

# Расчет линзы Люнебурга в ANSYS HFSS для подготовки к изготовлению с помощью 3D-печати

Д. В. Денисов, А. А. Тангамян

В работе обсуждается вариант создания линзы Люнебурга (ЛЛ) методом 3D-печати. Приводится описание способа изготовления ЛЛ с помощью распространенного диэлектрика – PLA-пластика, который используется при трехмерном прототипировании. Данный подход позволяет автоматизировать технологический процесс создания подобных антенных систем. До недавнего времени изготовление антенных систем на базе линз оставалось технически сложной задачей, однако с появлением 3D-принтеров и возможности печати из материалов, стабильных в используемом диапазоне частот, стало возможным серийное изготовление сложных сферических структур.

*Ключевые слова:* линза Люнебурга, диэлектрическая проницаемость, 3D-печать, 3D-прототипирование, диаграмма рассеяния.

## 1. Введение

Линза Люнебурга представляет собой объемное физическое тело, способное преобразовывать сферический фронт волны в плоский, выступая тем самым в роли высоконаправленной антенны. Долгое время изготовление подобной линзы было далеко не тривиальной задачей. Однако быстрое прототипирование с использованием 3D-принтеров открыло новые возможности во многих областях. Материал, используемый при трехмерной печати, обладает отличными электрофизическими свойствами, необходимыми для создания линзовой антенны Люнебурга. В связи с дешевизной и широкой распространённостью такого вида пластика антенны на базе линз Люнебурга могут найти широкое применение не только в средствах радиолокации и навигации, но и в беспроводных широкополосных средствах связи гражданского назначения, системах связи пятого поколения 5G, беспилотных системах и системах управления.

Для того чтобы создать линзу Люнебурга с требуемым коэффициентом преломления, в качестве основного материала тела линзы необходимо использовать неоднородный диэлектрик. Изменять параметры диэлектрика можно, контролируя плотность его заполнения при 3D-печати. При этом диэлектрическая проницаемость материала должны меняться в узком диапазоне: от двух в центре до единицы на поверхности (рис. 1).

До недавнего времени основным способом задания неоднородного материала было добавление различных вкраплений для изменения диэлектрической проницаемости. Например, мог использоваться материал с определенным значением диэлектрической проницаемости, значение которой могло плавно увеличиваться путем добавления металлизированной стружки или иных неоднородностей, способных повлиять на коэффициент преломления материала. Также встречались способы изготовления линз Люнебурга с помощью пенопласта разной степени плотности.

С развитием средств трехмерной печати появилась возможность плавно изменять геометрию материала с достаточной степенью точности, управляя тем самым его электрофизическими параметрами. Так как существует возможность реализации требуемых показателей преломления материала, используемого при 3D-прототипировании, то возможно создание

волноведущих структур сложной формы, в частности, ответвителей и элементов антенн с требуемыми электрофизическими параметрами.

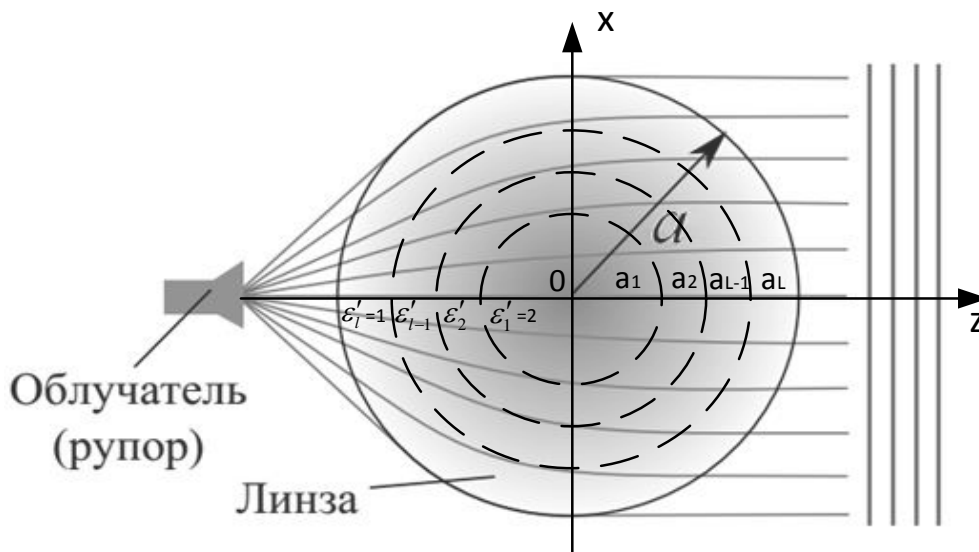


Рис. 1. Дифракция на многослойной ЛЛ

## 2. Способы изготовления линзы Люнебурга

На сегодняшний день существуют различные и весьма оригинальные варианты изготовления линзы Люнебурга, однако большинство из них реализует ступенчатое приближение коэффициента преломления к закону Люнебурга, то есть линза реализуется в виде многослойного материала с различными параметрами диэлектрической проницаемости. Как правило, диэлектрическая проницаемость внутри каждого слоя постоянна и дискретно изменяется от слоя к слою.

