

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.14>

УДК: 520.628; 621.396.67

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ И ФРАКТАЛЬНЫХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Д.С. Север, Я.С. Дронин, Л.Г. Стаценко, А.Ю. Родионов, М.В. Бернавская

**Дальневосточный федеральный университет
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10**

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2024 г.

Аннотация. Исследована возможность применения метаматериалов в конструкции микрополосковых и фрактальных антенн. Рассмотренные в работе вариации внедрения метаматериалов позволяют добиться повышенной энергоэффективности цифровых систем связи, что дает возможность создавать устройства с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями. Были смоделированы различные варианты микрополосковых и фрактальных антенных устройств при помощи программного обеспечения CST Studio, которые соответствуют современным требованиям к оптимизации размеров и улучшению параметров излучения. В работе рассматриваются две структуры: разорванный кольцевой резонатор (SRR) и комплементарный резонатор с разъемными кольцами (CSRR). Рассмотрена возможность применения исследуемых антенн в стандартах 5G, Wi-Fi (2,4 ГГц, 5 ГГц, стандарт 6E), показаны преимущества использования метаматериалов и фрактальных геометрий на основе метаматериалов для повышения энергоэффективности и помехоустойчивости цифровых систем связи.

Ключевые слова: квадратный резонатор с разрезным кольцом, метаматериал, патч-антенна, фрактальные антенны, резонансные свойства, рабочая частота, коэффициент отражения, комплементарный резонатор с разъемными кольцами, композитные структуры.

Финансирование: Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008.

Автор для переписки: Дронин Ярослав Сергеевич, dronin.ias@dvfu.ru

Введение

Метаматериал – это искусственный композитный материал, который состоит из микроскопических элементов (мета-ячеек), упорядоченных определенным образом [1,2,3]. Эти элементы могут быть различными по своей природе и форме, но их размеры обычно сопоставимы с длиной волны электромагнитного излучения в том диапазоне частот, для которого предназначены.

Поскольку в современных системах связи особое внимание уделяется вопросу увеличения помехоустойчивости и энергоэффективности, одним из вариантов, на который следует обратить внимание – это метаматериалы. Из-за своих уникальных свойств, которых невозможно встретить в природных материалах, метаматериалы в настоящее время являются перспективным решением в улучшении характеристик цифровых устройств.

Поскольку одной из важных задач, при проектировании устройств в современных системах связи является их миниатюризация при сохранении оптимальных параметров, метаматериалы все так же являются эффективным решением данной задачи [4,5].

В представленной работе рассматривается определенный тип мета-структуры, а именно SSRR (square split ring resonator, двойной кольцевой резонатор квадратного типа) и CSSRR (complimentary square split ring resonator, комплементарный резонатор с разъемными кольцами) [6,7].

Учитывая растущие требования к современным устройствам цифровых систем связи, а также многие примеры, доказывающие эффективность использования метаматериалов в конструкции антенн [8,9], необходимо изучить их влияние на качественные параметры устройств, работающих на частотах основных стандартов, таких как 5G и Wi-Fi.

1. Моделирование мета-ячейки

Основным элементом в моделируемой ячейке, обладающим отрицательным значением магнитной проницаемости, выбран резонатор с разрезным квадратным кольцом (SSRR – Square Split-Ring Resonator). Построение геометрии производится посредством кода, написанного в среде Matlab, расчёт характеристик выполнен в CST Studio Suite. Конечная модель ячейки представлена на рисунке 1.

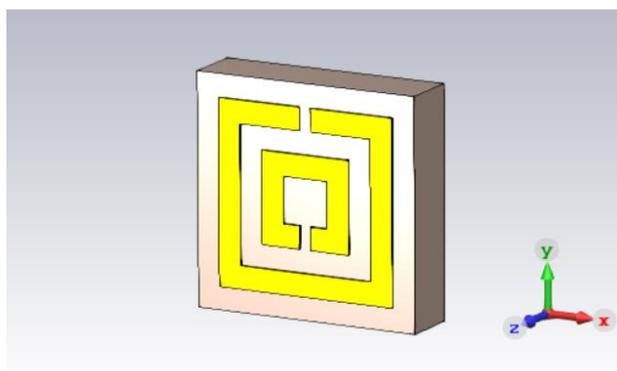


Рис. 1. Модель мета-ячейки.

В качестве диэлектрического слоя ячейки выбран FR-4 с коэффициентом диэлектрической проницаемости 4,4. Металлизация выполнена на основе меди.

Графики действительной части коэффициента магнитной проницаемости в зависимости от частоты для каждого рассматриваемого диапазона частот представлены на рисунках 2-5. Из графиков следует, что отрицательное значение коэффициента диэлектрической проницаемости лежит в целевых диапазонах частот, что подтверждает объективность их применения в качестве MNG-ячеек.

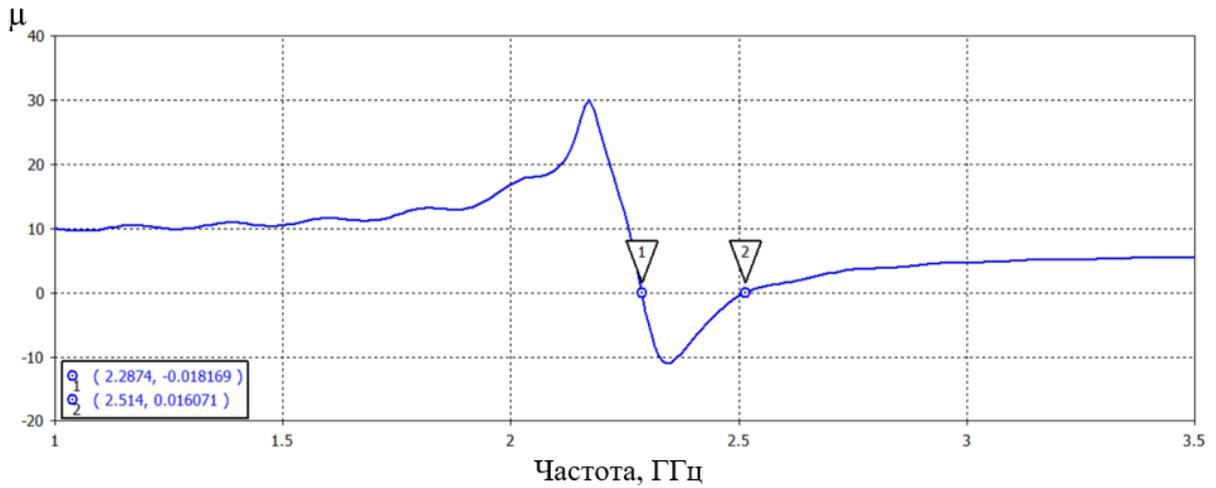


Рис. 2. Частотная зависимость действительной части коэффициента магнитной проницаемости MNG-ячейки для Wi-Fi 2,4 ГГц.

