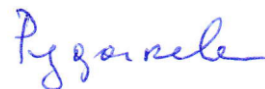


На правах рукописи



Рудаков Вячеслав Андреевич

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ И ДИПЛЕКСЕРЫ
ДЛЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Специальность 1.3.4. Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2026г.

Работа выполнена на кафедре прикладной электродинамики и компьютерного моделирования Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный Федеральный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Мануилов Михаил Борисович

Официальные оппоненты: Таран Владимир Николаевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения», кафедра «Связь на
железнодорожном транспорте», профессор

Звезда Марина Юрьевна,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-
исследовательский институт радиосвязи»
Федеральный научно-производственный центр,
отдел подготовки кадров высшей квалификации,
ведущий научный сотрудник

Защита состоится « 16 » октября 2026 г. в 14.00 час. на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.19 в Южном Федеральном университете по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге , 5, ЮФУ, физфак, ауд. 318.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на официальном сайте:
<https://hub.sfedu.ru/diss/show/1356093/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Отзыв (с указанием ФИО (полностью), ученой степени со специальностью, 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 ЮФУ801.01.19 по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, д.5, физический факультет ЮФУ, а также в формате pdf – на e-mail: ds@sfedu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета
ЮФУ801.01.19



Д.С. Губский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современные телекоммуникационные технологии в процессе своего динамичного развития прошли путь от традиционных голосовых и текстовых сервисов к широкополосной передаче мультимедийных данных, интеграции Интернета вещей (IoT), систем машинного обучения (Edge AI) и широкому распространению облачных решений. Ключевыми технологическими трендами последних лет стали внедрение стандартов мобильной связи пятого поколения (5G) и активная разработка шестого поколения (6G), что предъявляет повышенные требования к функциональности и энергетической эффективности оборудования базовых станций.

Одним из важнейших элементов радиочастотной подсистемы базовой станции мобильной связи являются антенные решётки (АР). Их роль заключается в эффективной передаче и приёме радиоволн заданного диапазона частот в условиях многолучевого распространения, высокой плотности абонентов и сложной электромагнитной обстановки. В современных системах мобильной связи антенны базовых станций должны обеспечивать поддержку двух наклонных линейных поляризаций, широкую полосу пропускания, высокую изоляцию между портами, стабильные диаграммы направленности (ДН) [1, 2], работу в нескольких частотных диапазонах, низкий уровень интермодуляционных искажений [3-5]. При этом конструкции антенн должны быть компактными, низкопрофильными, пригодными для интеграции в многоканальные конфигурации (MIMO), а также обеспечивать электромагнитную совместимость при плотной установке антенн в ограниченном пространстве.

Ключевым направлением исследований и разработок в области антенн базовых станций является расширение рабочего частотного диапазона, достижение стабильных характеристик направленности в заданном диапазоне частот, многолучевой режим работы, высокое согласование и развязка, низкий уровень кросс-поляризации, низкие интермодуляционные искажения.

Одним из перспективных направлений является создание антенных решёток с совмещенной апертурой для многодиапазонной работы на двух линейных наклонных поляризациях [6-8]. При этом возникает ряд технических проблем, в том числе взаимное влияние элементов разных диапазонов, взаимные помехи и искажение диаграмм направленности, что требует поиска новых видов структур и методов развязки. Решение этих задач требует применения различных подходов,

включая применение экранирующих или радиопрозрачных элементов, компенсацию наведённых токов, интеграцию паразитных и фильтрующих элементов, применение диэлектрических структур и метаповерхностей и др.

Наряду с антенными решётками, важнейшими компонентами радиочастотных трактов являются диплексеры, обеспечивающие отдельную передачу и приём сигналов различных диапазонов частот через общую антенну. В современных телекоммуникационных системах наблюдается экспоненциальный рост объема трафика данных, что требует постоянного совершенствования компонентов радиочастотных трактов. Компактность, низкие потери, высокая селективность, развязка и широкая полоса пропускания становятся ключевыми требованиями к диплексерам, используемым в базовых станциях, мобильных устройствах, спутниковых системах и других беспроводных приложениях. В последние годы ведутся интенсивные исследования, направленные на разработку новых конструкций диплексеров с использованием аддитивных технологий, SIW-технологий, многослойных печатных плат, резонансных кольцевых и квазисосредоточенных элементов и др [9-11]. Перспективным направлением является также интеграция диплексеров с антеннами в рамках единого антенного фильтрующего модуля, что позволяет сократить габариты устройств и повысить эффективность использования частотного спектра.

Таким образом, **актуальность** темы данной работы обусловлена необходимостью разработки новых широкополосных, многодиапазонных, двухполяризационных антенных решеток с высоким согласованием и изоляцией, стабильной диаграммой направленности, низким уровнем кроссполяризации и интермодуляционных искажений, а также созданием компактных диплексеров с высокими электрическими характеристиками для базовых станций перспективных систем мобильной связи.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является поиск новых решений в области создания широкополосных двухполяризационных антенных решеток и диплексеров с высокими электродинамическими характеристиками для базовых станций перспективных систем мобильной связи.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- Разработка новых типов АР со стабильной шириной ДН для диапазонов 1710–2170 МГц, 1710–2690 МГц и сектора обслуживания 60°, а также двухдиапазонной АР для диапазонов 690-960 МГц / 1710-2690 МГц и сектора 120°.

- Разработка новой модификации диплексеров на встречно штыревых резонаторах диапазонов 690-862/880-960 МГц, 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц.
- Разработка нового класса диплексеров на основе полосковых линий для диапазонов 698-806 / 885-960 МГц и 1710-1830 /1885-2025 МГц.

Научная новизна

1. Разработана и реализована новая двухполяризационная АР на основе петлевых вибраторов для работы в угловом секторе 60° в диапазоне 1710-2170 МГц (23.6%). Предложен новый метод стабилизации ДН данного типа антенн в горизонтальной плоскости, заключающийся в разбиении вертикальной АР на 3 подрешетки. Данная АР обеспечивает ширину ДН в горизонтальной плоскости по уровню половинной мощности $2\theta_{0.5}=36^\circ\pm 2.3^\circ$, высокие электрические характеристики и более простую конструкцию по сравнению с прототипами.
2. Разработана и реализована новая двухполяризационная АР на основе скрещенных диполей для работы в угловом секторе 60° в диапазоне 1710-2690 МГц (44.5%). Предложен новый метод стабилизации ширины ДН данного класса АР на основе применения несимметричных трехканальных частотно-зависимых делителей мощности (ДМ). Разработан новый 3-канальный частотно-зависимый ДМ на микрополосковых линиях. Ширина ДН АР по уровню половинной мощности составляет $2\theta_{0.5}=36^\circ\pm 4^\circ$ во всем рабочем диапазоне.
3. Разработана новая двухдиапазонная АР на основе печатных петлевых вибраторов и цельнометаллических скрещенных диполей для работы в угловом секторе 120° в диапазонах 690-960 МГц / 1710-2690 МГц на двух наклонных поляризациях $\pm 45^\circ$. Экспериментально подтверждены высокие электродинамические характеристики АР.
4. Предложена новая конструкция диплексеров на встречно-штыревых резонаторах. Экспериментально исследованы диплексеры диапазонов 690-862/880-960 МГц, 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц, подтверждены их высокие характеристики. Диплексеры имеют низкие вносимые потери, компактную настраиваемую конструкцию, низкие интермодуляционные искажения.
5. Предложена новая конструкция диплексеров на симметричных полосковых линиях с заполнением в виде вспененного диэлектрика с $\varepsilon = 1.06$. Реализованы и экспериментально исследованы диплексеры в диапазонах 698-806 / 885-960 МГц и 1710-1830 /1885-2025 МГц. Новизна конструкции определяется использованием четвертьволновых полосковых шлейфов в виде плоской спирали и корпуса сложного поперечного сечения, что обеспечило высокие характеристики диплексеров и компактную технологичную конструкцию.

