

# Прототипирование квазиоптических систем миллиметрового диапазона с помощью 3D печати

Е.М. Домбек<sup>1</sup>, П.М. Землянуха<sup>1</sup>, И.М. Летавин<sup>1</sup>, К.В. Минеев<sup>1,2</sup>, В.А. Сальков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** в докладе описывается один из возможных подходов к прототипированию квазиоптических систем, применяемых в миллиметровом диапазоне длин волн, под возможности их изготовления с помощью FDM 3D печати. Приводятся результаты экспериментальных исследований тестовых образцов диэлектрических линз в составе рупорно-линзовых антенн. Даются рекомендации по подготовке 3D принтера.

**Ключевые слова:** 3D печать, миллиметровый диапазон, квазиоптика, линза, антенна

## 1. Введение

Миллиметровый диапазон (30 – 300 ГГц) активно осваивается отечественной промышленностью, в то время как субмиллиметровый (300 ГГц – 3 ТГц) пока представлен только уникальными высокотехнологичными образцами научной продукции или единичными лабораторными установками. В обозримом будущем на стыке этих диапазонов будут работать телекоммуникационные каналы нового поколения, беспилотный транспорт, системы активно-пассивного радиовидения и др. [1], и одной из актуальных проблем является массовая доступность квазиоптических систем в перспективном диапазоне.

Существуют традиционные подходы к производству диэлектрических линз, поглотителей, согласованных нагрузок, и др. начиная от отливки по пресс-форме и заканчивая фрезеровкой на координатных станках с числовым программным управлением. Данные способы пригодны для создания относительно простых геометрических поверхностей квазиоптических элементов, но без трудоемкой технологической подготовки принципиально невозможно получить объемные элементы градиентного заполнения, переменной пористой структуры или сложной геометрической формы с пересечениями. Аддитивные технологии 3D печати лишены указанных недостатков и позволяют сразу изготавливать диэлектрические конструкции с непрерывно изменяющимся показателем преломления (например, линзы Люнеберга, Максвелла и др. [2]), деформированные кручением элементы микроволновых поглотителей [3], согласованные нагрузки с гироидным заполнением и многое другое.

В зависимости от назначения изделия различаются параметры и типы термопластов, используемые в 3D печати. Для проектирования поглотителей, согласованных нагрузок, чернотельных калибраторов (радиометрических эталонов яркостной температуры) выбирают материал с относительно высокой удельной проводимостью порядка  $\sigma \sim 10$  См/м и выше; для линзовых устройств, радиопрозрачных обтекателей, окон ввода-вывода излучения стараются применять полимеры с малой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \sim 2-3$  и низким тангенсом угла диэлектрических потерь  $tg\delta \sim 10^{-3}$ .

К настоящему моменту не существует исчерпывающих справочников по диэлектрическим параметрам термопластов, применяемых в 3D печати, особенно в диапазоне частот 30-300 ГГц, поэтому перед проектированием рекомендуется сначала выполнить измерения диэлектрических параметров тестового образца из единой

партии имеющегося термопласта. Предварительный выбор материала можно осуществить, базируясь на измерения, проведенных силами отдельных научных групп: в работах [4-7] исследованы ABS, CNT, TPU и PLA полимеры в диапазоне частот от 2 до 18 ГГц, нашими коллегами в ИПФ РАН исследованы PLA, SBS, PETG-полимеры и полиамиды для SLS-печати в диапазоне частот 26-185 ГГц [8], в работе [9] в диапазоне 200-300 ГГц экспериментально исследована возможность печати диэлектрических фильтров, в работе [10] представлен обзор технологий 3D печати магнитных материалов, пригодных к применению на высоких частотах.

## 2. Технологическая подготовка FDM 3D принтера

Основные усилия при подготовке FDM (метод послойного наплавления) 3D принтера должны быть направлены на максимизацию изотропности изделия, т.е. постоянства коэффициента преломления внутри однородного слоя, и повышение точности экструзии. Типовые 3D принтеры требуют тщательной калибровки передаточного числа экструдера, равномерности подачи и контроля диаметра прутка термопласта. Кроме этого, для обеспечения соответствия электродинамических свойств изделий проектным требуется максимизировать точность установки сопла: позиционирование должно быть не хуже  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны. В миллиметровом диапазоне длин волн реально добиться точности  $\lambda/100$ , что позволяет пренебречь слоистой структурой и считать слой полностью однородным. Для субмиллиметрового диапазона точность должна быть еще на порядок выше, что уже находится на грани допустимого разрешения большинства коммерчески доступных FDM 3D принтеров.

