации о существующих подходах к построению и реализации неоднородных линзовых антенн – ЛА Люнебурга

и других типов. Кроме того, рассматриваются вопросы облучения и формирования амплитудного распределения, поскольку они имеют определяющую роль в формировании таких характеристик, как уровень боковых лепестков (УБЛ), ширина ДН (ШДН), коэффициент направленного действия (КНД) и др. Также в первой главе рассмотрены диэлектрические материалы, которые могут использоваться для изготовления неоднородных линз и в т.ч. линз Люнебурга.

**Глава 2** посвящена исследованию методов анализа и моделирования сред для обеспечения возможности создания искусственной среды с неоднородной эффективной диэлектрической проницаемостью при использовании однородного материала.

В работе основное внимание уделено рассмотрению дискретно-слоистой среды, с использованием как аналитических методов, так и численного моделирования для расчета её эффективных параметров.

На рисунке 1 показан изометрический вид слоистой структуры в границах области расчета, а также окно установки граничных условий в САПР при расчете полей с использованием теоремы Флоке.

В результате моделирования получены зависимости фазы и амплитуды

электромагнитной волны на выходе структуры от толщины слоя материала (от коэффициента заполнения структуры). Полученные значения используются для расчета эффективных параметров среды. Таким образом, демонстрируется возможность изменения  $\epsilon_{\text{эфф}}$  в периодической слоистой структуре с использованием одного диэлектрического материала.

**В главе 3** приводятся результаты моделирования неоднородных линз с различными облучателями: простыми и специальными для повышения коэффициента использования поверхности (КИП), а также для работы с круговой поляризацией поля.

Моделирование неоднородных ЛА выполнялось в САПР электродинамического моделирования при расчете методом конечного интегрирования (временной метод, гексаэдрическая сетка).

Целью исследований являлось получение зависимости эффективной диэлектрической проницаемости в теле ЛА по закону, который имеет место

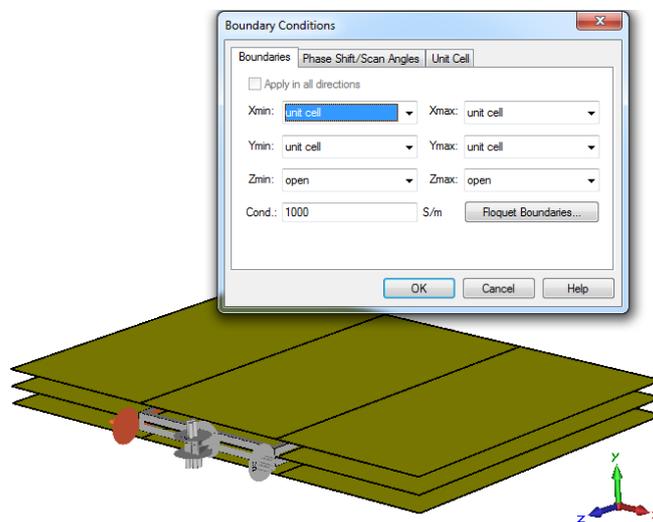


Рисунок 1 – Изометрический вид исследуемой слоистой структуры с окном установки граничных условий

в ЛА Люнебурга. При помощи моделирования проводилась проверка работоспособности модели, выяснялись допустимые пределы для дискретизации параметров моделей (количество сферических/цилиндрических слоёв, дискретность изменения толщины плоского слоя и т.п.), проводилась оценка влияния возникающей анизотропии слоистой структуры, обусловленной разностью эффективных проницаемостей в зависимости от направления вектора  $E$ , на антенные характеристики.

Идея построения линзы из слоёв одного однородного диэлектрика имеет генезис, описанный в диссертации и появилась как способ устранения сложности выполнения линзы из сферических слоёв, связанной с необходимостью наличия номенклатуры материалов с различной диэлектрической проницаемостью. Расчеты, выполненные в главе 2 диссертации показывают, что вариация толщины диэлектрика в слое имитирует изменение эффективной диэлектрической проницаемости. При этом, используется только один диэлектрический материал для всей линзы.

На рисунке 2 показана модель линзы с 15 дискретами изменения толщины материала в слое. Период слоистой структуры для данной модели на центральной частоте расчетного диапазона составляет  $0,4\lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве.

Предварительно, была исследована зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от толщины материала в слое фиксированных размеров для диэлектрика с  $\epsilon = 2$  (вектор  $E$  поля направлен перпендикулярно плоскости слоя).

Полученная зависимость  $\epsilon_{\text{эфф}}$  была использована для построения модели.

Диаметр линзы составил  $12\lambda_0$ . Облучение производилось открытым концом прямоугольного волновода, размер сечения которого –  $0,4 \times 0,8\lambda_0$ .

ДН модели линзы для частоты  $f_0$  представлены на рисунке 3.

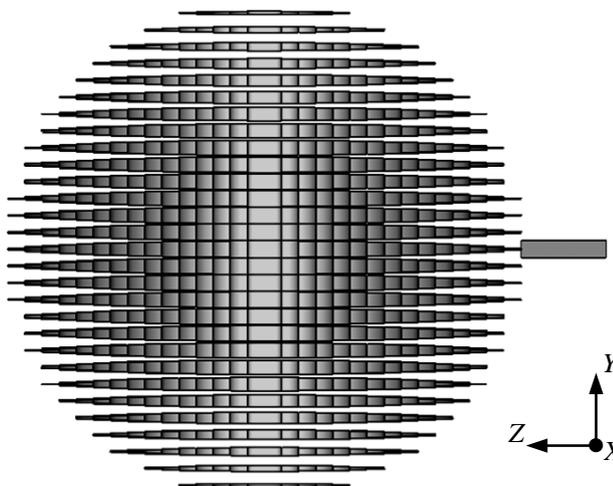


Рисунок 2 – Квазисферическая линза из слоёв однородного диэлектрика дискретно-переменной толщины в разрезе.