Практическая значимость

Практическая значимость работы определяется созданными новыми типами антенн для базовых станций диапазонов 1710-2170 МГц, 1710-2690 МГц, включая двухдиапазонную AP 690-960 МГц / 1710-2690 МГц. Все антенны изготовлены, успешно экспериментально протестированы, демонстрируют высокие электродинамические характеристики, имеют технологичную конструкцию и готовы к массовому производству. Предложенные конструкции антенн, а также предложенные методы стабилизации ДН в рабочем диапазоне могут быть применены в других диапазонах частот.

Важный практический результат также состоит в разработанных новых типах диплексеров на встречно-штыревых резонаторах (диапазоны 690-862/880-960 МГц, 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц) и на полосковых линиях (698-806 / 885-960 МГц и 1710-1830 / 1885-2025 МГц). Диплексеры указанных диапазонов успешно изготовлены и их высокие характеристики подтверждены экспериментально. Предложенные конструкции диплексеров могут быть применены в других частотных диапазонах.

Полученные результаты были использованы в разработках компании Guangzhou Sigtenna Technology Co.Ltd. (КНР).

Методы исследования

При проведении исследований использовались современные средства электродинамического моделирования антенн и СВЧ устройств на основе метода конечных элементов, методы синтеза распределительных устройств и диплексеров на основе эквивалентных схем, в т.ч. на основе аппарата матриц связи.

Экспериментальные исследования всех разработанных антенн и диплексеров проводились на современных векторных анализаторах СВЧ цепей (Planar, Keysight) с использованием безэховой камеры.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод формирования стабильной ширины диаграммы направленности двухполяризационных антенных решеток базовых станций мобильной связи, работающих в угловом секторе 60° в полосе частот до 24% (1710-2170 МГц). Разделение раскрыва AP на три подрешетки с одним или двумя элементами в каждом ряду обеспечивает стабильную ширину луча и низкий уровень боковых лепестков при установленном оптимальном соотношении числа рядов средней и двух крайних подрешеток (3/2).

2. Метод стабилизации ширины ДН двухполяризационных антенных решеток базовых станций мобильной связи, работающих в угловом секторе 60° в полосе частот до 45% (1710-2690 МГц). Раскрыв АР, сформированный из трехэлементных подрешеток, возбуждаемых несимметричным частотно-зависимым 3-канальным делителем мощности, обеспечивает стабильную ширину луча и низкий уровень боковых лепестков. Разработана новая конструкция несимметричного частотно-зависимого делителя мощности на микрополосковых линиях.
3. Новая конструкция двухдиапазонной антенной решетки для работы в угловом секторе 120° в базовых станциях мобильной связи диапазона 690-960 МГц / 1710-2690 МГц на двух наклонных поляризациях.
4. Новая широкополосная конструкция диплексеров на встречно-штыревых резонаторах для работы в базовых станциях мобильной связи. Предложенная эффективная комбинированная методика синтеза данного класса диплексеров на основе аппарата матриц связи.
5. Новый класс диплексеров на основе симметричных полосковых линий с близко расположенными рабочими полосами частот и низкими вносимыми потерями. Ключевыми новыми элементами конструкции, обеспечивающими высокую крутизну частотных характеристик, являются высокоомные четвертьволновые шлейфы, реализованные в виде плоской спирали и корпус со сложным сечением.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на международных и всероссийских конференциях:

- 28th International Crimean Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, (CriMiCo-2018), 2018, September 9-15, Sevastopol
- VI Всероссийская Микроволновая Конференция, 28 – 30 ноября 2018 г., Москва,
- Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW-2019), 2019, June 24-28, Divnomorskoe,
- 7th All-Russian Microwave Conference (RMC-2020), Moscow, 2020
- Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2021, Divnomorskoe, 2021,
- Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2023, Divnomorskoe, 2023.

По материалам диссертации опубликована 21 работа, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК для публикации научных результатов по специальности 1.3.4 «Радиофизика», 8 работ индексированы в базах данных Scopus и Web of Science, 9 международных патентов (КНР).

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит разработка электродинамических моделей, исследование и оптимизация параметров антенных решеток разных частотных диапазонов и диплексеров, экспериментальное исследование изготовленных антенных решеток и диплексеров.

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается сравнением полученных теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в результате изготовления и тестирования всех типов исследованных в работе антенных решеток и диплексеров. Проведенное сравнение во всех случаях показывает очень хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, полученных на векторном анализаторе цепей и в безэховой камере.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности 1.3.4. Радиофизика (отрасль науки – физико-математические) по п.3. «Разработка и исследование новых электродинамических систем и устройств формирования и передачи радиосигналов: резонаторов, волноводов, фильтров и антенных систем в радио, оптическом и ИК -диапазоне».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы – 171 страница, включая 85 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы включает 128 наименований, в том числе 21 публикация автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, а также основные результаты, выносимые на защиту. Также отражена апробация работы, личный вклад автора, соответствие паспорту специальности и краткое содержание работы.

В первой главе изложен обзор литературы в области актуальных исследований и разработок, посвященных широкополосным и многодиапазонным антеннам базовых станций мобильной связи LTE/5G, а также диплексерам, применяемым в системах мобильной связи, включая базовые станции.

Во второй главе предложены и исследованы три новых типа антенных систем для базовых станций мобильной связи.

Разработана двухполяризационная АР диапазона 1710-2170 МГц для углового сектора 60° (рис. 1). АР реализована на основе цельнометаллических двухполя-

ризационных излучателей, включающих четыре петлевых вибратора. Ширина ДН одиночного излучателя по уровню -10 дБ составляет 120° , поэтому для того, чтобы сузить ДН в горизонтальной плоскости, можно использовать АР, у которой каждый горизонтальный ряд содержит два излучателя. При этом необходимо контролировать частотную зависимость ширины ДН, уровень боковых лепестков (УБЛ), изоляцию. Была исследована АР 2×10 элементов. Анализ показал, что ширина ДН имеет существенную частотную зависимость, а УБЛ велик в верхней части рабочего диапазона.

