

Обзор конструкций линзовых антенн Люнеберга, изготовленных методами 3D-печати

Д. В. Кусайкин^{1✉}, И. В. Григорьев³, Д. В. Денисов^{1,2}, П. А. Туральчук³

¹ Уральский технический институт связи и информатики
"УрТИСИ СибГУТИ", Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ kusaykin@mail.ru

Аннотация

Введение. Интерес к многолучевым диэлектрическим линзовым антеннам в последние годы растет в связи с развитием телекоммуникационных и радиолокационных систем миллиметрового диапазона. При разработке систем мобильной связи с технологией адаптивного формирования луча в качестве альтернативы сложным в реализации и обладающим высоким энергопотреблением фазированным антенным решеткам все чаще рассматривают многолучевые системы на основе линзовых антенн. В последние годы появилось много публикаций по разработке сферических и цилиндрических линзовых антенн Люнеберга, реализованных с помощью технологии аддитивного производства. В данной статье приведен обзор линзовых антенн Люнеберга, изготовленных с помощью 3D-печати, которые могут найти применение в системах мобильной связи пятого и шестого поколений.

Цель работы. Обзор достижений в области изготовления линзовых антенн Люнеберга различными конструкциями аддитивными методами производства.

Материалы и методы. Материалы для анализа и систематизации были отобраны из отечественных и зарубежных научных публикаций, тезисов докладов всероссийских, международных конференций, а также веб-сайтов производителей линзовых антенн за последние 20 лет. Механизм отбора материала основывался на оригинальности представленных конструкций напечатанных линзовых антенн Люнеберга.

Результаты. Проведен обзор конструкций линзовых антенн Люнеберга, изготовленных с помощью 3D-печати, которые отличаются друг от друга механической прочностью, сложностью исполнения и электродинамическими характеристиками. Представлены результаты сравнительного анализа ключевых характеристик этих антенн, а также приведены примеры их практической реализации.

Заключение. Недостатком линзовых антенн Люнеберга всегда выступала сложность их изготовления, однако технологии аддитивного производства открывают новые возможности для быстрого, качественного и автоматизированного производства. Для создания диэлектрических линзовых антенн могут быть применены различные технологии 3D-печати, отличающиеся разрешающей способностью принтеров, скоростью печати и себестоимостью. С каждым годом методы аддитивного производства непрерывно развиваются и в настоящий момент достигнуты технологические возможности печати линзы Люнеберга для суб-ТГц-диапазона с высоким разрешением и точностью. Также появились 3D-принтеры, способные печатать одновременно несколько линз.

Ключевые слова: аддитивные технологии производства, 3D-печать, линзовая антенна, линза Люнеберга, сферическая линза, стереолитография, цилиндрическая линза

Для цитирования: Обзор конструкций линзовых антенн Люнеберга, изготовленных методами 3D-печати / Д. В. Кусайкин, И. В. Григорьев, Д. В. Денисов, П. А. Туральчук // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 2. С. 6–36. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-6-36

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания № 071–03–2023–001.

Статья поступила в редакцию 18.12.2023; принята к публикации после рецензирования 13.02.2024; опубликована онлайн 29.04.2024

Review of Luneburg Lens Antenna Designs Manufactured Using 3D Printing

Dmitry V. Kusaykin^{1✉}, Igor V. Grigoriev³, Dmitry V. Denisov^{1,2}, Pavel A. Turalchuk³

¹ Ural Technical Institute of Communications and Informatics, Yekaterinburg, Russia.

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia.

³ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ kusaykin@mail.ru

Abstract

Introduction. The interest in multibeam dielectric lens antenna arrays has been growing in recent years due to the development of millimeter-wave telecommunication and radar systems. Progress in the development of mobile communication systems based on adaptive beamforming technology is increasingly associated with multibeam systems based on lens antenna structures, providing an alternative to hard-to-implement and energy-consuming phased antenna arrays. In recent years, spherical and cylindrical Luneburg lens antennas implemented using additive manufacturing technology have attracted research attention. Despite their complexity of execution, these design exhibit excellent electromagnetic characteristics. This paper provides a review of Luneburg lens antennas manufactured using 3D printing, which can find application in 5G and 6G communication systems.

Aim. To review achievements in the design of lens antenna structures manufactured using additive manufacturing.

Materials and methods. Materials for analysis, comparison, and systematization were derived from various sources, including research articles, publications in proceedings of Russian and international conferences, and websites of manufacturers of lens antennas over the past 20 years. The material selection mechanism was based on the originality of the presented designs of printed Luneburg lens antennas.

Results. A review of Luneburg lens antennas manufactured using 3D printing, which differ from each other in terms of mechanical strength, complexity of execution, and electrodynamic characteristics, was carried out. The results of a comparative analysis of the key characteristics of these antennas are presented, along with examples of their practical implementation.

Conclusion. The disadvantage of Luneburg lens antennas has always been the complexity of their manufacture; however, additive manufacturing technologies open up new opportunities for their fast, high-quality, and automated production. Various 3D printing technologies can be used to create dielectric lens antennas, which differ in the resolution of printers, printing speed, and cost. Additive manufacturing methods are constantly developing, having reached the technological possibility of printing Luneburg lens for the sub-THz range with a high level of resolution and accuracy. In addition, 3D printers capable of printing multiple lenses simultaneously have also appeared.

Keywords: additive manufacturing technologies, 3D printing, lens antenna, Luneburg lens, spherical lens, stereolithography, cylindrical lens

For citation: Kusaykin D. V., Grigoriev I. V., Denisov D. V., Turalchuk P. A. Review of Luneburg Lens Antenna Designs Manufactured Using 3D Printing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 2, pp. 6–36. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-2-6-36

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of funding. This work was funded by the subsidy allocated the State Task No. 071–03-2023-001.

Submitted 18.12.2023; accepted 13.02.2024; published online 29.04.2024

Введение. Поколение сетей 5G впервые ознаменовало работу в новом для сотовых сетей миллиметровом диапазоне длин волн. Соответственно, появилась потребность в развитии оборудования для этого частотного диапазона, в том числе антенных систем. На крайних высоких частотах проявляется относительно

большое затухание сигнала при его распространении, поэтому для сетей 5G требуются антенны с высоким коэффициентом усиления (КУ). Также для диапазона миллиметровых волн при сравнительно малых габаритах антенн перспективными реализациями являются антенные системы с адаптивным формиро-

Обзор конструкций линзовых антенн Люнеберга, изготовленных методами 3D-печати

Review of Luneburg Lens Antenna Designs Manufactured Using 3D Printing

нием луча в направлении абонентского устройства (технология beamforming) и пространственным мультиплексированием по технологии Massive MIMO. Это позволяет повысить значение отношения сигнал/шум на входе мобильных приемников и улучшить пропускную способность канала связи.

Создание эффективной реконфигурируемой многолучевой антенны возможно на основе линзы Лüneберга (ЛЛ). Высокоточные ЛЛ с возможностью формирования нескольких лучей хорошо подходят для задач определения направления принимаемых радиоволн. Данные антенны во многих приложениях (например, системы радиопеленгации, сети 5G и др.) часто рассматривают перспективной альтернативой традиционным фазированным антенным решеткам (ФАР).

ФАР обладают относительно высокой скоростью переключения луча. Несмотря на то что подобный тип антенн уже достаточно долгое время используется в различных радиотехнических системах, они не лишены существенных недостатков. Во-первых, секторы сканирования весьма ограничены: типичная ФАР не способна работать в диапазоне более $\pm 60^\circ$ как в азимутальной, так и в угломестной плоскостях из-за значительного падения КУ и, соответственно, увеличения бокового излучения при сканировании в широком диапазоне углов. Во-вторых, типичной конструкцией ФАР является совокупность большого количества слабонаправленных излучателей, диаграммообразующей схемы в виде направленных ответвителей мощности и системы управления лучом, состоящей из множества фазовращателей. В совокупности это приводит к высокой конструктивной сложности, трудностям при реализации управления диаграммой направленности (ДН) и высокой стоимости антенной системы. В-третьих, ФАР имеют весьма ограниченную рабочую полосу частот.

В сравнении с ФАР ЛЛ можно отнести к широкополосным и сверхширокополосным антеннам. Важными преимуществами данного типа линз является отсутствие падения КУ при широкоугольном сканировании и малое энергопотребление относительно антенных решеток. К недостаткам линзовых антенн Лüneберга чаще всего относят сложность их изготовления и значительные массогабаритные парамет-

ры. Однако при работе в миллиметровом диапазоне длин волн антенна может быть малогабаритной и легкой. Например, сферическая линза диаметром 62 мм, реализованная с помощью технологии аддитивного производства (3D-печати) из фотополимерной смолы Rogers с центральной рабочей частотой 30 ГГц, имеет массу всего 34 г [1]. Линзовая антенна Лüneберга, учитывая перечисленные достоинства, рассматривается как одна из самых перспективных антенн для миллиметрового диапазона сетей 5G [2].

Традиционно ЛЛ могут быть изготовлены субтрактивными методами, например с помощью сверления отверстий с определенным шагом в подложках из фторопласта (создание перфорированных пластин) для достижения требуемой эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_r [3]. Другим способом изготовления может являться использование набора материалов с различным значением диэлектрической проницаемости [4]. Также добиться неоднородного распределения диэлектрической проницаемости в некотором объеме можно за счет использования метаматериалов [4]. Все эти методы представляют собой достаточно сложный и трудоемкий технологический процесс и не всегда могут быть использованы в миллиметровом диапазоне длин волн. Развитие технологий аддитивного производства может значительно упростить процесс изготовления ЛЛ.

Обзор современных способов и средств технической реализации ЛЛ представлен в [5], однако технологии 3D-печати не уделено большого внимания. В данной статье приведен краткий обзор различных технологий 3D-печати и анализа конструкций линзовых антенн Лüneберга.

Обзор технологий 3D-печати. В конце XX в. эволюция производственных процессов привела к появлению альтернатив традиционным методам производства, таких как токарная обработка, фрезерование, сверление, шлифование, литье, травление и другие методы механической или химической обработки. Появились новые методы производства трехмерных объектов путем послойного добавления двумерных профилей. Идея быстрого прототипирования с использованием аддитивных технологий начала обсуждаться в начале 1970-х гг. С тех пор аддитивные технологии быстро развива-

лись, стали более доступными. Прогресс в области аддитивного производства продолжается и сегодня с постепенным улучшением существующих технологий, разработкой новых технологий и материалов. В настоящее время аддитивные технологии находят применение не только в механике или биоинженерии, но также в электронике и радиотехнике.

Таким образом, помимо механических свойств материалов для 3D-печати все большее внимание начинает уделяться исследованию их электромагнитных свойств, таких как диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь.

Существуют различные виды 3D-печати. К наиболее часто используемым для производства антенн относят метод послойного наплавления (Fused deposition modelling – FDM), стереолитографию (Stereolithography – SLA), селективное лазерное спекание (Selective laser sintering – SLS) и струйную печать (Jet modelling – JM).

Метод FDM является одним из самых популярных в 3D-печати. FDM-технология основана на последовательном послойном осаждении

расплавленного термопластического материала и постепенном формировании объемной модели (рис. 1). Особенно привлекательным этот метод делает его доступность. Стоимость принтеров и расходных материалов ниже по сравнению с другими технологиями. Широкий спектр используемых материалов также является одним из достоинств. Заметным недостатком может являться низкое качество поверхности печатных образцов. Однако проблему значительной шероховатости поверхностей модели можно решить путем последующей механической или химической обработки.

Печать методом стереолитографии основана на полимеризации светочувствительных материалов под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения. Отличительной особенностью этой технологии является необходимость постобработки структуры посредством дополнительного УФ-отверждения после печати, которое улучшает механические свойства изготавливаемой структуры, включая прочность на разрыв и пластичность.

Также печать структур из жидкого полимера возможна с использованием цифровой светоди-

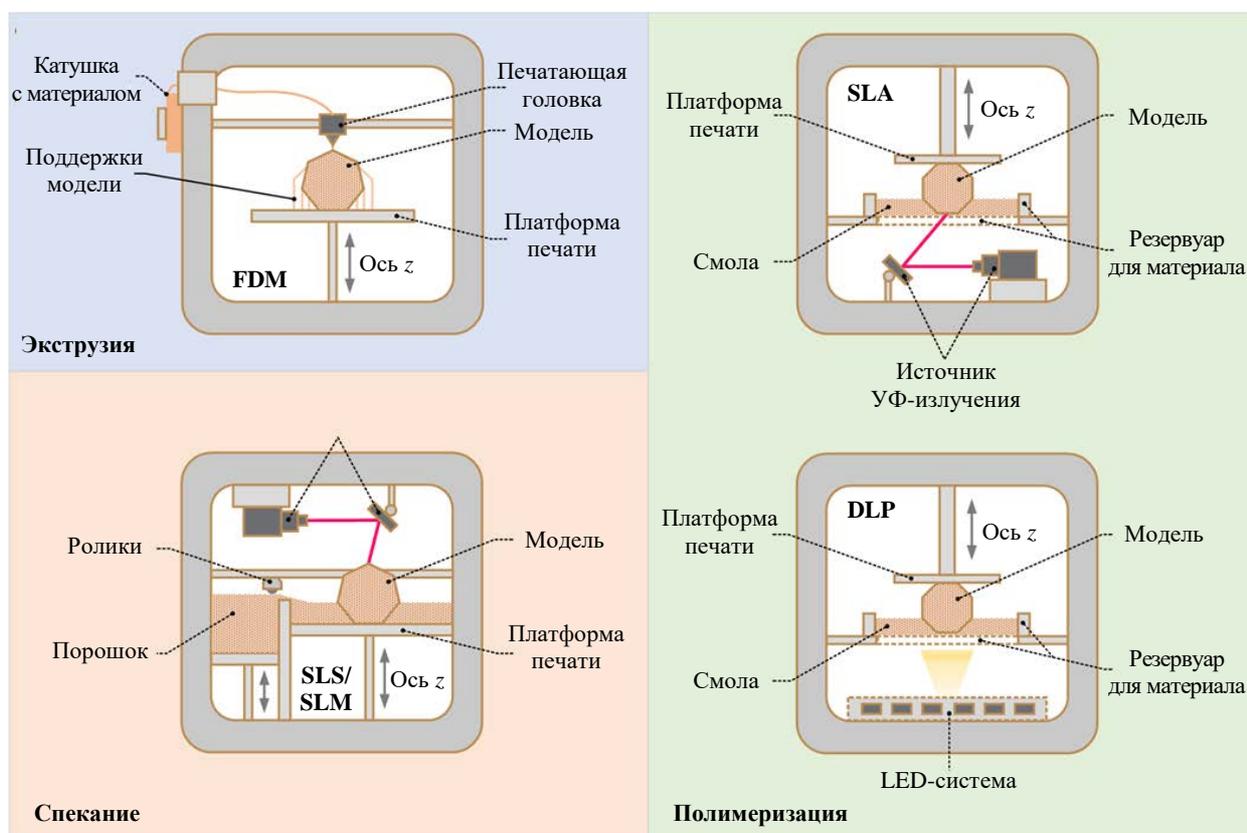


Рис. 1. Виды аддитивных технологий

Fig. 1. Types of additive technologies

одной проекции (Digital light processing – DLP), позволяющей сократить время печати. Технологии DLP и SLA демонстрируют исключительные возможности высокопроизводительной печати, достигая разрешения до 10 мкм. Это стало возможным благодаря использованию фотополимера в жидкой форме, который обладает высокой смачиваемостью и обеспечивает бесшовный контакт слоев. Технология DLP ограничена пиксельным построением матрицы и в связи с этим приводит к небольшому увеличению шероховатости относительно технологии SLA.

Технологиям SLA и DLP характерен разнообразный выбор материалов. Смолы, используемые в 3D-печати, различаются не только по механическим свойствам, но и по достигаемому разрешению. Даже цвет смолы может повлиять на точность изготовления модели, поскольку более темные смолы эффективнее поглощают свет, что приводит к улучшению обеспечиваемой разрешающей способности.

До некоторого времени применение подобных материалов для сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона было ограничено высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь. Однако, к примеру, корпорация Rogers Corp. разработала новый фотополимер для 3D-печати DLP и SLA с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2.6$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan \delta = 0.0043$. Жидкий фотополимер разработан для применения в верхней области СВЧ и диапазоне миллиметровых волн [1]. Для сравнительного испытания нового фотополимера были изготовлены две линзовые антенны эквивалентной конструкции: одна напечатана новым материалом, вторая – имеющимся в продаже полимером с $\epsilon_r = 2.9$ и $\tan \delta = 0.044$ на частоте 10 ГГц. Анализ диаграмм направленности изготовленных антенн показал, что линза на основе нового фотополимера демонстрирует КУ на 4 дБи больше по сравнению с линзой, изготовленной из обычного фотополимерного материала. Появление подобных смол с относительно низкими диэлектрическими потерями для данных диапазонов обусловлено в том числе актуальностью разработки линзовых антенн для различных радиотехнических и телекоммуникационных систем.

