

На правах рукописи



Во Ба Ау

Разработка низкопрофильной антенны систем связи

2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой 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: **Звездина Марина Юрьевна**
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»
(г. Ростов-на-Дону), ведущий научный сотрудник

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 «2» октября 2025 г. в 14:00 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, 21 Ж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1345875/>

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 работы.

В настоящее время технологии играют огромную роль практически на всех этапах жизни, начиная от повседневного общения и заканчивая глобальными промышленными процессами. Развитие междисциплинарных областей науки, таких как микроэлектроника, материаловедение, искусственный интеллект и квантовые вычисления, позволило создать технические решения, которые еще несколько десятилетий назад оказались невозможными. Одной из наиболее развивающихся и перспективных сфер является беспроводная связь, которая за последние 30 лет совершила колоссальный скачок – от аналоговых сетей первого поколения (1G) до сверхскоростного 5G и перспективного 6G.

Особое место в этом прогрессе занимает мобильная связь, ставшая неотъемлемой частью современной инфраструктуры. Внедрение 5G-технологий уже ведется в ведущих странах мира, включая РФ, США, Южную Корею, Швейцарию, Великобританию, Германию и Китай. Эта технология обеспечивает не только беспрецедентную скорость передачи данных (до 20 Гбит/с), но и минимальные задержки (менее 1 мс), что критически важно для таких приложений, как автономные транспортные средства, телемедицина и промышленный Интернет вещей (IoT)¹.

Не менее значимым направлением является развитие спутниковой связи и навигационной системы, особенно в условиях роста спроса на глобальный охват и устойчивость коммуникаций. Такие проекты, как OneWeb, Starlink и российская система "Сфера", показывают главную роль низкоорбитальных аппаратов в обеспечении высокоскоростного доступа в удалённых регионах и поддержки критически важных сервисов. Для навигации используются такие системы, как ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou, ставшие основой позиционирования в транспорте, логистике, геодезии и оборонной сфере. Современные технологии RTK-коррекции и интеграция с 5G открывают новые возможности для точного позиционирования с погрешностью менее 1 см, что особенно востребовано в беспилотных системах и автоматизированной сельхозтехнике².

Стремительное развитие беспроводной связи потребовало создания совершенно новых антенных систем, способных работать в условиях высокой плотности подключений и сложных электромагнитных помех. Антенны являются ключевым элементом любой системы связи, поскольку именно они отвечают за передачу и прием радиосигналов. С точки зрения инженерного проектирования, методы разработки антенн претерпели революционные изменения за последние 30 лет. Если в начальный период развития беспроводной связи антенные системы представляли собой громоздкие конструкции, то сегодня акцент сместился в

¹ Andrews J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S. V., Lozano A., Soong A. C. K., Zhang J. C. What Will 5G Be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32, No. 6. P. 1065–1082.

² Wong K. L., et al. Compact 5G Antennas for Mobile Devices: Design Challenges and Solutions // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2020. Vol. 62, No. 3. P. 45–59.

сторону компактных, низкопрофильных решений, которые можно интегрировать в портативные устройства и системы IoT. Эти антенны нашли применение в самых разных областях – от гражданской радиосвязи до военных систем, устанавливаемых на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) и подвижных наземных платформах.

Исторически концепция низкопрофильных антенн возникла как ответ на необходимость размещения антенных систем в ограниченном пространстве – например, на борту самолетов, кораблей или в компактных мобильных устройствах. Среди первых успешных решений можно выделить: спиральные антенны, которые обеспечивают круговую поляризацию и применяются в спутниковой связи; микрополосковые (патч) антенны, отличающиеся малыми габаритами и возможностью интеграции в печатные платы или планарные антенны с метаматериалами, позволяющие добиться высокой направленности при минимальной толщине.

К концу XX века спрос на низкопрофильные антенны резко вырос благодаря массовому распространению мобильных телефонов, систем навигации и спутниковой связи. Однако требования к антенным системам стали еще жестче: теперь они должны поддерживать многодиапазонный режим работы, обладать высокой энергоэффективностью и быть адаптивными к изменяющимся условиям распространения сигнала. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка: фрактальных антенн, которые за счет геометрии обеспечивают широкополосность; MIMO-систем (Multiple Input Multiple Output), используемых в 5G для увеличения пропускной способности; гибких и носимых антенн, интегрируемых в умную одежду и медицинские датчики³.

Таким образом, разработка низкопрофильных антенных систем остается ключевым направлением в связи с ростом спроса на компактные, высокоскоростные и энергоэффективные беспроводные технологии. Их применение охватывает телекоммуникации, IoT, автомобильную электронику, медицинские устройства и военные системы, что подтверждает высокую актуальность исследований в этой области.

Объект исследования: Антенные устройства для систем связи.

Предмет исследования: Конструкция низкопрофильной антенны для различных видов систем связи.

Цель исследования заключается в разработке и оптимизации конструкций низкопрофильных антенн для применения в современных системах связи с обеспечением широкополосности, высокой эффективности и компактности.

Научная проблема: Разработка низкопрофильной антенны с минимальным размером и заданными техническими параметрами для решения различных задач в системах связи.

³ ITU-R M.2450. Low-Profile Antennas for IMT-2020 (5G) Systems. 2021. 30 p.