В ранних работах было установлено, что реализация ЛЛ с количеством слоев больше 20 нецелесообразна и не приводит к существенному изменению характеристик линзы [1]. Как показывает практика, наибольшей технологичностью обладают 4–6-слойные линзы. Именно такое количество слоев чаще всего используется на практике.

Для того чтобы приблизить параметры ЛЛ к требуемым, могут быть применены различные оптимизационные алгоритмы. Например, критерием оптимизации может служить квадратное приближение параметров стратификации к закону Люнебурга [2].

В качестве наглядного представления возможных способов изготовления ЛЛ рассмотрим обзор наиболее известных ее реализаций.

На рис. 2 изображена линза Люнебурга, у которой неоднородность диэлектрической проницаемости материала реализована благодаря вырезам по параболическому профилю [3].

Данная конфигурация линзы трудна в реализации на практике по причине малой механической прочности. Это обусловлено тем, что единственным элементом, обеспечивающим целостность линзы, является тонкая сердцевина, а низкая прочность заготовки и высокие требования к точности реализации параболического выреза в материале не позволяют изготовить макет автоматизированными средствами.

На рис. 3 представлены примеры конструктивной реализации многослойных ЛЛ в виде полусфер различного радиуса из пористого диэлектрика (рис. 3а), из кусков пенистого полистирола сложной формы (рис. 3б) [4].

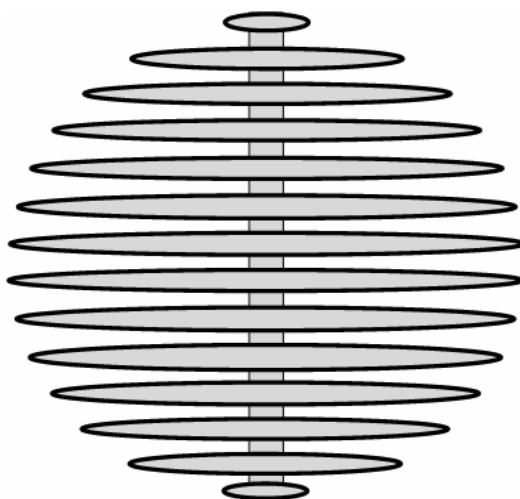


Рис. 2. Многослойная ЛЛ с переменным коэффициентом преломления

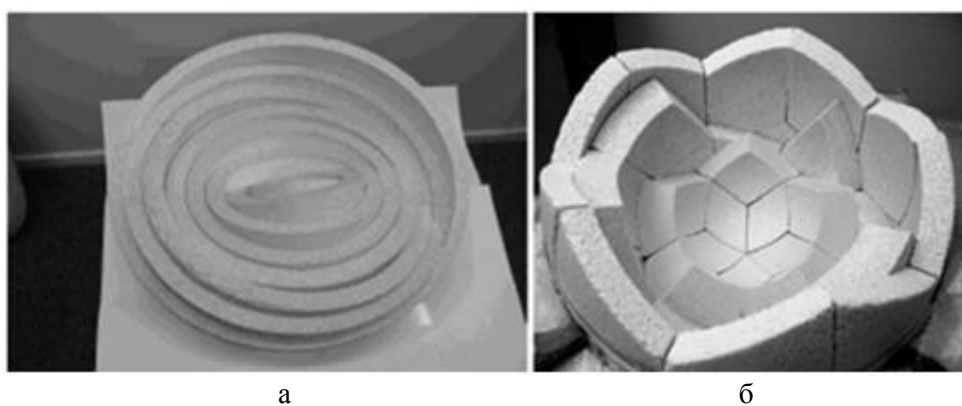


Рис. 3. Конструктивная реализация многослойной линзы

Данная конструкция линзы имеет довольно большой вес – до 200 кг для линзы диаметром 1 метр. Кроме того, наличие клеевых соединений между слоями увеличивает интерференцию радиоволн при прохождении через многослойную структуру, приводя тем самым к искажению формы диаграммы направленности. Такой способ реализации линзы больше подходит для стационарных антенных систем. Примером системы, изготовленной по такому принципу, может служить РЛС «Неман-П» (рис. 4) [5].