При этом существуют коммерчески доступные 3D-принтеры, способные печатать одновременно 5 ЛЛ, что значительно сокращает время их изготовления [1].

Еще одним видом аддитивных технологий является селективное лазерное спекание. SLS-метод основан на спекании порошка с помощью лазера. На протяжении всей процедуры печати порошкообразный материал равномерно распределяется по платформе с помощью валика, после чего лазер избирательно спекает порошок по заданному пути (см. рис. 1). При этом не требуется использование опорных конструкций даже для моделей сложной формы, так как сам порошкообразный материал служит материалом-поддержкой. На этом же принципе основана технология селективного лазерного плавления (Selective laser melting – SLM). В качестве порошка используется мелкодисперсная металлическая стружка, а не диэлектрические материалы. Наибольшее распространение технологии SLS/SLM нашли в конструкциях, требующих высокой надежности, где важны долговечность, пластичность и устойчивость к атмосферным условиям. Главным преимуществом данных технологий является высокая прочность изготавливаемых деталей.

Технологии SLS/SLM реализованы в профессиональных дорогих принтерах и, соответственно, требуют высокой квалификации операторов, особенно SLM-технология. Ввиду этих недостатков количество публикаций с изготовлением ЛЛ по технологиям SLS/SLM существенно меньше, в сравнении с FDM и SLA.

3D-печать сферических линзовых антенн Люнеберга. Изготовление линзовой антенны с неоднородным распределением показателя преломления является сложным технологическим процессом. Диэлектрическая проницаемость материала вдоль оси сферической линзы должна изменяться в соответствии с законом

$$n(r)^2 = \epsilon_r(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость; r – радиальная координата в сферической системе; R – радиус линзы. Значение относительной диэлектрической проницаемости варьируется от 1 во внешней части линзы

до 2 в ее центре. Поскольку большинство полимеров для 3D-печати имеют значение ϵ_r больше 2.5, требуемое значение относительной диэлектрической проницаемости ЛЛ достигается за счет добавления воздушных пустот либо иного материала.

На сегодняшний день одна из самых распространенных конструкций ЛЛ, изготовленная методом 3D-печати, представляет собой набор элементарных ячеек в виде кубов с разным процентным соотношением в них полимера и воздуха. В [6] представлена линза подобной конструкции диаметром 12 см из 7497 элементарных ячеек (кубов), предназначенная для работы в X-диапазоне (8.2...12.4 ГГц). Линза была изготовлена с применением технологии 3D-печати PolyJet, которая, как и SLA, основана на послойном отверждении жидкого фотополимерного материала под воздействием УФ-излучения. В качестве каркаса конструкции используются стержни диаметром 0.8 мм. Размер элементарной ячейки не превышает $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$, т. е. $\lambda/6$ на частоте 10 ГГц.

Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) полимера, из которого была напечатана линза, составляет 2.7, а тангенс угла диэлектрических потерь материала равен 0.02. Важно отметить, что это относительно большое значение, например, в сравнении с материалами в [7], что может привести к снижению эффективности антенны. Требуемое распределение показателя преломления линзы (1) достигается степенью заполнения полимером каждой элементарной ячейки. Табл. 1 содержит результаты измерений ϵ_r и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) при разных заполнениях ячейки полимером.

Измерения показали, что КУ рассматриваемой линзовой антенны составляет 18 дБи, а ширина диаграммы направленности (ШДН) на уровне половинной мощности равна 14° . Линза диаметром 10 см с аналогичной конструкцией из кубических ячеек и для того же X-диапазона, но изготовленная по технологии SLA, представлена в [8]. КУ антенны составляет 15 дБи на частоте 10 ГГц.

В [9] представлена ЛЛ с центральной рабочей частотой 26 ГГц и размером ячеек $2 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$. Поскольку толщина соединительных стержней в каркасе ячеек относительно малая и составляет $0.25 \times 0.25 \text{ мм}$, то для печати целесообразно использовать не FDM-, а SLA-технологии. За основу элементарной ячейки можно использовать разные фигуры: сферу, куб или октаэдр (рис. 2, а). ЛЛ реализована с использованием октаэдра из материала с $\epsilon_r = 3.2$ и $\text{tg } \delta = 0.026$. Линза радиусом 3 см и облучателем в виде открытого конца волновода обладает максимальным КУ 23.6 дБи, уровнем боковых лепестков (УБЛ) ниже -17 дБ , а ШДН не более 11.3° . Стоит отметить, что диэлектрическая проницаемость элементарных ячеек в форме куба на частотах 8...12 ГГц исследована в [10], однако не указано для какого материала 3D-печати были проведены измерения.

С помощью стереолитографии возможно изготовление ЛЛ из керамики. В этом случае полимерная смола заменяется фотореактивной керамической суспензией. В результате 3D-печати получается заполненная полимером деталь, содержащая большую объемную долю керамики. Полимерная часть в детали удаляется пиролизом. В [11] керамическая стереолито-

Табл. 1. Результаты измерения ϵ_r и $\text{tg } \delta$ при разных заполнениях ячейки полимером

Tab. 1. Measured results of ϵ_r and $\text{tg } \delta$ for different infill percentage of polymer in a unit cell

Размер стороны куба из полимера, мм	0.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00
Коэффициент заполнения	0.001	0.059	0.114	0.198	0.343	0.512	0.614	0.729	0.857	1.000
ϵ_r	1.002	1.100	1.195	1.337	1.583	1.870	2.044	2.239	2.458	2.700
$\text{tg } \delta$	0.003	0.004	0.006	0.009	0.013	0.018	0.020	0.022	0.026	0.030

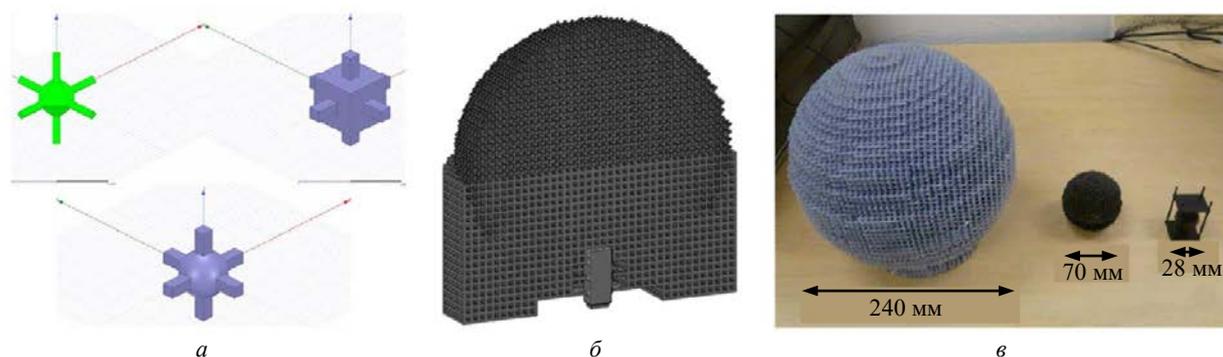


Рис. 2. Конструкции сферической ЛЛ: а – виды элементарных ячеек [9]; б – линза диаметром 54 мм, напечатанная по технологии SLA [11]; в – ЛЛ, напечатанные по технологии PolyJet [12]

Fig. 2. Designs of spherical LL: а – unit cell designs [9]; б – SLA-printed LL with diameter 54 mm [11]; в – PolyJet-printed LLs [12]

графия применена для изготовления трехмерной ЛЛ с использованием кубических ячеек (рис. 2, б). Линза диаметром 54 мм была изготовлена из оксида алюминия ($\epsilon_r = 9.7$, $\text{tg } \delta = 0.0002$). Центральная рабочая частота составляет 30 ГГц. Из-за ограничений, связанных с минимальной толщиной стенок элементарных ячеек, относительная диэлектрическая проницаемость для внешнего слоя ЛЛ составляет 1.23 вместо 1. Изотропная решетка была выбрана с периодичностью 1.4 мм. Минимальная толщина стенок составляла 340 мкм, а максимальная 650 мкм. С облучателем в виде квадратного диэлектрического волновода КУ составил 24 дБи. Очевидным преимуществом керамической стереолитографии является низкое значение тангенса угла диэлектрических потерь материала.

Другие примеры ЛЛ с кубическими элементарными ячейками представлены на рис. 2, в. Антенны изготовлены методом полимерной струйной печати диаметром 240 мм (для диапазона частот до 20 ГГц); диаметром 70 мм (для диапазона до 40 ГГц); диаметром 28 мм с опорной конструкцией (для диапазона до 110 ГГц) [12].

Изготовление линзы технологиями 3D-печати с конструкцией в виде ячеек с воздушными пустотами дает дополнительное преимущество в виде снижения массы линзы. Например, сферическая линза диаметром 62 мм, реализованная с помощью 3D-печати из фотополимерной смолы Rogers, имеет массу 34 г, а изготовленная из рексолита однородная диэлектрическая линза такого же диаметра – 131 г, т. е. почти в 4 раза больше, при этом выигрыш в массе достигается без ухудшения направленных свойств антенны.

Напечатанная линза на основе кубических ячеек рассматривается также в [13], но в реализации бифункциональной линзы Люнеберга–Итона. Сферическая линза спроектирована как ЛЛ для падающей волны с вертикальной поляризацией и как линза Итона–Липмана для волны с горизонтальной поляризацией. Для прототипа антенны используется облучатель в виде волновода WR-90 для X-диапазона (8...12 ГГц). КУ антенны в этом диапазоне составляет 15.7...16.4 дБи.

В [14] представлена ЛЛ для Ka-диапазона (26.5...40 ГГц), конструкция которой представляет собой сферу из напечатанных на 3D-принтере полимерных колец (рис. 3, а). Для их соединения были добавлены стержни толщиной 0.6 мм в трех вертикальных плоскостях. Линза была напечатана с использованием фотополимера VeroClear с $\epsilon_r = 2.9$ и $\text{tg } \delta = 0.01$. Прототип создан с облучателями, выполненными в виде магнитоэлектрических диполей, каждый из которых объединяет в себе два разных типа излучателей: полуволновой диполь (работающий как электрический диполь) и четвертьволновой диполь (работающий как магнитный диполь) [15]. ЛЛ формирует излучение в 9 заданных направлениях в угловом секторе $\pm 61^\circ$. Антенне характерен КУ до 21.2 дБи и эффективность излучения (коэффициент полезного действия – КПД) около 75 %. Как отмечают разработчики, данная линзовая антенна Люнеберга может стать перспективным решением для использования в системах MIMO 5G в диапазонах 28 и 38 ГГц.

Одна из самых простых конструкций ЛЛ представляет собой сферу с разной плотностью

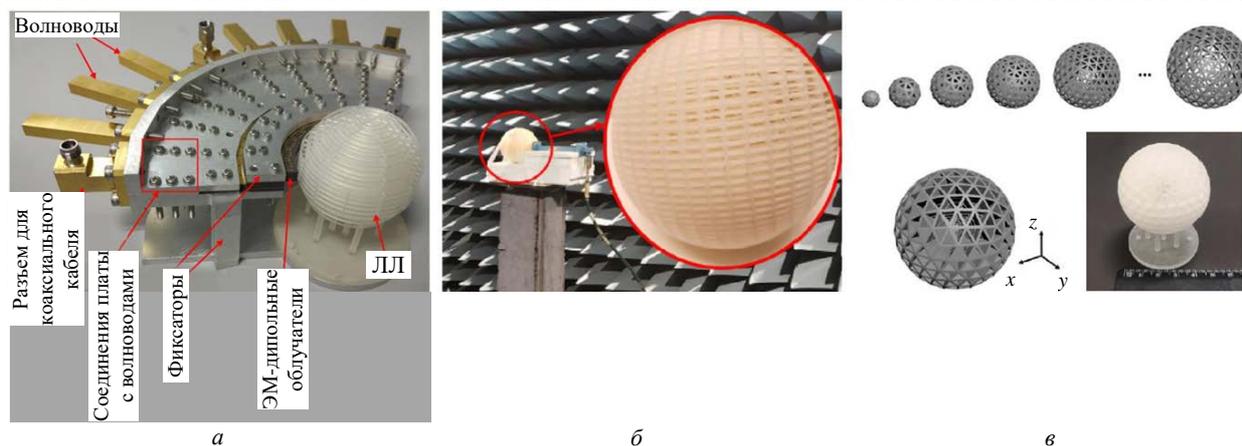


Рис. 3. Реализации сферической ЛЛ: а – состоящая из полимерных колец [14]; б – состоящая из элементарных ячеек с прямоугольными воздушными полостями [17]; в – состоящая из сферических слоев в форме икосаэдра [18]

Fig. 3. Designs of spherical LL: а – design based on polymer rings [14]; б – based on unit cells with rectangular cutouts [17]; в – with spherical layers based on using icosahedrons [18]

печати каждого слоя, задаваемой стандартными настройками печати. В [16] представлена конструкция такой линзы диаметром 11.8 см. Четыре внутренних слоя изготовлены на 3D-принтере отечественного производства Maestro 3D с процентом заполнения: 26, 46, 61, 77 % соответственно. В качестве материала печати использовался пластик HIPS, а внешний слой изготавливался отдельно в виде колец из акримида ($\text{tg } \delta = 1.1$). Характеристики линзовой антенны исследовались в диапазоне 12...18 ГГц, КУ в нем составил 20...25 дБи. В качестве облучателя использовалась компактная рупорная антенна. Результаты показали, что неравномерность фазового распределения в раскрытие линзы не превышает 7° ($50 \pm 7^\circ$).

В [17] для достижения требуемой диэлектрической проницаемости слоев линзы их плотность формируется прямоугольными отверстиями разного размера. Внешний слой линзы печатается с конфигурацией 2×2 , внутренний – с конфигурацией 4×4 . Материалом печати выбран полимер Nylon 6. Линза реализуется в виде двух полусфер, которые затем склеиваются друг с другом. Прототип сферической линзовой антенны тестировался в безэховой камере с облучателем в виде прямоугольного волновода на частоте от 8 до 12 ГГц (рис. 3, б). КУ составил 20.5 дБи, а ШДН равна 13.5°.

Несмотря на быстроту и удобство изготовления сферической линзовой антенны методом 3D-печати, существует ряд определенных трудностей, таких как зависимость поляризации-

ных характеристик линзы от выбранного типа элементарной ячейки, хрупкость конструкции (особенно для печати по SLA-технологии), сложность реализации многолучевой антенны из-за необходимости интеграции нескольких облучателей вдоль сферической поверхности.

Конструкция линзы зачастую является анизотропной. Например, ЛЛ, состоящая из колец [14], поддерживает работу только для вертикальной поляризации. Также сложнее реализовать сферическую линзу с круговой поляризацией (КП), так как волны с КП будут искажаться после прохождения через анизотропную среду. ЛЛ, которые могли бы поддерживать КП без искажений, заслуживают изучения и требуются во многих приложениях для систем связи.

Хрупкость конструкции может быть обусловлена тем, что размеры элементарных ячеек линзы должны быть меньше длины волны, что для диапазона миллиметровых волн составляет менее 2.5 мм. Тогда для реализации внешнего слоя с близкой к единице диэлектрической проницаемостью необходимо использовать элементарные ячейки с малым процентным содержанием пластика. Поскольку толщина стенок ячейки должна быть значительно меньше ее размера для получения близкого к единице значения диэлектрической проницаемости внешнего слоя линзы, при использовании классических полимеров 3D-печати необходимо заранее учитывать прочностные характеристики конструкции.

Перечисленные обстоятельства учитываются в [18], где представлены результаты исследова-

дования структуры линзы в виде икосаэдра – одного из платоновых тел (рис. 3, в). Напомним, что платоновы тела представляют собой правильные выпуклые многогранники, построенные из конгруэнтных правильных многоугольников. Существует пять правильных многогранников, и из них больше всего граней у икосаэдра. Этот факт побудил исследователей выбрать структуру икосаэдра для реализации тела ЛЛ, учитывая также его идеальную симметрию. Икосаэдр состоит из 20 одинаковых равносторонних треугольников.

При разработке ЛЛ часто пользуются теорией эффективных сред (Effective medium theory – ЕМТ), чтобы определить изменение диэлектрической проницаемости слоев с разными параметрами. Согласно этой теории с помощью аппроксимации определяется эффективная диэлектрическая проницаемость композитного материала на основе его состава и структуры. Среди различных ЕМТ-методов одним из наиболее эффективных является метод Бруггмана (Asymmetric Bruggman – А-ВГ) [19]:

$$\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_K}{\varepsilon_B - \varepsilon_G} = (1 - p) \left(\frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_G} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где ε_B , ε_G и ε_K – диэлектрические проницаемости вводимого материала (наполнителя), базового (основного) и результирующего материала соответственно; p – коэффициент заполнения. Для линзы радиусом R , состоящей из N слоев равной толщины, диэлектрическая проницаемость i -го слоя соответствует уравнению

$$\varepsilon_i = \varepsilon_r \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{2} \right); \quad (3)$$

$$r_{i+1} - r_i = R/N, \quad (4)$$

где r – радиус слоя.

