

На правах рукописи



**Комарова Елена Владимировна**

**АНТЕННЫЕ И ДИФРАКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
МНОГОСЛОЙНОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Екатеринбург – 2012**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Научный руководитель: заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Панченко Борис Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Носков Владислав Яковлевич

доктор технических наук, доцент  
Пономарев Олег Павлович

Ведущая организация: Открытое Акционерное Общество «Челябинский радиозавод «Полет», 454080, г. Челябинск, ул. Тернопольская, 6

Защита состоится 18 мая 2012 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.11 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 32, ауд. Р-217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.285.11 С.М. Зраенко.

Автореферат разослан 13 апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.285.11, к.т.н., доцент



С.М. Зраенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В различных системах радиолокации, радионавигации, радиоастрономии, наземной и космической связи, а также радиопротиводействия находят широкое применение антенны высокой направленности. Наиболее распространенными типами направленных антенн являются зеркальные и двухзеркальные антенны (Кассегрена, АДЭ, Грегори), фазированные антенные решетки, плоские ускоряющие и замедляющие линзовые антенны [1,2], а также появившиеся в последние два десятилетия антенны на основе поверхностных гребенчатых структур, как разновидность антенн вытекающей волны [3]. Для многих практических приложений направленных антенн желательно иметь систему управления лучом в широком диапазоне углов обзора. При этом в зеркальных и плоских линзовых антеннах такое управление лучом достигается путем их механического поворота в пространстве, что является не всегда приемлемым. Общими проблемами для этих антенн являются также вопросы ширины полосы рабочих частот и защиты антенных систем от внешних воздействий.

В фазированных антенных решетках управление лучом достигается с помощью специальных систем управления диаграммой направленности. Высокое быстродействие управления диаграммой – одно из важнейших достоинств этих антенн. Однако и они также имеют известные ограничения по диапазону углов сканирования и ширине полосы рабочих частот. Кроме того, стоимость на проектирование и изготовление систем управления диаграммой направленности решеток достаточно высока и часто превосходит стоимость самого антенного полотна.

Сравнительно новыми по отношению к перечисленным выше антеннам и свободными от ряда отмеченных недостатков являются антенны, построенные на базе линзы Люнеберга (ЛЛ). Впервые возможности фокусировки луча с помощью этой линзы были описаны математиком Рудольфом Карлом Люнебергом в работе «Математическая теория оптики», опубликованной в 1944 году [4]. В своих работах на основе квазиоптического приближения [5,6] Люнеберг показал, что сферическая линза, возбуждаемая в какой-либо точке ее поверхности, преломляет все лучи таким образом, что они выходят из линзы параллельно соответствующему диаметру, если коэффициент преломления  $n(r)$  удовлетворяет условию:  $n(r) = \sqrt{\varepsilon'(r)} = \sqrt{2 - (r/a)^2} = \sqrt{2 - \tilde{r}^2}$ , где  $\varepsilon'(r)$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы на текущем расстоянии  $r$  от центра линзы, имеющей радиус  $a$ .

Линзы Люнеберга обладают сферической симметрией, и это обстоятельство позволяет производить сканирование луча практически в диапазоне углов как в полноповоротной антенне. С учетом сферической симметрии линзы возможно одновременное формирование нескольких диаграмм направленности антенны. При этом достигается независимость формирования отдельных лучей, высокое быстродействие сканирования при условии электрического переключения и хорошая развязка каналов. Кроме того, эти антенны обладают умеренным аэродинамическим сопротивлением и по своей форме весьма эргономичны.

В реальных условиях точная реализация требуемого закона объёмного изменения коэффициента преломления  $n(r)$  в линзе Люнеберга практически невозможна. Все попытки создания ЛЛ сводились к искусству максимально приблизить реальные характеристики к идеальному закону, что достигается различными способами. Наиболее распространённый способ изготовления такой линзы – разбивка объёма сферы на слои из неоднородного материала (сферические оболочки), диэлектрическая проницаемость которого увеличивается от внешнего радиуса сферы к центру.

Довольно сложная технология производства многослойных структур, отличающихся электрофизическими характеристиками слоев – один из основных недостатков антенн на основе ЛЛ, долгое время сдерживающий развитие данного направления антенной техники. В последние годы благодаря прогрессу в области материаловедения и совершенствованию технологии производства необходимых компонентов линзовых антенн возник очередной всплеск интереса к линзе Люнеберга. Эти успехи, прежде всего, связаны с возможностями новых технологий, появлением композиционных, углепластиковых и кремний-органических диэлектриков с малыми омическими потерями и стабильными в диапазоне частот и во времени диэлектрическими характеристиками, а также метаматериалов, обеспечивающих принципиально новые возможности в конструировании антенн. Разработаны методы управления эквивалентными параметрами слоёв путём введения в применяемые материалы различных добавок, в том числе металлических вкраплений и иных неоднородностей. Кроме того, актуальность развития теории и техники линзовых антенн Люнеберга обусловлена стремительным освоением коротковолновой части сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн в связи с решением проблемы электромагнитной совместимости, повышения пропускной способности и качественных характеристик радиоэлектронных средств, где преимущества таких антенн наиболее привлекательны.

К настоящему времени имеется несколько удачных по конструкции антенн на основе линзы Люнеберга, которые используются в США и Франции в основном для управления и слежения за космическими объектами, а также в системах радиопротиводействия. Ведутся исследования различных конструкций и выполняются разработки таких антенн также в нашей стране. Появились новые методы проектирования сложных электродинамических структур антенных систем, обеспечивающих удовлетворительную точность и достаточное быстродействие расчётов на ЭВМ [7]. Данные работы в ведущих развитых странах мира в настоящее время классифицируются как hi-tech [8-11].

Необходимо отметить, что существующие методы расчета сложных электродинамических систем и слоистых структур, использующие достаточно универсальный метод частичных областей и его модификации, для решения рассматриваемой здесь задачи являются недостаточно совершенными. При расчетах многослойных структур вычисления усложняются применением матриц высокого порядка, поэтому получение численных результатов этими методами требует больших затрат машинного времени, а также мощные вычислительные ресурсы.

Широкими возможностями обладает метод интегральных уравнений, но наличие межслойных границ заметно усложняет решение задачи возбуждения. Численные методы хорошо зарекомендовали себя при решении электродинамики в замкнутых областях. Переход к открытым областям, к задачам излучения и дифракции предъявляет порой чрезмерные требования к вычислительным ресурсам. Кроме того, указанные методы не исключают проблемы, возникающие при расчете полей на стыках между слоями в многослойных структурах, недостаточно точно учитываются потери энергии на неоднородностях, а также не прогнозируются паразитные моды излучения.

В связи с этим, особенно востребованы новые, более точные и совершенные методы расчета, хорошо адаптируемые под анализ многослойных структур. Одним из таких методов является метод, основанный на использовании тензорных функций Грина, который подробно описан в монографиях Б.А. Панченко, С.Т. Князева, С.Н. Шабунина и активно используется в работах их аспирантов. Преимущество представления функций Грина при разложении поля по  $E$ - и  $H$ -волнам связано с простотой анализа многослойных сред. На основе этого метода представляет интерес разработка решения задачи электромагнитного возбуждения многослойной линзы Люнеберга. Использование данного метода позволит существенно сократить затраты машинного времени, что особенно актуально в современных условиях, когда этап проектирования и расчета является наиболее важным при разработке и внедрении устройств нового типа. Кроме того, использованная стратификация имеет непосредственный выход на практическую реализацию ЛЛ в виде слоев.

