

На правах рукописи



Алшимайсаве Ихсан Абдлкарем А. Лмунем

РАЗРАБОТКА АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ 5G

Специальность: 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления.

Научный руководитель: **Юханов Юрий Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Габриэльян Дмитрий Давидович**
доктор технических наук, профессор,
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи» (г. Ростов-на-Дону), заместитель начальника научно-технического комплекса по науке

Бобков Николай Иванович
кандидат технических наук, АО «ВНИИ «Градиент» (г. Ростов-на-Дону), главный научный сотрудник научно-технического сектора разработки и испытаний антенно-фидерных устройств

Защита состоится «18» сентября 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1338745/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Отзыв на автореферат (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специальностью, ученого звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail, даты) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.02.07 по адресу: 347922, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Д», а также в формате pdf – на e-mail: ampilipenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.02.07
кандидат технических наук, доцент



А. М. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие систем связи является одним из приоритетных направлений развития в мире. В стратегии развития отрасли связи указывают на необходимость упрощения создания и модернизации сетей связи. Расширение используемого диапазона, требования на скорость передачи данных, ограничения на время задержки формулирует новые требования к надёжности устройств, к обеспечению стабильности параметров при различных условиях эксплуатации и внешних воздействиях, к прочности конструкции. Постоянная модернизация уже существующих устройств с точки зрения улучшения их характеристик и расширения функциональных возможностей требует поиска актуальных конструктивно-технических решений. Повышение эффективности антенных систем и создание новых конструктивных решений для сверхширокополосных антенных систем связи 5G является актуальной задачей. Последовательный переход к системам 5.5G и 6G, обладающих на порядок лучшими характеристиками по сравнению с 5G, также подтверждает актуальность и перспективность проведенных исследований.

Целью работы является разработка антенн для систем 5G и модернизация конструкций антенн 4G до уровня систем 5G.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- провести сравнительный анализ существующих антенн для 4G и 5G систем связи;
- исследовать распределения ближних полей антенн систем связи 4G для выявления источников, влияющих на их характеристики;
- разработать антенны для систем связи 5G с улучшенными характеристиками;
- модифицировать антенны 4G до уровня требований систем связи 5G за счет использования дополнительных конструктивных элементов на основе диэлектрических и радиопоглощающих структур;
- исследовать влияние импедансных структур на характеристики антенн с целью доведения с их помощью параметров антенн 4G до уровня 5G;
- сформулировать рекомендации по использованию диэлектрических, поглощающих и импедансных структур в качестве дополнительных конструктивных элементов антенн, улучшающих их характеристики.

Объектом исследования являются антенные системы для связи 4G, 5G.

Предметом исследования разработка конструкций антенн на основе полноволнового моделирования с использованием специализированных САПР СВЧ.

Методология и методы исследования. Для расчета и исследования характеристик излучения антенн 5-го и 4-го поколений использовалась программа Ansys HFSS (high-frequency structure simulator), представляющая собой программный продукт для трехмерного электродинамического моделирования.

Научная новизна исследования

- разработана электродинамическая модель и предложена новая конструкция антенны для систем связи и проведены её численные исследования, показавшие, что предложенная конструкция обеспечивает улучшенные характеристики в диапазонах волн систем связи 2G - 5G;

- разработана электродинамическая модель и проведены исследования ближних электромагнитных полей широкополосной антенны 2×2 МИМО для систем связи GSM/3G/LTE/5G с целью выявления возможных путей улучшения их характеристик;

- исследованы влияния диэлектрических экранов и радиопоглощающих покрытий и импедансных структур на характеристики излучения антенн;

- предложены конструктивные элементы для антенн 4G на основе диэлектрических призм, радиопоглощающих плоских покрытий и цилиндрических экранов, позволивших улучшить эффективность антенн;

- предложена электродинамическая модель резистивного импедансного покрытия, установленного на поверхности вибратора 2×2 МИМО для систем связи GSM/3G/LTE/5G. Предложены варианты резистивных покрытий на конструктивных элементах антенны 4G, обеспечивающие наилучшие характеристики антенны по КСВН в диапазоне частот систем 5G без ухудшения КУ и эффективности излучения;

- предложенные модернизации антенн 4G обеспечили им характеристики, приемлемые для использования в системах связи 5G.

Теоретическая и практическая значимости работы

Теоретическая значимость работы заключается в том, что получены новые знания о распределениях ближних полей (полей рассеяния, наводимых поверхностных токов) и механизмах взаимодействия близко расположенных антенн.

Предложены новые конфигурации антенн за счет введения дополнительных радиопоглощающих и импедансных конструктивных элементов, позволивших увеличить рабочую полосу и расширить возможность использования антенн 4G для эффективной работы в системах 5G.

Разработаны две новые малогабаритные патч-антенны для работы на частотах 5G на основе ранее разработанных антенн 4G.

Разработана 2×2 МИМО-антенна, имеющая широкую полосу пропускания, включая диапазон 5G и обеспечивающая низкие значения КСВН, на основе конструкции антенны, предназначенной для 4G. Модификация заключалась в использовании в конструкции дополнительных элементов на основе РПМ и импедансных поверхностей.

Разработаны две 2×2 МИМО-антенны, имеющие широкую полосу пропускания, включая диапазон 5G, с уменьшенным значением КСВН, путем использования дополнительных конструктивных элементов на основе РПМ.

Сведения о личном вкладе автора. Все основные результаты, приведённые в диссертационном исследовании, получены автором лично. Разработаны электродинамические модели антенн и их конструктивных элементов на основе диэлектрических, радиопоглощающих и импедансных структур. Проведены

численные исследования их характеристик, сформулированы выводы и даны рекомендации по возможным путям модернизации конструкций антенн, доводя их параметры до уровня систем связи 5G.

Достоверность полученных результатов полученных в работе результатов подтверждается верификацией полученных результатов с отдельными данными из публикаций других авторов, полученных с использованием различных методов, а также совпадением расчётных данных с экспериментальными характеристиками прототипов антенн.

Результаты работы не противоречат полученным и опубликованным ранее в литературе результатам других авторов.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии» по пунктам 2 и 3:

«Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т.д.»;

«Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазированных, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами».

Апробация результатов.

Международная научно-практическая конференция, Технологические инновации и научные открытия, Номер МНК-499, 14 ноября 2024 г.

Международная научно-практическая конференция, Инновации в науке и практике, Номер МНК-506, 10 декабря 2024 г.

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 7 научных работ. Из них в перечне рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для публикации материалов диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора технических наук, опубликовано 3 статьи. В изданиях, реферируемых в базе данных «SCOPUS», опубликована 1 статья. В трудах международных научных конференций опубликовано 3 статьи.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Конструкция двухдиапазонной микрополосковой патч-антенны для устройств связи 5G диапазонов волн 2,3046 – 2,5103 ГГц и 3,1969 – 3,6618 ГГц, результаты численного моделирования.