Если основным материалом является воздух ($\varepsilon_G = 1$), тогда коэффициент заполнения p одной ячейки в каждом слое может быть определен на основе (2) после получения заданной диэлектрической проницаемости соответствующих слоев с помощью (3) и (4), а также диэлектрической проницаемости материала наполнителя (ε_B). Следует отметить, что метод А-ВГ справедлив только в случае равномерного распределения вводи-

мого материала, а также при условии, что размер каждой ячейки лежит в диапазоне $\lambda/10 \sim \lambda/4$.

В ЛЛ с конструкцией икосаэдра для выполнения требований метода А-ВГ к размерам элементарной ячейки каждый треугольник разбивается на n^2 треугольников, где n – порядок разбиения. Реализованная линзовая антенна содержит 10 слоев в форме икосаэдров, каждый из которых состоит из $20n^2$ треугольников. Диаметр линзы составляет 48 мм при толщине каждого слоя 2.4 мм. Линза напечатана по SLA-технологии, в качестве материала использована фотополимерная смола FLGPCL02 ($\varepsilon_r = 2.85$; $\text{tg } \delta = 0.02$).

Благодаря сферической симметрии ЛЛ форма луча может практически не изменяться в широком диапазоне сканирования [20]. В [21] показана линза, обеспечивающая сканирование лучом с произвольным направлением излучения с помощью управления амплитудой и фазой волны. Изготовленная по технологии струйной печати (PolyJet) ЛЛ диаметром 24 см имеет ШДН около 3.5° и КУ 30.2 дБи на частоте 19.8 ГГц.

В [22] представлена напечатанная на 3D-принтере ЛЛ для системы пеленгации диаметром 24 см с пятью детекторами в виде монополярных антенн, равномерно расположенных вдоль поверхности линзы с разнесением в 10° для приема сигнала в диапазоне от -20 до 20° в азимутальной плоскости. Первоначальные результаты радиопеленгации показывают, что расчетная погрешность составляет менее 2° для радиосигналов, приходящих в диапазоне углов от -15 до 15° . Подробное описание системы радиопеленгации на основе 3D-печатной ЛЛ можно найти в [23].

Как было отмечено ранее, актуальной является задача разработки ЛЛ с КП. В [24] представлена сферическая ЛЛ X-диапазона, структура которой выполняет функцию не только линзы, но и преобразователя поляризации, который изменяет линейную поляризацию падающей волны на круговую, при расположении облучателя под определенным углом поворота α относительно оси x (рис. 4, а). ЛЛ работает как поляризатор радиодиапазона. Все слои соединяются стержнем в вертикальной плоскости. Учитывая, что стержень должен обладать достаточной прочностью и как

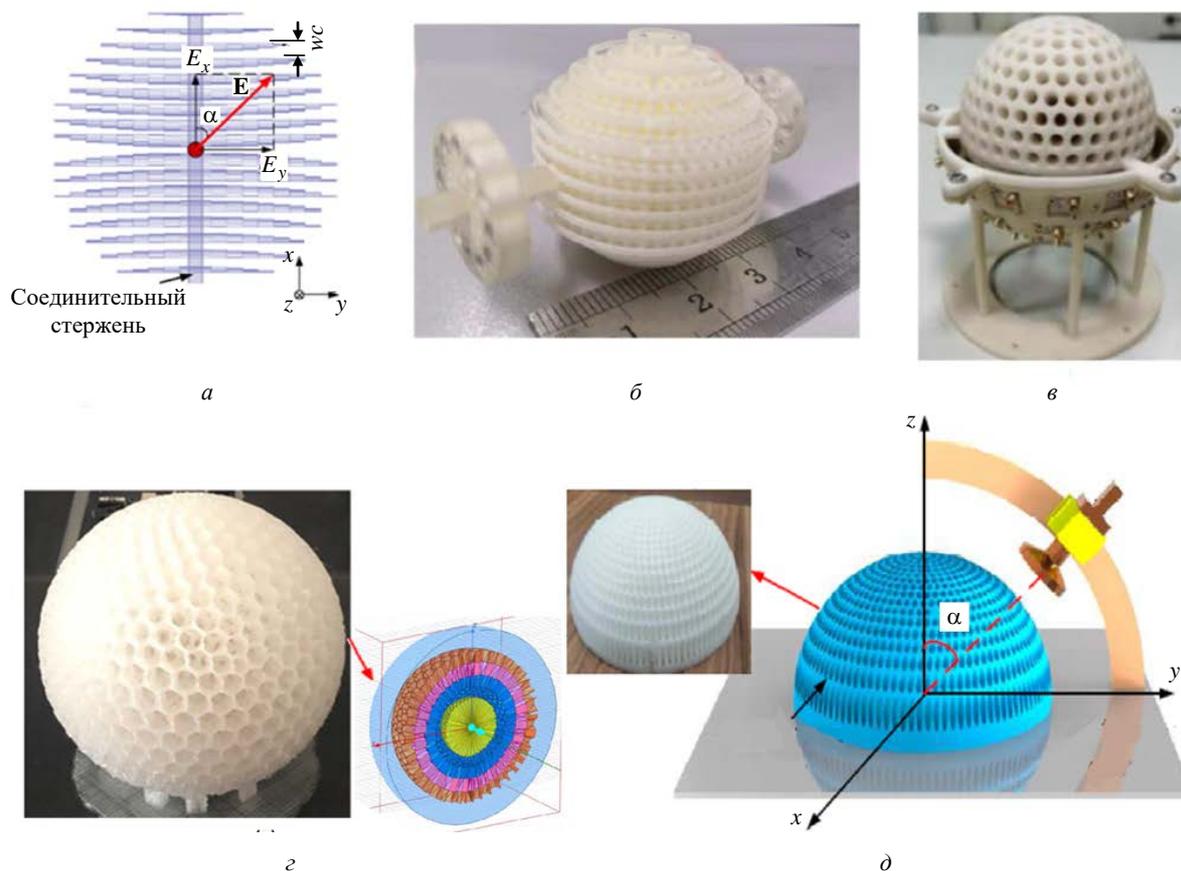


Рис. 4. Конструкции ЛЛ: а – из полимерных пластин на стержне [24]; б – из кубических ячеек и колец [20]; в – двухслойная сферическая линзовая антенна [25]; г – в форме многогранника Голдберга [28]; д – полусферическая линза с вертикальными отверстиями [30]

Fig. 4. Designs of LL: а – based on polymer slabs connected by vertical rod [24]; б – based on a cubic unit cell and rings [20]; в – two-layer lens antenna [25]; г – lens in the shape of a Goldberg polyhedron [28]; д – hemispherical lens with vertical holes [30]

можно меньше воздействовать на характеристики излучения, его ширина выбрана равной 4 мм. Для изготовления ЛЛ используется материал PLA + ($\epsilon_r = 2.54$, $\text{tg } \delta = 0.0045$), в качестве облучателя выступает антенна Вивальди. По результатам измерения КУ составляет не менее 10 дБи.

В [20] геометрия сферической линзы представлена сочетанием структур кубического и кольцевого типа (рис. 4, б). Особенностью предложенной конструкции является то, что при изменении размера куба диэлектрическая проницаемость структуры при горизонтальной и вертикальной поляризации имеет одинаковое значение в диапазоне от 1.3 до 2, а расхождение значений для двух режимов поляризации при изменении размера колец невелико при близком к единице значении ϵ_r . В результате такая конструкция ЛЛ является почти изотропной в режиме двойной поляризации. ЛЛ состоит из семи слоев, из которых внутренние шесть кубического

типа, а внешний слой – кольцевого. Облучателем выбрана рупорная антенна с квадратной апертурой, что гарантирует квазисимметричные диаграммы направленности в E - и H -плоскостях.

В [25] представлена двухслойная сферическая линзовая антенна, конструкция которой изображена на рис. 4, в. Предлагаемая линза не является в традиционном понимании ЛЛ, так как диэлектрическая проницаемость внутреннего слоя составляет 2.7 (материал PA3300 с $\text{tg } \delta \approx 0.005$ на частоте 8 ГГц). В качестве облучателей использовались патч-антенны с КП. Отдельно была спроектирована несущая конструкция для антенной решетки, которая была также напечатана на 3D-принтере. Измеренный КУ варьировался в диапазоне 14.3...15.3 дБи в диапазоне частот 7.7...8.2 ГГц. Антенна обладает возможностью двумерного сверхширокоугольного сканирования с охватом 360° в азимутальной плоскости и $\pm 90^\circ$ – в угломестной.

Представляет интерес сравнение двух подходов изготовления сферических ЛЛ для W-диапазона (75...110 ГГц) в соответствии с аддитивной и субтрактивной технологиями [26]. Для этого были изготовлены две ЛЛ: одна – методом 3D-печати с конструкцией в виде крестообразных элементарных ячеек (ϵ_r слоев меняется за счет кубических пустот разного размера), вторая – методом сверления подложек из фторопласта (создание перфорированных пластин). После сверления подложки соединялись клеем. Проведено сравнение ДН этих образцов. Вторая линза показала лучшие результаты, при том что измеренный КУ напечатанной линзы оказался на 3.7 дБ меньше по сравнению с результатами моделирования. Как объясняют авторы, это связано главным образом с несовершенством печати линзы, ее сборкой, а также с отсутствием учета диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь нанесенного клея [26]. Корректность подобного сравнения двух технологий изготовления можно подвергнуть сомнению, поскольку антенны были разной конструкции. Кроме того, при изготовлении ЛЛ методом 3D-печати нет необходимости в использовании клея, поэтому дополнительные диэлектрические потери можно было устранить. В то же время можно подчеркнуть ценность данной работы в виде представленных результатов сравнения технологий 3D-печати ЛЛ и их ограничений, а также в результатах сравнения материалов для 3D-печати антенн миллиметрового диапазона длин волн.

Коммерческим производством 3D-печатных сферических ЛЛ занимается компания ES Microwave [27], расположенная в Пекине. Конструкция линзы производителем не описывается, но внешне реализация похожа на элементарные ячейки в форме кубов. Антенна имеет следующие характеристики: диапазон частот 30...40 ГГц; диаметр 5 см; КУ 20.1 дБи на частоте 30 ГГц; обратные потери менее –20 дБ; ШДН равна 8°; УБЛ не более –20 дБ, а масса антенны составляет 32 г.

Реализация ЛЛ в форме многогранника Голдберга, который представляет собой сферу, замощенную правильными шестиугольниками

и небольшим количеством пятиугольников (рис. 4, з), представлена в [28, 29]. Конструкция хотя и является относительно сложной в построении, но обладает следующими преимуществами: радиальная симметрия, высокая прочность, отсутствие вспомогательных соединительных элементов, в сравнении с линзой в форме икосаэдра позволяет проще добиться слоя с $\epsilon_r \approx 1$. Технологией FDM из материала PETG изготовлены два образца антенны под частоты 10 и 30 ГГц. На частоте 30 ГГц при диаметре линзы 6 см и облучателе типа открытый конец волновода КУ составляет 23.4 дБ, УБЛ –20.2 дБ.

Для получения более высокого КУ требуется изготавливать ЛЛ большего электрического размера. В [30] методом 3D-печати была изготовлена полусферическая ЛЛ диаметром 240 мм, состоящая из семи полусферических слоев с металлическим отражающим основанием и рассчитанная на центральную частоту 12.5 ГГц (рис. 4, д). Требуемая диэлектрическая проницаемость каждого слоя достигается воздушными отверстиями с различным шагом. Проведено сравнение двух конструкций: полусферы с вертикальными отверстиями и полусферы с радиальными отверстиями. В качестве облучателя использовалась рупорная антенна из-за ее вращательно-симметричной структуры. Результаты моделирования показали пиковый КУ антенны в 28.4 дБи и коэффициент использования поверхности линзы порядка 70 %.

Одним из главных преимуществ сферических ЛЛ является способность формировать высоконаправленное излучение в любом направлении без потерь при сканировании. Применение аддитивных технологий позволяет обеспечить компактность и легкость разрабатываемых конструкций ЛЛ, особенно для работы в миллиметровом диапазоне длин волн. Однако сферическая форма антенны может также являться ее недостатком при внедрении ЛЛ в реальные системы связи, поэтому отдельного рассмотрения заслуживают методы, позволяющие преобразовать сферическую поверхность в плоскую для более удобного размещения облучателей, что особенно актуально для работы в многолучевом режиме.

Линзы Люнеберга, реализованные с применением трансформационной оптики.

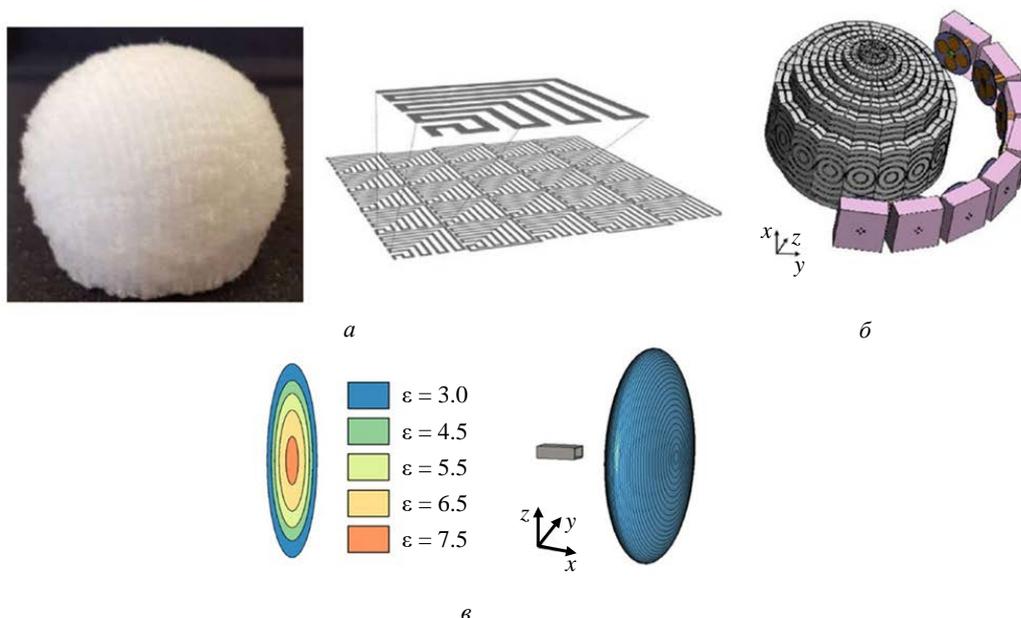


Рис. 5. ЛЛ с плоской поверхностью: *a* – с заполнением по кривой Пеано [36];
б – с квазипирамидной структурой [37]; *в* – уплощенная в форме диска [34]

Fig. 5. Designs of flattened LL: *a* – based on the Peano curve [36];
б – based on a quasi-pyramidal structure [37]; *в* – slim disc-like LL [34]

С появлением трансформационной оптики (Transformation optics – TO) и квазиконформной трансформационной оптики (Quasi conformal transformation optics – QCTO) ЛЛ может быть преобразована из сферы в более компактную конструкцию. Важной задачей при таком преобразовании является сохранение преимуществ сферической ЛЛ. В последнее время данная задача стала широко распространенной, типичными примерами использования TO и QCTO являются: усеченная линза [31], полусферическая линза [32], эллипсоидная линза [33], дисковидная линза [34] и плоская линза [35].

В [36] ЛЛ с плоской поверхностью реализована по принципу заполнения пространства кривой Пеано (рис. 5, *a*). Плоская поверхность облегчает интеграцию облучателей. Метод QCTO был использован для преобразования сферической поверхности линзы в плоскую поверхность путем пересчета локального распределения показателя преломления. В процессе изготовления применялась технология FDM, а в качестве печатного материала – поликарбонат с $\varepsilon_r = 2.68$ и $\text{tg } \delta = 0.0005$. В качестве облучателя использовался волновод с открытым концом. КУ линзовой антенны составил 16 дБи на частоте 26 ГГц и до 19 дБи на частоте

40 ГГц; диапазон сканирования $\pm 55^\circ$ во всем K_a -диапазоне (26...40 ГГц).

В [31] представлена ЛЛ с плоской поверхностью с использованием метода квазиконформных оптических преобразований для диапазона 26...40 ГГц. Методом FDM изготовлена не только линза $60 \times 60 \times 50.8$ мм, но и дополнительный согласующий слой с целью уменьшения коэффициента отражения. В стандартной ЛЛ с плоской поверхностью из-за отражений на границе раздела воздух/линза увеличивается ширина главного лепестка ДН, что приводит к снижению КУ. Дополнительный слой значительно уменьшает рассогласование на границе раздела воздух/линза во всем K_a -диапазоне частот и улучшает характеристики антенны. КУ данной структуры составил более 22 дБи.

В [37] предложена ЛЛ с двойной поляризацией, основанная на квазипирамидной структуре (рис. 5, *б*). Используются 18 идентичных квазипирамидальных 12-слойных секций. За счет дуговых элементарных ячеек достигается аппроксимация распределения показателя диэлектрической проницаемости шестью значениями. Радиус линзы составляет $0.88\lambda_0$, а КУ 15.4/15.1 дБи при уровне перекрестной поляризации лучше 17/17.5 дБ. В многолучевом режи-

ме достигается охват луча в 165° , что делает подобного рода антенну перспективным решением для базовых станций мобильной связи 5G.

