

Отзыв официального оппонента

доктора технических наук, профессора Пастернака Юрия Геннадьевича
на диссертацию Денисова Дмитрия Вадимовича «Методы анализа, оптимизации и реализации многослойных сферических линзовых структур», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Для подготовки отзыва оппоненту представлены:

- диссертация, основное содержание которой изложено на 500 страницах, включая 130 рисунков и 93 таблицы; список литературы содержит 231 наименование;
- автореферат диссертации объемом 3.1 печатных листа.

Актуальность темы диссертации

Развитие теории, техники и технологии производства систем телекоммуникации, управления, радиолокации и навигации, функционирующих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн требует создания методов анализа, синтеза и конструкторско-технологической реализации антенн, которые формируют один, или несколько, узких лепестков диаграммы направленности без использования электромеханических приводов, а также с минимальным количеством дорогостоящих управляющих устройств – фазовращателей.

Антенные системы, построенные на основе сферической линзы Люнеберга, позволяют реализовать одно- и многолучевые диаграммы направленности, а также – коммутационное сканирование в широком секторе углов, благодаря сферической симметрии профиля эффективной диэлектрической проницаемости материала линзы, что позволяет формировать главный лепесток диаграммы направленности в любом направлении без искажения формы и параметров диаграммы направленности. Однако практическое использование таких линз долгое время сдерживалось следующими обстоятельствами: отсутствием строгих, и одновременно быстрых методов синтеза и анализа неоднородной многослойной структуры, неопределенностью рационального выбора числа и параметров слоёв, а также – высокой трудоёмкостью и себестоимостью изготовления градиентной диэлектрической структуры, или неоднородной метаматериальной среды, формирующих объемную линзу Люнеберга.

Разработанные в рамках диссертации Денисова Дмитрия Вадимовича методы анализа, оптимизации и реализации многослойных сферических линзовых структур позволяют решить актуальную научную проблему, связанную с устранением вышеперечисленных ограничений научно-методического аппарата, используемого для реализации антенных систем на основе объемной линзы Люнеберга, в рамках единой методологии: от электродинамических моделей анализа кусочно-координатной структуры, декомпозируемой на плоские, цилиндрические и сферические слоистые подобласти, сводящихся к системе линейных алгебраических уравнений, к

методике оптимизации геометрии слоев объемной линзы Люнеберга при изготовлении линз аддитивными методами, и к открытому программному обеспечению, позволяющему реализовать процедуры синтеза и анализа объемных линз Люнеберга. Развитие аддитивных технологий, сделавшее доступным печать слоёв с заданной неоднородностью эффективной диэлектрической проницаемости, а также рост потребности в многолучевых антенных системах для аппаратуры телекоммуникации, управления беспилотными летательными аппаратами, радиолокации и навигации, делают тему диссертации Денисова Дмитрия Вадимовича весьма актуальной.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения, списка сокращений, словаря терминов, списка литературы и приложений. Объём работы — 500 страниц, включая 130 рисунков и 93 таблицы; список литературы содержит 231 наименование. Изложение построено последовательно: обзор и постановка задач, электродинамический аппарат, дифракционные и антенные характеристики, оптимизация стратификации, модифицированные конфигурации, технология изготовления, обобщение физико-математического аппарата, его алгоритмизация и программная реализация.

Содержание работы и полученные результаты

Основная цель рассматриваемой диссертации 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.

В первой главе систематизированы теория, области применения и технологии изготовления градиентных сферических линз — от работы Р. Люнеберга 1944 года, до современных реализаций миллиметрового диапазона, включая многолучевые базовые станции, радиолокационные отражатели и маркеры ЭПР, в том числе для беспилотных аппаратов и воздушных мишеней. Анализ патентной активности по базе Google Patents (около 4,5 тысячи документов) убедительно подтверждает растущий интерес к теме. Обзор завершается формулировкой нерешённых задач, которые определили цель работы.

