

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.2>

УДК: 520.628; 621.396.67

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Л.Г. Стаценко, М.М. Смирнова, Д.С. Север, Я.С. Дронин

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

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2023 г.

**Аннотация.** Исследована возможность применения метаматериалов в конструкции СВЧ антенн. Уникальные свойства метаматериалов могут найти широкое применение в технике сверхвысоких частот, поскольку позволяют получить устройства с улучшенными характеристиками и расширенными функциональными возможностями. Смоделированы с помощью программного обеспечения CST Software различные вариации микрополосковых антенных устройств, удовлетворяющие современным требованиям к оптимизации габаритов и улучшению параметров излучения. В работе рассматриваются следующие структуры: разорванный кольцевой резонатор (split ring resonator, SRR) и комплементарный резонатор с разъемными кольцами (complimentary split ring resonator, CSRR). Показана возможность применения исследуемых антенн в стандарте Wi-Fi 6E, а следовательно, в приложениях Интернета вещей (Internet of Things), и в других цифровых системах связи нового поколения.

**Ключевые слова:** двойной кольцевой резонатор, комплементарные разъемные кольца, метаматериал, патч-антенна, резонансные свойства, рабочая частота, коэффициент отражения.

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

**Автор для переписки:** Стаценко Любовь Григорьевна, [statsenko.lg@dvfu.ru](mailto:statsenko.lg@dvfu.ru)

## Введение

Метаматериал – композитный материал со специальными включениями из цветных металлов, определяющими его свойства [1]. В большинстве случаев, вещества, встречающиеся в природе, обладают положительными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей, так называемые DPS (double positive, двойные позитивные), значения магнитной и диэлектрической проницаемости положительные [2]. Такие двойные позитивные среды считаются прозрачными для электромагнитных волн, если внутренние потери в них малы.

Искусственное изменение структуры материалов позволяет синтезировать у измененного объекта новые свойства, которые невозможно получить, используя природные материалы. К таким искусственно построенным материалам с новыми свойствами относятся метаматериалы – уникальные материалы, имеющие трехмерную периодическую ячеистую архитектуру, которая проектируется для получения свойств, не воспроизводимых в природе [3]. При помощи перестраиваемой периодической структуры, можно добиться изменения диэлектрической и магнитной проницаемости у исходного материала.

Уникальность свойств метаматериалов объясняется резонансным взаимодействием электромагнитной волны, которая распространяется в гетерогенной среде с так называемыми включениями, имеющими свою форму, которая и обеспечивает резонансное возбуждение токов в этих включениях [4].

Метаматериалы позволяют решить довольно сложную как в теории, так и на практике задачу по миниатюризации антенн [5]. В теоретическом плане исследовались физические пределы миниатюризации, те минимальные размеры, при которых сохраняются приемлемые значения электродинамических параметров антенны (добротность, коэффициент усиления, полоса согласования). В представленной работе рассматриваются метаматериальные структуры: двойной кольцевой резонатор (split ring resonator, SRR) и комплементарные резонаторы с разъемными кольцами (complimentary split ring resonator, CSRR) [6].

Резонансная частота, получаемая при включении SRR, обычно намного меньше, чем частота, соответствующая классическим кольцевым или квадратным резонаторам с открытым контуром аналогичных размеров [7]. Малый размер SRR ячеек приводит к возможности создания малогабаритного устройства. Основными параметрами ячеек SRR являются длина резонансных колец и проницаемость диэлектрика [8]. Резонаторы с разрезным кольцом могут быть вытравлены на верхней стороне подложки, рядом с микрополосковой питающей линией передачи. Микрополосковая линия, нагруженная резонаторами с разрезными кольцами, представляет собой единую отрицательную среду.

В микрополосковой технологии CSRR достигаются путем периодического вытравливания емкостных зазоров в заземляющем экране под 50-омной микрополосковой линией [9]. CSRR создают отрицательную эффективную проницаемость  $\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}}) < 0$ . Механизм работы антенны на основе CSRR можно объяснить следующим образом: микрополосковая линия передачи индуцирует линии электрического поля, которые исходят из центральной полосы и заканчиваются перпендикулярно плоскости металлического экрана. Из-за наличия диэлектрической подложки линии поля плотно сконцентрированы непосредственно под центральным проводником, и плотность потока мощности достигает наибольшего значения вблизи этой области.

В работе концепция применения метаматериалов – это оптимизация габаритов исходного устройства, улучшение характеристик в режиме приема-передачи посредством применения многоэлементных слоев и интегрированных одиночных ячеек. В связи с этим исследуется перспектива использования метаматериалов в микрополосковой технике беспроводных сетей связи с целью повышения направленных свойств, помехоустойчивости и коэффициента полезного действия [10].

## 1. Моделирование антенн с применением мета-структур SRR

Для исследования была выбрана микрополосковая патч-антенна, излучатель, микроплосковая линия питания и металлический экран которой выполнены из чистой меди с магнитной проницаемостью равной единице. Рабочая частота резонанса для расчета антенны – 3,2 ГГц, размеры представлены таблицей 1.

Таблица 1. Размеры патч-антенны, работающей на частоте 3,2 ГГц.

Параметры	Величина, мм
Длина подложки	56,6
Ширина подложки	43,6
Высота подложки	1,6
Длина патча	28,3
Ширина патча	21,8
Ширина выреза фидера	0,54
Ширина линии питания	2,7
Толщина слоя металлизации	0,035
Проницаемость, $\epsilon$	4,3

В качестве основного элемента была выбрана структура мета-ячейки из чистой меди, геометрия ячейки представляет собой квадратный резонатор типа SRR (split-ring resonator). Размеры резонатора для SRR-ячейки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Размеры резонатора для SRR-ячейки.

Параметры	Величина, мм
Длина слоя диэлектрика	8
Длина внешнего кольца	7,5
Длина внутреннего кольца	5,1
Размер разреза	0,6
Расстояние между кольцами	0,6
Ширина проводников колец	0,6
Высота слоя диэлектрика	1,6
Проницаемость, $\epsilon$	4,3

Значения магнитной ( $\mu$ ) и диэлектрической ( $\epsilon$ ) проницаемостей рассчитанной ячейки соответствуют характеристикам двойной отрицательной (DNG – double-negative) среды. Размеры ячейки не превышают десятой доли

длины волны на резонансной частоте. Модель элемента представлена на рисунке 1. Использован диэлектрик FR-4 (стеклотекстолит).

