

## Цилиндрическая линза Люнеберга с использованием аддитивных технологий

И.В. Григорьев, И.В. Мунина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Разработана и экспериментально исследована конструкция цилиндрической линзы Люнеберга, изготовленная с использованием 3D-печати. При разработке конструкции линзы были использованы два различных подхода к дискретизации ее параметров. Была проведена оценка диэлектрической проницаемости образцов, изготовленных с различным процентом заполнения PLA-пластиком.

**Ключевые слова:** линза Люнеберга, характеристика диэлектриков, 3D-печать, аддитивные технологии.

### 1. Введение

Линза Люнеберга представляет собой сферу с градиентным изменением показателя преломления и размещенным на ее поверхности облучателем. Она предназначена для формирования узкого главного лепестка диаграммы направленности. Основными преимуществами линзы Люнеберга по сравнению с традиционными фазированными антенными решетками являются высокий коэффициент усиления, возможность широкоугольного сканирования без падения коэффициента усиления и низкий уровень боковых лепестков. Показатель преломления линзы от центра к внешнему радиусу изменяется от  $\sqrt{2}$  до 1. Классическая линза Люнеберга обеспечивает отклонение луча в двух плоскостях при изменении положения облучателя вдоль плоскости линзы. Для отклонения луча в одной плоскости может быть использован цилиндрический срез линзы.

Изменение показателя преломления линзы Люнеберга от центра к ее поверхности носит непрерывный характер. Однако, для практической реализации линзы зависимость показателя преломления необходимо дискретизировать. Существуют два различных подхода к дискретизации: использование слоев с одинаковой толщиной или использование слоев с фиксированным дискретом по показателю преломления и, соответственно, различными толщинами слоев. Для изготовления такой слоистой структуры могут быть использованы аддитивные технологии производства. Изменение диэлектрической проницаемости линзы может быть реализовано путем изменения процентного содержания пластика в объеме слоя. Такой подход был использован для реализации проходной антенной решетки [1]. Альтернативным методом изменения диэлектрической проницаемости слоя является использование эффективной среды, состоящей из субволновых элементарных ячеек с различным объемом заполнения воздухом [2].

В работе представлена конструкция цилиндрической линзы Люнеберга, которая представляет собой набор концентрических слоев с разным процентным заполнением PLA-пластиком.

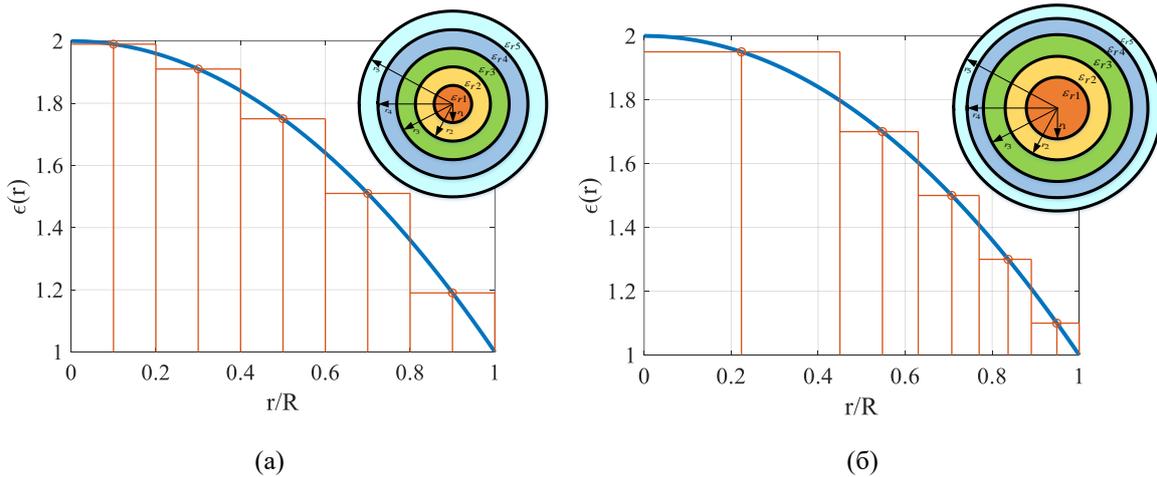
### 2. Цилиндрическая линза Люнеберга: моделирование и эксперимент

