

Исследование направленных свойств линзы Люнеберга с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии

М. Ф. Ахматнабиев¹, А. А. Петров²

¹Филиал НИЦ «Курчатовский институт»-ПИЯФ-ИХС

²АО «НИИ «Вектор»

marsel.akhmatnabiev@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования направленных свойств линзы Люнеберга, изготовленной методом 3D-печати из градиентных ячеистых структур с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТПМЭ). Проведены измерения диаграмм направленности (ДН) и коэффициента усиления (КУ) в диапазоне частот 8–18 ГГц. Выполнено сравнение полученных зависимостей с численной моделью линзы, реализованной в среде электродинамического моделирования. Установлены диапазоны частот, в которых наблюдается качественное сходство экспериментальных ДН с расчетной моделью, а также выявлены частотные области с увеличенным уровнем боковых лепестков и искажением главного луча.

Ключевые слова: линза Люнеберга; сферическая линза; антенная линза; диэлектрическая проницаемость; аддитивные технологии; 3D печать; ячеистые материалы; градиентные материалы; ТПМЭ

I. ВВЕДЕНИЕ

В радиотехнических системах сверхвысоко-частотного (СВЧ) диапазона, охватывающего дециметровые и сантиметровые волны, применяются различные типы диаграммообразующих устройств (ДОУ). Особое внимание в последние годы уделяется сферическим диэлектрическим линзам, выполняющих функции ДОУ. Такие структуры позволяют реализовать сканирование пространства как за счёт механического перемещения излучателя, так и посредством электрической коммутации между несколькими облучателями, размещёнными в фокусе линзы. Сферическая симметрия подобных устройств позволяет формировать одновременно несколько независимых диаграмм направленности, обеспечивая высокую скорость перестройки луча при электрическом управлении, что особенно ценно для многолучевых систем.

В данном контексте наибольшую перспективу для применения в СВЧ-устройствах представляют линзы Люнеберга [1] – сферические диэлектрические структуры с радиально изменяющейся диэлектрической проницаемостью. В [1] показано, что если коэффициент преломления линзы $n(r)$ удовлетворяет условию:

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

где n – показатель преломления в точке r ; $\varepsilon(r)$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы в точке r ; r/R – отношение текущей

радиальной координаты к радиусу сферы, то согласно (1), при условии изменения ε от 2 в центре до 1 на поверхности сферы волны, возбуждаемые на её поверхности, в результате преломления формируют в раскрыве линзы плоский фазовый фронт (рис. 1), что в совокупности с амплитудным распределением поля обеспечивает фокусировку и направленное излучение.

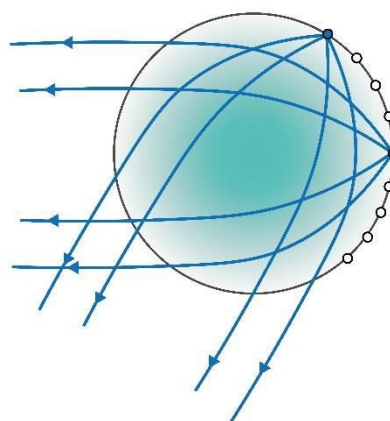


Рис. 1. Схема прохождения лучей в сферической линзе Люнеберга

Однако, практическая реализация непрерывного радиального градиента ε представляет собой значительную технологическую проблему. В большинстве случаев используется приближённая ступенчатая аппроксимация, при которой объём линзы разбивается на слои с постоянной диэлектрической проницаемостью. Для их изготовления применяются материалы с различными значениями ε , размещённые в виде полусферических оболочек [2]. Наиболее перспективным методом производства таких структур в настоящее время является 3D-печать, благодаря возможности реализации сложной геометрии [3].

Регулирование диэлектрической проницаемости в напечатанных слоях может осуществляться несколькими способами, включая варьирование плотности материала, изменение размеров ячеек периодической структуры или толщины стенок. Однако и эти методы не всегда обеспечивают требуемую точность реализации профиля ε .

С целью преодоления указанных ограничений в настоящей работе предложен новый подход, основанный на использовании градиентных ячеистых структур с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии, полученных с применением аддитивных технологий.