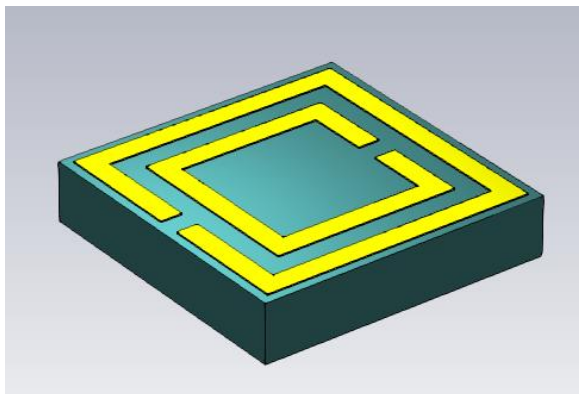


Рис. 1. Модель мета-ячейки.

Рассмотрено несколько вариантов применения метаматериала в конструкции патч-антенны. Произведен расчет S-параметров в программе CST studio.

Результаты, рассматриваемые далее, получены для случая размещения системы SRR-ячеек на верхней и нижней поверхностях подложки [11]. Система мета-ячеек размещается вместо металлического экрана, а также вокруг патча. Модель и график коэффициента отражения для данного случая представлены на рисунках 2 и 3 соответственно. Из рисунка 3 видно, что удалось добиться трех рабочих диапазонов частот, с шириной полосы пропускания до 1,37 ГГц.

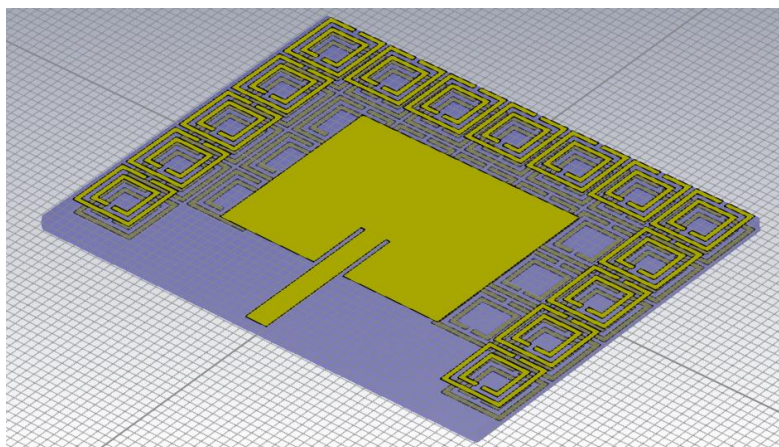


Рис. 2. Модель антенны с системой SRR-ячеек, размещенной вместо металлического экрана, а также вокруг патча.

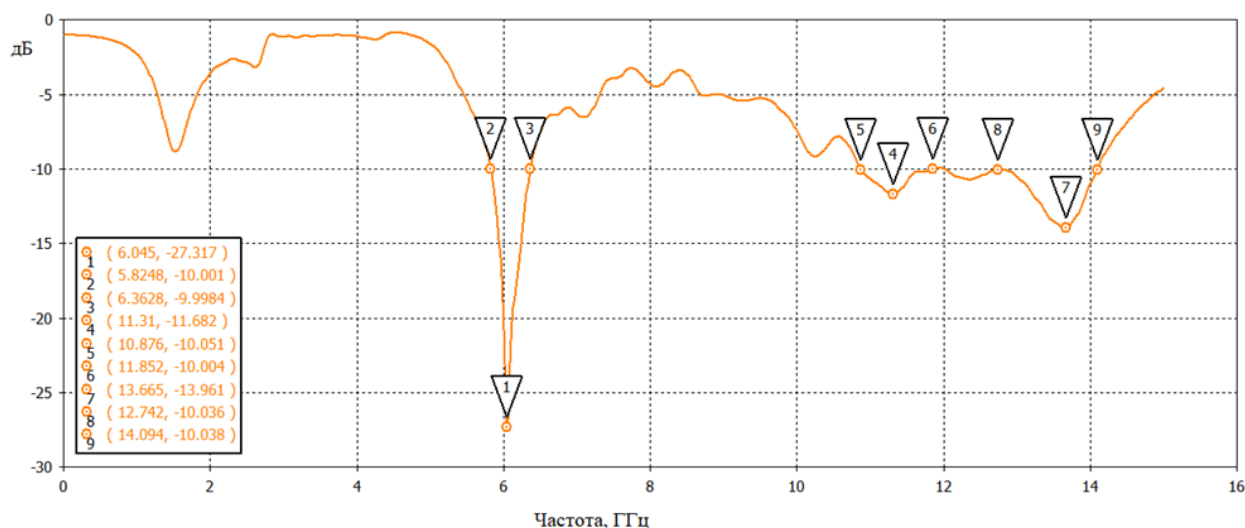


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты.

Данный тип антенны может быть применим в стандарте Wi-Fi 6E, который начинает развиваться в России. Диапазон стандарта полностью перекрывается шириной первой рабочей полосы частот порядка 500 МГц.

Далее произведен анализ структуры с вырезом мета-ячейки в экранирующем слое антенны. Данный метод можно отнести к более частному случаю резонаторов с разрезными кольцами – комплементарному резонатору с разрезными кольцами. Этот несколько иной относительно SRR по принципу функционирования метод отличается возникновением в области разрезных колец отрицательной магнитной, а не электрической компоненты проницаемости у резонансной частоты [12].

На рисунке 4 представлена модель (вид со стороны металлического экрана). График коэффициента отражения представлен на рисунке 5. Размеры вырезаемой ячейки, для сохранения характеристик метаматериала в области рабочей частоты, эквивалентны размерам SRR-ячейки, описанной ранее.

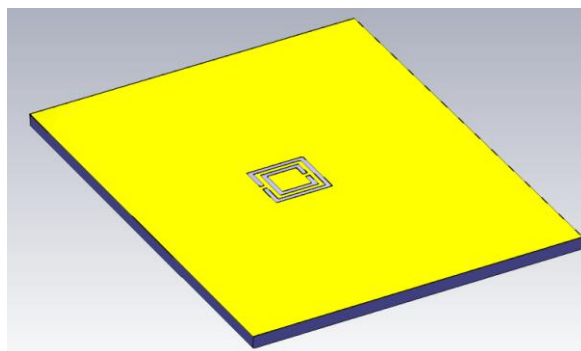


Рис. 4. Модель антенны с вырезом CSRR-ячейки в экране (желтый – слой экрана из меди).