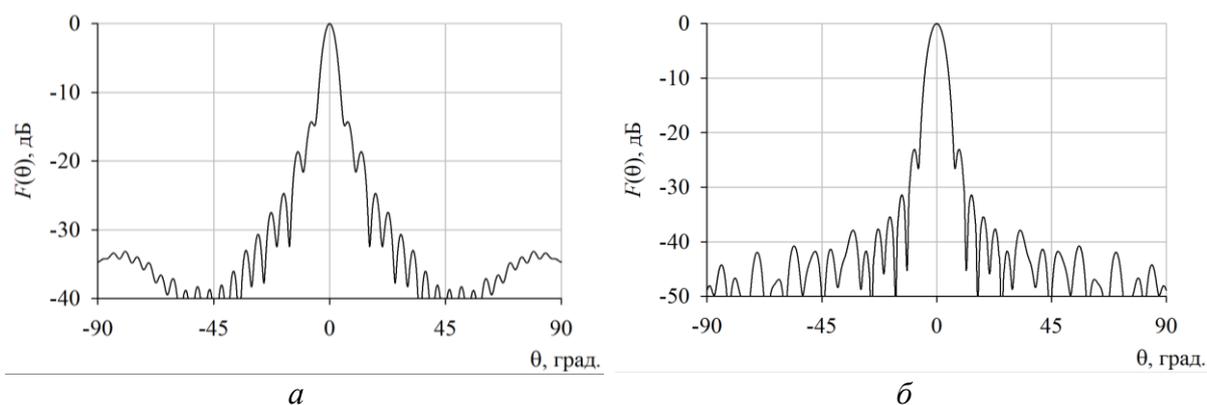


Рисунок 3 – ДН квазисферической линзы в плоскостях  $E$  и  $H$  ( $a$ ,  $b$  соответственно)

На основании материалов, приведенных в диссертации, может быть сделан вывод, что такой вариант выполнения неоднородной сферической структуры, в случае, когда направление облучения линзы лежит в плоскости слоёв, слабо влияет на ДН линзы.

Анализ величин КНД, ШДН в двух плоскостях говорит о некотором снижении КНД для модели квазисферической ЛА на 0,1–0,3 дБ в диапазоне исследуемых частот относительно результатов численного расчета параметров идеальной ЛА Люнебурга.

Предложенный вариант реализации неоднородного диэлектрика в квазисферической линзе является более технологичным, поскольку в качестве материала для изготовления достаточным является наличие листового однородного диэлектрика только одной диэлектрической проницаемости. Кроме того, линзу из слоёв однородного диэлектрика дискретно-переменной толщины можно выполнить в разборном виде, что, в частности, позволит уменьшить габариты при транспортировке.

Одним из преимуществ линзы Люнебурга является возможность электромеханического сканирования ДН во всем пространстве. В нашем случае нарушение сферической симметрии линзы приводит к изменению её свойств для различных направлений максимума ДН.

Сканирование в плоскости расположения пластин переменной толщины (рисунок 2, плоскость  $XOZ$ ) не вызывает вопросов, поскольку для квазисферической ЛА характерна осевая симметрия, и перемещение облучателя не влияет на характер прохождения волны.

В плоскости, перпендикулярной плоскостям расположения слоёв, изменение угла облучения линзы приводит к относительному изменению неоднородности пространства, воспринимаемого волной. Анализ характеристик ЛА при облучении её вдоль оси  $OY$ , в соответствии с расположением осей на рисунке 2, показал необходимость исследования, возможности сканирования в этой плоскости, т.к. выявил увеличение коэффициента отражения (КО) входа облучателя из-за отражения мощности от линзы.

Из анализа зависимостей КНД и УБЛ в широком диапазоне длин волн, в диапазоне углов облучения от  $0^\circ$  до  $40^\circ$ , отмечено, что существует некоторый частотный диапазон, где уменьшение КНД и соответствующее увеличение УБЛ наиболее значительны. При изменении межслойного расстояния, т.е. периода слоистой структуры, эта область изменения КНД «перемещается» по частоте.

Наиболее подходящими материалами для создания квазисферической линзы из слоёв дискретно-переменной толщины являются материалы, относительная диэлектрическая проницаемость которых близка к 2 для линзы с фокусом на поверхности либо с меньшим значением проницаемости для линзы с вынесенным фокусом.

Удаление облучателя от поверхности линзы позволяет увеличить КИП антенны, т.к. создает более равномерное амплитудное распределение, что показано в диссертации. В случае линзы Лüneбурга, при максимальном значении  $\varepsilon = 1,6$  в центре линзы, фокусное расстояние от центра линзы составит  $1,4 \cdot R$ , где  $R$  – радиус линзы.

На рисунке 4 приведены частотные зависимости КИП для двух квазисферических ЛА из слоёв однородного диэлектрика дискретно-переменной толщины: с фокусным расстоянием  $F = R$  и с вынесенным фокусом при  $F = 1,4 R$ . При этом, диаметры ЛА одинаковы и составляют  $12 \lambda_0$ . В качестве облучателей использованы открытый конец волновода для ЛА с фокусом на поверхности и пирамидальный рупор для ЛА с вынесенным фокусом.

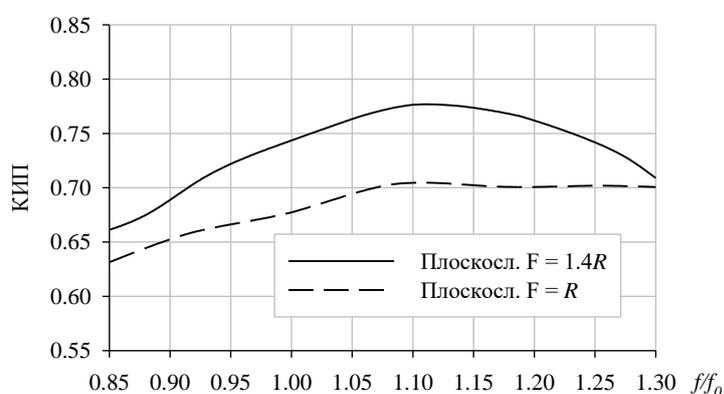


Рисунок 4 – КИП неоднородных квазисферических ЛА различным фокусным расстоянием

С целью получения высоких значений КИП антенной системы в широкой полосе частот, в диссертации предлагается использование расфазированного рупора с изломом конической образующей. В случае использования такого облучателя, высокая эффективность использования апертуры