Предложено физическое решение, позволяющее не только стабилизировать ширину луча, но и уменьшить количество излучателей и делителей мощности по сравнению с известными ранее конструкциями, а также значительно уменьшить уровень кроссполяризационного излучения в секторе 60° . Новизна предложенного решения заключается в том, что АР разделяется на 3 подрешетки (рис. 1,б). В верхней и нижней подрешетках АР в каждом ряду установлен только один излучатель. Роль одиночных излучателей заключается в том, чтобы уменьшить боковые лепестки, создаваемые парами излучателей. Частотная зависимость ширины луча всей антенной решетки также уменьшается, потому что ширина луча одиночных излучателей зависит от частоты гораздо меньше, чем ширина луча пары излучателей. Установлено, что оптимальное соотношение количества рядов в средней и крайних подрешетках равно $3/2$.

Ширина металлического экрана и высота изогнутых вверх боковых стенок выбраны так, чтобы обеспечить по уровню половинной мощности луч шириной менее 38.5° на самой нижней частоте 1710 МГц и снизить уровень боковых лепестков на верхней частоте 2170 МГц. Вдоль одиночных излучателей помещены дополнительные боковые стенки, наклонённые на 45° к плоскости экрана, которые уменьшают уровень боковых лепестков и улучшают кросс-поляризацию.

Антенна успешно изготовлена и экспериментально исследована, расчетные и экспериментальные ДН приведены на рис. 2. АР обеспечивает ширину ДН в горизонтальной плоскости по уровню половинной мощности $2\theta_{0.5} = 36^\circ \pm 2.3^\circ$ и высокие характеристики: коэффициент усиления более 20 дБ, низкий уровень боковых лепестков -20 дБ, коэффициент отражения по входам -18.5 дБ, поляризационная развязка не хуже -30 дБ, уровень интермодуляционных искажений около -107 дБм, уровень кроссполяризационного компонента в секторе 60° менее -22 дБ. На рис. 1,в приведено фото АР, формирующей два луча в секторе 120° .

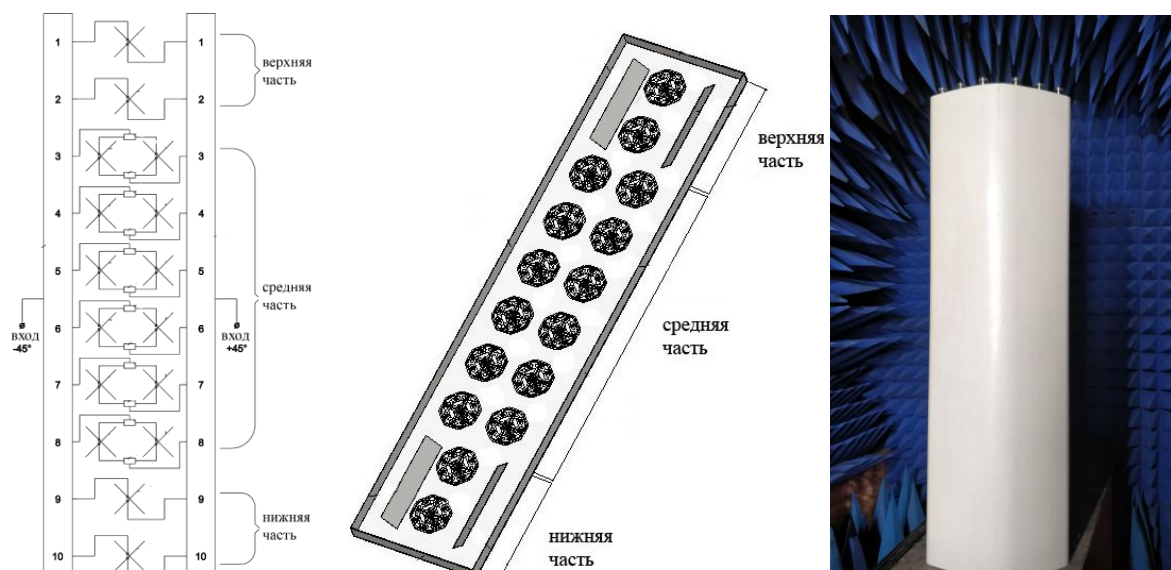


Рис. 1. Антенная решетка диапазона 1710-2170 МГц:
(а) электрическая схема, (б) 3D модель, (в) фото двухлучевой АР с обтекателем.

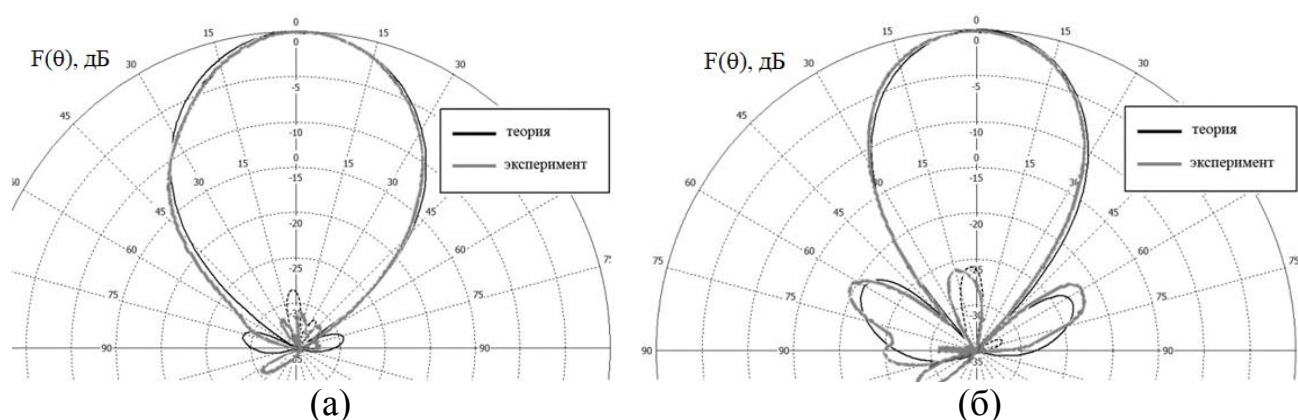


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические диаграммы направленности на частотах 1710 МГц (а) и 2170 МГц (б)

Разработан новый класс двухполяризационных антенных решеток для работы в расширенном диапазоне частот 1710-2690 МГц (44.5%) в угловом секторе 60° (рис. 3). Исследованная АР реализована на основе цельнометаллических скрещенных диполей, которые имеют улучшенные диапазонные свойства, благодаря сильному электромагнитному взаимодействию.

