

# Характеристики линзовых антенн мм-диапазона

С. В. Балландович, Л. М. Любина, М. И. Сугак, Г. А. Костиков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

sssr2123@yandex.ru, Lmlyubina@etu.ru, sugakmi@yandex.ru, gakostikov@gmail.com

**Аннотация.** Представлены результаты электродинамического моделирования и экспериментального исследования ряда линзовых антенн мм-диапазона, среди них: плоская диэлектрическая перфорированная линза 8мм-диапазона, выполненная по печатной технологии трёхслойная проходная антенная решётка трёхслойная линза того же частотного диапазона, зонированная диэлектрическая линза, выполненная средствами 3D-печати с рабочей частотой 90 ГГц. Обсуждаются сравнительные электрические характеристики, технологические и эксплуатационные особенности.

**Ключевые слова:** антенная решётка, мм-диапазон, 3D-печать, коэффициент усиления

## I. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие массовых телекоммуникационных систем, повышение требований к скорости передачи информации, совершенствование радиолокационных систем и систем связи, предъявляет новые требования к антенным системам миллиметрового диапазона и освоению его верхней части. Таким образом, развитие техники антенн, как составной части любой радиосистемы тесно связано с освоением частот 30–110 ГГц и выше, что заставляет искать новые технологии изготовления и подходы к формированию архитектуры антенн.

В данной работе приведены результаты электродинамического моделирования, проектирования и экспериментального исследования ряда антенн мм диапазона, предназначенных для радиосистем диапазона 26–100 ГГц [1]–[3]. Их общей особенностью является пространственный способ питания элементов, который реализован для уменьшения потерь в фидерной системе. Фактически, все рассмотренные в данной статье структуры являются линзовыми антеннами или проходными антенными решетками.

## II. ПРОХОДНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ ММ-ДИАПАЗОНА

### A. Печатная антенная решетка миллиметрового диапазона

На рис. 1 приведена структура печатной трехслойной антенной решетки проходного типа в разобранном виде. Здесь присутствуют три печатных информационных слоя (в качестве подложки используется лавсан толщиной 100 микрон) с элементами крестообразного типа, которые разделены тонким слоем листового диэлектрика (поливинилхлорид, относительная

диэлектрическая проницаемость 1.32, толщина 2 мм). Конструкция содержит также два защитных слоя.

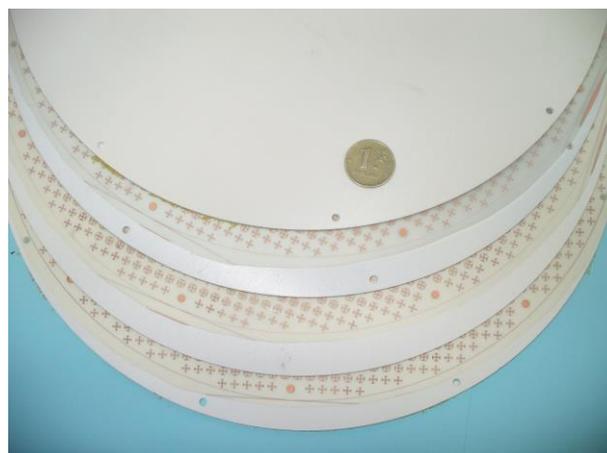


Рис. 1. Печатная трёхслойная проходная антенная решётка мм-диапазона

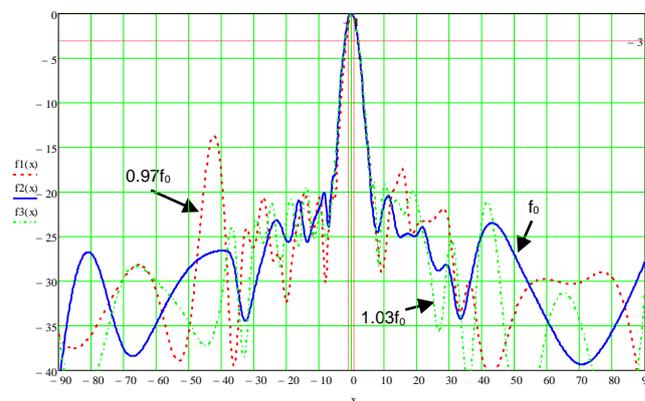


Рис. 2. Нормированные измеренные диаграммы направленности печатной трёхслойной проходной антенной решётки мм-диапазона