Научные задачи:

1. Анализ существующих конструкций низкопрофильных антенн для выявления ключевых параметров, влияющих на их характеристики.
2. Разработка конструкции низкопрофильной антенной решетки сильно связанных диполей круговой поляризации для систем связи.
3. Проведение численного моделирования низкопрофильной антенной решетки сильно связанных диполей круговой поляризации для систем связи.
4. Проведение численного моделирования конструкции элемента антенной решетки для базовой станции прототипа Kathrein 739622.
5. Разработка конструкции элемента низкопрофильной антенной решетки для базовой станции.
6. Проведение численного моделирования конструкции низкопрофильной антенной решетки для базовой станции.
7. Разработка конструкции низкопрофильной плоской широкополосной антенной решетки с модифицированным симметрирующим устройством.
8. Проведение численного моделирования конструкции низкопрофильной плоской широкополосной антенной решетки.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Разработан метод обеспечения широкой полосы пропускания в низкопрофильной антенной решётке с круговой поляризацией на основе структуры сильносвязанных диполей.
2. Предложена новая конструкция симметрирующего устройства, обеспечивающая снижение профиля антенны базовой станции без ухудшения её характеристик.
3. Разработана конструкция низкопрофильной плоской широкополосной антенной решетки с применением модифицированного симметрирующего устройства.

Теоретическая значимость проведенного исследования заключается:

1. Разработан способ увеличения полосы пропускания путем создания емкостной связи между диполями.
2. Предложена конструкция симметрирующего трансформатора, позволяющий снизить высоту профиля антенной решетки для различных систем связи.
3. Исследованы параметры низкопрофильной антенны и оценены предельные возможности по всем параметрам, таким как КСВН, коэффициенту эллиптичности и характеристикам по размерам.

Практическая значимость проведенного исследования заключается:

1. Использование емкостной связи между диполями позволяет расширить полосу пропускания антенны с типичных 5–10% до 96.3% (диапазон 0.7–2.0 ГГц), что делает антенну широкополосной для работы в многодиапазонных системах связи.

2. Оптимизация формы и размеров симметрирующего устройства между диполем и отражателем позволила сократить высоту антенны для базовой станции на 30%.

3. Разработана конструкция низкопрофильной плоской сверхширокополосной антенной решётки с применением модифицированного симметрирующего устройства, которая обеспечивает полосу частот в 2,6 раза шире при уменьшении высоты на 35% по сравнению с прототипом.

4. По результатам разработки низкопрофильной антенной решётки для базовой станции была подана заявка на патент на изобретение.

Метод исследования в диссертационной работе при рассмотрении низкопрофильной антенной решетки для системы связи заключается в применении численного моделирования методом конечных элементов с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS.

Положение, выносимые на защиту:

1. Метод введения ёмкостной связи между диполями позволил расширить рабочую полосу частот (не менее 90% от центральной частоты) антенного элемента.

2. Процесс параметризации формы и габаритов симметрирующего устройства, размещённого между диполем и отражателем позволил существенно снизить высоту конструкции антенны базовой станции до 30%.

3. Модифицированное симметрирующее устройство позволило создать низкопрофильную антенную решетку (высота $0,18\lambda$) с улучшением характеристик излучения (коэффициент перекрытия 4,2:1).

Соответствие паспорту специальности. Направление диссертационной работы заключается в разработке низкопрофильных антенн для систем связи и соответствует пунктам паспорта специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»:

- 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, сканирующих и других, с существенно улучшенными параметрами.

Апробация работы. В процессе диссертационного исследования результаты работы были представлены на следующих конференциях:

2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). 23-25 November 2022, Moscow, Russian Federation.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в решении поставленных задач исследования, создании метода улучшения характеристик низкопрофильной антенны в виде сильносвязанных диполей, и метода создания

низкопрофильности антенной решетки для систем связи. Лично автором исследованы характеристики низкопрофильной антенны круговой поляризации в виде скрещенных диполей и антенны Kathrein 739622 для базовой станции, которая предоставляет нужную основу для конструкции дальнейшей разработанной низкопрофильной антенной решетки. Лично автором предложена и исследована антенная решетка с применением модифицированного симметрирующего устройства, которое позволило создать низкопрофильность антенны. Лично автором и при участии автора подготовлены основные публикации по выполненной работе.

Достоверность полученных результатов в диссертационном исследовании подтверждается:

1. созданием электродинамических моделей антенн, максимально соответствующим физическим моделям.
2. численным моделированием с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS.
3. проведением эксперимента и совпадением результатов численных и экспериментальных данных.

Публикации.

В рамках диссертационной работы опубликованы:

- 2 статьи в журнале "Известия ЮФУ. Технические науки", входящем в перечень ВАК;
- 1 статья в журнале "Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ", входящем в перечень ВАК;
- 1 статья в сборнике трудов 8-й Всероссийской микроволновой конференции (RMC), входящая в базы данных Web of Science и Scopus.

Диссертационная работа содержит 119 страниц текста, 70 рисунков и включает в себя введение, четыре главы, заключение и список литературы из 118 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована ее актуальность, рассмотрено состояние вопроса, сформулированы цели, задачи и методы исследований, научная новизна, вопросы практической ценности работы, представлены основные научные положения, выдвигаемые для защиты.

В первой главе обоснована необходимость разработки низкопрофильных антенн в условиях современной тенденции к миниатюризации устройств связи, особенно для применения в ограниченном пространстве мегаполисов и компактных электронных системах. Особое внимание уделено перспективам создания широкополосных низкопрофильных антенн для систем 5G/6G, IoT, навигационных и спутниковых радиосистем, сочетающих компактность с высокой эффективностью. Проанализированы ключевые ограничения, связанные с уменьшением габаритов антенн: сужение полосы пропускания, снижение

коэффициента усиления и уменьшение эффективности излучения. Рассмотрены существующие конструкции низкопрофильных антенн (дипольные, рамочные, микрополосковые, PIFA, антенны Вивальди), их преимущества и недостатки. Обоснован перспективный подход Мунка, направленный на расширение полосы пропускания за счёт управляемой взаимной связи между элементами антенны, в отличие от традиционных методов, минимизирующих эту связь. Показана важность выбора симметрирующих устройств для разработки широкополосных низкопрофильных антенн для систем связи.