Отметим, что ЛЛ, напечатанные на 3D-принтере, можно использовать также в качестве ретрорефлектора в микроволновом диапазоне. ЛЛ, обладающие почти всенаправленным отражением в азимутальной плоскости, хорошо подходят для систем позиционирования с высоким разрешением [38]. Они обеспечивают дополнительную возможность работы в условиях плохой видимости или в условиях, насыщенных инфракрасным излучением, например в солнечный день.

В [39] представлена трехмерная ЛЛ в качестве ретрорефлектора, спроектированная на основе QSTO для широкоугольной локализации внутри помещений в миллиметровом диапазоне длин волн. Для изготовления линзы диаметром 30 мм используется стереолитография с применением керамических материалов. С помощью численного моделирования оценена относительная диэлектрическая проницаемость керамики для трех типов элементарных ячеек: трехмерный крест, куб со стержнями и куб с квадратным отверстием. Конструкция ЛЛ представляет собой набор элементарных ячеек в виде трехмерных крестов. Максимальное значение КУ составляет 16.5 дБи, а угол поворота луча 70° на частоте 40 ГГц.

В [34] представлена сжатая ЛЛ, состоящая из нескольких материалов, для диапазона частот 75...110 ГГц. Исходная модель линзы имела внешний радиус 13.5 мм. Сжатая линза приобретает форму диска с радиусом 14 мм и толщиной 4 мм (рис. 5, в). Это приводит к изменению распределения диэлектрической про-

ницаемости (1) от центра линзы к ее поверхности от 7.5 до 3. Такого распределения чрезвычайно трудно достичь, используя один материал, поэтому для печати было использовано пять различных ABS-пластиков со значениями диэлектрической проницаемости 3; 4.5; 5.5; 6.5 и 7.5. По результатам измерений КУ линзы с облучателем в виде волновода составил 22 дБи, диапазон углов сканирования $\pm 25^\circ$. Эффективность излучения составила 60 %, что на 10 % ниже результатов моделирования. Разница обусловлена погрешностями при производстве.

Одной из главных проблем преобразованных линз является уменьшение диапазона углов сканирования и эффективности апертуры из-за уменьшения фокальной плоскости линзы. Проектирование линз с преобразованной формой и распределением диэлектрической проницаемости всегда связано с компромиссом между направленными характеристиками и массогабаритными параметрами. Основные характеристики различных конструкций ЛЛ сведены в табл. 2.

Цилиндрические линзовые антенны Люнеберга. В некоторых случаях сферическая реализация ЛЛ может быть заменена ее цилиндрическим срезом. При этом подобные цилиндрические структуры могут быть использованы как линзы с одномерным сканированием при расположении облучателя на боковой поверхности цилиндра (рис. 6, а) или как антенны с пространственным питанием при расположении облучателя на некотором расстоянии от поверхности (рис. 6, б). Последний вариант реализуется с помощью трансформационной оптики и встречается довольно часто, поэтому работы этого вида антенн далее будут рассмотрены отдельно.

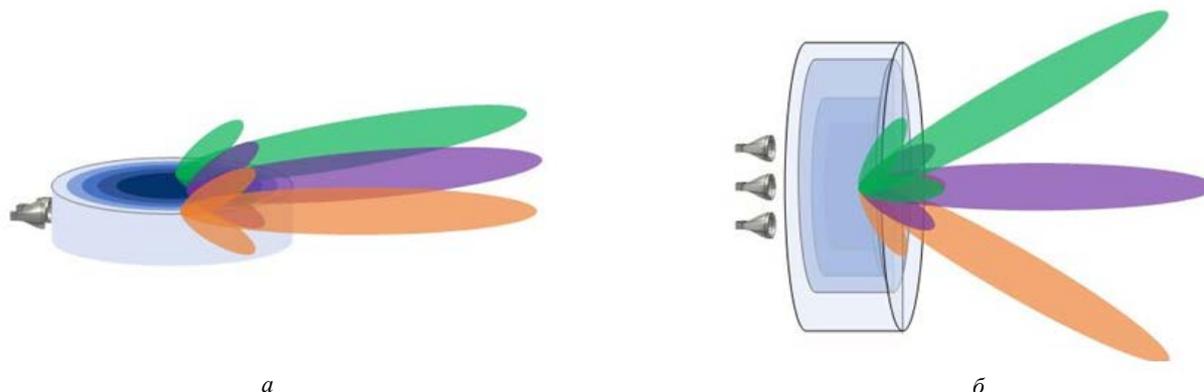


Рис. 6. Цилиндрические линзовые антенны: а – усеченная цилиндрическая ЛЛ; б – с пространственным питанием

Fig. 6. Cylindrical lens antennas: a – cylindrical cut of LL; б – flat lens with a spatial fed

Табл. 2. Сравнение линз Лунеберга, реализованных методом 3D-печати
 Tab. 2. Comparison of 3D-printed Luneburg lens designs

Ссылка	Вид линзы и тип ячейки	Метод 3D-печати	Материал печати	Количество и тип облучателей	Частотный диапазон, ГГц	Диаметр, см	Диапазон сканирования, ...°	КУ, дБи	ШДН, ...°	УБЛ Е/Н, дБ	КИП, %	КПД, %	Поляризация
[6]	Сферическая (кубическая ячейка)	PolyJet	$\epsilon_r = 2.7$; $\text{tg } \delta = 0.02$	Открытый конец волновода	8.2 ... 12.4	12	н/д	17.3 ... 20.3	13/19	-20/-25	47 ... 53	н/д	ЛП
[14]	Сферическая (кольца)	PolyJet	VeroClear ($\epsilon_r = 2.9$; $\text{tg } \delta = 0.01$)	ЭМ-диполь	26 ... 40	4	± 61	18.6 ... 21.2	12.8/12.4	-16/-15	46 ... 54	75	ЛП
[16]	Сферическая (переменная плотность печати слоев)	FDM	HIPS	Рупорный	12 ... 18	11.8	н/д	20 ... 25	н/д	-20/ н/д	н/д	н/д	ЛП
[18]	Сферическая (в форме икосаэдра)	SLA	FLGPCL2 ($\epsilon_r = 2.85$; $\text{tg } \delta = 0.02$)	Ребристый волновод	26.5 ... 37	4.8	± 44	19 ... 21.2	н/д	-15/-18	46 ... 85	70	КП
[17]	Сферическая (слои в виде прямоугольной сетки)	FDM	Nylon 6	Открытый конец волновода	8 ... 12	11	н/д	20.5	13.5	-16.9	59.26	н/д	ЛП
[11]	Сферическая (элементарные ячейки в форме куба)	sSLA	Керам. суспензия ($\epsilon_r = 9.7$; $\text{tg } \delta = 0.0002$)	Открытый конец волновода	28 ... 37	5.4	н/д	19 ... 26	н/д	-18/-9	н/д	н/д	ЛП

Продолжение табл. 2
 Continuation of the Tab. 2

Ссылка	Вид линзы и тип ячейки	Метод 3D-печати	Материал печати	Количество и тип облучателей	Частотный диапазон, ГГц	Диаметр, см	Диапазон сканирования, ...°	КУ, дБи	ШДН, ...°	УБЛ Е/Н, дБ	КИП, %	КПД, %	Поляризация
[8]	Сферическая (элементарные ячейки в форме куба)	SLA	C-UV 9400E ($\epsilon_r = 3.2$; $\text{tg } \delta \sim 4.0$)	Открытый конец волновода	8 ... 12	10	± 45	15	23	н/д	н/д	н/д	ЛП
[24]	Сферическая (полимерные пластины на стержне)	FDM	PLA+ ($\epsilon_r = 2.54$; $\text{tg } \delta = 0.0045$)	Антенна Вивальди	8 ... 12	9	н/д	16 ... 18.6	н/д	-12	н/д	67 ... 95	КП
[31]	Сферическая с использованием QCTO	FDM	$\epsilon_r = 2.89$	Открытый конец волновода	26 ... 40	6	± 55	23 ... 25	11	н/д	50 ... 70	н/д	ЛП
[30]	Полусферическая, воздушные отверстия	SLS	н/д	Рупорный	12.5	24	н/д	28.4	н/д	н/д	70	н/д	ЛП
[43]	Цилиндрическая, кубические ячейки со сферическими полостями	FDM	PREPERM	Открытый конец волновода	12 ... 18	н/д	н/д	22.2	н/д	-12.5	н/д	н/д	ЛП
[53]	Цилиндрическая, пластины и стержни	SLA	FLGPCL2 ($\epsilon_r = 2.85$; $\text{tg } \delta = 0.02$)	Рупорный	20 ... 34	6	± 60	11	н/д	н/д	26 ... 57	н/д	КП

Ссылка	Вид линзы и тип ячейки	Метод 3D-печати	Материал печати	Количество и тип облучателей	Частотный диапазон, ГГц	Диаметр, см	Диапазон сканирования, ...°	КУ, дБи	ШДН, ...°	УБЛ E/H, дБ	КИП, %	КПД, %	Поляризация
[56]	Цилиндрическая, воздушные отверстия	н/д	$\epsilon_r = 2.54$; $\text{tg } \delta = 0.0045$)	н/д	8 ... 12	н/д	± 60	13.7 ... 16.3	н/д	н/д	н/д	69 ... 94	КП
[75]	Цилиндрические ячейки	PolyJet	AR-M2 ($\epsilon_r = 2.6$; $\text{tg } \delta = 0.02$)	Открытый конец волновода	57 ... 62	н/д	н/д	20	н/д	-10	н/д	н/д	ЛП
[47]	Цилиндрическая, сетчатая структура	SLA	н/д	Монополь	6 ... 16	15.3	н/д	н/д	4	-8	н/д	н/д	н/д
[59]	Цилиндрическая, столбчатая структура	PµSL	н/д	н/д	350 ... 360	н/д	± 60	16	н/д	-10	н/д	н/д	н/д

При производстве ЛЛ методом 3D-печати возможны различные варианты реализации распределения диэлектрической проницаемости. К самым распространенным методам относят равномерное разделение линзы на слои одинаковой толщины или на слои с равномерным шагом изменения диэлектрической проницаемости [40]. Эти два варианта исследовались на основе цилиндрических линз с конструкцией в виде концентрических слоев с разным процентным заполнением PLA-пластиком [41]. КУ напечатанной линзы радиусом 5 см с одинаковой толщиной слоев составил 17.6 дБи на частоте 18 ГГц, ширина главного лепестка в E-плоскости около 11.9°. КУ

линзы с равномерным шагом изменения диэлектрической проницаемости составил 17.7 дБи, а ШДН около 11.5°.

В [42] представлена напечатанная по технологии SLA цилиндрическая линзовая антенна, работающая на частоте 26 ГГц, конструкция которой выполнена в виде перфорированных цилиндров (как имитация метода изготовления ЛЛ сверлением отверстий в материале). Для 3D-печати используется фотополимер VeroClear с $\epsilon_r = 2.91$ и $\text{tg } \delta = 0.01$ в миллиметровом диапазоне длин волн. Напечатанная цилиндрическая ЛЛ имеет диаметр 88.2 мм ($7.65 \lambda_0$) и толщину 20 мм. Конструктивно разделена на две части.

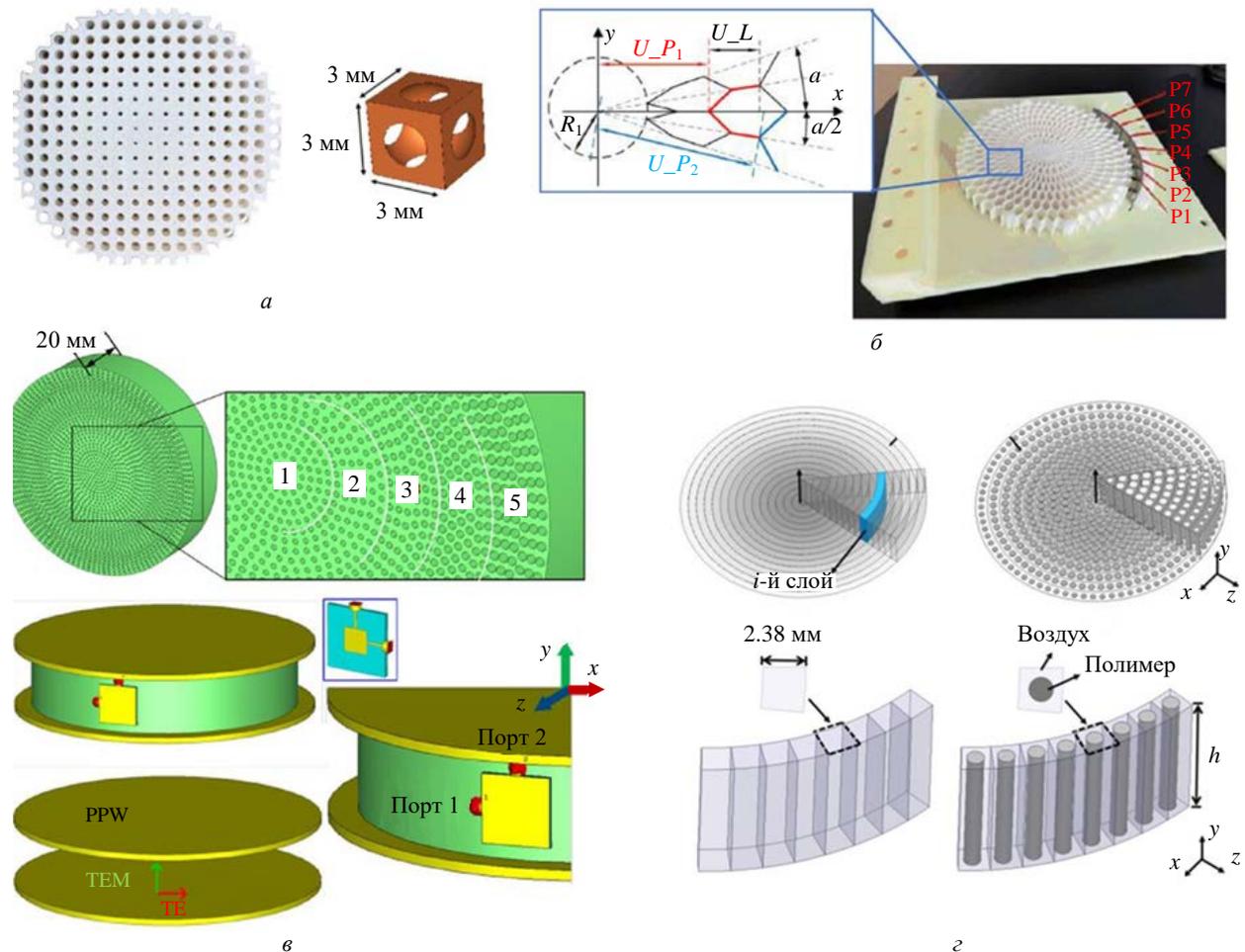


Рис. 7. Цилиндрические ЛЛ: *a* – состоящая из кубических элементарных ячеек [43]; *б* – с радиально-симметричной структурой и ячейкой в форме шестиугольников [46]; *в* – с круговой поляризацией и цилиндрическими воздушными отверстиями [51]; *г* – с диэлектрическими цилиндрами [53]

Fig. 7. Cylindrical LLs: *a* – based on cubic unit cells [43]; *б* – radial symmetrical structure with hexagonal unit cells [46]; *в* – with circular polarization and cylindrical cutouts [51]; *г* – with dielectric cylinders [53]

Внутренняя часть цилиндра представляет собой область с воздушными отверстиями диаметром 1 мм для достижения ϵ_r от 1.23 до 2, внешний контур цилиндра представляет собой кольцо с нарастающей толщиной, обеспечивающее изменение ϵ_r от 1 до 1.23. Измерения на частоте 26 ГГц показали значение КУ 16.3 дБи, а УБЛ –11.3 дБ.

В [43] реализована цилиндрическая ЛЛ диапазона 12...18 ГГц с конструкцией из элементарных ячеек в виде кубов со сферическими воздушными полостями (рис. 7, *a*). Для печати использован материал с низкими потерями производителя PREPERM [44]. Измерения показали, что в случае облучателя в виде открытого конца волновода КУ равен 22.2 дБи при УБЛ –12.5 дБ на частоте 15 ГГц. Линза такой

конструкции с облучателями, обладающими КП, рассматривается для применения в наземных спутниковых системах связи.

В [45] описана напечатанная по SLA-технологии ЛЛ с радиально-симметричной конструкцией, работающая в диапазоне от 6 до 16 ГГц, реализованная из ячеек в виде неправильных шестиугольников. Линза имеет малую массу с массовой плотностью 0.23 г/см³. В качестве облучателя использовался монополь. На частотах 6 и 16 ГГц УБЛ составил –6.7 и –10.3 дБ соответственно.