Рис. 4. Приемная позиция РЛС «Неман» на Балхашском полигоне

На рис. 5 приведена линза Люнебурга из сферических слоёв, которые выполнены из материалов на основе полистирола с диэлектрической проницаемостью, изменяющейся с шагом 0.1 [6].

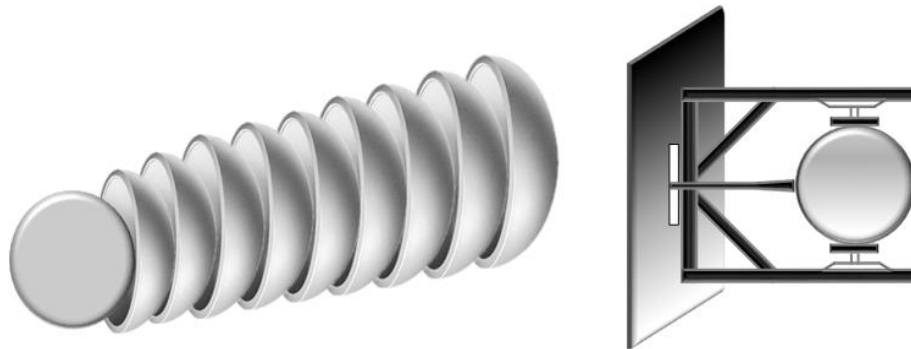


Рис. 5. ЛЛ, выполненная из сферических слоёв

Увеличением количества слоев характеристики такой линзы можно приблизить к идеальным, однако данный способ изготовления сложен, и погрешности в точности выполнения слоёв приводят к падению электродинамических характеристик.

Также следует отметить, что существуют линзы, представляющие собой диэлектрическую сферу, перфорированную стержнями переменного радиуса, выходящими из центра. Макет такой структуры показан на рис. 6а [7].

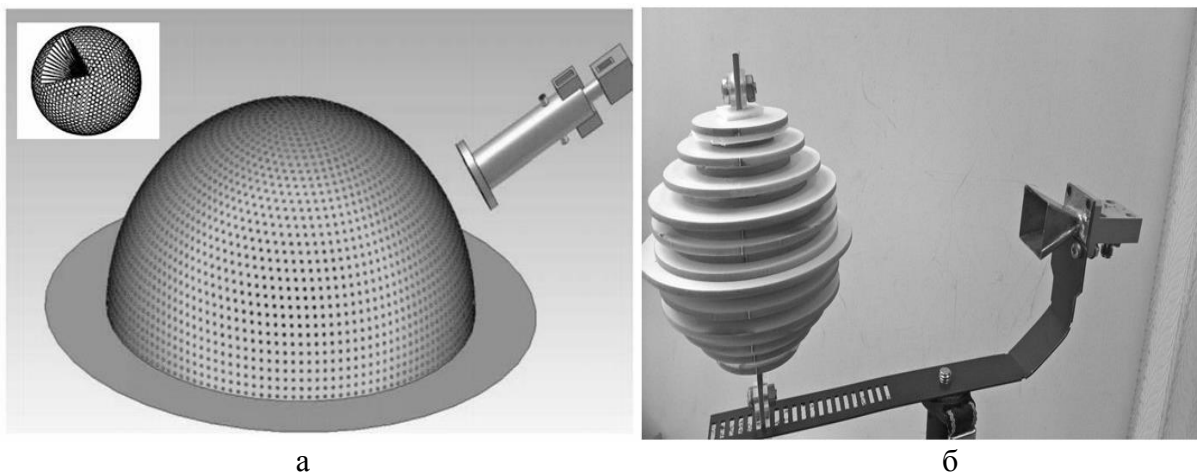


Рис. 6. ЛЛ, выполненная из перфорированного стержнями диэлектрика и дисков диэлектрика изменяющегося радиуса

Но наибольший интерес представляет собой ЛЛ, состоящая из дисков переменного радиуса, которые имитируют изменение коэффициента преломления вдоль радиуса линзы. От используемого материала будет изменяться положение фокуса линзы. Макет такой структуры показан на рис. 6б [8].

Для того чтобы улучшить характеристики линзы, при её изготовлении возможно внесение в материал каждого слоя неоднородностей различного размера и формы или, наоборот, образование проницаемых отверстий и щелей [9, 10]. Кроме того, тело линзы может состоять из дискретных элементов с различными коэффициентами преломления [11].

В последнее время ведутся работы по исследованию искусственных материалов и использованию их для изготовления линзы Люнебурга. Примером может служить совместная разработка института световой фотоники и научно-исследовательского центра нанофотоники и метаматериалов НИУ ИТМО [12]. Линзу Люнебурга было предложено собирать из радиальных диэлектрических стержней [13, 14]. Внешний вид линзы и её разрез представлен на рис. 7.

