



Денисов Дмитрий Вадимович

**Методы анализа, оптимизации и реализации
многослойных сферических линзовых
структур**

Специальность 2.2.14 —
«Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ.

Научный консультант:	д.т.н., доцент Носков Владислав Яковлевич профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (УрФУ), г. Екатеринбург
Официальные оппоненты:	Пастернак Юрий Геннадьевич , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), г. Воронеж Табаков Дмитрий Петрович , доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ПГУТИ), г. Самара Шипилов Сергей Эдуардович , доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиофизики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (ТГУ), г. Томск
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), г. Новосибирск

Защита состоится 24 декабря 2026 г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, проспект Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/v4puggx9>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.415.01,
д.т.н., доцент



Суровцев Роман Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования определяется сочетанием двух независимых тенденций в развитии радиотехники, совпавших во времени и взаимно усиливающих друг друга.

С одной стороны, переход систем подвижной и спутниковой связи, радиолокации и беспилотного транспорта в миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны требует широкополосных, компактных и высоконаправленных антенн, способных формировать несколько лучей одновременно без электромеханических поворотных устройств. Фазированные решётки при числе элементов от 64 становятся чрезмерно энергоёмкими и дорогими, а зеркальные антенны не обеспечивают нужной скорости переключения лучей и ограничены фиксированной геометрией раскрыва. Сферически-симметричные градиентные линзы — в первую очередь линза Люнеберга¹ — здесь выступают естественным пассивным формирователем многолучевой диаграммы: смещение облучателя по фокальной поверхности даёт полный обзор 4π стерадиан независимо от электрического размера апертуры.

С другой стороны, развитие аддитивных технологий — 3D-печати полимера с управляемой пористостью, появление композитных и метаматериальных сред с расширенным диапазоном реализуемых значений диэлектрической проницаемости² — устранило ключевое историческое препятствие: трудность получения материала с непрерывно изменяющимся показателем преломления. Переход от непрерывного профиля к многослойной аппроксимации сделал линзу Люнеберга технологически реализуемой конструкцией и перевёл задачу её синтеза из теоретической плоскости в инженерную.

Однако имеющийся инструментарий электродинамического анализа к этим задачам ещё не адаптирован. Универсальные полноволновые решатели — FEM (Ansys HFSS), FDTD (CST Microwave Studio), MoM — точны при однократном расчёте, но для параметрической оптимизации и тем более для генерации обучающих выборок неприемлемы по затратам: полный прогон по геометрическим параметрам занимает десятки и сотни часов. Лучевые методы (SBR³) при многократных переотражениях в линзе дают накопительную ошибку, а аналитические приближения теории Ми применимы лишь к однородным сферам. Устранить это противоречие способен полуаналитический аппарат тензорных функций Грина (ТФГ), развитый Б. А. Панченко⁴ и адаптированный

¹Фамилию Р. К. Люнеберга (R. K. Luneburg) в русскоязычной литературе передают двояко — *Люнеберг* и *Люнебург* (в англоязычной — *Luneburg* и *Luneberg*); оба написания корректны и встречаются примерно поровну. В работе написание не унифицируется: при ссылке на конкретный источник сохраняется вариант его авторов, при нейтральном упоминании принят вариант «Люнеберг».

²Денисов, Д. В. Способы реализации и применение современных линзовых антенных систем [Текст] / Д. В. Денисов, А. А. Тангамян // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы XVI международной научно-технической конференции. Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2020. С. 85—86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44620055>.

³SBR — shooting and bouncing rays, метод трассировки и отражения лучей.

⁴Панченко, Б. Тензорные функции Грина уравнений Максвелла для областей, частично заполненных диэлектриком. Часть 1 [Текст] / Б. Панченко. Свердловск : Изд-во УПИ, 1979.

С. Н. Шабунин к многослойным цилиндрическим структурам⁵: он сводит задачу к рекуррентному пересчёту направленных импедансов и адмитансов по слоям и даёт ускорение на несколько порядков при сопоставимой точности, но до сих пор не доведён до универсального инструмента инженерного проектирования линзовых антенн.

Актуальным поэтому является развитие аппарата ТФГ применительно к многослойным сферическим и тороидным линзам Лüneберга в сочетании с аддитивными технологиями и методами оптимизации, а также создание открытого программного инструмента, замыкающего цепочку «теория — синтез — изготовление — верификация». Интерес к направлению подтверждается ростом публикаций и патентов (IEEE Xplore, Google Patents, Scopus) и работами по применению линз Лüneберга в сетях 5G/6G, радиолокации беспилотного транспорта и управлении радиозаметностью.

Степень разработанности темы. Бэкграунд работы образуют четыре линии исследований. *Геометрооптический синтез* градиентных линз с центральной симметрией развит от частного решения Р. К. Лüneберга и общего решения С. Моргана до обобщения задачи на анизотропные среды и общего решения задачи синтеза, полученных школой ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (В. А. Калошин, А. С. Венецкий с соавторами, 1973–2024 гг.). *Строгий полноволновой анализ* сферически-слоистых сред опирается на аппарат сферических волновых функций, диадных функций Грина (Ч. Тай, В. Чью, L.-W. Li с соавторами) и рекуррентные схемы многослойной теории Ми; известен также одномерный алгоритм расчёта функций Грина плоской, цилиндрической и сферической геометрий (Ž. Šipuš, P.-S. Kildal). *Аппарат тензорных функций Грина* слоистых сред систематически развит школой Б. А. Панченко — С. Н. Шабунина для плоских и цилиндрических структур. *Технологии многослойной реализации* градиентных профилей исследованы в работах В. Fuchs, J. Thornton и других. Эти линии не сведены в единый инструмент: геометрооптический синтез не даёт полноволнового контроля при конечных электрических размерах, строгие решения не доведены до открытого средства проектирования, а сферическая геометрия не охвачена рекуррентным импедансным аппаратом ТФГ. Работа продолжает их в полноволновой слоисто-дискретной постановке и замыкает в единый расчётно-технологический цикл.

Крупная научная проблема и квалификация работы. Выявленные проблемы объединяются в крупную научную проблему: *разработка универсального полуаналитического метода электродинамического анализа многослойных радиально-неоднородных сферических диэлектрических структур, обеспечивающего расчёт практически произвольного числа слоёв без потери точности и с радикальным сокращением вычислительных затрат по сравнению с существующими полноволновыми численными методами, и применение этого метода к синтезу нового класса линзовых антенн и пассивных рассеивателей миллиметрового и сантиметрового диапазонов для перспективных систем радиосвязи, радиолокации и управления радиозаметностью.* По пункту 9 Положения о присуждении учёных степеней (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842) работа предьявляется как *решение крупной научной*

⁵Шабунин, С. Н. Электродинамика плоских и цилиндрических магнитодиэлектрических слоистых структур [Текст] : Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Шабунин Сергей Николаевич. Екатеринбург : Уральский государственный технический университет — УПИ, 2006. 300 с. URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/26187> ; Специальность 05.12.07 — Антенны, СВЧ-устройства и их технологии. Научный консультант: д.т.н., проф. Б. А. Панченко.

проблемы развития теории и техники антенн в части электродинамики и проектирования сферических градиентных линзовых структур, имеющей важное хозяйственное значение для отечественных систем радиосвязи, радиолокации и управления радиозаметностью. Тема и результаты соответствуют пунктам 1, 2, 3, 6, 8 и 9 паспорта специальности 2.2.14 (соответствие каждого положения конкретному пункту указано в его формулировке).

Объект исследования. класс пассивных сферически-симметричных радиально-неоднородных диэлектрических структур: классическая линза Люнеберга с профилем $\varepsilon(r) = 2 - (r/a)^2$, её модификации (полусферическая на проводящем экране, тороидная для панорамного азимутального обзора, с центральным металлическим ядром, обобщённый класс линз-дефлекторов с углом отклонения $\alpha \in (0; \pi)$, включая линзу Итона при $\alpha \rightarrow \pi$), а также построенные на них многолучевые антенные системы и пассивные рассеиватели для управления радиозаметностью в диапазоне от 1 до 80 ГГц.

Цель работы состоит в развитии методов электродинамического анализа, синтеза и реализации линзовых антенн Люнеберга на основе аппарата тензорных функций Грина и численного моделирования, а также в расширении областей их применения в современных радиотехнических системах, в том числе с учётом возможностей изготовления при помощи аддитивных технологий 3D-печати.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Систематизировать состояние теории и практики применения сферических градиентных линз (Люнеберга, Максвелла, Итона и модификаций) в антенных, радиолокационных и беспилотных системах, обосновать многослойную аппроксимацию с управляемой пористостью как основную конструктивную модель и выявить методические, технологические и прикладные пробелы существующего инструментария.
2. Развить аппарат тензорных функций Грина в сферических координатах для радиально-неоднородных и радиально-анизотропных слоистых структур; построить рекуррентную схему пересчёта направленных импедансов и адмитансов по слоям, единообразную при произвольном числе слоёв, профилях проницаемости и типах возбуждения.
3. Исследовать дифракционные характеристики (диаграммы рассеяния, бистатическую ЭПР⁶, коэффициенты основной и кросс-поляризации) многослойной ЛЛ при линейной и круговой поляризации и установить связь между числом слоёв, электрическим размером и рассеивающими свойствами.
4. Разработать методику оптимизированной многослойной аппроксимации непрерывного профиля диэлектрической проницаемости $\varepsilon(r) = 2 - (r/a)^2$, согласованную с технологическими ограничениями FDM⁷-3D-печати по диапазону реализуемых проницаемостей и степеней заполнения.
5. Синтезировать класс сферических градиентных структур с наперёд заданным постоянным углом отклонения луча: свести обратную задачу к интегральному уравнению Абеля, получить замкнутое соотношение для профиля показателя преломления и верифицировать синтезированные профили полноволновым электродинамическим расчётом.

⁶ЭПР — эффективная площадь рассеяния.

⁷FDM — fused deposition modeling, моделирование методом наплавления (3D-печать).

6. Получить замкнутые расчётные соотношения для антенных характеристик линз Лüneберга — коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента усиления, диаграмм направленности по основной и кросс-поляризационной составляющим, коэффициента поляризационных потерь — с использованием развитого аппарата тензорных функций Грина.
7. Исследовать характеристики линейных и моноимпульсных антенных решёток, построенных на основе многослойных линз Лüneберга, и установить ограничения по периодам и фазовому распределению, при которых обеспечивается заданная развязка каналов и подавление дифракционных максимумов.
8. Получить расчётные характеристики нестандартных конфигураций линз Лüneберга — полусферической линзы на проводящем экране, тороидной линзы для панорамного азимутального обзора, сферической линзы с центральным металлическим ядром — и обосновать их применимость для формирования диаграмм направленности специального вида (косекансных, многолучевых, с управляемой обратной составляющей).
9. Разработать технологию изготовления многослойных линз Лüneберга методом FDM-3D-печати с управляемой пористостью полимерных материалов (HIPS, PLA, PETG⁸, пенопласт), включая методику расчёта пустот по логарифмической модели Лихтенекера и контроля диэлектрической проницаемости методом NRW⁹ в волноводном тракте; верифицировать предложенную технологию на серии макетов диаметром 50, 73 и 130 мм.
10. Разработать метод декомпозиции произвольной кусочно-координатной электродинамической структуры на плоско-, цилиндрические и сферически-слоистые подобласти: получить ядра преобразования модальных базисов на интерфейсах разной координатной симметрии, привести все типы сшивания к единой алгебраической форме и реализовать метод программно.
11. Создать открытую программную библиотеку *GreenTensor*, реализующую разработанный аппарат тензорных функций Грина в виде классового API и интегрированную со средой Ansys Electronics Desktop через IronPython-скрипты автоматического синтеза HFSS-моделей; верифицировать библиотеку на канонических задачах (металлические сферы, многослойные линзы Лüneберга) и обосновать возможность её применения для генерации обучающих выборок при построении нейросетевых суррогатных моделей.

Методология и методы исследования. сочетание аналитических и численных методов расчёта электромагнитных полей в многослойных структурах с акцентом на моделирование и оптимизацию линзовых антенн на базе аппарата тензорных функций Грина и численного моделирования в Ansys HFSS.

В работе использованы следующие методы исследования:

- аналитические методы разложения по тензорным функциям Грина для строгого описания рассеяния и распространения волн в сферических неоднородных средах;

⁸HIPS — high impact polystyrene, ударопрочный полистирол; PLA — polylactic acid, полилактид; PETG — polyethylene terephthalate glycol, гликоль-модифицированный полиэтилентерефталат.

⁹NRW — Nicolson–Ross–Weir, метод восстановления комплексных ϵ и μ материала по измеренным S -параметрам.

- методы решения прямых и обратных задач геометрической оптики для радиально-неоднородных сред (инвариант Бугера, преобразования Абеля-типа);
- численное моделирование в Ansys HFSS, CST Microwave Studio и FEKO — для верификации аналитических моделей, оптимизации геометрии антенн и анализа их характеристик;
- разработка и тестирование программных инструментов, в частности библиотеки GreenTensor, для расчёта электромагнитных характеристик многослойных сред;
- сравнительный анализ с данными других авторов и экспериментальными измерениями для обеспечения достоверности моделей.