Во второй главе предложена конструкция низкопрофильной антенной решетки сильно связанных диполей круговой поляризации для системы связи. Для обеспечения емкостной связи между элементами антенной решетки (АР) применяются металлические диски, гальванически соединенные с основанием АР. Для улучшения полосы рабочих частот добавлена над диполями верхняя диэлектрическая подложка (суперстрат). Квадратурное возбуждения обеспечивает полоска в форме дуги окружности. Численное исследование данной конструкции проведено на современном программном комплексе по расчету электромагнитных полей ANSYS HFSS [1].

Результаты моделирования показали, что данная конструкция имеет широкую полосу рабочих частот от 0,73 до 1.95 ГГц (2.67:1), малую высоту профиля, простую схему питания по коаксиальной линии без отдельного проводника. На основе предлагаемой конструкции проведено исследование модели конечных антенных решеток из 3×3 , 4×4 , 5×5 и 6×6 элементов. Показано влияние элементов, расположенных на краях, на характеристики антенной решетки. Исследована возможность улучшения характеристик за счёт подсоединения крайних элементов к согласованным нагрузкам.

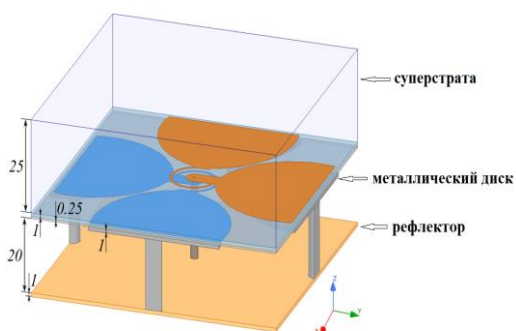


Рис. 1. Общий вид элемента антенной решетки. Диэлектрические материалы показаны полупрозрачными для ясности

На рис. 1 показан общий вид элемента предлагаемой АР. Основной деталью конструкции являются два скрещенных диполя в печатном исполнении. Плечи диполей размещаются на обеих сторонах диэлектрической подложки толщиной 1 мм из материала ФЛАН-2.8.

Для обеспечения ёмкостной связи между элементами АР в конструкцию добавлены металлические диски, гальванически соединённые с основанием при помощи металлических стержней [1,3]. Для изоляции нижнего слоя диполей от емкостных дисков между ними установлен дополнительный слой диэлектрика ФЛАН-2.8 толщиной 0,25 мм.

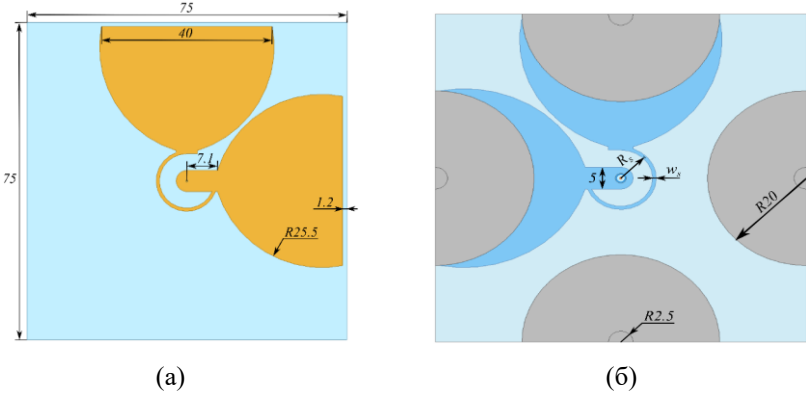


Рис. 2. Элемент антенной решетки. Суперстрат и рефлектор-основание не показаны. (а) Вид сверху. (б) Вид снизу

Квадратурное возбуждение в предлагаемой АР обеспечивается полосками в форме дуги окружности, соединяющими пары ортогонально расположенных плеч на верхнем и нижнем слоях металлизации (см. рис. 2).

Увеличение рабочей полосы частот и параметров излучения антенной решетки было достигнуто за счёт установки диэлектрического слоя из материала Eccostock NiK (с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3.5$ и тангенсом угла потерь $\tan(\delta) = 0.002$) над дипольными элементами.

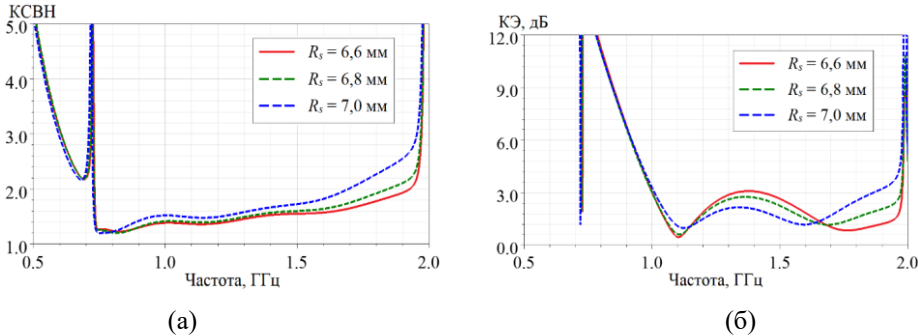


Рис. 3. Влияние радиуса полоски в форме дуги окружности на характеристики антенной решётки. (а) Зависимость КСВН элемента АР от частоты. (б) Зависимость коэффициента эллиптичности от частоты [1]

На графиках 3(а) и 3(б) представлены частотные характеристики КСВН и коэффициента эллиптичности (КЭ) для различных радиусов полосы в конструкции исследуемой низкопрофильной антенной решётки.