Следует отметить еще одно полезное свойство линзы Люнеберга – возможность формирования направленного излучения при достаточно большом удалении источника возбуждения от поверхности линзы. Данная возможность значительно расширяет область применения ЛЛ, особенно при решении задач радиопротиводействия. В связи с этим, в диссертационной работе наряду с антенной задачей впервые рассматривается задача дифракции излучения на линзе от удалённого источника.

#### **Целью диссертации является:**

1. Разработка нового метода расчета распределения электромагнитных полей в ближней и дальней зоне линзы Люнеберга, основанного на использовании аппарата тензорных функций Грина для многослойных сферических областей.

2. Определение дифракционных характеристик линзы Люнеберга, таких как диаграммы рассеяния по основной и кроссполяризационной составляющим поля, коэффициенты рассеяния, включающие в себя полный коэффициент рассеяния, коэффициент поглощения, радиолокационный и попутный коэффициенты рассеяния. Исследование зависимости численных результатов от типа профиля линзы, количества слоев и диаметра линзы. Сравнение полученных результатов расчёта характеристик рассеяния с известными данными.

3. Определение антенных характеристик линзы Люнеберга, таких как диаграмма направленности по основной и кроссполяризационной составляющим поля, амплитудно-фазовое распределение поля на теневой стороне линзы, ко-

эффицент направленного действия, коэффициент усиления. Исследование зависимости численных результатов от типа первичного источника, его пространственного положения и диаметра линзы. Оценка влияния пространственного смещения облучателя на антенные характеристики.

**Метод решения** задачи электромагнитного возбуждения многослойной сферической структуры основан на использовании аппарата тензорных функций Грина. Задача электродинамического решения ЛЛ ставится для двух вариантов возбуждения: источник находится вблизи поверхности линзы (антенная задача), источник находится на удалении (дифракционная задача). На основе решения этой задачи получены расчетные формулы для электромагнитного поля и интегральных характеристик. Расчетные процедуры со специальными функциями упрощены путем введения специальных нормировок сферических функций Бесселя.

**Научная новизна** диссертации заключается в разработке нового метода электродинамического расчета полевых и интегральных (мощностных) характеристик многослойных линз Люнеберга, который существенно сокращает затраты машинного времени. На основе предложенного метода получены антенные характеристики для стратифицированной модели линзы: диаграмма направленности по основной и кроссполяризационной составляющим, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления с учетом омических потерь в материале линзы. Рассмотрено влияние типа первичного облучателя и его пространственного положения на антенные характеристики. При решении задачи дифракции определены коэффициенты рассеяния, а также учтены потери, для определения которых использована оптическая теорема.

**Обоснованность и достоверность** положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается строгой постановкой решения задачи электромагнитного возбуждения. Правильность аналитических и численных решений проверялась на сходимость с рядом частных случаев, а также с результатами более ранних исследований, полученных другими авторами.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке нового более точного метода расчета характеристик линз Люнеберга, обеспечивающего комплексный учёт объёмной многослойной структуры линзы и параметры применяемых материалов. Полученные формулы для антенных и дифракционных характеристик позволяют существенно сократить затраты времени и материальных ресурсов при проектировании антенных устройств на основе ЛЛ. Так, например, для расчёта диаграммы рассеяния линзы с диаметром  $12\lambda_0$  затраты машинного времени для компьютера AMD Phenom 9550 Quad-Core Processor, 2.20 GHz составляет около 30 минут.

Даны рекомендации по определению оптимального количества слоев исходя из критерия минимизации затрат на изготовление линзы. При определении коэффициента усиления учтены источники возможных потерь на образование паразитной поляризации электромагнитного поля и тепловых потерь, а также обратное отражение в сторону облучателя. Практическое значение для различных вариантов применения имеют также полученные результаты анализа антенны, учитывающие тип и местоположение первичного облучателя.

Практическая значимость работы подтверждена двумя актами об использовании результатов выполненных исследований.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Описание математическим аппаратом тензорных функций Грина при разложении поля по волнам типа  $E$  и  $H$ , электрофизической модели линзы Люнеберга, представляющей собой многослойную сферу, позволяет однозначно определить все составляющие электромагнитного поле как внутри всех слоёв и на границах между ними, так и вне объёма сферы, рассчитать все необходимые антенные характеристики, оптимизировать внутреннюю структуру линзы и рассмотреть условия её возбуждения.

2. Аппарат тензорных функций Грина, построенный на концепции направленных модальных токов, напряжений, сопротивлений и проводимостей, использующий матрицы передачи слоев и границ, не имеет принципиальных ограничений на число разбиений объёма линзы на слои. Требуемое число слоёв определяется заданной точностью аппроксимации закона радиального распределения коэффициента преломления. Использование простой равношаговой стратификации тела линзы в данном методе обеспечивает решение как прямой задачи на оптимизацию значений диэлектрической проницаемости слоёв при заданном их числе, так и обратной, когда необходимо найти количество и толщину слоёв при имеющейся номенклатуре диэлектрических материалов.

3. Использование нормировки сферических функций Бесселя-Риккати, входящих в расчетные формулы, оптимизирует расчетные процедуры по затратам машинного времени. Вместе с увеличением диаметра линзы увеличиваются затраты машинного времени на вычисления. При этом с увеличением количества слоёв наблюдается улучшение вторичных параметров антенны, таких, как ширина главного лепестка диаграммы направленности, уровень боковых лепестков, обратное рассеяние. Исходя из критерия экономии машинного времени оптимальное число разбиения сферы на слои, при котором отклонение от истинных параметров незначительно, составляет шесть-семь.

4. При решении задачи оптимального возбуждения линзы для расчета вектора напряженности электрического поля в дальней зоне, целесообразно использовать скалярные компоненты функций Грина. Учет эффективности облучения ЛЛ зависит от диаграммы направленности облучателя и его положения. Одиночный вибратор имеет малую эффективность, так как более половины мощности не участвует в фокусировке с помощью линзы. Элемент Гюйгенса и вибратор с рефлектором или их аналоги более предпочтительны для использования в качестве облучателей линзы Люнеберга.

5. Основные характеристики линзовой антенны, такие как ширина диаграммы направленности и коэффициент направленного действия для облучателя в виде элемента Гюйгенса и вибратора с рефлектором приблизительно одинаковые. Различия в диаграммах направленности порядка 6-8 дБ наблюдаются в области бокового и заднего излучения и обусловлены различным видом диаграмм направленности вибратора с рефлектором в плоскостях  $E$  и  $H$ . Значительное смещение облучателя приводит к уменьшению коэффициента эффективности облучателя, что в свою очередь ведет к общему снижению коэффи-

ента усиления. Разница в поле основной и кроссполяризации наблюдается для области бокового заднего излучения. Амплитудно-фазовое распределение по эквивалентной апертуре на теневой стороне линзы, полученное для различных диаметров ЛЛ, может быть использованы для приближенного расчета диаграмм направленности апертурным методом.

6. Предложенная методика определения коэффициента усиления антенны на основе линзы Люнеберга позволяет учитывать следующие явления: различия диаграммы направленности облучателя и амплитудного распределения на теневой стороне ЛЛ; затухание волн, связанное с омическими потерями в материале линзы; снижение эффективности облучателя из-за попадания части мощности первичной антенны в линию питания за счет отражения от поверхности линзы.