Комплексный подход — аналитические, вычислительные и экспериментальные методы — обеспечил анализ поведения электромагнитного поля в исследуемых структурах и практические рекомендации по их применению в радиотехнических системах.

Предмет исследования. Предметом исследования являются электродинамические характеристики указанных в объекте структур (диаграммы направленности по основной и кросс-поляризационной составляющим, диаграммы рассеяния, бистатистическая и моностатическая эффективная площадь рассеяния, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, коэффициент поляризационных потерь α и сопряжённая с ним поляризационная эффективность $\mu = 1 - \alpha$), рассчитываемые методом тензорных функций Грина в сферической системе координат, а также методики синтеза радиально-неоднородного профиля показателя преломления $n(r)$ и многослойной аппроксимации профиля $\varepsilon(r)$, согласованной с технологическими ограничениями FDM-3D-печати по диапазону реализуемых проницаемостей и степеней заполнения полимерных материалов (HIPS, PLA, PETG, пенопласт). Поскольку именно методология (метод ТФГ + многокритериальная оптимизация + FDM-стратификация) формирует расчётную модель объекта, изменение методологии — например, переход к полностью численному FEM-анализу или к лучевому приближению — порождает иной предмет исследования, что отражает классический принцип Аникина–Пойзнера–Усанова «один объект порождает множество предметов».

Положения, выносимые на защиту:

1. Электродинамический аппарат анализа кусочно-координатной структуры, декомпозируемой на плоско-, цилиндрические и сферически-слоистые подобласти, сводящийся к системе линейных уравнений с блочной матрицей, диагональные блоки которой — импедансные матрицы локальных ТФГ, а недиагональные — матрицы перекрытия модальных базисов. Для радиально-стратифицированных структур аппарат позволяет получать диаграммы рассеяния и направленности с расхождением с МКЭ¹⁰ не более 0,6° по ширине главного лепестка и 1 дБ по ПБЛ¹¹. *Соответствует п. 1 паспорта научной специальности 2.2.14; публикации: 11, 12, 15, 24, 32.*
2. Программная реализация аппарата в виде открытой Python-библиотеки GreenTensor, объединяющей в едином интерфейсе одночастотный расчёт диаграмм рассеяния и параметрический свип по электрическому размеру. Библиотека обеспечивает расчёт бистатистического и моностатического сечений рассеяния $\sigma_s(k_0 a)$, $\sigma_r(k_0 a)$ за время на 2–4 порядка меньшее, чем МКЭ.

¹⁰МКЭ — метод конечных элементов; эталонный полноволновой расчёт выполнен в Ansys HFSS.

¹¹ПБЛ — первый боковой лепесток диаграммы направленности.

На выборке из тысяч конфигураций многослойной ЛЛ¹², сгенерированной этими средствами, построен нейросетевой суррогат характеристик рассеяния, воспроизводящий полное сечение с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,99$ на отложенной выборке. *Соответствует п. 9 паспорта научной специальности 2.2.14; публикации: 13, 19, 20, 26, 29, 33, 55–57.*

3. Класс линз-дефлекторов — сферических радиально-неоднородных структур радиуса a в свободном пространстве, отклоняющих все падающие параллельные лучи на заданный угол $\alpha \in (0; \pi)$ независимо от прицельного параметра, — задаётся замкнутым соотношением для показателя преломления $n^{1+\nu} + n^{1-\nu} = 2a/r$, $\nu = \pi/\alpha$, полученным обращением интегрального уравнения Абея. Класс построен на том же аппарате, что и классические решения Люнеберга и Итона (различие — только в виде угловой функции отклонения), и содержит линзу Итона $n = \sqrt{2a/r - 1}$ как предельный случай $\alpha \rightarrow \pi$; подтверждено электродинамическим расчётом: отклонение главного максимума от заданного направления не более $\pm 2^\circ$. *Соответствует п. 8 паспорта научной специальности 2.2.14; публикации: 11, 32.*
4. Модифицированные сферические конфигурации ЛЛ — полусферическая на проводящем экране, с центральным металлическим ядром, магнетодиэлектрическая и метаматериальная — обеспечивают управление переизлучённым полем: формирование косекансной диаграммы направленности с шириной косекансного сектора $76,1^\circ$ и ПБЛ не выше $-25,4$ дБ при $d = 8\lambda$, причём при $d \geq 8\lambda$ характеристики выходят на насыщение и дальнейшее увеличение экрана влияния не оказывает; управление уровнем обратного излучения металлическим ядром не менее чем в пределах ± 10 дБ; подавление обратного рассеяния до $\sigma_r \leq 10^{-25} \pi a^2$ импедансным согласованием слоёв магнетодиэлектрической конфигурации. *Соответствует п. 3 паспорта научной специальности 2.2.14; публикации: 1, 4, 6, 8, 9, 20, 23, 31.*
5. Совместный выбор параметров многослойного профиля ЛЛ по двум критериям — минимизации RMSE¹³ ступенчатой аппроксимации методом многокритериальной генетической оптимизации при технологических ограничениях FDM-печати и выбору числа слоёв L в спектральных «окнах» минимума коэффициента поляризационных потерь, осциллирующего по электрическому размеру, — обеспечивает изготавливаемый профиль с $\text{RMSE}(\epsilon) = 0,032$ при восьми слоях (на 13% ниже оптимизированной аппроксимации Фукса) и кросс-поляризацией на 5,65 дБ ниже, чем у однородной сферы того же электрического размера; подтверждено макетом $D = 73$ мм: отклонение реализованного профиля от расчётного не более 3%. *Соответствует пп. 2 и 6 паспорта научной специальности 2.2.14; публикации: 2, 3, 7, 13, 14, 16, 19, 22.*

Цвет номера публикации указывает её тип: ■ — статьи в журналах перечня БAK (№ 1–18); ■ — доклады на конференциях, индексируемых Scopus и Web of Science (№ 19–26); ■ — монография и публикации в других изданиях и материалах конференций (№ 27–52); ■ — патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№ 53–57). Номера соответствуют списку работ автора в конце автореферата.

¹²ЛЛ — линза Люнеберга.

¹³RMSE — root mean square error, среднеквадратичное отклонение.

1. *К положению 1.* Единый аппарат тензорных функций Грина впервые доведён от рекуррентной схемы пересчёта направленных импедансов и адмитансов, ранее построенной школой Б. А. Панченко для плоских и цилиндрических слоистых структур, до сферически-симметричного случая и далее до метода декомпозиции произвольной кусочно-координатной структуры на канонические подобласти трёх типов с замкнутым аппаратом сшивания модальных базисов на интерфейсах разной координатной симметрии. Триада «плоскость — цилиндр — сфера» замкнута в единой методологии: полуаналитический анализ структур со смешанной координатной симметрией ранее в литературе не описывался.
2. *К положению 2.* Аппарат впервые доведён до открытой программной реализации с единым интерфейсом, объединяющим одночастотный анализ и параметрический свип по электрическому размеру. В отличие от существующих узкоспециализированных скриптов это делает практически осуществимой массовую генерацию обучающих выборок и построение нейросетевых суррогатов характеристик рассеяния для инверсного дизайна, а открытость кода обеспечивает независимую проверку и развитие метода сторонними исследователями.
3. *К положению 3.* Обращением аппарата анализа радиально-неоднородных сферических структур на задачу синтеза получено замкнутое аналитическое решение для профиля показателя преломления, отклоняющего параллельный пучок на произвольный наперёд заданный угол. Класс линз-дефлекторов сформулирован как аналитическое обобщение, содержащее классическую линзу Итона и однородную среду предельными случаями; в замкнутой форме такое обобщение ранее не приводилось.
4. *К положению 4.* В рамках единого аналитического аппарата описано формирование диаграмм специального вида — косекансных $\csc^2(\theta)$, многолучевых, с управляемой обратной составляющей — модифицированными конфигурациями сферической линзы: полусферической на проводящем экране, с центральным металлическим ядром, магнетодиэлектрической и метаматериальной. Систематического описания этого класса конфигураций в рамках одного аппарата в опубликованных работах по линзовым антеннам не встречается.
5. *К положению 5.* Многослойная аппроксимация профиля линзы впервые поставлена как многокритериальная задача с явным учётом технологических ограничений FDM-3D-печати, что позволило превзойти классические схемы стратификации одновременно по точности профиля и по максимальному скачку проницаемости между слоями. Дополнительно введён и систематически исследован коэффициент поляризационных потерь при облучении волнами круговой поляризации: установлен его осциллирующий характер, образующий спектральные «окна» минимальных потерь и дающий ранее не предлагавшийся критерий совместного выбора числа слоёв и рабочей полосы.

Значимость работы раскрывается в теоретической и прикладной плоскостях и привязывается к каждому из пяти положений, выносимых на защиту.

Теоретическая значимость. Во-первых, аппарат тензорных функций Грина школы Б. А. Панченко обобщён на сферически-симметричный случай и объединён с плоским и цилиндрическим в единый декомпозиционный метод для кусочно-координатных структур, чем замкнута триада «плоскость — цилиндр — сфера», а область применимости ТФГ распространена на комбинированные структуры, ранее доступные только методам объёмной дискретизации (положение 1). Во-вторых, получено замкнутое решение обратной задачи абелевского типа для синтеза радиально-неоднородного профиля под наперёд заданный угол отклонения, расширяющее класс аналитически решаемых градиентных линз (положение 3). В-третьих, введён спектральный инвариант — коэффициент поляризационных потерь $\alpha(k_0 a)$, ранее для сферической градиентной линзы не вводившийся (положение 5). В-четвёртых, аппарат переведён в открытый инструмент GreenTensor (положение 2), что делает метод независимо проверяемым и создаёт основу для нейросетевых суррогатных моделей инверсного дизайна.

Практическая значимость. Положения 2 и 5 непосредственно применимы при проектировании линзовых антенн миллиметрового диапазона для сетей подвижной связи пятого поколения (5G/6G): сокращение машинного времени расчёта на 2...4 порядка по сравнению с конечно-элементным эталоном (Ansys HFSS) и количественная оценка ускорения параметрической оптимизации в $10^2 \dots 10^4$ раз переводят задачу синтеза многослойной линзы из категории трудоёмкой в инженерно-практическую. Библиотека GreenTensor работает на рабочей станции уровня Intel Core i7 без вычислительных кластеров: расчёт $\sigma_s(k_0 a)$, $\sigma_r(k_0 a)$ на сетке 100 узлов в диапазоне $k_0 a \in [\pi; 10\pi]$ занимает не более 5 секунд, а генерация обучающей выборки 10^4 конфигураций — часы. Положение 4 даёт методическую базу для антенн обзорной радиолокации с диаграммой $\text{csc}^2(\theta)$, панорамных систем без механического сканирования и пассивных ЭПР-маркеров; положение 3 — для управления радиозаметностью БПЛА и пассивных элементов многолучевой связи. Положение 5 обеспечивает воспроизводимое изготовление линз стандартными FDM-слайсерами без аппаратных модификаций, что критично для серийного производства.

Перспективы внедрения. Открытая архитектура библиотеки GreenTensor допускает её встраивание в отечественные и зарубежные САПР в качестве «плагиной» аналитической подсистемы. Исходный код размещён на GitHub¹⁴, документация — на Read the Docs¹⁵, официальный сайт проекта — greentensor.ru¹⁶.

Личный вклад. Все основные результаты получены лично соискателем: постановка задач, развитие аппарата ТФГ для сферически-симметричных многослойных структур и его реализация в виде открытой Python-библиотеки GreenTensor, метод декомпозиции кусочно-координатных структур с программной реализацией

¹⁴GreenTensor [Text] / D. V. Denisov [et al.] ; [Source Code] <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor>. 2024. URL: <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor> (visited on 09/22/2024) ; Accessed: Sept. 22, 2024.

¹⁵GreenTensor Documentation [Text] / D. V. Denisov [et al.] ; <https://greentensor.readthedocs.io/>. 2024. URL: <https://greentensor.readthedocs.io/> (visited on 02/13/2024) ; [Online]. Accessed: Feb. 13, 2024.

¹⁶Денисов, Д. В. GreenTensor — open-source библиотека электродинамического анализа многослойных сферических структур [Текст] / Д. В. Денисов ; <https://greentensor.ru>. 2025. URL: <https://greentensor.ru> (дата обр. 28.04.2025) ; Официальный сайт проекта.

(модуль *decomposition*), методика многокритериальной оптимизации многослойной аппроксимации и технология её реализации FDM-3D-печатью с управляемой пористостью. Выполнены численное моделирование в Ansys HFSS, сопоставление с результатами других авторов и экспериментальная верификация на серии 3D-печатных макетов. Прикладные радиолокационные решения защищены патентами [53, 54]. В совместных работах автору принадлежат постановка задачи, методика, программная реализация и интерпретация результатов. Параллельно в 2019–2026 гг. на портале «Клуб пользователей САЕ» опубликовано 48 обзорных материалов и видеокейсов по прикладной электродинамике.