Антенна аналогичной конструкции (рис. 7, *б*) с КУ 19.8 дБи на частоте 10 ГГц представлена в [46]. Как и в [45], линза напечатана по технологии SLA, однако антенна реализована для приложений многолучевого режима, поэтому в

качестве облучателей рассматривается микрополосковая антенная решетка. Предлагаемая антенна поддерживает формирование семи лучей с минимальным уровнем перекрытия -2.5 дБ, диапазон сканирования $\pm 29^\circ$, КПД 96.2 %.

Для увеличения направленного действия без изменения размеров антенны можно модифицировать функцию распределения показателя преломления в ЛЛ. С такой целью в [47] с помощью 3D-печати изготовлена модифицированная цилиндрическая ЛЛ диаметром 160 мм для диапазона от 8 до 16 ГГц. Изменение распределения диэлектрической проницаемости позволило улучшить субдифракционную фокусировку линзы (эффективность излучения составила более 74 %). Уникальность напечатанной линзы в том, что она содержит 33 слоя, показатель преломления изменяется от 1.26 на внешней поверхности до 1.6 в центре. При печати по технологии SLA была использована фотополимерная смола Vero White Plus 835 с диэлектрической проницаемостью 2.8.

Цилиндрические линзовые антенны, основанные на квазиоптическом формировании луча, в сочетании с волноводными облучателями хорошо подходят для реализации широкополосных многолучевых антенных систем с относительно большим диапазоном сканирования пространства (до $\pm 40^\circ$ в азимутальной плоскости). Можно выделить две концепции построения линз: на основе диэлектрического волновода (Dielectric slab waveguide – DSW) [48] и на основе волновода из параллельных проводящих пластин (Parallel plate waveguide – PPW) [49]. Сравнение этих концепций линзовых антенн по таким параметрам, как КУ, УБЛ, ширина главного лепестка ДН, показало, что их отличия невелики [50]. Ряд антенн Люнеберга напечатаны с использованием этих концепций [30, 48]. Облучателем выступает патч-антенна с двойной поляризацией. Измеренный КУ составляет 15.1 дБи для вертикальной поляризации и 14.7 дБи для горизонтальной поляризации на частоте 15 ГГц. 3D-печать ЛЛ на основе концепции PPW также представлена в [52] для работы на частоте 35 ГГц.

В [51] предложена цилиндрическая ЛЛ, разработанная на основе концепции PPW. Линза реализована таким образом, чтобы обеспечивать работу в режиме вертикальной и гори-

зонтальной поляризации. Относительная диэлектрическая проницаемость слоев линзы достигается с помощью добавления воздушных отверстий (рис. 7, в), используется фотополимерная смола с $\epsilon_r = 3.4$ и $\text{tg } \delta = 0.001$.

В [53] представлена линза для диапазона 21...32.5 ГГц на основе концепции PPW для случая КП. Отметим, что ЛЛ с КП может быть реализована путем использования облучателей с КП [54]. Такой подход, несмотря на то что обеспечивает широкополосность антенны, имеет недостатки в виде относительно больших размеров антенной системы и сложности изготовления облучателей.

При реализации концепции PPW КП реализуется путем возбуждения двух ортогональных распространяющихся типов волн TE_1 и TM_0 с изменяющейся разностью фаз благодаря интегрированным параллельным пластинам. Конструктивно линза реализована в виде напечатанных с заданным шагом цилиндров между двумя параллельными пластинами (рис. 7, з), которые впоследствии были металлизированы. Изменение диэлектрической проницаемости от центра к краю обеспечивается выбором радиуса цилиндров. Прототип работает в многолучевом режиме с 5 рупорными облучателями, КУ равен 12 дБи. Материалом печати являлась смола FLGPCL02 ($\epsilon_r = 2.9$; $\text{tg } \delta = 0.02$). Однако рассмотренные PPW-линзы в некоторых задачах могут иметь ограниченное применение ввиду их относительно больших массогабаритных параметров.

В [55] приведена ЛЛ, реализованная по концепции DSW. Ее недостатком является резкое снижение рабочей полосы по критерию 3 дБ коэффициента эллиптичности (Axial ratio – AR) при уменьшении размеров антенны. В [56] с помощью 3D-печати реализован прототип цилиндрической многолучевой ЛЛ на основе DSW без этих недостатков. Антенна разработана с КП для диапазона 8...12 ГГц. Чтобы реализовать заданное распределение показателя преломления, цилиндрический слой разбивается на несколько концентрических колец одинаковой ширины, и каждый слой делится на ячейки одинакового размера. Материал печати имеет характеристики $\epsilon_r = 2.54$, $\text{tg } \delta = 0.0045$.

Представленная ЛЛ имеет малую высоту апертуры $0.43\lambda_0$. По результатам измерений ЛЛ поддерживает многолучевой режим с 11 облучателями и диапазоном углов сканирования $\pm 60^\circ$ в азимутальной плоскости. КУ для заданных направлений составляет более 13.7 дБи, а полоса рабочих частот по критерию 3 дБ коэффициента эллиптичности 2.4 ГГц.

В [57] исследуется целесообразность использования в качестве облучателя геодезической линзы комбинации патч-антенны и рупора в рамках концепции PPW для X-диапазона (8...12 ГГц). Линза напечатана на 3D-принтере из PLA-пластика и обклеена медной лентой (рис. 8, а). Антенна обеспечивает азимутальное сканирование в 7 положениях, а диапазон углов сканирования составляет $\pm 60^\circ$. Однако, как отмечают авторы, из-за допущенных ошибок в изготовлении измеренные характеристики антенны не соответствуют результатам моделирования. КУ на частоте 10 ГГц составил для лучей в разных направлениях 5...7 дБи, в то же время по результатам моделирования он должен был составить более 11 дБи.

Отражающая геодезическая ЛЛ в рамках концепции PPW [58] напечатана на 3D-принтере с использованием PLA-пластика.

Линза разработана для частотного диапазона 8...12 ГГц. Результаты моделирования на частоте 12 ГГц совпадают с результатами измерений, а на частотах 8 и 10 ГГц выявлено несоответствие ШДН и УБЛ.

В [59] представлена реализация многолучевой линзы для субтерагерцового диапазона, работающей на частоте 355 ГГц. Конструкция цилиндрической ЛЛ реализована в виде совокупности прямоугольных столбцов (рис. 8, б). Антенна поддерживает многолучевой режим работы и содержит в своем составе 9 волноводов WR-2.2. Линза и облучатели изготовлены по технологии проекционной микростереолитографии (PμSL) и металлизированы золотым покрытием методом магнетронного распыления для достижения необходимой электропроводности. Линза имеет размеры $14 \times 14 \times 1.6$ мм с допусками ± 5 мкм. КУ равен 16 дБи, потери при сканировании составляют менее 1.2 дБ, диапазон углов сканирования $\pm 60^\circ$.

Методы ТО также используются для разработки цилиндрических ЛЛ. Авторы работы [60] поставили цель изготовить сжатую ЛЛ с широкоугольным сканированием в частотном диапазоне 3.3...5 ГГц. Благодаря применению данного метода линза преобразуется из сферы в эллипсоид.

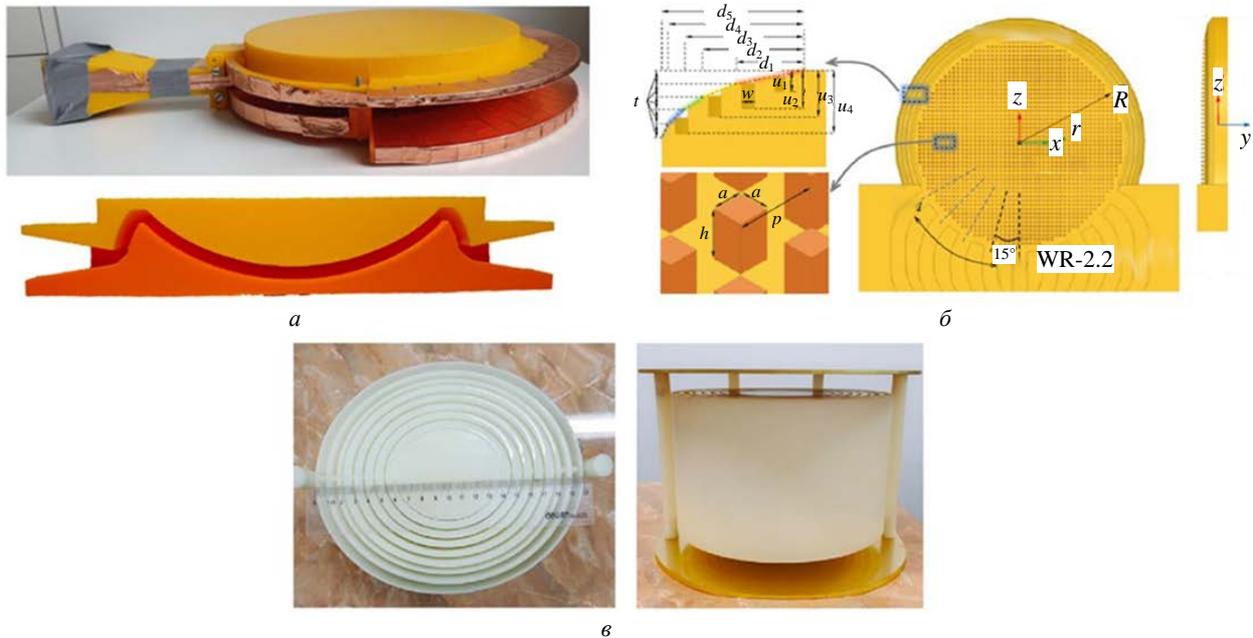


Рис. 8. Конструкции ЛЛ: а – геодезическая, предназначенная для работы в X-диапазоне [57]; б – многолучевая линза субтерагерцового диапазона [59]; в – с использованием полимерных колец разной плотности [60]

Fig. 8. Design of LLs: а – geodesic for X-band applications [57]; б – multibeam for sub-THz frequency range [59]; в – based on polymer rings [60]

липтический цилиндр с уменьшенным на 47.5 % объемом. Конструкция линзы представляет собой набор колец, расположенных с разной плотностью и скрепленных по центру стержнями (рис. 8, в). Облучатель реализован в виде двухполяризационного диполя. Линза крепится между парой параллельных металлических пластин для увеличения КУ и снижения УБЛ. Антенна обеспечивает пиковый КУ в каждом режиме поляризации 16.1/15.9 дБи, угол сканирования 100° в H -плоскости и 40° в E -плоскости.

3D-печать цилиндрических линзовых антенн Лüneберга с пространственным питанием. В [61] спроектирована плоская ЛЛ на основе искусственных диэлектриков для частотного диапазона 12...40 ГГц. Тело линзы реализовано путем сочетания напечатанных на 3D-принтере элементов и многослойных печатных плат с металлическими вкраплениями. Такой подход позволяет использовать при создании ЛЛ диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью и дает преимущество в уменьшении толщины и массы линзы. КУ реализованного прототипа плоской ЛЛ составляет 23.6 дБи. Материалами печати являлись пластики ABS ($\epsilon_r = 2.7$, $\text{tg} \delta = 0.01$) и Preperm TP20280 ($\epsilon_r = 4.4$, $\text{tg} \delta = 0.004$).

Одной из самых распространенных конструкций цилиндрических плоских линз является набор концентрических колец с разной плотностью диэлектрика. Исследование параметров плоских линз для частотного диапазона 12...18 ГГц, изготовленных методом FDM в виде концентрических диэлектрических колец с раз-

ной плотностью печати, можно найти в [62].

Плоская ЛЛ с сотовой структурой (рис. 9, а) для частотного диапазона 25...31.5 ГГц и облучателями в виде антенны "волновой канал" представлена в [63]. Линза диаметром $6\lambda_0$ состоит из 4 слоев, толщина стенок сот равна 1 мм. Материалом печати выступает PLA с $\epsilon_r = 2.2$, $\text{tg} \delta = 0.05$. С помощью моделирования и теории эффективных сред получена зависимость эффективной диэлектрической проницаемости элементарной ячейки в виде "соты" от длины ее диагонали. КУ составил 16.9 дБи, а УБЛ -17 дБ, эффективность излучения 92 %.

Плоская линза с элементарными ячейками в виде кубов для диапазона 57...64 ГГц показана в [7]. Диаметр линзы равен 30 мм. Для печати использован материал с параметрами: $\epsilon_r = 2.9$ и $\text{tg} \delta = 0.015$. В качестве облучателя используется прямоугольный волновод WR-15. На частоте 60 ГГц КУ составляет 15.3 дБи, ШДН в E -плоскости 11.5, а УБЛ не превышает -12 дБ. Также возможно изготовление плоской ЛЛ с элементарными ячейками в виде кубов на основе керамической суспензии MgTiO_3 . Такая линза K_u -диапазона (12...18 ГГц) представлена, например, в [64].

В [65] представлена плоская линзовая антенна для K_a -диапазона, которая состоит из 10 концентрических колец толщиной 4.4 мм каждое с различной диэлектрической проницаемостью. Кольца выполнены из разного ABS-пластика. Одной из проблем плоской линзы является большая разница диэлектрической



Рис. 9. Цилиндрическая линза: а – с сотовой структурой [63]; б – ЛЛ с применением ТО [69]

Fig. 9. Cylindrical lens: а – based on honeycomb unit cells [63]; б – TO-based LL [69]

проницаемости на границе воздух/линза, особенно для центральных слоев, что может привести к значительным отражениям. С целью уменьшить этот эффект для данной антенны используется специально подобранный по диэлектрической проницаемости дополнительный согласующий слой, который печатается поверх каждого кольца. При использовании облучателя в виде открытого конца волновода КУ составляет 25.7 дБи, УБЛ не превышает –18 дБ, а эффективность излучения 67.3 %.

В [66] предложена многолучевая ММО-антенна диапазона 26 ГГц для сетей 5G на основе плоской диэлектрической линзы. Облучателями выступают 4 патч-антенны, расположенные на печатной плате. Линза выполнена в виде перфорированного цилиндра, изготовленного по SLA-технологии из смолы с $\epsilon_r = 2.5$ и $\text{tg} \delta = 0.0025$. КУ составляет 20.2 дБи, УБЛ не превышает –11 дБ, а эффективность излучения 84.5 %.

В [67] исследована антенная решетка, интегрированная с плоской ЛЛ для формирования системы управления направленным лучом в широком диапазоне частот 45...110 ГГц. Для создания прототипа такой линзы использовалась SLA-технология. Материал для 3D-печати представляет собой композит из метакрилатных олигомеров и метакрилатного мономера с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2.5$. Показатель преломления слоев изменялся путем размещения круглых отверстий разного диаметра в полимере.

Плоская линза с пластиковым микроэлек-

тротомеханическим приводом для управления углом наклона линзы рассмотрена в [68]. Максимальный угол поворота луча составляет $\pm 10^\circ$ с КУ 18 дБи на частоте 60 ГГц.

В [69] выполнена оптимизация геометрии линзы и функции распределения диэлектрической проницаемости с использованием метода геометрической оптики и метода роя частиц, который широко используется для оптимизации сложных нелинейных функций. Синтезирована оптимизированная конструкция линзы (рис. 9, б). Линза реализована по FDM-технологии с использованием цилиндрических элементарных ячеек с коническим основанием. В качестве материала линзы выбран высокотемпературный термопласт Ultem 9085 с низким газомыделением, подходящий для применения в космосе. Измеренные параметры материала на частоте 13.9 ГГц составили $\epsilon_r = 2.69$, $\text{tg} \delta = 0.012$. КУ антенны равен 20.6 дБи на частоте 13.4 ГГц. Та же структура была напечатана с использованием многоструйной печати (MultiJet printing – MJP) из другого материала. Однако авторами отмечено, что материал Ultem 9085 больше подходит для применения в условиях космоса.

Как один из примеров, в [70] представлены напечатанные по технологии SLS полуэллипсоидные ЛЛ, размещенные внутри рупорных антенн WRD350 (3.5...8.2 ГГц) и WRD750 (7.5...18 ГГц). В качестве материала для SLS-печати использовался нейлон PA2200 с $\epsilon_r = 2.4$. Линзы выполнены со структурой из кубических элементарных ячеек (рис. 10, а).



Рис. 10. Эллипсоидальные линзы: а – полуэллипсоидная ЛЛ, размещенная внутри рупорной антенны [70]; б – полусферическая вытянутая и эллипсоидальная однородные линзы [74]

Fig. 10. Ellipsoidal lenses: а – semi-ellipsoidal LL placed inside a horn antenna [70]; б – hemispherical and ellipsoidal homogeneous lenses [74]

Рупорная антенна К-диапазона (18...28 ГГц) с плоской линзой рассматривается в [71]. Линза предназначена для непосредственного крепления к апертуре рупора и преобразует сферические волны, исходящие из фазового центра антенны, в ЭМ-волны с плоским волновым фронтом. Рупорная антенна имеет эллиптически расширяющиеся боковые стенки, которые напечатаны на 3D-принтере из PLA-пластика и покрыты изнутри медной лентой. Плоская ЛЛ напечатана из эко-ABS-пластика. КУ в диапазоне от 18 до 28 ГГц на 5 дБ выше по сравнению с рупорной антенной без вставки. Аналогичная конструкция, состоящая из рупорной антенны и неоднородной плоской напечатанной линзы для X-диапазона, рассмотрена в [72]. КУ антенны изменяется от 17 до 20 дБ в диапазоне частот 8.2...12.4 ГГц.

