

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.12>

УДК: 621.396.677.55

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ КУБИЧЕСКАЯ ФРАКТАЛЬНАЯ АНТЕННА

А.А. Щекатурин, В.М. Иськив, Е.Е. Васин

Севастопольский государственный университет
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2024 г.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования сверхширокополосной кубической фрактальной антенны. С целью достижения сверхширокополосных характеристик фрактальная конфигурация каждой грани дополняет общую структуру антенны. Проведено электродинамическое моделирование характеристик излучения антенны. Выполнен макет антенны, изготовленный из стиропора, на который наклеена медная пленка фрактальной структуры толщиной 0,3 мм. Общий коэффициент усиления антенны варьируется в пределах 2,4 – 7,6 дБи в рабочей полосе частот 0,48 – 10 ГГц. Антенна излучает поле эллиптической поляризации во всем рабочем диапазоне частот.

Ключевые слова: фрактальная антенна, спиральная антенна, эллиптическая поляризация.

Автор для переписки: Васин Евгений Евгеньевич, Fleetwood_mac@mail.ru

Введение

Современный мир, с его растущими требованиями к мобильным устройствам, беспроводному интернету и различным приложениям, требует всё большей пропускной способности и скорости передачи данных. Именно здесь на первый план выходят сверхширокополосные антенны с круговой поляризацией – ключевой элемент для построения высокоскоростных и надежных беспроводных систем. В сравнении с традиционными антеннами с линейной поляризацией антенны с круговой поляризацией обладают рядом неоспоримых преимуществ. Они менее подвержены влиянию внешних факторов, таких как дождь, снег или изменение ориентации устройства в пространстве. Это особенно важно для мобильных устройств, где ориентация может постоянно меняться. В последние десятилетия исследователи предложили множество различных конструкций антенн с круговой поляризацией. Например, широкополосные антенны с круговой поляризацией на основе микрополосковых элементов, работающих в диапазоне частот 2 – 4 ГГц, нашли применение в системах связи 5G. Другой перспективный тип антенн – это антенны с круговой поляризацией на основе метаматериалов, позволяющие достичь более компактных размеров и улучшенных характеристик. Однако, несмотря на все достижения, разработка эффективных сверхширокополосных антенн с круговой поляризацией остается сложной задачей. Необходимо учитывать множество факторов, таких как коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны, ширина диаграммы направленности, а также стабильность поляризации в широком диапазоне частот [1-5].

Так, в [6] была предложена прогрессивная многополосная поверхность с высоким импедансом, интегрированная с широкополосной спиральной антенной для применения в глобальной навигационной спутниковой системе GNSS. Характерной особенностью разработки является возможность работы в двух диапазонах. Первый диапазон предназначен для применения в системах GNSS в диапазоне от 1,1 до 1,6 ГГц, включая GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou (BDS), QZSS и NavIC. Вторая полоса частот предназначена для использования в

приложениях GNSS в диапазоне 2,4 – 2,5 ГГц, таких как NavIC на частоте 2,49 ГГц, для определения дальности и использования функций Wi-Fi в NavIC, QZSS и BDS соответственно. В [7] рассмотрена коническая двухдиапазонная спиральная антенна L/S-диапазона с высоким коэффициентом усиления, интегрированная с оптической системой для небольшого космического аппарата CubeSat

За основу исследования взята работа [8], в которой рассмотрены порядок согласования и характеристики излучения фрактальной кубической антенны, но не проанализированы ее поляризационные свойства. С целью увеличения рабочего диапазона частот предложенная в [8] антенна доработана путем увеличения числа итераций, что позволило увеличить рабочий диапазон антенны.

1. Конструкция антенны

На рис. 1 показана грань кубической антенны. Единичный элемент представляет плоскую фигуру, включающую в себя 19 смежных равнобедренных прямоугольных треугольников, последовательно уменьшенных в размерах и совмещенных по одному из катетов (рис. 1а).