2. Конструкция трехдиапазонной микрополосковой патч-антенны для устройств связи 5G диапазонов волн 0.4 – 3,4096 ГГц, 43,5 – 64 ГГц и 81 – 95 ГГц; результаты проведенных численных экспериментов и анализа характеристик антенны.

3. Результаты исследований ближних электромагнитных полей ММО-антенн систем связи 4G с целью усовершенствования их характеристик до требований систем 5G.

4. Результаты исследований влияния диэлектрических конструкций и радиопоглощающих материалов на характеристики модернизированной антенны 4G MIMO 2×2 TONGYU. Результаты численного анализа её характеристик излучения, направленных на определение возможности их применения в системах связи 5G.

5. Конструкция модернизированной антенны 4G MIMO 2×2 TONGYU с резистивными импедансными покрытиями на нижних сторонах плеч вибраторов, улучшивших характеристики антенны до уровня систем 5G. Результаты численного анализа характеристик антенны.

6. Результаты анализа ближних полей трехдиапазонной двухэлементной антенной решетки MIMO 2×2.

7. Конструкция модернизированной антенны с включенными конструктивными элементами из РПМ. Результаты численного анализа характеристик антенны.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Полный объём диссертации составляет 144 страниц, включая 192 рисунка и 6 таблиц. Список используемой литературы включает 126 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении в диссертационной работе обосновывается ее актуальность, приведено обоснование научной новизны и научно-практической значимости работы. Определяются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния и перспективных тенденций развития антенных систем для 5G. Исследованы различные виды антенн и подходы, используемые для улучшения параметров и характеристик этой антенны. Особое внимание уделено антеннам, в конструкциях которых используется РПМ с целью улучшения их характеристик.

Рассмотрены различные способы возможного улучшения характеристик антенных систем.

Во второй главе приведены результаты разработки новых конструкций микрополосковых антенн с улучшенными параметрами, пригодными для использования в системах связи 5G. Разработаны электродинамические модели этих антенн и численно исследованы их характеристики.

В первой части этого раздела большая одночастотная полосковая патч-антенна улучшена до меньшей прямоугольной двухдиапазонной (CPW) антенны для приложений 5G, WiMAX, ISM и WLAN. Предлагаемая антенна, показанная на рис. 1, надежна, дешева, легка, проста в изготовлении, имеет две рабочие частоты: частота 2,4 ГГц при $S_{11} = -12$ дБ с полосой пропускания 205,7 МГц, коэффициент усиления = 3,85 (см. рис.2,3) и 3,42 ГГц при $S_{11} = -37$ дБ с полосой пропускания 464,9 МГц и коэффициентом усиления = 3,41 (см. рис. 2 и 4).

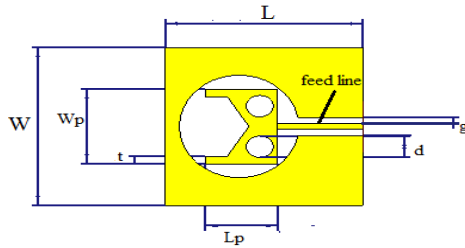


Рисунок 1. Предлагаемая геометрия антенны.

Таблица 1. Геометрические параметры конструкции антенны.

длина подложки	L	71.42 мм
ширина подложки	W	71.89 мм
высота подложки	H	1.6 мм
длина патча	Lp	26.06 мм
ширина патча	Wp	34.14 мм
диаметр отверстий	d	9.80 мм
зазор	g	2.74 мм
ширина края патча	t	3.49 мм
длина подачи	Lf	30.77 мм
ширина подачи	Wf	2.73 мм

Ниже, на рис. 2–5, приведены результаты моделирования, полученные после анализа проекта.

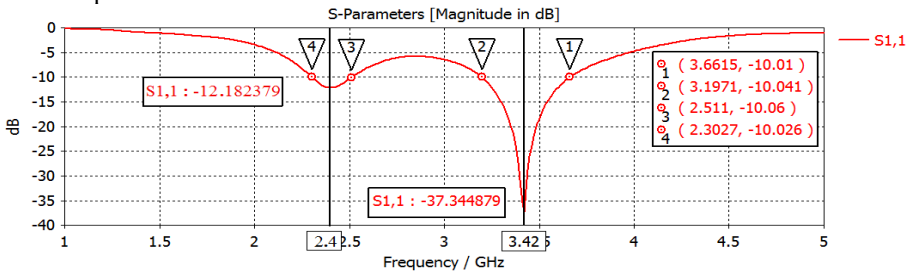


Рисунок 2. Обратные потери (S_{11}) для 2,4 ГГц и 3,42 ГГц.

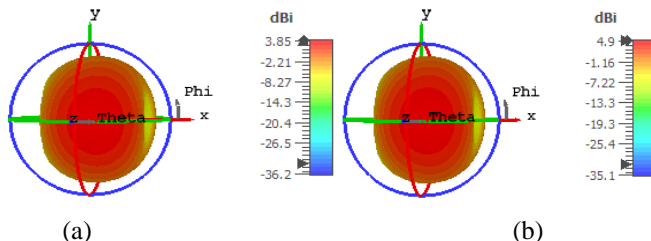


Рисунок 3. Для диапазона 2,4 ГГц (a) и (b) показывают усиление и направленность соответственно в 3D.

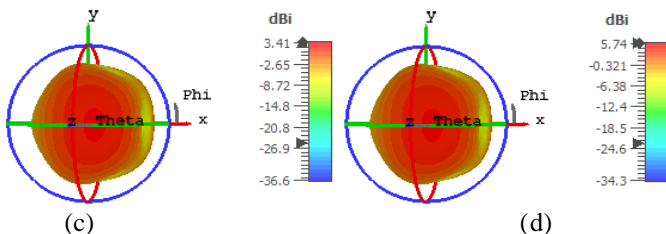


Рисунок 4. Для диапазона 3,42 ГГц (c) и (d) показывают усиление и направленность соответственно в 3D.

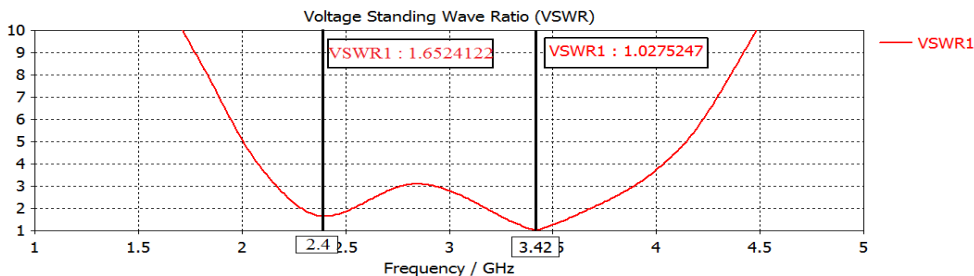


Рисунок 5. Результаты моделирования КСВН на частотах 2,4 ГГц и 3,42 ГГц.