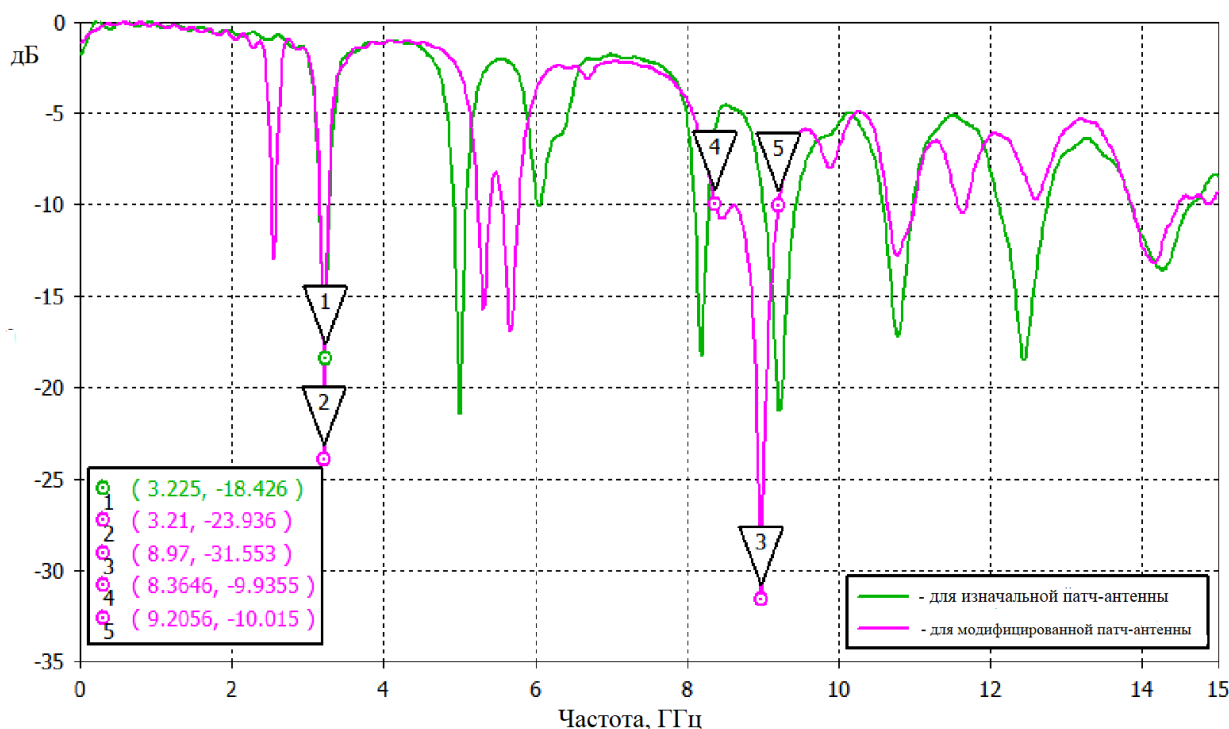


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от частоты для исходного патча (зеленый) и модифицированного ячейкой CSRR (фиолетовый).

Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что интеграция ячейки метаматериала позволила уменьшить значение коэффициента отражения рабочей частоты на 5,5 дБ. Несмотря на то, что до модификации наблюдалось большое количество резонансов на частотах от 5 до 15 ГГц, интеграция ячейки позволила уменьшить коэффициент отражения на частоте 3.2 ГГц, а также привела к появлению резонанса на частоте 9 ГГц с шириной рабочей полосы частот порядка 450 МГц.

Объемная диаграмма направленности для частоты 3.2 ГГц, полученная численными методами в программе CST Software, представлена на рисунке 6. Форма диаграммы близка к всенаправленной, а усиление антенны достигает 6.39 дБ, что говорит об эффективном функционировании структуры.

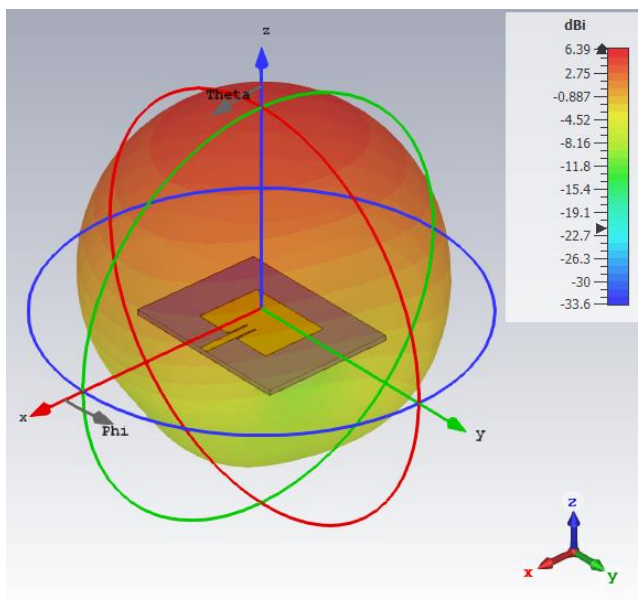


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны с CSRR-ячейкой в металлическом экране.

В следующей модели используются ячейки CSRR на самом патче. Размещение выреза мета-ячейки в центре симметрии излучателя привело к возникновению дополнительных резонансов на частотах 2.5, 3.2 и 5.5 ГГц, график представлен на рисунке 7. Можно отметить широкий диапазон рабочих частот в области 5 ГГц благодаря которому антенна может применяться в существующих Wi-Fi сетях, а, следовательно, в устройствах Интернета вещей.