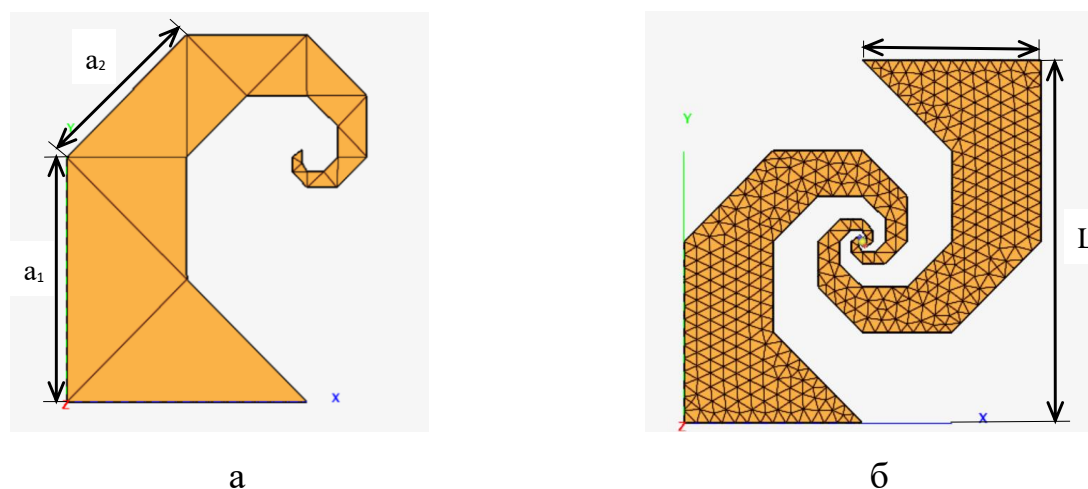


Рис. 1. Геометрия фрактальной структуры: а) результат построения одного захода с 19 итерациями; б) общий вид грани куба.

При этом коэффициент уменьшения λ определяется следующим образом:

$$\lambda = a_n + 1/a_n, \quad (1)$$

где a – гипотенуза треугольника.

На рис. 1б длина грани куба L составляет 170 мм, что обеспечивает настройку антенны на минимальную рабочую частоту 480 МГц.

На рисунке 2а показан трехмерный вид исследуемой антенны, на рис. 3б показан порядок компоновки граней в единый куб. При этом точка возбуждения расположена на верхней грани, фрактальные структуры остальных поверхностей соединены в середине перемычками (закорочены). Внутренняя часть антенны полая, подложка граней выполнена из диэлектрического материала стиропор с относительной диэлектрической проницаемостью, близкой к единице, и малыми потерями. На подложку наклеены фрактальные структуры из медной фольги толщиной 0,3 мм.

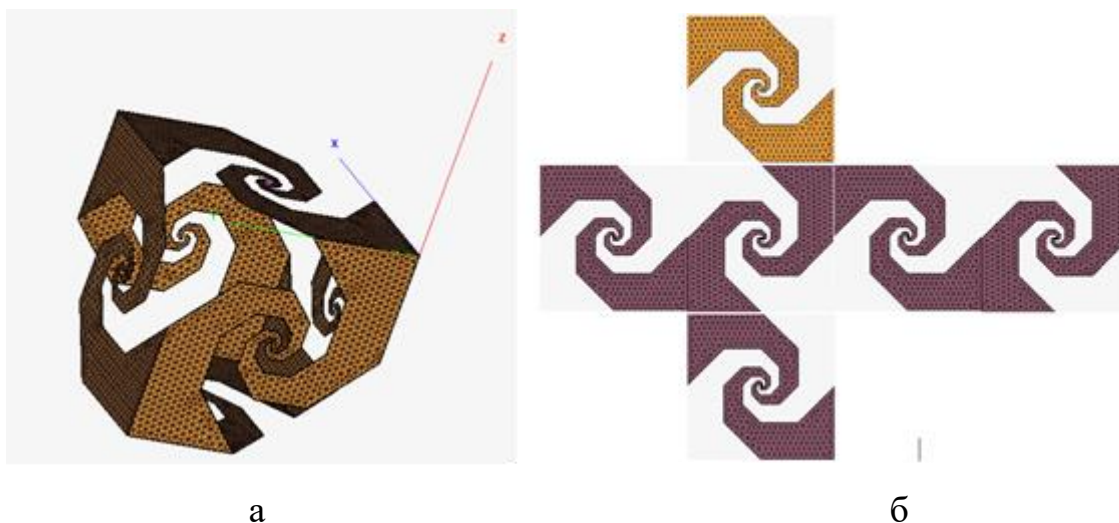


Рис. 2. Исследуемая антенна: а) трехмерный вид;
б) порядок компоновки сторон.