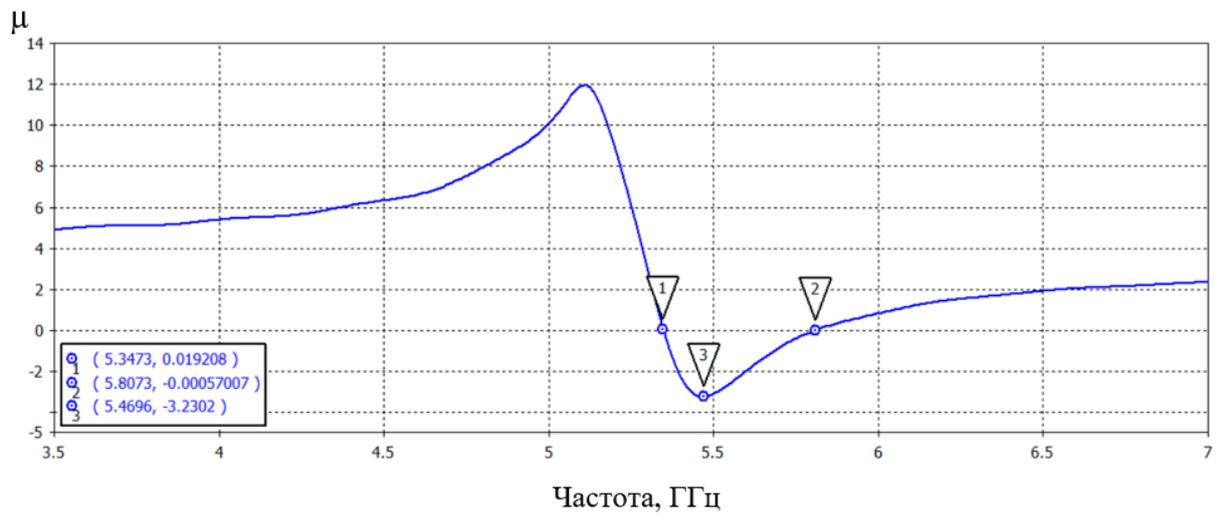


Рис. 3. Частотная зависимость действительной части коэффициента магнитной проницаемости MNG-ячейки для Wi-Fi 5 ГГц.

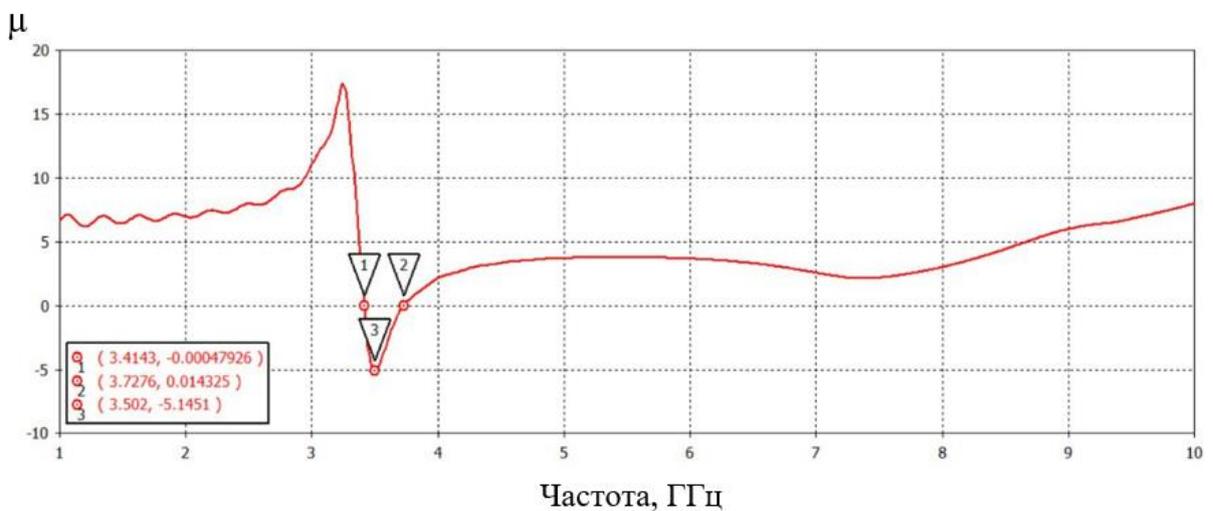


Рис. 4. Зависимость коэффициента магнитной проницаемости от частоты для MNG-ячейки диапазона 3,6 ГГц.

