

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.9>

УДК: 621.396.67:621.763

ОБЛУЧАТЕЛЬ КА-ДИАПАЗОНА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ СЕПТУМ-ПОЛЯРИЗАТОРОМ, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ МЕТОДОМ SLM

Н.О. Сивов, К.В. Лемберг, К.И. Поминов, А.А. Горчаковский, Д.А. Шабанов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/12

Статья поступила в редакцию 10 октября 2025 г.

Аннотация. В работе представлены результаты разработки рупорного облучателя Ка-диапазона с интегрированным септум-поляризатором, изготовленного методом селективного лазерного плавления сплава алюминия. Описаны особенности проектирования конструкции с учётом ограничений аддитивных технологий: ориентации при печати, расположении поддержек и последующей обработке. Рассмотрены вопросы влияния шероховатости поверхности на тепловые потери и кросс-поляризационную развязку. Полученный облучатель имеет высокий уровень развязки между портами (>25 дБ), низкие коэффициенты отражения (не более -20 дБ) и кросс-поляризационную развязку более 20 дБ в рабочих диапазонах частот. Результаты показывают, что 3D печать технологией селективного лазерного плавления является перспективным инструментом при изготовлении компактных и интегрированных СВЧ устройств со сложной внутренней геометрией.

Ключевые слова: Ка диапазон, селективное лазерное плавление (SLM), рупорный облучатель, септум-поляризатор, круговая поляризация, аддитивные технологии.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН (шифр научной темы FWES-2025-0028)

Автор для переписки: Сивов Никита Олегович, nsivov@kirensky.ru

Введение

Современные аддитивные технологии активно применяются для изготовления металлических и гибридных (диэлектрик с металлизацией) компонентов СВЧ-устройств. В частности, селективное лазерное плавление металлического порошка позволяет напрямую печатать полые металлические волноводные структуры сложной формы, а методы печати пластиком (FDM, SLA и др.) с последующим нанесением проводящего слоя (гальванические покрытия, напыление или покраска проводящими составами) дают возможность изготавливать СВЧ устройства с невысокой стоимостью и массой [1,2]. Эти подходы дополняют друг друга: печать металлом обеспечивает высокую проводимость и термостойкость деталей, тогда как печать диэлектриком с последующей металлизацией позволяет создавать монолитные диэлектрические резонаторные узлы и уменьшать габариты за счёт заполнения полостей материалом с высокой диэлектрической проницаемостью [3].

С применением аддитивных методов уже реализован широкий спектр СВЧ устройств. Классический пример – рупорные облучатели, напечатанные пластиком с последующей металлизацией или с использованием электропроводящих полимерных композитов. Такие устройства успешно работают в Ка диапазоне, хотя их КПД несколько снижается из-за невысокой проводимости материала и повышенной шероховатости поверхности. Так, в работе [4] описана рупорная антенна Ка диапазона, напечатанная из пластика с проводящим наполнителем: она обеспечивает коэффициент усиления (КУ) около 15 дБи, что существенно ниже (на 5-6 дБ) КУ такой антенны в полностью металлическом исполнении.

Другой современный подход – прямая печать металлом. В литературе описаны монолитные рупоры и поляризаторы, изготовленные методом SLM

(selective laser melting – селективное лазерное плавление) из сплавов алюминия или титана. Например, в [5] представлен компактный поляризатор Ка диапазона с парой продольных канавок, изготовленный из сплава алюминия; измеренная ширина полосы рабочих частот по коэффициенту эллиптичности <3 дБ достигает ~ 6 ГГц. Также продемонстрирован и осесимметричный гофрированный рупор, покрывающий диапазон 26.5-40 ГГц. Этот облучатель имеет уровень кросс-поляризационной развязки (КПР) более 29 дБ во всём диапазоне, что сопоставимо с образцами, изготовленными фрезерованием [6].

Типичные характеристики напечатанных СВЧ устройств уже приближаются к уровню традиционного производства. Хорошие характеристики и высокая воспроизводимость делают эти решения перспективными для массового применения. При этом на высоких частотах основным ограничением остаётся относительно высокая шероховатость поверхности, но эта проблема решается методами постобработки (полировка, гальваника), либо изначальной геометрической оптимизацией [7,8].