2. Результаты электродинамического моделирования характеристик излучения антенны и их обсуждение

Исследование поляризационных характеристик антенны в рабочем диапазоне 0,48 – 10 ГГц проводилось с дискретностью в 1 ГГц. Результаты моделирования поляризационных характеристик показаны на рис. 3. Из рис. 3 видно, что поле с эллиптической поляризацией формируется в направлении оси Z, с увеличением частоты коэффициент эллиптичности приближается к 1.

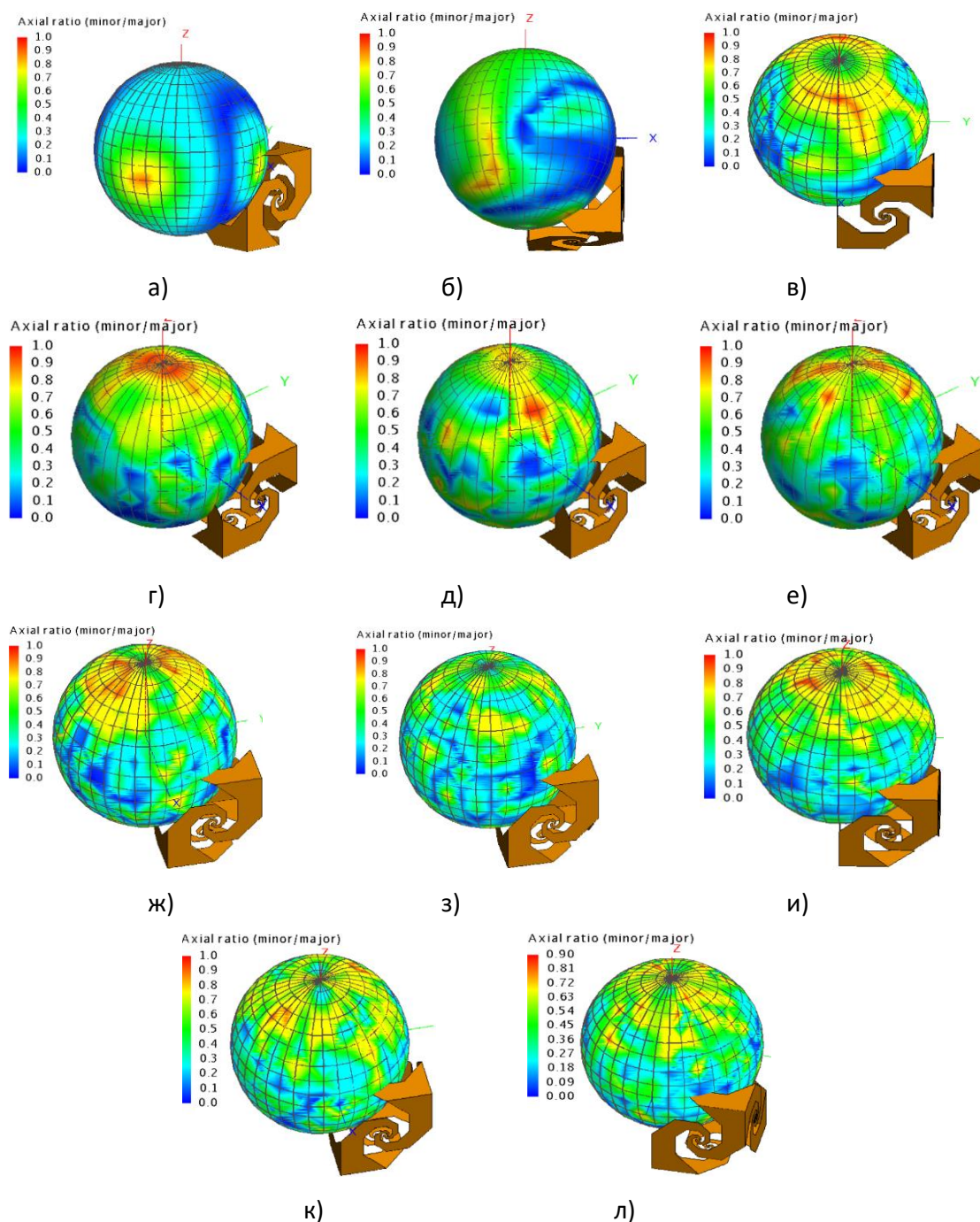
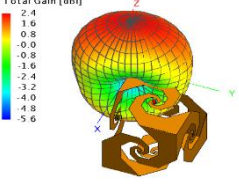
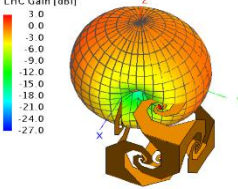