Однородные линзовые антенны также часто реализуются с применением 3D-печати [73]. Они широко рассматриваются для использования в сетях 5G и сопряженных с ними концепциях, например при организации связи автомобилей с другими объектами (Vehicle-to-everything – V2X). Для систем связи V2X в [74] представлено сравнение пяти типов линзовых антенн, напечатанных на 3D-принтере: однородные полусферическая и эллипсоидальная диэлектрические линзы (рис. 10, б) и три линзы с неоднородным распределением диэлектрической проницаемости (линза Френеля, цилиндрическая и сферическая ЛЛ). При сравнении антенн используется один и тот же облучатель в виде патч-антенны. По результатам исследования значение КУ для данных антенн лежит в диапазоне 14.1...14.7 дБ. Самый низкий УБЛ показала сферическая ЛЛ, а высокий – линза Френеля. Эффективность излучения цилиндрической и сферической ЛЛ составила 97 %, в то время как для однородных диэлектрических линз 89 %. При сопоставимом с другими антеннами КУ линза Френеля обладает наибольшими массогабаритными параметрами, а наименьшими – сферическая ЛЛ.

Отметим, что производство антенн с применением аддитивных технологий развивается также за счет разработки новых материалов для 3D-печати. В [75] представлен пример успешного создания ЛЛ цилиндрической формы диаметром 40 мм с применением технологии

PolyJet (материал AR-M2 $\epsilon_r = 2.6$, $\text{tg } \delta = 0.02$). По результатам измерения КУ антенны составляет не менее 20 дБ в диапазоне частот 59...62 ГГц. Эти многообещающие результаты демонстрируют текущие возможности аддитивных технологий производства для создания сложных пассивных компонентов и модулей миллиметрового диапазона.

Заключение. Методы 3D-печати открывают новые возможности для быстрого изготовления с заданной точностью как однородных диэлектрических линзовых антенн, так и более сложных неоднородных ЛЛ. Данный тип антенн широко исследуется для применения в сетях мобильной связи 5G и 6G, а также для иных применений в диапазоне миллиметровых длин волн. Использование технологии аддитивного производства может стать импульсом для массового производства ЛЛ. В сравнении с традиционными субтрактивными методами 3D-печать позволяет достичь большей экономической эффективности.

Для создания диэлектрических линзовых антенн могут быть применены различные технологии 3D-печати, отличающиеся разрешающей способностью принтеров, скоростью печати и себестоимостью. Таким образом, необходимо выбирать подходящий технологический процесс, основываясь на области применения, сложности конструкции линзы, типе элементарной ячейки, параметрах используемых материалов, требованиях к стоимости продукта, а также с учетом диапазона рабочих частот. С каждым годом методы 3D-печати непрерывно развиваются и в настоящий момент достигнуты технологические возможности печати ЛЛ для суб-ТГц-диапазона с высоким разрешением и точностью. Также появились 3D-принтеры, способные печатать одновременно несколько линз или задействовать несколько печатающих головок с возможностью печати разными материалами, что значительно сокращает время изготовления линзовых антенн.

При разработке линз различных типов и конструкций важно располагать широким ассортиментом материалов с необходимыми химическими, механическими и электромагнитными свойствами в широком диапазоне частот. Для повышения КПД антенн должны быть доступны ма-

териалы с низким значением тангенса угла диэлектрических потерь, а для возможности эксплуатации напечатанных линз вне помещений материал должен обеспечивать устойчивость к различным климатическим воздействиям.

На сегодняшний день реализовано множество прототипов ЛЛ различных конструкций. С нашей точки зрения, несмотря на успешное

изготовление с помощью аддитивных технологий большого ряда образцов линзовых антенн, задача разработки и реализации новых конструкций и профилей продолжает сохранять научную и практическую ценность. Можно отметить множество работ по созданию новых конструкций линз с применением различных методов синтеза.

Авторский вклад

Кусайкин Дмитрий Вячеславович – подбор литературы; введение; заключение; обзор конструкций линзовых антенн Лунеберга, изготовленных с помощью 3D-печати.

Григорьев Игорь Владимирович – обзор технологий 3D-печати; аннотация; оформление рисунков, текста и списка литературы; правка текста.

Денисов Дмитрий Вадимович – обзор 3D-печати цилиндрических линзовых антенн Лунеберга с пространственным питанием; редактирование, правка текста.

Туральчук Павел Анатольевич – обзор технологий 3D-печати; редактирование, правка текста.

Author's contribution

Dmitry V. Kusaykin, selection of literature; introduction; conclusion; review of 3D printed Luneberg lens antenna designs.

Igor V. Grigoriev, review of 3D printing technologies; annotation; design of drawings, text and bibliography; text editing.

Dmitry V. Denisov, review of 3D printing of cylindrical lens Luneberg antennas with spatial feeding; editing, text editing.

Pavel A. Turalchuk, review of 3D printing technologies; editing, text editing.

Список литературы

1. 3D printed dielectric lenses increase antenna gain and widen beam scanning angle: White paper. URL: https://3dfortify.com/white_papers/3d-printed-dielectric-lenses-increase-antenna-gain-and-widen-beam-scanning-angle/ (дата обращения 10.10.2023)

2. 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges / Y. Wang, X. Zhang, R. Su, M. Chen, C. Shen, H. Xu, R. He // Chinese J. of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2023. Vol. 2, iss. 1. P. 100065. doi: 10.1016/j.cjmeam.2023.100065

3. Sato K., Ujiie H. A plate Luneberg lens with the permittivity distribution controlled by hole density // Electronics and Communications in Japan (Pt. I: Communications). 2002. Vol. 85, iss. 9. P. 1–12. doi: 10.1002/ecja.1120

4. Cheng Q., Ma H. F., Cui T. J. Broadband planar Luneberg lens based on complementary metamaterials // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 95, iss. 18. P. 181901. doi: 10.1063/1.3257375

5. Анализ современных способов и средств технической реализации линзы Лунеберга / Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, Е. А. Рогозин, П. Е. Рогозин, С. М. Федоров // Антенны. 2022. № 2. P. 53–62. doi: 10.18127/j03209601-202202-07

6. A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping / M. Liang, W.-R. Ng, K. Chang, K. Gbele, M. E. Gehm, H. Xin // IEEE Trans

Antennas Propag. 2014. Vol. 62, iss. 4. P. 1799–1807. doi: 10.1109/TAP.2013.2297165

7. Millimeter-wave 3D Printed Luneburg Lens Antenna / M. Noroozariab, D. McCloskey, D. S. Kozlov, V. V. Kirillov, S. Bulja, F. Pivitt, P. Rulikowski // 2019 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). IEEE, 2019. P. 1–2. doi: 10.23919/RADIO46463.2019.8968885

8. Design of a metamaterial Luneburg lens antenna based on 3D printing technology / J. Yue, C. Zhou, S. Chai, K. Xiao // 2022 2nd Intern. Conf. on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI). Nanjing, China, 23–25 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 352–355. doi: 10.1109/CEI57409.2022.9950224

9. Ratajczak P. Design of a 3D Printed Luneburg Lens Antenna for Multiple Beams Applications at mm-wave Frequencies // 13th European Conf. on Antennas and Propagation (Eu-CAP). Krakow, Poland, 31 March 2019–05 Apr. 2019. IEEE, 2019. P. 1–4.

10. Hoel K. V., Kristoffersen S. Characterization of variable density 3D printed materials for broadband GRIN lenses // 2017 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego, USA, 09–14 July 2017. IEEE, 2017. P. 2643–2644. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073364

11. Brakora K. F., Halloran J., Sarabandi K. Design of 3-D Monolithic MMW Antennas Using Ceramic

Stereolithography // IEEE Trans Antennas Propag. 2007. Vol. 55, № 3. P. 790–797. doi: 10.1109/TAP.2007.891855

12. Xin H., Liang M. 3-D-Printed Microwave and THz Devices Using Polymer Jetting Techniques // Proc. of the IEEE. 2017. Vol. 105, № 4. P. 737–755. doi: 10.1109/JPROC.2016.2621118

13. Bifunctional Luneburg-Eaton Lens Fabricated of 3-D-Printed Anisotropic Medium / X. Li, G. Wei, S. Lei, K. Han, T. Qiu, G. Zhang, Yu. Zhou // IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2022. Vol. 21, № 7. P. 1462–1466. doi: 10.1109/LAWP.2022.3171777

14. Multibeam 3-D-Printed Luneburg Lens Fed by Magnetolectric Dipole Antennas for Millimeter-Wave MIMO Applications / Y. Li, L. Ge, M. Chen, Z. Zhang, Z. Li, J. Wang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, № 5. P. 2923–2933. doi: 10.1109/TAP.2019.2899013

15. Magneto-Electric Dipole antenna for 5-G applications / G. Scalise, L. Boccia, G. Amendola, M. Rousstia, A. Shamsafar // 2020 14th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020. IEEE, 2020. P. 1–3. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9136068

16. Сферическая линзовая антенна Лунеберга, изготовленная по технологии 3D-печати / В. М. Кузьминых, Р. С. Орехов, Н. А. Павлов, Ю. П. Саломатов, М. И. Сугак // Антенны и распространение радиоволн. 2019. С. 122–126.

17. Electrically-small Luneburg lens for antenna gain enhancement using new 3D printing filling technique / H. Saghlatoon, M. M. Honari, S. Aslanzadeh, R. Mirzavand // AEU – Intern. J. of Electronics and Communications. 2020. Vol. 124. P. 153352. doi: 10.1016/j.aeue.2020.153352

18. Wang C., Wu J., Guo Y.-X. A 3-D-Printed Multibeam Dual Circularly Polarized Luneburg Lens Antenna Based on Quasi-Icosahedron Models for Ka-Band Wireless Applications // IEEE Trans Antennas Propag. 2020. Vol. 68, № 8. P. 5807–5815. doi: 10.1109/TAP.2020.2983798

19. Effective medium theories for artificial materials composed of multiple sizes of spherical inclusions in a host continuum / W. M. Merrill, R. E. Diaz, M. M. LoRe, M. C. Squires, N. G. Alexopoulos // IEEE Trans Antennas Propag. 1999. Vol. 47, № 1. P. 142–148. doi: 10.1109/8.753004

20. Guo Y., Li Y., Wang J. A Millimeter-Wave 3D-Printed Dual-Polarized Wideband Luneburg Lens Antenna // IEEE 9th Intern. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE). Chengdu, China, 26–29 Aug. 2022. IEEE, 2022. P. 226–229. doi: 10.1109/MAPE53743.2022.9935214

21. Beam scanning array based on Luneburg lens / Ying Li, Min Liang, Xiaoju Yu, Qi Zhu, Hao Xin // IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. (APSURSI), Memphis, USA, 06–11 July 2014. IEEE, 2014. P. 1274–1275. doi: 10.1109/APS.2014.6904964

22. Direction of arrival estimation using Luneburg lens / M. Liang, X. Yu, R. Sabory-García, W.-R. Ng, M. E. Gehm, H. Xin // IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Montreal, Canada, 17–22 June 2012. IEEE, 2012. P. 1–3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259559

23. Yu X., Min Liang, Hao Xin. Performance Evaluation of Wideband Microwave Direction-of-Arrival Estimation Using Luneburg Lens // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2017. Vol. 16. P. 2453–2456.

24. A Design of Broadband 3-D-Printed Circularly Polarized Spherical Luneburg Lens Antenna for X – Band / S. Lei, K. Han, X. Li, G. Wei // IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2021. Vol. 20, № 4. P. 528–532.

25. A 3-D-Printed Multibeam Spherical Lens Antenna with Ultrawide-Angle Coverage / K. Liu, C. Zhao, S.-W. Qu, Y. Chen, J. Hu, S. Yang // IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2021. Vol. 20, № 3. P. 411–415. doi: 10.1109/LAWP.2021.3054042

26. Kadera P., Lacik J. Performance Comparison of W-band Luneburg Lens Antenna: Additive versus Subtractive Manufacturing // 20th Intern. Conf. on Microwave Techniques (COMITE), Brno, Czech Republic, 19–21 Apr. 2021. IEEE, 2021. P. 1–6. doi: 10.1109/COMITE52242.2021.9419879

27. 30–40 GHz Luneburg Lens Antenna OLLA-300400. URL: http://www.ecmicrowave.com/m_product/356-OLLA-300400.html (дата обращения 01.10.2023)

28. Кусайкин Д. В., Денисов Д. В. 3D-печать сферической линзовой антенны в форме многогранника Голдберга // VII Междунар. науч.-техн. конф. "Радиотехника, электроника и связь" (РЭИС-2023). Омск, Россия, 04–06 окт. 2023. P. 108–110.

29. Влияние электрических размеров линзы Лунеберга на ее дифракционные и антенные характеристики / Д. В. Денисов, В. Я. Носков, Д. В. Кусайкин, А. И. Малкин // Ural Radio Engineering J. 2023. Т. 7, № 4. P. 343–375.

30. A Design Method of the 3-D-Printed Luneburg Lens Antenna / M. Wang, Z. Liao, J. Chen, X. Zhao, R. Jin // IEEE 10th Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), Xiamen, China, 04–07 Nov. 2022. IEEE, 2022. P. 1–2. doi: 10.1109/APCAP56600.2022.10069583

31. Biswas S., Mirotznik M. High gain, wide-angle QCTO-enabled modified Luneburg lens antenna with broadband anti-reflective layer // Sci Rep. 2020. Vol. 10, № 1. Art. no. 12646. doi: 10.1038/s41598-020-69631-6

32. Xu R., Chen Z. N. A Hemispherical Wide-Angle Beamsteering Near-Surface Focal-Plane Metamaterial Luneburg Lens Antenna Using Transformation-Optics // IEEE Trans Antennas Propag. 2022. Vol. 70, № 6. P. 4224–4233. doi: 10.1109/TAP.2021.3138554

33. Wang B., Wang C., Zhu Q. An Ellipsoidal Luneburg Lens Antenna for Gain Enhancement and Beam Scanning // 7th Intern. Conf. on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 10–13 Dec. 2021. IEEE, 2021. P. 2149–2153. doi: 10.1109/ICCC54389.2021.9674665

34. Giddens H., Andy A. S., Hao Y. Multimaterial 3-D Printed Compressed Luneburg Lens for mm-Wave

Beam Steering // IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2021. Vol. 20, № 11. P. 2166–2170. doi: 10.1109/LAWP.2021.3109591

35. Xu R., Chen Z. N. A Transformation-Optics-Based Flat Metamaterial Luneburg Lens Antenna with Zero Focal Length // IEEE Trans Antennas Propag. 2022. Vol. 70, № 5. P. 3287–3296. doi: 10.1109/TAP.2021.3137528

36. Realization of modified Luneburg lens antenna using quasi-conformal transformation optics and additive manufacturing / S. Biswas, A. Lu, Z. Larimore, P. Parsons, A. Good, N. Hudak, B. Garrett, J. Suarez, M. S. Mirotznik // Microw. Opt. Technol. Lett. 2019. Vol. 61, № 4. P. 1022–1029. doi: 10.1002/mop.31696

37. A 3-D-printed Luneburg lens antenna with consistent multibeams based on quasi-pyramid structure / Y. Zang, Y. Zhu, W. Xie, X. Liu, L. Bu, Y. Yang // Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2022. Vol. 32, № 12. Art. e23437. doi: 10.1002/mmce.23437

38. 3D-Printed Omnidirectional Luneburg Lens Retroreflectors for Low-Cost mm-Wave Positioning / R. A. Bahr, A. O. Adeyeye, S. V. Rijs, M. M. Tentzeris // IEEE Intern. Conf. on RFID (RFID), Orlando, USA, 28 Sept. 2020–16 Oct. 2020. IEEE, 2020. P. 1–7. doi: 10.1109/RFID49298.2020.9244891

39. Wide-Angle Ceramic Retroreflective Luneburg Lens Based on Quasi-Conformal Transformation Optics for Mm-Wave Indoor Localization / P. Kadera, J. Sánchez-Pastor, H. Eskandari, T. Tyc, M. Sakaki, M. Schüßler, R. Jakoby, N. Benson, A. Jiménez-Sáez, J. Láčik // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 41097–41111. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3166509

40. Grigoriev I., Munina I., Zelenchuk D. 3D printed Ku band cylindrical Luneburg lens // J. Phys. Conf. Ser. 2021. Vol. 2015, № 1. P. 012095. doi: 10.1088/1742-6596/2015/1/012095

41. Григорьев И. В., Мунина И. В. Цилиндрическая линза Люнеберга с использованием аддитивных технологий // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. С. 606–611.

42. 3D-printed cylindrical Luneburg lens antenna for millimeter-wave applications / P. Liu, X.-W. Zhu, Y. Zhang, Ji Li, Z. Jiang // Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2020. Vol. 30, № 1. Art. e21994. doi: 10.1002/mmce.21994

43. Björkqvist O., Dahlberg O., Quevedo-Teruel O. Additive Manufactured Three Dimensional Luneburg Lens for Satellite Communications // 13th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 31 March 2019–05 Apr. 2019. IEEE, 2019. P. 1–4.