Предложена новая концепция построения раскрыва широкополосной двухполяризационной АР со стабильной шириной ДН, низким уровнем боковых лепестков и высокой изоляцией. Каждый горизонтальный ряд вертикальной АР представляет собой трехэлементную подрешетку, причем элементы расположены в узлах треугольной сетки (рис. 3). Возбуждение каждой трехэлементной подрешетки

осуществляется с помощью микрополоскового частотно-зависимого несимметричного трехканального делителя мощности (ДМ) (рис.4). Частотный диапазон разделяется на нижний и верхний поддиапазоны. ДМ синтезирован таким образом, чтобы в нижнем поддиапазоне амплитуды на крайних излучателях были больше, чем на центральном излучателе. В верхнем поддиапазоне, наоборот, амплитуда на центральном излучателе больше, чем на крайних излучателях (рис. 4,б). При таком частотно-зависимом амплитудном распределении удастся обеспечить стабильную по ширине ДН в широком диапазоне частот, низкий УБЛ и высокую изоляцию. При этом на одной плате размещаются два таких ДМ, обеспечивающих возбуждение двух ортогональных поляризаций на трех излучателях. Ключевым элементом в структуре ДМ является предложенный новый тип широкополосного перекрещивания микрополосковых линий.

Предложенный метод обеспечил стабильную ширину ДН (рис.5), которая по результатам измерений равна $2\theta_{0.5}=38.7^\circ, 35.6^\circ, 31.9^\circ$ на частотах 1710 МГц, 2200 МГц, 2690 МГц. Таким образом, изменение ширины ДН по уровню половинной мощности в рабочей полосе не превышает 6.8° . УБЛ в горизонтальной плоскости не превышает -15.5 дБ, коэффициент усиления 17 дБ. Коэффициенты отражения портов излучателя в составе АР не хуже $S_{11}, S_{22} < -20$ дБ, поляризационная развязка $S_{21} = -30$ дБ, а уровень интермодуляционных искажений составил около -108 дБм.

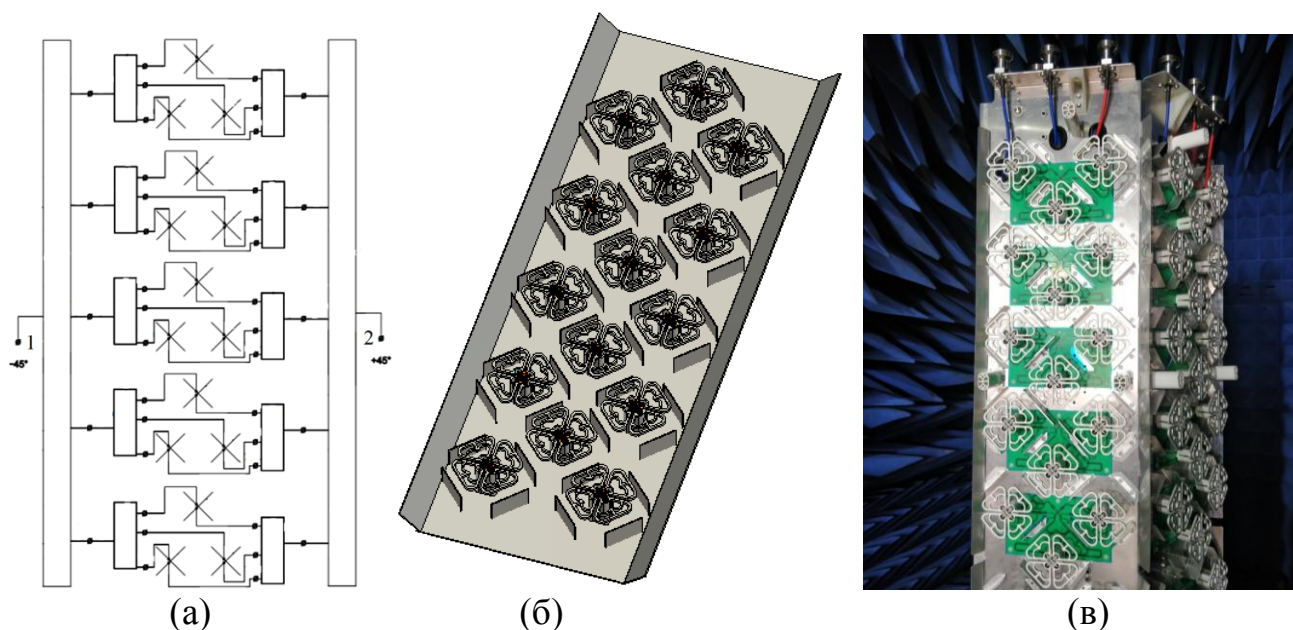
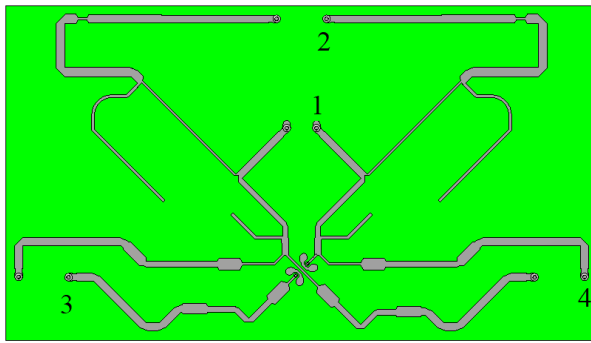
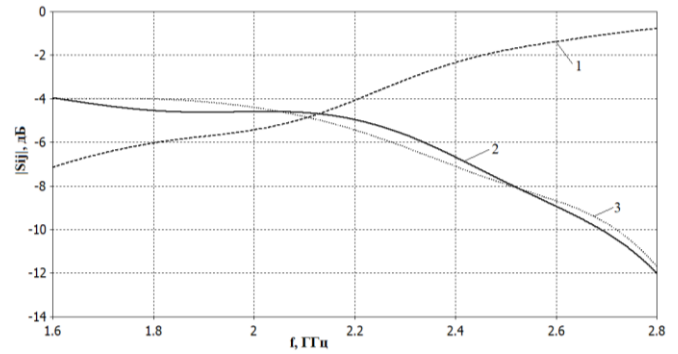


Рис. 3. Антенная решетка диапазона 1710-2690 МГц:
 (а) электрическая схема, (б) трехмерная модель,
 (в) АР в составе двухлучевой антенны базовой станции.

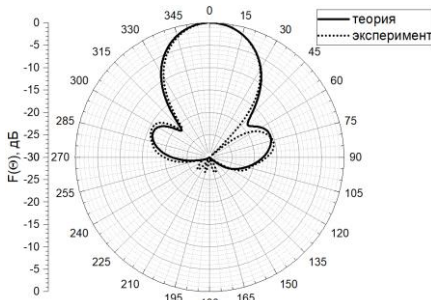


(а)

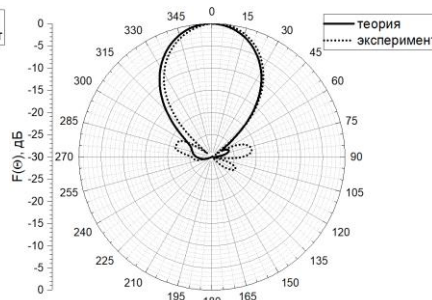


(б)