Достоверность полученных результатов и положений, выносимых на защиту, обеспечивается тремя независимыми направлениями верификации, применёнными к каждому из пяти положений.

Первое направление — математическая строгость аппарата. Метод ТФГ для сферически-симметричных структур (положения 1, 2, 5) опирается на теоремы существования и единственности решения уравнений Максвелла в областях, частично заполненных диэлектриком, и наследует формализм школы Б. А. Панченко; обратная задача синтеза профиля (положение 3) сведена к уравнению абелевского типа с доказанными условиями разрешимости. Основанием декомпозиционной части (положение 1) служат теорема единственности в каждой канонической подобласти, принцип эквивалентности Шелкунова–Шуберта и условие излучения Зоммерфельда.

Второе направление — сопоставление с эталонным полноволновым решателем. Для всех численных результатов диссертации проведена систематическая верификация в Ansys Electronics Desktop (FEM с адаптивной тетраэдральной сеткой, абсорбирующее граничное условие Radiation, источник — плоская волна Incident Wave). На канонической серии задач (металлическая сфера 2 и 5 слоёв при $k_0 a = 4\pi$, четырёхслойная линза Лüneберга при $k_0 a = 6\pi$, металлическая сфера с диэлектрическим укрытием) достигнута точность, составляющая количественное содержание положения 1. HFSS-проект и экспортированные диаграммы хранятся в открытом репозитории GreenTensor (examples/Example 2) и доступны для независимой проверки.

Третье направление — независимая программная реализация и эксперимент. Python-реализация GreenTensor перекрёстно сопоставлена с независимым Matlab-скриптом: расхождение E_θ не превышает 10^{-4} (положение 2). Экспериментальная верификация положения 5 выполнена на серии 3D-печатных макетов диаметром 50, 73 и 130 мм (контроль методом NRW, глава 8). Осциллирующий характер $\alpha(k_0 a)$ (положение 5) воспроизведён двумя независимыми реализациями и подтверждён аналитически. Корректность декомпозиционного аппарата (положение 1) подтверждена тремя верификационными тестами: формулы Френеля одиночной границы — $3,9 \cdot 10^{-16}$; ряд Ми однородной сферы — $\sim 10^{-18}$; многослойная линза Лüneберга — $\sim 10^{-22}$.

Дополнительные опоры — анализ чувствительности к параметрам слоёв, показавший устойчивость методов к реализуемым вариациям входных данных, и соответствие результатов данным других авторов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научных конференциях:

- 25-я Международная конференция молодых специалистов по электронным приборам и материалам (IEEE EDM), Эрлагол, 2024 г. [20];
- IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT), Екатеринбург, 2024 г. [19], 2022 г. [21] и 2019 г. [25];

- 28-й Международный форум по телекоммуникациям (IEEE TELFOR), Белград, Сербия, 2020 г. [24];
- 12-я Европейская конференция по антеннам и распространению радиоволн (EuCAP), Лондон, Великобритания, 2018 г. [42];
- 12-я Европейская конференция по радиолокации (EuRAD) и 45-я Европейская конференция по микроволнам (EuMC), Париж, Франция, 2015 г. [26];
- Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АРЕПЕ), Новосибирск, 2021 г. [22, 23];
- Научно-техническая конференция ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, Ижевск, 2022 г. [36];
- 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации», Красноярск, 25–27 октября 2023 г. [29, 30];
- Семинары кафедры «Радиоэлектроники и телекоммуникаций» ИРИТ-РТФ УрФУ, Екатеринбург, 2018–2024 гг. Семинары кафедры «Мультимедиа и мобильных систем» УрТИСИ СибГУТИ, Екатеринбург, 2012–2020 гг.

Результаты работы прошли апробацию на научных семинарах кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций ИРИТ-РТФ Уральского федерального университета, проводимых заведующим кафедрой доктором технических наук, профессором С. Н. Шабуниним; основные положения и результаты исследования прорабатывались автором в ходе регулярных рабочих встреч и обсуждений с научным консультантом доктором технических наук, профессором В. Я. Носковым, а также с представителями научной школы прикладной электродинамики, основанной доктором технических наук, заслуженным деятелем науки Российской Федерации, почётным профессором УГТУ-УПИ Б. А. Панченко.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 52 печатных изданиях, 18 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 8 — в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, 26 — в монографии и других изданиях. Зарегистрированы 2 патента и 3 программы для ЭВМ.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения, списка сокращений, словаря терминов, списка литературы и приложений. Полный объём диссертации составляет **500** страниц, включая **130** рисунков и **93** таблицы. Список литературы содержит **231** наименование.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования и раскрыты положения, выносимые на защиту. Выделены три пробела существующего инструментария: *методический* — отсутствие универсального полупараметрического инструмента анализа многослойных сферических и тороидных структур для параметрической оптимизации и машинного обучения; *технологический* — отсутствие методики многослойной аппроксимации профиля $\varepsilon(r)$, согласованной с ограничениями FDM-3D-печати; *прикладной* — отсутствие единого подхода к проектированию модифицированных конфигураций линз Лüneберга (ЛЛ) для диаграмм направленности специального вида в сетях 5G/6G, радиолокации и системах управления радиозаметностью. На основе этих пробелов сформулирована *крупная научная проблема* развития теории и техники антенн (п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842).

Первая глава. «Линзы Люнеберга. Свойства и потенциал применения на радиочастотах»

Систематизированы теория, технологии изготовления и области применения градиентных сферических структур — от работы Р. Люнеберга (1944) до реализаций миллиметрового диапазона. Закон $\varepsilon(r) = 2 - (r/a)^2$ преобразует сферическую волну облучателя на поверхности линзы в плоскую на противоположной стороне (рисунок 1а). Сферическая симметрия профиля отличает ЛЛ от зеркал и плоских ФАР: сканирование до 4π стерадиан без механического поворота при широкополосности, ограниченной лишь дисперсией диэлектрика.

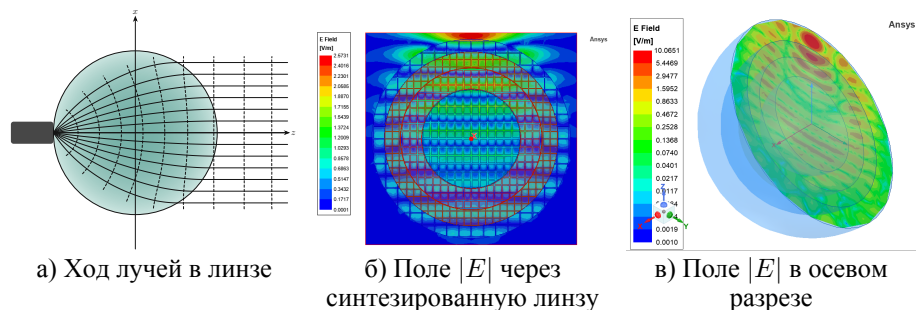


Рисунок 1 — Принцип действия линзы Люнеберга ($\varepsilon(r) = 2 - (r/a)^2$): (а) ход лучей в непрерывном градиентном профиле; (б) распределение поля $|E|$ при прохождении через синтезированную многослойную линзу; (в) поле $|E|$ в осевом разрезе линзы (расчёт Ansys HFSS)

Области применения ЛЛ — радиолокационные отражатели и маркеры ЭПР (включая малогабаритные БПЛА¹⁷), высоконаправленные антенны подвижной и спутниковой связи, многолучевые базовые станции 5G, системы роботизированного зрения, пассивные элементы радиопротиводействия.

Отдельно рассмотрен класс *воздушных мишеней*: ЛЛ здесь — пассивная нагрузка, поднимающая ЭПР изделия до уровня имитируемой цели без затрат бортовой энергии, что принципиально для одноразового малогабаритного изделия. Отечественные примеры — комплекс E95M (ЛЛ доводит ЭПР до $7 \dots 8 \text{ м}^2$) и создаваемая по ОКР «Соната» (ОАО «Лётные испытания и производство имени В. С. Гризодубовой», г. Жуковский) многоразовая ракета-мишень с турбореактивным двигателем для имитации дозвуковых целей; зарубежный — *Banshee*. Отражатель размещают в носовой радиопрозрачной части, свободной от силовых элементов, для максимального переизлучения навстречу радиолокатору.

Рост публикаций и патентов в 2015–2024 гг. (развёрнутый анализ — в приложении) подтверждает актуальность темы: на август 2026 г. суммарная патентная активность по двум вариантам написания в базе patents.google.com достигла $\Sigma 4455$ документов.

¹⁷БПЛА — беспилотный летательный аппарат.

Вторая глава. «Расчёт многослойных сфер методом тензорных функций Грина»

Развит и верифицирован центральный аппарат диссертации — метод тензорных функций Грина (ТФГ) для многослойных сферических и тороидных структур (рисунок 2а), дающий замкнутое представление характеристик в малом числе спектральных мод.

Получено замкнутое представление ТФГ многослойной сферы через решение обобщённых телеграфных уравнений для сферических областей. Ключевой элемент аппарата — рекуррентный пересчёт направленного импеданса от слоя к слою: для l -го слоя с внутренним и внешним радиусами r_{l-1} , r_l и локальным волновым числом $k_l = k_0 \sqrt{\varepsilon_l \mu_l}$

$$\overleftarrow{Z}_n(r_l) = j Z_l \frac{\overleftarrow{Z}_n(r_{l-1}) \hat{j}_n(k_l r_l) + j Z_l \hat{j}'_n(k_l r_l) \Gamma_l^E}{\overleftarrow{Z}_n(r_{l-1}) \hat{h}_n^{(2)}(k_l r_l) + j Z_l \hat{h}_n^{(2)'}(k_l r_l) \Gamma_l^E}, \quad (1)$$

где $Z_l = \sqrt{\mu_l / \varepsilon_l} Z_0$ — волновое сопротивление слоя, $\hat{j}_n$, $\hat{h}_n^{(2)}$ — функции Бесселя–Риккати первого и второго рода. Для направленного адмитанса $\overleftarrow{Y}_n(r_l)$, описывающего H -волны, пересчёт имеет двойственный вид. Последовательное применение (1) от центра к внешней границе (рисунок 2б) распространяет аппарат на произвольное число слоёв при любых профилях проницаемости и типах возбуждения.

Через полученные импедансы выражаются коэффициенты a_n , b_n , а через них — компоненты поля в дальней зоне:

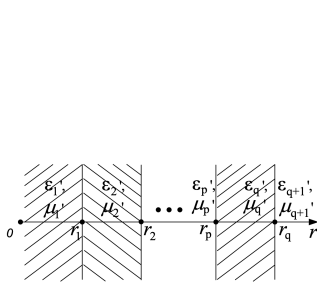
$$E_\theta(\theta, \varphi) = \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)], \quad (2)$$

где $\pi_n = P_n^1 / \sin \theta$, $\tau_n = dP_n^1 / d\theta$ — угловые функции, P_n^1 — присоединённые функции Лежандра; компонента E_φ получается заменой $\cos \varphi \rightarrow \sin \varphi$ и перестановкой $\tau_n \leftrightarrow \pi_n$. Решены две канонические задачи — рассеяния плоской волны на многослойной сфере (дифракционная) и возбуждения линзы точечным электрическим или магнитным диполем (антенная). Метод верифицирован на металлическом шаре (пределный переход к ряду Ми) и на четырёхслойной ЛЛ (сопоставление с Ansys HFSS — ниже).

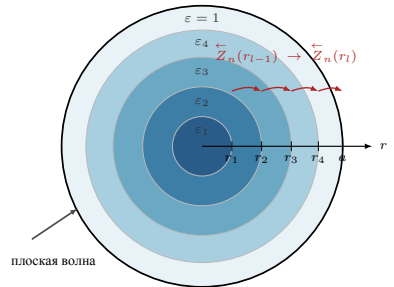
Разграничены зоны поля излучающей линзы — ближняя реактивная, Френеля и дальняя (Фраунгофера) (рисунок 3). Точное ядро $\hat{h}_n^{(2)}(k_0 r)$ метода ТФГ описывает поле во всех трёх зонах, тогда как дальнезонное представление $e^{-jk_0 r} / (k_0 r)$ применимо лишь при $r > 2D^2 / \lambda$ — это задаёт корректную постановку измерений ДН¹⁸.

Корректность подтверждена на эталонной задаче: для четырёхслойной ЛЛ на 10 ГГц бистатистические диаграммы рассеяния, рассчитанные методом ТФГ и МКЭ в главных плоскостях $E_\varphi = 0^\circ$ и 90° (рисунок 4), совпадают по положению и уровню всех лепестков, а расчёт ТФГ выполняется на 2–4 порядка быстрее.

¹⁸ ДН — диаграмма направленности.