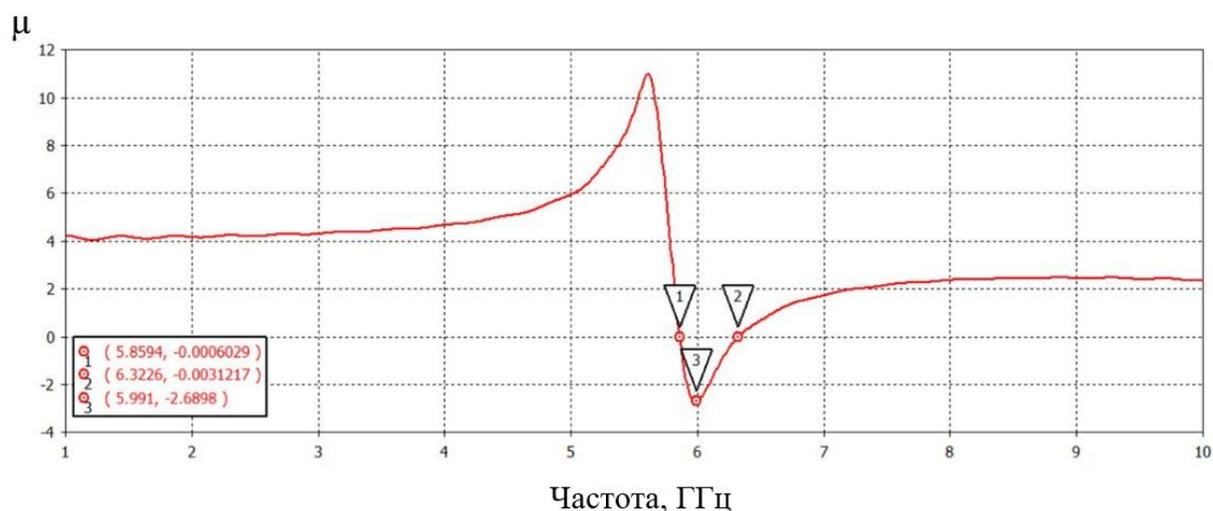


Рис. 5. Зависимость коэффициента магнитной проницаемости от частоты для MNG-ячейки диапазона 6,175 ГГц.

2. Моделирование патч-антенны с внедрением мета-структур

Одним из исследуемых в работе вариантов внедрения мета-ячеек является структура с интеграцией SSRR ячеек в конструкцию экрана патч-антенны. Полученная конструкция показана на рисунке 6.

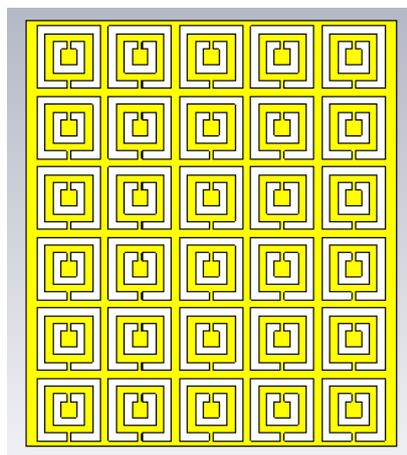


Рис. 6. Интеграция мета-ячеек в конструкцию экрана.

График зависимости коэффициента отражения от частоты усовершенствованной патч-антенны, совмещенный с графиком зависимости коэффициента отражения от частоты исходной патч-антенны, показан на рисунках 7 и 8 (для 3,6 ГГц и 6,175 ГГц соответственно).

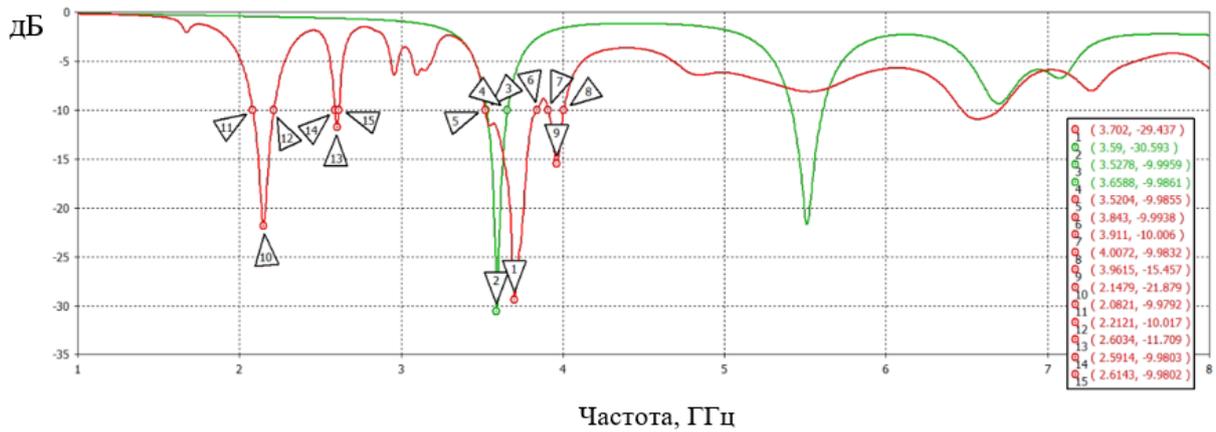


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты для исходного патча (зелёный) и для модифицированного патча (красный) для диапазона 3,6 ГГц.

Как можно увидеть, после интеграции ячеек SSRR, пик резонанса с целевой частоты 3,6 ГГц сместился в область более высоких частот, при этом ширина рабочих частот увеличилась со значения 130 МГц (маркеры 3 и 4 на рисунке 7) до значения 320 МГц (маркеры 5 и 6 на рисунке 7).

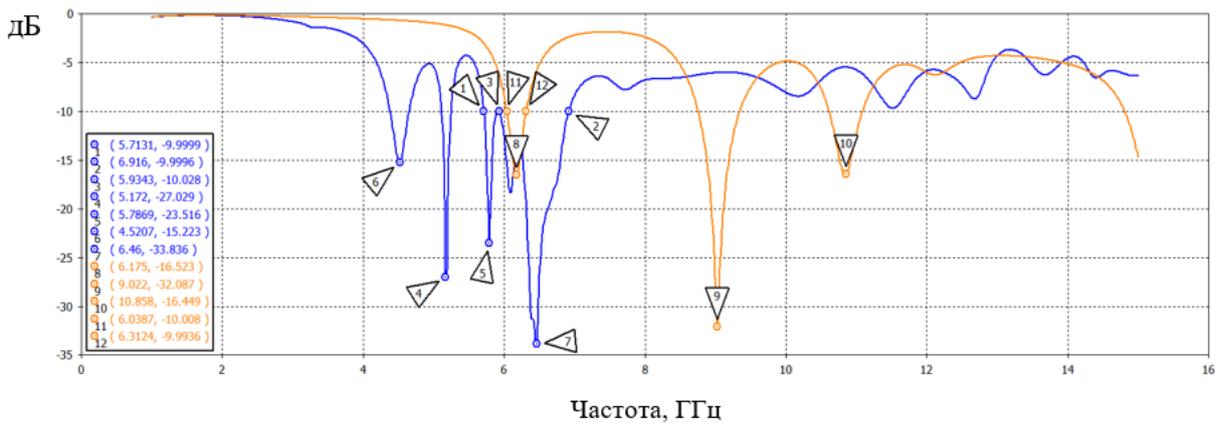


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения от частоты для исходного патча (оранжевый) и для модифицированного патча (синий) для диапазона 6,175 ГГц.