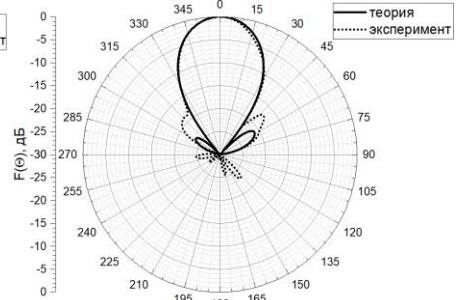
Рис. 4. Частотно-зависимый трехканальный делитель для диапазона 1710-2690 МГц: (а) топология, (б) расчетные частотные зависимости делителя, $|S_{21}|$ - кривая 1, $|S_{31}|$ - кривая 2, $|S_{41}|$ - кривая 3



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Экспериментальные и теоретические диаграммы направленности в горизонтальной плоскости на частотах 1710 МГц (а), 2200 МГц (б) и 2690 МГц (в)

Предложена новая конструкция двухдиапазонной антенной решетки для работы в базовых станциях мобильной связи диапазона 690-960 МГц / 1710-2690 МГц на двух наклонных поляризациях $\pm 45^\circ$ в угловом секторе 120° (рис.6). Предложенное решение реализовано на основе интегрированного раскрыва, в центре которого располагается двухэлементная АР диапазона 690-960 МГц, а по краям расположены две четырехэлементные линейные АР диапазона 1710-2690 МГц. Элементы нижнего диапазона представляют собой структуру из четырех петлевых вибраторов, выполненных в печатном варианте на однослойной диэлектрической плате с двухсторонней металлизацией. Такая конструкция позволяет несколько уменьшить размеры излучателей. Излучатели верхнего диапазона 1710-2690 МГц реализованы в виде цельнометаллических скрещенных диполей с вынесенной над ними металлической пластинкой, которая введена для сужения ДН. Предложенные меры уменьшают взаимное влияние излучателей АР. Для улучшения кросспо-

ляризационных характеристик в конструкцию добавлены вертикальные металлические стенки, окружающие ВЧ излучатели.

Расчетные и экспериментальные ДН АР приведены на рис. 7,8. АР обеспечивает стабильную ширину ДН в двух рабочих диапазонах с полосами частот 32% и 44.5% при работе в угловом секторе 120° . Измеренная ширина ДН составляет $2\theta_{0.5} = 68^\circ, 66^\circ, 62^\circ$ на частотах 690 МГц, 825 МГц, 960 МГц и $2\theta_{0.5} = 64^\circ, 60^\circ, 59^\circ$ на частотах 1710 МГц, 2200 МГц, 2690 МГц. УБЛ в вертикальной плоскости не превышает -14 дБ в нижнем диапазоне и -15.5 дБ в верхнем диапазоне, а коэффициент усиления выше 10 дБ и 12.5 дБ в НЧ и ВЧ диапазонах соответственно. Антенна имеет высокое согласование ($S_{11} < -15$ дБ, $S_{22} < -15$ дБ), поляризационную развязку ($S_{21} < -25$ дБ), а также низкий уровень интермодуляционных искажений (-108 дБм).

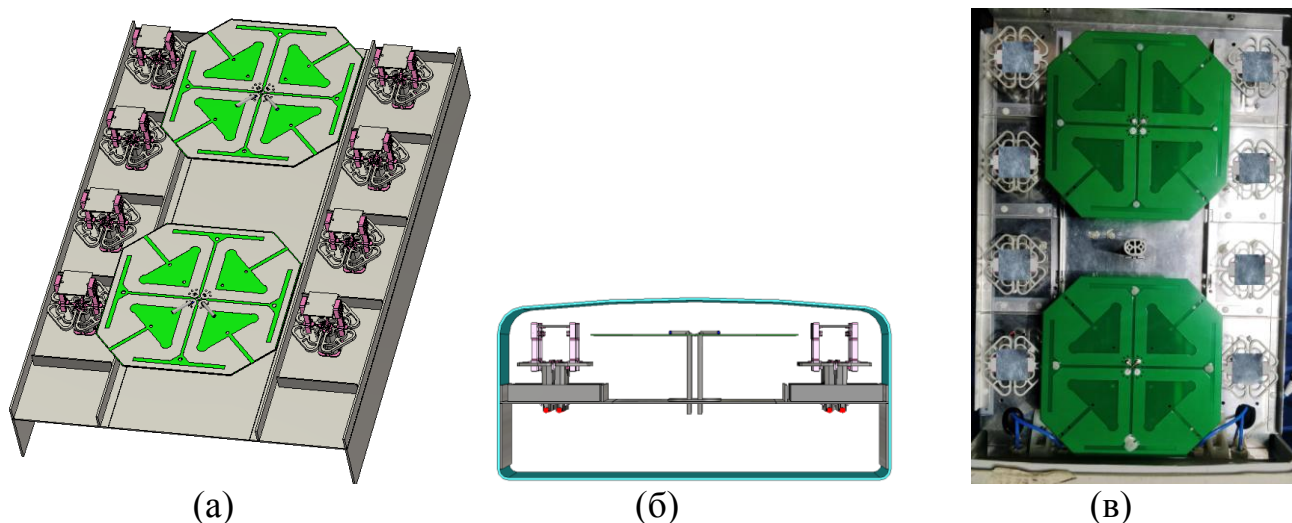


Рис. 6. Двухдиапазонная антенна (690-960 МГц / 1710-2690 МГц):
(а) 3D модель; (б) 3D модель с обтекателем, (в) фото без обтекателя.

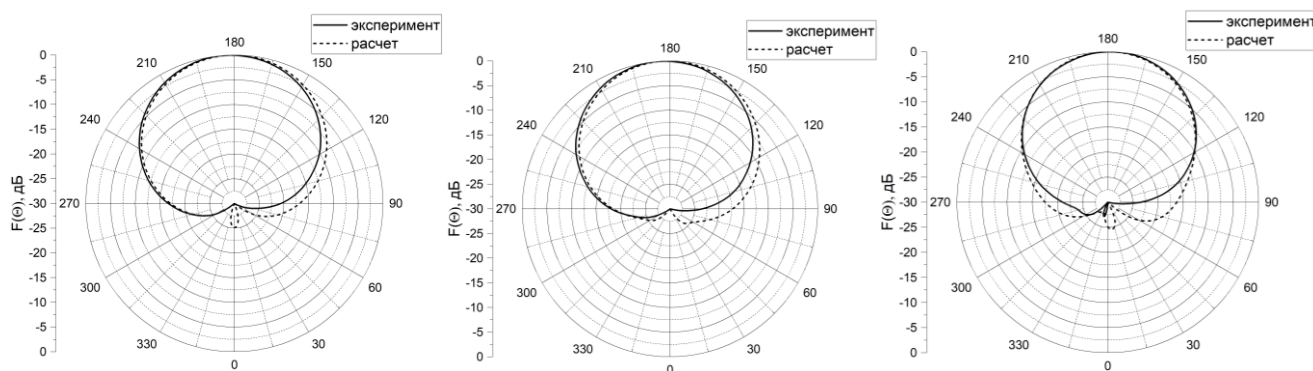


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные ДН антенны
в диапазоне 690-960 МГц: (а) 690 МГц, (б) 825 МГц, (в) 960 МГц