44. Preperm webshop 3D filaments. URL: <https://www.preperm.com/webshop/product-category/3d-filaments/> (дата обращения 10.10.2023)

45. Ultrabroadband Three-Dimensional Printed Radial Perfectly Symmetric Gradient Honeycomb All-Dielectric Dual-Directional Lightweight Planar Luneburg Lens / J. Chen, X. Yuan, M. Chen, X. Cheng, A. Zhang, G. Peng, W.-L. Song, D. Fang // ACS Appl.

Mater. Interfaces. 2018. Vol. 10, № 44. P. 38404–38409. doi: 10.1021/acsami.8b11239

46. Cao Y., Yan S. A low-profile high-gain multi-beam antenna based on 3D-printed cylindrical Luneburg lens // Microw. Opt. Technol. Lett. 2021. Vol. 63, № 7. P. 1965–1971. doi: 10.1002/mop.32862

47. Modified Luneburg Lens for Achromatic Subdiffraction Focusing and Directional Emission / J. Chen, H. Chu, H. Chu, Y. Lai, M. Chen, D. Fang // IEEE Trans Antennas Propag. 2021. Vol. 69, № 11. P. 7930–7934. doi: 10.1109/TAP.2021.3083843

48. Xue L., Fusco V. Patch-fed planar dielectric slabwaveguide Luneburg lens // IET microwaves, antennas & propagation. 2008. Vol. 2, iss. 2. P. 109–114. doi: 10.1049/iet-map:20070146

49. Multiple beam antenna based on a parallel plate waveguide continuous delay lens beamformer / H. Legay, S. Tubau, E. Girard, J.-P. Frayssé, R. Chiniard, C. Diallo, R. Sauleau, M. Ettorre, N. Fonseca // Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP), Okinawa, Japan, 24–28 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 118–119.

50. Millimetre-wave dielectric slab and parallel plate waveguide dielectric lens antennas for beam steering / A. Karttunen, K. Piironen, J. Ala-Laurinaho, A. V. Räsänen // The 8th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), The Hague, Netherlands, 06–11 Apr. 2014. IEEE, 2014. P. 459–462. doi: 10.1109/EuCAP.2014.6901791

51. 3-D Printed Cylindrical Luneburg Lens for Dual Polarization / B. Qu, S. Yan, A. Zhang, F. Wang, F. Wang // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2021. Vol. 20, № 6. P. 878–882. doi: 10.1109/LAWP.2021.3065938

52. A wide-angle scanning Luneburg lens antenna / Y. Zheng, C. Ma, S. Zheng, N. Yang // Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2022. Vol. 32, № 6. Art. e23143. doi: 10.1002/mmce.23143

53. Wang C., Wu J., Guo Y.-X. A 3-D-Printed Wideband Circularly Polarized Parallel-Plate Luneburg Lens Antenna // IEEE Trans Antennas Propag. 2020. Vol. 68, № 6. P. 4944–4949. doi: 10.1109/TAP.2019.2955222

54. Thornton J. Waveguide feed chains for scanning lens array in Ku and Ka bands // The 8th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), The Hague, Netherlands, 06–11 Apr. 2014. IEEE, 2014. P. 3026–3029. doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902465

55. Circularly polarised planar Luneburg lens antenna for mm-wave wireless communication / Z. Shi, S. Yang, S.-W. Qu, Y. Chen // Electron Lett. 2016. Vol. 52, № 15. P. 1281–1282. doi: 10.1049/el.2016.1524

56. A Wideband 3-D-Printed Multibeam Circularly Polarized Ultrathin Dielectric Slab Waveguide Luneburg Lens Antenna / S. Lei, Gao Wei, K. Han, X. Li, T. Qiu // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2022. Vol. 21, № 8. P. 1582–1586. doi: 10.1109/LAWP.2022.3174866

57. Berglund E., Freimanis S. 3D-Printed Geodesic Luneburg Lens Antenna with Novel Patch Antenna

Feeding // Kandidatexjobb i elektroteknik. Stockholm: KTH, 2021. P. 353–363.

58. Oxelmark D., Jonasson L. 3D-Printed Geodesic Reflective Luneburg Lens Antenna for X-Band // Kandidatexjobb i elektroteknik. Stockholm: KTH, 2021. P. 365–373.

59. A 3D-Printed Subterahertz Metallic Surface-Wave Luneburg Lens Multibeam Antenna / B. Nie, H. Lu, T. Skaik, Y. Liu, Y. Wang // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2023. Vol. 13, № 3. P. 297–301. doi: 10.1109/TTHZ.2023.3242227

60. A bi-dimensional compressed Luneburg lens antenna for miniaturization based on transformation optics / Y. Zang, Y. Zhu, W. Xie, Y. Yang, L. Bu // Front. Phys. 2022. Vol. 10. P. 1–11. doi: 10.3389/fphy.2022.1012470

61. Ultra-Wideband Flat Metamaterial GRIN Lenses Assisted with Additive Manufacturing Technique / S. Zhang, R. K. Arya, W. G. Whittow, D. Cadman, R. Mittra, J. C. Vardaxoglou // IEEE Trans Antennas Propag. 2021. Vol. 69, № 7. P. 3788–3799. doi: 10.1109/TAP.2020.3044586

62. 3D-printed planar graded index lenses / S. Zhang, R. K. Arya, S. Pandey, Y. Vardaxoglou, W. Whittow, R. Mittra // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2016. Vol. 10, № 13. P. 1411–1419. doi: 10.1049/iet-map.2016.0013

63. Lightweight 3D-Printed Fractal Gradient-Index Lens Antenna with Stable Gain Performance / Y. Kim, D. A. Pham, R. Phon, S. Lim // Fractal and Fractional. 2022. Vol. 6, № 10. P. 551. doi: 10.3390/fractalfract6100551

64. Design of Ku-Band Flat Luneburg Lens Using Ceramic 3-D Printing / Y.-H. Lou, Y.-X. Zhu, G.-F. Fan, W. Lei, W.-Z. Lu, X.-C. Wang // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2021. Vol. 20, № 2. P. 234–238. doi: 10.1109/LAWP.2020.3046489

65. Poyanco J.-M., Pizarro F., Rajo-Iglesias E. Cost-effective wideband dielectric planar lens antenna for millimeter wave applications // Sci Rep. 2022. Vol. 12, № 1. P. 4204. doi: 10.1038/s41598-022-07911-z

66. Low-cost lens antenna for 5G multi-beam communication / E. Garcia-Marin, D. S. Filipovic, J. L. Masa, P. Sanchez-Olivares // Microw Opt Technol Lett. 2020. Vol. 62, № 11. P. 3611–3622. doi: 10.1002/mop.32486

67. Manafi S., González J. F., Filipovic D. S. Design of a Perforated Flat Luneburg Lens Antenna Array for Wideband Millimeter-Wave Applications // 13th European Conf. on Antennas and Propagation (Eu-

CAP), Krakow, Poland, 31 March 2019–05 Apr. 2019. IEEE, 2019. P. 1–5.

68. Hegazy A. M., Basha M. A., Safavi-Naeini S. 3D-Printed Scanning Dielectric Lens Antenna // 2019 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, USA, 07–12 July 2019. IEEE, 2019. P. 1991–1992. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889020

69. Three-Dimensionally Printed, Shaped, Engineered Material Inhomogeneous Lens Antennas for Next-Generation Space-borne Weather Radar Systems / J. Budhu, Y. Rahmat-Samii, R. E. Hodges, D. C. Hofmann, D. F. Ruffatto, K. C. Carpenter // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2018. Vol. 17, № 11. P. 2080–2084. doi: 10.1109/LAWP.2018.2848263

70. 3-D Printed Monolithic GRIN Dielectric-Loaded Double-Ridged Horn Antennas / K. V. Hoel, M. Ignatenko, S. Kristoffersen, E. Lier, D. S. Filipovic // IEEE Trans. Antennas. Propag. 2020. Vol. 68, № 1. P. 533–539. doi: 10.1109/TAP.2019.2938563

71. Goode I., Saavedra C. E. 3D Printed 18 GHz to 28 GHz Horn Antenna and Gradient Index of Refraction Lens // 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symp. of the Intern. Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 28 Aug. 2021–04 Sept. 2021. IEEE, 2021. P. 1–4. doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560278

72. Wirth S. G., Morrow I. L., Horsfall I. Near-Field Microwave Imaging using a Polarimetric Array of 3D Printed Antennas and Lenses // Loughborough Antennas & Propagation Conf. 2018 (LAPC 2018), Loughborough, 12–13 Nov. 2018. IEEE, 2018. P. 1–6. doi: 10.1049/cp.2018.1486

73. Low-cost 3D Printed Circularly Polarized Lens Antenna for 5.9 GHz V2X Applications / W. Kalista, L. Leszkowska, M. Rzymowski, K. Nyka, L. Kulas // 17th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 26–31 March 2023. IEEE, 2023. P. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133420

74. Low-Cost 3D Printed Dielectric Lens Antennas for 5.9 GHz Frequency Band V2X Applications / W. Kalista, L. Leszkowska, M. Rzymowski, K. Nyka, L. Kulas // 24th Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022. P. 1–4. doi: 10.23919/MIKON54314.2022.9924842

75. Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R. 3D printed luneburg lens for flexible beam steering at millimeter wave frequencies // 47th European Microwave Conf. (EuMC), Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. IEEE, 2017. P. 787–790. doi: 10.23919/EuMC.2017.8230965

Информация об авторах

Кусайкин Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук (2015), доцент (2021), доцент кафедры многоканальной электрической связи Уральского технического института связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (УрТИСИ СибГУТИ). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; системный анализ; системы связи. Адрес: УрТИСИ СибГУТИ, ул. Репина, д. 15, Екатеринбург, 620109, Россия
E-mail: kusaykin@mail.ru

Григорьев Игорь Владимирович – бакалавр по направлению "Радиотехника" (2022), студент 2-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им.

В. И. Ульянова (Ленина). Автор восьми научных публикаций. Сфера научных интересов – пассивные СВЧ-устройства; антенная техника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: grigorev.i1@mail.ru

Денисов Дмитрий Вадимович – кандидат технических наук (2015), доцент (2021), доцент кафедры информационных технологий и систем управления Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета, доцент кафедры информационных систем и технологий Уральского технического института связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (УрТИСИ СибГУТИ). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – радиотехника; антенная техника.

Адрес: Уральский федеральный университет, ул. Мира, д. 32, Екатеринбург, 620002, Россия

E-mail: denisov.dv55@gmail.com

Туральчук Павел Анатольевич – кандидат физико-математических наук (2010), доцент кафедры микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – пассивные и активные СВЧ-устройства с использованием планарной и многослойных технологий; физическая акустика; антенная техника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: paturalchuk@etu.ru

References

1. 3D printed dielectric lenses increase antenna gain and widen beam scanning angle: White paper. Available at: https://3dfortify.com/white_papers/3d-printed-dielectric-lenses-increase-antenna-gain-and-widen-beam-scanning-angle/ (accessed 10.10.2023)
2. Wang Y., Zhang X., Su R., Chen M., Shen C., Xu H., He R. 3D Printed Antennas for 5G Communication: Current Progress and Future Challenges. Chinese J. of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2023, vol. 2, iss. 1, p. 100065. doi: 10.1016/j.cjmeam.2023.100065
3. Sato K., Ujiie H. A Plate Luneberg Lens with the Permittivity Distribution Controlled by Hole Density. Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications). 2002, vol. 85, iss. 9, pp. 1–12. doi: 10.1002/ecja.1120
4. Cheng Q., Ma H. F., Cui T. J. Broadband Planar Luneburg Lens Based on Complementary Metamaterials. Appl. Phys. Lett. 2009, vol. 95, iss. 18, p. 181901. doi: 10.1063/1.3257375
5. Pasternak Yu. G., Pendyurin V. A., Rogozin E. A., Rogozin R. E., Fedorov S. M. Analysis of Modern Methods and Means of Technical Implementation of Luneburg Lens. Antennas. 2022, no. 2, pp. 53–62. doi: 10.18127/j03209601-202202-07 (In Russ.)
6. Liang M., Ng W.-R., Chang K., Gbele K., Gehm M. E., Xin H. A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping. IEEE Trans Antennas Propag. 2014, vol. 62, iss. 4, pp. 1799–1807. doi: 10.1109/TAP.2013.2297165
7. Norooziarab M., McCloskey D., Kozlov D. S., Kirillov V. V., Bulja S., Pivitt F., Rulikowski P. Millimeter-wave 3D Printed Luneburg Lens Antenna. 2019 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). IEEE, 2019, pp. 1–2. doi: 10.23919/RADIO46463.2019.8968885
8. Yue J., Zhou C., Chai S., Xiao K. Design of a Metamaterial Luneburg Lens Antenna Based on 3D Printing Technology. 2022 2nd Intern. Conf. on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI). Nanjing, China, 23–25 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 352–355. doi: 10.1109/CEI57409.2022.9950224
9. Ratajczak P. Design of a 3D Printed Luneburg Lens Antenna for Multiple Beams Applications at mm-wave Frequencies. 13th European Conf. on Antennas and Propagation (Eu-CAP). Krakow, Poland, 31 March 2019–05 April 2019. IEEE, 2019, pp. 1–4.
10. Hoel K. V., Kristoffersen S. Characterization of Variable Density 3D Printed Materials for Broadband GRIN Lenses. 2017 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego, USA, 09–14 July 2017. IEEE, 2017, pp. 2643–2644. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073364
11. Brakora K. F., Halloran J., Sarabandi K. Design of 3-D Monolithic MMW Antennas Using Ceramic Stereolithography. IEEE Trans Antennas Propag. 2007, vol. 55, no. 3, pp. 790–797. doi: 10.1109/TAP.2007.891855
12. Xin H., Liang M. 3-D-Printed Microwave and THz Devices Using Polymer Jetting Techniques. Proc. of the IEEE. 2017, vol. 105, no. 4, pp. 737–755. doi: 10.1109/JPROC.2016.2621118
13. Li X., Wei G., Lei S., Han K., Qiu T., Zhang G., Zhou Yu. Bifunctional Luneburg-Eaton Lens Fabricated of 3-D-Printed Anisotropic Medium. IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2022, vol. 21, no. 7, pp. 1462–1466. doi: 10.1109/LAWP.2022.3171777
14. Li Y., Ge L., Chen M., Zhang Z., Li Z., Wang J. Multibeam 3-D-Printed Luneburg Lens Fed by Magneto-electric Dipole Antennas for Millimeter-Wave MIMO