Главное преимущество 3D печати – геометрическая свобода. Сложные формы, объединение нескольких функций (например, фильтр, поляризатор и рупор в одном корпусе) и отсутствие резьбовых или винтовых соединений дают выигрыш по массе, размерам и надёжности [2,9]. Кроме того, 3D печать особенно выгодна для мелкосерийного производства и быстрого прототипирования, позволяя производить устройства за несколько часов без дополнительной оснастки [3].

В данной работе авторами предложена конструкция монолитного рупорного облучателя с интегрированным септум поляризатором, предназначенного для использования в составе приемо-передающей зеркальной антенны, работающей на прием в диапазоне частот 18.1-19.3 ГГц, а на передачу в диапазоне частот 27.6-27.9 ГГц.

1. Проектирование и изготовление

Проектирование СВЧ устройства, пригодного для изготовления с использованием аддитивных технологий, требует особого подхода. Необходимо учитывать накладываемые методами послойного построения ограничения геометрии и ориентации элементов модели. Например, важно правильно сориентировать изделие на платформе печати, чтобы минимизировать количество поддержек под нависающими элементами, особенно во внутренних волноводных каналах. Кроме того, во избежание увеличения неравномерности профиля (R_z) и среднего отклонения профиля (R_a), следует избегать наклонных или нависающих элементов конструкции или переработать их с учётом технологических возможностей 3D принтера. Всё это делает задачу проектирования электродинамической модели устройства ещё и технологической – необходимо учитывать одновременно требования к радиотехническим характеристикам и ограничения технологии печати.

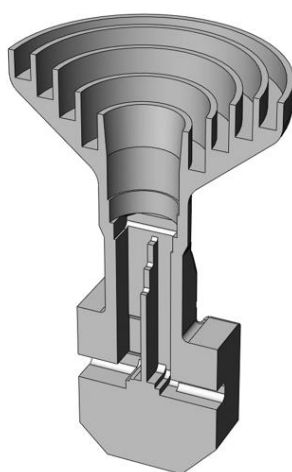
С учётом вышеописанных ограничений и требований была разработана конструкция гофрированного рупора Ka диапазона, совмещённого с септум поляризатором. Элементы облучателя рассчитывались по отдельности с использованием стандартных методов СВЧ проектирования, после чего интегрировались в единую модель для анализа характеристик всего устройства. Целевыми значениями по кросс-поляризационной развязке являлся уровень 20 дБ; по уровню коэффициента отражения от портов –20 дБ; по развязке между портами – 20 дБ.

Также ещё на этапе электродинамического моделирования была проведена доработка конструкции с учётом особенностей аддитивного производства. Все нависающие элементы были модифицированы для обеспечения реализуемости – добавлены уклоны, сглажены острые переходы. Облучатель был ориентирован вертикально на платформе принтера таким образом, чтобы поддержки формировались внутри горизонтального участка волновода и были доступны для легкого удаления. Также вертикальная ориентация модели при печати обеспечивает осевую симметрию гофрированного рупора, что важно

для получения высоких уровней кросс-поляризационной развязки на круговой поляризации.

После печати изделие прошло струйную обработку стеклянными шариками для снижения шероховатости, а волноводные фланцы были обработаны на фрезерном станке. В процессе механической обработки были удалены внутренние поддержки, а на фланцах выполнены резьбовые отверстия для крепления коаксиально волноводных переходов (КВП).

На рис. 1 представлены 3D модель в разрезе и изготовленный прототип облучателя. После механической доработки габариты устройства составили $72.3 \times 44.6 \times 44.6$ мм. Следует отметить, что рупор с аналогичной внутренней геометрией, изготовленный фрезерованием, потребовал бы сборки из трёх отдельных частей, соединённых винтами. Конструкция, выполненная таким способом из монолитных металлических заготовок, обладала бы массой, на 60 % превышающей массу изделия, изготовленного методом аддитивного производства. Это обстоятельство подчёркивает обоснованность применения аддитивных технологий при создании СВЧ-устройств, особенно в задачах, связанных с бортовой аппаратурой.



а)



б)

Рис. 1. 3D модель в разрезе (а) и изготовленный облучатель (б).

2. Результаты

S-параметры облучателя были измерены с помощью векторного анализатора цепей, подключенного двумя портами с помощью КВП к фланцам облучателя. Таким образом измерялись коэффициенты отражения и развязка между портами. Измеренные S-параметры облучателя в сравнении с расчетными представлены на рис. 2. Измеренные коэффициенты отражения (S_{11} и S_{22}) на обоих портах облучателя в рабочих диапазонах частот (18.1-19.3 ГГц и 27.6-27.9 ГГц) составили не более -19 дБ, а межпортовая развязка (S_{21}) в обоих диапазонах составила более 25 дБ (рис. 2).