**Связь темы с планом научных работ.** Работа является частью научных исследований, проводимых на кафедре Высокочастотных средств радиосвязи и телевидения» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, связанных с планом госбюджетных работ.

**Личный вклад автора.** Постановка задачи исследований и выбор метода анализа принадлежит научному руководителю. Разработка математической модели многослойной линзы Люнеберга, программ расчёта линзы и её характеристик, выполнение всех расчётов, а также формулировка научных положений и выводов принадлежат лично автору. Обсуждение результатов математического моделирования и публикация материалов выполнялось совместно с научным руководителем и М.Г. Гизатуллиным, а ряд результатов численных расчётов – с Е.А. Екимовских, являющихся сотрудниками Уральского технического института связи и информатики.

**Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:**

1. Международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2010», проводимой в рамках VII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2010», Екатеринбург, 2010
2. Международной научно-практической конференции «СВЯЗЬ-ПРОМ 2011», проводимой в рамках VIII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011», Екатеринбург, 2011
3. Международной научной конференции «Динамика современной науки», Болгария, 2011
4. Шестой всероссийской научно-технической Интернет-конференции «Информационные технологии и электроника», Екатеринбург, 2012

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка литературы. Объем диссертации составляет 131 страницу основного текста, содержит 78 рисунков, 15 таблиц, 7 страниц списка литературы (81 наименование).

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы



основные положения, выносимые на защиту, дается краткое содержание диссертационной работы.

**В первой главе** диссертации приводится историческая справка на линзу Люнеберга, представляющую из себя сферу из неоднородного диэлектрика, которая благодаря сферической симметрии способна преобразовывать сферический фронт волны в плоский. Согласно приведенному геометро-оптическому подходу к определению профиля линзы [12] коэффициент преломления ЛЛ должен изменяться вдоль радиуса сферической системы по следующему закону:

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon'(r)} = \sqrt{2 - (r/a)^2} = \sqrt{2 - \tilde{r}^2}. \quad (1)$$

Поскольку выполнить ЛЛ из неоднородного материала с плотностью, непрерывно изменяющейся от поверхности к центру, достаточно трудно, на практике используется многослойная реализация. Наиболее простой способ стратификации заключается в равномерном разбиении тела линзы на  $L$  слоев. При этом в соответствии с выбранным числом  $L$  делится интервал изменения диэлектрической проницаемости. Далее, по выбранным значениям  $\varepsilon'_i$  определяется ширина слоев –  $\Delta r_i$  в соответствии с законом (1). На рисунке 1 показана стратифицированная модель ЛЛ.

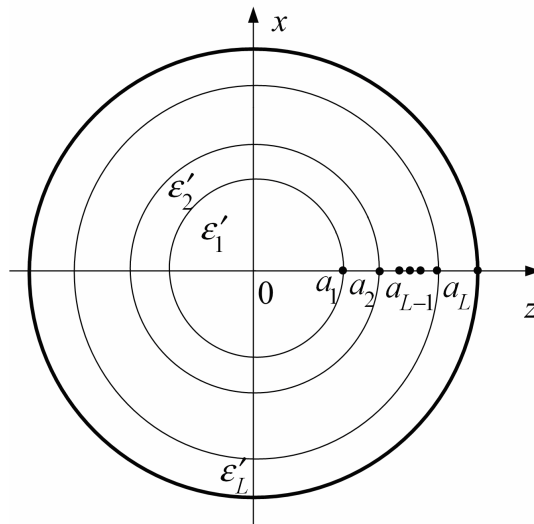


Рисунок 1 – Многослойная модель ЛЛ

Для того чтобы приблизить характеристики создаваемой ЛЛ к требуемым параметрам могут использоваться различные оптимизационные алгоритмы. В диссертации рассматриваются два способа выбора  $\varepsilon'_i$  – равношаговый и оптимизированный [8].

С учетом отмеченных сложностей реализации ЛЛ особое значение приобретают достоверные методы расчета, которые существенно сократят общую стоимость на проектирование и изготовление линз. Нами предлагается универсальный способ решения задачи электромагнитного возбуждения, основанный на построении тензорных функций Грина –  $\bar{\bar{G}}_{11}$ ,  $\bar{\bar{G}}_{12}$ ,  $\bar{\bar{G}}_{21}$ ,  $\bar{\bar{G}}_{22}$ , который позволяет рассчитать компоненты полей  $E$  и  $H$  внутри сферы, на сферической границе и в дальней зоне.

Рассмотрены примеры конструктивной реализации многослойных ЛЛ, а также технологии и материалы для их изготовления. На рисунке 2 представлены примеры конструктивной реализации многослойных ЛЛ [13].

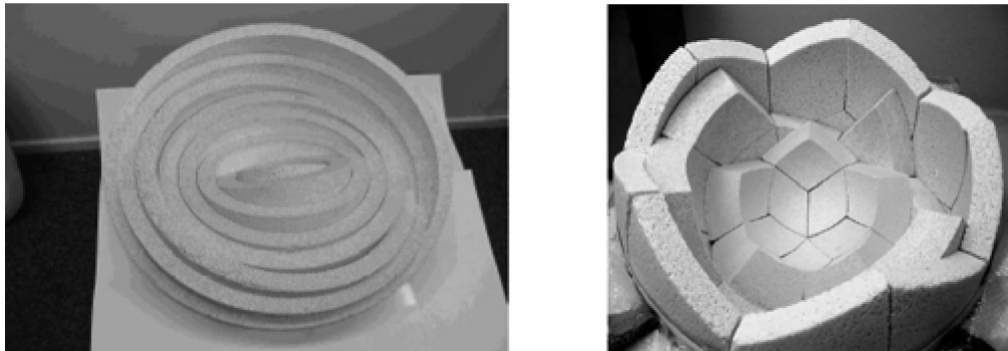


Рисунок 2 – Конструктивные реализации многослойных ЛЛ

Указано возможное применение линз Люнеберга в технике радиолокации, радионавигации и связи. Линза Люнеберга может быть использована для направленного переизлучения плоской электромагнитной волны, в этом качестве линза может быть использована как средство радиопротиводействия. ЛЛ также может быть использована в качестве остронаправленной антенны, для этого необходимо расположить облучатель вблизи поверхности сферической линзы. Возможно применение ЛЛ для широкоугольного сканирования. Благодаря сферической симметрии ЛЛ может быть использована в многолучевом режиме, для этого необходимо расположить несколько первичных облучателей вокруг линзы. Кроме того, с помощью вспомогательного облучателя возможно подавление местной или организованной помехи, положение которой не совпадает с направлением штатной диаграммы направленности.

Рассмотрены примеры применения Линзы Люнеберга в спутниковых системах, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и связи. Линзовая антенна для спутникового применения [14] приведена на рисунке 3.