## 3. Расчет фокусирующей линзы

Благодаря не очень жестким требованиям на изготовление, в пределах которых можно пренебречь искажениями фронта волны (порядка  $\lambda/8$ ) [11], фокусирующие диэлектрические линзы являются потенциальными кандидатами для их изготовления методами 3D печати. Допуски зависят от величины коэффициента преломления материала, и при большом  $n$  небольшие изменения толщины линзы влекут уже значительные изменения оптического пути, однако величина допуска на коэффициент преломления уменьшается с увеличением толщины линзы  $t$ . Допуск на изменение величины показателя преломления не должен превышать  $\lambda/8t$ .

Для отработки технологии была выбрана диэлектрическая линза гиперболического профиля, применяемая в составе рупорно-линзовой антенны Ka-диапазона.

В большинстве рупорно-линзовых антенн непреломляющей поверхностью выбирают внешнюю поверхность линзы, делая её плоской. Это приводит к заметному упрощению процесса изготовления, где плоская граница (без просветления) выступает собственным основанием. При организации просветляющего гофрированного слоя или дополнительной кривизны линзы при печати необходимы специальные поддерживающие оправки. Большинство штатных программ, поставляемых в комплекте с 3D принтерами, позволяют автоматически расставлять поддерживающие оправки и варьировать коэффициент их заполнения.

При зондировании в воздушной среде преломляющая поверхность будет иметь форму гиперболы, а толщина линзы будет определяться по формуле:

$$t = \sqrt{\left(\frac{F}{n+1}\right)^2 + \frac{R^2}{n^2-1}} - \frac{F}{n+1}, \quad (1)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы,  $R$  – радиус линзы. В полярной системе

координат форму профиля линзы можно представить уравнением:

$$\rho(\theta) = F \frac{n-1}{n \cdot \cos \theta - 1}, \quad (2)$$

где  $\theta$  – максимальный угол облучения края линзы.

Введем замену:  $A = F(n-1)/R$ , тогда в предположении геометрической оптики из уравнения (2) находится угол  $\theta$  для заданного радиуса  $R$  при условии, что фокус  $F$  помещен в фазовый центр облучающей рупорной антенны.

$$\theta = \arccos \left( \frac{n + A\sqrt{n^2 + A^2 - 1}}{n^2 + A^2} \right). \quad (3)$$

Описанный алгоритм позволяет спроектировать линзу заданных параметров из известного диэлектрика. В современных пакетах электродинамического моделирования (Гамма, CST MWS, Ansys HFSS и др.) построение 3D модели поверхности упрощается за счет применения операции вращения. Достаточно организовать параметризацию в диапазоне углов от 0 до  $\theta$  и вращать вдоль аксиальной оси, тогда линза будет строго привязана к фазовому центру и автоматически будет перестраиваться при изменении коэффициента преломления материала или внешнего диаметра. Большинство пакетов позволяют сразу произвести экспорт геометрии модели в поддерживаемые 3D принтером форматы (STL, STEP и др.).

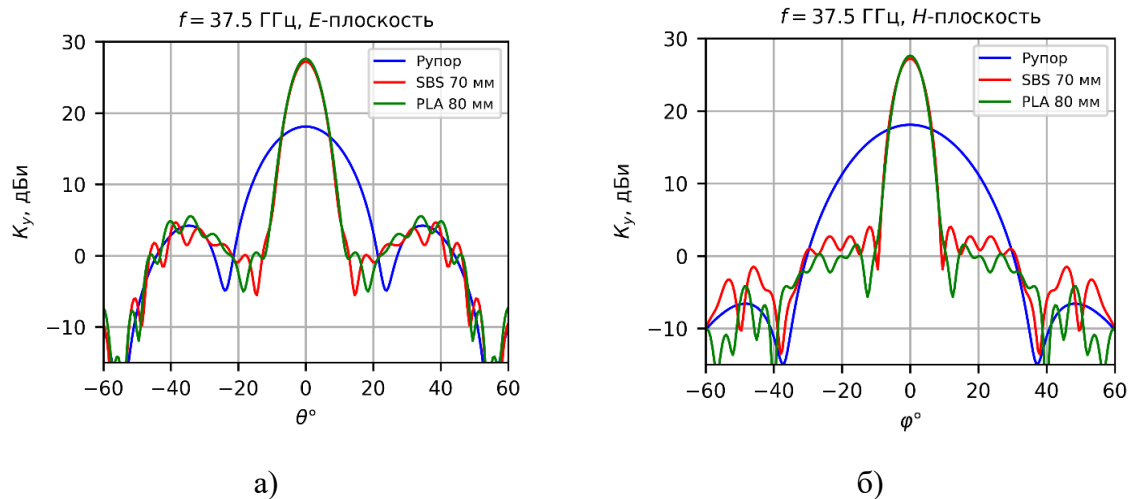
На резонаторном спектрометре УНУ ЦКП-7 в ИПФ РАН были измерены образцы термопластов в диапазоне 120-130 ГГц. Коэффициенты преломления и тангенсы угла диэлектрических потерь составили для термопласта SBS:  $n = 1.56$ ,  $tg\delta = 1.6 \cdot 10^{-3}$ , для термопласта PLA:  $n = 1.65$ ,  $tg\delta = 1.7 \cdot 10^{-3}$ . Значения показателя преломления получились близкими для SBS и немного выше (+0.15) для PLA, чем в работе [8], что может объясняться более плотной печатью с меньшим шагом и диаметром сопла, а также различными параметрами исходного материала. Данные значения были экстраполированы в  $Ka$ -диапазон ( $f = 37.5$  ГГц) и заданы для расчета диаграмм направленности рупорно-линзовых антенн в пакете моделирования.