достигается за счет создания более близкого к равномерному амплитудного распределения (по уровню  $-3$  дБ), с сохранением облучения края линзы на уровне  $\approx -9$  дБ, а также за счет высокой стабильности параметров создаваемого распределения в рабочей полосе частот. ШДН предлагаемого облучателя в диапазоне частот с коэффициентом перекрытия  $\approx 1,4$  изменяется не много более чем на  $\approx 10$  градусов по уровню  $-9$  дБ, и менее чем на  $10$  градусов по уровню  $-3$  дБ. На рисунке 5 приводится сравнение

расчетных частотных зависимостей КИП для различных типов облучателей в составе антенны с линзой Лüneбурга ( $D \approx 20\lambda$ ,  $F = 1,4R$ ), а именно:

- расфазированного рупора с изломом конической образующей;
- прямоугольного рупора, для которого уровень облучения краев

линзы в начале диапазона частот перекрытия соответствует аналогичному для исследуемого расфазированного облучателя;

– конического рупора, для которого уровень облучения краев линзы в плоскости  $H$  соответствует расфазированному облучателю в начале рассматриваемого диапазона частот.

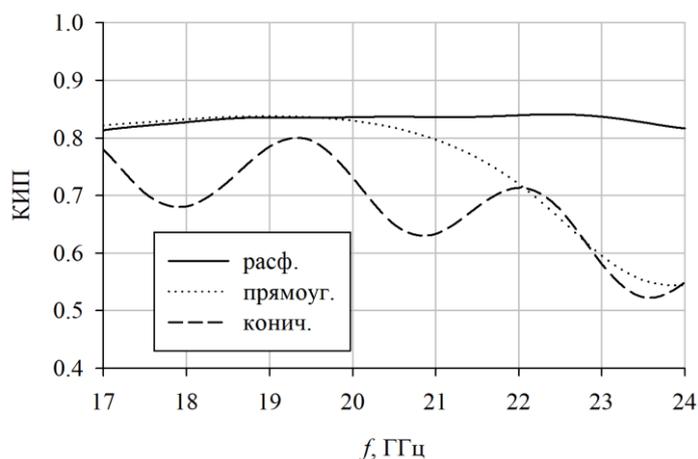


Рисунок 5 – КИП для различных типов облучателей «идеальной» линзы Лüneбурга

Степень соответствия характеристик квазисферической и идеальной линз Лüneбурга зависит от **параметров пространственной дискретизации**:

- 1) расстояния между центрами слоёв (период,  $d$ );
- 2) дискретности изменения толщины слоя вдоль его радиуса.

Фиксированными параметрами в исследовании являются диэлектрическая проницаемость материала ( $\epsilon = 1,6$ ) и фокусное расстояние линзы ( $1,4 \cdot R$ , где  $R$  – внешний радиус линзы).

При исследовании параметров дискретизации рассмотрены три диаметра линзы ( $D$ ) и три различных значения периода  $d$ . Вектор поляризации поля облучения ( $E$ ) лежит в плоскости сканирования (пл.  $YOZ$ ), характеристики моделей исследованы для углов облучения  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  относительно исходного положения облучателя (рисунок 2).

Табл. 2. Значения параметров дискретизации линзы.

$d$	$D = 6 \cdot \lambda_0$	$D = 12 \cdot \lambda_0$	$D = 24 \cdot \lambda_0$
$0,5 \cdot \lambda_0$	✓	✓	–
$0,375 \cdot \lambda_0$	✓	✓	✓
$0,25 \cdot \lambda_0$	–	✓	✓

Зависимости КНД от частоты для случая  $D = 12 \cdot \lambda_0$ ,  $d = 0,5 \cdot \lambda_0$  в диапазоне углов сканирования приведены на рисунке 6. Видно, что при направлении облучения «90°» наблюдается падение КНД, максимальное на частоте  $\approx 0,88 \cdot f_0$ .

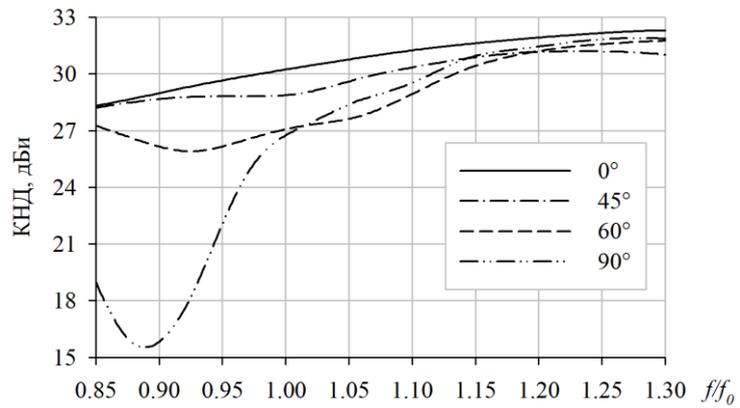
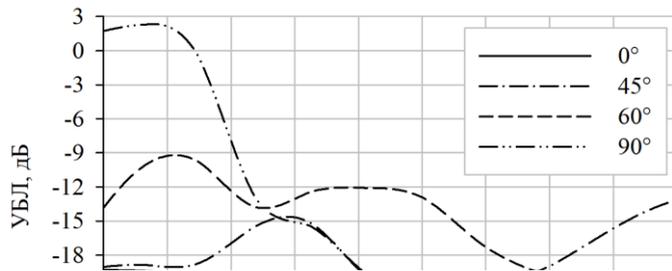


Рис. 6. КНД квазисферической ЛА с  $D = 12 \cdot \lambda_0$  и  $d = 0,5 \cdot \lambda_0$

Зависимости УБЛ в плоскости сканирования для диапазона углов облучения приведены на рисунке 7.



Из рисунка 7 видно, что боковое излучение на частоте  $\approx 0,88 f_0$  при направлении облучения 90° превышает уровень главного лепестка ДН. Причиной является резонансное поведение структуры, проявление которого зависит от периода расположения слоёв  $d$  относительно

длины волны из рассматриваемого частотного диапазона.

Зависимости КНД для квазисферической ЛА с  $D = 12 \cdot \lambda_0$  и  $d = 0,375 \cdot \lambda_0$  представлены на рисунке 8.