Во второй главе развит основной математический аппарат диссертации — метод тензорных функций Грина для многослойных сферических структур. Получено замкнутое представление функции Грина через решение обобщённых телеграфных уравнений и рекуррентный пересчёт направленных импедансов и адмитансов от слоя к слою, пригодный при любом числе слоёв, профиле проницаемости и типе возбуждения. Решены дифракционная и антенная канонические задачи. Метод проверен предельным переходом к ряду Ми для металлического шара и сравнением с конечноэлементным расчётом

для четырёхслойной линзы на частоте 10 ГГц; при совпадении диаграмм по положению и уровню всех лепестков расчёт выполняется на 2-4 порядка быстрее. Отдельно рассмотрены радиально-анизотропные слои и влияние диэлектрических потерь.

В третьей главе исследована дифракция плоской волны на линзе с отдельным учётом основной и кросс-поляризационной составляющих, что позволяет рассматривать как линейную, так и круговую поляризацию. Для восьмислойной линзы в диапазоне изменения электрической величины радиуса линзы от 0 до 25 рассчитан полный набор интегральных характеристик — полное, обратное, попутное сечения, сечение поглощения, поляризационные потери и направленность переизлучения. Тем самым шести-коэффициентный аппарат школы Б.А. Панченко, ранее известный для плоской и цилиндрической геометрий, распространён на сферический случай. Введённый коэффициент поляризационных потерь, осциллирующий по электрическому размеру, даёт практический критерий выбора числа слоёв.

В четвёртой главе решена центральная задача проектирования — дискретная аппроксимация непрерывного закона изменения эффективной диэлектрической проницаемости линзы Люнеберга. Сопоставлены равношаговая, оптимизированная по методу Фукса, и предложенная автором многокритериальная генетическая стратификация. Последняя, при восьми слоях линзы, снижает среднеквадратичную ошибку профиля до 0,032, что на 13 % меньше, чем у схемы метода Фукса, и на 23 % меньше, чем у равношаговой; при том же максимальном скачке диэлектрической проницаемости между слоями, что и у схемы метода Фукса, найденная точка фронта Парето даёт меньшее значение погрешности. Также решена обратная задача: обращением интегрального уравнения Абеля получен замкнутый закон преломления для линз-дефлекторов, отклоняющих параллельный пучок на заданный угол; линза Итона и однородная среда входят в этот класс, как предельные случаи.

В пятой главе линза рассмотрена как излучающая антенна. Систематизированы типы облучателей — открытый конец волновода, рупорные, полосковые, спиральные, турникетные излучатели и элементы Гюйгенса; для турникетного облучателя с рефлектором и элемента Гюйгенса рассчитаны коэффициенты использования поля в девяти точках электрического размера. Частотные зависимости коэффициента усиления получены с учётом всех составляющих потерь мощности. Предложена модификация линзы с осевым металлическим стержнем, повышающая жёсткость конструкции и снижающая обратное излучение на 8–12 дБ без потери усиления. Разработана двенадцатиканальная многолучевая антенна диапазона 24,25–24,65 ГГц, реализующая пассивную аналоговую архитектуру ММО.

В шестой главе исследованы антенные решётки, состоящие из нескольких линз Люнеберга меньшего диаметра. Получен множитель системы, установлены ограничения на период решётки, исключая дифракционные максимумы, рассмотрены суммарный и разностный режимы,

а также развязка между каналами. Показано, что замена одной крупной линзы решёткой уменьшает массу и расход диэлектрика на 50–70 % при сопоставимой ширине луча.