- Applications. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019, vol. 67, no. 5, pp. 2923–2933. doi: 10.1109/TAP.2019.2899013
15. Scalise G., Boccia L., Amendola G., Rousstia M., Shamsafar A. Magneto-Electric Dipole antenna for 5-G applications. 2020 14th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP). Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020. IEEE, 2020, pp. 1–3. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9136068
16. Kuzminykh V. M., Orekhov R. S., Pavlov N. A., Salomatov Yu. P., Sugak M. I. Luneburg Spherical Lens Antenna, Made Using 3D Printing Technology. Antennas and Radio Wave Propagation. 2019, pp. 122–126. (In Russ.)
17. Saghlatoon H., Honari M. M., Aslanzadeh S., Mirzavand R. Electrically-small Luneburg Lens for Antenna Gain Enhancement Using New 3D Printing Filling Technique. AEU – Intern. J. of Electronics and Communications. 2020, vol. 124, p. 153352. doi: 10.1016/j.aeue.2020.153352
18. Wang C., Wu J., Guo Y.-X. A 3-D-Printed Multibeam Dual Circularly Polarized Luneburg Lens Antenna Based on Quasi-Icosahedron Models for Ka-Band Wireless Applications. IEEE Trans Antennas Propag. 2020, vol. 68, no. 8, pp. 5807–5815. doi: 10.1109/TAP.2020.2983798
19. Merrill W. M., Diaz R. E., LoRe M. M., Squires M. C., Alexopoulos N. G. Effective Medium Theories for Artificial Materials Composed of Multiple Sizes of Spherical Inclusions in a Host Continuum. IEEE Trans Antennas Propag. 1999, vol. 47, no. 1, pp. 142–148. doi: 10.1109/8.753004
20. Guo Y., Li Y., Wang J. A Millimeter-Wave 3D-Printed Dual-Polarized Wideband Luneburg Lens Antenna. IEEE 9th Intern. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE). Chengdu, China, 26–29 August 2022. IEEE, 2022, pp. 226–229. doi: 10.1109/MAPE53743.2022.9935214
21. Ying Li, Min Liang, Xiaoju Yu, Qi Zhu, Hao Xin. Beam Scanning Array Based on Luneburg Lens. IEEE Antennas and Propagation Society Intern. Symp. (AP-SURSI), Memphis, USA, 06–11 July 2014. IEEE, 2014, pp. 1274–1275. doi: 10.1109/APS.2014.6904964
22. Liang M., Yu X., Sabory-García R., Ng W.-R., Gehm M. E., Xin H. Direction of Arrival Estimation Using Luneburg Lens. IEEE/MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest, Montreal, Canada, 17–22 June 2012. IEEE, 2012, pp. 1–3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259559
23. Yu X., Min Liang, Hao Xin. Performance Evaluation of Wideband Microwave Direction-of-Arrival Estimation Using Luneburg Lens. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2017, vol. 16, pp. 2453–2456.
24. Lei S., Han K., Li X., Wei G. A Design of Broadband 3-D-Printed Circularly Polarized Spherical Luneburg Lens Antenna for X-Band. IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2021, vol. 20, no. 4, pp. 528–532.
25. Liu K., Zhao C., Qu S.-W., Chen Y., Hu J., Yang S. A 3-D-Printed Multibeam Spherical Lens Antenna with Ultrawide-Angle Coverage. IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2021, vol. 20, no. 3, pp. 411–415. doi: 10.1109/LAWP.2021.3054042
26. Kadera P., Lacik J. Performance Comparison of W-band Luneburg Lens Antenna: Additive versus Subtractive Manufacturing. 20th Intern. Conf. on Microwave Techniques (COMITE), Brno, Czech Republic, 19–21 April 2021. IEEE, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/COMITE52242.2021.9419879
27. 30–40 GHz Luneburg Lens Antenna OLLA-300400. Available at: http://www.ecmicrowave.com/m_product/356-OLLA-300400.html (accessed 10.10.2023)
28. Kusaykin D. V., Denisov D. V. *3D-pechat` sfericheskoy linzovoy antenmy` v forme mnog-ogrannika Goldberg* [3D-Printing of a Spherical Lens Antenna in the Form of a Goldberg Polyhedron]. VII Intern. Scientific and Technical Conf. "Radio Engineering, Electronics and Communications" (REiS-2023). Omsk, Russia, 04–06 Oct. 2023, pp. 108–110. (In Russ.)
29. Denisov D. V., Noskov V. Ya., Kusaikin D. V., Malkin A. I. The Influence of the Electrical Dimensions of the Luneberg Lens on Its Diffraction and Antenna Characteristics. Ural Radio Engineering J. 2023, vol. 7, no. 4, pp. 343–375. (In Russ.)
30. Wang M., Liao Z., Chen J., Zhao X., Jin R. A Design Method of the 3-D-Printed Luneburg Lens Antenna. IEEE 10th Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP), Xiamen, China, 04–07 Nov. 2022. IEEE, 2022, pp. 1–2. doi: 10.1109/APCAP56600.2022.10069583
31. Biswas S., Mirotznik M. High Gain, Wide-Angle QCTO-Enabled Modified Luneburg Lens Antenna with Broadband Anti-Reflective Layer. Sci Rep. 2020, vol. 10, no. 1, art. no. 12646. doi: 10.1038/s41598-020-69631-6
32. Xu R., Chen Z. N. A Hemispherical Wide-Angle Beamsteering Near-Surface Focal-Plane Metamaterial Luneburg Lens Antenna Using Transformation-Optics. IEEE Trans Antennas Propag. 2022, vol. 70, no. 6, pp. 4224–4233. doi: 10.1109/TAP.2021.3138554
33. Wang B., Wang C., Zhu Q. An Ellipsoidal Luneburg Lens Antenna for Gain Enhancement and Beam Scanning. 7th Intern. Conf. on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 10–13 Dec. 2021. IEEE, 2021, pp. 2149–2153. doi: 10.1109/ICCC54389.2021.9674665
34. Giddens H., Andy A. S., Hao Y. Multimaterial 3-D Printed Compressed Luneburg Lens for mm-Wave Beam Steering. IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2021, vol. 20, no. 11, pp. 2166–2170. doi: 10.1109/LAWP.2021.3109591
35. Xu R., Chen Z. N. A Transformation-Optics-Based Flat Metamaterial Luneburg Lens Antenna with Zero Focal Length. IEEE Trans Antennas Propag. 2022, vol. 70, no. 5, pp. 3287–3296. doi: 10.1109/TAP.2021.3137528
36. Biswas S., Lu A., Larimore Z., Parsons P., Good A., Hudak N., Garrett B., Suarez J., Mirotznik M. S. Realization of Modified Lune-Burg Lens Antenna Using

Quasi-Conformal Transformation Optics and Additive Manufacturing. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2019, vol. 61, no. 4, pp. 1022–1029. doi: 10.1002/mop.31696

37. Zang Y., Zhu Y., Xie W., Liu X., Bu L., Yang Y. A 3-D-Printed Luneburg Lens Antenna with Consistent Multibeams Based on Quasi-Pyramid Structure. *Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2022, vol. 32, no. 12, art. e23437. doi: 10.1002/mmce.23437

38. Bahr R. A., Adeyeye A. O., Rijs S. V., Tentzeris M. M. 3D-Printed Omnidirectional Luneburg Lens Retroreflectors for Low-Cost mm-Wave Positioning. *IEEE Intern. Conf. on RFID (RFID)*, Orlando, USA, 28 Sept. 2020–16 Oct. 2020. IEEE, 2020, pp. 1–7. doi: 10.1109/RFID49298.2020.9244891

39. Kadera P., Sánchez-Pastor J., Eskandari H., Tyc T., Sakaki M., Schüßler M., Jakoby R., Benson N., Jiménez-Sáez A., Láčík J. Wide-Angle Ceramic Retroreflective Luneburg Lens Based on Quasi-Conformal Transformation Optics for Mm-Wave Indoor Localization. *IEEE Access*. 2022, vol. 10, pp. 41097–41111. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3166509

40. Grigoriev I., Munina I., Zelenchuk D. 3D Printed Ku Band Cylindrical Luneburg Lens. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, vol. 2015, no. 1, p. 012095. doi: 10.1088/1742-6596/2015/1/012095

41. Grigoriev I. V., Munina I. V. Cylindrical Luneburg Lens Using Additive Technologies. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2021, pp. 606–611. (In Russ.)

42. Liu P., Zhu X.-W., Zhang Y., Ji Li, Jiang Z. 3D-Printed Cylindrical Luneburg Lens Antenna for Millimeter-Wave Applications. *Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2020, vol. 30, no. 1, art. e21994. doi: 10.1002/mmce.21994

43. Björkqvist O., Dahlberg O., Quevedo-Teruel O. Additive Manufactured Three Dimensional Luneburg Lens for Satellite Communications. *13th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 31 March 2019–05 Apr. 2019. IEEE, 2019, pp. 1–4.

44. Preperm webshop 3D filaments. Available at: <https://www.preperm.com/webshop/product-category/3d-filaments/> (accessed 10.10.2023)

45. Chen J., Yuan X., Chen M., Cheng X., Zhang A., Peng G., Song W.-L., Fang D. Ultrabroadband Three-Dimensional Printed Radial Perfectly Symmetric Gradient Honeycomb All-Dielectric Dual-Directional Lightweight Planar Luneburg Lens. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018, vol. 10, no. 44, pp. 38404–38409. doi: 10.1021/acsami.8b11239

46. Cao Y., Yan S. A Low-Profile High-Gain Multi-Beam Antenna Based on 3D-Printed Cylindrical Luneburg Lens. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2021, vol. 63, no. 7, pp. 1965–1971. doi: 10.1002/mop.32862

47. Chen J., Chu H., Lai Y., Chen M., Fang D. Modified Luneburg Lens for Achromatic Subdiffraction Focusing and Directional Emission. *IEEE Trans Antennas Propag.* 2021, vol. 69, no. 11, pp. 7930–7934. doi: 10.1109/TAP.2021.3083843

48. Xue L., Fusco V. Patch-Fed Planar Dielectric Slabwaveguide Luneburg Lens. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2008, vol. 2, iss. 2, pp. 109–114. doi: 10.1049/iet-map:20070146

49. Legay H., Tubau S., Girard E., Fraysse J.-P., Chiniard R., Diallo C., Sauleau R., Ettorre M., Fonseca N. Multiple Beam Antenna Based on a Parallel Plate Waveguide Continuous Delay Lens Beamformer. *Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP)*, Okinawa, Japan, 24–28 Oct. 2016. IEEE, 2016, pp. 118–119.

50. Karttunen A., Piironen K., Ala-Laurinaho J., Räisänen A. V. Millimetre-Wave Dielectric Slab and Parallel Plate Waveguide Dielectric Lens Antennas for Beam Steering. *The 8th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, Netherlands, 06–11 April 2014. IEEE, 2014, pp. 459–462. doi: 10.1109/EuCAP.2014.6901791

51. Qu B., Yan S., Zhang A., Wang F., Wang F. 3-D Printed Cylindrical Luneburg Lens for Dual Polarization. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2021, vol. 20, no. 6, pp. 878–882. doi: 10.1109/LAWP.2021.3065938

52. Zheng Y., Ma C., Zheng S., Yang N. A Wide-Angle Scanning Luneburg Lens Antenna. *Intern. J. of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2022, vol. 32, no. 6, art. e23143. doi: 10.1002/mmce.23143

53. Wang C., Wu J., Guo Y.-X. A 3-D-Printed Wideband Circularly Polarized Parallel-Plate Luneburg Lens Antenna. *IEEE Trans Antennas Propag.* 2020, vol. 68, no. 6, pp. 4944–4949. doi: 10.1109/TAP.2019.2955222

54. Thornton J. Waveguide Feed Chains for Scanning Lens Array in Ku and Ka Bands. *The 8th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, Netherlands, 06–11 Apr. 2014. IEEE, 2014, pp. 3026–3029. doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902465

55. Shi Z., Yang S., Qu S.-W., Chen Y. Circularly Polarised Planar Luneburg Lens Antenna for mm-Wave Wireless Communication. *Electron Lett.* 2016, vol. 52, no. 15, pp. 1281–1282. doi: 10.1049/el.2016.1524

56. Lei S., Gao Wei, Han K., Li X., Qiu T. A Wideband 3-D-Printed Multibeam Circularly Polarized Ultrathin Dielectric Slab Waveguide Luneburg Lens Antenna. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2022, vol. 21, no. 8, pp. 1582–1586. doi: 10.1109/LAWP.2022.3174866

57. Berglund E., Freimanis S. 3D-Printed Geodesic Luneburg Lens Antenna with Novel Patch Antenna Feeding. *Kandidatexjobb i elektroteknik*. Stockholm, KTH, 2021, pp. 353–363.

58. Oxelmark D., Jonasson L. 3D-Printed Geodesic Reflective Luneburg Lens Antenna for X-Band. *Kandidatexjobb i elektroteknik*. Stockholm, KTH, 2021, pp. 365–373.

59. Nie B., Lu H., Skaik T., Liu Y., Wang Y. A 3D-Printed Subterahertz Metallic Surface-Wave Luneburg Lens Multibeam Antenna. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2023, vol. 13, no. 3, pp. 297–301. doi: 10.1109/TTHZ.2023.3242227

60. Zang Y., Zhu Y., Xie W., Yang Y., Bu L. A Bi-Dimensional Compressed Luneburg Lens Antenna for Miniaturization Based on Transformation Optics. *Front. Phys.* 2022, vol. 10, pp. 1–11. doi: 10.3389/fphy.2022.1012470
61. Zhang S., Arya R. K., Whittow W. G., Cadman D., Mittra R., Vardaxoglou J. C. Ultra-Wideband Flat Metamaterial GRIN Lenses Assisted with Additive Manufacturing Technique. *IEEE Trans Antennas Propag.* 2021, vol. 69, no. 7, pp. 3788–3799. doi: 10.1109/TAP.2020.3044586
62. Zhang S., Arya R. K., Pandey S., Vardaxoglou Y., Whittow W., Mittra R. 3D-Printed Planar Graded Index Lenses. *IET Microwaves, Antennas & Propagation.* 2016, vol. 10, no. 13, pp. 1411–1419. doi: 10.1049/iet-map.2016.0013
63. Kim Y., Pham D. A., Phon R., Lim S. Lightweight 3D-Printed Fractal Gradient-Index Lens Antenna with Stable Gain Performance. *Fractal and Fractional.* 2022, vol. 6, no. 10, p. 551. doi: 10.3390/fractalfract6100551
64. Lou Y.-H., Zhu Y.-X., Fan G.-F., Lei W., Lu W.-Z., Wang X.-C. Design of Ku-Band Flat Luneburg Lens Using Ceramic 3-D Printing. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2021, vol. 20, no. 2, pp. 234–238. doi: 10.1109/LAWP.2020.3046489
65. Poyanco J.-M., Pizarro F., Rajo-Iglesias E. Cost-Effective Wideband Dielectric Planar Lens Antenna for Millimeter Wave Applications. *Sci Rep.* 2022, vol. 12, no. 1, p. 4204. doi: 10.1038/s41598-022-07911-z
66. Garcia-Marin E., Filipovic D. S., Masa J. L., Sanchez-Olivares P. Low-Cost Lens Antenna for 5G Multi-Beam Communication. *Microw Opt Technol Lett.* 2020, vol. 62, no. 11, pp. 3611–3622. doi: 10.1002/mop.32486
67. Manafi S., González J. F., Filipovic D. S. Design of a Perforated Flat Luneburg Lens Antenna Array for Wideband Millimeter-Wave Applications. 13th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 31 March 2019–05 Apr. 2019. IEEE, 2019, pp. 1–5.
68. Hegazy A. M., Basha M. A., Safavi-Naeini S. 3D-Printed Scanning Dielectric Lens Antenna // 2019 IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, USA, 07–12 July 2019. IEEE, 2019, pp. 1991–1992. doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889020
69. Budhu J., Rahmat-Samii Y., Hodges R. E., Hofmann D. C., Ruffatto D. F., Carpenter K. C. Three-Dimensionally Printed, Shaped, Engineered Material Inhomogeneous Lens Antennas for Next-Generation Space-borne Weather Radar Systems. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2018, vol. 17, no. 11, pp. 2080–2084. doi: 10.1109/LAWP.2018.2848263
70. Hoel K. V., Ignatenko M., Kristoffersen S., Lier E., Filipovic D. S. 3-D Printed Monolithic GRIN Dielectric-Loaded Double-Ridged Horn Antennas. *IEEE Trans. Antennas. Propag.* 2020, vol. 68, no. 1, pp. 533–539. doi: 10.1109/TAP.2019.2938563
71. Goode I., Saavedra C. E. 3D Printed 18 GHz to 28 GHz Horn Antenna and Gradient Index of Refraction Lens. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symp. of the Intern. Union of Radio Science (URSI GASS), Rome, Italy, 28 Aug. 2021–04 Sept. 2021. IEEE, 2021, pp. 1–4. doi: 10.23919/URSIGASS51995.2021.9560278
72. Wirth S. G., Morrow I. L., Horsfall I. Near-Field Microwave Imaging using a Polarimetric Array of 3D Printed Antennas and Lenses. *Loughborough Antennas & Propagation Conf. 2018 (LAPC 2018)*, Loughborough, 12–13 Nov. 2018. IEEE, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1049/cp.2018.1486
73. Kalista W., Leszkowska L., M. Rzymowski, Nyka K., Kulas L. Low-cost 3D Printed Circularly Polarized Lens Antenna for 5.9 GHz V2X Applications. 17th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 26–31 March 2023. IEEE, 2023, pp. 1–4. doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133420
74. Kalista W., Leszkowska L., Rzymowski M., Nyka K., Kulas L. Low-Cost 3D Printed Dielectric Lens Antennas for 5.9 GHz Frequency Band V2X Applications. 24th Intern. Microwave and Radar Conf. (MIKON), Gdansk, Poland, 12–14 Sept. 2022. IEEE, 2022, pp. 1–4. doi: 10.23919/MIKON54314.2022.9924842
75. Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R. 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies. 47th European Microwave Conf. (EuMC), Nuremberg, Germany, 10–12 Oct. 2017. IEEE, 2017, pp. 787–790. doi: 10.23919/EuMC.2017.8230965

Information about the authors

Dmitry V. Kusaykin, Cand. Sci. (2015), Associate Professor of the Department of Multichannel Electrical Communication of the Ural Technical Institute of Communications and Informatics of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics (UrTISI SibGUTI). The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: radio engineering, system analysis, communication systems.

Address: Ural Technical Institute of Communications and Informatics, 15, Repina St., Yekaterinburg 620109, Russia
E-mail: kusaykin@mail.ru

Igor V. Grigoriev, Bachelor in "Radio Engineering" (2022), 2nd year Master's student at Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: passive microwave devices and antenna technology.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: grigorev.il@mail.ru

Dmitry V. Denisov, Cand. Sci. (2015), Associate Professor of the Department of Information Technologies and Control Systems of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies – RTF of the Ural Federal University, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the Ural Technical Institute of Communications and Informatics of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics (UrTISI SibGUTI). The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: radio engineering; antenna technology.
Address: Ural Federal University, 32, Mira St., Yekaterinburg 620002, Russia
E-mail: denisov.dv55@gmail.com

Pavel A. Turalchuk, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2010), Associate Professor of the Department of Microradioelectronics and Technology of Radio Equipment, Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: passive and active microwave devices using planar and multilayer technologies; physical acoustics; antenna technology.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: paturalchuk@etu.ru