Значения КСВН в зависимости от диапазона частот показаны на рис. 5. КСВН, измеренный на резонансной частоте, составил 1,0275 для частоты 3,42 ГГц, что считается типичным значением, а для частоты 2,4 ГГц он составил 1,6524, что также соответствует желательному двойному значению. -зонные условия ($КСВН \leq 2$).

Во второй части этого раздела представлена маленькая, дешевая и простая конструкция многодиапазонной антенны, в которой предлагаемая конструкция включает в себя микрополосковую патч-антенну с квадратными прорезями и тремя диапазонами ВЧ и миллиметрового диапазона для 5G.

Антенна, показанная на рис. 6, имеет размеры $1,5357 \times 1,5357 \text{ mm}^2$. Сначала расчетные параметры рассчитывались по формулам, а затем моделировались с помощью CST MWS. Результаты моделирования (см. рис. 7) показывают характеристики антенны в диапазоне РЧ от 0.1 до 3,4096 ГГц с коэффициентом усиления 3,29, значением обратных потерь S_{11} и полосой пропускания -13,229644 и 3,4096 ГГц. Разработанная антенна работает в диапазонах миллиметровых волн 43,5-64 ГГц с коэффициентом усиления 3,49, $S_{11} = -42,419084$ и шириной полосы 20,252 ГГц. Антенна также может работать на миллиметровых волнах в диапазоне 81–95 ГГц с $S_{11} = -22,269547$, коэффициентом усиления 4,52 и полосой пропускания 14,085 ГГц.

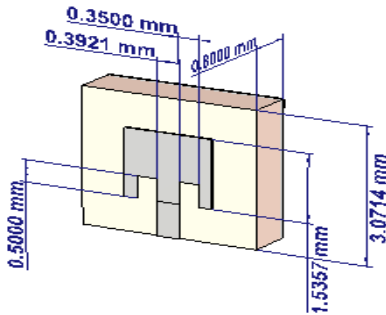


Рисунок 6. Трехмерная принципиальная схема конструкции многодиапазонной небольшой микрополосковой патч-антенны с размерами.

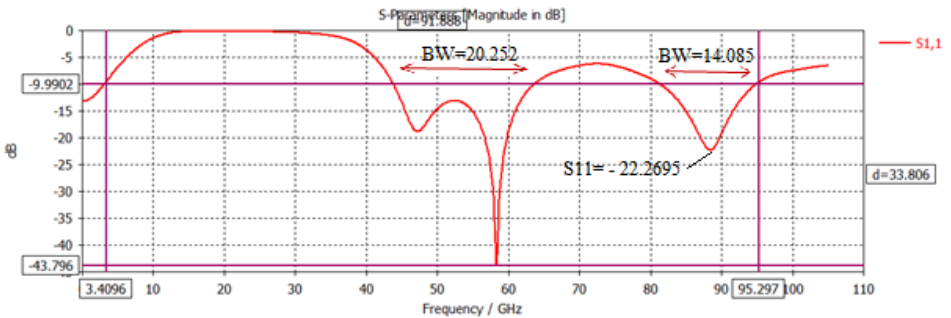


Рисунок 7. Частотная характеристика коэффициента отражения трехдиапазонной микрополосковой патч-антенны.

На рис. 8 приведена частотная характеристика КСВН в диапазоне до 100 ГГц.

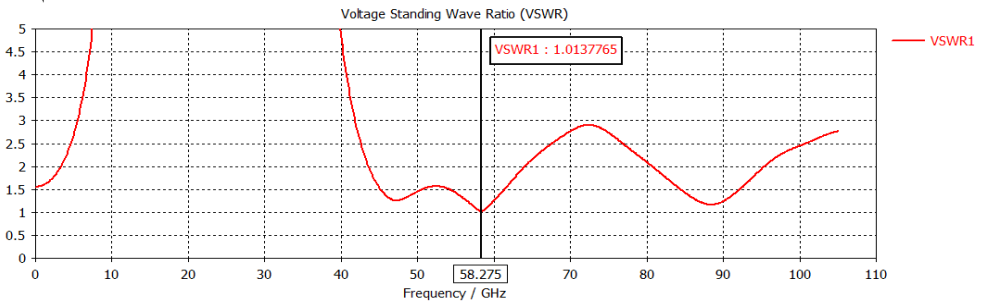


Рисунок 8. Показан КСВН предлагаемой небольшой антенны.

В третьей главе приведены результаты разработки электродинамической модели антенной систем 2×2 ММО для 4G. Для улучшения ее характеристик предложены новые конструктивные элементы в виде диэлектрических и импедансных поверхностей и радиопоглощающих покрытий, позволяющих расширить частотную область применения антенных систем, включая диапазоны

5G систем связи.

В этом разделе первая идея по улучшению заключается в улучшении свойств предварительно спроектированной антенны 4G 2*2 MIMO (см. рис. 9) для ее работы на частотах 5G (3.4-3,8 ГГц) путем изменения конструкции или типа материалов, используемых в конструкции. На рис. 10–11 приведены результаты моделирования в сравнении с исходной антенной частотных зависимостей КСВН и коэффициента усиления антенны. Сплошная кривая – характеристики для модифицированной антенны, а пунктирная – для исходной антенны. Модификация антенны заключалась в замене части штырей на диэлектрические стержни.



Рисунок 9. Прототип антенны MIMO 2×2 (антенна компании TONGYU)

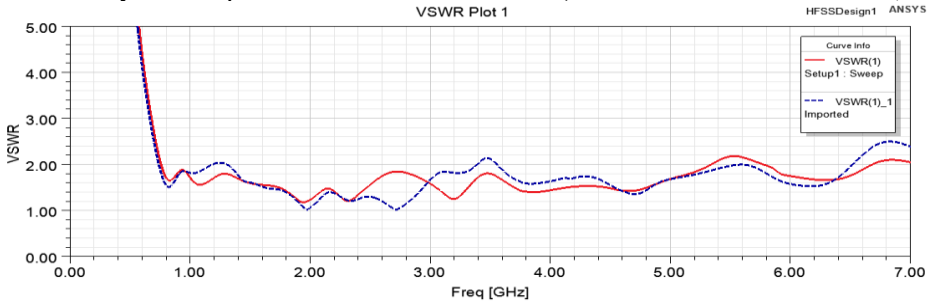


Рисунок 10. Частотная зависимость КСВН исходной и модифицированной антенн.