ТПМЭ представляют собой особый класс математически определённых поверхностей с нулевой

средней кривизной, трехмерной периодичностью и минимальной площадью элементарной ячейки. Благодаря своей седловидной геометрии, такие структуры демонстрируют благоприятные механические свойства, в частности высокую устойчивость к локализации напряжений, что повышает их прочность и снижает энергопоглощение [4, 5]. При этом регулирование диэлектрических свойств возможно за счёт изменения толщины стенок и пористости, что открывает возможность создания структур с непрерывным градиентом диэлектрической проницаемости [6].

Таким образом, применение ТППМЭ в конструкции сферической линзы Люнеберга может существенно повысить её механическую прочность, обеспечить близкую к теоретическому профилю реализацию распределения ϵ , а также снизить массу изделия. Разработка подобных градиентных ячеистых структур открывает путь к созданию антенных устройств, способных эффективно функционировать в широком диапазоне частот и различных эксплуатационных условиях.

В предыдущих исследованиях [7] авторами была разработана технология изготовления материала на основе ABS-пластика, модифицированного диоксидом титана, с последующим формированием геометрий ТППМЭ для получения заданной диэлектрической проницаемости.

В целях подтверждения или опровержения целесообразности использования ТППМЭ-структур при построении линз Люнеберга необходимо оценить соответствие ДН и КУ экспериментального образца и расчётной модели аналогичной идеальной линзы, реализованной путем ступенчатой аппроксимации, а также определить диапазоны рабочих частот и возможные ограничения технологии.

Работа дополняет разработанную ранее методику изготовления ячеистого диэлектрика, показывая возможность её использования для формирования направленного излучения в антенных системах СВЧ диапазона [7].

Целью работы является экспериментальное исследование направленных свойств линзы Люнеберга, изготовленной методом 3D-печати из градиентных ячеистых структур с геометрией ТППМЭ. В рамках работы производилось измерение диаграмм направленности и коэффициента усиления в диапазоне частот 8–18 ГГц, а также их сравнение с характеристиками аналогичной численной модели.

II. РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА

Моделирование прототипа линзы проводилось в студенческой версии ANSYS SpaceClaim. На первом этапе были сформированы твердотельные полусферы, соответствующие слоям линзы (рис. 1).

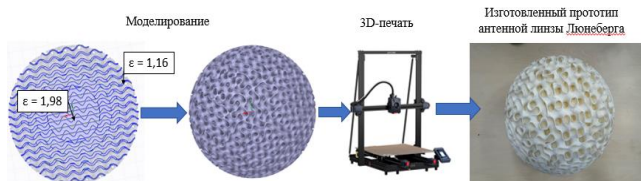


Рис. 2. Моделирование и печать прототипа линзы Люнеберга

С помощью встроенного инструмента «Оболочки» производилось вырезание геометрий ТППМЭ типа «Gyroid», при этом контролировалась степень заполнения каждой структуры.

Полученные элементы объединялись в единый прототип линзы. Конечная сборка представляла собой модель из последовательно упорядоченных полусфер с различной степенью пористости, что позволяло реализовать градиентное распределение эффективной диэлектрической проницаемости.

Сгенерированная 3D-модель экспортировалась в формат STL, и обрабатывалась в Anycubic Slicer. Генерация управляющего кода (g-code) выполнялась с учетом ранее подобранных параметров печати [7]. Изготовление прототипа осуществлялось на 3D-принтере Anycubic Kobra 2 MAX. Диаметр линзы был выбран равным 200 мм, что обеспечивало её работу в диапазоне частот 8–18 ГГц. В качестве материала изготовления выбран ABS-пластик белого цвета фирмы REC. Для выбора геометрических параметров слоев использовались результаты предыдущих экспериментов [7], по полученной зависимости ϵ от степени заполнения. Был составлен набор слоёв, каждый из которых характеризовался определённым диаметром, пористостью и целевым значением диэлектрической проницаемости.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения диаграмм направленности производились методом дальней зоны. В качестве облучателя использовалась рупорная антенна диапазона 8–18 ГГц, расположенная в фокусе линзы. В качестве измерительной антенны – рупорная антенна П6-23М. Поляризация – горизонтальная.

Полученные при измерениях в диапазоне 8 – 12 ГГц, нормированные ДН, демонстрируют высокую степень качественного соответствия с расчетной моделью (рис. 3, рис. 4). При этом главный луч сфокусирован в заданном направлении, уровень боковых лепестков (УБЛ) не превышает -15 дБ. С увеличением частоты основной луч, формируемый макетом линзы, расширяется относительно ширины ДН «идеальной модели», но форма ДН свидетельствует об адекватной работе макета линзы (рис. 4).