Данный вариант модификации патч-антенны позволяет покрыть весь диапазон частот стандарта Wi-Fi 6E. Резонансы на частотах 9 ГГц и 10,8 ГГц исчезли, но при этом появились резонансы в районе 4,5 ГГц (маркер 6 на рис. 8), 5,78 ГГц (маркер 5 на рис. 8) и 5,17 ГГц (маркер 4 на рис. 8).

Следующим рассмотренным вариантом внедрения мета-ячеек является вариант интеграции SSRR ячеек в конструкцию диэлектрической подложки

патч-антенны. Мета-ячейки располагаются по периметру подложки, огибая излучающий патч. Таким образом, формируется U-образная структура, показанная на рисунке 9.

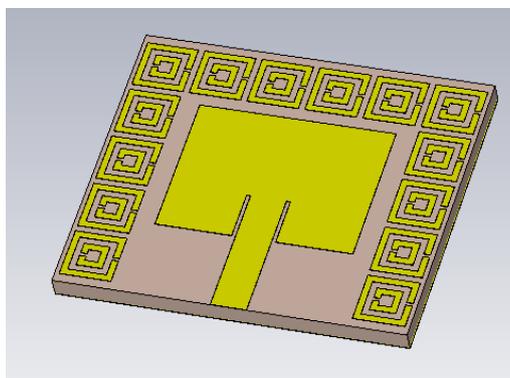


Рис. 9. Интеграция мета-ячеек в конструкцию диэлектрической подложки.

Результат после интеграции мета-ячеек в конструкцию диэлектрической подложки отображён посредством графиков зависимости коэффициента отражения от частоты для частот 3,6 ГГц и 6,175 ГГц (рисунки 10 и 11).

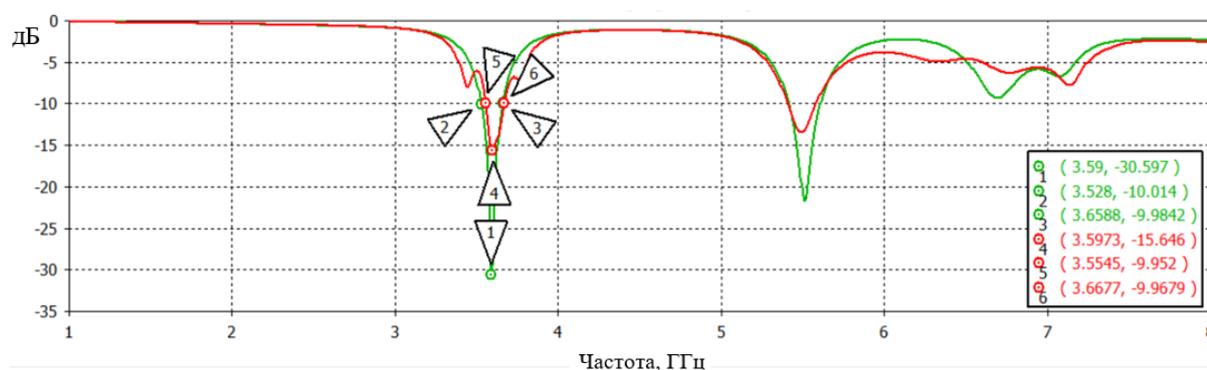


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения от частоты для исходного патча (зелёный) и для модифицированного патча (красный) для диапазона 3,6 ГГц.

Как можно увидеть, интеграция ячеек SSRR в конструкцию диэлектрической подложки не привела к значимым результатам по расширению полосы рабочих частот. Наоборот, можно сделать вывод о том, что данная конструкция ухудшает параметры патч-антенны, поскольку интеграция мета-ячеек привела к увеличению значения коэффициента отражения на рабочей частоте на 15 дБ.

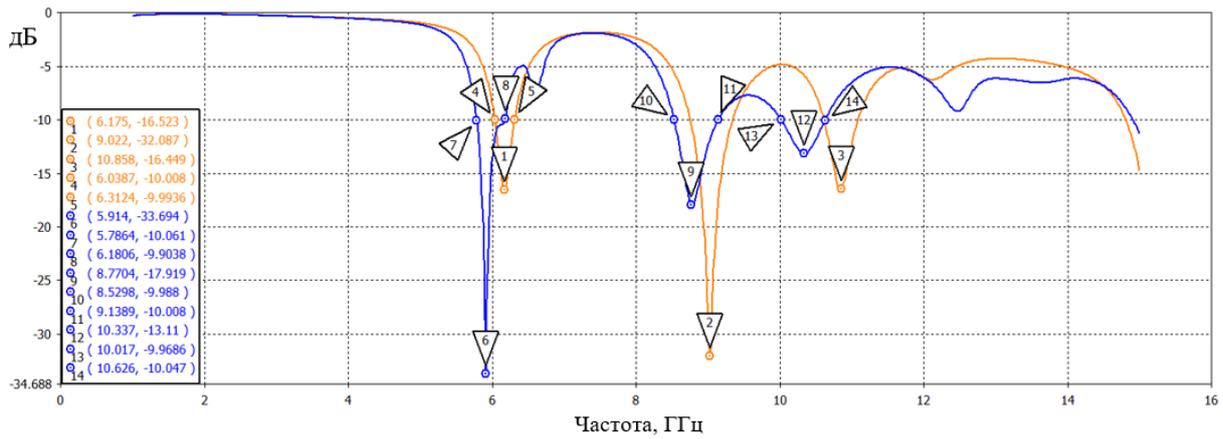


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения от частоты для исходного патча (оранжевый) и для модифицированного патча (синий) для диапазона 6,175 ГГц.

Как можно увидеть, интеграция ячеек SSRR в конструкцию диэлектрической подложки привела к незначительному смещению резонансов в область низких частот. Также на графике наблюдаются два диапазона рабочих частот шириной по 610 МГц каждый. Интеграция мета-ячеек в конструкцию диэлектрической подложки позволила получить три широких диапазона рабочих частот, что является удовлетворительным результатом.