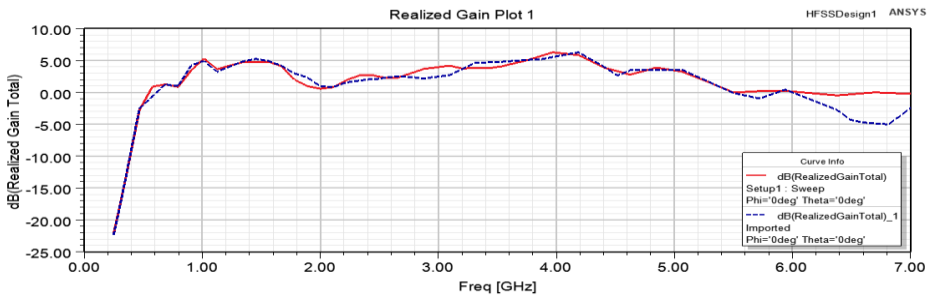


Рисунок 11. Частотная зависимость коэффициента усиления исходной и модифицированной антенны.

Во второй части этого раздела для улучшения параметров антенны (КСВН) и уменьшения воздействия излучения каждого отдельного элемента друг на друга используйте материал, поглощающий излучение (РПМ).

Материал РПМ помещается между двумя активными частями антенны, как

показано на рис. 12, и проводятся различные расчеты для того, чтобы получить наилучшие результаты для параметров антенны.

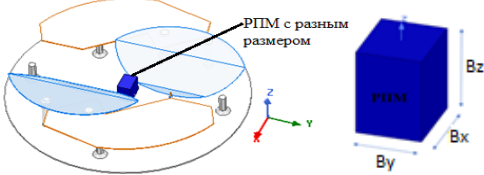


Рисунок 12. Антенна МИМО 2×2 с РПМ.

Первая конструкция антенны с применением РПМ имеет размеры 20 мм как для осей Z, так и для осей Y, с изменением размеров бокса вдоль оси X ($B_x=1-9$ мм с шагом 1 мм).

Вторая оптимизация конструкции антенны проведена с целью получения оптимального значения размеров бокса вдоль оси Z ($B_z=5-40$ мм с шагом 5мм) при использовании РПМ с размерами 14 мм по оси X и 20 мм по оси Y.

Третья конструкция с применением бокса из РПМ, имеющим размеры 14 мм по оси X и 20 мм по оси Z. Здесь менялся размер бокса по оси Y ($B_y=5-150$ мм с шагом 5 мм).

Благодаря моделированию и результатам, полученным, мы пришли к выводу, что наилучшее измерение материала РПМ, включенного в центр антенны между двумя основными частями излучения, составляет 14 мм по оси X, 12 мм по оси Y и 20 мм по оси Z.

Применяя эти измерения (14 мм ось X, 12 мм ось Y, 20 мм ось Z) для РПМ в антенне на рис. 12, мы получим улучшение основных характеристик и параметров антенны, особенно в используемых диапазонах (0,75–0,96, 1,71–2,7, 3,4–3,8) ГГц. Путем добавления РПМ, который поглощает волны и уменьшает их влияние между двумя излучающими частями антенны и, таким образом, улучшает КСВН за счет уменьшения значения с небольшим и незначительным снижением значения усиления, как показано на рис. 13-15. Красные кривые показывают характеристики антенны после добавления материала РПМ, а зеленые кривые показывают характеристики антенны до добавления.

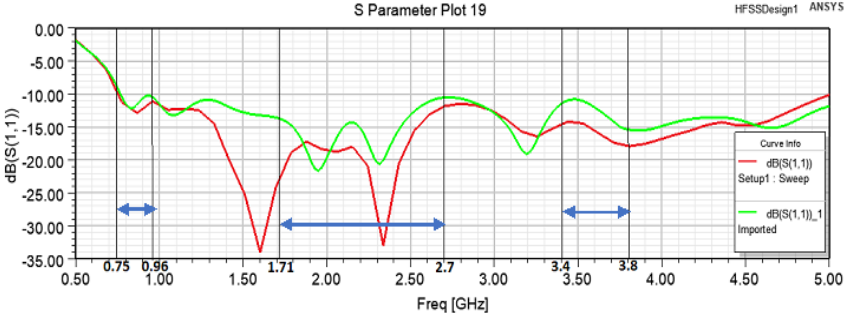


Рисунок 13. Частотная зависимость коэффициента отражения S_{11} .

Для частотного диапазона 0,75–0,96 ГГц для антенны с РПМ максимальное

значение КСВН не превышает 1,75, в то время как антенна без РПМ реализует КСВН 1,9, а коэффициент усиления практически одинаков для обоих случаев антенн. Для частотных диапазонов 1,71–2,7 ГГц и 3,4–3,8 ГГц (соответствует 5 G связи) для антенны с РПМ максимальное значение КСВН не превышает 1,5, а коэффициент усиления не ниже 6дБ и на 1 дБ в среднем ниже, чем для антенны без РПМ. Таким образом, для указанных диапазонов антенна с РПМ реализует меньшее значения КСВН при относительно небольшом снижении коэффициента усиления.

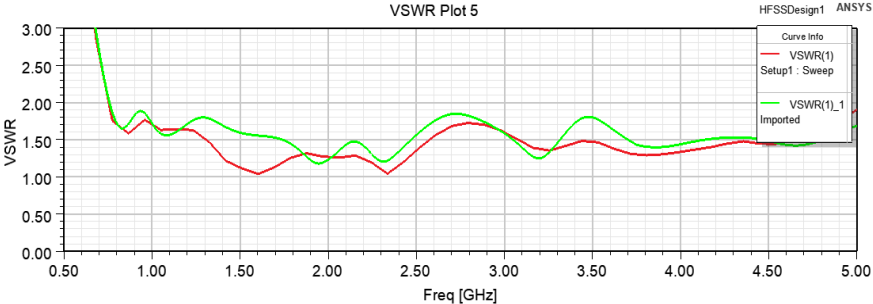


Рисунок 14. Частотная зависимость КСВН.