На рисунке 1 представлены графики диаграмм направленности (ДН) рупорно-линзовых антенн с 70 мм SBS и 80 мм PLA линзами и облучающего рупора, в качестве которого использовался пирамидальный рупор ВП-07 с апертурой 20×20 мм, возбуждаемый волноводом стандартного сечения 7.2×3.4 мм. Видно увеличение усиления рупорно-линзовой антенны на 10 дБ в направлении главного лепестка при сохранении уровня боковых лепестков около исходного значения.

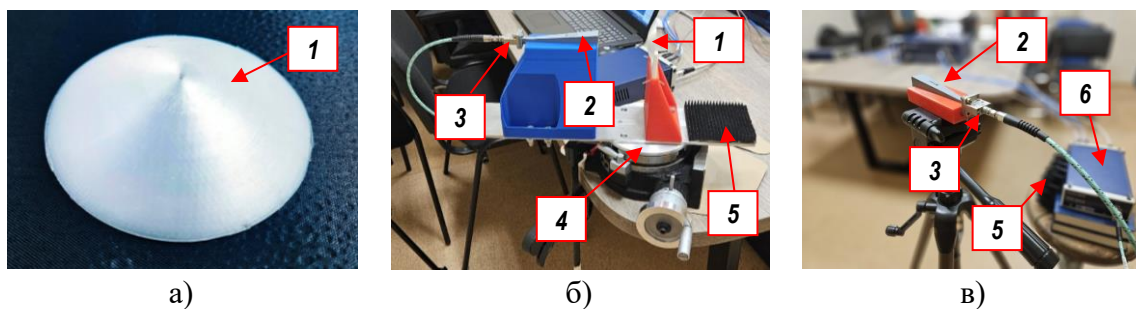
#### 4. Экспериментальные исследования

Тестовые образцы SBS (рисунок 2а) и PLA линз были изготовлены с 100% сплошным заполнением соплом 0.1 мм, что удовлетворяет условию  $\lambda/100$ . Параметры печати подбирались для каждого термопласта отдельно, чтобы исключить появление пиролитической деградации, карбонизации, а также минимизировать наличие включений и следов перегретого материала. Печать производилась из нагретой камеры с низкой (не более 10%) относительной влажностью. Накопленная в прутке влага приводит к гидролизу ряда полимеров при экструзии и образованию пузырей в наносимом расплаве. Подобные дефекты увеличивают степень неизотропности готового изделия, приводя к вариации диэлектрических свойств по объему.

Измерительная установка представляла собой стенд на базе векторного анализатора цепей PLANAR C4220 с модулями расширения частотного диапазона TFE1854. Соосность антенн контролировалась с помощью лазерных нивелиров в горизонтальной и вертикальной плоскостях.



**Рисунок 1.** Сравнение ДН пирамидального рупора ВП-07 и рупорно-линзовых антенн: а – в  $E$ -плоскости, б – в  $H$ -плоскости.

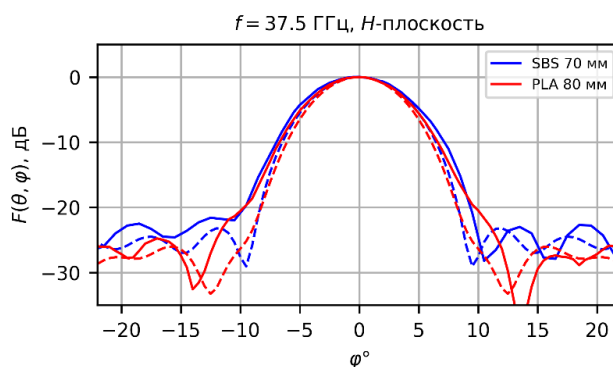


**Рисунок 2.** а – SBS-линза гиперболического профиля диаметром 70 мм, изготовленная методом FDM 3D печати, б – рупорно-линзовая (измеряемая) антенна, в – приемная антенна. Цифрами обозначены: 1 – линза, 2 – пирамидальный рупор, 3 – коаксиально-волноводный переход, 4 – поворотная платформа с минутным шагом, 5 – микроволновый поглотитель, 6 – расширитель частотного диапазона векторного анализатора цепей.