3. Моделирование фрактальных антенн с внедрением мета-структур

Помимо евклидовой геометрии конструкции патч-антенн, в работе рассматривается набор фрактальных структур: кривая Коха и остров Минковского.

Для оптимизации следующей антенны было выбрано преобразование кривой Коха второй итерации. Патч-антенна первой и второй итерации показана на рисунке 12 слева и справа соответственно.

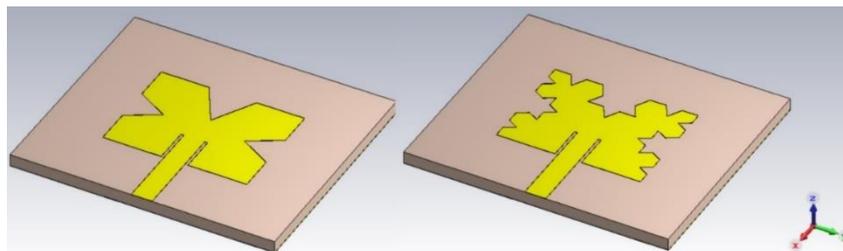


Рис. 12. Модели первой и второй итерации кривой Коха.

График зависимости коэффициента отражения от частоты для второй итерации кривой Коха представлен на рисунке 13.

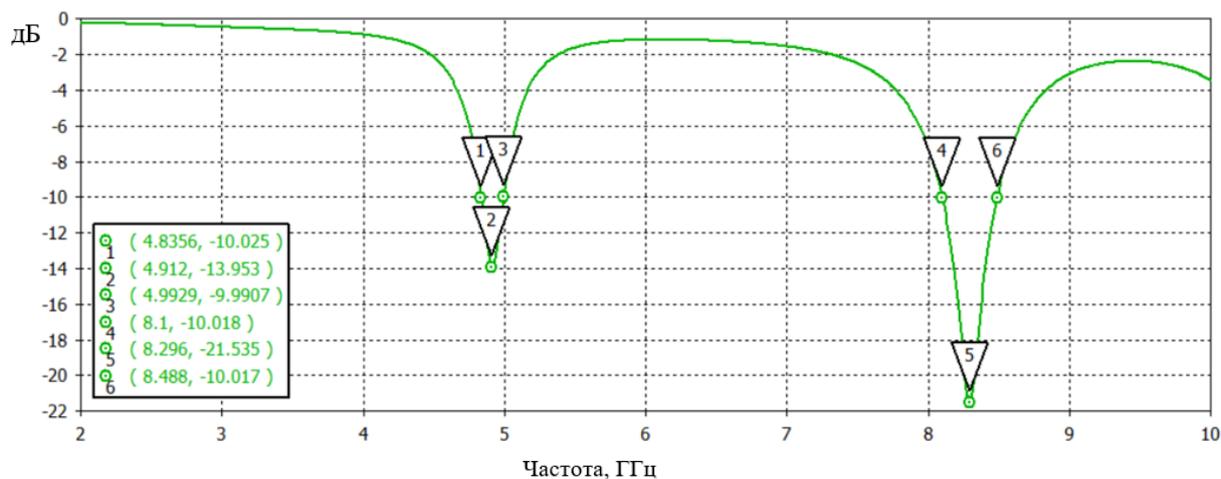


Рис. 13. Частотная зависимость коэффициента отражения в пределах 2-10 ГГц (маркер 2 на целевой резонансной частоте) второй итерации фрактала Коха

Следующим шагом оптимизации структуры является добавление в антенну мета-ячеек, настроенных на целевой частотный диапазон.

Модель фрактальной антенны Коха с мета-ячейками в области экрана и верхней области подложки представлена на рисунке 14.

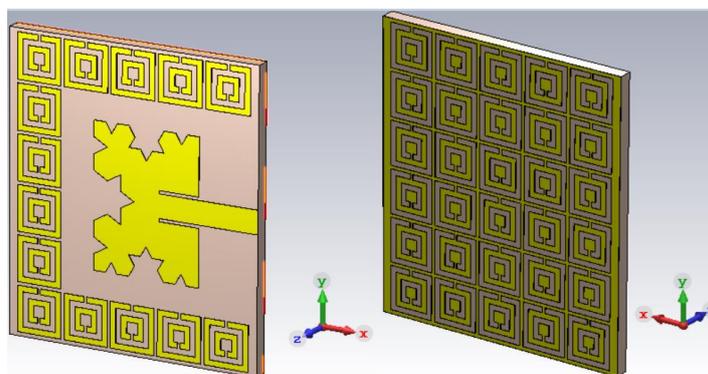


Рис. 14. Модель фрактальной антенны диапазона 5G с добавлением ячеек SSRR вокруг патча и внедрением ячеек CSSRR в область экрана.

В результате добавления метаматериалов MNG-типа в область патча было достигнуто уменьшение значения коэффициента отражения на величину порядка 14 дБ относительно результата только с CSSRR-ячейками в области

экрана. Соответствующие графики представлены на рисунке 15. Ширина рабочей полосы для резонанса целевого диапазона равна 420 МГц.