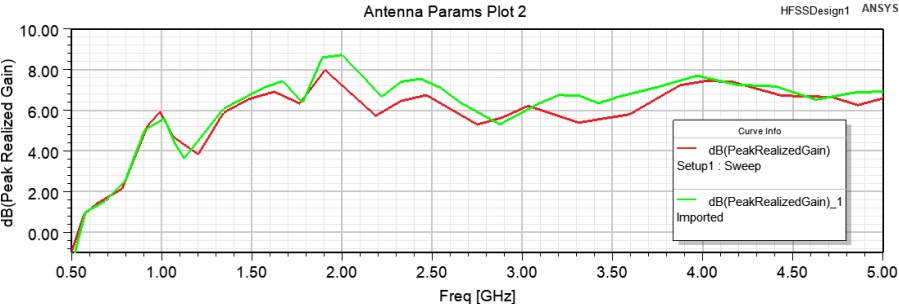


Рисунок 15. Пиковый реализованный коэффициент усиления в зависимости от частоты.

В третьей части третьей главы улучшены характеристики антенны за счет использования импедансных материалов излучателей для улучшения параметров антенны (КСВН) (рис. 16) и уменьшения влияния излучения каждого отдельного элемента друг на друга.

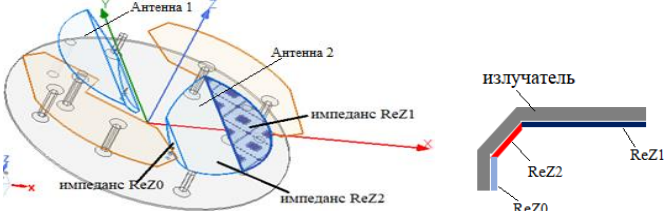


Рисунок 16. Антенна МИМО 2x2, один из излучателей которой выполнен на основе импедансной поверхности.

На рис. 16 приведены пример реализации излучателя (Антенна 2) на основе импедансной поверхности с следующими значениями импедансов: $ReZ_0 = 10, 80, 250, 400$ Ом, $ReZ_1 = 0,01 - 1010$ с шагом 50 Ом, $ReZ_2 = 200, 230$ Ом.

Наилучший результат достигается при значениях импеданса ($ReZ_0=80, ReZ_1=250$ и $ReZ_2= 200$), где максимальное значение КСВН не превышает 1.6 в диапазоне от 0,5 ГГц до 5 ГГц. Для исходной антенны частотная характеристика носит осциллирующий характер, общий уровень КСВН выше, чем для антенны с импедансом, но в диапазоне от 0,7 ГГц до 5 ГГц не превышает 2 (рис.17). Основное преимущество антенны с использованием импеданса безусловно заключается в расширении рабочей полосы частот в нижнюю часть дециметрового диапазона.

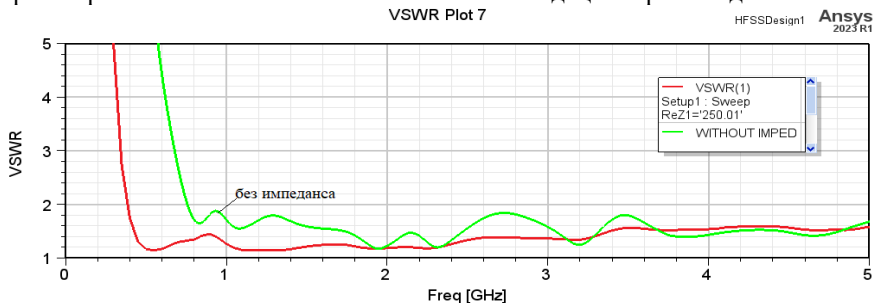


Рисунок 17. Частотная зависимость КСВН для исходной антенны (зеленая кривая) с модифицированной (красная кривая).

Частотная зависимость коэффициента усиления исходной и модифицированной антенн (рис.18) отличаются незначительно.

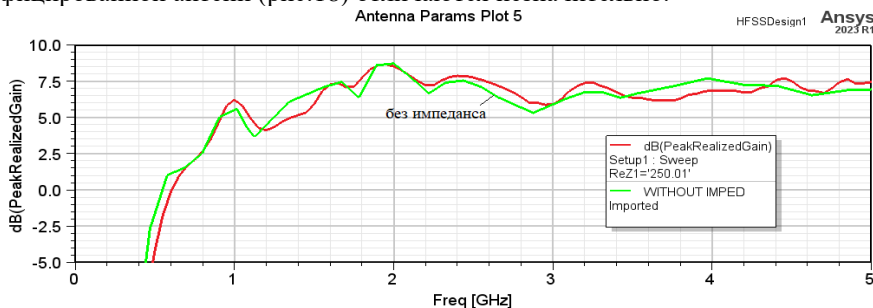


Рисунок 18. Частотная зависимость максимального коэффициента усиления для исходной антенны (зеленая кривая) с модифицированной (красная кривая).

Конструкция антенны с резистансным импедансом на нижней части вибраторов антенны имеет КСВН, меньший 1.5 практически во всей полосе частот от 400 МГц до 5 ГГц на (0-0,7), с расширением рабочей полосы частот в нижнюю сторону на 50%, снизившись с 700МГц до 400 МГц (см. рис. 17), при сохранении высоких значений коэффициента усиления и эффективности излучения. Так при значениях импеданса ($ReZ_0=80, ReZ_1=250, ReZ_2=200$) Ом, уменьшение пикового реализованного КУ модернизированной антенны не превысило 0,8 дБ (см. рис. 18).

В четвёртой главе посвящена разработке электродинамической модели модернизированной двухэлементной антенной решетки 2×2 МИМО пятого поколения. Проведены исследования ближних электромагнитных полей, на основании которого даны рекомендации по использованию дополнительных конструктивных элементов различной конфигурации и размеров, выполненных из РПМ.

В этом разделе для улучшения параметров антенны (рис. 19-а) и уменьшения воздействия излучения каждого отдельного элемента друг на друга используйте поглощающий материал (РПМ).

Проведено исследование влияния РПМ разной толщины, расположенного на платформе (рис. 19-б). Толщина РПМ меняется от 0,1 до 7 мм с шагом 0.5 мм.

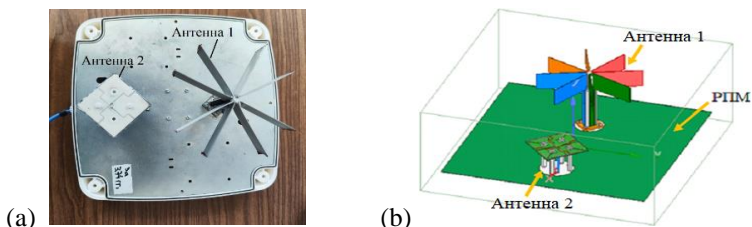


Рисунок 19. а) Исходная антенна (прототип) б) Трехдиапазонная две МИМО-антенны 2x2 с РПМ на общей платформе (Модель 1)

Наилучшее значение КСВН, полученное в диапазоне частот 790–950 МГц при толщине плоского РПМ 5 мм, при этом на частоте 830 МГц значение КСВН достигает 1,08 (рис. 20). В Численном эксперименте считалось, что антенна 1 работает в режиме передачи, а антенна 2 находится в пассивном режиме.