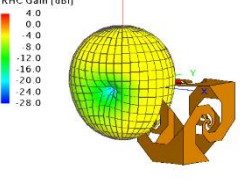
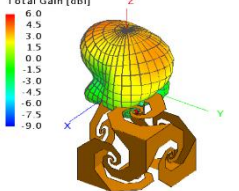
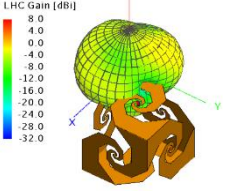
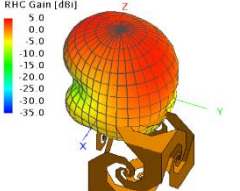
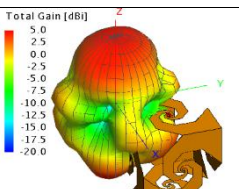
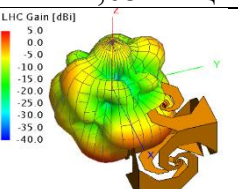
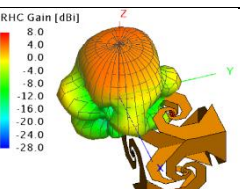
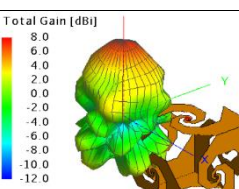
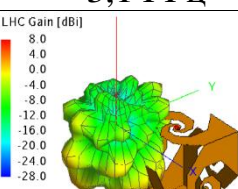
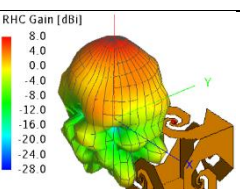
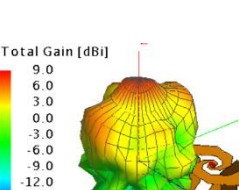
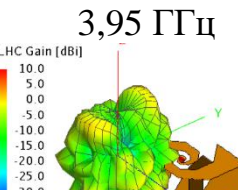
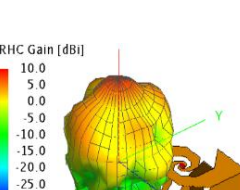
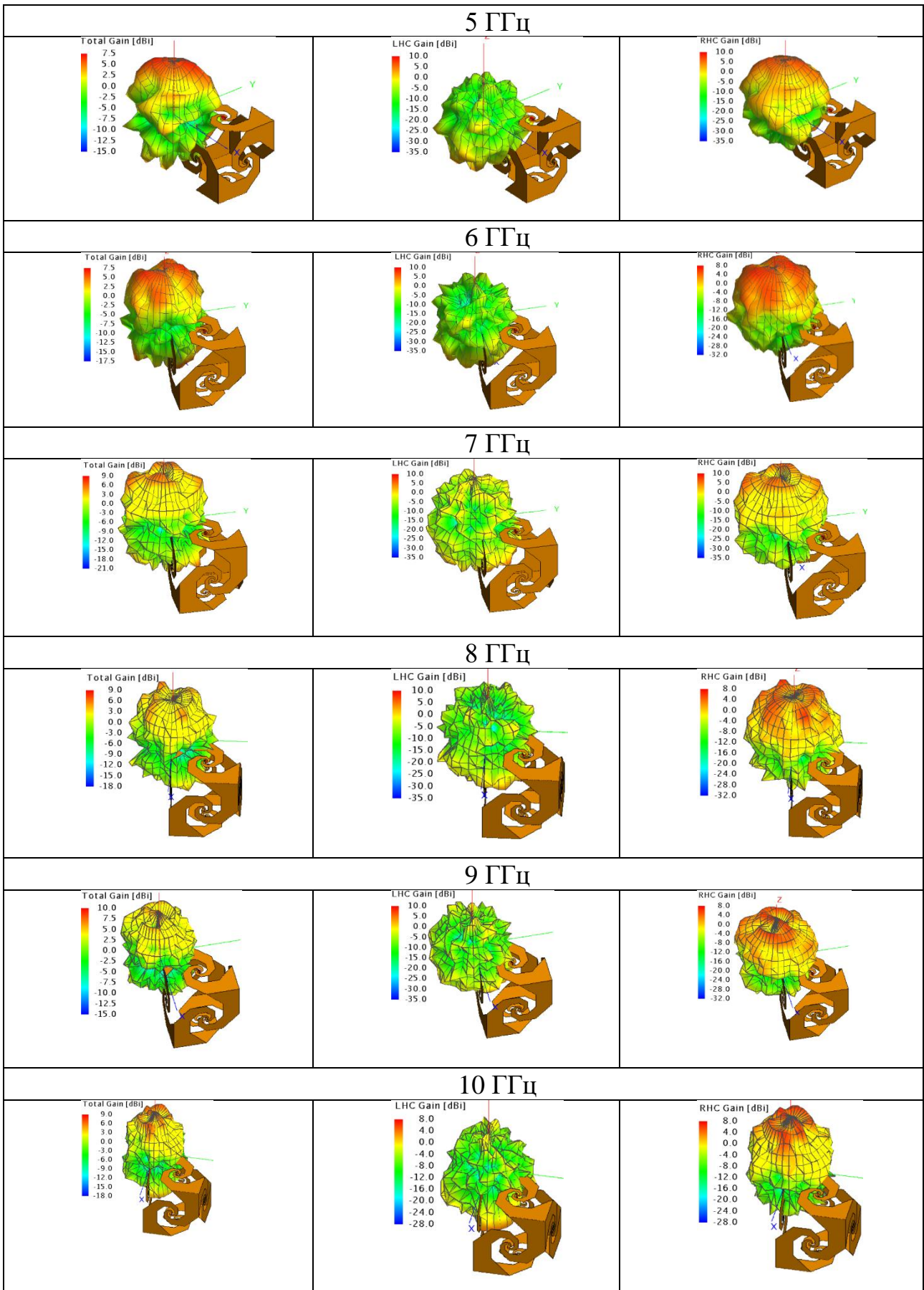