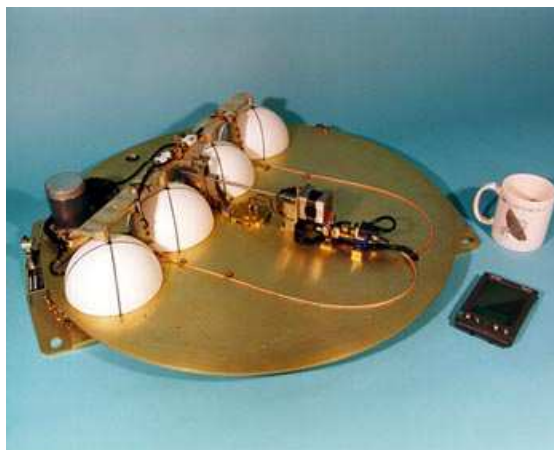


Рисунок 3 – Линзовая антенна для спутникового применения

Одинаковые по размерам ЛЛ могут формировать антенные решетки. В этом случае можно достичь высокого коэффициента усиления.

**Во второй главе** диссертации рассмотрено решение задачи электромагнитного возбуждения многослойных сферических областей [15]. Получены скалярные компоненты тензорных функций Грина, которые используются для

решения антенных и дифракционных задач. Выполнено преобразование общих представлений тензоров Грина при возбуждении поперечными источниками. Переход от задачи электромагнитного возбуждения соответствующими сторонними токами в задачу дифракции выполнен путем удаления на бесконечность источников, моделирующих фронт плоской или цилиндрической волны вблизи объекта дифракции. Получена единая универсальная запись компонентов электромагнитного поля, позволяющая определить все составляющие электромагнитного поля внутри сферы, на ее границах и во внешней области. Для минимизации расходов машинного времени использована перенормировка сферических функций Бесселя и введены комбинации функций Бесселя-Неймана, отличающиеся хорошей сходимостью, как по номерам функций, так и по значениям аргументов.

**В третьей главе** диссертации рассматривается дифракция плоской электромагнитной волны на многослойной линзе Люнеберга. Поле в дальней зоне ЛЛ определяется следующим выражением:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = E_0 \cdot \frac{e^{-ik_0 r}}{(k_0 r)(k_0 a)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot e^{i\frac{\pi}{2}n} \langle [\cos \varphi \cdot \tau_n(\theta) \cdot \mathbf{a}_\theta - \sin \varphi \cdot \pi_n(\theta) \cdot \mathbf{a}_\varphi] \cdot M'_n - [\cos \varphi \cdot \pi_n(\theta) \cdot \mathbf{a}_\theta - \sin \varphi \cdot \tau_n(\theta) \cdot \mathbf{a}_\varphi] \cdot N'_n \rangle, \quad (2)$$

Выполнено разбиение на три, пять, шесть и семь слоев для равношагового приближения профиля линзы диаметром  $2a = 2\lambda_0$ . Отмечено, что с увеличением количества слоев наблюдается улучшение вторичных характеристик ЛЛ. При расчете использовались стандартные подпрограммы расчета полиномов Лежандра и встроенные функции Бесселя.

Получены диаграммы рассеяния и численные результаты для равношагового и оптимизированного приближения профиля линзы при шестислойном разбиении для нескольких значений диаметра ЛЛ. В качестве примера на рисунках 4 и 5 приведены диаграммы рассеяния в главных плоскостях для линзы диаметром  $2a = 4\lambda_0$ , при этом использовано шестислойное разбиение.

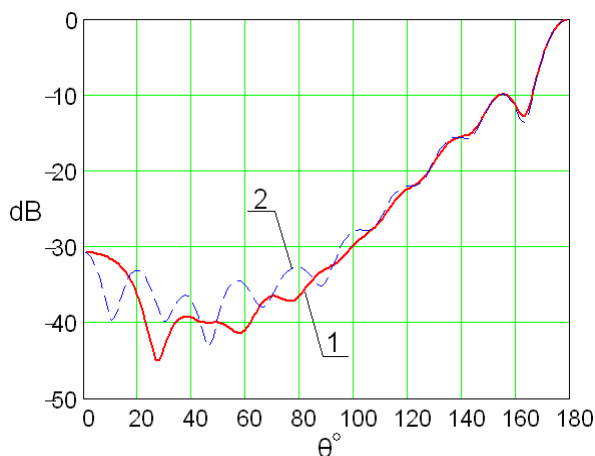


Рисунок 4 – Диаграмма рассеяния:  
1 –  $F(\theta, 0)$ , 2 –  $F(\theta, \pi/2)$ ;  $2a = 4\lambda_0$ ;  
равношаговая стратификация

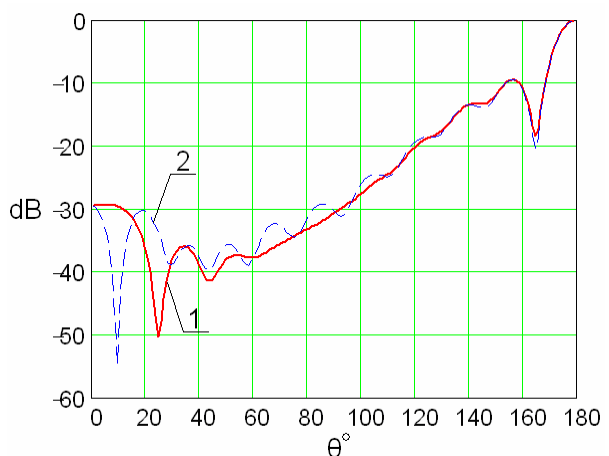


Рисунок 5 – Диаграмма рассеяния:  
1 –  $F(\theta, 0)$ , 2 –  $F(\theta, \pi/2)$ ;  $2a = 4\lambda_0$ ;  
оптимизированная стратификация

Для получения основной (оп) и кроссполяризационной (кп) составляющих вектора  $E$  используется альтернативная сферическая система координат [16]. Получены диаграммы рассеяния по полю  $оп$  и  $кп$  для нескольких диаметров линзы для двух видов стратификации. На рисунках 6, 7 приведены диаграммы рассеяния для линзы диаметром  $2a = 4\lambda_0$ , на которых показаны компоненты электрического поля основной и кроссполяризации.

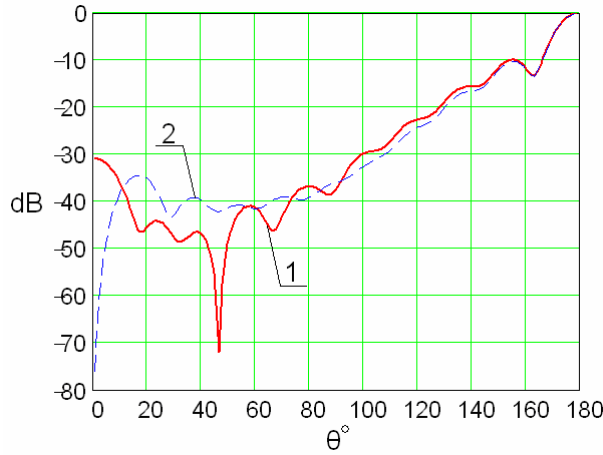


Рисунок 6 – Диаграмма рассеяния:

1 –  $F_{оп}(\theta, \pi/4)$ , 2 –  $F_{кп}(\theta, \pi/4)$ ;  $2a = 4\lambda_0$ ; равношаговая стратификация

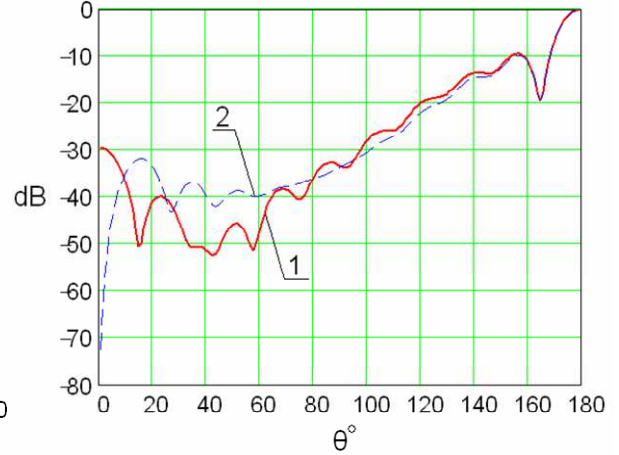


Рисунок 7 – Диаграмма рассеяния:

1 –  $F_{оп}(\theta, \pi/4)$ , 2 –  $F_{кп}(\theta, \pi/4)$ ;  $2a = 4\lambda_0$ ; оптимизированная стратификация

Диаграммы рассеяния рассчитаны в диагональной плоскости ( $\varphi = \pi/4$ ), где кроссполяризационная составляющая имеет наибольшую амплитуду.