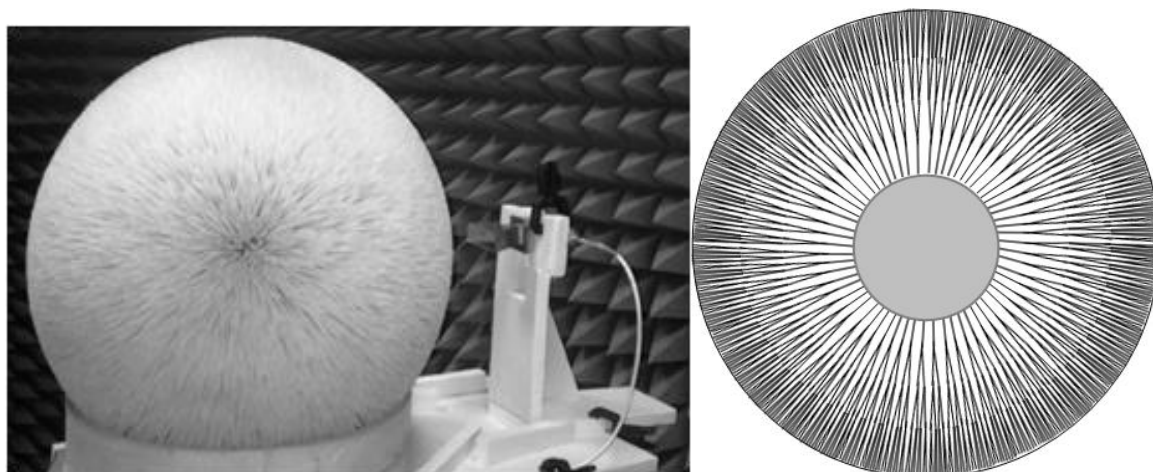


Рис. 7. Сферическая ЛЛ на основе диэлектрического метаматериала

Преимуществом такой конструкции является идентичность деталей из однородного материала (полистирола), необходимого для сбора геометрии линзы. Элементы данной модели могут изготавливаться на 3D-принтере, а небольшие линзы Ка-диапазона могут быть напечатаны целиком. При этом объём сферы заполнен частично, что способствует снижению веса в 3–4 раза по сравнению с полностью заполненной сферой. Отсутствие послойно-однородной структуры уменьшает фазовые ошибки и увеличивает эффективность использования апертуры [12].

Таким образом, при анализе различных вариантов изготовления ЛЛ можно сделать вывод, что наиболее технологичный способ реализации ЛЛ заключается в её создании из неоднородного диэлектрика, формируемого методом 3D-печати. Ниже будет решена задача оптимизации линзы Лüneбурга для определения структуры материала с использованием программного пакета ANSYS HFSS и опции Parametric Analyze и Design of Experiments.

### 3. Изготовление линзы методом 3D-печати

Основной задачей при изготовлении линзы Лüneбурга с помощью трёхмерного прототипирования является выбор наиболее оптимальной геометрии заполнения основного элемента конструкции тела линзы. На сегодняшний день опубликовано множество вариантов, среди которых ЛЛ, изготовленные с помощью печати на 3D-принтере с использованием технологии струйной полимеризации, включающей в структуру электромагнитные кристаллы [15]. Такие антенные системы применимы не только для аэрокосмической промышленности, но и могут изготавливаться на заказ для конкретных рабочих частот и пропускной способности. Внешний вид таких линз представлен на рис. 8.

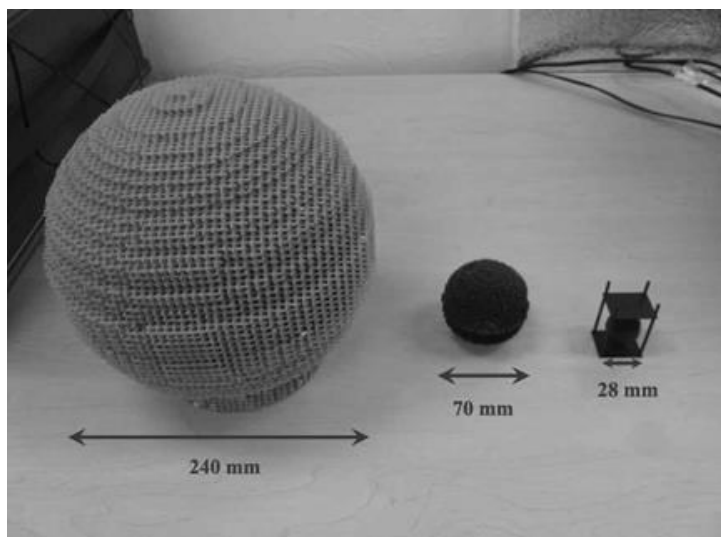


Рис. 8. Внешний вид ЛЛ, изготовленных методом 3D-печати

В нашей работе мы будем уменьшать среднюю диэлектрическую проницаемость каждого слоя линзы с помощью кубических отверстий. Добавление воздушных заполнений кубической формы разного размера и с разным шагом позволит уменьшать диэлектрическую проницаемость до требуемого значения. Пример центральной сферы линзы (первого слоя) с подобным заполнением приведен на рис. 9.