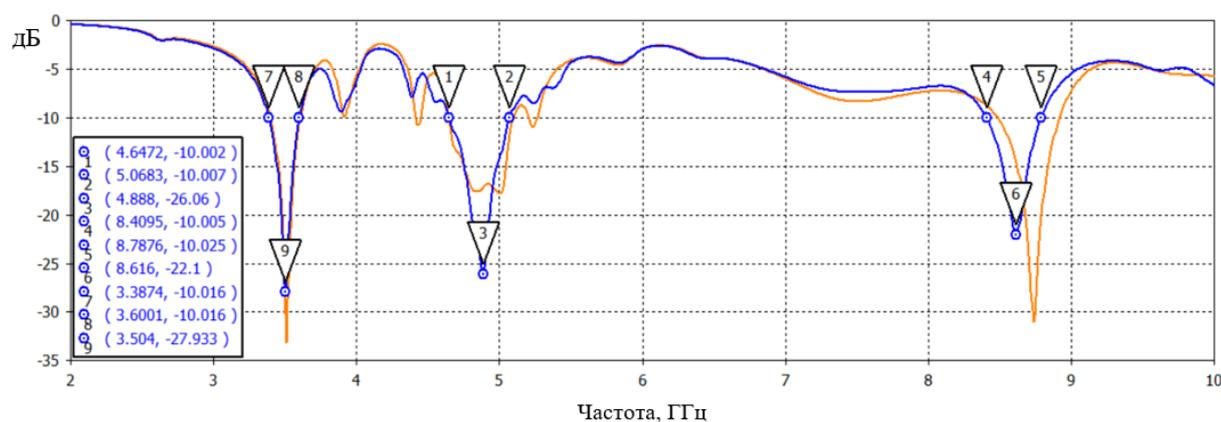


Рис. 15. Сравнительный график частотной зависимости коэффициента отражения в пределах 2-10 ГГц для фрактальной 5G-антенны только с CSSRR-элементами в области экрана (оранжевая кривая); для фрактальной антенны с добавлением SSRR-ячеек в область патча (синяя кривая).

На рисунке 16 представлена модель первой итерации острова Минковского, результаты исследования которой представлены далее.

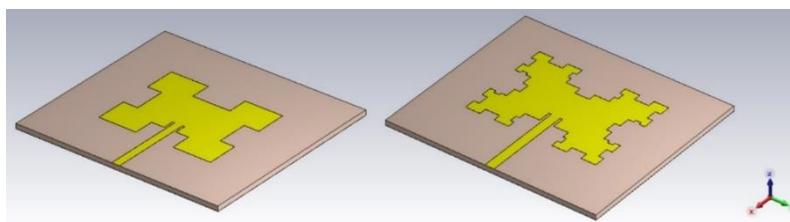


Рис. 16. Модели первой и второй итерации острова Минковского.

Вследствие смещения резонанса относительно целевой частотной области, необходимо было произвести миниатюризацию патча в соответствии с коэффициентом миниатюризации, полученным в результате численного моделирования. Графический результат расчёта зависимости от частоты коэффициента отражения антенны на основе второй итерации острова Минковского, представлен на рисунке 17.

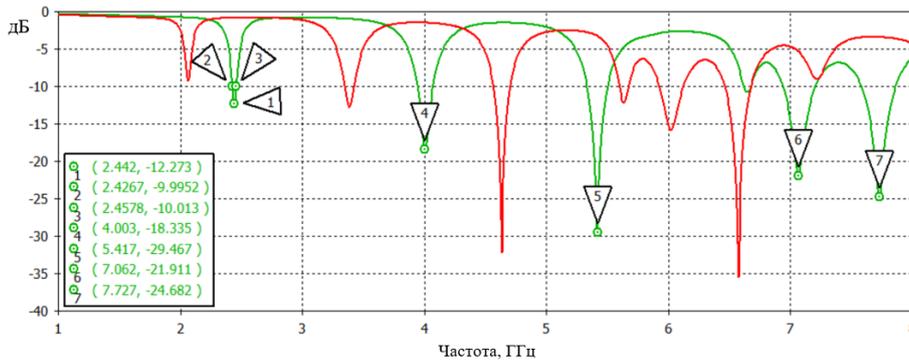


Рис. 17. Частотная зависимость коэффициента отражения в пределах 1-8 ГГц для исходного масштаба второй итерации фрактала острова Минковского (красная кривая) и уменьшенного, с коэффициентом масштабирования патча 0,935 (зелёная кривая)

На рисунке 18 демонстрируется модель предлагаемой антенны на основе метаматериалов в проекциях со стороны патча и экрана с интегрированными ячейками CSSRR.

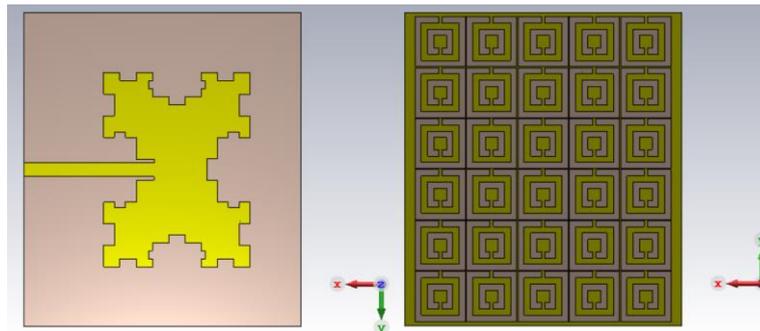


Рис. 18. Модель фрактальной антенны диапазона 5G с добавлением CSSRR-типа в область экрана, вид сверху (слева) и снизу (справа).

График коэффициента отражения для фрактальной антенны Минковского с мета-ячейками в области экрана представлен на рисунке 19.

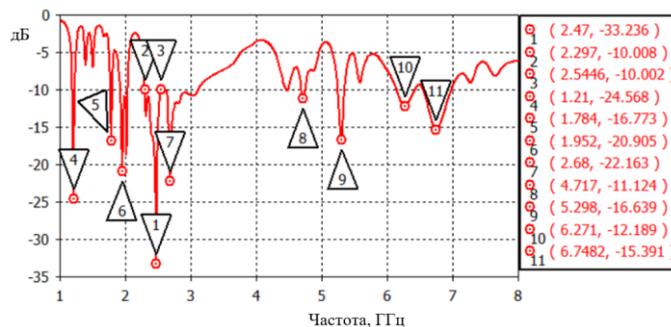


Рис. 19. Частотная зависимость коэффициента отражения в пределах 1-8 ГГц (маркер 1 в целевом диапазоне частот) второй итерации фрактала Коха с метаматериалами.

Как видно из графика, ширина рабочей полосы вследствие применения метаматериалов увеличилась до значения 247 МГц, полностью покрывая целевой диапазон. Коэффициент отражения на средней частоте рабочего диапазона 2,45 ГГц уменьшился до значения -1 дБ и, по сравнению с фрактальным патчем, уменьшился на величину приблизительно равную 10 дБ. Также результат улучшился на 7 дБ относительно исходного прямоугольного патча.

4. Анализ характеристик физических моделей фрактальных антенн

Для того, чтобы подтвердить эффективность комбинирования метаматериалов и фрактальной геометрии экспериментально, были произведены три прототипа антенн, описанных ранее.