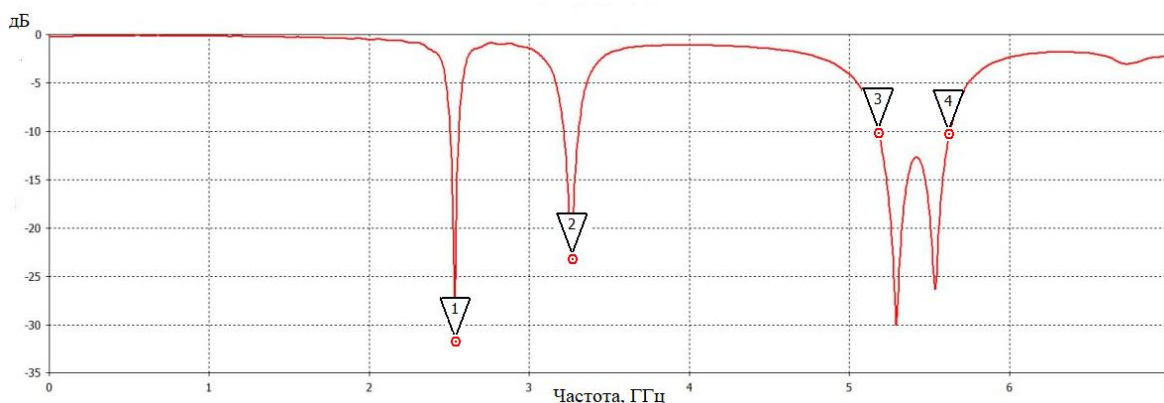


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты антенны с CSRR-вырезом на патче.



Далее исследовалось влияние вырезанной в медном слое экрана системы ячеек (CSRR)  $5 \times 7$  с пропуском двух ячеек в области микрополосковой линии питания. Расстояние между центрами симметрии ячеек равно 8 мм. Внешний вид антенны и график коэффициента отражения представлены на рисунках 8 и 9, соответственно. Для наглядности слой диэлектрической подложки прозрачен.

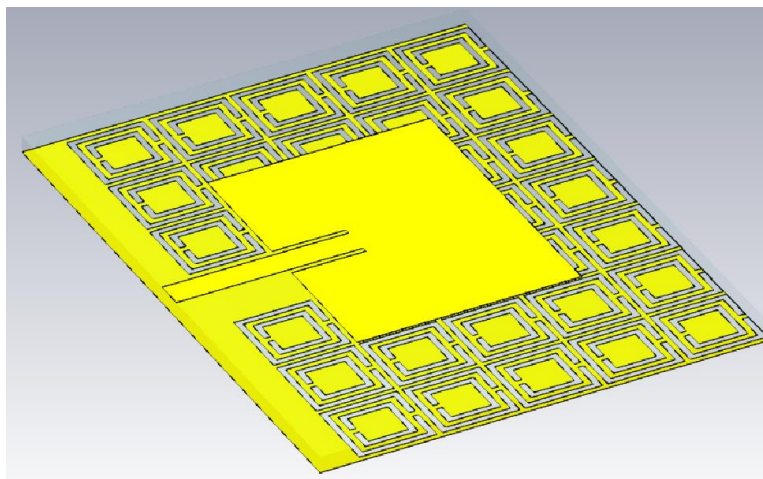


Рис. 8. Модель антенны с вырезом системы из 33 ячеек в экране.

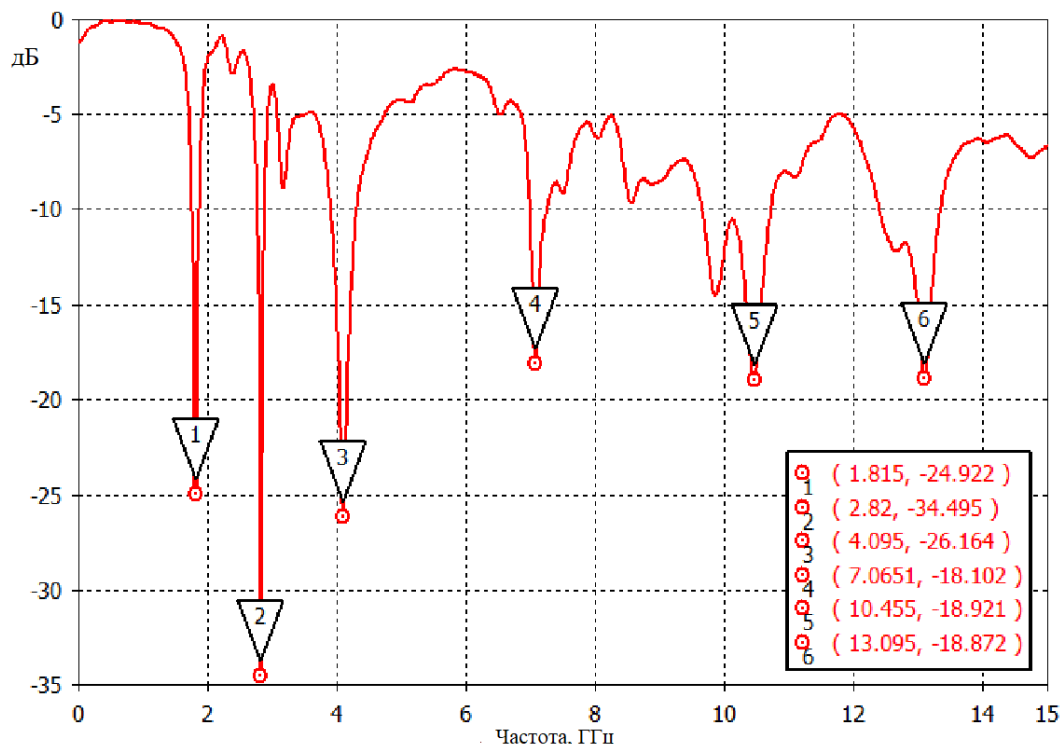


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения от частоты для модели антенны с вырезом системы из 33 ячеек в экране.

Данная модификация позволила получить многодиапазонную антенну с резонансом на частоте 2.82 ГГц. Смещение резонанса в более низкую

частотную область показывает возможность миниатюризации антенны [13], которая связана с перспективами использования структуры в устройствах Интернета вещей (Internet of Things) и других цифровых системах связи.

Следующим вариантом внедрения мета-ячеек являлся комбинированный вариант интеграции нескольких SSRR ячеек в конструкцию диэлектрической подложки и экранирующего слоя. Мета-ячейки располагалась в виде латинской буквы «U» вокруг излучающего патча. С другой стороны патч-антенны в экране по всему периметру «вырезались» SSRR ячейки. Вид со стороны излучающего патча модифицированной антенны показан на рисунке 10, вид со стороны экранирующего слоя показан на рисунке 11.