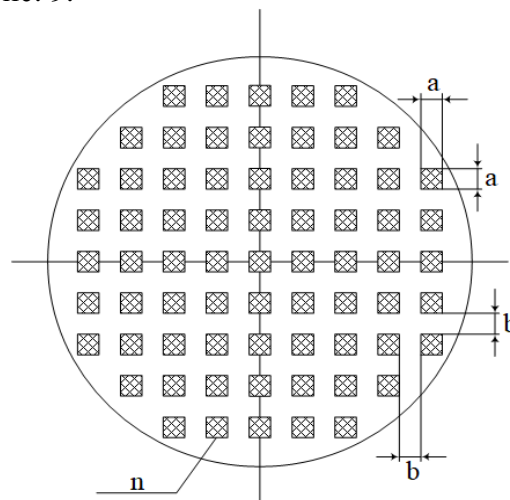


Рис. 9. Структура ЛЛ с перфорацией отверстий

Регулировка диэлектрической проницаемости производится с помощью трёх параметров:  $a$  – размер сторон кубического элемента,  $b$  – расстояние между элементами,  $n$  – количество элементов. Для достижения наиболее удовлетворительных электродинамических параметров при прохождении волны через подобную структуру должно соблюдаться условие  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны.

В работе [2] приводятся параметры слоёв линзы Люнебурга с оптимизированной аппроксимацией профиля. В таблице ниже для разного количества слоёв приводятся параметры диэлектрической проницаемости каждого слоя и относительный радиус слоя.

Таблица 1. Параметры слоёв при оптимизированной аппроксимации профиля ЛЛ

L	Радиусы слоёв	Диэлектрическая проницаемость слоёв $\varepsilon'_l$
1	0.82	1.67
2	0.63; 0.89	1.8; 1.4
3	0.53; 0.75; 0.93	1.86; 1.57; 1.28
4	0.47; 0.67; 0.82; 0.94	1.88; 1.67; 1.44; 1.22
5	0.43; 0.60; 0.74; 0.85; 0.95	1.91; 1.73; 1.55; 1.36; 1.18
6	0.39; 0.56; 0.68; 0.78; 0.88; 0.96	1.93; 1.77; 1.61; 1.46; 1.31; 1.16
7	0.37; 0.52; 0.63; 0.73; 0.82; 0.89; 0.97	1.93; 1.80; 1.67; 1.53; 1.40; 1.27; 1.13
8	0.34; 0.49; 0.59; 0.69; 0.77; 0.84; 0.91; 0.97	1.94; 1.82; 1.71; 1.59; 1.47; 1.35; 1.24; 1.12

На рис. 10 приводится пример оптимизированного разделения линзы на 6 слоёв, где показаны теоретический (сплошная линия) и восстановленный (пунктирная) законы распределения для нормализованных радиусов и диэлектрической проницаемости. Также существуют и другие оптимизационные алгоритмы определения профиля линзы. Мы в работе рассматриваем оптимизированную аппроксимацию, так как при данном подходе при меньшем количестве слоёв можно добиться наилучших антенных характеристик.