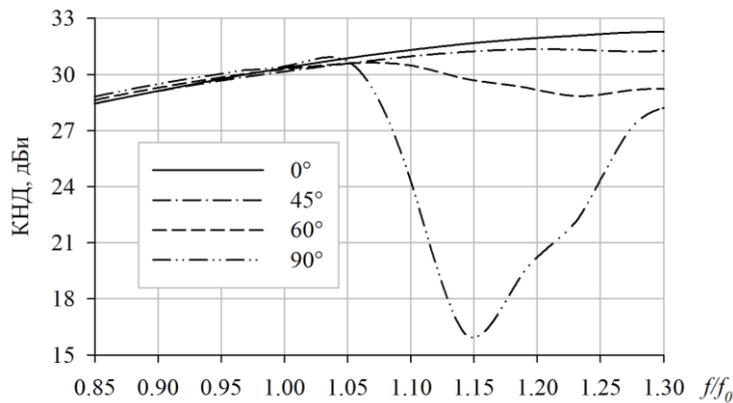


Рис. 8. КНД квазисферической ЛА с  $D = 12 \cdot \lambda_0$  и  $d = 0,375 \cdot \lambda_0$

Из сравнения рисунков 6 и 8 видно, что область, в которой происходит падение КНД в направлении облучения при сканировании переместилась по частоте. Минимальный КНД при направлении облучения 90° находится на частоте  $\approx 1,15 \cdot f_0$ .

Аналогично предыдущему случаю,

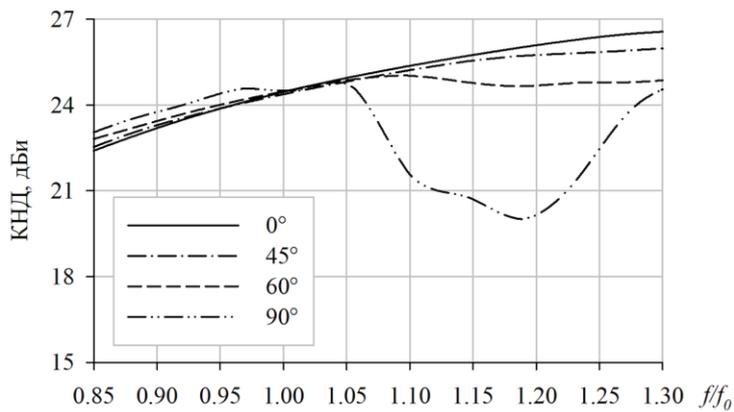


Рис. 9. КНД квазисферической ЛА с  $D = 6 \cdot \lambda_0$  и  $d = 0,375 \cdot \lambda_0$

что «резонансным» для исследуемой структуры является значение  $d \approx 0,43 \lambda_{\text{res}}$ , где  $\lambda_{\text{res}}$  – длина волны в свободном пространстве, на которой происходит максимальное отражение от плоских слоёв ЛА и соответственно наиболее выражена деградация параметров ДН.

Следует отметить, что при периоде расположения слоёв  $d = 0,25 \cdot \lambda_0$ , частота, на которой будет происходить возникновение «зеркального» излучения переместится на частотной оси вверх и будет равна  $f_{\text{res}} \approx 1,72 f_0$ . Отсутствие «резонансной» области в выбранном диапазоне частот 0,85-1,3  $f_0$  при  $d = 0,25 \cdot \lambda_0$  в исследуемом диапазоне частот было подтверждено результатами моделирования.

На рисунке 10 представлены характеристики антенны с линзой

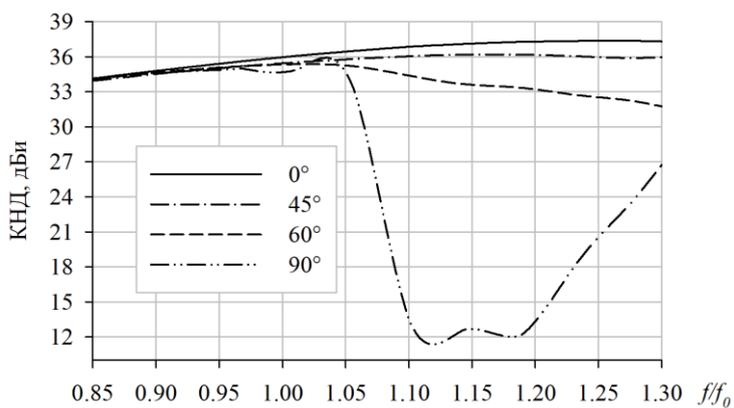


Рис. 10. КНД квазисферической ЛА с  $D = 24 \cdot \lambda_0$  и  $d = 0,375 \cdot \lambda_0$

( $D = 12 \cdot \lambda_0$ ) с тем же межслойным периодом является большая «глубина» и ширина области с выраженным падением КНД.

Зависимости КНД антенны с линзой диаметром  $6 \cdot \lambda_0$  и межслойным периодом  $0,375 \cdot \lambda_0$  приведены на рисунке 9.

Сравнение зависимостей КНД и УБЛ линз диаметрами  $D = 6 \cdot \lambda_0$ ,  $D = 12 \cdot \lambda_0$  и  $D = 24 \cdot \lambda_0$  с одним и тем же межслойным расстоянием  $d = 0,375 \cdot \lambda_0$

боковое излучение в области частот  $\approx (1,1 - 1,15) \cdot f_0$  при направлении облучения  $90^\circ$  превышает уровень главного лепестка ДН.

Расчеты, включающие в себя отношение периода расположения слоёв к длине волны, на которой наблюдается высокий уровень бокового излучения, показывают,

$D = 24 \cdot \lambda_0$  и межслойным периодом  $d = 0,375 \cdot \lambda_0$ . Из рисунка видно, что центр области, в которой происходит падение КНД в направлении облучения, находится на той же частотной отметке  $\approx 1,15 \cdot f_0$ , что и для линзы с  $D = 12 \cdot \lambda_0$ . Отличием характеристик « $90^\circ$ » от характеристик ЛА меньшего размера

размера

позволяет сделать вывод о прямой зависимости выраженности «резонансных» свойств структуры линзы от количества слоев.