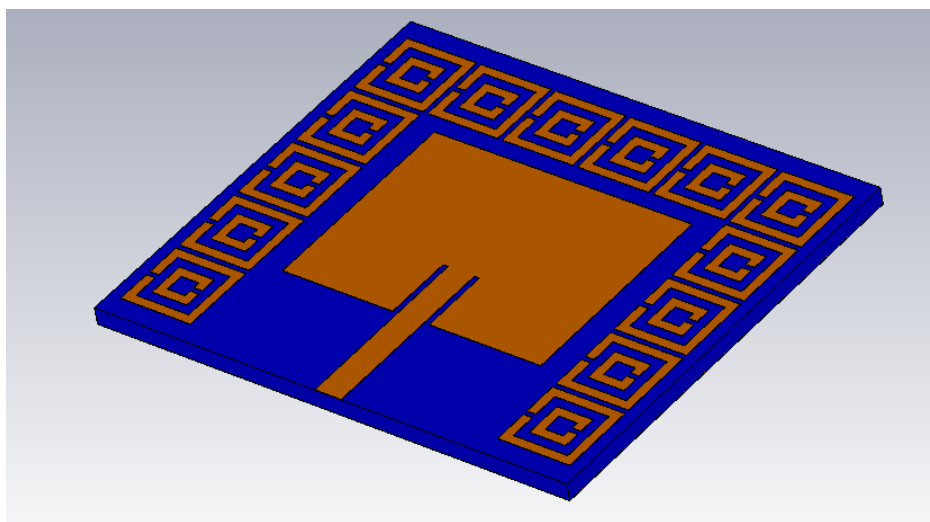


Рис. 10. Модификация патч-антенны (вид спереди).

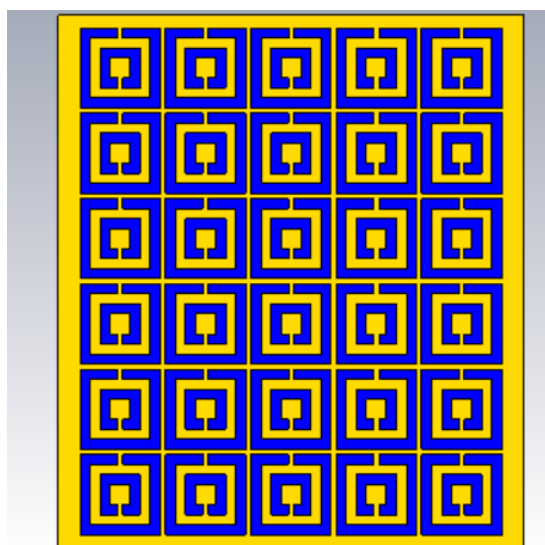


Рис. 11. Модификация патч-антенны (вид со стороны экранирующего слоя).

Результат после интеграции SSRR ячеек в конструкцию патч-антенны выражается на графике зависимости коэффициента отражения от частоты усовершенствованной патч-антенны, совмещенном с графиком зависимости коэффициента отражения от частоты изначальной патч-антенны (рисунок 12).

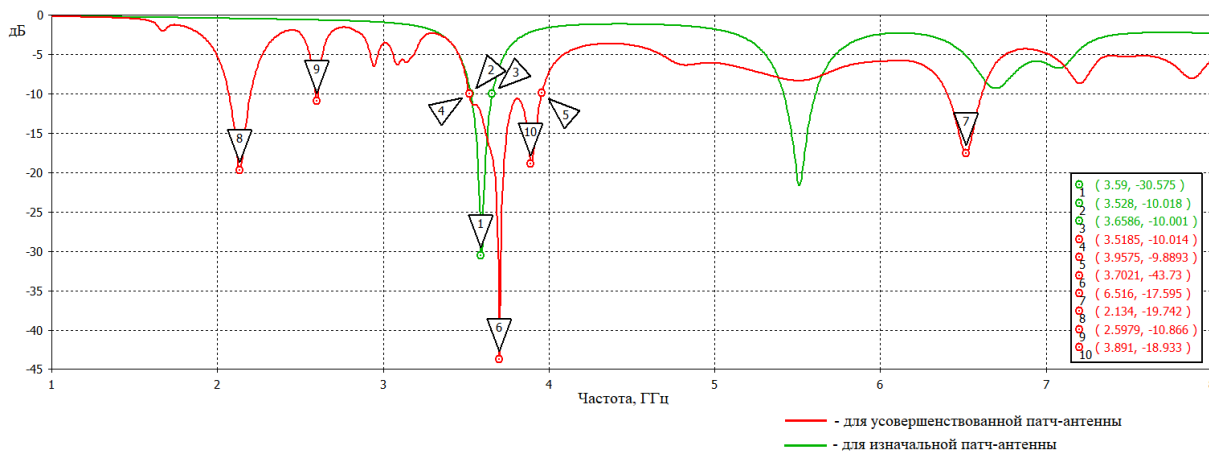


Рис. 12. Зависимость коэффициента отражения от частоты для исходного патча (зеленый) и для модифицированного патча (красный).

Как можно увидеть, при подобном варианте комплексной модификации патч-антенны, удалось добиться появления новых резонансов в области более низких частот, а также резонанса на частоте 6,5 ГГц. Резонанс с рабочей частоты (маркер номер 1) сместился в область более высоких частот (маркер номер 6). Значение коэффициента отражения частоты 3,7 ГГц равно минус 43 дБ. Самым большим достижением использования такого типа комбинированной мета-структуры является расширение рабочей полосы со значения 130 МГц до 440 МГц. Данная полоса рабочих частот практически покрывает принятый за основу диапазон частот 3,4 ГГц – 3,8 ГГц.

## 2. Проведение натурального эксперимента, анализ характеристик физических моделей патч-антенн

В данной части работы проанализированы физические модели патч-антенн, рассчитанных для целевого диапазона частот сотовой связи пятого поколения (5G). Были изготовлены несколько моделей патч-антенн, одна из которых сконструированная для работы на частоте 3,6 ГГц,

вторая – с использованием мета-структур в конструкции диэлектрической подложки и экранирующего слоя. Изготовленная модель патч-антенны, работающей в диапазоне частот 5G показана на рисунке 13.