Линза Люнеберга представляет собой структуру с пространственно изменяющимся показателем преломления:

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon(r)} = \sqrt{2 - (r/R)^2}, \quad (1)$$

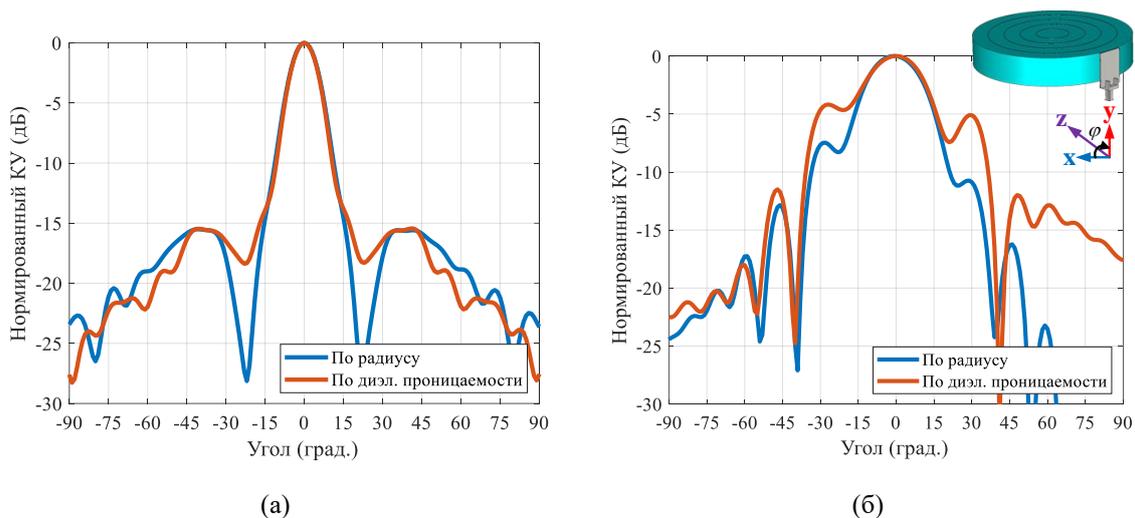
где  $r$  - расстояние от центра линзы, а  $R$  - внешний радиус. Технологически сложно реализовать непрерывное изменение показателя преломления, а, следовательно, и диэлектрической проницаемости материала вдоль линзы. Одним из решений является использование разнородных материалов, но технологичнее использовать один и тот же материал и варьировать его процентное содержание в слое. Такой подход может быть реализован с помощью 3D-печати, что обеспечивает относительную дешевизну производства, а возможность регулировать процент заполнения слоя хорошо согласуется с требуемым характером структуры.

В данной работе рассмотрена реализация линзы Лüneберга в виде цилиндрического среза сферической линзы. Такая линза представляет собой концентрически расположенные цилиндры с определенным набором значений диэлектрической проницаемости (рис.1). Дискретизация линзы может быть равномерной по радиусу, либо равномерной по диэлектрической проницаемости. Оба метода характеризуются слоистой структурой, причем каждому слою соответствует свое значение диэлектрической проницаемости. Количество слоев при дискретизации влияет на характеристики линзы. Выбор 5 слоев в структуре был обусловлен тем, что дальнейшее увеличение количества слоев не приводит к значительному улучшению характеристик линзы [3].



**Рисунок 1.** Равномерная дискретизация линзы по радиусу (а) и равномерная дискретизация по диэлектрической проницаемости (б).

Расстояние от центра линзы  $r$  было нормировано к внешнему радиусу  $R$  (рис. 1). Полученные значения диэлектрической проницаемости слоев были использованы для полноволнового электродинамического моделирования. Были разработаны две модели с радиусом 5 см ( $3\lambda$  на частоте 18 ГГц) и высотой 18 мм. В качестве облучателя была выбрана патч-антенна, работающая на частоте 18 ГГц. Рабочая полоса частот антенны по уровню -10 дБ коэффициента отражения составляет 4%. Стоит отметить, что линза Лüneберга является частотно независимой и рабочая полоса определяется рабочей полосой частот облучателя.