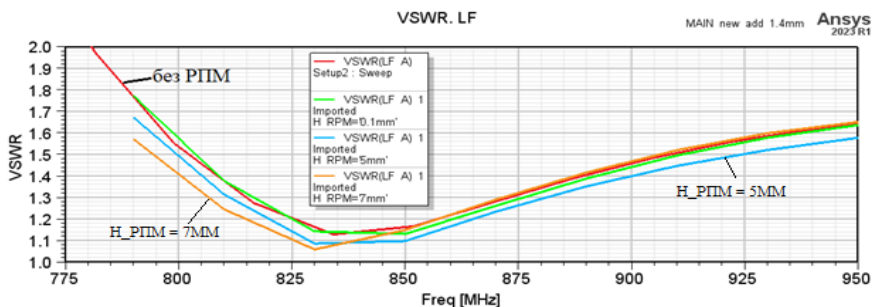


Рисунок 20. Частотная зависимость КСВН при различной толщине плоского РПМ

В диапазоне 1,710 - 2,7 ГГц использование РПМ приводит к снижению КСВН в диапазоне 1,835 – 2,7 ГГц, причем с увеличением толщины РПМ характеристики улучшаются, однако на частотах 1,710 – 1,835 ГГц наблюдается обратная картина, когда КСВН увеличивается, но наибольшие значения не превышают 1,55 (рис.21). При проведении расчетов полагалось, что питание подключено к антенне 2, а антенна 1 находилась в пассивном режиме.

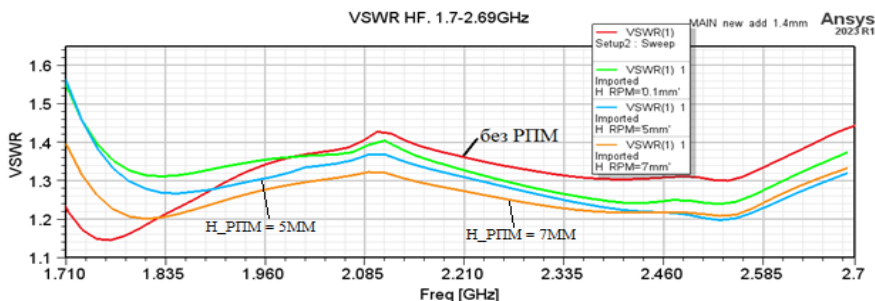


Рисунок 21. Частотная зависимость КСВН

В диапазоне 5G 3,4-3,8 ГГц наблюдается снижение КСВН во всем диапазоне, однако это снижение незначительно и не превышает 6%. Наибольшее значение КСВН фиксируется для случая отсутствия РПМ, равное 1,57, а наименьшее КСВН равно 1,37 толщине плоского покрытия 7 мм (рис.22).

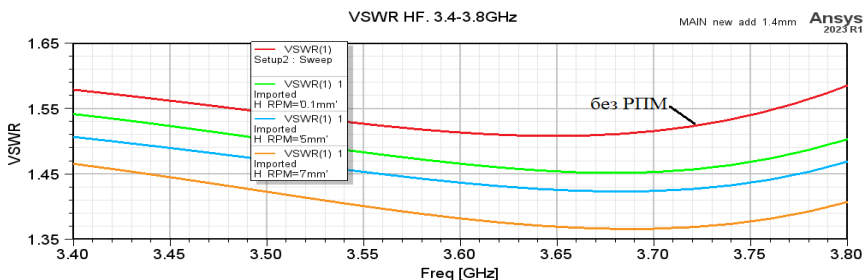


Рисунок 22. Частотная зависимость КСВН

Из полученных результатов отметим, что высота РПМ, равная 5 мм, является наиболее оптимальным значением из исследуемых, при котором обеспечивается уменьшение значений КСВН для всех трех диапазонов 790 – 950 МГц, 1,710 – 2,7 ГГц и 3,4 – 3,8 ГГц.

В данной конструкции материал РПМ размещается вокруг непосредственно крепления антенны 1 и 2, как показано на рис. 23 и представляет собой полые цилиндрические структуры разной высоты от 1 мм – 30 мм с шагом 1 мм.

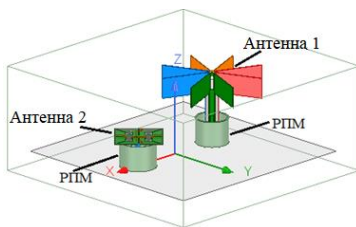


Рисунок 23. Трехдиапазонная две МИМО-антенны 2x2 с РПМ Окружает антенны (Модель 2)

Как видно из рис. 24 РПМ цилиндрической формы вокруг основания антенны 1 практически не влияет на КСВН в диапазоне частот 790–950 МГц.

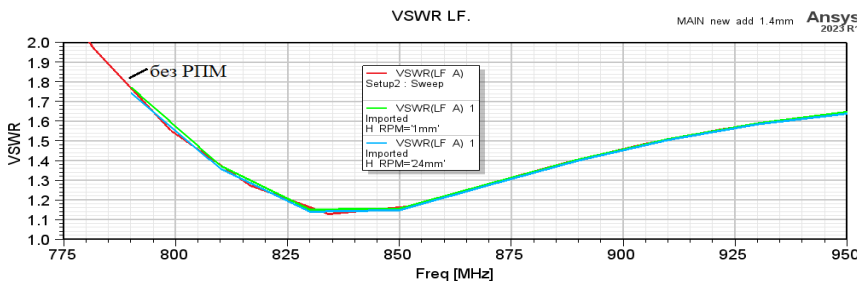


Рисунок 24. Частотная зависимость КСВН антенны 1 (антенна 1 – в режиме передачи, антенна 2 – в пассивном режиме)

В диапазоне частот 1,71 - 2,7 ГГц уже влияние РПМ оказывается более заметным, с 1,71 ГГц до 2,0 ГГц наблюдается увеличение КСВН при использовании РПМ, наибольшее значение фиксируется на частоте 1,71 ГГц КСВН=1,634, в то время как без РПМ КСВН \leq 1,4. Начиная с 2,0 ГГц до 2,7 ГГц наблюдается обратная картина, использование РПМ приводит к снижению КСВН: максимальное значение КСВН при применении РПМ меньше 1,35, а без РПМ 1,44 (рис.25). Следует отметить, что для всех вариантов применения РПМ и без него КСВН \leq 2.