Набор квадратичных (мощностных) характеристик, описывающих явление дифракции на ЛЛ, включает в себя [17]:

1. Полный коэффициент рассеяния:

$$\sigma_s = \frac{2}{(k_0 a)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left[ |M_n|^2 + |N_n|^2 \right] \quad (3)$$

2. Коэффициент поглощения:

$$\sigma_a(a) = \frac{2}{(k_0 a)^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot \left. \cdot \operatorname{Re} \left\{ (-i) \left\langle \frac{i\tilde{Z}(a)}{\left| i\tilde{Z}(a)h_n^{(2)}(k_0 a) - h_n^{(2)'}(k_0 a) \right|^2} + \frac{i\tilde{Y}(a)}{\left| i\tilde{Y}(a)h_n^{(2)}(k_0 a) - h_n^{(2)'}(k_0 a) \right|^2} \right\rangle \right\} \right. \quad (4)$$

3. Радиолокационный коэффициент рассеяния:

$$\sigma(0,0;0,0) = \frac{1}{(k_0 a)^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (-1)^n [M_n - N_n] \right|^2. \quad (5)$$

4. Попутный коэффициент рассеяния:

$$\sigma(\pi,0;0,0) = \frac{1}{(k_0 a)^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [M_n + N_n] \right|^2. \quad (6)$$

Приведены значения коэффициентов рассеяния для нескольких диаметров линзы и двух типов стратификации (таблица 1). В таблице 1 в скобках указано значение коэффициентов в дБ.

Таблица 1

$\sigma$ \ $2a$	Равношаговая стратификация			Оптимизированная стратификация		
	$2\lambda_0$	$4\lambda_0$	$8\lambda_0$	$2\lambda_0$	$4\lambda_0$	$8\lambda_0$
$\sigma_s$	1,819	1,765	1,753	2,268	1,723	1,828
$\sigma(0,0;0,0)$	0,059 (-12,302)	0,104 (-9,825)	0,277 (-5,581)	0,062 (-12,076)	0,133 (-8,761)	0,161 (-7,932)
$\sigma(\pi,0;0,0)$	47,369 (16,755)	123,084 (20,902)	485,823 (26,865)	63,479 (18,026)	117,5 (20,700)	532,715 (27,265)

Показано влияние омических потерь материала линзы на коэффициенты рассеяния. Отмечено, что при рассмотрении дифракции на ЛЛ способ стратификации в радиальном направлении не сказывается существенно на характеристиках рассеяния при достаточном количестве слоев.

Для того чтобы проследить появление кроссполяризационных составляющих, рассмотрены диаграммы рассеяния в различных плоскостях:  $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \pi/2$ ,  $\varphi = \pi/3$ ,  $\varphi = \pi/4$ ,  $\varphi = \pi/6$ . В главных плоскостях ( $\varphi = 0$ ,  $\varphi = \pi/2$ ) кроссполяризационные составляющие отсутствуют. Наибольшая амплитуда кп наблюдается в диагональной плоскости ( $\varphi = \pi/4$ ).

**Четвертая глава** посвящена вопросам применения разработанного электродинамического метода возбуждения многослойной сферической структуры, основанного на использовании тензорных функций Грина, для расчета антенных характеристик линзы Люнеберга. Приведены характеристики трех типов облучателей, допускающие строгое электродинамическое решение задачи возбуждения линзы. Одиночный вибратор имеет малую эффективность, так как более половины мощности не участвует в фокусировке с помощью линзы. Элемент однонаправленного излучения и вибратор с рефлектором или их аналоги могут быть использованы в качестве облучателей ЛЛ.

Рассмотрено решение задачи облучения ЛЛ одиночным вибратором, представляющее академический интерес. На основании этого решения в главе 3 рассмотрен случай дифракции на линзе Люнеберга путем сноса вибратора на бесконечность.

В качестве первого приближения однонаправленного облучателя может быть использован элемент Гюйгенса, который представляет собой комбинацию электрического и магнитного диполей. На рисунке 8 показана модель линзы, облучателем которой является элемент Гюйгенса.

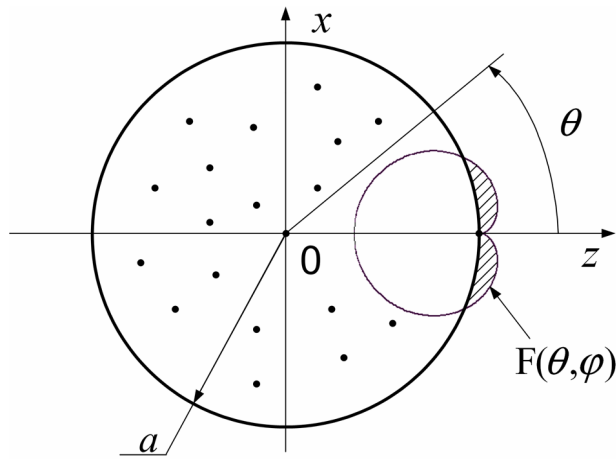


Рисунок 8 – Линза с облучателем в виде элемента Гюйгенса

Вибратор с рефлектором также может быть использован в качестве облучателя ЛЛ как однонаправленный элемент. Рассмотрен случай, когда второй элемент играет роль директора и расстояние между элементом облучателя и директором равно  $\lambda/4$ . Формула для расчета вектора напряженности электрического поля в дальней зоне:

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_0 \cdot \frac{e^{-ik_0 r}}{(k_0 r)(k_0 a)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot e^{i\frac{\pi}{2}n} \langle [\cos \varphi \cdot \tau_n(\theta) \cdot \vec{a}_\theta - \sin \varphi \cdot \pi_n(\theta) \cdot \vec{a}_\varphi] \cdot [M'_n + iM''_n] - [\cos \varphi \cdot \pi_n(\theta) \cdot \vec{a}_\theta - \sin \varphi \cdot \tau_n(\theta) \cdot \vec{a}_\varphi] \cdot [N'_n + iN''_n] \rangle. \quad (7)$$

Приведены диаграммы направленности в главных плоскостях для равношаговой модели линзы диаметром  $2a = 2\lambda_0$ ,  $2a = 4\lambda_0$ ,  $2a = 8\lambda_0$  и  $2a = 12\lambda_0$ . В качестве примера на рисунках 9 и 10 представлены диаграммы направленности в главных плоскостях для линзы диаметром  $2a = 4\lambda_0$  и двух типов облучателей.

