

Усеченная линза Гутмана, реализованная с использованием 3D печати

И.В. Григорьев, И.В. Мунина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Линзовые антенны находят широкое применение в современных системах связи. Как правило, линзовые антенны представляют совокупность диэлектрической линзы и источника излучения. Одним из типов неоднородных диэлектрических линз является линза Гутмана. В общем случае линза Гутмана представляет собой сферу с градиентом показателя преломления и источником излучения, расположенным внутри объема линзы. Для практического использования сферическая линза Гутмана может быть заменена на усеченную линзу с источниками, расположенными в квазифокальной плоскости. В статье рассматривается влияние степени усечения линзы на ее направленные свойства, а также представлена реализация линзы с использованием аддитивных технологий. Разработанная конструкция обеспечивает работу в Ka-диапазоне с возможностью формирования излучения в нескольких направлениях.

Ключевые слова: линзовые антенны, линзы Гутмана, аддитивные технологии, 3D печать

1. Введение

Интенсивное развитие систем беспроводной передачи данных и телекоммуникационных стандартов приводит к необходимости высокоэффективных и недорогих в производстве антенн. Основными тенденциями в области разработки антенн является обеспечение широкой рабочей полосы частот, высокого коэффициента усиления и возможности управления лучом. Многие из этих требований могут быть выполнены за счет использования реконфигурируемых антенных решеток [1]. Однако, данные требования также могут быть достигнуты за счет использования линзовых антенн, которые обычно состоят из линзы и питающей антенны. Такой тип антенн является наиболее экономически эффективным при применении аддитивных технологий производства. Существуют различные типы линзовых антенн, например, однородные диэлектрические линзовые антенны [2] или антенны с градиентом показателя преломления [3].

Линзовые антенны являются широкополосными, и обычно рабочая полоса частот ограничена рабочей полосой питающей антенны. Существуют различные типы градиентных линзовых антенн, например, линзы "рыбий глаз" [4], линзы Френеля [5], линзы Микаэляна [6], линзы Гутмана [7], линзы Люнеберга [8] и т.д. Эти линзы состоят из неоднородного диэлектрика и преобразуют сферическую волну в плоский волновой фронт. Градиентное распределение показателя преломления может быть относительно легко реализовано с помощью аддитивного производства [3], [8].

Линза Люнеберга - один из наиболее популярных типов градиентных линз. Она может обеспечить возможность сканирования луча путем переключения между несколькими питающими антеннами. Основной трудностью при размещении антенн является сферическая фокальная поверхность линз Люнеберга. Линза Люнеберга особый случай линзы Гутмана, в которой источники излучения должны быть расположены на внешней сферической поверхности. В линзе Гутмана же фокальная поверхность находится во внутреннем объеме линзы, и используя некоторые упрощения, срез плоской поверхности линзы Гутмана можно использовать в качестве квазифокальной плоскости для расположения нескольких источников [7]. Такая линза

Гутмана будет являться усеченной линзой Гутмана. Однако ей присуще падение коэффициента усиления для антенн, удаленных от точки фокуса. Предметом данной статьи является исследование влияния различного усечения на направленные свойства линзы Гутмана.

В работе было выполнено моделирование для линзы Гутмана Ka-диапазона с радиусом, равным 3λ (50 мм), а в качестве питающей антенны выбрана патч-антенна. Исследован эффект усечения сферической линзы Гутмана. В качестве эталона для дальнейшего сравнения использовалась сферическая линза Люнеберга того же радиуса. Рассмотрены усеченные линзы Гутмана с квазифокальной плоскостью, расположенной на различном расстоянии от центра линзы от $f = 0.4R$ до $f = 0.8R$ с шагом $0.2R$.

2. Исследование усеченной линзы Гутмана

Линза Гутмана представляет собой общий случай линзы Люнеберга, в которой фокальная поверхность расположена внутри линзы, а фокусное расстояние меньше внешнего радиуса (рис. 1-а). Стоит отметить, что на практике трудно разместить питающую антенну внутри линзы, поэтому часто используется усеченная линза Гутмана [7] (рис. 1-б).