Для синтеза геометрии излучателей в раскрыве использован известный алгоритм [4]. Каждый крестообразный элемент антенной решетки снабжен концевой емкостной нагрузкой индивидуальных размеров, позволяющей эффективно регулировать фазу прошедшей электромагнитной волны [5]. Оптимизация элемента ведётся в пределах ячейки Флоке по критериям минимума коэффициента отражения и максимизации диапазона фазы прошедшего поля в требуемом диапазоне частот. Антенна возбуждается коническим рупорным облучателем, таким образом, на раскрыве реализуется спадающее к краям амплитудное распределение. Синфазность поля в раскрыве достигается синтезом геометрии емкостных нагрузок печатных элементов. Диаграмма направленности для трех частот приведена на рис. 2.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках стратегического проекта СПбГЭТУ «ЛЭТИ» как части реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение № 075-15-2021-1318, 29/09/2021).

Некоторым недостатком такого построения проходной антенной решетки в мм-диапазоне можно считать относительно высокую стоимость изготовления информационных слоев.

### *В. Плоская диэлектрическая перфорированная линза мм-диапазона*

Логика построения этой антенны понятна из рис. 3. Небольшой конический рупор с коаксиально-волноводным переходом засвечивает плоский диэлектрический раскрыв антенны (в данном случае это акриловое стекло, толщиной 14 мм), перфорированный отверстиями разного диаметра. Размеры отверстий подобраны из соображений регулирования фазы прошедшего поля и расположения окна прозрачности в рабочем диапазоне частот. Таким образом, непосредственно в раскрыве происходит трансформация сферической волны облучателя в плоскую. Опытный образец антенны выполнен на тот же частотный диапазон, что и предыдущий печатный вариант, экспериментально показано, что характеристики направленности обеих антенн идентичны, однако, полоса рабочих частот диэлектрической плоской линзы заметно шире.



Рис. 3. Перфорированная диэлектрическая линза мм-диапазона

### *С. Диэлектрическая зонированная линза мм-диапазона, выполненная по технологии 3D-печати*

С переходом к реализации антенн в частотном диапазоне 40 ГГц и выше привлекательным становится технология 3D-печати [6]–[9]. Исследуемая антенна представляет собой диэлектрическую линзу Френеля (рис. 4). Для изготовления антенны использовался материал «HIPS» с относительной диэлектрической проницаемостью 3.0 и тангенсом угла потерь около 0.003.

Измеренная частотная зависимость коэффициента усиления приведена на рис. 5. Здесь видно, что максимальное значение коэффициента усиления составляет 27–29 дБ и приходится на частоту около 90 ГГц. Облучателем являлся открытый конец волновода. Измерения частотной зависимости коэффициента усиления проводились с применением режима «временного окна» на базе векторного

анализатора цепей С4220 «Planar» с модулями расширения частот АКИП-9902Р методом сравнения с эталонной антенной, в качестве которой в данном случае выступал открытый конец стандартного волновода WR-10 с коэффициентом усиления на рабочей частоте около 7.8 дБи.

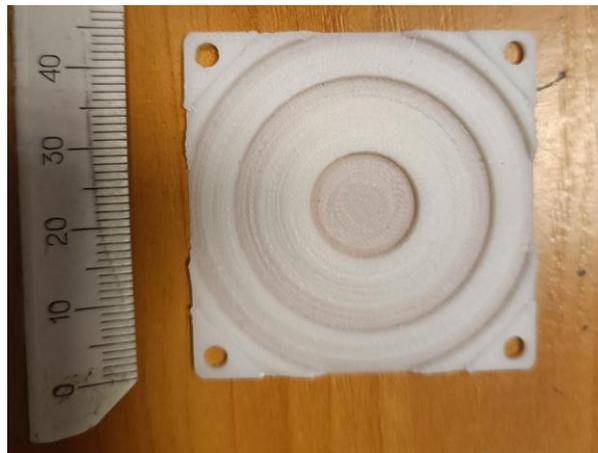


Рис. 4. Диэлектрическая зонированная линза с рабочей частотой 90 ГГц, реализованная с применением технологии 3D-печати

