

**Кузиков А.А.<sup>1</sup>, Орехов Р.С.<sup>2</sup>, Саломатов Ю.П.<sup>3</sup>, Сугак М.И.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>АО «НИИ "Вектор»

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет

## Исследование печатной цилиндрической линзы Люнеберга

*Представлены результаты разработки и экспериментального исследования цилиндрической линзы Люнеберга мм-диапазона, выполненной средствами 3D печати. Макет антенны реализован двумя способами: на основе однородного ступенчатого и перфорированного диэлектрика и работает в полосе частот 18-26 ГГц.*

**Ключевые слова:** цилиндрическая линза Люнеберга, искусственный диэлектрик, 3D печать.

Многолучевые антенны, построенные на основе линзы Люнеберга (ЛЛ) привлекают разработчиков своей широкой полосой рабочих частот и постоянством формы диаграммы направленности (ДН) при отклонении луча в широком интервале углов [1-5]. Появление технологии 3D печати позволяет существенно расширить сферу применения ЛЛ и упростить их производство.

В данной работе был произведен расчёт геометрии двух вариантов исполнения цилиндрической ЛЛ из однородного и перфорированного диэлектриков, выполнено электродинамическое моделирование, изготовлены и исследованы характеристики макетов антенн.

Цилиндрическая ЛЛ устанавливается между двумя металлическими пластинами дисковой формы и имеет коэффициент преломления, который изменяется по закону:

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{\rho}\right)^2},$$

где  $r$  – расстояние от оси цилиндра;  $\rho$  – радиус цилиндра. В соответствии с законами геометрической оптики траектории лучей в такой линзе представляют собой части эллипсов [2]. Излучающим раскрытием цилиндрической ЛЛ является часть боковой поверхности цилиндра, противоположная точке облучения. В выходной плоскости ЛЛ образуется плоский фронт волны, результаты электродинамического моделирования, иллюстрирующие этот факт, приведены на рис.1.

При вертикальной поляризации поля текущая толщина диэлектрика ЛЛ  $t$  определяется по известной методике из соотношения [2]:

$$\operatorname{tg} \left[ \frac{2\pi}{\lambda_0} (s - t) \sqrt{1 - n^2} \right] + \frac{\sqrt{n_d^2 - n^2}}{n_d^2 \sqrt{1 - n^2}} \operatorname{tg} \left[ \frac{2\pi t}{\lambda_0} \sqrt{n_d^2 - n^2} \right] = 0.$$

Здесь  $s$  -расстояние между пластинами,  $n$  требуемое значение коэффициента преломления,  $n_0$  коэффициент преломления диэлектрика. Расстояние между пластинами должно быть меньше половины длины волны в диэлектрике с  $n = n_{\max}$ .

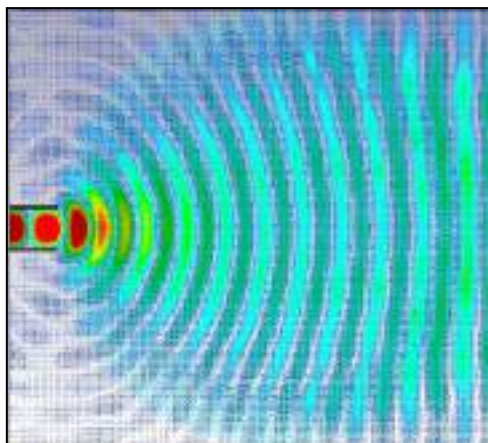


Рис. 1. Электрическое поле в цилиндрической ЛЛ

На этапе проектирования в пакете CST Studio была построена 3D модель идеализированной цилиндрической ЛЛ, выполненной из однородного диэлектрика с непрерывным законом изменения толщины (рис. 2). Высота диэлектрика непрерывно уменьшается от 3.14 мм в центре до нуля на краях. Расстояние между проводящими основаниями  $s = 3.55$  мм, диаметр линзы – 91.6 мм, диэлектрическая проницаемость материала  $\epsilon = 2.3$ .



Рис. 2. Сечение модели идеализированной цилиндрической ЛЛ.

Известно [3], что ступенчатая аппроксимация непрерывного закона не приводит к существенному искажению свойств ЛЛ при числе ступеней не менее семи и равномерному выбору шага по диэлектрической проницаемости.