Диэлектрическая проницаемость в профиле линзы описывается выражением:

$$\varepsilon(r) = \frac{1 + (f/R)^2 - (r/R)^2}{(f/R)^2}, \quad (1)$$

где f – расстояние от центра линзы до фокальной поверхности, R - внешний радиус линзы. Профиль диэлектрической проницаемости зависит от расположения фокальной поверхности. Если для линзы Люнеберга диэлектрическая проницаемость изменяется от 2 до 1, то для линзы Гутмана диэлектрическая проницаемость будет принимать более высокие значения.

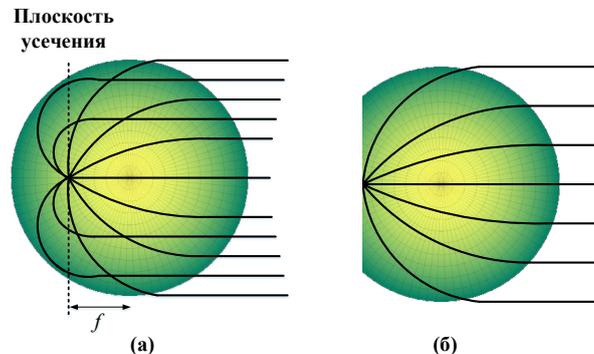


Рисунок 1. Линза Гутмана (а) и усеченная линза Гутмана (б).

В качестве эталона для сравнения будет использоваться линза Люнеберга. В качестве питающих антенн будут использоваться патч-антенны с центральной рабочей частотой 18 ГГц. Патч-антенна выполнена на подложке Isola IS620 ($\epsilon_r = 3.6$, $\tan \delta = 0.008$, $h = 0.6$ мм). Относительная рабочая полоса частот патч-антенны по уровню - 10 дБ коэффициента отражения составляет 4%.

Модель линзы состоит из пяти concentрических однородных диэлектрических слоев (рис. 2). Требуемый профиль диэлектрической проницаемости равномерно выбирается в соответствии с формулой (1). Все электродинамическое моделирование проводилось для пятислойных структур.

Переход от линзы Люнеберга к усеченной линзе Гутмана приводит к ухудшению фокусирующих свойств линзы и появлению снижения коэффициента усиления при

сканировании лучом для питающих антенн, расположенных вне центрального положения и вдоль квазифокальной плоскости. Было проведено полноволновое моделирование для линзы Гутмана с усечением от $f = 0.4R$ до $f = 0.8R$. Распределение диэлектрической проницаемости для пятислойной линзы Гутмана показано в таблице 1.

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость для усеченной линзы Гутмана

f	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5
$0.4R$	7.19	6.69	5.96	4.19	2.19
$0.6R$	3.75	3.53	3.08	2.42	1.53
$0.8R$	2.55	2.42	2.17	1.80	1.30
$1R$	1.99	1.91	1.75	1.51	1.19

В качестве эталонной структуры использовалась линза Лüneберга с пятью патч-антеннами, расположенными на сферической поверхности (рис. 2-а). Для линзы Гутмана с фокусным расстоянием $0.8R$ в квазифокальной плоскости может быть расположено до пяти антенн с расстоянием между ними dx равным 15 мм (рис. 2-б). Выбрав меньшее фокусное расстояние, можно расположить большее количество патч-антенн в плоскости, например, при усечении $0.4R$ количество патчей может быть равно семи при том же расстоянии между ними.

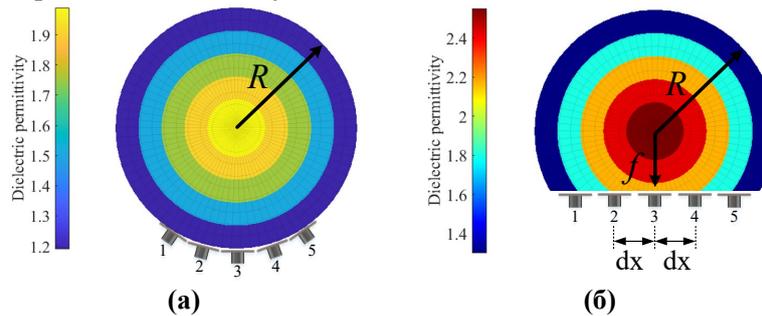


Рисунок 2. Распределение диэлектрической проницаемости для Линзы Лüneберга (а) и усеченной линзы Гутмана (б).