Рис. 3. Коэффициент эллиптичности антенны: а) 0,48 ГГц; б) 1 ГГц; в) 2,05 ГГц; г) 3,01 ГГц; д) 3,95 ГГц; е) 5 ГГц; ж) 6 ГГц; з) 7 ГГц; и) 8 ГГц; к) 9 ГГц; л) 10 ГГц.

Итоги электродинамического моделирования общего коэффициента усиления, коэффициентов усиления для правой и левой поляризаций представлены в таблице 1. Общий коэффициент усиления возрастает в пределах 2,4 – 7,6 дБи при увеличении частоты. При этом коэффициент усиления принимает минимальное значение в 1,3 дБи на частоте 0,64 ГГц и достигает максимума в 9 дБи на частоте 3,3 ГГц.

Таблица 1. Коэффициенты усиления антенны

| Общий коэффициент усиления, дБи | Коэффициент усиления при левой поляризации, дБи | Коэффициент усиления при правой поляризации, дБи |
|---|---|---|
| 0,48 ГГц | | |
|  |  |  |
| 1 ГГц | | |
|  |  |  |
| 2,05 ГГц | | |
|  |  |  |
| 3,1 ГГц | | |
|  |  |  |
| 3,95 ГГц | | |
|  |  |  |



Резюмированный график с данными зависимости общего коэффициента усиления антенны от частоты показаны на рис. 4.