а) Объёмная модель
многослойной ЛЛ



б) Стратификация
и рекуррентный пересчёт

Рисунок 2 — Модель многослойной сферической линзы Люнеберга:
(а) объёмная структура слоёв; (б) радиальная стратификация ε_l и направ-
ление рекуррентного пересчёта направленных импедансов от слоя к слою
по формуле (1)

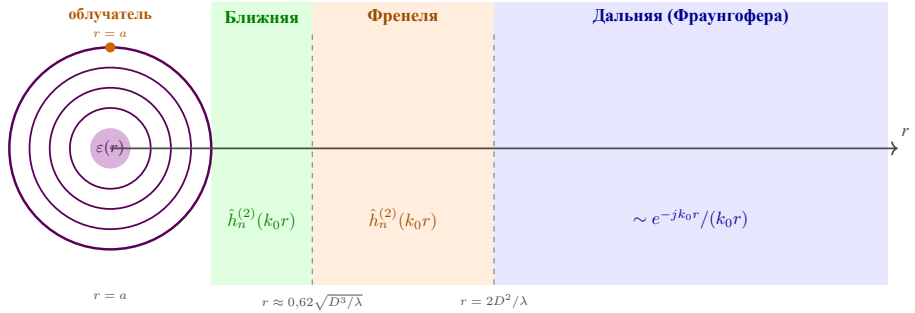
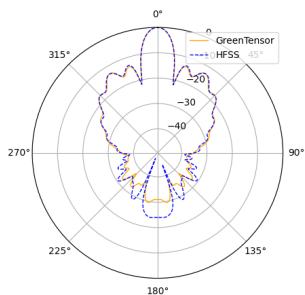


Рисунок 3 — Зоны поля сферической ЛЛ с облучателем на поверхности:
точное ядро $\hat{h}_n^{(2)}(k_0 r)$ описывает поле во всех трёх зонах, дальнезонное
представление применимо при $r > 2D^2/\lambda$

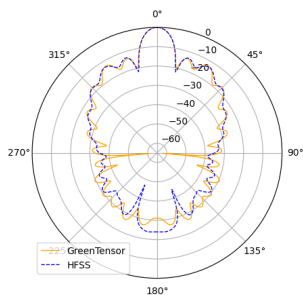
Аппарат доведён до программной реализации — открытой библиотеки *GreenTensor*^a (глава 10); веб-версия на сайте greentensor.ru выполняет расчёт непосредственно в браузере, что делает результаты работы независимо воспроизводимыми без установки программного обеспечения.

^aGreenTensor [Text] / D. V. Denisov [et al.]; [Source Code] <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor>. 2024. URL: <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor> (visited on 09/22/2024); Accessed: Sept. 22, 2024.





а) $E_\varphi = 0^\circ$

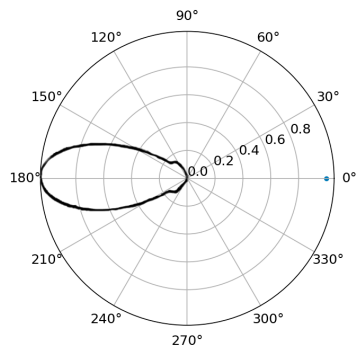


б) $E_\varphi = 90^\circ$

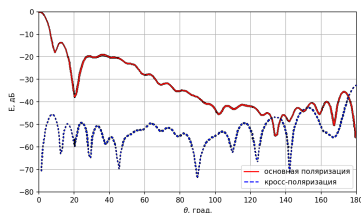
Рисунок 4 — Верификация метода ТФГ на четырёхслойной ЛЛ (10 ГГц): бистатические диаграммы, рассчитанные методом ТФГ (GreenTensor) и МКЭ (Ansys HFSS), в двух главных плоскостях

Третья глава. «Дифракция плоской электромагнитной волны на линзе»

Исследованы дифракционные характеристики ЛЛ в режиме пассивного рассеивателя. На основе замкнутых выражений ТФГ (глава 2) выведены формулы коэффициентов рассеяния *раздельно для основной (оп) и кросс-поляризационной (кп) составляющих*, что позволяет считать и линейную, и круговую поляризацию падающего поля. Помимо бистатической диаграммы систематизированы интегральные сечения, нормированные на площадь миделя πa^2 : полное σ_s , радиолокационное (обратное) σ_r , попутное σ_f , поглощения σ_a , поляризационных потерь σ_p , а также направленность переизлучения вперёд $D_f = \sigma_f / \sigma_s$. Для круговой поляризации введены коэффициент поляризационных потерь α и поляризационная эффективность $\mu = 1 - \alpha$, задающие долю энергии, переизлучаемой с нежелательной поляризацией (рисунок 5а).



а) $k_0a = 2\pi$



б) $k_0a = 8\pi$

Рисунок 5 — Диаграммы рассеяния восьмислойной оптимизированной ЛЛ при круговой поляризации: (а) $k_0a = 2\pi$; (б) $k_0a = 8\pi$

Исследовано влияние комплексной проницаемости $\epsilon' = \epsilon'_{re} + j\epsilon'_{im}$ на рассеяние. Систематизированы характеристики для $k_0a = 2\pi, 4\pi, 8\pi$: при $k_0a = 8\pi$ ширина

главного лепестка $\Delta\theta = 6^\circ$, уровень ПБЛ – 14 дБ, кросс-поляризации – 32 дБ (рисунок 5б). Рост тангенса потерь $\tan \delta$ до 0,1 снижает боковое рассеяние более чем на 10 дБ, что позволяет управлять ЭПР линзы подбором материала (расчёт выполнен аппаратом главы 2).

Тем же аппаратом систематизированы интегральные характеристики восьмислойной оптимизированной ЛЛ в диапазоне $k_0 a \in [0; 25]$ по всем шести коэффициентам ($\sigma_s, \sigma_r, \sigma_f, \sigma_a, \sigma_p, D_f$); тем самым на сферическом случае замкнут шестикoeffициентный аппарат школы Б. А. Панченко (ранее — только цилиндр и плоскость); зависимости осциллируют по электрическому размеру из-за интерференции волн, переизлучаемых границами слоёв. В отличие от уголкового отражателя ЛЛ слабее зависит от угла падения и допускает модификацию диаграммы экраном или неоднородным слоем, а осциллирующий характер $\alpha(k_0 a)$ задаёт количественный критерий выбора числа слоёв для пассивных отражателей.

Четвёртая глава. «Способы аппроксимации многослойных линз»

Решена задача оптимального дискретного представления непрерывного профиля $\varepsilon(r) = 2 - (r/a)^2$ конечным числом сферических слоёв — центральная задача проектирования ЛЛ.

Сопоставлены три подхода к аппроксимации: равношаговый по радиусу, равношаговый оптимизированный и оптимизированный многокритериальным генетическим алгоритмом (MOGA) (рисунок 6). Для каждого рассчитаны комплексные направленные сопротивления $\hat{Z}_n(r_l)$ слоёв и характеристический параметр M_n ; поиск оптимальных параметров сведён к серии коэффициентов с плавным изменением связей от слоя к слою (рисунок 7а).

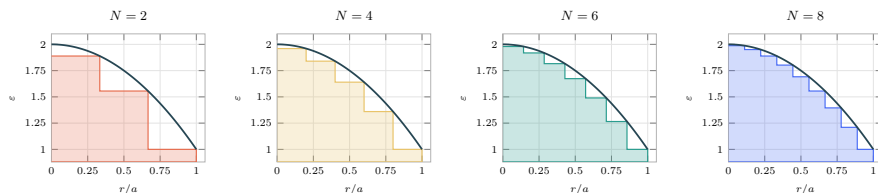
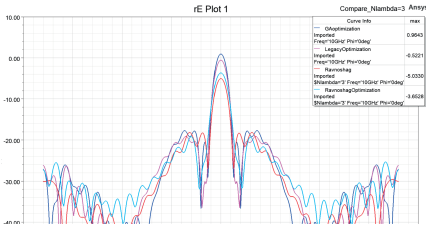


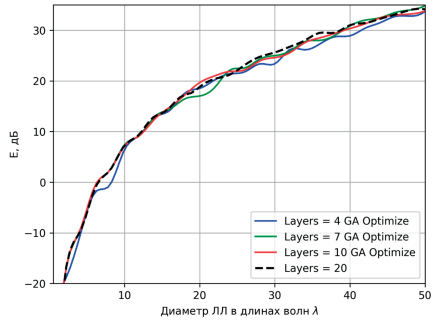
Рисунок 6 — Ступенчатая дискретизация непрерывного профиля $\varepsilon(r) = 2 - (r/a)^2$ при $N = 2, 4, 6, 8$ слоях: с ростом N ступенчатый профиль сходится к непрерывному

Для $k_0 a = 2\pi \dots 8\pi$ оптимизированная четырёхслойная аппроксимация даёт характеристики, практически неотличимые от непрерывного профиля (отличие по ПБЛ менее 1 дБ) при существенно меньшей технологической сложности. Для $D = 6\lambda$ генетический алгоритм улучшает излучение на ≈ 6 дБ в направлении падающей волны относительно равношагового разбиения (рисунок 7б); оптимум — 4...10 слоёв.

Точность трёх схем стратификации сопоставлена в метрике $\text{RMSE}(\varepsilon)$: при $L = 8$ слоях равношаговая схема даёт $\text{RMSE} \approx 0,042$, оптимизированная (по Фуксу) — 0,037, а предложенная MOGA-стратификация с совместной генетической оптимизацией радиусов и проницаемостей слоёв — 0,032 (на 13% ниже схемы Фукса и на 23% ниже равношаговой); при максимальном скачке проницаемости, равном фуксовскому



а) Сравнение диаграмм рассеяния



б) Усиление vs D и числа слоёв

Рисунок 7 — Схемы стратификации оптимизированной ЛЛ: (а) диаграммы рассеяния при разных схемах стратификации; (б) усиление поля в зависимости от диаметра линзы и числа слоёв при MOGA-оптимизации

($\Delta\epsilon_{\max} = 0,12$), точка фронта Парето даёт $\text{RMSE} = 0,0335$, т. е. доминирует классическую схему по обоим критериям. Для трёх инженерных порогов $\text{RMSE} \in \{2; 2,5; 5\}\%$ в главе 7 получены минимальные $L_{\min}$ всех трёх схем — база для выбора компромисса между точностью профиля и сложностью FDM-3D-печати.

Наряду с прямой задачей аппроксимации решена *обратная задача синтеза* профиля: обращением интегрального уравнения Абеля получено замкнутое соотношение $n^{1+\nu} + n^{1-\nu} = 2a/r$ ($\nu = \pi/\alpha$) для показателя преломления сферической линзы, отклоняющей все падающие параллельные лучи на произвольный наперёд заданный угол $\alpha \in (0; \pi)$ независимо от прицельного параметра. Полученный *класс линз-дефлекторов* строится на том же аппарате, что и классические решения, и содержит линзу Итона (ретрорефлектор, $\alpha \rightarrow \pi$) и однородную среду ($\alpha \rightarrow 0$) как предельные случаи; корректность профиля подтверждена электродинамическим расчётом (**положение 3**).

Пятая глава. «Линзы Люнеберга в составе антенных систем»

Систематизированы характеристики ЛЛ в режиме излучающей антенны: рассмотрены типы первичных облучателей (открытый конец волновода, рупор, полосковые апертурные, спиральные, *турникетные* двухкрестовые, элементы Гюйгенса), из которых турникетный вибраторный облучатель с рефлектором выбран как технологически простейший источник круговой поляризации.

Введён коэффициент использования поля облучателя η_1 (spill-over): $\eta_1^{\text{Г}} \approx 0,875$ (элемент Гюйгенса), $\eta_1^{\text{БП}} \in [0,849; 0,950]$ (вибратор с рефлектором). Антенный режим охарактеризован в девяти точках $k_0a \in \{0,01; 2; \pi; 2\pi; 4\pi; 6\pi; 8\pi; 10\pi; 12\pi\}$ для обоих облучателей, обобщая 4–5-точечные оценки школы Б. А. Панченко.

Систематизированы характеристики ДН при круговой поляризации: для $k_0a \approx 2\pi, 4\pi, 8\pi$ ширина главного лепестка $19,4^\circ, 6,8^\circ, 3,6^\circ$; ПБЛ $-10,5, -8,6, -8,5$ дБ; кросс-поляризация $-28,5, -34,0, -25,9$ дБ. Коэффициент усиления получен с учётом четырёх источников потерь — переоблучения ($\eta_{sp} \approx 0,875$), кросс-поляризации ($\eta_{xp} \in [0,75; 0,87]$), омических ($\eta_{om} \in [0,66; 1,0]$), отражения от поверхности ($\eta_{\Sigma} \approx 0,999$); при $k_0a = 4\pi$ получен $G \approx 19,9$ дБ при $D \approx 21,1$ дБ (рисунок 8в).

Впервые рассмотрена модификация ЛЛ с металлическим стержнем вдоль оси симметрии: она повышает жёсткость конструкции и даёт параметр управления обратным излучением — при корректном диаметре стержня оно снижается без заметной потери усиления.