Проведённый анализ демонстрирует, что уменьшение радиуса дуги приводит к улучшению параметров согласования и снижению коэффициента эллиптичности в верхней части рабочего диапазона. Однако следует отметить, что такая оптимизация сопровождается некоторым ухудшением круговой поляризации в центральной части частотного диапазона.

На рисунках 4(а) и 4(б) представлены частотные характеристики КСВН и коэффициента эллиптичности для различных значений ширины полосы, осуществляющей квадратурное возбуждение дипольных плеч.

Анализ данных показывает, что: ширина полосы оказывает незначительное влияние на характеристики КСВН, уменьшение ширины полосы позволяет расширить рабочую полосу частот при условии $КЭ < 3$ дБ в верхней части рабочего диапазона

Таким образом, выбор радиуса и ширины полосы, обеспечивающего квадратурное возбуждение плеч диполей, представляет собой компромисс между широкой полосой рабочих частот и лучшим коэффициентом эллиптичности в центре диапазона.

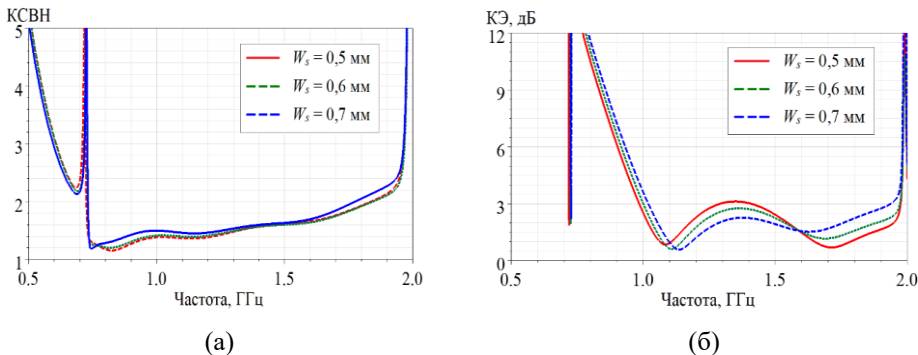


Рис. 4. Влияние ширины полоска в форме дуги окружности на характеристики антенной решетки. (а) Зависимость КСВН элемента АР от частоты. (б) Зависимость КЭ от частоты [1]

На основе предлагаемой конструкции элемента АР были разработаны электродинамические модели АР конечных размеров из 3×3 , 4×4 , 5×5 и 6×6 элементов.

Сравнение коэффициента эллиптичности АР с различным количеством элементов показано на рис. 5. Коэффициент эллиптичности АР конечных размеров ухудшается по сравнению с характеристиками элементарной ячейки. В центральной части рабочего диапазона наблюдается превышение $КЭ > 3$ дБ, что приводит к переходу от круговой к эллиптической поляризации. Данный эффект

обусловлен влиянием крайних элементов на характеристики антенных решёток конечных размеров.

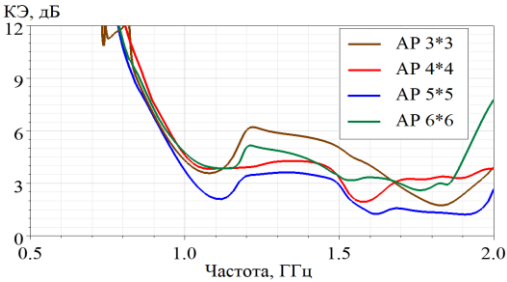


Рис. 5. Коэффициент эллиптичности конечных АР различных размеров

Для проверки того, как влияют крайние элементы на характеристики конечных АР были исследованы 2 конфигурации размером 5x5 и 6x6, при этом возбуждались только центральные ячейки (3x3 и 4x4 соответственно), все крайние элементы были подключены к согласованным нагрузкам.

Рассчитанные значения коэффициента эллиптичности представлены на рис. 6. По сравнению с результатами, показанными на рис. 5, в центральной части рабочего диапазона наблюдается значительное улучшение поляризационных характеристик антенной решётки. Это подтверждает существенное влияние краевых элементов на параметры конечной антенной решётки.

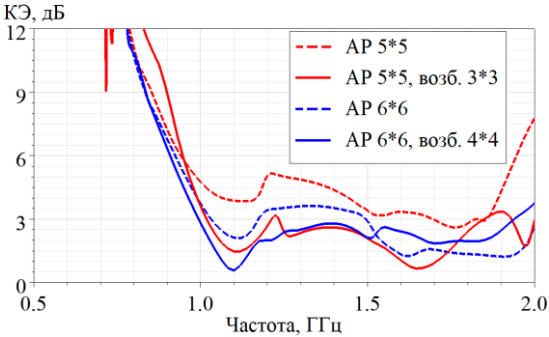


Рис. 6. Коэффициент эллиптичности АР конечных размеров

Результаты численного исследования показывает полосу рабочих частот по уровню КСВН < 3 от 0.7 до 2.0 ГГц (2.85:1), полосу рабочих частот с коэффициентом эллиптичности < 3 дБ от 1 до 1.93 ГГц (1.93:1). Высота профиля разработанной антенной решетки составляет 0,1λ на нижней частоте диапазона рабочих длин волн. Благодаря широкой полосе рабочих частот, малой высоте профиля и простой схеме питания по коаксиальной линии без применения дополнительных проводников и сложных симметрирующих устройств

предложенная конструкция антенной решётки представляет практический интерес для современных систем связи.