На рисунке 3 приведена ступенчатая аппроксимация закона изменения проницаемости цилиндрической ЛЛ и фотография соответствующего макета, выполненного средствами 3D печати. Диэлектрические детали выполнялись из материала NIPS ( $\epsilon=2.3$ ,  $\text{tg}\delta=0.0025$ ) на 3D принтере с системой подачи нити типа боуден, соплом 0.4 мм, собранном на базе платы RepRap 1.4 под управлением «Arduino mega 2560» с прошивкой «Marlin».

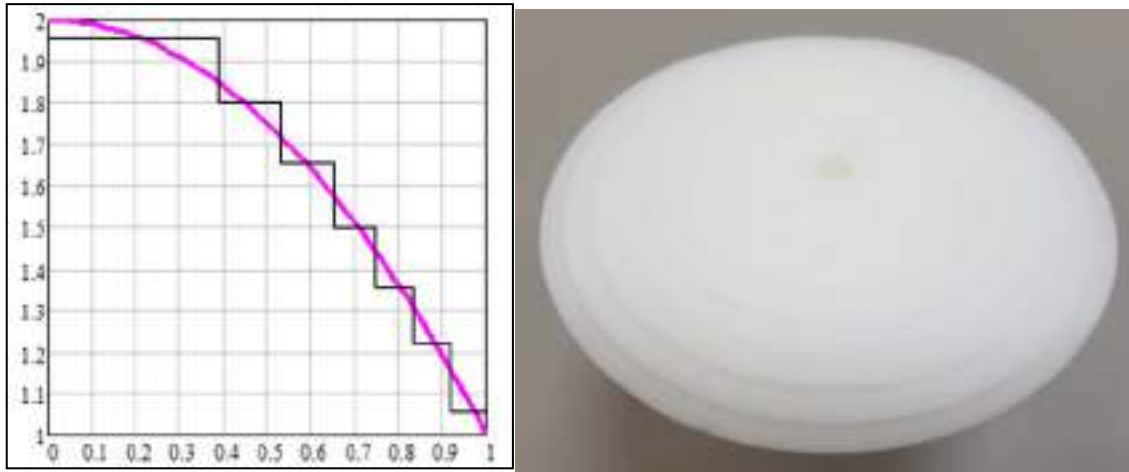


Рис. 3. Ступенчатая аппроксимация закона изменения диэлектрической проницаемости ЛЛ и линза макета.

Другой известный способ реализации искусственного материала с заданным законом изменения коэффициента преломления заключается в перфорации однородного диэлектрика, т.е. в цельном куске материала выполняются цилиндрические отверстия нужного радиуса. Их число и диаметр выбираются так, чтобы эффективный коэффициент преломления (диэлектрическая проницаемость) подчинялся закону[5]:

$$\epsilon_{\text{эфф}} = \epsilon(1 - \alpha) + \alpha,$$

где  $\epsilon$  относительная диэлектрическая проницаемость материала,  $\epsilon_{\text{эфф}}$  относительная эффективная проницаемость,  $\alpha$  – коэффициент заполнения:

$$\alpha = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{c}\right)^2,$$

$d$ –диаметр отверстий,  $c$  – расстояние между их центрами. На рисунке 4 представлен второй исследуемый вариант исполнения ЛЛ. Здесь четыре верхних ступени радиальной зависимости коэффициента преломления задаются отверстиями.



Рис. 4. Выполнение макета ЛЛ с помощью перфорации.

Результаты экспериментального исследования двух описанных вариантов выполнения ЛЛ приведены ниже. В качестве облучателя использовался рупор с апертурой 11.75 мм x 3.55 мм и длиной расширяющей части 25.2 мм.

На рисунке 5 приведена частотная зависимость ШДН двух исследуемых вариантов выполнения ЛЛ, причем расчётные данные соответствуют модели с непрерывным изменением высоты диэлектрика. В диапазоне 18 ГГц – 26 ГГц ШДН модели ЛЛ уменьшается с  $10.8^0$  до  $7.4^0$ , что свидетельствует о высоком коэффициенте использования поверхности антенны.