Для усеченной линзы Гутмана с фокусным расстоянием $0.8R$ (рис. 3-а), согласно результатам электродинамического моделирования, коэффициент направленного действия (КНД) составляет 24 дБ для второй и четвертой антенны, уровень боковых лепестков (УБЛ) составляет -17 дБ, ширина луча составляет 10.7° . Также наблюдается снижение КНД для трех центральных антенн (2-й, 3-й и 4-й) по сравнению с линзой Лüneберга. Однако для 1-го и 5-го положения антенн падение КНД составляет около 6 дБ, а увеличение ширины луча по уровню -3 дБ составляет до 13° . Первое и пятое положения также характеризуются увеличением УБЛ.

Для усечения $0.6R$ (рис. 3-б) КНД линзы Гутмана составляет 23.3 дБ в центральном положении, УБЛ составляет -17 дБ, ширина луча по уровню -3 дБ составляет 10.8° . КНД по сравнению с линзой Лüneберга ниже примерно на 0.7 дБ и составляет 22.6 дБ. Для второй и четвертой антенн КНД уменьшился на 2.4 дБ, а луч расширился до 13° . Для первой и пятой антенн уменьшение КНД и расширение луча становятся критическими. Это можно объяснить тем фактом, что для 1-го и 5-го положения антенны при фокусном расстоянии $0.6R$ предположение о применимости квазифокальной плоскости больше нельзя использовать. Исходя из этого, использование усеченной линзы Гутмана для многолучевой работы с усечением более $0.6R$ представляется нецелесообразным.

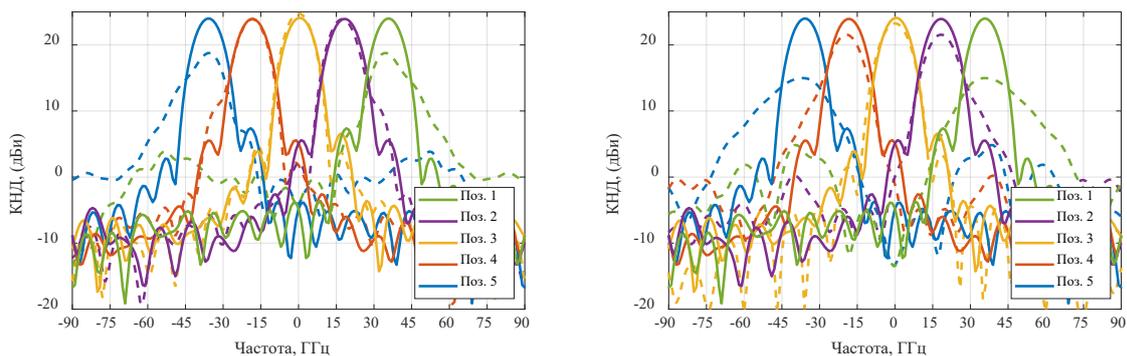


Рисунок 3. Сравнение ДН линзы Лунеберга (сплошная линия) и усеченной линзы Гутмана (штриховая линия) на частоте 18 ГГц для $f = 0.8R$ (а) и $f = 0.6R$ (б).

Рассматриваемый тип антенн может быть реализован не только набором различных материалов с требуемым значением диэлектрической проницаемости. Гораздо более технологичным способом является использование аддитивных технологий производства. Конструкция линз с градиентом показателя преломления может быть основана на использовании элементарной ячейки. Элементарная ячейка часто реализуется в виде субволнового диэлектрического куба с воздушной полостью внутри. Обычно в качестве элементарной ячейки выбирается куб с цилиндрическими пустотами определенного радиуса t или куб с кубическими пустотами с размерами ребра w . С точки зрения изготовления удобнее использовать цилиндрические пустоты (рис. 4).

Основываясь на результатах моделирования элементарной ячейки с изменением радиуса цилиндрических вырезов, можно извлечь эффективную диэлектрическую проницаемость элементарных ячеек.

Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от размера пустот показана на (рис. 4). При моделировании было рассмотрено несколько материалов для 3D-печати: полилактид (PLA-пластик), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS-пластик) с двумя различными диэлектрическими проницаемостями, равными 5 и 10, и фотополимерная смола (Resin).