В третьей главе предложена конструкция элемента антенной решетки и проведение численного исследования конструкции конечной антенной решетки для базовой станции. Удалось расширить рабочий диапазон частот, снизить высоту и уменьшить размеры антенного элемента благодаря использованию утолщенных вибраторов, применению симметрирующего устройства в форме «Змейка» и размещению диэлектрика с относительной проницаемостью $\epsilon_r = 2$ и тангенсом угла потерь $\tan(\delta) = 0.002$ между диполями и землей [2].

Численное исследование данной конструкции проведено на современном программном комплексе по расчету электромагнитных полей ANSYS HFSS. Результаты моделирования показали, что в исследуемом диапазоне от 0,78 до 0,96 ГГц, который охватывает частоты CDMA и GSM-связи, наблюдается стоячая волна с коэффициентом стоячей волны менее 1,5. В этом частотном диапазоне антенна обеспечивает ширину диаграммы направленности более 65° на уровне -3 дБ в горизонтальной плоскости, а также характеризуется слабым задним излучением в обеих плоскостях. Кроме того, габариты разработанной антенной решётки в 1,5 раза меньше, чем у промышленного аналога (Kathrein 739622), при сохранении требуемых характеристик [2].

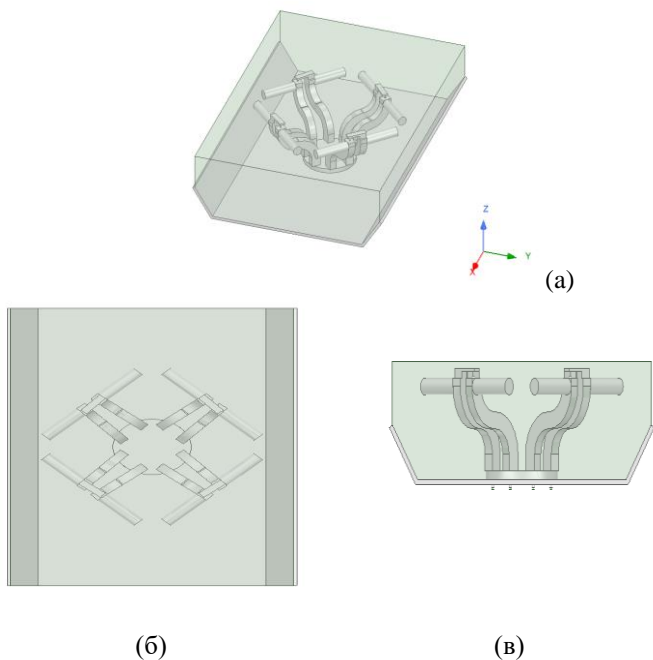


Рис. 7. (а) Конфигурация исследованного антенного элемента базовой станции (б) вид сверху и (в) вид сбоку

Конструкция предлагаемого широкополосного антенного элемента с двойной поляризацией включает три ключевых компонента: квадратную дипольную структуру, симметрирующее устройство в форме «Змейка» и отражатель в виде U-образного металлического экрана (рис. 7).

В отличие от конструкции прототипа - модели Kathrein 739622, в предлагаемой конструкции элемента антенной решетки применены утолщенные излучающие диполи, толщина которых составляет 0,5 см (в 2 раза больше, чем у прототипа - 0,25 см) и новая геометрия симметрирующего устройства в форме «змейка» [2].

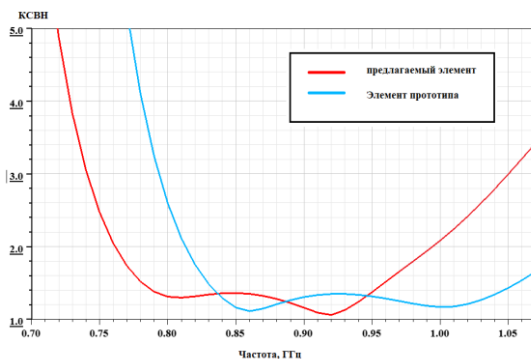


Рис. 8. КСВН элемента антенны

На рис. 8 представлены графики зависимости КСВН от частоты для различных значений радиуса изгиба R_k симметрирующего трансформатора, выполненного в форме "змейки". Анализ данных показывает, что правильно подобранный радиус симметрирующего трансформатора позволяет обеспечить значение КСВН ниже 1,5 в рабочем диапазоне частот 0,78-0,96 ГГц.

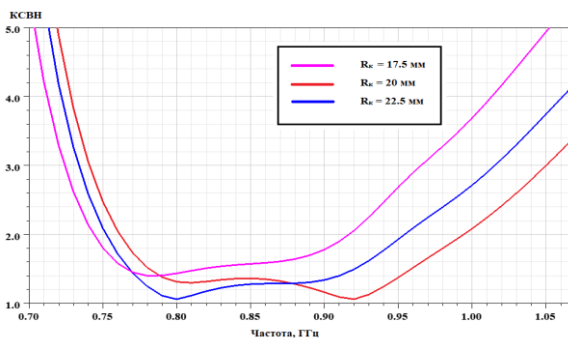


Рис. 9. Влияние формы симметрирующего трансформатора на характеристики элемента антенной решетки. Зависимость КСВН элемента АР от частоты [2]

Увеличение радиуса изгиба улучшает согласование в нижней части рабочего диапазона частот, но приводит к возрастанию КСВН на верхних частотах (рис.9). В то же время, уменьшение радиуса вызывает ухудшение согласования во всей рабочей полосе. Таким образом, геометрические параметры симметрирующего трансформатора оказывают решающее влияние на характеристики антенны

На рис. 10 представлена конструкция антенной решётки для системы базовой станции, реализованная с использованием разработанных излучающих элементов. Стандартная компоновка состоит из четырёх идентичных излучателей, размещённых по вертикали с интервалом, равным длине волны рабочей частоты.