Прототип антенны, произведённой на основе модели второй итерации кривой Коха для частот 5G, представлен на рисунках 20, 21.

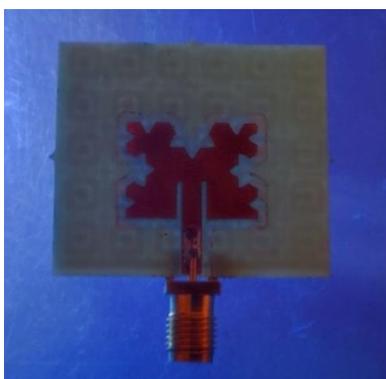


Рис. 20. Антенна на основе второй итерации кривой Коха с метаматериалами в области экрана, вид сверху.

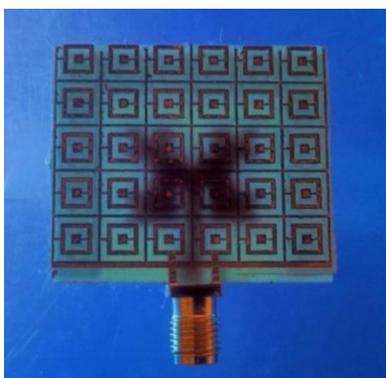


Рис. 21. Антенна на основе второй итерации кривой Коха с метаматериалами в области экрана, вид снизу

Характеристики антенны оцениваются на основе графика параметра S_{11} . Для получения соответствующего графика использовался векторный анализатор цепей компании Keysight модели P9371A.

Прибор позволяет производить анализ характеристик в диапазоне 300 кГц...6,5 ГГц. На рисунке 22 представлен график частотной зависимости коэффициента отражения для антенны диапазона 5G.

Исходя из результатов первого графика, целевой частотный диапазон лежит в пределах полосы пропускания на уровне минус 10 дБ.

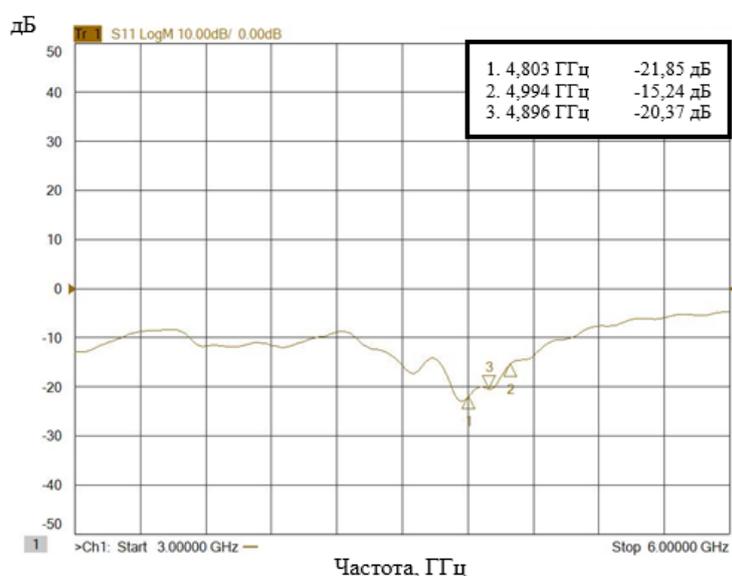


Рис. 22. График частотной зависимости коэффициента отражения для антенны 5G с метаматериалами в области экрана.

На рис. 23 демонстрируется следующий тип антенны 5G с метаматериалами в областях экрана и патча.

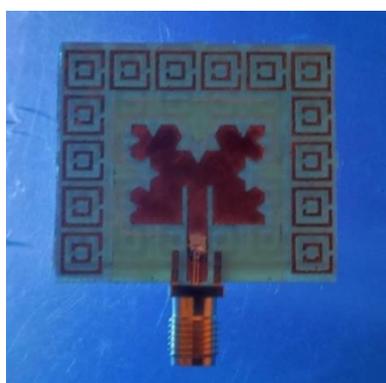


Рис. 23. Антенна на основе второй итерации кривой Коха с метаматериалами в области экрана и патча, вид сверху.

В области экрана метаматериалы интегрированы аналогично предыдущему прототипу. График частотной зависимости коэффициента отражения для данной антенны представлен на рисунке 24.

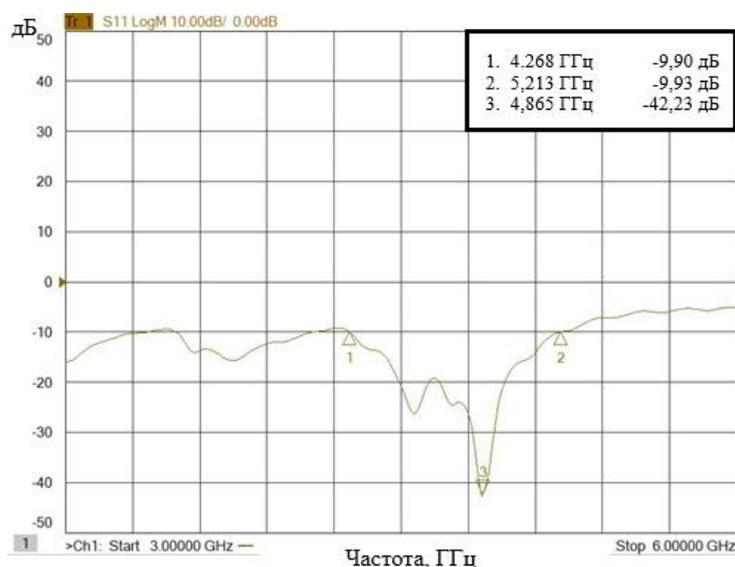


Рис. 24. График частотной зависимости коэффициента отражения для антенны 5G с метаматериалами в области экрана и патча.

Результаты прототипирования для обоих типов антенн 5G-диапазона близки к результатам симуляции. В случае интеграции метаматериалов в область экрана действительно наблюдается расширение рабочей полосы частот в целевом диапазоне, а добавление метаматериалов в область патча улучшает величину коэффициента отражения. Ширина рабочей полосы частот порядка 940 МГц.