Рассмотрена многолучевая антенна для сетей 5G миллиметрового диапазона: двенадцать прямоугольных волноводов ($10,67 \times 4,32$ мм) на поверхности шестислойной ЛЛ с угловым шагом 6° (рисунки 8а и 8б), диапазон 24,25...24,65 ГГц. Она формирует несколько независимых диаграмм одновременно, реализуя пассивную аналоговую архитектуру ММО без активных формирователей луча; сценарий размещения такой антенны на опоре городской инфраструктуры для облучения абонентов показан на рисунке 9а. По формуле Фрииса переход от 2 к 60 ГГц для всенаправленной антенны увеличивает потери на 29 дБ, что делает высоконаправленные линзовые антенны с многоканальной ДН неизбежными для 5G.

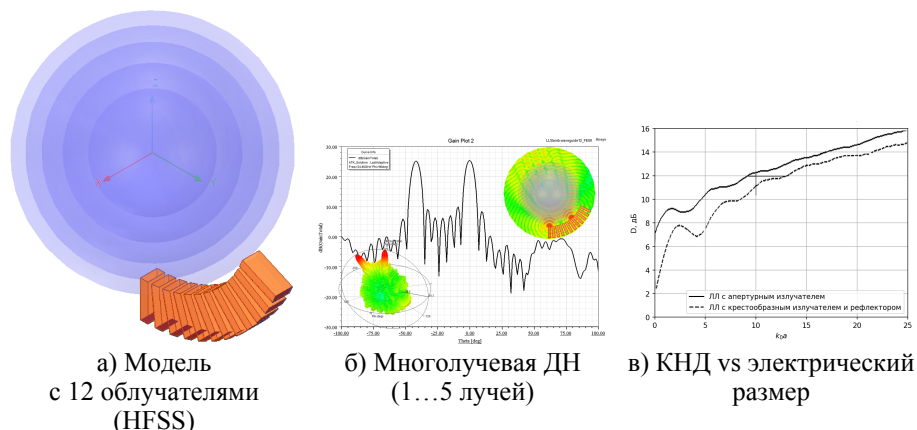
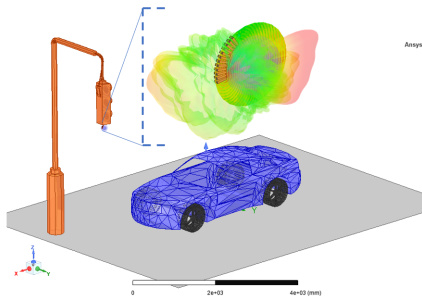


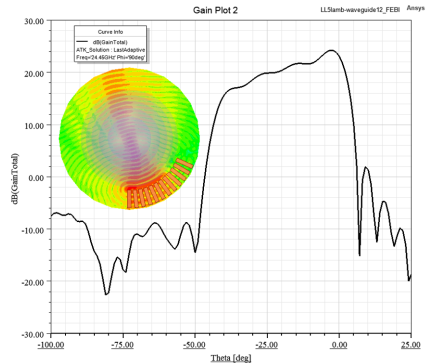
Рисунок 8 — Многолучевая линзовая антенна 5G (24,25...24,65 ГГц): (а) шестислойная ЛЛ с 12 волноводными облучателями (Ansys HFSS); (б) одновременное формирование до пяти независимых лучей; (в) КНД антенны как функция электрического размера

Показано, что та же система облучателей позволяет синтезировать диаграммы специального вида — $\csc(\theta)$ и $\csc^2(\theta)$ (рисунок 9б) — подбором *весовых коэффициентов возбуждения* отдельных облучателей при неизменном классическом профиле $\varepsilon(r)$. Косекансная диаграмма получена монотонно спадающим распределением мощности по восьми последовательным облучателям (1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 Вт при отключённых остальных четырёх). В отличие от известных решений, где форма луча закладывается в закон $n(r)$ на этапе геометрикооптического синтеза¹⁹, здесь она задаётся амплитудным распределением, что допускает перестройку формы ДН без замены линзы переключением каналов коммутационного блока, выполняющего функции диаграммообразующей схемы.

¹⁹ Венецкий, А. С. Общее решение задачи синтеза градиентной линзы с центральной симметрией [Текст] / А. С. Венецкий, В. А. Калошин, Чан Т. Т. // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 8. С. 754—760.



а) Размещение на опоре городской инфраструктуры (Ansys HFSS)



б) Синтез косекансной $csc^2(\theta)$ ДН весами облучателей

Рисунок 9 — Многолучевая ЛЛ-антенна 5G, управление формой ДН: (а) размещение антенны на опоре городской инфраструктуры и облучение абонента; (б) косекансная диаграмма, синтезированная амплитудным распределением по каналам без изменения профиля линзы

Шестая глава. «Антенные решётки в составе линз»

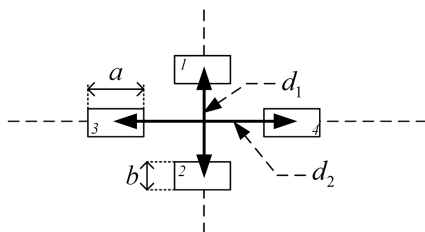
Изучена замена одиночной крупной ЛЛ линейной эквидистантной решёткой из N линз меньшего размера, каждая со своим облучателем; лучи отдельных линз в дальней зоне считаются параллельными (рисунок 10а).

Получен нормированный амплитудный множитель системы эквидистантной линейной решётки:

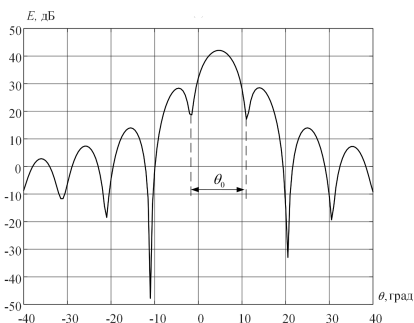
$$F_{\text{сист}}(\theta) = \frac{\sin(N k d \cos \theta/2)}{N \sin(k d \cos \theta/2)} \exp(j \psi_{\text{дос}}), \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, d — шаг решётки, $\psi_{\text{дос}}$ — фазовый сдвиг в диаграммообразующей схеме. Суммарная диаграмма — произведение парциальной диаграммы одиночной линзы (метод ТФГ, глава 2) на множитель системы. Получены ограничения на период решётки ($\leq \lambda$, иначе дифракционные максимумы) и характеристики суммарного и разностного режимов (рисунок 10б).

Решётка из $N = 3$ линз $k_0 a = 4\pi$ с трёхслойной оптимизированной аппроксимацией даёт $\Delta\theta = 2,3^\circ$ (эквивалент одиночной ЛЛ $k_0 a \approx 6\pi$); для $N = 5$ и 7 — эквиваленты $k_0 a \approx 8\pi$ и 12π . За счёт кубической зависимости объёма от радиуса переход к N малым линзам сокращает массу и расход диэлектрика на 50...70% — ключевое преимущество для бортовых применений и серийного производства. Рассмотрены режимы многолучевой решётки, электронного сканирования фазами, формирования широкого луча и подавления помех вспомогательной решёткой.



а) Решётка из N линз меньшего диаметра



б) ДН решётки в суммарном режиме

Рисунок 10 — Антенная решётка из линз Люнеберга: (а) схема линейной эквидистантной решётки из N линз; (б) диаграмма направленности в суммарном режиме

Седьмая глава. «Модифицированные по форме линзы»

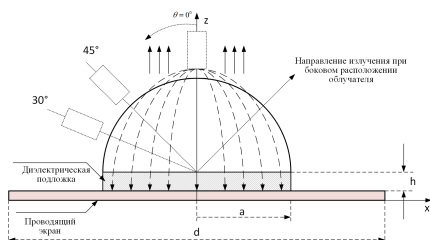
Проанализированы полусферическая линза с плоским проводящим экраном и тороидальные линзы (рисунок 11а). *Полулинза* получается рассечением сферической ЛЛ плоскостью симметрии и установкой на идеально проводящий экран, зеркально восстанавливающий недостающее полушарие: при вдвое меньшей высоте и расходе диэлектрика сохраняются фокусирующие свойства полной сферы. Облучатель размещается на сферической поверхности осью к центру линзы; исследован режим сканирования поворотом облучателя по дуге экрана.

Влияние толщины диэлектрической подложки (FR-4, $\varepsilon = 4,3$; фторопласт-4, $\varepsilon = 2,1$) на ДН рассчитано в Ansys HFSS при $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ и $h = 0 \dots 21$ мм на 10 ГГц: зазор влияет главным образом на уровень ПБЛ (до 5 дБ), при $h > 21$ мм ($\approx 0,7\lambda$) диаграмма искажается паразитными поверхностными модами. Это позволяет подстраивать характеристики при монтаже без изменения конструкции (рисунок 11б).

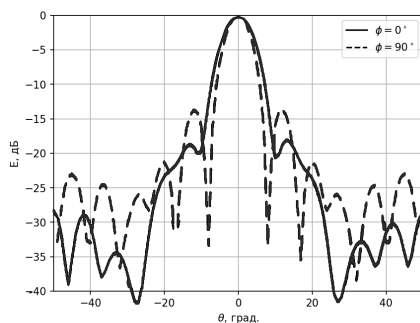
На основе полусферической ЛЛ с экраном разработана антенна с косекансной ДН $\csc^2(\theta)$ для обзорной радиолокации (рисунок 12): при $d = 8\lambda$ на 10 ГГц (≈ 240 мм) ширина косекансного сектора $76,1^\circ$, ПБЛ $-25,4$ дБ; форма диаграммы управляется углом поворота облучателя (оптимум $\theta = 83^\circ$) и диаметром экрана $d = 4 \dots 10\lambda$.

Таким образом, обоснованы **два способа формирования косекансной диаграммы**: *геометрический* — полусферическая ЛЛ на экране (форма ДН — углом наклона облучателя и диаметром экрана); и *амплитудный* — сферическая ЛЛ с группой облучателей на дуге (глава 5, форма ДН — распределением мощности по каналам). Первый компактнее и встраивается в силовой набор носителя, но фиксирует форму ДН при сборке; второй допускает электронную перестройку ценой диаграммообразующего тракта и габаритов. Для обоих предложены схемы размещения на борту летательного аппарата (вырез обшивки под радиопрозрачным обтекателем) для обзора нижней полу-сферы без механического сканирования.

Разработан тороидальный вариант ЛЛ — альтернатива при ограничениях на высоту и требовании круговой симметрии ДН в горизонтальной плоскости; сравнительная таблица параметров сферической, полусферической и тороидальной ЛЛ позволяет обоснованно выбрать геометрию под задачу.

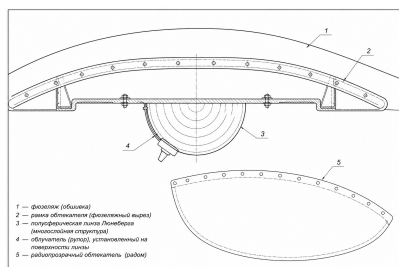


а) Принципиальная схема на экране

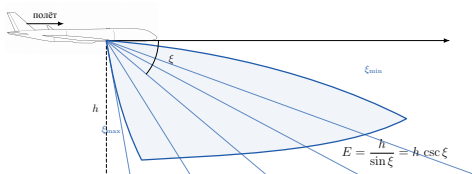


б) ДН шестислойной ЛЛ (Ansyz HFSS)

Рисунок 11 — Полусферическая линза Люнеберга на проводящем экране: (а) принципиальная схема; (б) диаграмма направленности шестислойной ЛЛ (Ansyz HFSS)



а) Монтаж полусферической ЛЛ в вырезе фюзеляжа



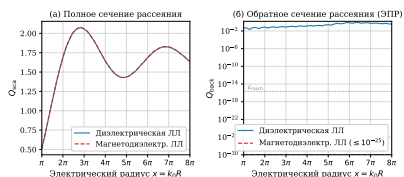
б) Схема обзора наземных целей косекансной ДН

Рисунок 12 — Линзовая антенна с косекансной ДН $\text{csc}^2(\theta)$ на борту носителя: (а) монтаж полусферической ЛЛ на металлическом экране в вырезе фюзеляжа; (б) схема формирования косекансной ДН $E = h \text{csc} \xi$ при обзоре наземных целей

Исследована ЛЛ с центральным металлическим ядром — концентрической металлической сферой радиуса r_m внутри шестислойной оптимизированной линзы ($f = 10$ ГГц, облучатель — открытый конец прямоугольного волновода). Ядро выполняет двойную функцию: механическое крепление тела линзы и регулирование средней диэлектрической проницаемости центральных слоёв через отношение r_m/a , что существенно при 3D-печати, где подбор $\varepsilon(r)$ ограничен выбором полимера и степенью заполнения. Уровень обратного излучения управляется в пределах ± 10 дБ; решение ТФГ для этой конфигурации верифицировано сопоставлением с МКЭ. Вместе с осевым металлическим стержнем (глава 5) это образует группу конструктивных элементов двойного назначения — несущих и одновременно управляющих полем.