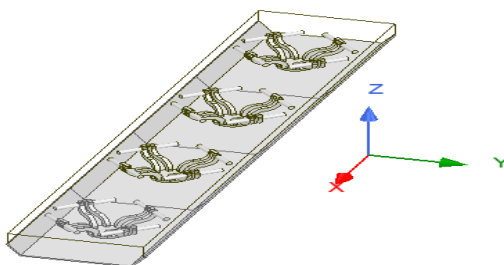


Рис. 10. Геометрия низкопрофильной антенной решетки для базовой станции

На рис. 11 представлены значения коэффициента стоячей волны антенной решётки. Результаты исследований свидетельствуют, что антенная решётка сохраняет коэффициент стоячей волны (КСВ) на уровне $\leq 1,5$ в полосе частот 0,78-0,96 ГГц, что соответствует характеристикам одиночного излучателя.

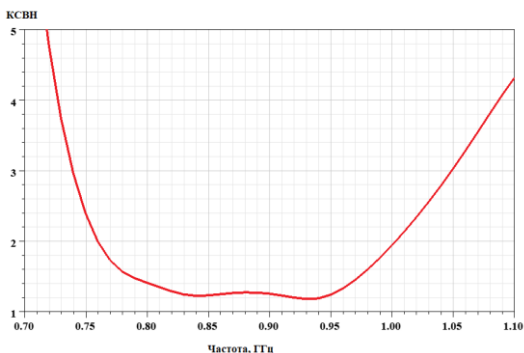


Рис. 11. КСВН низкопрофильной антенной решетки [2]

На рис. 12 показано что, коэффициент усиления антенной решетки составляет 14,5 дБ и так же мало варьируется в диапазоне рабочих частот от 0,78 до 0.96 ГГц.

Данная антенная решетка обеспечивает стабильное усиление во всем диапазоне частот.

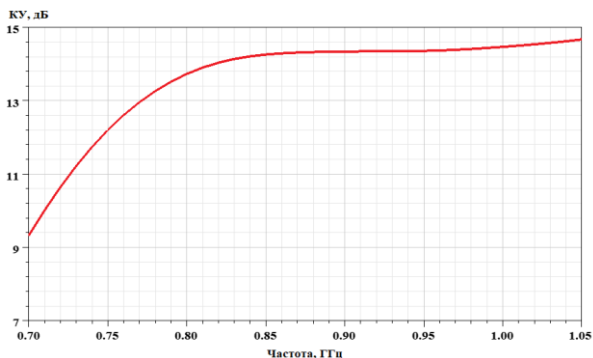


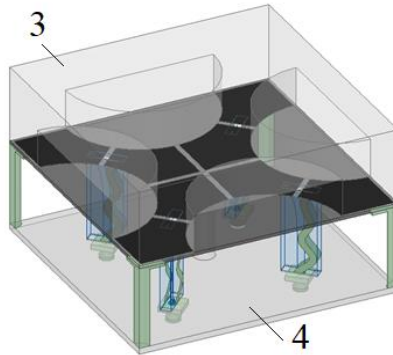
Рис. 12. Коэффициент усиления низкопрофильной антенной решетки

Габариты разработанной антенной решётки в 1,5 раза меньше, чем у промышленного аналога (Kathrein 739622), при сохранении требуемых характеристик. Благодаря компактности, низкому профилю и отсутствию сложных согласующих элементов конструкция представляет практический интерес для применения в системах базовой станции мобильной связи.

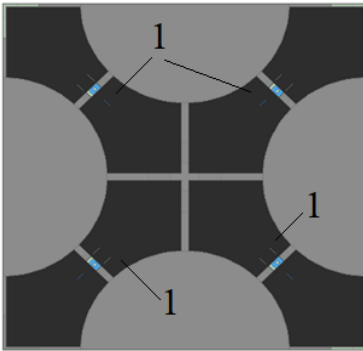
В четвёртой главе предложена конструкция низкопрофильной плоской широкополосной антенной решетки. Проведен анализ недостатков существующих плоских широкополосных антенных решеток и исследование влияния параметров симметрирующих трансформаторов на характеристики антенной решетки. Разработано модифицированное симметрирующее устройство, которое позволило снизить высоту антенной решетки и улучшить частотные характеристики антенны по критерию КСВН менее 2.

Численное исследование данной конструкции и экспериментальное измерение прототипа проведено с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS и прибора ZVA40 - векторный анализатор цепей. Результаты исследований показали, что антенная решетка работает в диапазоне частот от 0,5 до 2,1 ГГц (4,2:1) при условии выполнения критерия КСВН < 2 с низким профилем, высоты которой составляет $0,18\lambda$. Результаты доказали возможность создать низкопрофильность антенны путем применения предложенного симметрирующего устройства.