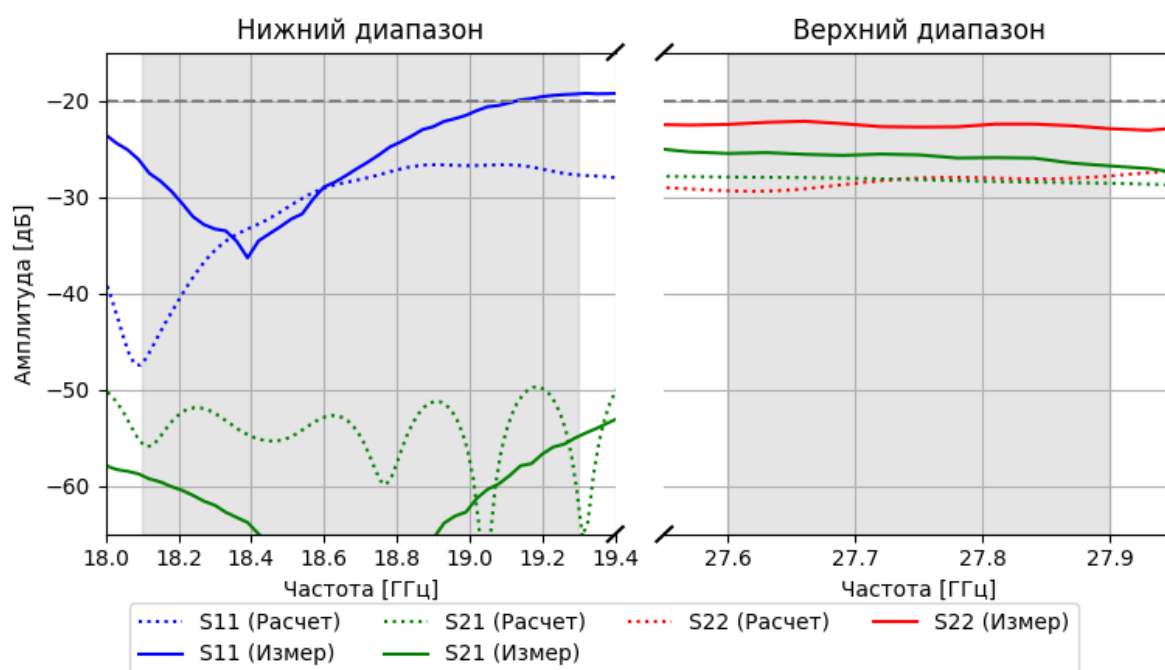


Рис. 2. S-параметры облучателя.

Измерение характеристик направленности проводилось с использованием сканера ближнего поля. Результаты измерений для центральных частот рабочих диапазонов приведены на рис. 3. На этих частотах уровень КПР по оси составил более 30 дБ. На остальных частотах диапазонов КПР имеет значение не хуже 20 дБ. Измеренные и расчётные диаграммы направленности имеют хорошее совпадение в угловом секторе от -50 до $+50$ градусов. Измеренный коэффициент усиления (КУ) облучателя составляет не менее 12.5 дБи по всему диапазону. При этом разница с расчетным значением КУ не превышает 0.8 дБ.