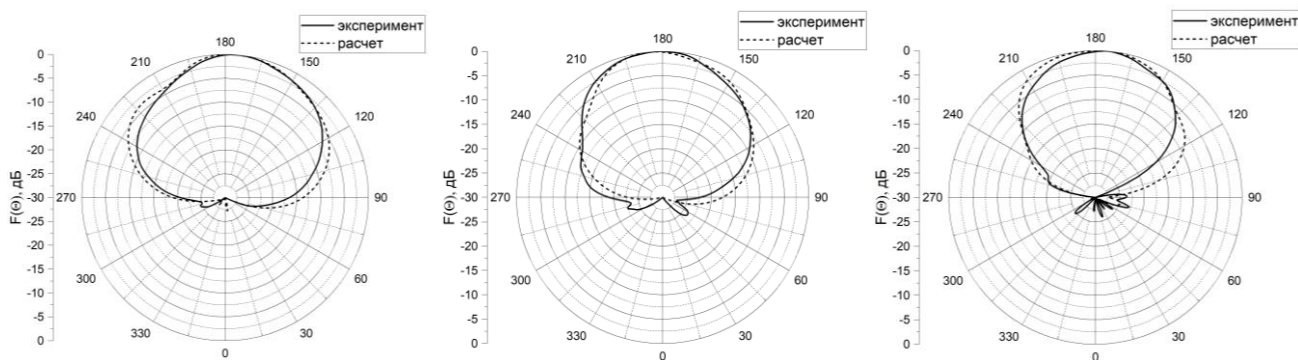


Рис. 8. Экспериментальные и расчетные ДН антенны в диапазоне 1710-2690 МГц: (а) 1710 МГц, (б) 2170 МГц, (в) 2690 МГц

В третьей главе предложена новая модификация диплексоров на встречно-штыревых резонаторах для базовых станций мобильной связи. Диплексер включает два канальных фильтра на встречно-штыревых четвертьволновых резонаторах и согласующую цепь на основе Т-образного разветвления коаксиальной линии с прямоугольным поперечным сечением. Конструктивно диплексер состоит из цельнометаллического корпуса и двух металлических крышек (рис.9,11).

Новизна предложенной конструкции состоит в том, что фильтры и согласующая цепь в виде Т-образного коаксиального разветвления объединены в единую цельнометаллическую структуру (корпус), которая не содержит отделяющихся частей (рис.11). Это обеспечивает возможность прецизионного изготовления с применением современных технологий (CNC технологии, литье под давлением, 3D печать и др.). Для тонкой настройки в конструкцию введены диэлектрические винты вблизи открытых концов четвертьволновых штыревых резонаторов (рис.12). Диэлектрические настроечные винты обеспечивают более низкий уровень вносимых интермодуляционных искажений.

Предложена эффективная комбинированная методика синтеза данного класса диплексоров. Методика включает: (i) синтез прототипа фильтра на основе аппарата матриц связи, (ii) численное решение задач на собственные значения для одиночного и двух связанных встречно-штыревых резонаторов, (iii) электродинамическое моделирование и оптимизацию фильтров, (iv) электродинамическое моделирование и оптимизацию диплексера. Продемонстрирована эффективность методики при синтезе диплексоров с различной шириной рабочих полос.

Разработаны, изготовлены и успешно экспериментально протестированы диплексеры для диапазонов 690-862/880-960 МГц, 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теорией и подтверждают реализуемость предложенных решений (рис.10). Диплексер диапазона 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц

по данным измерений (рис. 13) обеспечивает уровень коэффициента отражения в полосах пропускания -20 дБ, вносимые потери около -0.15 дБ, изоляцию -30 дБ, интермодуляционные искажения -124 дБм при весьма компактных размерах (20×87×109мм).

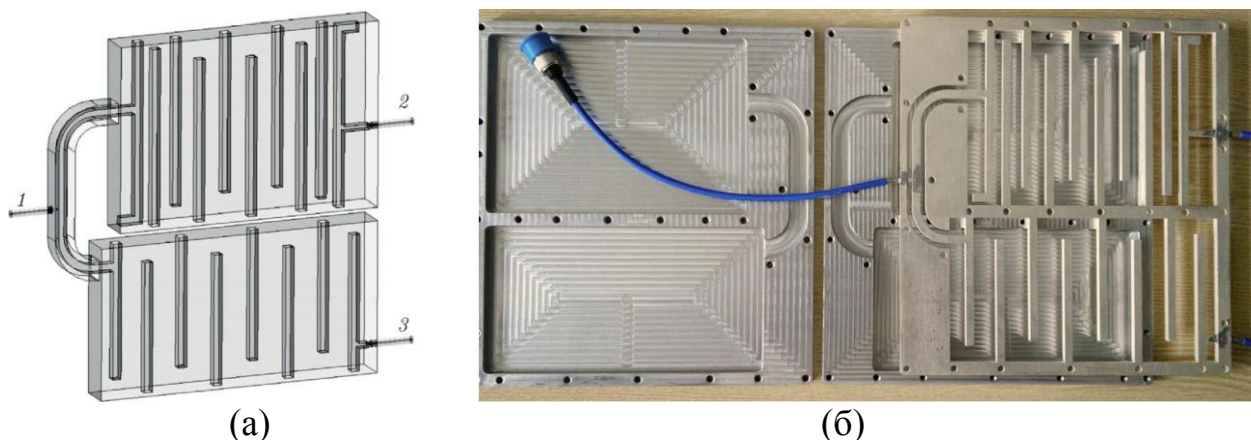


Рис. 9. Диплексер диапазона 680-862 / 880-960 МГц:
(а) 3D модель, (б) фото в разобранном виде