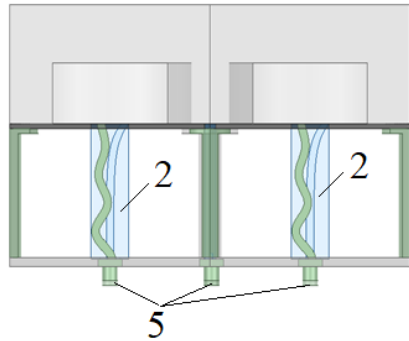
Конструкция элемента антенной решётки-прототипа. На рис. 13(а), (б) и (в) представлены: полный вид, вид сверху и вид сбоку предлагаемого излучающего элемента соответственно. Конструкция предлагаемого низкопрофильного элемента антенной решётки состоит из четырёх скрещённых диполей в печатном исполнении (1) на подложке из стеклотекстолита ($\epsilon_r = 4,4$, $\tan(\delta) = 0,02$), модифицированного симметрирующего устройства (2), диэлектрического слоя над диполями - суперстрата (3) и металлического основания (4) [3].



(a)



(б)



(в)

Рис. 13. (а) Конфигурация исследованного элемента антенной решетки (б) вид сверху и (в) вид сбоку

Симметрирующий трансформатор выполнен в виде симметричной полосковой линии включает центральную проводящую полосу, две экранирующие внешние полоски и диэлектрическую подложку.

В отличие от традиционной конструкции симметрирующего трансформатора прототипа (рис. 14а), в предлагаемом решении (рис. 14б) применены металлические внешние слои в форме затухающего колебания. Это позволяет обеспечить более плавную трансформацию сопротивления. Улучшенное согласование. Форма и геометрические параметры симметрирующего трансформатора оказывают значительное влияние на рабочие характеристики антенны [3].

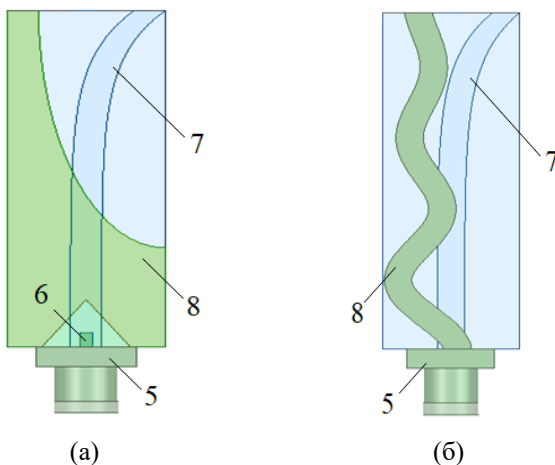


Рис. 14. Конструкция симметрирующего устройство прототипа (а) и предлагаемой антенны (б)

Цифрами на рисунке обозначены: 5 – коаксиальные соединители, 6 – жилы коаксиальных соединителей, 7 – центральная полоска линии передачи, 8 – внешние металлизированные полоски..

На рис. 15 представлены зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) от частоты для различных конфигураций металлических полос симметрирующего устройства при постоянной высоте антенны (0,18λ на верхней частоте). Анализ данных показывает, что использование полосы с профилем затухающих колебаний улучшает согласование и снижает КСВН в рабочем диапазоне частот, однако приводит к уменьшению верхней граничной частоты.

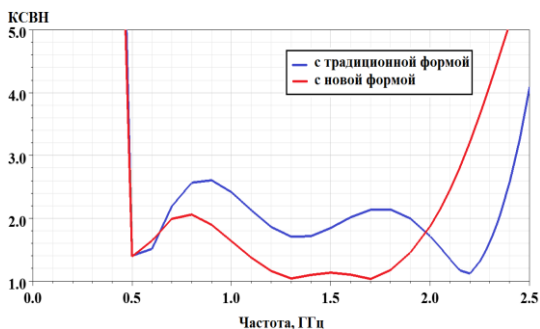


Рис. 15. Влияние формы симметрирующего устройства на характеристики антенной решетки.

Измерение элемента прототипа было проведено для подтверждение результатов моделирования. Сравниваются характеристики измерения и

моделирования прототипа как отдельного излучателя для верификации исходных данных для модели.

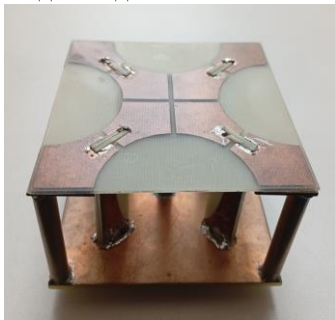


Рис. 16. Макет прототипа и прибор измерения ZVA40

Сравнение характеристики КСВН элемента прототипа и смоделированного элемента прототипа как отдельный излучатель приведено на рис 17.

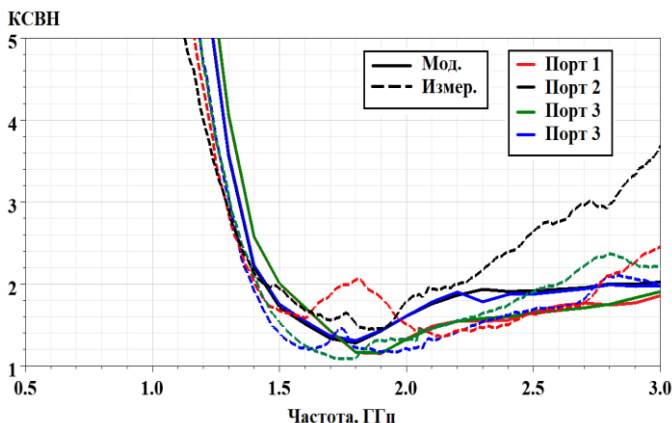


Рис. 17. Зависимость КСВН элемента прототипа и смоделированный элемент прототипа от частоты

На рис. 17 наблюдается совпадение результатов измерения и моделирования что подтверждает:

- Достоверность моделирования прототипа: точность расчёта и исходных параметров для модели элемента антенной решетки.
- качество изготовления прототипа – соответствие его характеристик проектным значениям ($КСВ \leq 2$ в рабочем диапазоне).