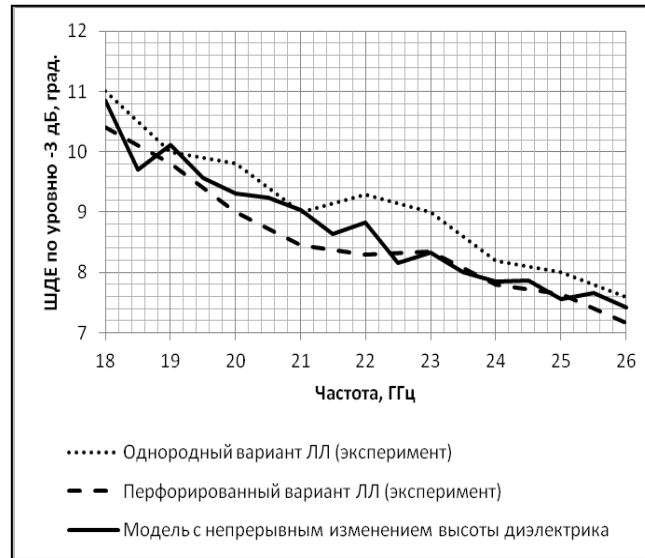


Рис. 5. Частотная зависимость ШДН по уровню -3 дБ (эксперимент, расчет).

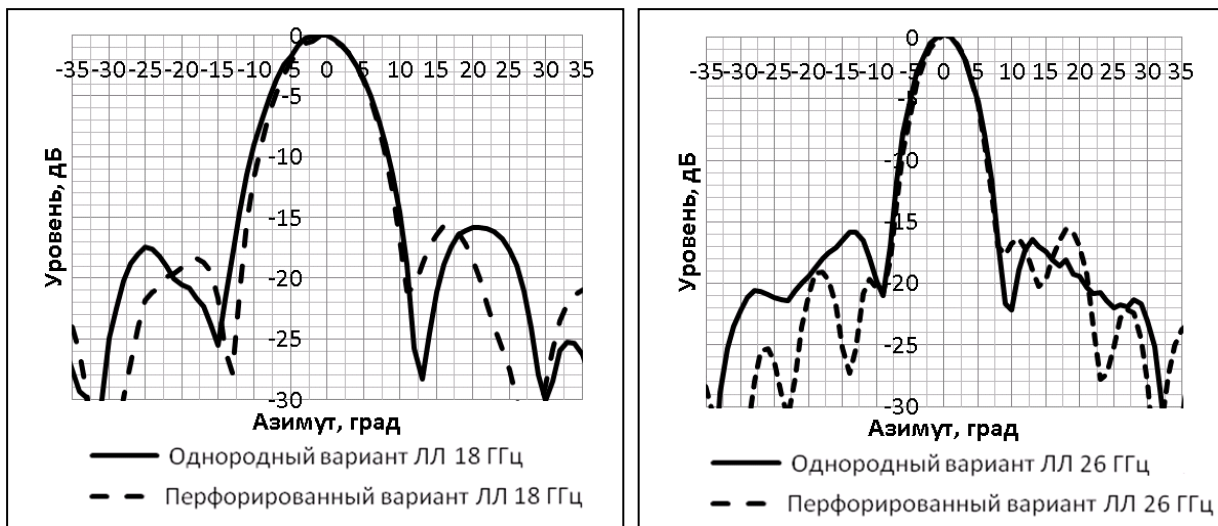


Рис. 6. ДН линзы на крайних частотах рабочего диапазона (эксперимент).

На рисунке 6 приведены измеренные азимутальные сечения ДН на крайних частотах рабочего диапазона (18 ГГц и 26 ГГц). Измеренные данные хорошо совпадают с расчётными. Авторы выражают признательность к.ф.-м.н. Сурикову В.В за помощь в проектировании антенн.

#### Библиографический список

1. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. Москва: Советское радио, 1974. – 279 с
2. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. М. Энергия 1973г. 440 с., илл.
3. Кузьмин С. В. Математическая модель многослойной линзы Люнеберга. Дисс. на соискание к.ф.-м.н. СПб 2004 г.
4. Александрин А.М., Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П., Сугак М.И. Сферическая линза Люнеберга из искусственного диэлектрика // Известия высших учебных заведений. Физика. Томск. 2010. № 9/2. С. 70–72.
5. A. Petosa, A. Ittipiboon, and S. Thirakoune, Shadow blockage improvement using a perforated dielectric Fresnel lens, Proc. 2003 IEEE Antennas and Propagation Society Int. Conf. Vol. 4, June 22–27, 2003, pp. 514- 517.