Как уже было отмечено выше, характеристики ЛА зависят от **параметров дискретизации слоев**, входящих в ее состав. Ниже приведены результаты исследования свойств ЛА от максимального количества дискретов в слое для линз с  $D = 6 \cdot \lambda_0$  и  $D = 24 \cdot \lambda_0$  с периодом структуры  $d = 0,25 \cdot \lambda_0$ . Во всех представленных случаях шаг изменения толщины слоя является равномерным и одинаковым для всех слоёв линзы.

Зависимости КИП от максимального количества дискретов в слое ( $N$ ) для линз диаметрами  $D = 6 \cdot \lambda_0$  и  $D = 24 \cdot \lambda_0$  с межслойным периодом  $d = 0,25 \cdot \lambda_0$  и для

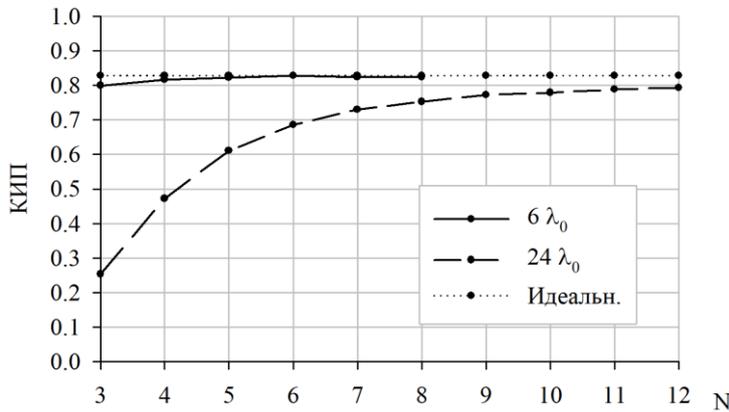


Рис. 11. КИП квазисферических ЛА с  $D = 6 \cdot \lambda_0$  и  $D = 24 \cdot \lambda_0$  при  $d = 0,25 \cdot \lambda_0$  на частоте  $1,15 f_0$ .

идеальной линзы Люнебурга с тем же фокусным расстоянием и облучателем, приведены на рисунке 11. Можно отметить, что для линзы диаметром  $6 \cdot \lambda_0$  достаточным является 4 дискрета на слой, а для линзы диаметром  $24 \cdot \lambda_0$  достаточным является 8 – 9 дискретов на слой (в

качестве критерия достаточности выбрана величина приращения КИП при увеличении количества дискретов).

В главе 3 также рассматривается эффект, связанный разностью эффективных диэлектрических проницаемостей для различных поляризаций поля в периодической слоистой диэлектрической структуре. Указанный эффект наблюдается для волн с ортогональными поляризациями, вектор поляризации одной из которых перпендикулярен плоскости слоёв структуры.

Разность эффективных диэлектрических проницаемостей для ортогональных компонент поля зависит от коэффициента заполнения слоя ( $K$ ) как отношения толщины слоя к периоду структуры  $d$  и от

диэлектрической проницаемости используемого материала. Для структуры с периодом равным  $0,19 \cdot \lambda_0$ , зависимость разности эффективных диэлектрических проницаемостей от коэффициента заполнения слоя материалом с  $\varepsilon = 1,6$ , рассчитанная с использованием теоремы Флоке на частоте  $1,25 f_0$ , приведена на рисунке 12.

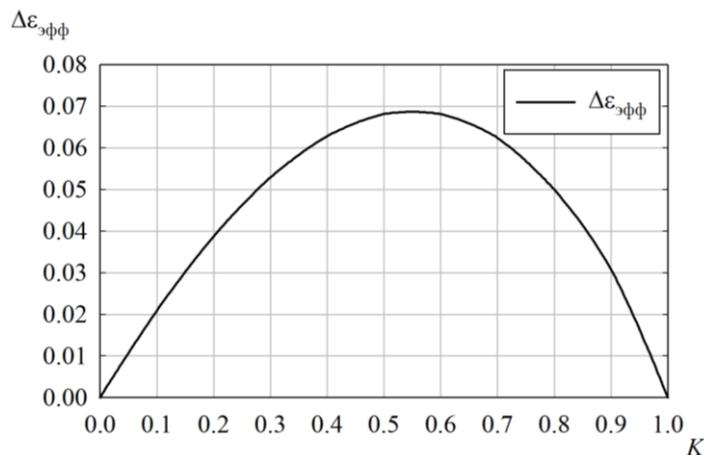


Рисунок 12 – Зависимость разности эффективных диэлектрических проницаемостей структуры из слоёв переменной толщины

В связи с наличием вышеуказанного эффекта возникает анизотропия в квазисферической ЛА из слоёв дискретно-переменной толщины,

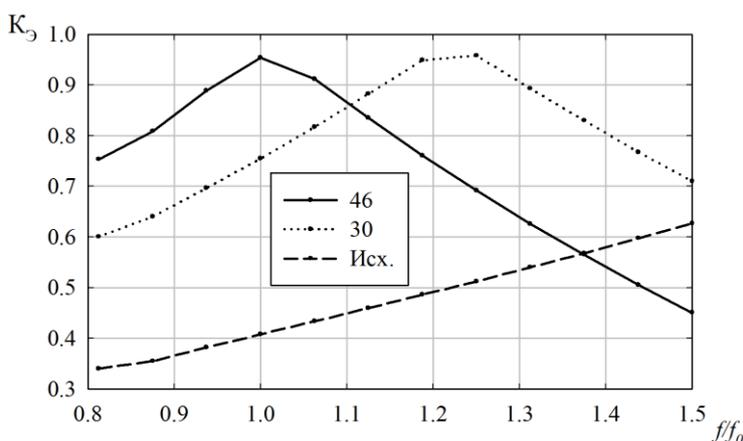


Рисунок 13 – КЭ линзы с волноводно-фланцевым облучателем для различных дополнительных фазовых сдвигов (угол облучения  $0^\circ$ )

диаметром  $7,5 \cdot \lambda_0$  с волноводно-фланцевым облучателем для различных случаев введения дополнительного фазового сдвига ортогональной компоненты поля к исходному, равному  $90^\circ$  на частоте  $f_0$ .