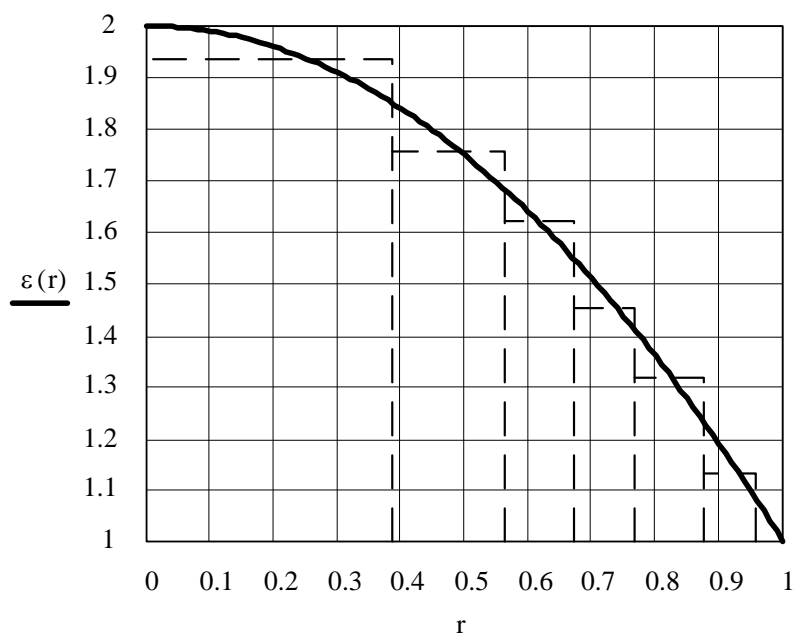


Рис. 10. Оптимизированная стратификация шестислойной модели ЛЛ

С увеличением количества слоев закон распределения приближается к непрерывному, что, в свою очередь, увеличивает коэффициент усиления антенны. Однако с добавлением каждого нового слоя увеличивается техническая трудность реализации такой линзы.

#### 4. Подбор параметров перфорации с помощью параметрического анализа в ANSYS HFSS

Для подбора параметров отверстий ( $a$ ,  $b$ ,  $n$ ) будет использована опция программного пакета ANSYS HFSS, отвечающая за возможность проведения параметрического анализа – Parametric и Design of Experiments. Суть использования данного подхода заключается в том, чтобы, изменяя параметры геометрии модели, приблизиться к необходимым электродинамическим характеристикам. Так, например, при рассмотрении четырехслойной модели линзы с параметрами  $a = 0.47; 0.67; 0.82; 0.94$ .  $\varepsilon'_l = 1.88; 1.67; 1.44; 1.22$  рассчитывается диаграмма рассеяния на каждом отдельно взятом слое.

Далее выбирается сфера того же геометрического размера, но с параметрами проницаемости материала, из которого может быть произведено 3D-прототипирование. В нашей работе в качестве базового материала используется PLA-пластик с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon'_l = 3.1$ . Затем с помощью параметрического анализа производится изменение параметров отверстий до тех пор, пока диаграмма рассеяния на сфере необходимой диэлектрической проницаемости не станет совпадать с параметрами рассеяния на сфере с отверстиями.

С помощью добавления отверстий (перфорации) уменьшается проницаемость исходного материала, в данном случае PLA-пластика ( $\varepsilon'_l = 3.1$ ), до тех пор, пока параметры рассеяния не будут совпадать с параметрами одного из слоев при оптимизированной аппроксимации профиля линзы.

Приведем расчет четырех различных слоев модели линзы. Так, например, на рис. 11а приводится геометрия первого слоя четырехслойной линзы с параметрами  $a = 0.47$ ;  $\varepsilon'_l = 1.88$ , на рис. 11б приводится геометрия с перфорацией.

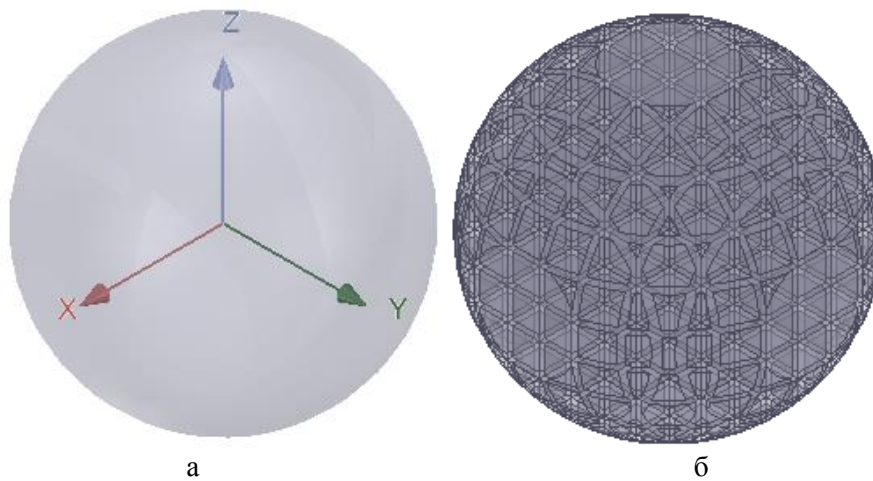


Рис. 11. Геометрия первого слоя четырехслойной ЛЛ

На рис. 12 приведена диаграмма рассеяния для двух указанных геометрий. При этом график с названием «E norm» показывает диаграмму рассеяния цельной сферы с параметрами первого слоя линзы, а «E perf» показывает диаграмму рассеяния на сфере с перфорацией для того же слоя.