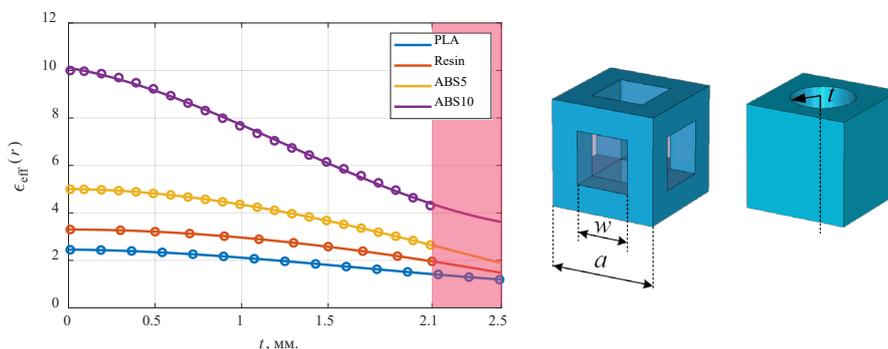


Рисунок 4. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от радиуса цилиндрического выреза (а) и примеры элементарных ячеек (б).

Однако, реализация элементарной ячейки предполагает ограничения, накладываемые процессами 3D-печати. В нашем случае для куба с ребром $a = 5$ мм радиус цилиндрического выреза ограничен 2.1 мм. С помощью используемого 3D-

принтера возможно реализовать эту элементарную ячейку с использованием аддитивной технологии моделирования плавного осаждения (FDM) на принтере Creality Ender 5 plus с соплом диаметром 0.4 мм.

3. Заключение

Использование усеченной линзы Гутмана для многолучевой работы как альтернативы линзе Лунеберга позволяет обеспечить планарное размещение питающих антенн. Однако существуют ограничения на их количество, обусловленное размером квазифокальной плоскости и коэффициентом усечения. Основываясь на результатах электромагнитного моделирования, уменьшение фокусного расстояния более чем на 60% приводит к значительному искажению диаграммы направленности, особенно при смещенных от центра положениях антенн. Аддитивное производство может быть использовано для изготовления линз данного типа. Предложена конструкция усеченной линзы Гутмана для реализации с помощью аддитивных технологий.

Исследование выполнено при поддержке **Российского научного фонда (проект № 17-79-20374-П)**.

Список литературы

1. I. Munina, P. Turalchuk, A. Verevkin, V. Kirillov, D. Zelenchuk, и A. Shitvov, «A Study of C-Band 1-Bit Reconfigurable Dual-Polarized Transmitarray», вып. EuCAP, 2019.
2. K. H. Jeong и N. Ghalichechian, «3D-printed 4-zone Ka-band Fresnel lens: Design, fabrication, and measurement», IET Microwaves, Antennas Propag., т. 14, вып. 1, сс. 28–35, 2020, doi: 10.1049/iet-map.2019.0117.
3. S. Zhang, R. K. Arya, S. Pandey, Y. Vardaxoglou, W. Whittow, и R. Mittra, «3D-printed planar graded index lenses», IET Microwaves, Antennas Propag., т. 10, вып. 13, сс. 1411–1419, 2016, doi: 10.1049/iet-map.2016.0013.
4. H. Lu, Z. Liu, Y. Zhang, K. Pang, и Y. Liu, «Partial Maxwell fish-eye lens inspired by the Gutman lens and Eaton lens for wide-angle beam scanning», Opt. Express, т. 29, вып. 15, с. 24194, 2021, doi: 10.1364/oe.426539.
5. J. M. Monkevich и G. P. Le Sage, «Design and Fabrication of a Custom-Dielectric Fresnel Multi-Zone Plate Lens Antenna Using Additive Manufacturing Techniques», IEEE Access, т. 7, сс. 61452–61460, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916077.
6. W. Shao и Q. Chen, «Performance analysis of an all-dielectric planar Mikaelian lens antenna for 1-D beam-steering application», Opt. Express, т. 29, вып. 18, с. 29202, авг. 2021, doi: 10.1364/OE.438182.
7. O. Bjorkqvist, O. Zetterstrom, и O. Quevedo-Teruel, «Additive manufactured dielectric Gutman lens», Electron. Lett., т. 55, вып. 25, сс. 1318–1320, 2019, doi: 10.1049/el.2019.2483.
8. M. Norooziarab и др., «Millimeter-wave 3D Printed Luneburg Lens Antenna», 2019 IEEE Radio Antenna Days Indian Ocean. RADIO 2019, сс. 12–13, 2019, doi: 10.23919/RADIO46463.2019.8968885.