При облучении линзы полем с эллиптической поляризацией, в зависимости от угла облучения в плоскости  $YOZ$  (рисунок 2), изменяется КЭ. В результате моделирования была получена зависимость необходимого дополнительного фазового сдвига для получения максимальных значений КЭ для углов сканирования ДН от  $0^\circ$  до  $45^\circ$  в плоскости  $YOZ$  с шагом в  $5^\circ$ . Набор зависимостей КЭ (для линзы с вышеуказанными параметрами) для различных фиксированных значений фазового сдвига, показан на рисунке 14.

происходит изменение характеристик ДН в зависимости от направления распространения облучающего поля. В частности, получение поля с высоким КЭ в квазисферической ЛА становится возможным только при определенных условиях. На рисунке 13 представлены зависимости КЭ линзы

Из зависимостей, приведенных на рисунке 14 может быть оценен КЭ в угловом диапазоне сканирования для линзы с вышеуказанными параметрами вблизи частоты  $f_0$ . В случае небольших углов сканирования (менее  $\pm 27$  градусов), при дополнительном фазовом сдвиге в  $42^\circ$ , КЭ не опускается ниже значения 0,9.

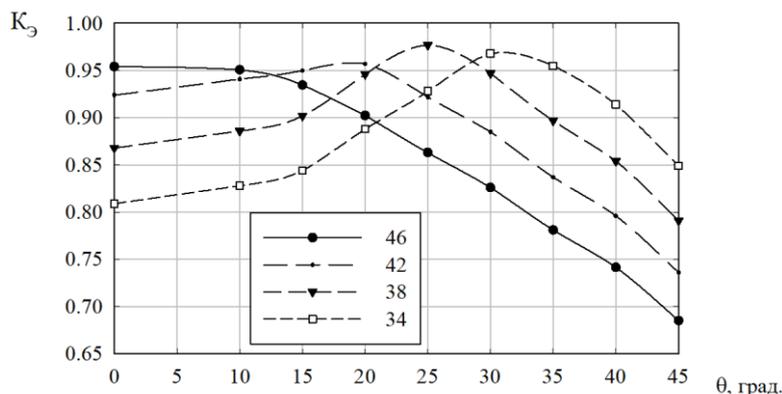


Рисунок 14 – КЭ в направлении максимума ДН от угла облучения квазисферической линзы для различных фиксированных значений фазового сдвига

В главе 4 диссертации представлены экспериментальные исследования макетов квазисферических линзовых антенн.

Фотографии исследуемого экспериментального образца АС диаметром  $D = 12 \cdot \lambda_0$  приведены на рисунке 15. Линза закреплена в специальной раме, позволяющей выставлять угол облучения. Дискрет изменения углов облучения составляет  $8^\circ$ .

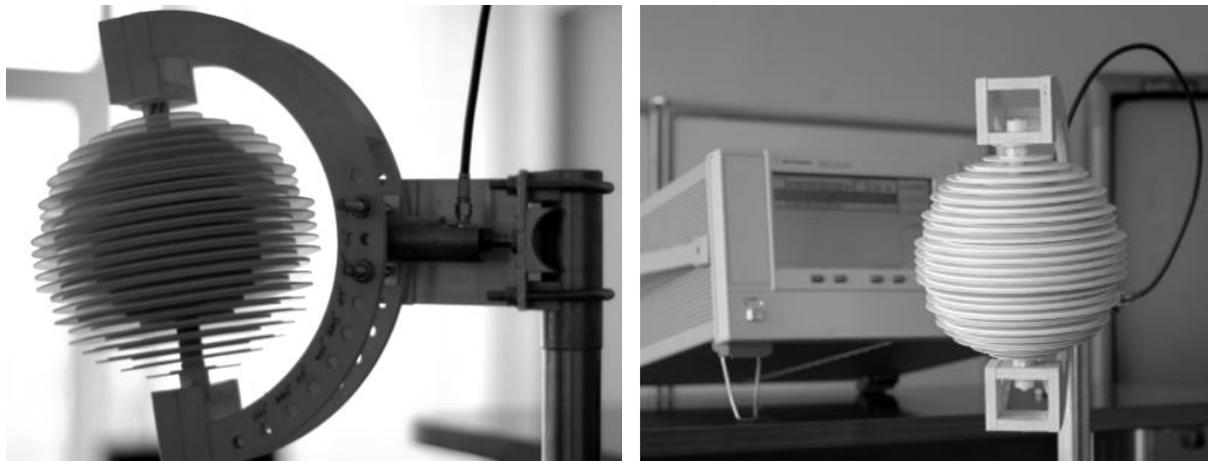


Рисунок 15 – Фото экспериментального образца линзы

ДН антенны были измерены на частотах 24 и 28 ГГц в двух плоскостях ( $E$  и  $H$ ), при углах облучения  $0^\circ$ ,  $\approx 8^\circ$ ,  $\approx 16^\circ$  и  $\approx 24^\circ$ . Ниже приводятся сравнения расчетных и измеренных ДН при углах облучения  $0^\circ$  и  $24^\circ$  на частоте 28 ГГц. Ширина главного лепестка ДН и УБЛ для каждой диаграммы приведены ниже соответствующего рисунка (рисунки 15 – 16). На представленных графиках сплошной линией показана измеренная, пунктирной – расчетная ДН.

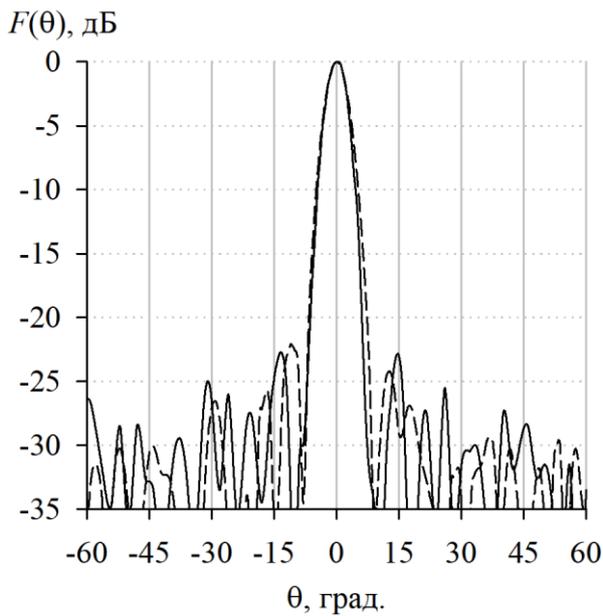


Рисунок 16 – ДН на частоте 28 ГГц в плоскости  $E$  при угле облучения  $0^\circ$   
 Расчет: ШДН =  $5,5^\circ$ ; УБЛ = - 22,1 дБ.  
 Эксперим.: ШДН  $\approx 5,2^\circ$ ; УБЛ = -23,1 дБ.