**Рисунок 2.** Нормированный коэффициент усиления в E- (а) и H-плоскости (б) для двух типов линз Лунеберга на частоте 18 ГГц.

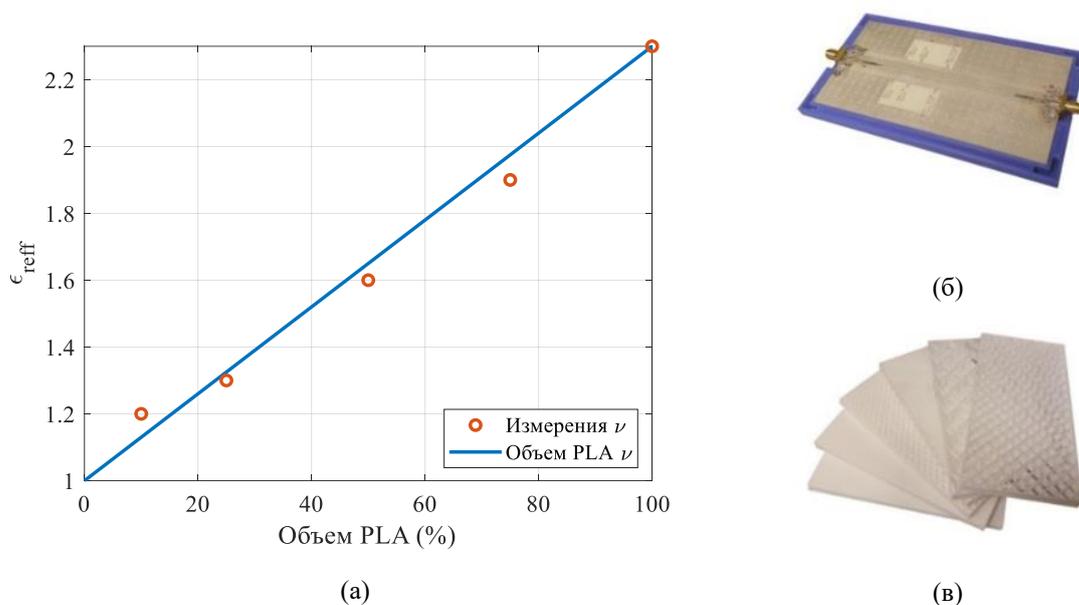
Результаты полноволнового моделирования представлены на рис. 2. Результаты моделирования показывают, что коэффициент усиления линзы с равномерным радиусом составляет 17,6 дБи на частоте 18 ГГц. Ширина главного лепестка в плоскости E составляет около  $11,9^\circ$ , а уровень боковых лепестков -15,5 дБ. Для линзы с равномерной диэлектрической проницаемостью коэффициент усиления составляет 17,7 дБи, а ширина главного лепестка около  $11,5^\circ$  с уровнем боковых лепестков лучше 15,4 дБ.

Чтобы реализовать линзу Лунеберга, необходимо обеспечить градиентное изменение диэлектрической проницаемости путем варьирования процента заполнения пластиком слоя дискретизированной структуры. Требуемые дискретные значения эффективной диэлектрической проницаемости реализуются путем их пересчета в процент заполнения слоя PLA-пластиком. Диэлектрическая проницаемость может быть пересчитана в процент заполнения [1] с помощью (2):

$$v = \frac{\varepsilon_{\text{reff}} - 1}{\varepsilon_{r0} - 1}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{r0}$  - относительная диэлектрическая проницаемость пластика для 3D-печати,  $\varepsilon_{\text{reff}}$  - эффективная диэлектрическая проницаемость слоя линзы.

Для расчетов  $v$  важно знать диэлектрическую проницаемость материала для 3D-печати. Был использован резонансный метод определения диэлектрической проницаемости. Было изготовлено пять образцов толщиной 3 мм с различным процентом заполнения от 10% до 100%. Образцы с различным заполнением устанавливались на копланарный резонатор и по сдвигу резонансной частоты определялось соответствие диэлектрической проницаемости проценту заполнения образца. Сравнение результатов, полученных по формуле (2), с измеренными данными показано на рис. 3. Диэлектрическая проницаемость 100% заполненного PLA-пластиком образца была определена как 2,3.