Класс модифицированных конфигураций расширен двумя импедансо-согласованными вариантами. Магнетодиэлектрическая ЛЛ с $\varepsilon(r) = \mu(r)$ удовлетворяет обобщённому закону Люнеберга и обнуляет обратное сечение рассеяния

$\sigma_r \leq 10^{-25} \pi a^2$ за счёт точного согласования импеданса каждого слоя со свободным пространством. Сферические рассеиватели с радиопоглощающим покрытием рассмотрены на промышленных материалах ZIK 51-2190 и ZIK 51-2191 (измеренные $\varepsilon(\omega)$, $\mu(\omega)$ на четырёх частотах); рассчитана эффективность подавления ЭПР проводящей сферы по толщине покрытия. Для сферических метаматериальных структур ($\varepsilon = \mu < 0$) при $\varepsilon = \mu = -3$ численно показан сферический аналог эффекта Пендри — локализация ближнего поля с $|E|_{\max}^2 \approx 473$ при $z/a \approx -0,30$ в сторону источника, ранее для сферической геометрии не описанная (рисунок 13).



а) Магнетодиэлектрическая ЛЛ:

$$\varepsilon(r) = \mu(r)$$

Рисунок 13 — Импедансно-согласованные модификации сферической ЛЛ: (а) магнетодиэлектрическая линза; (б) метаматериальная ЛН-сфера

Рассмотрены радиолокационные и радионавигационные применения линз-дефлекторов (глава 4): линза Итона как пассивный ретрорефлектор и ложная цель, секторные диаграммы для обзорных РЛС и радиомаяков, управление радиозаметностью объектов целенаправленным отклонением переизлучённого поля.

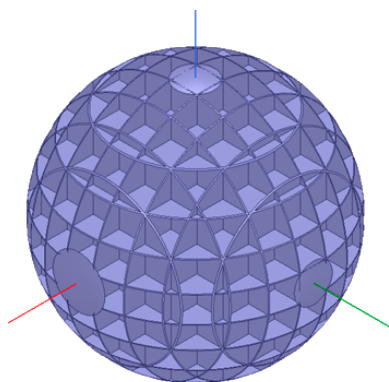
Восьмая глава. «Конструктивные варианты исполнения линз»

Рассмотрена реализация многослойной ЛЛ аддитивной 3D-печатью. Сопоставлены два подхода: печать из ударопрочного полистирола (HIPS, $\varepsilon = 2,4$, $\tan \delta = 0,001$) с кубическими пустотами (рисунок 14а) и из пенопласта переменной плотности (рисунок 15в).

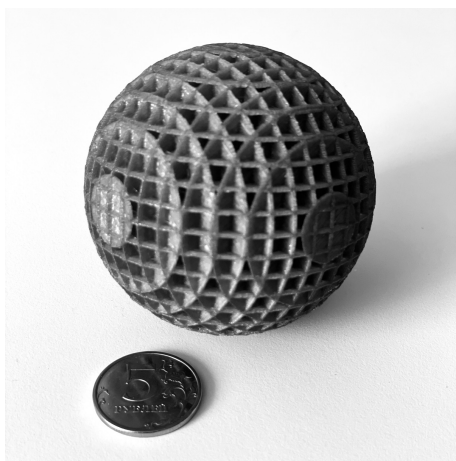
Предложен аналитический метод расчёта кубических пустот, задающих эффективную проницаемость каждого слоя, на основе логарифмической модели смесей (формула Лихтенекера) для среды с включениями воздуха в матрицу полистирола. Проницаемость изготовленных слоёв контролируется методом NRW (Nicolson-Ross-Weir) в прямоугольном волноводе. Для четырёхслойной ЛЛ диаметром 73 мм на 10 ГГц ($k_{0a} = 7,65$) получены размеры пустот под оптимизированную аппроксимацию из главы 4 (изготовленная сотовая ЛЛ и её модель — на рисунке 15б). Верификация в Ansys HFSS и сопоставление с методом ТФГ подтверждают применимость технологии для серийного изготовления линз сантиметрового и миллиметрового диапазонов; отклонение реализованного профиля $\varepsilon(r)$ от расчётного не превышает 2...3% при $1 \leq \varepsilon \leq 2$.

Разработана альтернативная технология — ЛЛ из пенопласта переменной плотности (рисунок 15в), где локальное $\varepsilon(r)$ задаётся плотностью вспенивания. Она применима при крупных электрических размерах, где точность FDM-печати недостаточна, и где критичен малый вес изделия (например, на борту БПЛА).

Применимость ЛЛ в режиме пассивного рассеивателя показана на модели малогабаритного БПЛА: рассчитана ЭПР в трёх конфигурациях (без линзы, с одной и с двумя

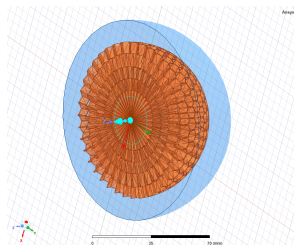


а) Образец слоя ЛЛ с перфорацией (CAD)

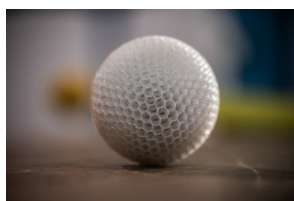


б) Изготовленный образец (масштаб — монета)

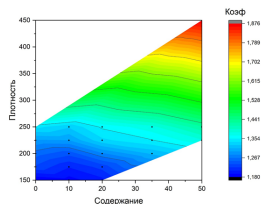
Рисунок 14 — Реализация слоя ЛЛ кубической перфорацией: (а) расчётная геометрия пустот, задающих эффективную ε ; (б) изготовленный FDM-печатью образец



а) Модель в Ansys HFSS



б) Сотовая ЛЛ (3D-печать, PETG)



в) Пенопласт переменной плотности

Рисунок 15 — Изготовление многослойной ЛЛ: (а) HFSS-модель перфорированной линзы; (б) сотовая ЛЛ, напечатанная из PETG; (в) диапазон плотностей пенопласта и соответствующие значения эффективной ε

ЛЛ). Управляемое размещение линз позволяет повышать или снижать ЭПР объекта в заданном секторе, что обосновывает применимость ЛЛ для радиолокационной маркировки воздушных судов. Для сохранения уровня ЭПР в широком азимутальном секторе несколько ЛЛ-переотражателей размещают по периметру объекта: три элемента в вершинах треугольника дают круговое покрытие 360° , суммарная ЭПР растёт как $\sigma_\Sigma = N\sigma_1$. ЛЛ-маркеры размещают в ракетах-мишенях.

FDM-печать применима в полевых условиях: доступность оборудования и отсутствие спецоснастки открывают возможность оперативного производства линзовых антенн и маркеров на местах эксплуатации.

Девятая глава. «Метод декомпозиции произвольных кусочно-координатных электродинамических структур»

Аппарат ТФГ обобщён с подобластей одной геометрии (сфера, цилиндр или плоскость) на произвольные структуры, содержащие границы разной координатной симметрии одновременно. Такие структуры — ЛЛ на плоском экране, полусферическая антенна в цилиндрическом обтекателе, обтекатель самолёта (носовая сфера, цилиндрический фюзеляж, плоские крылья), решётка сферических рассеивателей над подложкой — встречаются повсеместно, но к ним неприменим ни один из трёх частных аппаратов школы Б. А. Панченко, развитых независимо для плоской, цилиндрической и сферической геометрий.

Получены три замкнутых аппарата сшивания тангенциальных компонент поля на интерфейсах разной симметрии, приведённые к единой блочной СЛАУ. Диагональные блоки — импедансные матрицы локальных ТФГ-задач; внедиагональные выражаются через теоремы сложения векторных гармоник: для плоско-сферического интерфейса — Релея–Гордона, сферо-цилиндрического — Гегенбауэра–Графа, цилиндро-плоского — Якоби–Ангера–Графа (таблица 1).

Таблица 1 — Сводка элементов трёх типов сшивания полей в декомпозиционном методе

Элемент	Плоск.–сфера	Сфера–цил.	Цил.–плоск.
Спектр. параметр	$\vec{k}_\perp$ непрерывный	(n, m) или (m, k_z)	$\vec{k}_\perp$ непрерывный
Теорема сложения	Релея–Гордона	Гегенбауэра–Графа	Якоби–Ангера–Графа
Сложность	$O(N_{\max}^2 K^2)$	$O(N_{\max}^2 M_{\max})$	$O(M_{\max} K^2)$

Сформулирован итерационный алгоритм с критерием сходимости по норме невязки на интерфейсах. Сложность матриц перевязи полиномиальна и не превышает $O(N_{\max}^2 K^2) \leq 10^6$ для типичных $N_{\max} \leq 30$, $K \leq 100$ — реализуется на одиночном узле без распараллеливания, в отличие от объёмных методов с $\sim 10^8 \dots 10^9$ неизвестных для тех же геометрий.

Аппарат реализован Python-модулем `decomposition` (приложение) и верифицирован на трёх канонических тестах по числу базовых блоков: плоский блок — формулы Френеля одиночной границы, погрешность $3,9 \cdot 10^{-16}$ (машинный ноль); сферический — ряд Ми однородной сферы, затухание хвоста до $\sim 10^{-18}$ (рисунок 16); многослойный сферический — пересчёт направленных импедансов на восьмислойной линзе Фукса, сходимость до $\sim 10^{-22}$. Дополнительно выполнен тест на закон сохранения энергии; цилиндрическая часть проверена на тождестве Вронскиана и двухслойной коаксиальной структуре.

Тем самым открывается класс задач, ранее доступных только FEM/FDTD: линзовые антенны на корпусе носителя, конформные радары со сферическими облучателями, обтекатели произвольной канонической топологии.

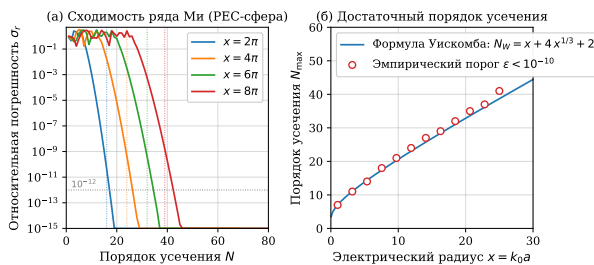


Рисунок 16 — Сходимость ряда Ми для РЕС-сферы и достаточный порядок усечения по формуле Уискомба

Десятая глава. «Программно-аппаратный комплекс для синтеза линз Люнеберга»

Разработана Python-библиотека `GreenTensor`²⁰ для расчёта рассеяния электромагнитных волн на многослойных сферических телах и её интеграция с Ansys HFSS через интерфейс IronPython. Библиотека открыта (лицензия MIT), документация — на платформе *Read the Docs*²¹, официальный сайт проекта — `greentensor.ru`²². На сайте развёрнут `GreenTensor Studio` — веб-версия расчётного ядра, работающая в браузере без установки и серверных вычислений: расчёт многослойной сферы, цилиндра и кластера частиц, эталоны Ansys HFSS для сопоставления и формирование косекансной (csc^2) ДН по адресу `greentensor.ru/studio.html` (шаблоны «полусфера на РЕС-экране» и сфера с группой облучателей).

Модульная архитектура включает три класса: `RCSCalculator` — бистатистическая ДН и ЭПР при произвольной поляризации; `ScatteringCalculator` — свип по $k_0 a$; `AnisotropicMieCalculator` — анизотропные среды. Ядро покрывает все задачи работы: многослойную сферу (включая конфигурации с проводящим ядром и магнетодиэлектрическими слоями $\varepsilon = \mu$), бесконечный цилиндр, кластер сферических частиц, а также декомпозиционный аппарат главы 9, реализованный отдельным модулем `decomposition`. Развёртка сечений рассеяния в 96 точках занимает не более 5 секунд на одной CPU-машине.

Введён комплекс *внутренних регрессионных тестов*: закон сохранения энергии бездиссипативной сферы $\sigma_s + \sigma_a = \sigma_e$ при $\tan \delta = 0$ выполняется с погрешностью $\leq 6 \cdot 10^{-16}$; парадокс экстинкции даёт $\sigma_e/(\pi a^2) = 2,006$ при $k_0 a = 150$ (предел 2 по Бабине–ван де Хюлсту); порядок усечения ряда Ми совпадает с оценкой Уискомба

²⁰GreenTensor [Text] / D. V. Denisov [et al.] ; [Source Code] <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor>. 2024. URL: <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor> (visited on 09/22/2024) ; Accessed: Sept. 22, 2024.

²¹GreenTensor Documentation [Text] / D. V. Denisov [et al.] ; <https://greentensor.readthedocs.io/>. 2024. URL: <https://greentensor.readthedocs.io/> (visited on 02/13/2024) ; [Online]. Accessed: Feb. 13, 2024.

²²Денисов, Д. В. GreenTensor — open-source библиотека электродинамического анализа многослойных сферических структур [Текст] / Д. В. Денисов ; <https://greentensor.ru>. 2025. URL: <https://greentensor.ru> (дата обр. 28.04.2025) ; Официальный сайт проекта.

$N_W(x) = x + 4x^{1/3} + 2$ до 10^{-12} ; воспроизведены рэлеевская асимптотика $\sigma \propto (k_0 a)^4$ и геометрооптический предел $\sigma \rightarrow \pi a^2$. Тесты запускаются при каждом коммите.