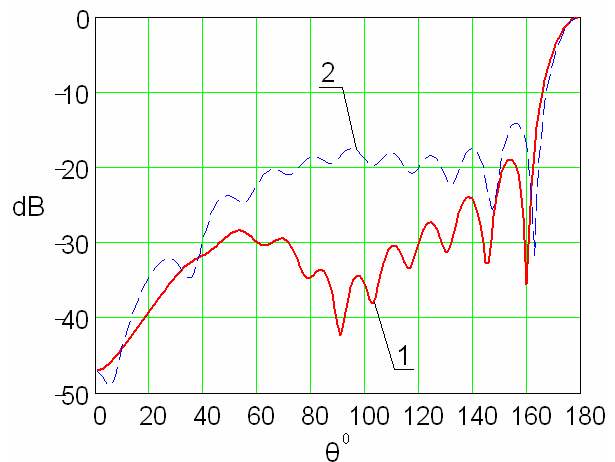
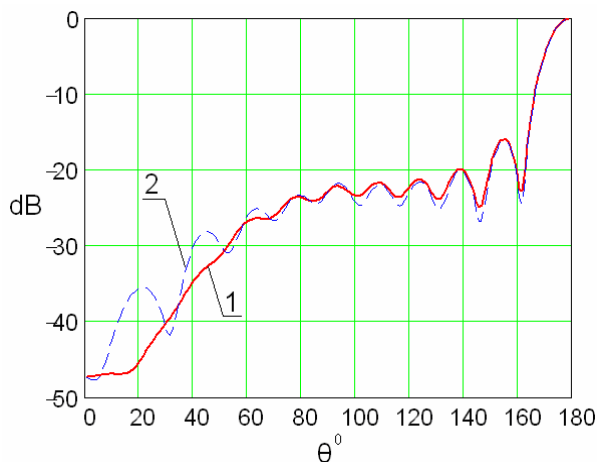


Рисунок 9 – Диаграмма направленности: 1 –  $F(\theta, 0)$ , 2 –  $F(\theta, \pi/2)$ ;  $2a = 4\lambda_0$ ; облучатель – элемент Гюйгенса

Рисунок 10 – Диаграмма направленности: 1 –  $F(\theta, 0)$ , 2 –  $F(\theta, \pi/2)$ ;  $2a = 4\lambda_0$ ; облучатель – вибратор с рефлектором

Показано, что основные характеристики линзы (ширина диаграммы направленности, коэффициент направленного действия) для облучателя в виде элемента Гюйгенса и вибратора с рефлектором приблизительно одинаковые. Различия наблюдаются в области бокового и заднего излучения и обусловлены

различным видом диаграмм направленности вибратора с рефлектором в плоскостях  $E$  и  $H$ .

Отмечено, что затраты машинного времени растут с увеличением диаметра линзы и составляют около 30 минут для компьютера AMD Phenom 9550 Quad-Core Processor, 2.20 ГГц для линзы размером  $2a = 12\lambda_0$ .

Исследовано влияние смещения облучателя от поверхности линзы на антенные характеристики путем изменения величины виртуального воздушного слоя, что соответствует смещению источника от поверхности ЛЛ.

Рассмотрена равношаговая модель аппроксимации ЛЛ с диаметром  $2a = 2\lambda_0$  и  $2a = 8\lambda_0$ . На рисунках 11 и 12 представлены диаграммы направленности в главных плоскостях для равношаговой модели линзы диаметром  $2a = 2\lambda_0$  при различных положениях источника.



Рисунок 11 – Диаграмма направленности: 1 –  $F(\theta, 0)$ , 2 –  $F(\theta, \pi/2)$ ;  
 $2a = 2\lambda_0$ ;  $r/a = 1,1$

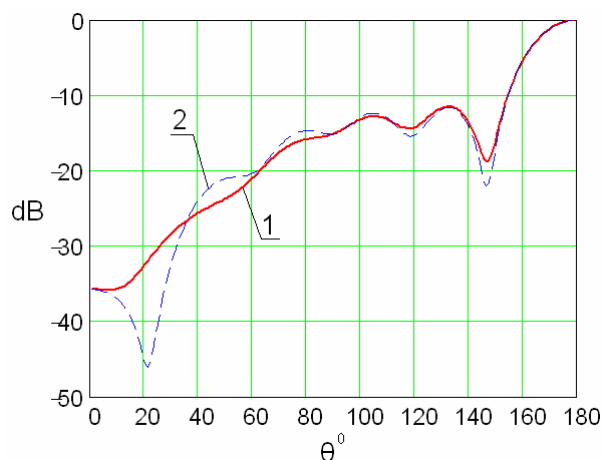


Рисунок 12 – Диаграмма направленности: 1 –  $F(\theta, 0)$ , 2 –  $F(\theta, \pi/2)$ ;  
 $2a = 2\lambda_0$ ;  $r/a = 1,3$

Показано, что заметное смещение облучателя приводит к искажению формы главного лепестка диаграммы направленности и структуры бокового излучения. Кроме того, значительное смещение облучателя приводит к уменьшению коэффициента эффективности облучателя, что в свою очередь ведет к общему снижению коэффициента усиления.

Исследованы поляризационные характеристики линзы. Основными причинами появления кроссполяризационных составляющих являются кривизна слоев линзы и многослойность диэлектрической структуры. Компоненты электрического поля основной и кроссполяризации приведены для равношаговой модели линзы диаметром  $2a = 2\lambda_0$ ,  $2a = 4\lambda_0$ ,  $2a = 8\lambda_0$  и  $2a = 12\lambda_0$ . Анализ полученных результатов показывает, что разница в поле  $on$  и  $kp$  наблюдается для области бокового заднего излучения. При этом ширина главного лепестка диаграммы направленности сохраняется такой же, как для главных плоскостей.

Рассмотрено амплитудно-фазовое распределение по эквивалентной апертуре на теневой стороне линзы. Приведены распределения амплитуды и фазы по апертуре для четырех размеров ЛЛ. На рисунках 13 и 14 в качестве примера приведены распределения амплитуды и фазы по апертуре для линзы размером  $2a = 2\lambda_0$  и  $2a = 8\lambda_0$ .