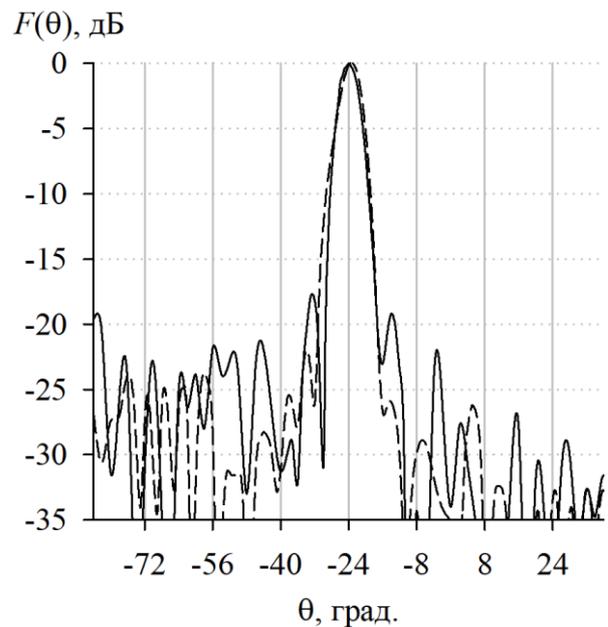


Рисунок 17 – ДН на частоте 28 ГГц в плоскости  $E$  при угле облучения  $24^\circ$   
 Расчет: ШДН =  $5,0^\circ$ ; УБЛ = - 20,4 дБ.  
 Эксперим.: ШДН  $\approx 5^\circ$ ; УБЛ = -17,9 дБ.

Из сравнения расчетных и экспериментальных ДН антенны можно заключить следующее:

- главные лепестки ДН хорошо повторяют форму расчетных. Максимальное отличие ширины главного лепестка составляет  $\pm 0,3^\circ$ , что является значением, близким к погрешности измерения;
- УБЛ экспериментальных ДН выше расчётных, однако и в самом худшем случае их уровень не превышает -15,4 дБ.;

Второй макет линзовой антенны имел диаметр  $20 \cdot \lambda_0$ . Макет отличался размером, использованием специального облучателя для работы в широкой полосе частот и наличием обтекателя (рисунок 18).

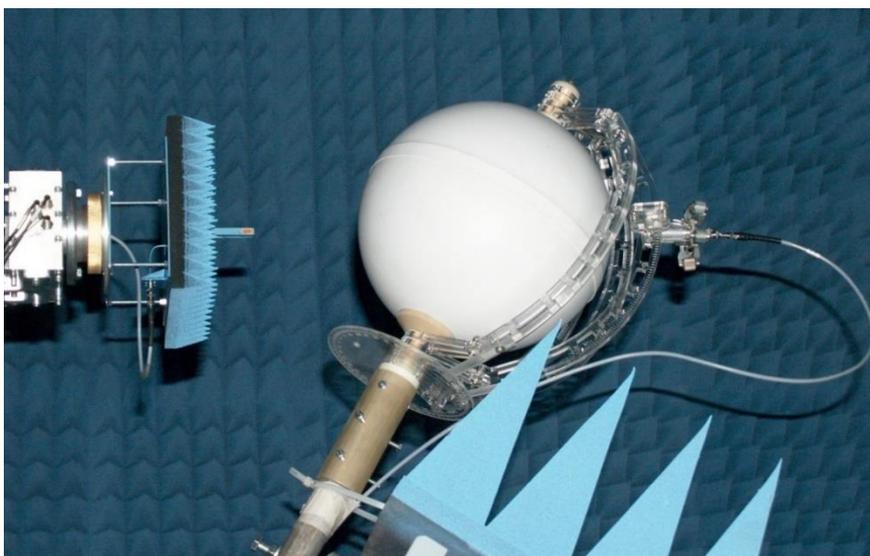


Рисунок 18 – Фотография макета квазисферической ЛА с  $D = 20 \cdot \lambda_0$

Макет обеспечивал формирование узконаправленной ДН в полосе частот 17—24 ГГц. Зависимости ШДН для различных плоскостей и направлений облучения приведены на рисунке 19.

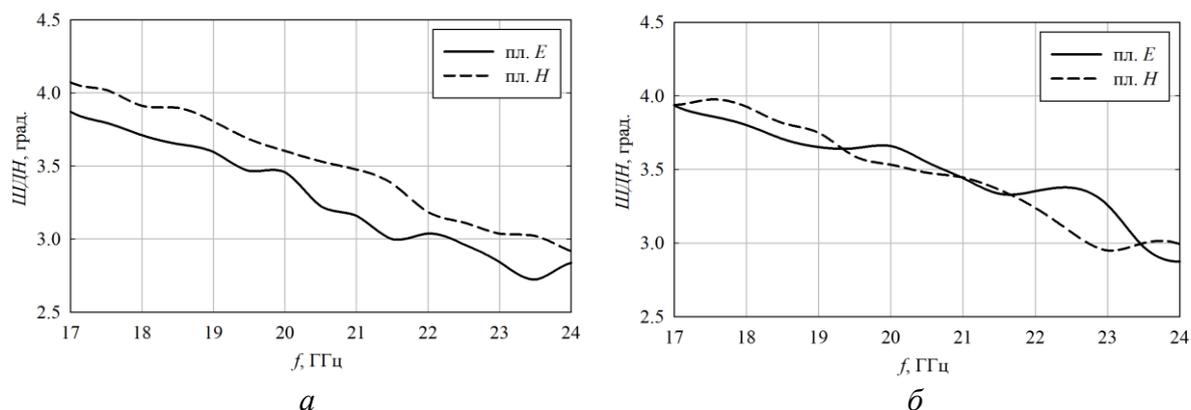


Рисунок 19 – Экспериментально полученные зависимости ШДН макета квазисферической ЛА с  $D = 20 \cdot \lambda_0$  при облучении линзы под углом  $0^\circ$  (а) и  $25^\circ$  (б)

В связи с тем, что рабочая область частот включает «резонансную» область, характерную для слоистой структуры с выбранным периодом слоёв, рабочий диапазон углов сканирования данного макета является ограниченным ( $\pm 25^\circ$ ). Уровень боковых лепестков в диапазонах рабочих частот и углов облучения не превышает -15 дБ.