Седьмая глава посвящена модифицированным конфигурациям линзы Люнеберга. Для полусферической линзы на проводящем экране получена косекансная диаграмма для обзорной радиолокации (сектор $76,1^\circ$, уровень первого бокового лепестка $-25,4$ дБ и ниже) и установлено, что увеличение экрана свыше восьми длин волн не меняет характеристик; обоснованы геометрический и амплитудный способы формирования такой диаграммы. Предложены тороидальная линза, линза с центральным металлическим ядром (управление обратным излучением в пределах ± 10 дБ), магнетодиэлектрическая линза из импедансно-согласованного материала с эффективной диэлектрической проницаемостью, равной эффективной магнитной проницаемости, практически полностью подавляющая обратное рассеяние, а также сферические рассеиватели с промышленными радиопоглощающими покрытиями. Для метаматериальной сферы описан аналог эффекта Пендри.

В восьмой главе разработана технология изготовления многослойных линз методами FDM-печати из ударопрочного полистирола с расчётными кубическими пустотами (модель Лихтенекера) и контролем проницаемости слоёв волноводным методом Николсона-Росса-Вейра, а также альтернативная технология изготовления линзы из пенопласта переменной плотности. Изготовлены макеты линзы Люнеберга с диаметрами 50, 73 и 130 мм; отклонение реализованного профиля от расчётного не превышает 3 %. На основе использования модели малогабаритного беспилотного аппарата показана возможность управления величиной его эффективной поверхности рассеяния путем оптимизации размещения линз на его борту.

В девятой главе аппарат тензорных функций Грина обобщён на структуры, содержащие одновременно плоские, цилиндрические и сферические границы. Получены операторы сшивающих интерфейсов разной координатной симметрии на основе теорем сложения Релея-Гордона, Гегенбауэра-Графа и Якоби-Ангера-Графа, и вся задача электродинамического анализа сведена к единой блочной системе уравнений. Это открывает полуаналитический анализ линз, расположенных на корпусе носителя и в обтекателях, ранее доступный лишь объёмным численными методами.

В десятой главе описана открытая Python-библиотека GreenTensor, её связь с пакетом электродинамического моделирования Ansys HFSS через программу IronPython и веб-версия GreenTensor Studio, работающая в браузере. Библиотека снабжена набором регрессионных тестов: энергобаланс выполняется с погрешностью не хуже $6 \cdot 10^{-16}$, воспроизводятся парадокс экстинкции, рэлеевский и геометрооптический пределы. Показано применение библиотеки для генерации обучающих выборок и построения нейросетевых суррогатных моделей.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту

К числу наиболее значимых научных результатов, полученных автором на основании выполненных исследований и использованных для формулировки положений, выдвигаемых для публичной защиты, относятся:

- электродинамический аппарат анализа кусочно-координатных структур, замыкающий триаду «плоскость — цилиндр — сфера» в единой методологии; полуаналитический анализ структур со смешанной координатной симметрией ранее в литературе не описывался;
- открытая программная реализация аппарата с единым интерфейсом одночастотного расчёта и параметрического свипа, сделавшая возможной массовую генерацию данных для нейросетевых моделей;
- замкнутое аналитическое решение для класса линз-дефлекторов, обобщающее линзу Итона;
- описание в рамках одного математического аппарата модифицированных конфигураций линзы Люнеберга, формирующих диаграммы специального вида;
- трактовка выбора слоистого профиля как задачи многокритериальной оптимизации, учитывающей ограничения 3D-печати и критерий совместного выбора числа слоёв и рабочей полосы по коэффициенту поляризационных потерь.

Перечисленные положения научной новизны соответствует пунктам 1, 2, 3, 6, 8, 9 паспорта специальности 2.2.14 и подтверждены публикациями автора, в которых они опубликованы.

Обоснованность и достоверность результатов

Достоверность обеспечивается строгой электродинамической постановкой, проверкой предельных переходов к известным решениям, внутренними регрессионными тестами, сравнением с конечноэлементным моделированием в Ansys HFSS и экспериментальным исследованием изготовленных макетов.