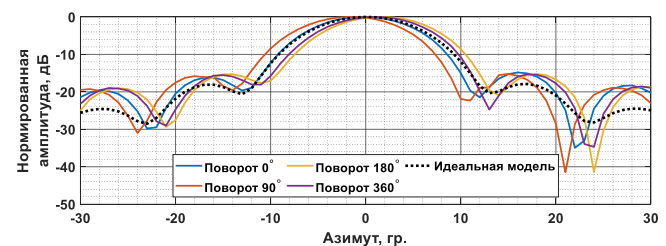


Рис. 3. Семейство азимутальных сечений ДН на частоте 8 ГГц

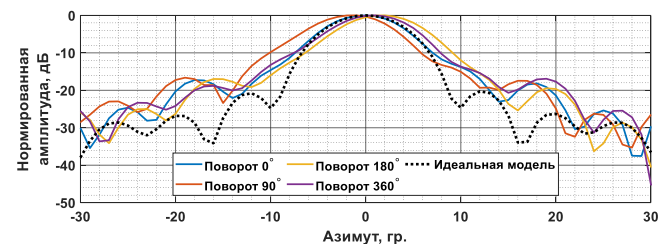


Рис. 4. Семейство азимутальных сечений ДН на частоте 12 ГГц

На частотах 13–14 ГГц наблюдается отклонение измеренных ДН от результатов моделирования в виде расширения луча и повышения УБЛ до -7 дБ, что свидетельствует об ухудшении направленных свойств линзы (рис. 5).

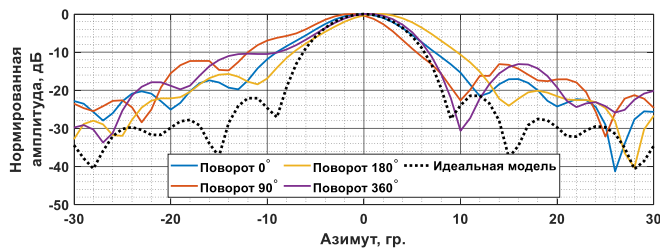


Рис. 5. Семейство азимутальных сечений ДН на частоте 13 ГГц

На частотах выше 14 ГГц увеличивается асимметрия ДН и возрастает УБЛ, достигая -5 дБ (рис. 6), что показывает нецелесообразность использования линзы в верхнем диапазоне частот.

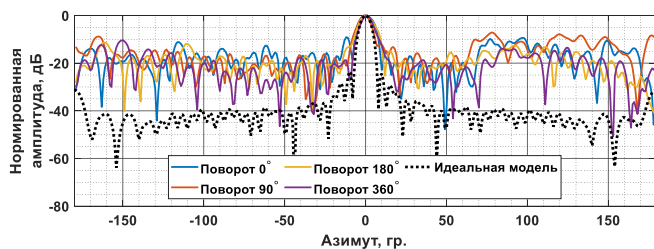


Рис. 6. Семейство азимутальных сечений ДН на частоте 15 ГГц

Данные явления объясняются неоднородностями структуры линзы, полученными в результате неравномерности печати, наличия локальных воздушных полостей, а также ограничения дискретизации при реализации градиентного распределения ϵ . Кроме того, наличие пор в структуре размером соизмеримым с длиной волны на частотах выше 12,5 ГГц также отрицательно сказывается на формировании необходимого амплитудно-фазового распределения в раскрыве линзы и, как следствие, на форму ДН.

На частотах 17–18 ГГц наблюдается критическое искажение формы ДН, недопустимое для адекватной работы антенной системы (рис. 7).