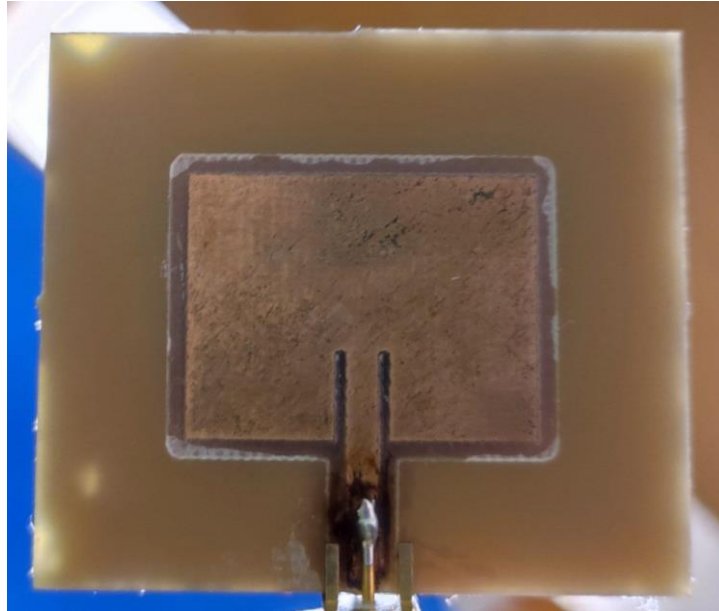


Рис. 13. Физическая модель патч-антенны, работающей в диапазоне 5G.

Анализ зависимости коэффициента отражения от частоты производился при помощи векторного анализатора цепей Keysight P9371A (серийный номер MY57211476).

Начальным этапом проведения эксперимента являлось подключение коаксиального кабеля к векторному анализатору цепей, после чего производилась его калибровка. Затем исследуемая патч-антенна подключалась к коаксиальному кабелю, после чего снимались зависимости коэффициента отражения от частоты. Полученные результаты представлены на рисунке 14.

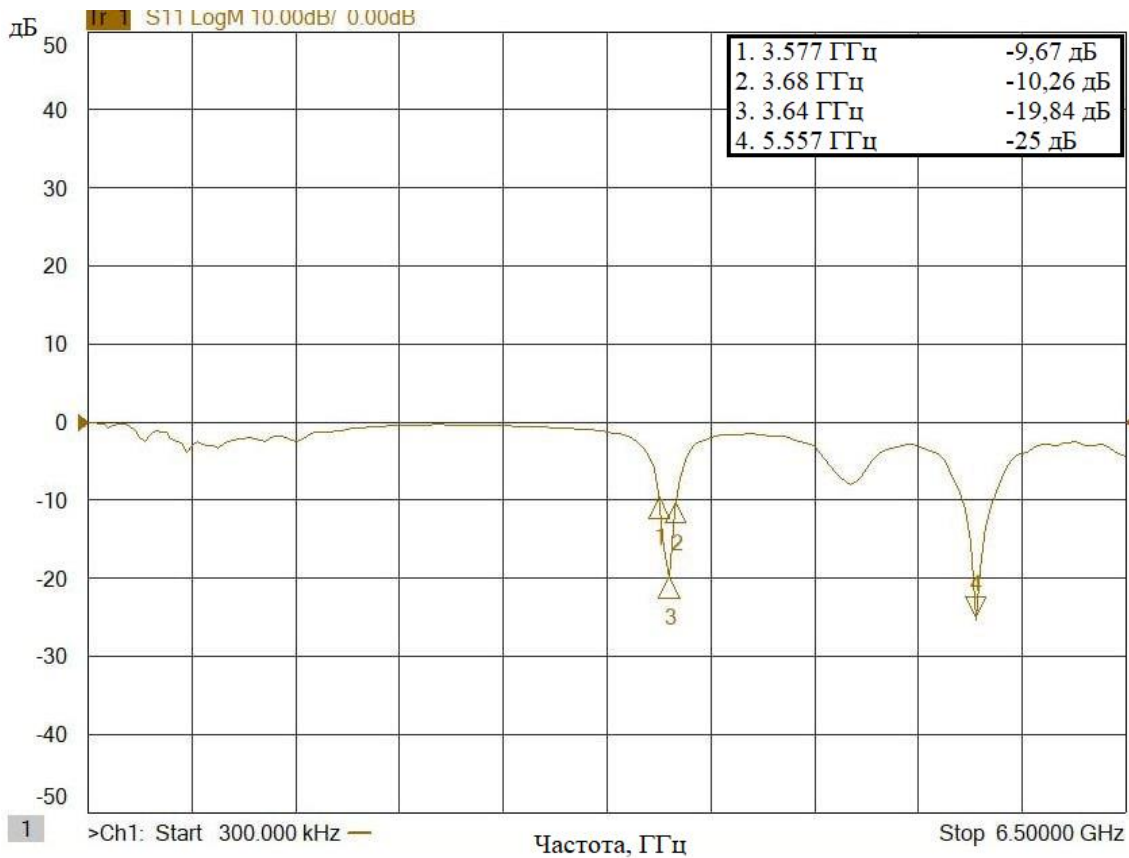


Рис. 14. Зависимость коэффициента отражения от частоты патч-антенны диапазона 5G, снятые при помощи векторного анализатора цепей.

Как можно заметить, имеется резонанс на рабочей частоте 3,6 ГГц, значение коэффициента отражения равно минус 19,84 дБ. Ширина полосы рабочих частот составляет 103 МГц. Данный результат показывает, что изготовленная модель патч-антенны может использоваться для работы в диапазоне частот 5G (3,4-3,8 ГГц).

Следующая изготовленная и проанализированная модель патч-антенны с мета-структурами в конструкции диэлектрической подложки и экранирующего слоя для диапазона 5G (3,4- 3,8 ГГц) показана на рисунках 15 и 16.