**Рисунок 3.** Зависимость диэлектрической проницаемости от объема PLA (а), резонатор, который использовался для характеристики материала (б) и образцы из PLA-пластика с различным процентом заполнения (в).

При печати линзы слои с разным процентным заполнением отделяются один от другого сплошными диэлектрическими стенками, толщину которых необходимо учитывать при расчете процента заполнения. Для описания эффективного объема пластика с учетом наружных стенок (обычно минимальная толщина стенки равна диаметру сопла 3D-принтера) каждого цилиндрического слоя использовалось следующее выражение [1]:

$$d = \frac{v\pi(R^2 - r^2) - 2\pi(R + r)}{\pi(R^2 - r^2) - 2\pi(R + r)}, \quad (3)$$

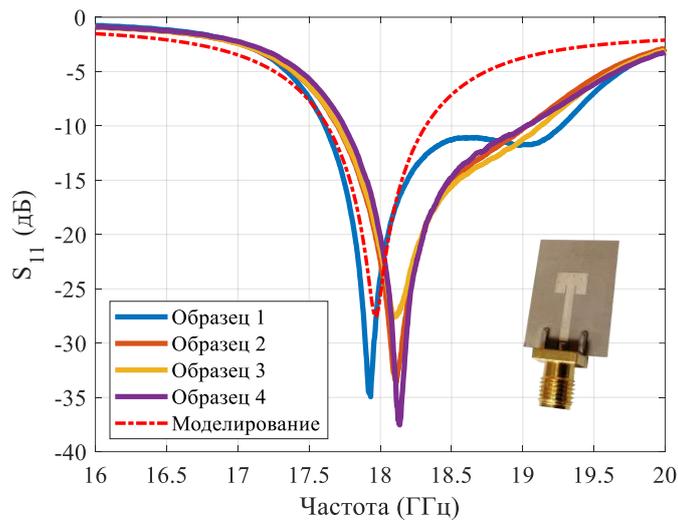
где  $t$  - толщина наружной стенки, определяемая диаметром сопла экструдера,  $R$  - наружный и  $r$  - внутренний радиусы цилиндрического кольца соответственно. Данные по изготовлению линз представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры для печати линзы

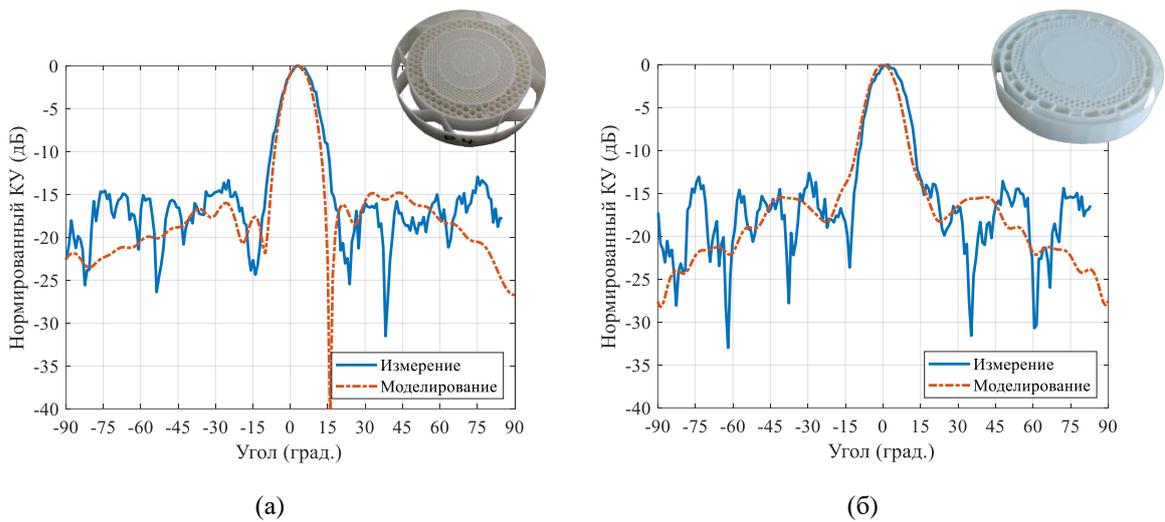
<b>Одинаковая толщина слоев</b>	$\epsilon_{\text{reff}}$	1.99	1.91	1.75	1.51	1.19
	$r/R$	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
	$d, \%$	74	67	54	34	7
<b>Фиксированный дискрет по диэлектрической проницаемости</b>	$\epsilon_{\text{reff}}$	1.90	1.70	1.50	1.30	1.10
	$r/R$	0.45	0.63	0.77	0.89	1.00
	$d, \%$	68	50	31	11	2