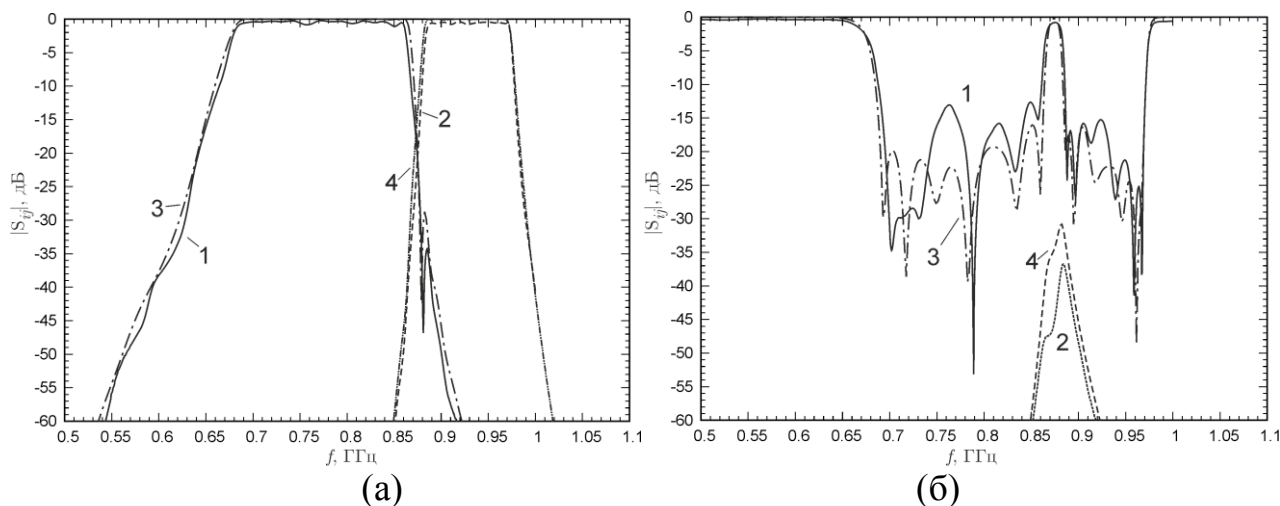


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные характеристики диплексера диапазона 690-862/880-960 МГц с учетом реальных размеров макета:
(а) 1 - $|S_{21}|$ (эксперимент); 2 - $|S_{31}|$ (эксперимент); 3 - $|S_{21}|$ (теория); 4 - $|S_{31}|$ (теория); (б) 1 - $|S_{11}|$ (эксперимент); 2 - $|S_{32}|$ (эксперимент); 3 - $|S_{11}|$ (теория); 4 - $|S_{32}|$ (теория).

Для случая, когда рабочие диапазоны диплексеров оказываются очень близко расположены друг к другу, предложен способ улучшения развязки каналов. Для этого в конструкцию одного из канальных фильтров вводится дополнитель-

ный штыревой Г-образный резонатор, который формирует полюс затухания. Задавая требуемую длину Г-резонатора, можно контролировать положение полюса затухания и крутизну характеристики диплексера. Это позволяет достигнуть требуемой величины развязки каналов диплексера. Данный способ проиллюстрирован на примере диплексера диапазона 1710-1880/1920-2170 МГц.

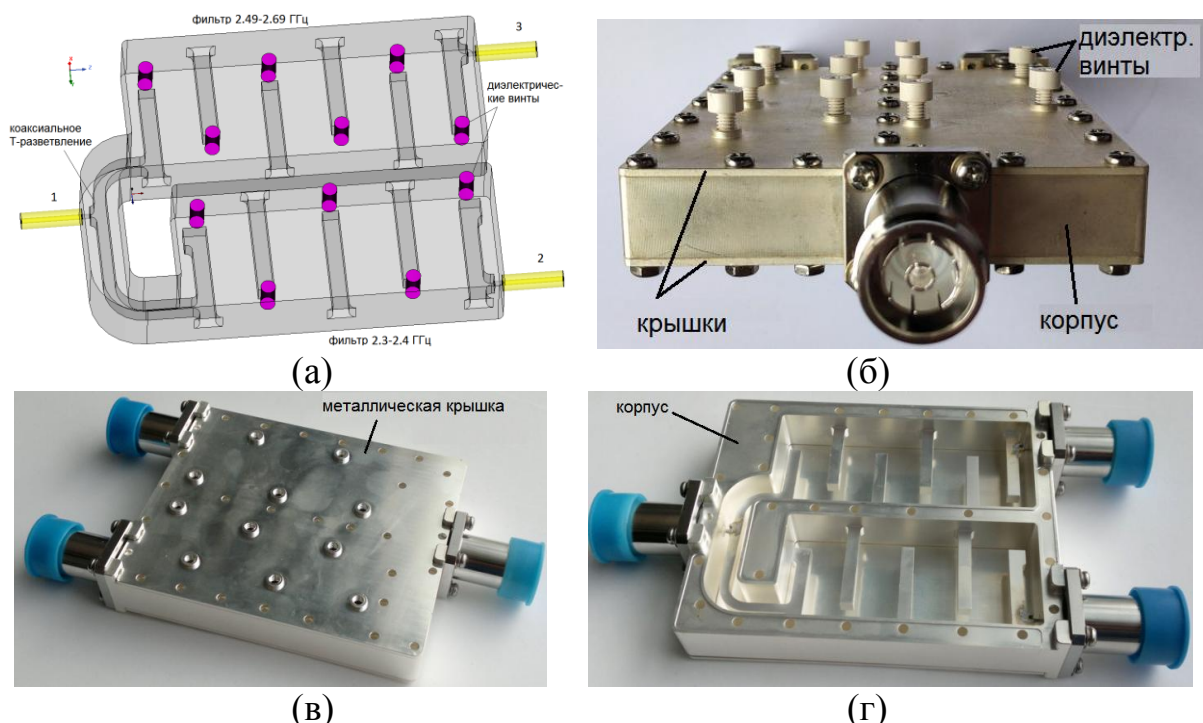


Рис. 11. Диплексер диапазона 2.3–2.4/2.49–2.69 ГГц:
(а) электродинамическая модель, (б), (в), (г) изготовленный диплексер.

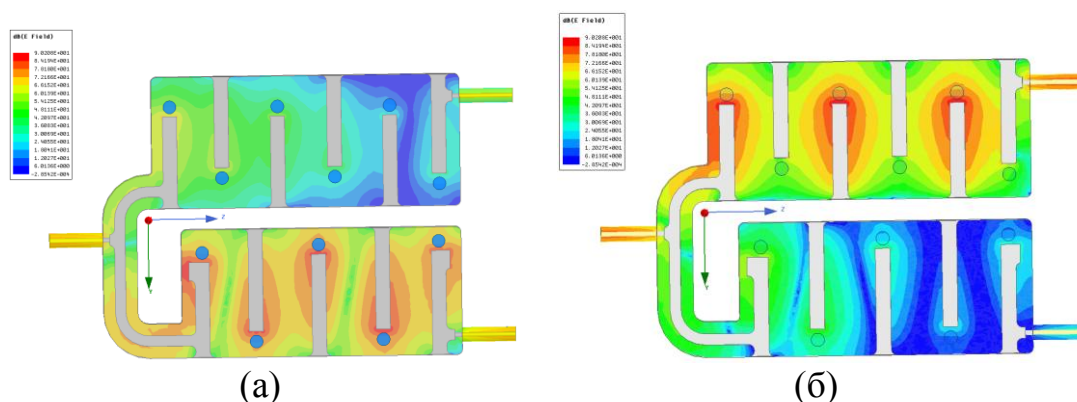


Рис. 12. Распределение напряженности электрического поля
при 2.35 ГГц (а), при 2.59 ГГц (б).