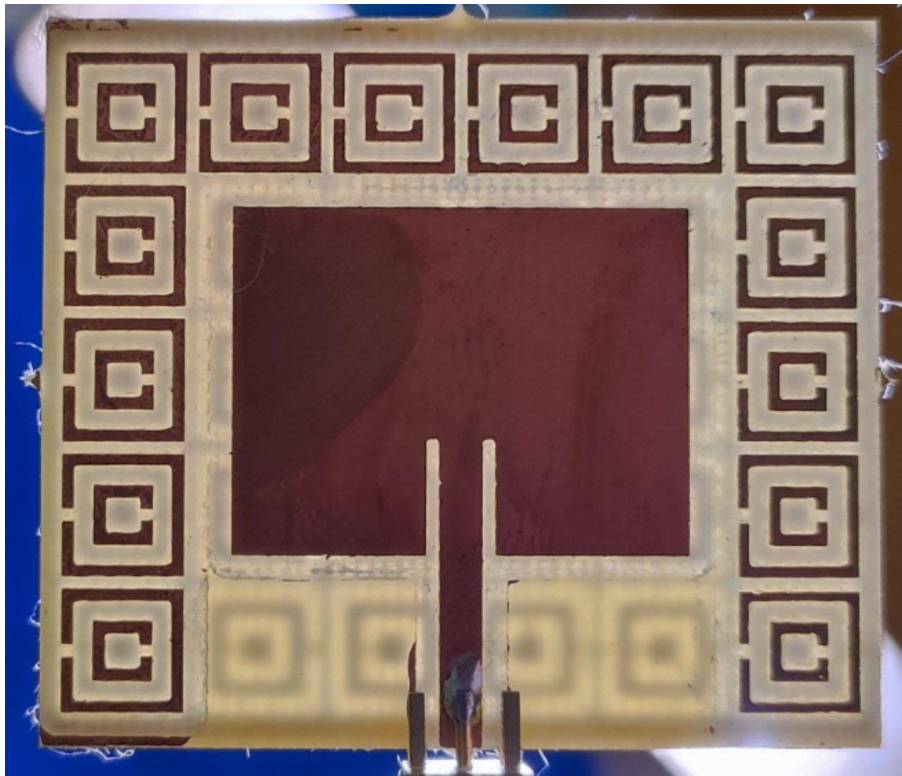


Рис. 15. Физическая модель модифицированной патч-антенны (вид со стороны излучающего патча).

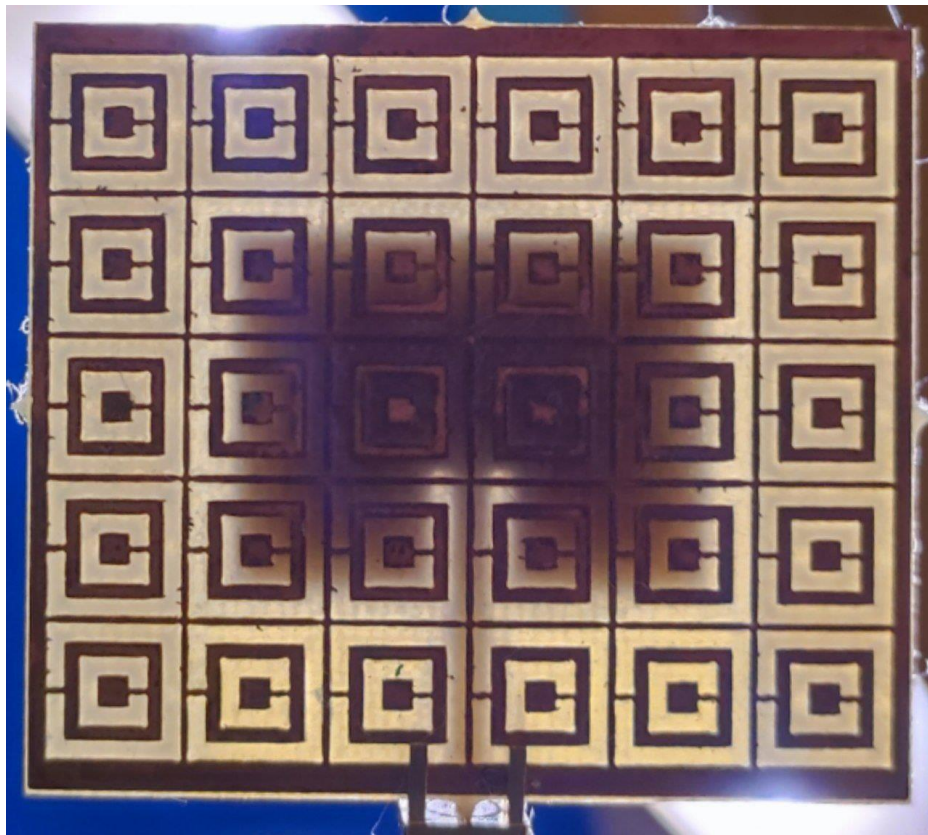


Рис. 16. Физическая модель модифицированной патч-антенны (вид со стороны экранирующего слоя).

Далее проводился анализ модифицированной мета-ячейками патч-антенны при помощи векторного анализатора цепей Keysight P9371A. Исследуемая антенна подключалась по коаксиальному кабелю к векторному анализатору цепей, после чего снимались зависимости коэффициента отражения от частоты. Полученные результаты представлены на рисунке 17.