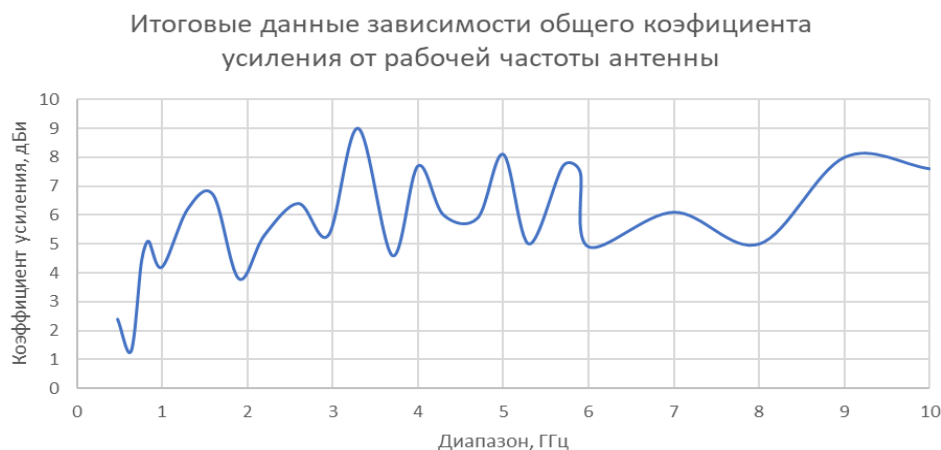


Рис. 4. Итоговые данные зависимости общего коэффициента усиления от рабочей частоты антенны.



Рис. 5. Диаграмма изменения входной части активного сопротивления от частоты.

На рис. 5 показано изменение активной части входного сопротивления в рабочем диапазоне частот. Так, максимальное значение сопротивления 610 Ом соответствует частоте 0,62 ГГц, минимальное значение 98 Ом приходится на частоту 0,81 ГГц.

В диапазоне частот от 1 до 10 ГГц активная часть входного сопротивления находится в границах 150 – 350 Ом и с увеличением частоты с 6 до 10 ГГц значение сопротивления плавно увеличивается в пределах 222 – 268 Ом.



Рис. 6. Диаграмма изменения входной части реактивного сопротивления от частоты.

На рис. 6 показаны изменения реактивной части входного сопротивления в рабочем диапазоне частот. Максимальное значение сопротивления 425 Ом соответствует частоте 10 ГГц, минимальное значение – 280 Ом относится к величине частоты 0,65 ГГц.

Начиная с частоты 3,6 ГГц реактивная часть входного сопротивления плавно увеличивается со значения 17 Ом до значения 425 Ом на частоте 10 ГГц.

Исследование коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ) проводилось для варианта с подключением фидера сопротивлением 50 Ом через микрополосковое согласующее устройство, интегрированное в антенну, и для варианта, когда согласующее устройство отсутствует. Среднее значение активной части входного сопротивления составляет 240 Ом во всем диапазоне рабочих частот рассматриваемой антенны.

Установлено, что наибольшие значения КСВ принимает в диапазоне 1 – 5 ГГц как для сопротивления 50 Ом, так и 240 Ом. Данные показаны на рис. 7.