На рисунках 25, 26 представлен прототип антенны для частот Wi-Fi 2,4 ГГц.

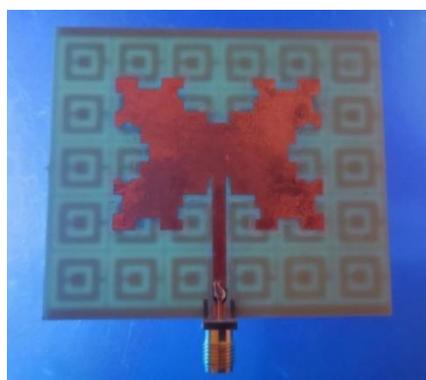


Рис. 25. Антенна на основе второй итерации острова Минковского с метаматериалами в области экрана, вид сверху.



Рис. 26. Антенна на основе второй итерации острова Минковского с метаматериалами в области экрана, вид снизу.

График частотной зависимости коэффициента отражения для данной антенны представлен на рисунке 27.

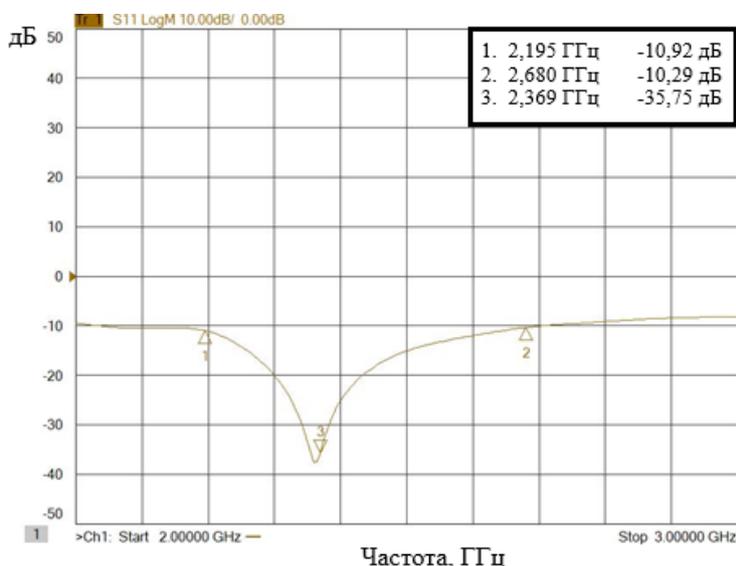


Рис. 27. График частотной зависимости коэффициента отражения для антенны Wi-Fi 2.4 ГГц с метаматериалами в области экрана и патча

Из результатов следует, что рабочий диапазон прототипа полностью покрывает целевой диапазон частот Wi-Fi 2,4 ГГц.

Таким образом, результаты экспериментов подтвердили эффективность применения метаматериалов при проектировании антенн. Все прототипы покрывают целевые диапазоны частот. Некоторое отклонение от результатов симуляции объяснимо недостаточной точностью при производстве антенн, варьированием коэффициента диэлектрической проницаемости подложки, а также точностью симуляции. Применение описанных антенн рекомендуется в сетях Wi-Fi и 5G.

Заключение

В результате проведенной работы, можно сделать вывод о целесообразности применения метаматериалов для проектирования как фрактальных, так и микрополосковых антенн. При использовании мета-ячеек, объединенных в определенные структуры, удалось добиться повышения полосы пропускания, тем самым добившись работы антенн в широком диапазоне частот при сохранении их размеров. Рассмотренные антенны, работающие в наиболее востребованных стандартах связи, показали свою высокую эффективность, как при компьютерном моделировании, так и при проведении натурального эксперимента.

Проанализированные зависимости коэффициента отражения от частоты для физических моделей фрактальных антенн в некоторых случаях несколько отличаются от смоделированных зависимостей. Это объясняется недостаточной точностью при производстве антенн, варьированием коэффициента диэлектрической проницаемости подложки, а также точностью симуляции. Сохраняется основная концепция повышения эффективности антенн, путем увеличения ширины полосы рабочих частот.

Рассмотренные в работе модели антенн рекомендуются к использованию в стандарте сотовой связи 5G и в стандарте беспроводной связи Wi-Fi.

Финансирование: Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008.

Литература

1. Стаценко Л.Г., Пуговкина О.А. Метаматериалы в системах СВЧ. – 2014.
2. Satarkar P.R., Lohani R.B. Characterization of metamaterial based patch antenna for worldwide interoperability for microwave access application //Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2022. – Т. 11. – №. 5. – С. 2687-2695. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i5.4149>

3. Krzysztofik W.J., Cao T.N. Metamaterials in application to improve antenna parameters //Metamaterials and metasurfaces. – 2018. – Т. 12. – №. 2. – С. 63-85. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80636>
4. Семченко И. и др. Метаматериалы и метаповерхности //Наука и инновации. – 2020. – №. 8 (210). – С. 23-27. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2020-8-23-27>
5. Стаценко Л.Г., Пуговкина О.А., Мансуров Ю.Н. Влияние геометрических размеров включений из цветных металлов на резонансные свойства устройств СВЧ //Цветные металлы. – 2015. – №. 12. – С. 71-76. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.12.13>
6. Махьюб Х.Е.А., Кисель Н.Н. Оценка эффективности применения метаматериала в разработках микрополосковых антенн на основе ЛТСС-технологии //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2019. – №. 3 (205). – С. 179-190. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-3-179-90>
7. Kaur P., Bansal S., Kumar N. SRR metamaterial-based broadband patch antenna for wireless communications //Journal of Engineering and Applied Science. – 2022. – Т. 69. – №. 1. – С. 47. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00103-6>
8. Стаценко Л.Г. и др. Применение метаматериалов в антенных устройствах цифровых систем связи //Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.2>
9. Kumar S., Singh H. A comprehensive review of metamaterials/metasurface-based MIMO antenna array for 5G millimeter-wave applications //Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2022. – Т. 35. – №. 11. – С. 3025-3049. <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06408-0>

Для цитирования:

Север Д.С., Дронин Я.С., Стаценко Л.Г., Родионов А.Ю., Бернавская М.В. Применение микрополосковых и фрактальных антенн на основе метаматериалов в цифровых системах связи для повышения их энергоэффективности. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.14>