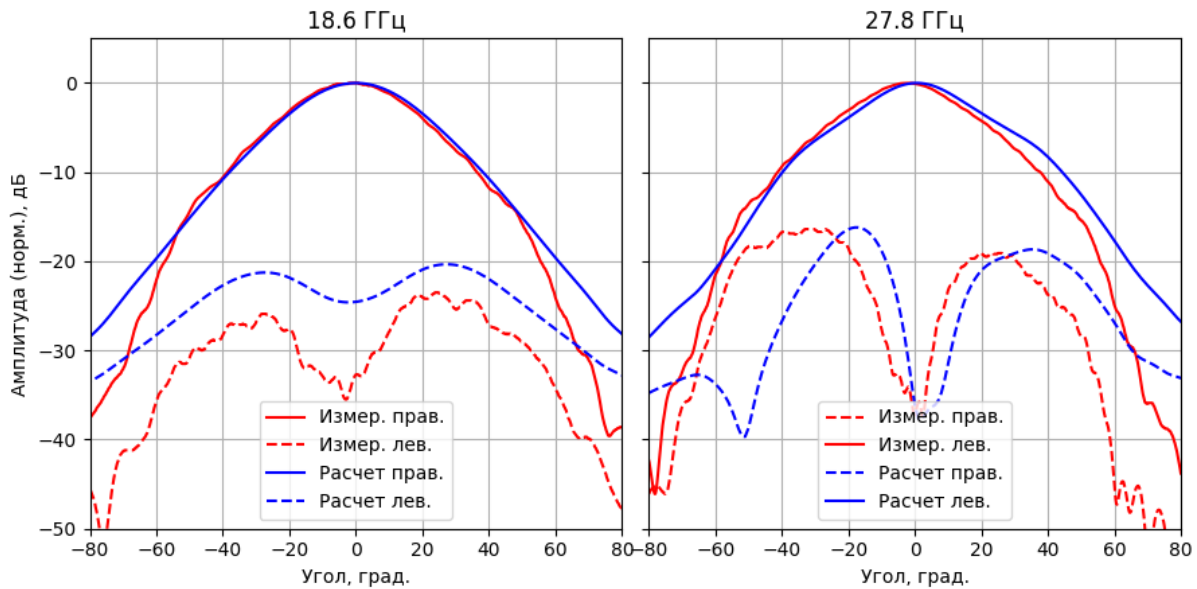


Рис. 3. Сечения основной и кроссовой ДН
на центральных частотах рабочих диапазонов.

Заключение

Описанная в работе конструкция демонстрирует, что совмещение поляризующего элемента и рупорного облучателя в одной детали, изготовленной по аддитивной технологии, возможно без ущерба для электродинамических характеристик. Проектирование электродинамической модели с учётом специфики SLM технологии позволило добиться высокого качества полученного устройства без необходимости сложной механической обработки, а также добиться компактности итогового устройства и снижения его массы более чем на 60 % по сравнению с изготовлением на токарно-фрезерных станках. Результаты измерений подтвердили работоспособность конструкции, её соответствие расчётным характеристикам и, таким образом, перспективность применения аддитивных технологий в производстве антенн для Ка диапазона. Подобный подход открывает путь к дальнейшему упрощению конструкций антенных систем, уменьшению их габаритов и массы, ускорению производственного цикла.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН (шифр научной темы FWES-2025-0028)

Литература

1. Helena D. et al. The use of 3D printing technology for manufacturing metal antennas in the 5G/IoT context //Sensors. – 2021. – Т. 21. – №. 10. – С. 3321.
2. Peverini O. A. et al. Integration of an H -Plane Bend, a Twist, and a Filter in Ku/K-Band Through Additive Manufacturing //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2018. – Т. 66. – №. 5. – С. 2210-2219.
3. Qian L. et al. 3-D Printed Monolithic Dielectric Waveguide Filter Using LCM Technique //2022 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP). – IEEE, 2022. – С. 1-3.
4. Zárate Y. D. et al. 3D-printed low-cost choke corrugated Gaussian profile horn antenna for Ka-band //Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 22957.
5. Agnihotri I., Sharma S. K. Design of a compact 3-D metal printed Ka-band waveguide polarizer //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Т. 18. – №. 12. – С. 2726-2730.
6. Agnihotri I. 3D Metal Printed Ka-Band Waveguide Polarizer and Feed Horn Antenna : дис. – San Diego State University, 2020.
7. Baranowski M. et al. Low-Loss 3D-Printed Waveguide Filters Based on Deformed Dual-Mode Cavity Resonators //IEEE Access. – 2024. – Т. 12. – С. 78275-78285.
8. Baranowski M. et al. A circular waveguide dual-mode filter with improved out-of-band performance for satellite communication systems //IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2022. – Т. 32. – №. 12. – С. 1403-1406.
9. Peverini O. A. et al. Selective laser melting manufacturing of microwave waveguide devices //Proceedings of the IEEE. – 2017. – Т. 105. – №. 4. – С. 620-631.

Для цитирования:

Сивов Н.О., Лемберг К.В., Поминов К.И., Горчаковский А.А., Шабанов Д.А. Облучатель Ка-диапазона с интегрированным септум-поляризатором, изготовленный методом SLM. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.10.9>