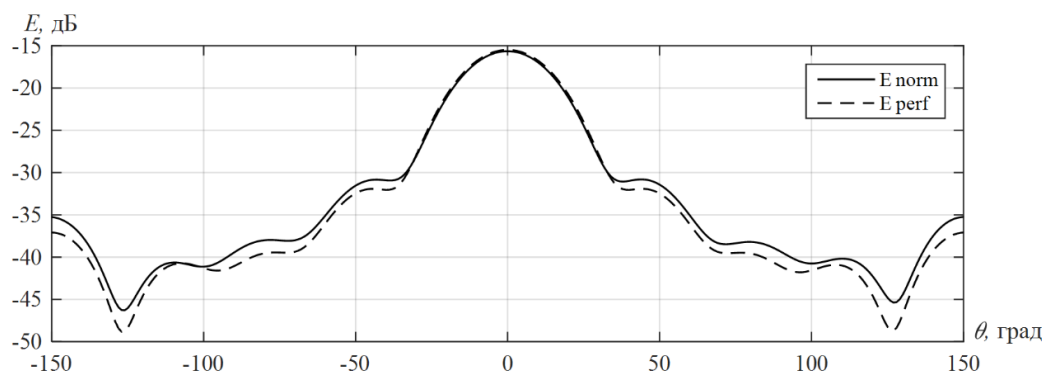


Рис. 12. Диаграмма рассеяния на первом слое линзы

Таким образом, диаграммы на графике рис. 12 показывают, что при уменьшении плотности заполнения материала можно добиться изменения диэлектрической проницаемости с необходимой степенью точности. В табл. 2 приводятся параметры заполнения пустыми отверстиями для каждого слоя четырехслойной линзы.

Таблица 2. Параметры заполнения исходного материала (PLA-пластика)

Номер слоя	Радиус $a$	Проницаемость исходного материала (PLA-пластик)	$a$ , мм	$b$ , мм	$n$ , шт.	Проницаемость слоя $\varepsilon'_l$
1	0.47	3.1	5	1	5	1.88
2	0.67	3.1	5.2	1	7	1.67
3	0.82	3.1	5.5	1	9	1.44
4	0.94	3.1	5.3	1	10	1.22

Для наглядности на рис. 13 приведено изображение волнового фронта при прохождении электромагнитной волны через ЛЛ.



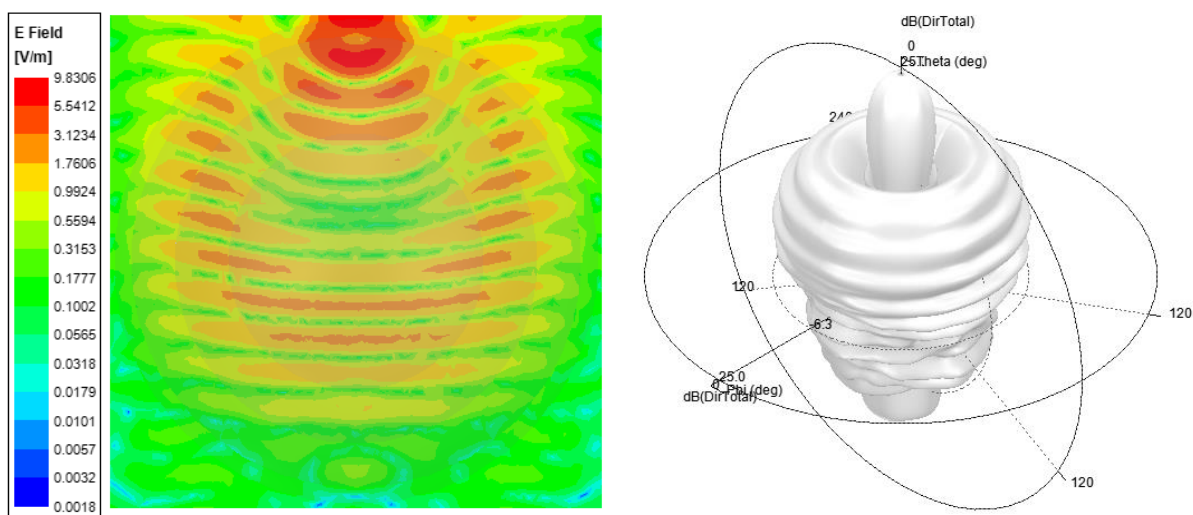


Рис. 13. Рассеяние электромагнитной волны на четырехслойной линзе

Данные, приведённые в табл. 2, могут быть использованы при создании геометрии линзы в программном пакете для трехмерного моделирования с целью подготовки геометрии для печати на 3D-принтере.