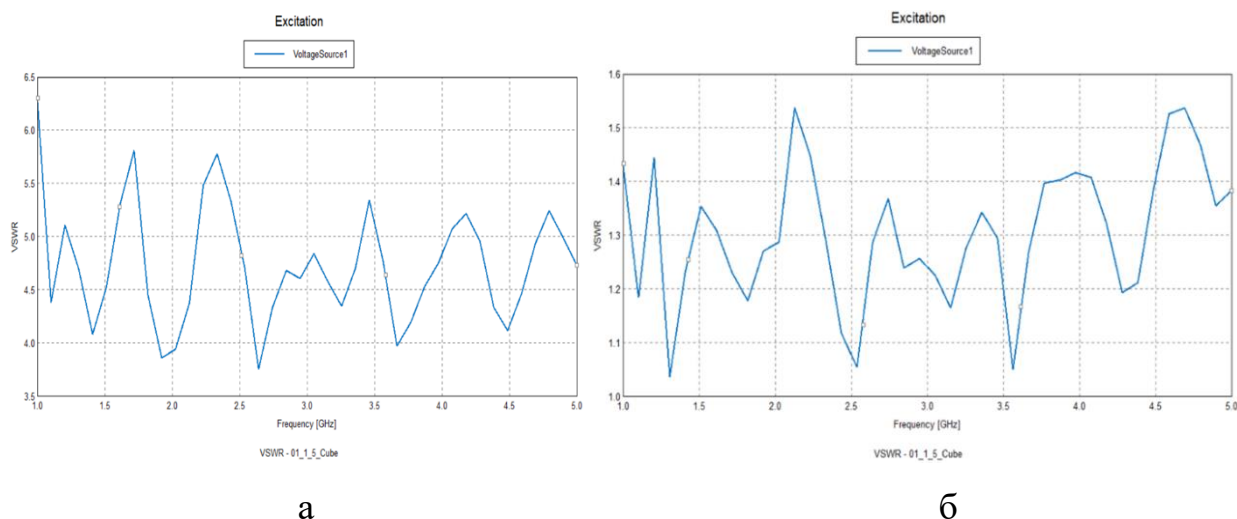


Рис. 7. График КСВ диапазона 1 – 5 ГГц: а) 50 Ом; б) 240 Ом.

Обобщенные результаты КСВ исследуемой антенны для сопротивлений 50 и 240 Ом показаны на рис. 8 и 9.

Диаграмма коэффициента стоячей волны для волнового сопротивления 50 Ом

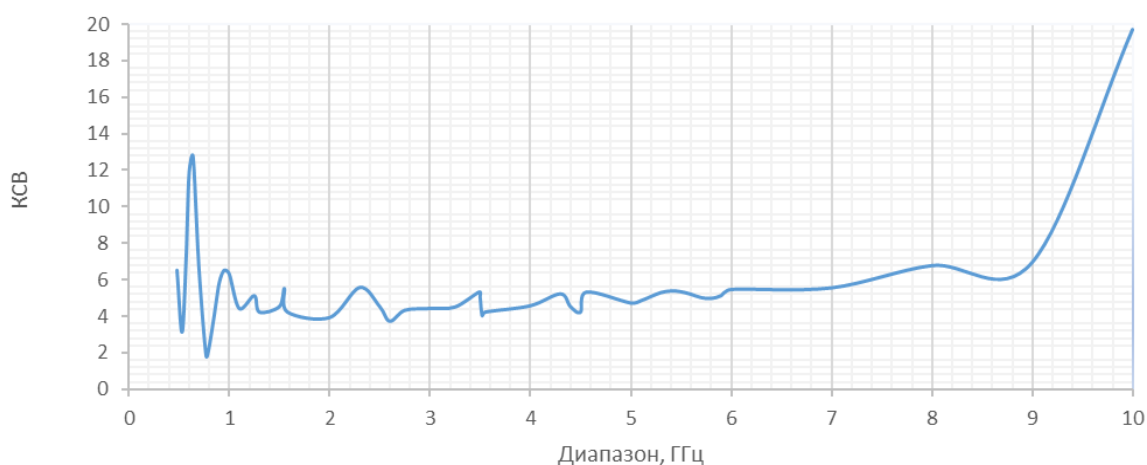


Рис. 8. График коэффициента стоячей волны для волнового сопротивления 50 Ом.

Так, минимум КСВ, равный 1,8 для волнового сопротивления 50 Ом, приходится на частоту 0,77 ГГц, максимум – 19,7 соответствует верхней границе диапазона – 10 ГГц. В целом, график КСВ имеет область с 1 до 9 ГГц, где КСВ не выходит за пределы значений 3,7 – 6,93.