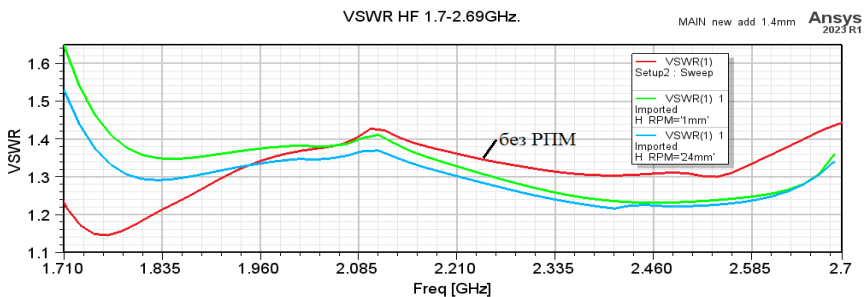


Рисунок 25. Частотная зависимость КСВН антенны 2 (антенна 2 – в режиме передачи, антенна 1 – в пассивном режиме)

В диапазоне частот 3,4 - 3.8 ГГц использование РПМ приводит к небольшому снижению КСВН с 1,57 для случая отсутствия РПМ до 1,45 при высоте цилиндрической РПМ 24 мм (рис. 26).

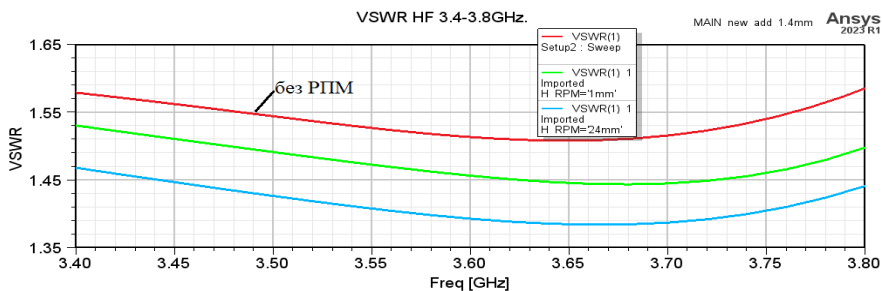


Рисунок 26. Частотная зависимость КСВН антенны 2 (антенна 2 – в режиме передачи, антенна 1 – в пассивном режиме)

В данной конструкции на рис. 27 показано размещение РПМ плоской формы на антенной платформе с толщиной 7 мм и при основаниях антенн цилиндрической формы вокруг каждой из двух антенн. Толщина плоского покрытия фиксируется, а высота цилиндрического меняется с 7 мм до 30 мм с шагом 0.5 мм.

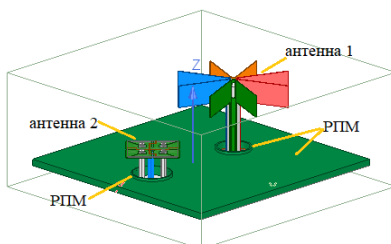


Рисунок 27. Трехдиапазонная две МИМО-антенны 2x2 с РПМ на платформе и окружает антенны (Модель 3)

Наилучшее значение КСВН, равное 1,06, полученное в диапазоне 790–950 МГц при высоте цилиндрического РПМ 22,5 мм на частоте 830 МГц как показано на рис. 28.

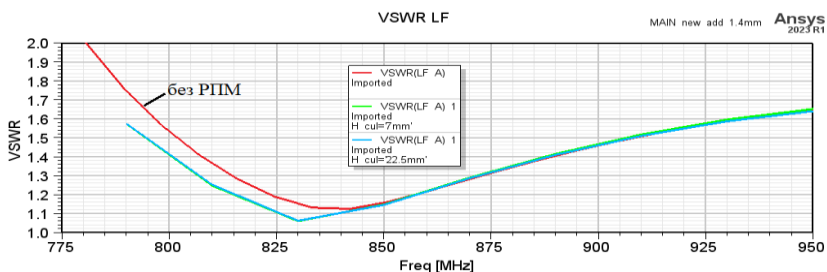


Рисунок 28. Частотная зависимость КСВН (h=22.5мм)

В диапазоне 1,710-2,7 ГГц фиксируется лучшее значение КСВН, равное 1,16 при высоте цилиндрического РПМ 22,5 мм на частоте 1,81 ГГц, как показано на

рис. 29. Расчет выполнялся при работе антенны 2 в активном режиме и антенны 1 в пассивном (рис. 27).

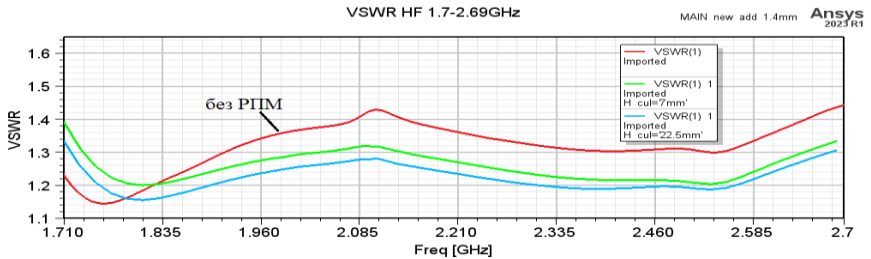


Рисунок 29. Частотная зависимость КСВН

В диапазоне 3,4-3,8 ГГц фиксируется лучшее значение КСВН, равное 1,29 при высоте РПМ 22,5 мм на частоте 3,67 ГГц (рис.30).

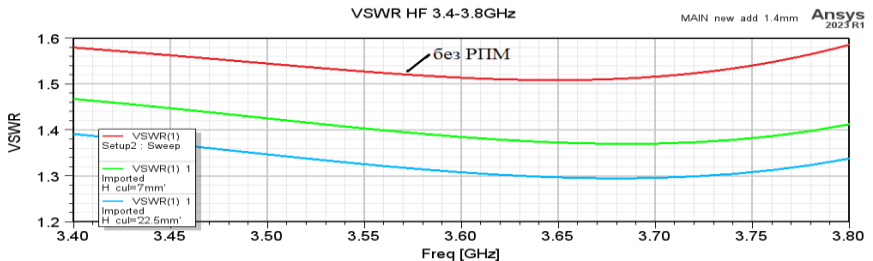


Рисунок 30. Частотная зависимость КСВН

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных в диссертационной работе исследований можно заключить:

- разработана электродинамическая модель и предложена новая конструкция антенны для систем связи и проведены её численные исследования, показавшие, что предложенная конструкция обеспечивает улучшенные характеристики в диапазонах волн систем связи 2G - 5G.
- разработана электродинамическая модель и проведены исследования ближних электромагнитных полей широкополосной антенны 2×2 MIMO для систем связи GSM/3G/LTE/5G с целью выявления возможных путей улучшения их характеристик;
- исследованы влияния диэлектрических экранов и радиопоглощающих покрытий и импедансных структур на характеристики излучения антенн;
- предложены конструктивные элементы для антенн 4G на основе диэлектрических призм, радиопоглощающих плоских покрытий и

цилиндрических экранов, позволивших существенно улучшить эффективность антенн;

- предложена электродинамическая модель резистивного импедансного покрытия, установленного на поверхности вибратора 2×2 ММО для систем связи GSM/3G/LTE/5G. Предложены варианты резистивных покрытий на конструктивных элементах антенны 4G, обеспечивающие наилучшие характеристики антенны по КСВН в диапазоне частот систем 5G без ухудшения КУ и эффективности излучения;
- предложенные модернизации антенн 4G обеспечили им характеристики, приемлемые для использования в системах связи 5G.