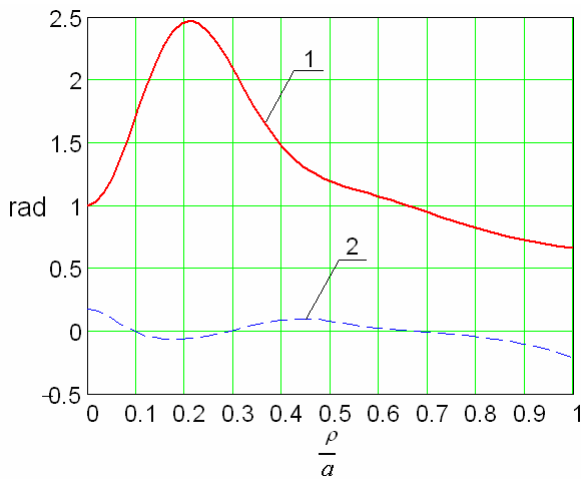


Рисунок 13 – Распределение амплитуды – 1 и фазы – 2;  $2a = 2\lambda_0$

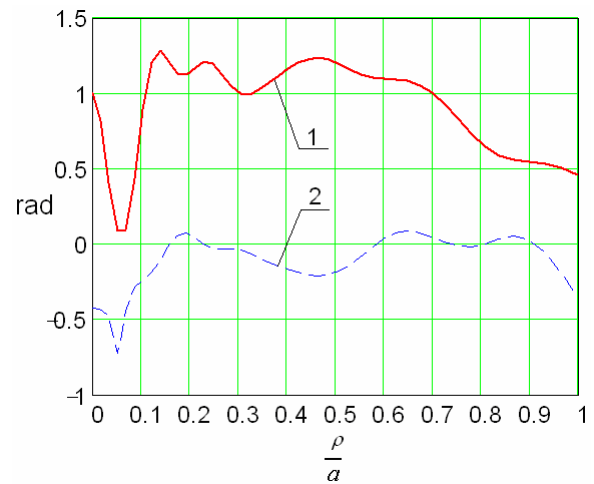


Рисунок 14 – Распределение амплитуды – 1 и фазы – 2;  $2a = 8\lambda_0$

Сравнительно равномерное амплитудное и квази-синфазное распределение поля на эквивалентной апертуре оправдывает достаточно высокий КНД линзы в направлении  $\theta = \pi$ ,  $\varphi = 0$ . Рассмотрено влияние положения первичного источника на амплитудно-фазовое распределение.

Полученные распределения поля в эквивалентных апертурах могут быть использованы для расчета диаграмм направленности апертурным методом.

Рассчитан коэффициент направленного действия и коэффициент усиления антенны. Коэффициент направленного действия определяется:

$$D(\pi) = \frac{\left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot e^{i\frac{\pi}{2}n} \cdot (-1)^n \cdot \langle M'_n + iM''_n + N'_n + iN''_n \rangle \right|^2}{2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left( |M'_n + iM''_n|^2 + |N'_n + iN''_n|^2 \right)} \quad (8)$$

На рисунках 15 и 16 приведены графики коэффициента направленного действия ЛЛ, облучателем которой является элемент Гюйгенса вибратор с рефлектором при шестислойной равношаговой аппроксимации тела линзы.

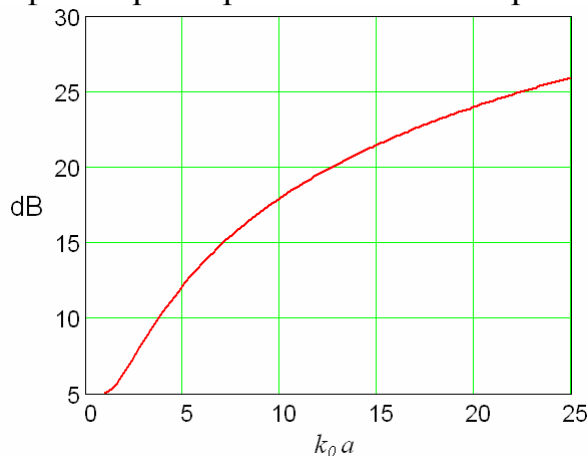


Рисунок 15 – Коэффициент направленного действия  $D(\pi)$ ; облучатель – элемент Гюйгенса

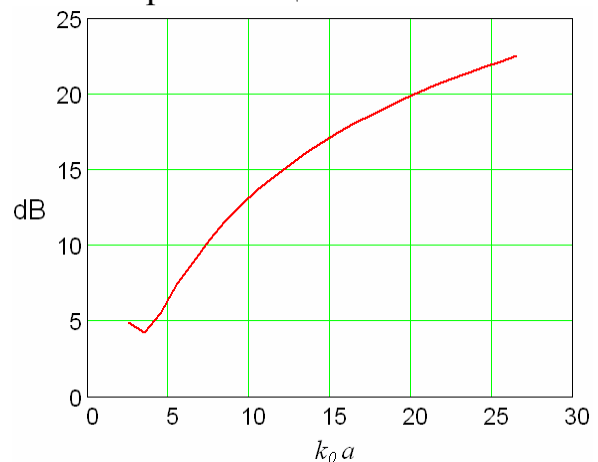


Рисунок 16 – Коэффициент направленного действия  $D(\pi)$ ; облучатель – вибратор с рефлектором



При определении коэффициента усиления учтены следующие явления: эффективность использования диаграммы направленности облучателя с учетом кривизны фокусирующей линзы; омические потери в материале линзы, состоящей из ряда диэлектрических слоев; снижение эффективности облучателя из-за попадания части мощности первичной антенны в линию питания за счет отражения от поверхности линзы.

Коэффициент усиления:

$$G = D \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3, \quad (9)$$

Приведены результаты численных расчетов для трех размеров линзы и двух значений угла потерь в материале слоев линзы (таблица 2).

Таблица 2

<i>Облучатель – элемент Гюйгенса</i>						
Коэф.	$2a = 2\lambda_0$		$2a = 4\lambda_0$		$2a = 8\lambda_0$	
	$\text{Im}\varepsilon' = 0$	$\text{Im}\varepsilon' = 0,01$	$\text{Im}\varepsilon' = 0$	$\text{Im}\varepsilon' = 0,01$	$\text{Im}\varepsilon' = 0$	$\text{Im}\varepsilon' = 0,01$
D, dB	13,971	13,889	19,918	19,712	25,951	25,494
$\eta_1$	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875	0,875
$\eta_2$	1	0,932	1	0,872	1	0,776
$\eta_3$	0,941	0,953	0,896	0,93	0,723	0,853
G, dB	11,503	10,794	15,616	13,987	16,417	14,766
<i>Облучатель – вибратор с рефлектором</i>						
Коэф.	$2a = 2\lambda_0$		$2a = 4\lambda_0$		$2a = 8\lambda_0$	
	$\text{Im}\varepsilon' = 0$	$\text{Im}\varepsilon' = 0,01$	$\text{Im}\varepsilon' = 0$	$\text{Im}\varepsilon' = 0,01$	$\text{Im}\varepsilon' = 0$	$\text{Im}\varepsilon' = 0,01$
D, dB	10,723	10,627	16,518	16,281	22,534	22,021
$\eta_1$	0,849	0,849	0,849	0,849	0,849	0,849
$\eta_2$	1	0,932	1	0,872	1	0,776
$\eta_3$	0,998	0,999	0,997	0,998	0,999	0,999
G, dB	9,086	8,400	13,982	12,029	19,112	14,493

Рассмотрено влияние смещения облучателя на коэффициент усиления антенны для двух типов первичных источников. Таким образом, проведенные исследования учли все основные факторы, связанные как с внутренней структурой линзы, так и с компоновкой и типом облучателя антенной системы (линза и первичный источник).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОодЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Приведена историческая справка по публикациям связанным с линзой Люнеберга – сферически симметричной линзой с изменяющимся по радиусу коэффициентом преломления. Геометро-оптический подход к определению профиля линзы показывает, что если функция изменения коэффициента преломления  $n(r)$  правильно выбрана, все лучи покидающие точку на поверхности линзы могут быть сфокусированы на ее противоположной стороне.

2. Поскольку выполнить ЛЛ из неоднородного материала с плотностью непрерывно изменяющейся от поверхности к центру достаточно трудно, на

практике используется многослойная реализация. В этом случае линза состоит из нескольких слоев диэлектрика, причем диэлектрическая проницаемость в пределах каждого слоя постоянна и наблюдается ее скачкообразное изменение между слоями. Приведены примеры конструктивной реализации многослойной линзы Люнеберга.