Диаграмма коэффициента стоячей волны
для волнового сопротивления 240 Ом

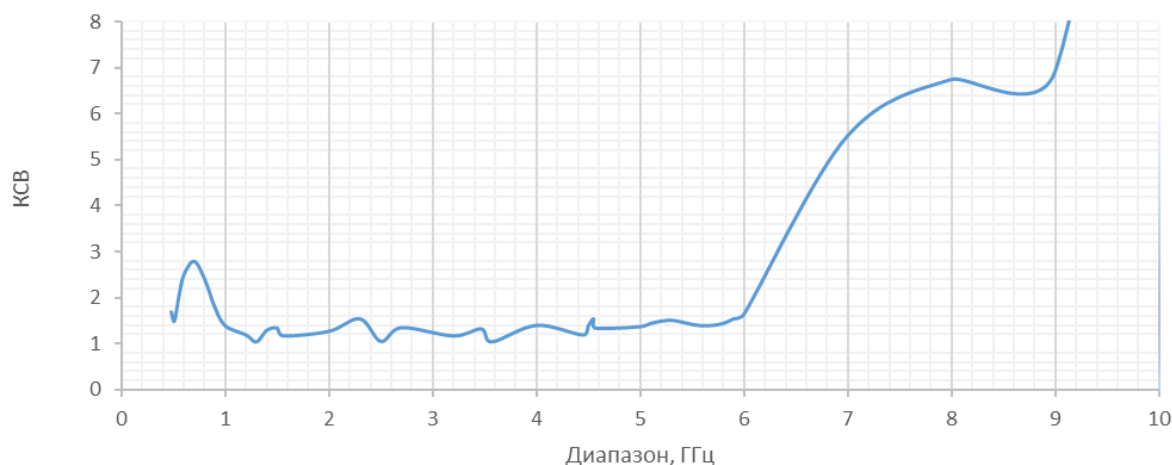


Рис. 9. График коэффициента стоячей волны
для волнового сопротивления 240 Ом.

Для волнового сопротивления 240 Ом существует три минимума КСВ, равных 1,05 на частотах 1,3 ГГц, 2,5 ГГц и 3,57 ГГц. Максимум КСВ приходится на верхнюю границу рабочего диапазона в 10 ГГц и составляет 19,17. График зависимости КСВ от частоты можно разделить на три области: область 0,48 – 1 ГГц со скачкообразной частью коэффициента стоячей волны, участок с 1 до 6 ГГц с плавным изменением КСВ в пределах 1 и область с резким возрастанием КСВ с 1,65 до 19,17 в диапазоне 6 – 10 ГГц.

Заключение

Разработан макет широкополосной фрактальной кубической антенны с согласующим устройством, расположенным вдоль захода спирали, что позволило сохранить общие габариты изделия. Проведено исследование характеристик излучения в диапазоне частот 0,48 – 10 ГГц. Установлено, что антенна обладает коэффициентом усиления в пределах 2,4 – 10 дБи и излучает поле эллиптической поляризации во всем рабочем диапазоне частот.

Литература

1. Зеленкевич Д.Ю., Манько А.С., Головин В.В. Печатный излучатель антенной решетки базовой станции 5G диапазона n79 // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: сб. науч. тр. – Севастополь: 2022. – № 5. – 224 с. – С. 109.
2. Hannan M., Ghosh S. Design and Analysis of Enhanced Bandwidth Slotted Logarithmic Spiral Patch Antenna for 5G Communication // NIELIT's International Conference on Communication, Electronics and Digital Technologies. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. – С. 159-171.
3. Kosta S., Baudh R.K., Kumar V.D. Logarithmic-spiral magneto-electric dipole antenna for 5G communication // AEU-International Journal of Electronics and Communications. – 2023. – Т. 171. – С. 154875.
4. Bezgin A.A., Savochkin A.A. Patch Antennas Characteristics Design Using RWG Functions // 2021 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). – IEEE, 2021. – С. 51-53.
5. Bezgin A.A., Savochkin A.A. The Patch Circular Polarization Antenna for Autonomous Marine Platforms // 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). – IEEE, 2021. – С. 0289-0292.
6. Lele K., Bartone C. Circularly Periodic Progressive Multi-Band High Impedance Surface Integrated with a Wideband Spiral Antenna for GNSS Applications // Proceedings of the 2024 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. – 2024. – С. 987-997.
7. Meirambekuly N. et al. A High Gain Deployable L/S Band Conical Helix Antenna Integrated with Optical System for Earth Observation CubeSats // IEEE Access. – 2023. – Т. 11. – С. 23097-23106.
8. Kwon O.H. et al. 3D-printed super-wideband spidron fractal cube antenna with laminated copper // Applied Sciences. – 2017. – Т. 7. – №. 10. – С. 979.

Для цитирования:

Щекатурин А.А., Иськив В.М., Васин Е.Е. Сверхширокополосная кубическая фрактальная антенна. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.12>