Расхождение между измеренным и расчётным КСВ в полосе 1,5–3 ГГц незначительное, что обусловлено погрешностями изготовления прототипа.

На основе исходной модели прототипа было проведено моделирование и проведение характеристики единичного элемента:

- в составе антенной решётки прототипа;

- в составе предлагаемой антенной решётки.

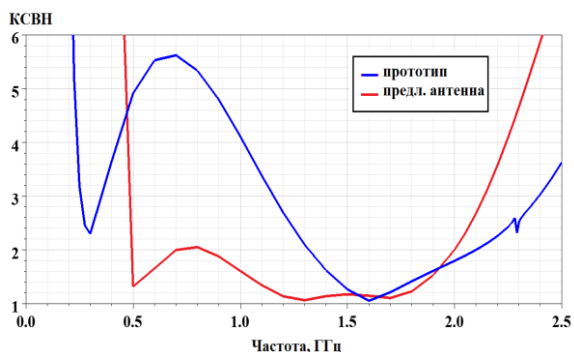


Рис. 18. КСВН элемента антенной решетки прототипа и предлагаемой антенной решетки [3]

На рис. 18 проведено КСВН одной ячейки в составе антенной решетки прототипа и предлагаемой антенной решетки. Видно, что предлагаемая антенная решетка работает на более широкой полосе частот от 0,5 ГГц до 2 ГГц по критерию КСВН менее 2 по сравнению с прототипом. При этом конструкции имеет низкий профиль, ее высота составляет $0,18\lambda$.

В заключении подведены итоги диссертационных исследований, обосновано достижение поставленной цели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен детальный анализ конструкции низкопрофильных антенн круговой поляризации на основе скрещенных диполей, что позволило определить ключевые параметры и принципы их работы. Разработана конструкция низкопрофильной антенны в виде сильно связанных диполей круговой поляризации, обладающая улучшенными характеристиками для применения в современных систем связи. Высота профиля предлагаемой антенной решетки составляет 0,1 длина волны на нижней частоте рабочего диапазона длин волн. Проведено численное моделирование низкопрофильной антенной решетки на основе сильно связанных диполей круговой поляризации, подтвердившее ее эффективность для систем связи. Диапазон рабочих частот для КСВ <3 от 0,7 до 2,0 ГГц (2,83:1). Полоса пропускания по осевому соотношению от 1 до 1,93 ГГц (1,93:1) [1].

2. Выполнено численное моделирование элемента антенной решетки, соответствующего базовой станции прототипа Kathrein 739622, что позволило оценить его характеристики и возможности оптимизации. Проведено численное моделирование конструкции низкопрофильной антенной решетки для базовой станции. Результаты моделирование демонстрируют наличие стоячей волны. соотношение менее 1,5 в диапазоне от 0,8 до 0,96 ГГц, которое охватывает как CDMA и полосы частот мобильной связи GSM. В пределах этой частоты диапазон,

он имеет ширину луча 3дБ более 65° по горизонтали. Кроме того, он может обеспечить низкий уровень излучения заднего лепестка в обеих плоскостях [2].

3. Разработана конструкция низкопрофильной плоской широкополосной антенной решетки с модифицированным симметрирующим устройством, обеспечивающим улучшенные широкополосные характеристики. Уменьшения длины симметрирующего трансформатора за счет придания ему формы затухающего колебания, таким образом уменьшена высота профиля антенны решетки. Проведено численное моделирование конструкции низкопрофильной плоской широкополосной антенной решетки, подтвердившее ее работоспособность и соответствие заданным требованиям. Предложенная конструкция элемента антенной решетки с общим профилем решетки $0,18\lambda$ была смоделирована и исследована в диапазоне частот от 0,5 до 2,1 ГГц (4,2:1) при условии выполнения критерия КСВН <2 [3].

Таким образом, в ходе проведенного исследования были успешно решены все поставленные задачи, т. е. поставленная в диссертационной работе цель достигнута. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы при проектировании антенных систем для базовых станций и других устройств связи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Во, Б. А. Низкопрофильная антенная решетка сильно связанных диполей круговой поляризации / Во Ба Ау, И. Н. Бобков, Ю. В. Юханов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4(240). – С. 188-196. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-188-196 (K2).

2. Во, Б. А. Низкопрофильная антенная решетка для базовой станции / Б. А. Во, Ю. В. Юханов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 1(243). – С. 255-262. – DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-255-262 (K2).

3. Во, Б. А. Низкопрофильная плоская сверхширокополосная антенная решетка / Б. А. Во, Ю. В. Юханов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2025. – Т. 205, № 2. – С. 56-60 (K2).

Публикации в сборниках трудов конференций

4. Vo B. A. Low-Profile Circularly Polarized Tightly Coupled Dipole Array / Vo Ba Au, I. N. Bobkov, Y. V. Yukhanov // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Russia, Moscow, November 23-25, 2022 : Proceedings / Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences. – IEEE, 2022. – P. 207-210. – DOI 10.1109/RMC55984.2022.10079477.

Во Ба Ау
РАЗРАБОТКА НИЗКОПРОФИЛЬНОЙ АНТЕННЫ СИСТЕМ СВЯЗИ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать 24.07.2025 г.
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз.
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 26

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