3. Указаны возможные режимы работы ЛЛ и их применение в различных системах радиолокации, радионавигации, радиоастрономии, наземной и космической связи, а также радиопротиводействия. Приведены примеры практической реализации и применение линзы Люнеберга в современной технике.

4. На основании решения задачи электромагнитного возбуждения многослойных сферических структур получены скалярные компоненты тензорных функций Грина, которые используются для решения антенных и дифракционных задач. Получена единая универсальная запись компонентов электромагнитного поля в ближней и дальних зонах. Для минимизации расходов машинного времени использована перенормировка сферических функций Бесселя и введены комбинации функций Бесселя-Неймана, отличающиеся хорошей сходимостью, как по номерам функций, так и по значениям аргументов.

5. При удалении источника облучения от поверхности, линза Люнеберга способна формировать довольно узкую диаграмму рассеяния с теневой стороны линзы. Исходя из этого определены дифракционные характеристики линзы Люнеберга, такие как диаграмма рассеяния по основной и кроссполяризационной составляющим поля, коэффициенты рассеяния, включающие в себя полный коэффициент рассеяния, коэффициент поглощения, радиолокационный и попутный коэффициенты рассеяния.

6. Получены расчетные значения для равношаговой и оптимизированной аппроксимации профиля линзы, радиусы слоев при этом определены в соответствии с законом распределения. Исследована зависимость численных результатов от количества слоев и диаметра линзы.

7. Приведены характеристики трех типов облучателей, допускающие строгое электродинамическое решение задачи возбуждения линзы. Одиночный вибратор имеет малую эффективность, так как более половины мощности не участвует в фокусировке с помощью линзы. Элемент Гюйгенса и вибратор с рефлектором или их аналоги более предпочтительны для использования в качестве облучателей линзы Люнеберга.

8. Определены антенные характеристики линзы Люнеберга, такие как диаграмма направленности по основной и кроссполяризационной составляющим поля, амплитудно-фазовое распределение поля на теневой стороне линзы, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления.

9. При определении коэффициента усиления учтены следующие явления: различия диаграммы направленности облучателя и амплитудного распределения на теневой стороне ЛЛ; затухание волн, связанное с омическими потерями в материале линзы; снижение эффективности облучателя из-за попадания части мощности первичной антенны в линию питания за счет отражения от поверхности линзы. Рассмотрено влияние смещения облучателя на коэффициент усиления антенны.

Совокупность основных научных положений и результатов работы можно квалифицировать как решение задачи разработки нового метода расчета электромагнитных полей в ближней и дальней зонах линзы Люнеберга, определения её антенных и дифракционных характеристик, которые имеют существенное значение для теории и практики линзовых антенн.

### **ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:**

- 1\*. Панченко Б.А., Гизатуллин М.Г., Лебедева Е.В. Рассеяние электромагнитных волн многослойной линзой Люнеберга // Антенны, № 11, 2009
2. Панченко Б.А., Гизатуллин М.Г., Лебедева Е.В. О новых возможностях создания неотражающих покрытий // Международная научно-практическая конференция «СВЯЗЬ-ПРОМ 2010», проводимая в рамках VII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2010», Екатеринбург, 2010
3. Панченко Б.А., Лебедева Е.В., Екимовских Е.А. Расчет антенных характеристик линзы Люнеберга // Международная научно-практическая конференция «СВЯЗЬ-ПРОМ 2010», проводимая в рамках VII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2010», Екатеринбург, 2010
- 4\*. Панченко Б.А., Лебедева Е.В. Антенные характеристики линзы Люнеберга // Антенны. 2010. № 12. С. 5–9.
5. Панченко Б.А., Лебедева Е.В., Екимовских Е.А. Дифракция электромагнитных волн на неоднородных сферических телах // Международная научно-практическая конференция «СВЯЗЬ-ПРОМ 2011», проводимая в рамках VIII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011», Екатеринбург, 2011
- 6\*. Панченко Б.А., Лебедева Е.В., Екимовских Е.А. Коэффициент направленного действия и усиления линзы Люнеберга // Антенны. 2011. № 6. С. 67–69.
7. Панченко Б.А., Лебедева Е.В., Екимовских Е.А. Дифракционные характеристики многослойных сферических линз // Международная научная конференция «Динамика современной науки», Болгария, 2011
8. Комарова Е.В., Панченко Б.А. Антенные характеристики многослойной диэлектрической линзы // Шестая всероссийская научно-техническая Интернет-конференция «Информационные технологии и электроника», Екатеринбург, 2012

Номера публикаций помеченные «\*» включены в перечень ВАК российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Сканирующие антенные системы СВЧ, т. I, Р.С. Хансен, перевод с английского, под редакцией Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. М., Изд-во «Советское радио», 1966 – 536 с.
2. Фрадин А.З. Антенны сверхвысоких частот. – М.: «Советское радио», 1957. – 652 с.

3. Останков А.В. Электродинамические модели резонансных гребенчатых структур для анализа и синтеза высокоэффективных дифракционных антенн. Диссертация на соиск. уч. ст. доктора техн. наук. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. – 415 с.
4. R.K. Luneburg. The mathematical theory of optics. Providence, RI: Brown Univ. Press, 1944.
5. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1973.
6. Р. Кюн. Микроволновые антенны. «Судостроение», М., 1967. – 518 с.
7. Кузьмин С.В. Математическая модель многослойной линзы Лüneберга. Диссертация на соиск. уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. – Санкт-Петербург: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 2004. – 114 с.
8. B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, S. Rondineau. Design optimization of multishell Luneburg Lenses // IEEE Trans. AP, vol. 55, no. 2, pp. 283-289, 2007.
9. G. Zouganelis, D. Budimir. Effective dielectric constant and design of sliced Luneberg lens // Microwave and Optical Technology Letters, vol. 49, no. 10, pp. 2332-2337, 2007.
10. G. C. Kokkorakis, J. G. Fikioris. EM field induced in inhomogeneous dielectric spheres by external sources // IEEE Trans. AP, vol. 55, no. 11, pp. 3178-3190, 2007.
11. B. Fuchs, S. Palud, L. Le Coq, O. Lafond, M. Himdi, S. Rondineau. Scattering of spherically and hemispherically stratified lenses fed by any real source // IEEE Trans. AP, vol. 56, no. 2, pp. 450-460, 2008.
12. R.S. Elliott. Antenna theory and design // IEEE Press, Wiley interscience, p. 594, 2003.
13. S. Baev, B. Hadjistamov, P. Dankov. Lüneburg Lenses as Communication Antennas // Annuaire de l'Universite de Sofia «St. Kliment Ohridski», Faculte de Physique, 102, 2009, pp. 67-84.
14. <http://www.eccosorb.com>.
15. Б.А. Панченко, М.Г. Гизатуллин. Дифракция электромагнитных волн на металлических и диэлектрических сферах – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2007. – 88 с.
16. В.П. Нарбут, В.Ф. Хмель. Поляризация излучения зеркальных антенн. «Высшая школа», Киев, 1978.
17. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. «Наука», М., 1973.

---

Подписано в печать 04.04.2012

Плоская печать

Формат 60x84/16

Заказ

Бумага писчая

Тираж 120

---