Измерение угла поворота в  $H$ -плоскости ( $\theta = 0^\circ$ ) проводилось с помощью минутной шкалы нониуса поворотной платформы (рисунок 2б), на которой размещалась измеряемая рупорно-линзовая антенна. В качестве измерительной антенны использовался аналогичный пирамидальный рупор ВП-07 (рисунок 2в). Расстояние между антеннами было 1,5 м, что удовлетворяет условию дальней зоны. Для снижения негативных переотражений применялись микроволновые поглотители, напечатанные на 3D принтере из ABS-полимера [3].

Как видно из графиков на рисунке 3, экспериментальные результаты достаточно близки к результатам электродинамического моделирования: отличие измеренного показателя преломления составляет  $\Delta n = -0.08$  (5%) для SBS материала и  $\Delta n = -0.05$  (3%) для PLA. Большие расхождения в области отрицательных азимутальных углов  $\varphi$  у боковых лепестков объясняются паразитными переотражениями от базового блока анализатора и лабораторного стола, который находился слева ( $\varphi < 0^\circ$ ) от передающей антенны.

Методика определения ДН в условиях небольшого помещения не является высокоточной, но в пределах 25 дБ вполне состоятельна и может применяться как для первичного контроля качества выходных изделий, так и для оценки показателя преломления, когда искомое значение  $n$  находится приведением математической модели к экспериментальному результату.



**Рисунок 3.** Сравнение нормированных ДН рупорно-линзовых антенн на частоте 37.5 ГГц. Пунктирная линия – результаты моделирования, сплошная – результаты измерений.

## 5. Заключение

Показана возможность прототипирования квазиоптических элементов приемо-передающих систем миллиметрового диапазона длин волн, изготовленных методом послойного наплавления (FDM 3D печати). Оценочные измерения диаграммы направленности рупорно-линзовой антенны с напечатанной линзой хорошо повторяют численную модель сплошного изделия. Ошибка эффективного коэффициента преломления находится в пределах 5%, что свидетельствует о малом влиянии технологических особенностей на характеристики прототипа.

Финальные контрольные измерения подобных изделий должны производиться радиотехническими и радиофизическими методами уже в составе разрабатываемой аппаратуры внутри экранированных, безэховых или  $T$ -камер по специально разработанным и утвержденным методикам.

Работа выполнена в рамках гранта **Российского научного фонда: проект № 25-22-00598.**

### Список литературы

1. Rappaport T.S. et al. Spectrum opportunities for the wireless future: from direct-to-device satellite applications to 6G cellular // *npj Wirel. Technol.* – 2025 Т. 1. – №8. – 15 с.
2. Chen M. et al. Wideband Quasi-Nondiffracting Radial GRIN Lenses // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation.* – 2026. – 13 с.
3. Патент РФ №2835474, Землянуха П.М., Минеев К.В. «Микроволновый поглотитель», заявл. 24.09.2024; опублик. 24.02.2025 Бюл. № 6. – 14 с.
4. Демиденко Е. В. 3D печать антенно-фидерных устройств с использованием полимерных материалов // *Электроника и микроэлектроника СВЧ.* – 2018. – Т. 1. – С. 491-495.
5. MARquez-Segura E. et al. Microwave characterization of conductive PLA and its application to a 12 to 18 GHz 3-D printed rotary vane attenuator // *IEEE Access.* – 2021. – Т. 9. – С. 84327-84343.
6. Silver K. et al. 3D-printed microfluidic-microwave device for droplet network formation and characterisation // *Lab on a Chip.* – 2024. – Т. 24. – №. 22. – С. 5101-5112.
7. Wu H. et al. Enhanced microwave absorption through fused deposition modeling of CNT/PLA/TPU composites // *Journal of Applied Physics.* – 2025. – №. 137 – 14 с.
8. Proyavin M. D. et al. Study of 3D-printed dielectric barrier windows for microwave applications // *Electronics.* – 2021. – Т. 10. – №. 18. – С. 2225.
9. Ortiz-Martinez M., Castro-Camus E., Hernandez-Serrano A. I. Guided-mode filters for terahertz frequencies fabricated by 3D printing // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.* – 2019. – Т. 40. – №. 7. – С. 731-737.
10. Mazeeva A. et al. 3D Printing Technologies for Fabrication of Magnetic Materials Based on Metal-Polymer Composites: A Review // *Materials.* – 2023. – Т. 16. – №. 21. – С. 6928.
11. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. – М. Советское радио, 1974. – 280 с.