Предложенные новые конфигурации антенн за счет введения дополнительных радиопоглощающих и импедансных конструктивных элементов позволили увеличить рабочую полосу и расширить возможность использования антенн 4G для эффективной работы в системах 5G.

Таким образом, антенна после разработки может работать в трех диапазонах частот (0,75–0,96 ГГц), (1,71–2,7 ГГц), (5G: 3,4–3,8 ГГц), включая частоту пятого поколения для связи, вместо работы в двух диапазонах (0,75–0,96 ГГц), (1,71–2,7 ГГц).

Разработаны две новые малогабаритные патч-антенны для работы на частотах 5G на основе ранее разработанных антенн 4G.

У одного имеет компактные размеры $71,42 \times 71,89 \times 1,6$ мм³, двухдиапазонный частотный обеспечивает 2,3046–2,5103 ГГц и 3,1969–3,6618 ГГц. А у другого ширину $1,5357 \times 1,5357$ мм², трехдиапазонный частотный диапазон составляет 0,1–3,4096 ГГц, 43,5–64 ГГц и 81–95 ГГц с поддержкой полосы пропускания 3,3, 20,252 и 14,085 ГГц соответственно.

Разработана 2×2 ММО-антенна, имеющая широкую полосу пропускания, включая диапазон 5G и обеспечивающая низкие значения КСВН, на основе конструкции антенны, предназначенной для 4G. Модификация заключалась в использовании в конструкции дополнительных элементов на основе РПМ и импедансных поверхностей.

Использование РПМ с размером (14 мм - по оси X; 12 мм - по оси Y; 20 мм - по оси Z) привело к снижению КСВН (0,2–0,6), для трех рабочих диапазонов (0,75–0,96 ГГц), (1,71–2,7 ГГц), (3,4–3,8 ГГц). уменьшение реализованного КУ модернизированной антенны не превысило 0,7 дБ.

Использование импеданса на нижней части вибраторов антенны привело к снижению КСВН на (0–0,7) при расширении полосы пропускания на (400 МГц) для начала работы на частоте (400 МГц) вместо (700 МГц), где антенна может работать в диапазонах (0,4–0,96 ГГц), (1,71–2,7 ГГц), (3,4–3,8 ГГц). уменьшение пикового реализованного КУ модернизированной антенны не превысило 0,8 дБ.

Разработаны две 2×2 ММО-антенны, имеющие широкую полосу пропускания, включая диапазон 5G, с уменьшенным значением КСВН, путем использования дополнительных конструктивных элементов на основе РПМ.

Было достигнуто снижение КСВН (0–0,25) при небольшом уменьшении коэффициента усиления (0–1) дБ и снижении КПД (0–15) %. Коэффициент

усиления находится в пределах (2.5-7.5) дБ, а КПД — в пределах (66-90) %, для рабочих диапазонов (790–950) МГц, (1,710-2,7) ГГц, ((3,4-3.8) ГГц.

Для будущей работы планируется продолжить исследования по использованию радиопоглощающих и импедансных покрытий в качестве конструктивных элементов антенн с улучшенными характеристиками настоящих и будущих поколений систем связи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Yukhanov, Yu. V. A 5G dual-band rectangular microstrip antenna with two etches and upper hexagonal end cut CPW fed / Yu. V. Yukhanov, I. A. Alshimaysawe // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 6(230). – P. 206-212. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-206-212 (K2).

2. Alshimaysawe, I. A. Ultra wideband indoor omni-directional 2×2 MIMO antenna for 2G, 3G, 4G, and 5G applications / I. A. Alshimaysawe // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – №. 3(233). – P. 266-274. – DOI 10.18522/2311-3103-2023-3-266-274 (K2).

3. Alshimaysawe, I. A. Optimization omni-directional 2×2 MIMO antenna for indoor 2G, 3G, 4G, and 5G applications / I. A. Alshimaysawe, Yu. V. Yukhanov // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4(240). – С. 181-188. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-181-188 (K2).

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus

4. Al-Khaffaf, D. A. J. Miniaturised tri-band microstrip patch antenna design for radio and millimetre waves of 5G devices / D. A. J. Al-Khaffaf, I. A. Alshimaysawe // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2021. – Vol. 21, №. 3. – С. 1594-1601. – DOI 10.11591/ijeecs.v21.i3.pp1594-1601 (Q3).

Публикации в сборниках трудов конференций

5. Alshimaysawe, I. A. Optimization of VSWR of 5G 2×2 MIMO omnidirectional antenna using radio absorbent material / I. A. Alshimaysawe // Технологические инновации и научные открытия : сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции, 14 ноября 2024 г. – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2024. – С. 24-28. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75096312>.

6. Алшимаисаве, И. А. Оптимизация КСВН для двух антенн ММО 2X2 с использованием радиопоглощающего материала в полу / И. А. Алшимаисаве // Инновации в науке и практике : сборник научных статей по материалам XVI Международной научно-практической конференции, 10 декабря 2024 г. : в 3 ч. Ч. 1. – Уфа: НИЦ Вестник науки, 2024. – С. 51-55. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76090825>.

7. Alrubei, M. A. T. Capacity analysis & performance comparison of SISO, SIMO, MISO & MIMO systems / M. A. T. Alrubei, I. A. Alshimaysawe, A. N. Hassan, A. H. K. Khwayyir // Journal of Physics: Conference Series : Imam Al-Kadhumi International Conference for Modern Applications of Information and Communication Technology (MAICT), 4-5 December 2019, Baghdad, IRAQ. – 2020. – Vol. 1530, No. 1. – Art. No 012077. – DOI 10.1088/1742-6596/1530/1/012077.

Алшимайсава Ихсан Абдлкарем А. Лмунем
РАЗРАБОТКА АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ 5G
Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук

Подписано в печать 06.06.2025 г.
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз.
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № _25_

Отпечатано в отделе полиграфии центра услуг «Караван», ИНН 615400225064
347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 63, тел 8-928-600-8000.