## 5. Заключение

В работе обсуждается вариант создания линзы Лüneбурга методом 3D-печати. Приводится описание способа изготовления ЛЛ с помощью распространенного диэлектрика – PLA-пластика, который используется при трехмерном прототипировании. Данный подход позволяет автоматизировать технологический процесс создания подобных антенных систем. До недавнего времени изготовление антенных систем на базе линз оставалось технически сложной задачей, однако с появлением 3D-принтеров и возможностью печати из материалов, стабильных в используемом диапазоне частот, стало возможным серийное изготовление сложных сферических структур. Следует отметить, что точность выполнения печати должна быть достаточно высокой. Приемлемая точность выполнения линзы достижима при использовании промышленных 3D-принтеров.

## Литература

1. Денисов Д. В. Антенные и дифракционные характеристики линз Лüneбурга при облучении полем круговой поляризации: диссертация.
2. Fuchs B., Coq Le L., Lafond O., Rondineau S. Design optimization of multishell Luneburg Lenses // IEEE Trans. AP. 2007. V. 55, № 2. P. 283–289.
3. Александрин А. М., Рязанцев Р. О., Саломатов Ю. П. Исследование квазиоптических структур из искусственного диэлектрика в СВЧ-диапазоне // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2010.
4. Baev S., Hadjistamov B., Dankov P. Lüneburg Lenses as Communication Antennas // Annuaire de l'Université de Sofia "St. Kliment Ohridski", Faculte de Physique. 2009. № 102. P. 67–84.
5. Денисенко В. В., Курикуша В. А., Левишан Б. А. и др. История отечественной радиолокации. М.: Изд. дом «Столичная энциклопедия», 2011, разд. 7.3.
6. Schell H. W. Luneberg Linsen Antennen fur Nachrichtensatelliten // Raumfahrtforschung. 1970. V. 14, № 3. P. 96.
7. Мешковский И. К., Шанников Д. В. Фазовые искажения в анизотропной линзе Лüneбурга // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, В. 22. С. 1–6.

8. *Рязанцев Р. О., Александрин А. М., Саломатов Ю. П.* Исследование квазиоптических структур из искусственного диэлектрика в СВЧ-диапазоне // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического унив. им. Ак. М. Ф. Решетнева. 2010. В. 6 (32). С. 15–18.
9. *Zouganelis G., Budimir D.* Effective dielectric constant and design of sliced Luneberg lens // Microwave and Optical Technology Letters. 2007. V. 49, № 10. P. 2332–2337.
10. *John Hunt, Nathan Kundtz, Nathan Landy, Vinh Nguyen, Tim Perram, Anthony Starr and David R. Smith.* Broadband Wide Angle Lens Implemented with Dielectric Metamaterials // Sensors. 2011. № 11. P. 7982–7991.
11. *Голубятников А. В.* Линза Люнебурга из кубиков. Геометрооптический расчёт // Письма в ФТЖ. 1998. Т. 24, № 15.
12. Линза Люнебурга на основе метаматериалов. URL: <http://phoinf.ifmo.ru> (дата обращения: 10.04.2014).
13. *Мешковский И. К., Шанников Д. В.* Фазовые искажения в анизотропной линзе Люнебурга // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, В. 22. С. 1–6.
14. Устройство для фокусировки при приеме – передаче радиоволн сантиметрового диапазона. Патент РФ № 2159487; опубликовано 20.11.2000 г. Авторы: Мешковский И. К., Шанников Д. В. Правообладатель: Мешковский Игорь Косьянович.
15. *Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R.* 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies // IEEE 2017 47th European Microwave Conference (EuMC).

*Статья поступила в редакцию 18.03.2020;  
переработанный вариант – 03.09.2020.*

**Денисов Дмитрий Вадимович**

к.т.н., заведующий кафедрой информационных систем и технологий УрТИСИ СибГУТИ (620109, Екатеринбург, ул. Репина, 15), e-mail: [ddv@urtisi.ru](mailto:ddv@urtisi.ru).

**Тангамян Анатолий Анатольевич**

аспирант, преподаватель кафедры информационных систем и технологий УрТИСИ СибГУТИ, e-mail: [taa@urtisi.ru](mailto:taa@urtisi.ru).

**Calculation of the Luneburg lens in ANSYS HFSS for manufacturing preparation using 3D printing**

**D. V. Denisov, A. A. Tangamyun**

The paper discusses the option of creating a Luneburg lens (LL) using 3D printing. The paper describes a method for manufacturing LL using a common dielectric-PLA-plastic, which is used for three-dimensional prototyping. This approach allows you to automate the technological process of creating such antenna systems. Until recently, the production of antenna systems based on lenses remained technically challenging, but with the advent of 3D printers and the ability to print from materials that are stable in the used frequency range, it became possible to mass-produce complex spherical structures.

*Keywords:* Luneburg lens, permittivity, 3D printing, 3D prototyping, scattering diagram.