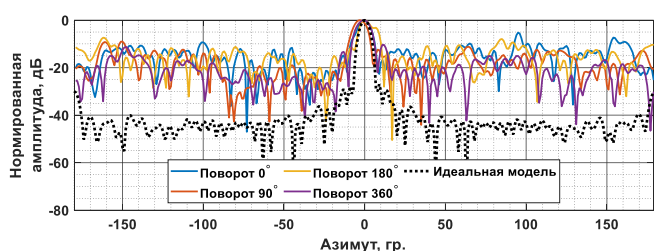


Рис. 7. Семейство азимутальных сечений ДН на частоте 18 ГГц

Показанные искажения свидетельствуют о снижении эффективности линзы за пределами диапазона 8–12,5 ГГц. Частотная зависимость коэффициента усиления (КУ) подтверждает вышеуказанные наблюдения: в интервале 8–12,5 ГГц КУ макета демонстрирует качественное сходство с моделью в данном частотном диапазоне, но его значение стабильно ниже, при этом максимальная разница в 6 дБ достигается на верхней частоте данного интервала (рис. 8).

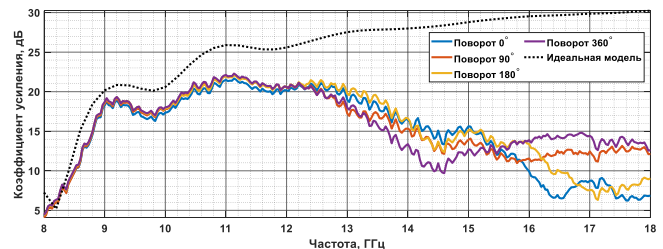


Рис. 8. Семейство частотных зависимостей КУ

На частотах свыше 12,5 ГГц наблюдается спад КУ у прототипа, тогда как у модели линзы данная характеристика продолжает возрастать и достигает 30 дБ на верхней границе частотного диапазона.

Сравнение численной моделью показывает, что макет уступает по уровню КУ и направленным свойствам. Полученные данные позволяют сформулировать рекомендации по усовершенствованию технологии, в частности, улучшению точности 3D-печати, подбору геометрий ТППМЭ и увеличению числа градиентных слоев.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено экспериментальное исследование направленных свойств прототипа линзы Лüneберга, изготовленного методом 3D-печати на основе градиентных ячеистых структур. Из полученных результатов следует, что в диапазоне частот 8–12,5 ГГц наблюдается качественное сходство экспериментальных и расчетных кривых. За пределами указанного диапазона наблюдаются искажения главного луча и увеличение УБЛ, что указывает на ограниченность применяемой технологии при более высоких частотах.

Согласно частотной зависимости коэффициента усиления в интервале 8–12,5 ГГц прототип демонстрирует качественное сходство с моделью в данном частотном диапазоне, но его значение стабильно ниже, при этом максимальная разница достигает 6 дБ.

Полученные результаты показывают необходимость совершенствования методики печати и оптимизации параметров ячеистой структуры для их применения в сферических линзах Лüneберга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Luneburg R.K. Mathematical Theory of Optics. RT: Brown Univ. Press, 1944.484 с.
- [2] Kunning Liu, Chunyu Zhao, Shi-Wei Qu, Yikai Chen, Jun Hu, Shiwen Yang. A 3-D-Printed Multibeam Spherical Lens Antenna With Ultrawide-Angle Coverage. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, vol. 20, no 3, pp. 2409–2430. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3054042>.
- [3] Munina I., Grigoriev I., O'donnell G., Trimble D. A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas. IEEE Access, 2023, vol. 11, pp. 8790–8809. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239782>.
- [4] Diachenko S.V., Lebedev L.A., Sychov M.M., Nefedova L.A. Physicomechanical Properties of a Model Material in the Form of a Cube with the Topology of Triply Periodic Minimal Surfaces of the Gyroid Type. Technical physics. The Russian journal of applied physics, 2018, vol. 63, no 7, pp. 984–987. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784218070101>.
- [5] Sychov M.M., Lebedev L.A., Dyachenko S.V., Nefedov L.A. Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology. Acta Astronautica, 2018, pp. 81–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.034>.
- [6] Sato K., Ujiie H. A plate luneberg lens with the permittivity distribution controlled by hole density // Electro. Commun. Jpn, 2002, vol. 85, no 9, pp. 1–12. <http://dx.doi.org/10.1002/ecja.1120>.
- [7] М.Ф. Ахматнабиев, М.В. Тимошенко, М.М. Сычев, А.А. Петров. Перспектива применения градиентных ячеистых структур с управляемой диэлектрической проницаемостью для 3D-печати линзы Лüneберга // Журнал технической физики. 2025. Т. 95. №7. С. 1328–1334. <https://doi.org/10.61011/JTF.2025.07.60655.417-24>