Верификация библиотеки построена по многоуровневой схеме (см. «Достоверность»): аналитические эталоны (ряд Ми для однородной сферы, предельный переход к идеально проводящему шару, формулы Френеля одиночной границы), сходимость ряда сферических гармоник и рекуррентного пересчёта направленных импедансов (рисунок 16), сопоставление с *Ansys HFSS* (глава 2, рисунок 4) и с данными других авторов — все уровни пройдены с машинной или предельной точностью.

Расхождение не превышает $\Delta\theta_{-3} \leq 0,6^\circ$ по ширине главного лепестка и 1 дБ по ПБЛ, при ускорении в $10^2 \dots 10^4$ раз относительно FEM: для двухслойной металлической сферы ($k_0 a = 2\pi$) — менее 0,4 с против 57 мин и 6,2 ГБ в HFSS; для четырёхслойной ЛЛ ($k_0 a = 6\pi$) — менее 1 с против 15 мин и 6 ГБ; для восьмислойной ($k_0 a = 10\pi$) — менее 3 с против ≥ 120 мин и ≥ 30 ГБ. Это делает осуществимой массовую генерацию обучающих выборок для суррогатных нейросетевых моделей инверсного дизайна. На выборке из 6000 конфигураций четырёхслойной ЛЛ обучен нейросетевой суррогат (многослойный перцептрон 5–64–64–2), воспроизводящий полное Q_s и обратное $\lg Q_r$ сечения рассеяния с $R^2 = 0,99$ и 0,80 на отложенной выборке (рисунок 17).

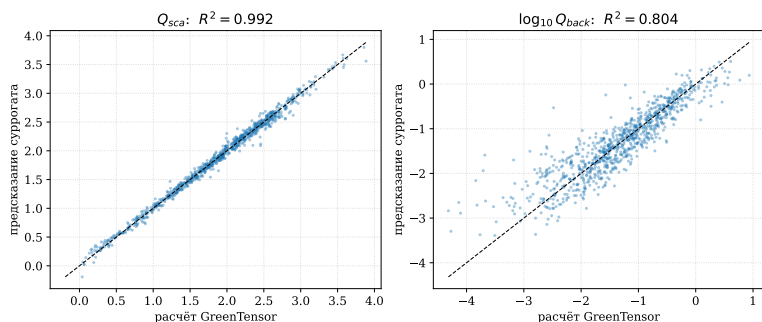


Рисунок 17 — Предсказание нейросетевого суррогата GreenTensor против прямого расчёта на тестовой выборке; пунктир — идеальное совпадение

Интерфейс автоматизации Ansys HFSS через IronPython программно генерирует многослойные сферические геометрии. Связка GreenTensor и автоматизации HFSS — замкнутый комплекс синтеза линз от анализа профиля до документации на 3D-печать; цикл проектирования сокращается с недель до часов. На библиотеку получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Заключение

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

В диссертации выполнены анализ и синтез неоднородных сферических линз Люнеберга — от аппарата тензорных функций Грина (ТФГ) до программной реализации, изготовления линз 3D-печатью и применения в антенных системах миллиметрового

и сантиметрового диапазонов. На единой основе — аппарате ТФГ для многослойной сферы — получены замкнутые выражения для полей в ближней и дальней зонах, диаграмм рассеяния и направленности, ЭПР, поляризационных потерь и развязки каналов при различных профилях проницаемости; разработаны алгоритмы оптимизации слоистой аппроксимации и установлены ограничения на периоды решёток облучателей в моноимпульсном и многолучевом режимах. Для полусферической линзы на экране, тороидной линзы и линзы с металлическим ядром подтверждено формирование диаграмм специального вида — косекансных $\csc^2(\theta)$ и панорамных 360° — для радиолокации, сетей 5G/6G и дистанционного зондирования.

Практическая реализация выполнена FDM-печатью полимерами (HIPS, PLA, PETG) и пенопластом с управляемой пористостью и кубической перфорацией; отклонение реализованного $\varepsilon(r)$ от расчётного не превышает 2–3% (макеты диаметром 50, 73 и 130 мм).

Существенные результаты работы:

1. На аппарате ТФГ для многослойной сферы разработан подход к оптимизированной дискретизации профиля проницаемости, учитывающий физические ограничения реализуемых материалов и вычислительную устойчивость. Получены количественные критерии выбора числа слоёв и схемы стратификации, при которых характеристики дискретной линзы приближаются к характеристикам идеального непрерывного профиля без усложнения конструкции.
2. Численное исследование поля в многослойных сферических и полусферических структурах выполнено библиотекой *GreenTensor* и верифицировано аналитическими решениями и расчётами в *Ansys HFSS* с точностью, заявленной в положении 1.
3. Показано, что выбор схемы дискретизации снижает уровень боковых лепестков, обеспечивает требуемую фокусировку и сохраняет устойчивость характеристик к технологическим отклонениям параметров материала. Методика применена к сферическим, полусферическим и тороидным конфигурациям, что расширяет её на задачи панорамного обзора без механического сканирования.
4. Разработана, верифицирована и интегрирована с *Ansys Electronics Desktop* открытая библиотека *GreenTensor*²³, реализующая метод ТФГ в сферических координатах. Модульная архитектура обеспечивает включение в более крупные расчётные комплексы, а связка «аналитический синтез → численная верификация» через *IronPython*-скрипты радикально сокращает цикл проектирования линзовой антенны.
5. Разработан метод декомпозиции произвольной структуры на канонические подобласти трёх типов (плоско-, цилиндрико- и сферически-слоистые) с замкнутым аппаратом сшивания тангенциальных компонент поля на интерфейсах разной координатной симметрии. Ядра преобразования модальных базисов сведены к единой алгебраической форме блочной СЛАУ. Метод реализован *Python*-модулем *decomposition* и верифицирован тремя каноническими тестами с машинной точностью (глава 9).

²³*GreenTensor* [Text] / D. V. Denisov [et al.] ; [Source Code] <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor>. 2024. URL: <https://github.com/DenlsovDmltriy/GreenTensor> (visited on 09/22/2024) ; Accessed: Sept. 22, 2024.

6. Класс модифицированных сферических линз расширен импедансно-согласованными конфигурациями: магнетодиэлектрической ЛЛ с $\varepsilon(r) = \mu(r)$; рассеивателями с радиопоглощающими покрытиями ZIK 51-2190 и ZIK 51-2191 по экспериментальным $\varepsilon(\omega), \mu(\omega)$ на четырёх частотах; метаматериальными структурами с $\varepsilon = \mu < 0$, для которых установлен сферический аналог эффекта Пендри. Шестикoeffициентный аппарат школы Б. А. Панченко $(\sigma_s, \sigma_r, \sigma_p, \sigma_f, \sigma_a, D_f)$ замкнут на сферическом случае: систематизированы интегральные характеристики восьмислойной оптимизированной линзы в диапазоне $k_0 a \in [0; 25]$.

Итоги. Результаты образуют замкнутую цепочку «теория — аппроксимация — конструкция — программный комплекс — антенные и радиолокационные приложения», ранее в литературе по линзовым антеннам не воспроизводившуюся в едином аппарате. Метод ТФГ и его декомпозиционное обобщение, замыкающее программу школы Б. А. Панченко по триаде «плоскость — цилиндр — сфера» (положение 1), переведены в открытый Python-инструмент (положение 2), дающий сокращение машинного времени на 2–4 порядка относительно конечно-элементного решения при сопоставимой точности. На этой базе получены замкнутый синтез линз-дефлекторов (положение 3), новые классы модифицированных конфигураций (положение 4) и методика выбора многослойного профиля под ограничения FDM-3D-печати с учётом поляризационных потерь (положение 5). Тем самым **решена крупная научная проблема** развития теории и техники антенн в части электродинамики и проектирования сферических градиентных линзовых структур.

Рекомендации по практическому использованию. Методы и программные средства применимы при проектировании: (а) многолучевых линзовых антенн миллиметрового диапазона для базовых станций 5G/6G и спутниковой связи (ускорение параметрической оптимизации в $10^2 \dots 10^4$ раз); (б) пассивных формирователей диаграмм $\csc^2(\theta)$ и 360° -панорамных для радиолокации без механического сканирования; (в) ЭПР-маркеров и линз-дефлекторов для управления радиоизлучением; (г) импедансно-согласованных рассеивателей и метаматериальных структур для задач ЭМС. Методика стратификации под FDM-3D-печать обеспечивает воспроизводимое изготовление стандартными слайсерами, а библиотека GreenTensor рекомендуется как самостоятельный инструмент, как «плагиная» подсистема Ansys Electronics Desktop, *ЛОГОС ЭМИ* (РФЯЦ-ВНИИЭФ), Altair FEKO, CST Microwave Studio, и как генератор обучающих выборок для нейросетевых суррогатных моделей.

Перспективы дальнейшей разработки темы видятся в шести направлениях: (1) расширение декомпозиционного инструмента (положение 1) на комбинированные сферо-цилиндрические и сферо-плоские геометрии; (2) интеграция ядра GreenTensor с машинным обучением — как быстрого «оракула» при инверсном синтезе градиентных сред; (3) перенос метода ТФГ в оптический и инфракрасный диапазоны (металповерхности, фотонные линзы, ОАМ-формирователи) с учётом дисперсии; (4) экспериментальная валидация магнетодиэлектрических и LH-метаматериальных конфигураций (положение 4), разработка композитов с одновременным управлением $\varepsilon(r)$ и $\mu(r)$; (5) обобщение методики оптимизации (положение 5) на задачи с массогабаритными, тепловыми и стоимостными ограничениями; (6) переход к реконфигурируемому управлению полем — дополнение градиентных структур управляемыми средами (жидкие кристаллы, варакторы, сегнетоэлектрики).

Главный итог. Класс сферически-симметричных градиентных линзовых антенн — от классической ЛЛ до её модификаций по форме, граничным условиям и материалу (полусфера на экране, тороид, металлическое ядро, магнетодиэлектрик, метаматериалы, поглощающие покрытия) — получает единое, замкнутое и проверяемое описание: единое — через сквозной аппарат ТФГ с декомпозиционным обобщением; замкнутое — через цепочку «теория → аппроксимация → конструкция → программный инструмент → серийное изделие»; проверяемое — через трёхступенчатую верификацию. Результат переводит сферические градиентные линзы из категории «нишевый класс антенн с неудобным расчётом» в категорию инженерно-проектируемых компонентов современных радиосистем.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ

1. Методика изготовления линзы Лунеберга для увеличения эффективной площади рассеяния малых беспилотных летательных аппаратов [Текст] / Д. В. Денисов [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. — 2025. — Т. 9, № 2. — С. 194–215. — URL: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/145286>.
2. Обзор конструкций антенн на основе линзы Лунеберга, изготавливаемых методами аддитивного производства [Текст] / Д. В. Кусайкин [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2024. — Т. 27, № 2. — С. 6–36. — URL: <https://re.eltech.ru/jour/article/view/861/756>.
3. Выбор параметров многослойной сферической линзы Лунеберга при ее реализации посредством аддитивных технологий [Текст] / Д. В. Денисов [и др.] // Ural Radio Engineering Journal. — 2023. — Т. 7, № 4. — С. 343–374. — URL: <https://journals.urfu.ru/index.php/urj/article/view/7675> ; urfu.ru (DOI) + ELAR УрФУ (elar.urfu.ru/handle/10995/129367).
4. Denisov, D. V. Modeling of a Lunenburg lens antenna with the inner metallic sphere [Text] / D. V. Denisov, V. Y. Noskov, D. V. Kusaykin // T-Comm. — 2022. — 16 (11). — P. 44–49.
5. Денисов, Д. В. Влияние металлического стержня внутри сферической линзы Лунеберга на ее характеристики [Текст] / Д. В. Денисов, В. Я. Носков // Ural Radio Engineering Journal. — 2022. — 6 (2). — С. 160–185.
6. Денисов, Д. В. Оценка канала в системах 5G MIMO-OFDM с многолучевыми линзовыми антеннами [Текст] / Д. В. Денисов, Д. В. Кусайкин // Вестник СибГУТИ. — 2021. — 2(56). — С. 56–68.
7. Денисов, Д. В. Формирование диаграммы направленности специального типа с помощью полусферической линзы Лунеберга [Текст] / Д. В. Денисов, А. А. Тангамян // Вестник Концерна ВКО «Алмаз–Антей». — 2021. — № 2. — С. 28–34.
8. Денисов, Д. В. Расчет линзы Лунеберга в ANSYS HFSS для подготовки к изготовлению с помощью 3D-печати [Текст] / Д. В. Денисов, А. А. Тангамян // Вестник СибГУТИ. — 2020. — 3 (51). — С. 54–63.
9. Денисов, Д. В. Антенные характеристики полусферической линзы Лунеберга при сканировании [Текст] / Д. В. Денисов, Б. А. Панченко, С. Н. Шабунин // Радиотехника и электроника. — 2019. — 64(3). — С. 246–251. — Denisov, D. V. Antenna characteristics of a hemispherical Luneburg lens in the scan mode [Text] / D. V. Denisov, B. A. Panchenko, S. N. Shabunin // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2019. — 64(4). — P. 357–362.
10. Панченко, Б. А. Антенная решетка линз, возбуждаемая системой первичных облучателей [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов // Антенны. — 2018. — 2(246). — С. 21–25.
11. Панченко, Б. А. Выбор параметров первичного облучателя линзы Лунеберга для суммарно-разностного режима работы [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов, О. П. Пономарев // Радиотехника и электроника. — 2018. — 63(2). — С. 139–143.
12. Панченко, Б. А. Рассеяние электромагнитных волн на неоднородных сферических телах [Текст] / Б. А. Панченко, О. П. Пономарев, Д. В. Денисов // Антенны. — 2017. — № 4. — С. 3–6.
13. Панченко, Б. А. Быстрый расчет характеристик рассеяния линзы Лунеберга [Текст] / Б. А. Панченко, О. П. Пономарев, Д. В. Денисов // Вестник Концерна ВКО Алмаз–Антей. — 2017. — 2(21). — С. 21–25.
14. Тензорные функции Грина для расчёта электромагнитных полей от слоистых сферических структур [Текст] / Б. А. Панченко [и др.] // Вестник СибГУТИ. — 2016. — № 2. — С. 18–24. — URL: <https://vestnik.sibsutis.ru/jour/article/view/176>.