Результаты исследований макетов хорошо согласуются с результатами моделирования антенных параметров, в частности по частотным зависимостям ШДН, УБЛ, КНД.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований были решены поставленные задачи, конечной целью которых являлось создание квазисферической неоднородной ЛА из однородных диэлектрических материалов. Представленные в данной работе как теоретические, так и экспериментальные результаты имеют высокую прикладную ценность в области создания неоднородных ЛА.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработаны методика синтеза квазисферической ЛА из однородного диэлектрического материала, макросы для формирования геометрии ЛА в САПР.

2. Установлено, что параметры ДН квазисферической ЛА из слоёв дискретно-переменной толщины соответствуют аналогичным параметрам ЛА со сферической линзой Люнебурга из неоднородного диэлектрического материала при облучении полем линейной поляризации.

- 2.1 Результаты моделирования квазисферических ЛА позволили установить критерии для выбора параметров ЛА исследуемого типа для обеспечения достижимых антенных характеристик в широком диапазоне частот. Указанные характеристики становятся достижимы при соответствующе выбранных параметрах структуры таким образом, чтобы

резонансная область на частотной оси находилась выше рабочей области частот. Также была установлена зависимость максимального количества дискретов толщины в слое от размеров линзы для получения ее высокой эффективности. Следует отметить, что допускается построение неоднородной квазисферической линзы из слоёв дискретно-переменной толщины с периодом структуры бóльшим, нежели требуется для соответствия её параметров параметрам ЛА Люнебурга. При этом, характеристики КНД, ШДН и УБЛ будут соответствовать линзе Люнебурга в ограниченном диапазоне углов облучения линзы.

2.2. Слоистая диэлектрическая структура, при определенных условиях проявляет анизотропные свойства. Показано, что за счет фазового сдвига между ортогональными компонентами поля облучателя могут быть получены высокие значения КЭ квазисферической ЛА в диапазоне углов облучения. Квазисферическая ЛА обеспечивает КЭ  $\geq 0,8$  поля волны в полосе частот  $\approx 20\%$ .

3. Результаты проведенных исследований показывают, что квазисферическая ЛА работает в широкой полосе частот с высокой эффективностью, использование рупорного облучателя с изломом образующей повышает КИП квазисферической линзовой антенны на 20%, по сравнению с использованием простого рупорного облучателя.

4. Выполненные разработки конструкций антенн, макетирование и экспериментальные исследования подтвердили результаты расчетов и моделирования.

Результаты исследований и предложенные конструкции, полученные в результате выполнения настоящей диссертационной работы, нашли применение в составе НИР и ОКР, выполненных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

### **Список публикаций в журналах, входящих в перечень ВАК РФ**

1. Рязанцев Р.О., Александрин А.М., Саломатов Ю.П. Исследование квазиоптических структур из искусственного диэлектрика в СВЧ-диапазоне // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического унив. им. ак. М.Ф. Решетнева. 2010. вып. 6 (32). С. 15–18.
2. Рязанцев Р.О., Александрин А.М., Саломатов Ю.П. Влияние параметров облучателей на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика // Известия вузов. Физика. 2012. № 9/2. С. 93–94.
3. Многолучевая широкополосная антенная система на основе линзы Люнеберга. / Н.А. Павлов, Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов, М.Е. Синицин, М.И. Сугак // Нелинейный мир. 2014. Т. 12, № 5. С. 37–44.
4. Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П., Сугак М.И. Антенна на основе долей неоднородной сферической линзы с экраном // Известия вузов. Физика. 2015. №8/3. С.75–77.
5. Диагностика линзовых антенн с использованием сканера ближнего поля / А.С. Иванов, А.М. Александрин, К.В. Лемберг, Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов. // Доклады ТУСУР. 2015. № 1 (35). С. 33–36.

### Список патентов по теме исследования

6. Пат. 2485646, Российская Федерация, МПК H01Q 15/02. Устройство для фокусировки типа "Линза Лüneберга" / Рязанцев Р. О., Саломатов Ю.П.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»; заявл. 12.03.2012; опубл. 20.06.2013, Бюл № 17.
7. Пат. 019779, Евразийское патентное ведомство, МПК H01Q 15/02. Устройство типа "линза Лüneберга" для фокусировки радиоволн / Рязанцев Р. О., Саломатов Ю. П.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»; заявл. 2012.06.04, опубл. 2014.06.30, Бюл № 6.

### Список публикаций в трудах конференций

8. Concave Spherical Feed Array for Luneberg Lens. / Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Sugak M.I. // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013 / IEEE, 2013. P 1–4.\*
9. Антенная система с круговой поляризацией на основе плоскостойкой сферической линзы Лüneберга / Рязанцев Р. О., Саломатов Ю. П., Александрин А. М., Дранишников А. С. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2014): тез. докл. 24-я Межд. Крымская конф. Севастополь: материалы конф. в 2 т. С. 465–466.\*
10. Flat-layered spherical lens antenna system in conditions of slant polarized feeder radiation / Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Panko V.S., Sugak M.I. // The proceedings of Control and Communications (SIBCON), 2016 International Siberian Conference on, 12–14 May 2016, P. 1–3.\*
11. Huygens Source for Application in Modern Electromagnetic Simulation Software / Ryazantsev R. O., Salomatov Y. P. // The International Scientific Conference 2017 RADIATION AND SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES RSEMW. 26–30 June 2017, Gelendzhik, Russia. / IEEE, 2017. P. 303–305.\*
12. Параметры дискретизации квазисферической плоскостойкой линзовой антенны / Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П. // Антенны и распространение радиоволн: сб. науч. тр. Всероссийской научн.-техн. конф. Санкт-Петербург, 2018. С. 92-96.

---

\* Индексированы в наукометрической базе данных Scopus