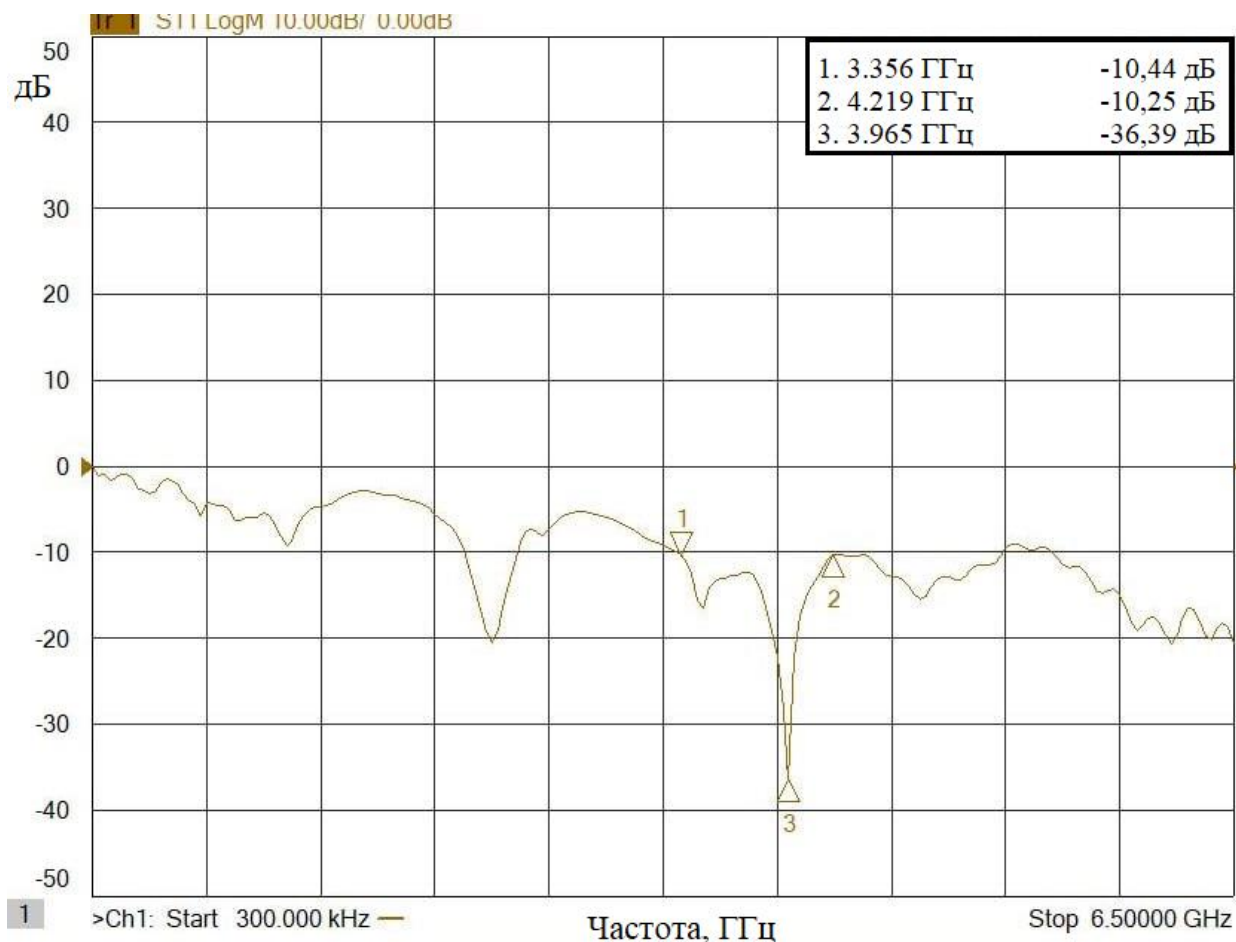


Рис. 17. Зависимость коэффициента отражения от частоты модифицированной патч-антенны, снятые при помощи векторного анализатора цепей.

Полученное на резонансной частоте 3,965 ГГц значение коэффициента отражения равно минус 36,39 дБ. Ширина полосы рабочих частот составляет 860 МГц.

Таким образом, проанализировав физические модели патч-антенн можно сделать вывод о том, что зависимости коэффициента отражения от частоты, измеренные при помощи векторного анализатора цепей Keysight P9371A, совпадают с расчетными характеристиками. Доказано, что при использовании

мета-ячеек в структуре патч-антенны можно добиться расширения полосы рабочих частот, а также усиления резонанса на рабочей частоте.

## **Заключение**

В результате исследования можно сделать вывод о перспективе применения метаматериалов для проектирования многодиапазонных микрополосковых антенн с медными экраном, линией питания и патчем. При использовании систем мета-ячеек можно получить ширину рабочей полосы частот, превышающую 1 ГГц. Кроме того, доказана возможность получения несколько рабочих диапазонов частот с одновременным уменьшением коэффициента отражения на резонансных частотах. Данные исследования позволяют решить задачи миниатюризации микрополосковых антенн при переходе к новым стандартам связи.

Проведен эксперимент, в рамках которого были изготовлены физические модели исследуемой патч-антенны, рассчитанной для работы в диапазоне частот 5G (3,4-3,8 ГГц) и модифицированной мета-структурами патч-антенны. При помощи векторного анализатора цепей были проанализированы зависимости коэффициента отражения от частоты для физических моделей исследуемых антенн, которые в последующем сравнивались с рассчитанным значением коэффициента отражения.

Смоделированные антенны рекомендуются использовать в цифровых системах связи нового поколения.

**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., Мансуров Ю.Н. Влияние геометрических размеров включений из цветных металлов на резонансные свойства устройств СВЧ //Цветные металлы. – 2015. – №. 12. – С. 67-71.  
<https://doi.org/10.17580/tsm.2015.12.13>
2. Стаценко Л.Г., Пуговкина О.А. Использование цветных металлов в конструкции СВЧ-фильтров //Цветные металлы. – 2017. – №. 4. – С. 76-80.  
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.04.11>
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. Ищенко Е.А. и др. Многодиапазонная патч-антенна на основе активного метаматериала. //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18. – №. 3. – С. 113-116.  
<https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.18.3.016>
5. 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>
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. Верзунов С.Н. Способ оптимизации конструктивных параметров ячеек-резонаторов микрополосковых антенн на основе интеллектуального анализа данных //Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – №. 3 (56). – С. 54-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-54-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64)

8. Абдуллин Р.Р. Эффекты применения метаматериала в конструкции волноводов //Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». – Екатеринбург, 2015. – Уральский федеральный университет, 2015. <http://hdl.handle.net/10995/31023>
9. Piyasu A.Y. et al. Wideband frequency reconfigurable metamaterial antenna employing SRR and CSRR for WLAN application //Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS). – 2019. – Т. 15. – №. 3. – С. 1436-1442. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i3.pp1436-1442>
10. Махьюб Х.Е.А., Кисель Н.Н. Исследование характеристик микрополосковой антенны с управляемым метаматериалом //Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2019. – №. 3 (205). – С. 190-198. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2019-3-179-90>
11. Mohammed Berka, Amina Bendaouhdi, Ahmed Yacine Rouabhi, Zoubir Mahdjoub. Investigation of multiband pentagonal antenna based on complementary metamaterial resonator (CSRR) // 6th International conference on advances in mechanical engineering Istanbul 2021, 20-22 October 2021. <https://www.researchgate.net/publication/355668890>
12. Soerbakti Y. et al. Improvement of low-profile microstrip antenna performance by hexagonal-shaped SRR structure with DNG metamaterial characteristic as UWB application //Alexandria Engineering Journal. – 2022. – Т. 61. – №. 6. – С. 4241-4252. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.048>
13. Rambe A.H., Nasution F.A., Sinulingga E.P. Simulation and design of the circular polarization microstrip antenna with CSRR metamaterial structure //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – Т. 2421. – №. 1. – С. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012021>

**Для цитирования:**

Стаценко Л.Г., Смирнова М.М., Север Д.С., Дронин Я.С. Применение метаматериалов в антенных устройствах цифровых систем связи. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.2>.