15. Влияние уровня стратификации линзы Лüneберга на ее антенные характеристики [Текст] / Б. А. Панченко [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2014. — № 1. — С. 3—6.
16. Панченко, Б. А. Антенные характеристики линзы Лüneберга при круговой поляризации поля [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов // Антенны. — 2013. — № 12. — С. 026—030.
17. Панченко, Б. А. Дифракционные характеристики линзы Лüneберга для поля круговой поляризации [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2013. — Т. 16, № 4. — С. 33—37.
18. Панченко, Б. А. Поляризационная эффективность излучения крестообразных вибраторов [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов // Вестник СибГУТИ. — 2013. — № 1. — С. 68—74.

Публикации в материалах конференций, индексируемых Scopus и Web of Science

19. Denisov, D. V. GreenTensor Electromagnetic Library for Calculating Scattering Patterns on a Human Head Model [Text] / D. V. Denisov, I. O. Skumatenko, M. A. Shesterov // 2024 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). — 2024. — P. 338—340.
20. GreenTensor Electromagnetic Library for Calculate Scattering on Multilayer Spherical Structures [Text] / D. V. Denisov [et al.] // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). — 2024. — P. 530—533.
21. Denisov, D. Creating a Luneburg Lens with a Variable Pitch 3D Printer [Text] / D. Denisov, A. Tangamyan // 2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). — 2022. — P. 090—093.
22. Base Station Multibeam Antenna for 5G Network Based on the Lunenburg Lens Structure [Text] / D. V. Denisov [et al.] // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). — Новосибирск : IEEE, 2021. — P. 260—263. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9647657>.
23. Kusaykin, D. V. Based Interpolation Channel Estimation for Millimeter-Wave MIMO OFDM Systems with Multibeam Luneburg Antenna [Text] / D. V. Kusaykin, D. V. Denisov, M. A. Klevakin // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). — Новосибирск : IEEE, 2021. — P. 224—227.
24. Denisov, D. Influence of the Dielectric Layer on the Antenna Characteristics of the Luneburg Lens [Text] / D. Denisov, S. Shabunin, A. Tangamyan // 2020 28th Telecommunications Forum (TELFOR). — 2020. — P. 1—4.
25. Denisov, D. Lens Antenna Array Excited by the Primary-Feed System [Text] / D. Denisov, B. Panchenko // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). — IEEE. 2019. — P. 321—324.
26. Panchenko, B. Fast analysis of Luneburg lens radiation by Green's function method [Text] / B. Panchenko, S. Shabunin, D. Denisov // 2015 European Radar Conference (EuRAD). — 2015. — P. 568—571.

Монография и публикации в других изданиях и материалах конференций

27. Денисов, Д. В. Моделирование сферической линзы Лüneберга с перфорированной структурой слоёв при 3D-печати [Текст] / Д. В. Денисов, Д. В. Кусайкин // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. — Москва, 2024. — С. 161—167. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=81389569>.
28. Кусайкин, Д. В. Сравнение моделей сферических линзовых антенн для сетей 5G [Текст] / Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. — Москва, 2024. — С. 361—365.
29. Денисов, Д. В. Библиотека с открытым исходным кодом для решения задач рассеяния на многослойных сферических телах [Текст] / Д. В. Денисов, В. Я. Носков, И. О. Скуматенко // 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» (25—27 окт. 2023). — Красноярск, 2023. — С. 200—203.
30. Денисов, Д. В. Способы постановки задач в HFSS для анализа влияния электромагнитного излучения на человека [Текст] / Д. В. Денисов, В. Я. Носков, И. О. Скуматенко // 7-я Всероссийская научно-техническая конференция «Системы связи и радионавигации» (25—27 окт. 2023). — Красноярск, 2023. — С. 212—214.
31. Каменсков, А. Е. Прогнозирование характеристик многолучевой линзовой антенны с помощью искусственных нейронных сетей [Текст] / А. Е. Каменсков, Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов // Тенденции развития науки и образования : научный журнал. — 2023. — С. 83—86. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53929073>.

32. Кусайкин, Д. В. 3D-печать сферической линзовой антенны в форме многогранника Голдберга [Текст] / Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов // Прикладная физика, информационные технологии и инженерия : сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции. — Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2023. — С. 108—110. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59994538>.
33. Кусайкин, Д. В. Прогнозирование параметров линзы Лунеберга нейросетевым методом [Текст] / Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов, А. Е. Каменсков // Тенденции развития науки и образования. — 2023. — № 103—8. — С. 239—242. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58908283>.
34. Кусайкин, Д. В. Анализ системы MU-MIMO сети 5G с многолучевой линзовой антенной [Текст] / Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов // Динамика систем, механизмов и машин : материалы XIV Международной IEEE научно-технической конференции. — МИРЭА — Российский технологический университет, 2022. — С. 412—416. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50149430>.
35. Кусайкин, Д. В. Моделирование электромагнитной обстановки вблизи многолучевой линзовой антенны миллиметрового диапазона в условиях сложной городской среды [Текст] / Д. В. Кусайкин, Д. В. Денисов, А. Е. Каменсков // Сборник трудов конференции. — 2022. — С. 114—119.
36. Кусайкин, Д. В. Анализ архитектур многолучевых сферических линзовых антенн систем MIMO для сетей 5G [Текст] / Д. В. Кусайкин, А. Е. Каменсков, Д. В. Денисов // Труды конференции ИжГТУ им. М. Т. Калашиникова. — Ижевск, 2022. — С. 752—756.
37. Носков, В. Я. Способы подбора шага 3D-печати линзы Лунеберга [Текст] / В. Я. Носков, Д. В. Денисов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. — 2022. — № 4. — С. 73—74. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50044906>.
38. Денисов, Д. В. Исследование характеристик антенной системы на основе линзы Лунеберга при смещении первичного облучателя из фокуса [Текст] / Д. В. Денисов, А. А. Тангамян // Российская научно-техническая конференция «Обработка информации и математическое моделирование» : сборник трудов. — Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021. — С. 528—534. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47147457>.
39. Денисов, Д. В. Способы реализации и применение современных линзовых антенных систем [Текст] / Д. В. Денисов, А. А. Тангамян // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы XVI международной научно-технической конференции. — Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2020. — С. 85—86. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44620055>.
40. Денисов, Д. В. Возможности программных продуктов ANSYS для проектирования устройств Интернета вещей (IoT): связка HFSS-EMIT-SAVANT [Текст] / Д. В. Денисов // Ural Radio Engineering Journal. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2019.
41. Денисов, Д. В. Анализ электромагнитной совместимости многоантенных систем в среде Ansys EMIT [Текст] / Д. В. Денисов, И. Р. Зарипова // Материалы международной научно-технической конференции. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2019.
42. Panchenko, B. Antenna properties of the modified Luneburg lens with backward radiation [Text] / B. Panchenko, D. Denisov, S. Shabunin // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). — 2018. — P. 1—3.
43. Денисов, Д. В. Первичные облучатели линзы Лунеберга для суммарно-разностного режима работы [Текст] / Д. В. Денисов // Разработка и применение фондов оценочных средств в рамках реализации образовательных программ: материалы 58 (LVIII) межвузовской научно-методической конференции. — 2017. — С. 55—56.
44. Денисов, Д. В. Рассеяние электромагнитных волн сотовых диапазонов на многослойной сферической модели [Текст] / Д. В. Денисов, К. А. Санникова, Д. Э. Королев // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. — 2017. — № 1. — С. 161—170.
45. Денисов, Д. В. Характеристики линзы Лунеберга для полей круговой поляризации [Текст] / Д. В. Денисов, Б. А. Панченко. — Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2017. — 200 с. — URL: <https://books.google.com/books?id=jtvSzQEACAAJ>.
46. Измерение параметров материалов [Текст] / Д. В. Денисов [и др.] // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. — 2017. — № 1. — С. 170—175. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30074340>.
47. Техническая реализация многослойных линзовых антенн Лунеберга [Текст] / Д. В. Денисов [и др.] // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. — 2017. — № 1. — С. 153—161.

48. Денисов, Д. В. Влияние системы перемещения облучателя вдоль поверхности линзы Лüneберга на характеристики антенной системы [Текст] / Д. В. Денисов, Б. А. Панченко, В. О. Фадеев // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. — 2016. — № 1. — С. 102—106.
49. Денисов, Д. В. Линза Лüneберга с облучателем в виде микрополосковой антенны в режиме круговой поляризации для Wi-Fi [Текст] / Д. В. Денисов, В. О. Фадеев, Д. С. Русинов // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. — 2016. — С. 107—111.
50. Панченко, Б. А. Математическое моделирование антенны на базе линзы Лüneберга при круговой поляризации поля [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов, В. В. Мохова // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. — 2014. — № 1. — С. 296—299.
51. Использование линзы Лüneберга для повышения эффективности передачи данных в сетях подвижной связи 4G [Текст] / А. Г. Абакумова [и др.] // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. — 2013. — № 1. — С. 27—29.
52. Панченко, Б. А. Облучение линзы Лüneберга источниками поля круговой поляризации [Текст] / Б. А. Панченко, Д. В. Денисов // Научные труды SWorld. — 2013. — Т. 10, № 3. — С. 71—76.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

53. Патент на изобретение № 2792315. Способ радиолокационного контроля состояния стрелочного перевода сортировочной горки и датчик его реализующий [Текст] / В. Я. Носков [и др.] (Российская Федерация); заявитель АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»». — № 2022126622; заявл. 12.10.2022; опубл. 21.03.2023, Бюл. № 9; приоритет 12.10.2022, 2022126622 (Рос. Федерация). — 10 с. : ил. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50432528>.
54. Патент на изобретение № 2815559. Способ фиксации момента отделения отцепа от состава и радиолокационный датчик его реализующий (варианты) [Текст] / В. Я. Носков [и др.] (Российская Федерация); заявитель АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»»; патент. поверенный Зубов Ю. С. — № 2023124930; заявл. 28.09.2023; опубл. 18.03.2024, Бюл. № 7 (1 ч.); приоритет 01.01.2020, 09/289, 037 (Рос. Федерация). — 5 с. : ил.
55. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016616168. Расчет антенных и дифракционных характеристик линзы Лüneберга в режиме круговой поляризации [Текст] / Д. В. Денисов [и др.]; АО «Особое конструкторское бюро «Пеленг»» (АО «ОКБ «Пеленг»»). — № 2016611044; заявл. 11.02.2016; опубл. 07.06.2016, 2016616168 (Рос. Федерация).
56. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017616708. Расчет диаграмм рассеяния на неоднородных сферических телах [Текст] / Д. В. Денисов, Б. А. Панченко, О. П. Пономарев; АО «Уральское производственное предприятие «Вектор»» (АО УПП «Вектор»). — № 2017614007; заявл. 27.04.2017; опубл. 16.06.2017, 2017616708 (Рос. Федерация).
57. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023688035. Расчёт параметров линзы Лüneберга в среде Ansys HFSS [Текст] / Д. В. Денисов, Д. В. Кусайкин; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ). — № 2023681224; заявл. 12.10.2023; опубл. 20.12.2023, 2023688035 (Рос. Федерация).

Акты внедрения результатов работы

1. ПАО «Машиностроительный завод имени М. И. Калинина» (МЗиК), г. Екатеринбург
2. ОАО «ЛИИП им. Гризодубовой В. С.»
3. ООО «ИСКРАТЕХ» (Искра-Технологии)
4. ООО «Нова Инжиниринг»
5. ООО «ТвинТех»
6. ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (СибГУТИ)
7. ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (ИРИТ-РТФ)

Денисов Дмитрий Вадимович

Методы анализа, оптимизации и реализации многослойных сферических
линзовых структур

Автореф. дис. на соискание учёной степени доктора технических наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 3,1. Тираж 100 экз.

Типография _____