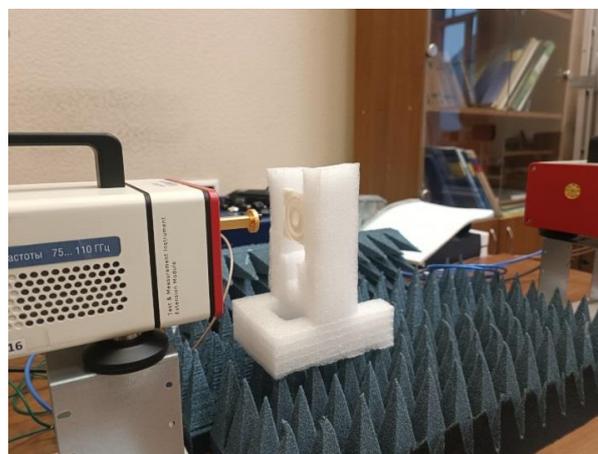


Рис. 5. Фрагмент измерительной установки диапазона 75–110 ГГц

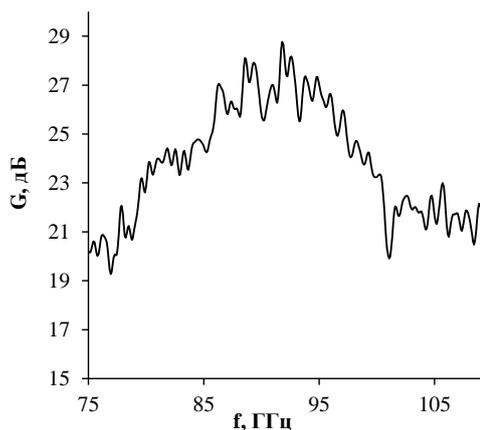


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента усиления диэлектрической зонированной линзы

Определенный практический интерес представляет оценка КИП для данной антенны. С учетом измеренного КУ на центральной частоте, при диаметре линзы 44 мм КИП приблизительно можно оценить величиной минус 5 дБ.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопленный опыт в области проектирования и экспериментального исследования плоских линзовых антенн миллиметрового диапазона позволяет предположить, что в диапазоне 26–110 ГГц наиболее привлекательным решением являются плоские антенны с пространственным питанием, реализованные по проходной или отражательной схеме.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Балландович С.В., Костиков Г.А., Пташкин А.А., Сугак М.И. Оптимизация геометрии многослойной линзы. «Антенны», М.: 2000, N 10.
- [2] Балландович С.В., Костиков Г.А., Пташкин А.А., Сугак М.И., Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П. Опыт проектирования и результаты исследования печатных многослойных линзовых антенн // «Антенны», М., 2010, N 6, с. 3-7.
- [3] Александрин А.М., Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П., Сугак М.И. Широкополосные линзовые антенны из искусственного неоднородного диэлектрика (практические конструкции) / под ред. Ю.П. Саломатова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, 182 с.
- [4] Балландович С.В., Сугак М.И., Костиков Г.А. Печатные отражательные антенные решетки с диаграммой направленности специальной формы // Антенны. 2008. № 6. С. 53-59.
- [5] Васильев М.Б., Любина Л.М., Сугак М.И. Отражательная антенная решетка к-диапазона, выполненная методом лазерной резки // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Москва: 13–17 ноября 2017 года / Московский технологический университет (МИРЭА). Часть 1. Москва: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. С. 94-99.
- [6] I. Goode and C.E. Saavedra, “3D printed variable aperture horn with modular ridges,” // J. Phys. Commun. 2023. 7. 055004
- [7] S.A. Korolyov, A.V. Zaitsev, V.M. Seleznev, I.A. Ilarionov, M.D. Proyavin, and V.E. Kotomina, “3D printed horn antenna for millimeter-wave focal-plane array imaging systems,” // in 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) Divnomorskoe, Russian Federation (2023), pp. 380–383.
- [8] F. Oktafiani, E.Y. Hamid and A. Munir, “Wideband dual-polarized 3D printed quad-ridged horn antenna,” // IEEE Access 10, 8036–8048 (2022).
- [9] I. Goode and C.E. Saavedra, “3D printed linearly polarized X-band conical horn antenna and lens,” // IEEE Open J. Antennas Propag. 3, 549–556 (2022).