Для облучения линзы были изготовлены и измерены 4 образца патч-антенн. Проведено сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования (рис. 4). Используя данные приведенные в таблице 1, были напечатаны две линзы с различными подходами к дискретизации их параметров. Результаты измерений диаграммы направленности линз в дальней зоне хорошо согласуются с результатами моделирования (рис. 5). Для линзы с равномерной дискретизацией по радиусу ширина главного лепестка по уровню -3дБ составила  $12.3^\circ$ , уровень боковых лепестков (УБЛ)

-15 дБ, для второго типа дискретизации ширина луча  $13.5^\circ$ , а УБЛ -13 дБ.

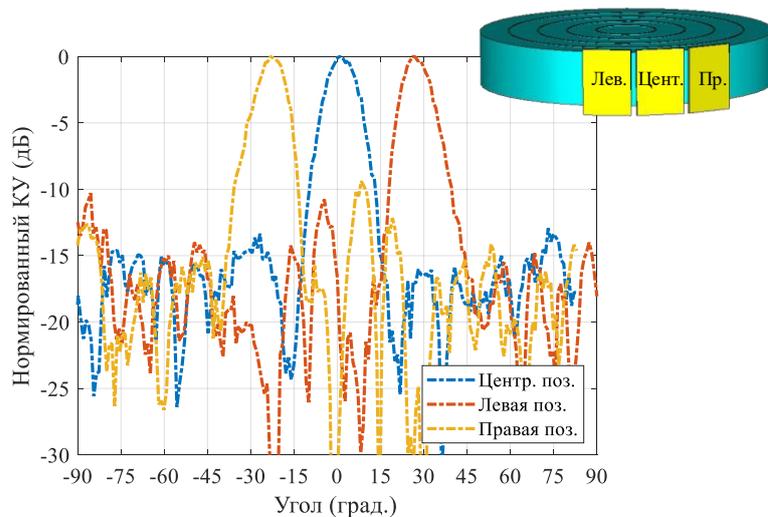


**Рисунок 4.** Коэффициент отражения изготовленных патч-антенн.



**Рисунок 5.** Нормированные диаграммы направленности линз Лунеберга: равномерный дискрет толщины слоя (а) и равномерный дискрет по диэлектрической проницаемости (б).

Также, изменяя положение облучателя возможно осуществить сканирование пространства, результаты измерения представлены на рис. 6. При измерении патч-антенна устанавливалась в различные положения относительно центрального, таким образом возможно реализовать сканирование в одной плоскости для случая цилиндрической линзы (рис. 6). При смещении антенны луч отклонялся на  $25^\circ$  от центрального положения.



**Рисунок 6.** Измеренные диаграммы направленности для трех различных положений облучателя.

### 3. Заключение

В данной работе была разработана 3D-печатная цилиндрическая линза Лüneберга. Для изготовления линз были охарактеризованы резонансным методом образцы с различным процентом заполнения PLA-пластиком. Были промоделированы, изготовлены и измерены две линзы с различными подходами к дискретизации параметров. В качестве источника излучения использовалась патч-антенна, работающая на частоте 18 ГГц. Измеренные результаты соответствуют результатам моделирования.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20374П).**

#### Список литературы

1. Zhang S. et al. 3D-printed planar graded index lenses // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2016. – Т. 10. – №. 13. – С. 1411-1419.
2. Norooziarab M. et al. Millimeter-wave 3D Printed Luneburg Lens Antenna // 2019 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). – IEEE, 2019. – С. 1-2.
3. Korotkov A. N., Shabunin S. N., Chechetkin V. A. The cylindrical Luneburg lens discretization influence on its radiation parameters // 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – IEEE, 2017. – С. 394-398.