Автор корректно разграничивает уровни подтверждения: преимущество восьмислойной оптимизированной стратификации установлено расчётом, а технология и аппарат анализа проверены на изготовленном трёхслойном макете диаметром 73 мм. Открытость исходного кода библиотеки позволяет любому исследователю независимо воспроизвести полученные результаты.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии анализа, синтеза и технологической реализации антенных систем, построенных на основе сферических линз Люнеберга: с линзами сферической, полусферической формы, а также — на основе антенных решеток, состоящих из линз Люнеберга, учитывающей влияние корпусов их базирования, для систем телекоммуникации, управления, радиолокации и навигации.

Практическая значимость результатов диссертации и их внедрение

Практическую ценность имеют следующие результаты диссертации: методика выбора числа и параметров слоёв под технологию печати; рекомендации по выбору облучателей; способы формирования косекансной и многолучевой диаграмм; технология изготовления линз на серийном оборудовании и открытая библиотека GreenTensor с веб-интерфейсом.

Использование результатов подтверждено семью актами внедрения в промышленных организациях и вузах, патентом на изобретение и свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

Публикации, апробация и автореферат

По теме диссертации опубликовано 57 работ, в том числе 18 статей в журналах перечня ВАК, 8 докладов в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, а также патенты и свидетельства о регистрации программ. Результаты доложены на международных и всероссийских конференциях, включая EuCAP, EuRAD/EuMC, TELFOR, USBEREIT и APEIE. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и правильно отражает её основные результаты.

Замечания по работе

1. В работе рассматриваются сферические, полусферические и тороидальные линзы, тогда как плоские (планарные) градиентные линзы, в том числе получаемые методами трансформационной оптики из сферической линзы Люнеберга, упоминаются лишь в обзоре. Для ряда применений с жёсткими требованиями к профилю антенны такие конструкции удобнее сферических, и их рассмотрение расширило бы область применения результатов.

2. Характеристики линз в основном представлены как функции величины их электрического радиуса. Для инженерного использования было бы удобнее дополнительно привести частотные зависимости коэффициента усиления и уровня боковых лепестков в рабочей полосе для конкретных конструкций.

3. Преимущества линзовых антенн перед фазированными антенными решётками по массе, стоимости и энергопотреблению обсуждаются в основном качественно; количественное технико-экономическое сравнение для типового применения усилило бы выводы работы.

4. Объём диссертации велик; обзорная первая глава и часть приложений могли бы быть сокращены без ущерба для содержания.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают защищаемых положений и не снижают высокой оценки работы.

Заключение

Результаты, полученные в диссертации Денисова Дмитрия Вадимовича, позволили решить крупную научную проблему согласованного электродинамического анализа, оптимизации и реализации многослойных

сферических линзовых структур. Ее решение имеет важное значение для разработки эффективных антенных устройств и совершенствования технологии их проектирования при реализации систем телекоммуникации, управления, радиолокации и навигации. Диссертация содержит новые научные результаты, отличается единством научно-методического подхода и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой полностью решена поставленная в диссертации цель исследования.

Несмотря на приведенные замечания, считаю, что диссертация Денисова Дмитрия Вадимовича «Методы анализа, оптимизации и реализации многослойных сферических линзовых структур», представленная на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии, полностью удовлетворяет всем критериям Положения ВАК РФ о присуждении учёных степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Считаю, что Денисов Дмитрий Вадимович достоин присуждения ему учёной степени доктора технических наук по научной специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Согласен с включением моих персональных данных в аттестационное дело соискателя Денисова Дмитрия Вадимовича и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный технический университет»

Ю. Г. Пастернак Пастернак Юрий Геннадьевич

«27» октября 2026 г.

Сведения об официальном оппоненте:

Почтовый адрес организации: 394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84. ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». Телефон рабочий: +7-4732-43-77-29. E-mail: pasternakyg@mail.ru

Подпись Пастернака Ю. Г. заверяю:

Проректор по науке и инновациям ФГБОУ ВО «ВГТУ»,
доктор технических наук

«27» октября 2026 г.



А. В. Башкиров Башкиров А.В.