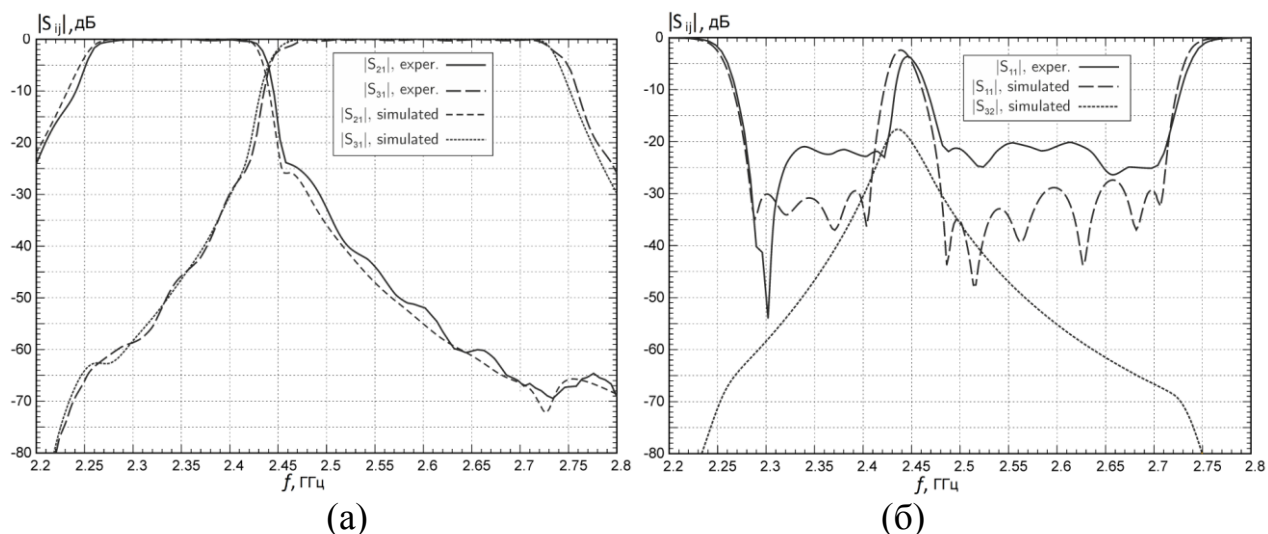


Рис. 13. Экспериментальные и теоретические характеристики диплексера 2.3-2.4/2.49-2.59 ГГц. (а) S_{21} и S_{31} , (б) S_{11} и S_{32} .

В четвертой главе предложен новый класс диплексеров для работы в составе антенн базовых станций мобильной связи. Основная особенность характеристик данного класса диплексеров – узкая частотная полоса, отделяющая рабочие диапазоны (порядка 1-9%), что требует высокой крутизны частотных характеристик в этой полосе частот.

Новое физическое решение для диплексеров реализовано на основе симметричных полосковых линий. Канальные фильтры представляют собой структуру, включающую несколько последовательно соединенных секций полосковых линий и параллельно соединенные четвертьволновые шлейфы с открытым концом, формирующие полюсы затухания, которые могут быть расположены выше или ниже полосы пропускания фильтра (рис.14). Данная конструкция позволяет реализовать высокую крутизну частотных характеристик. Оба фильтра и согласующая цепь объединены в единый разветвленный полосковый проводник, расположенный в металлическом корпусе, который заполнен вспененным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью 1.06.

Синтез диплексеров выполнен на основе аппарата теории цепей на основе эквивалентной схемы (рис.14). По итогам синтеза установлено, что волновые сопротивления разомкнутых шлейфов могут иметь большие значения (при этом ширина полосковых проводников шлейфов критически мала), поэтому для их технологической реализации требуется новое физическое решение. В качестве такого решения было предложено использовать шлейфы в виде плоской спирали, что позволило существенно увеличить ширину полосковых проводников и сделать структуру технологически реализуемой (рис.14,17).

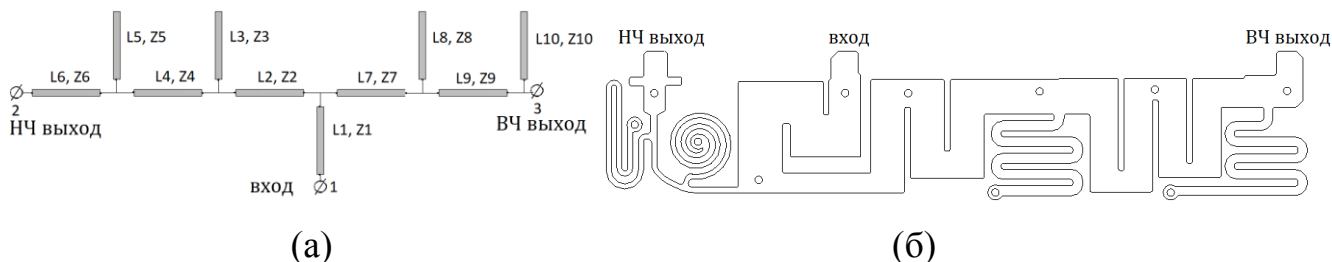
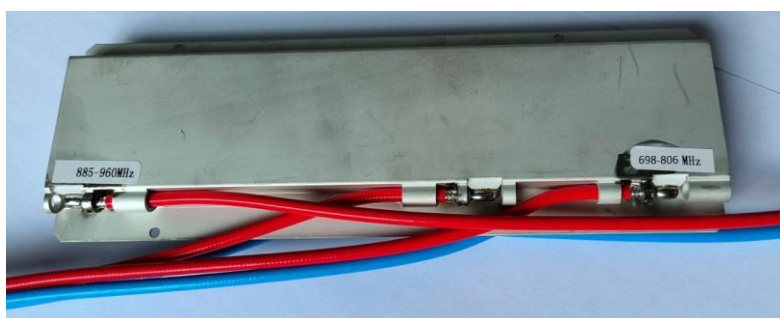


Рис. 14. Эквивалентная схема диплексера (а), топология полоскового проводника диплексера диапазона 698-806 / 885-960 МГц

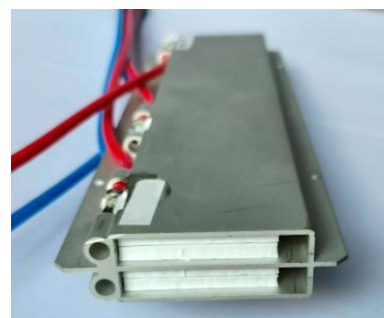
В качестве дополнительной модификации конструкции диплексера для увеличения ширины полосковых проводников шлейфов был также предложен корпус сложного поперечного сечения со ступенчатой формой (рис. 17). При этом шлейфы располагаются в расширенной части корпуса, а полосковый проводник – в части корпуса с меньшей высотой.

Предложенная концепция реализована на примере диплексеров, работающих в диапазонах 698-806 / 885-960 МГц (рис. 15,16) и 1710-1830 /1885-2025 МГц (рис. 17,18). Итоговые конструкции диплексеров получены в результате электродинамического моделирования и многопараметрической оптимизации. Диплексеры успешно изготовлены, экспериментально протестированы и имеют высокие электродинамические характеристики. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Для диплексера диапазона 698-806/885-960 МГц измеренные значения коэффициента отражения в полосах пропускания составляют -19.4 дБ, изоляция не хуже -30 дБ, вносимые потери менее 0.3 дБ. Диплексер диапазона 1710-1830 /1885-2025 МГц имеет экспериментальное значение коэффициента отражения в рабочих диапазонах не хуже -18.4 дБ, изоляцию -27 дБ и вносимые потери менее 0.5 дБ.

Предложенное решение характеризуется высокой технологичностью, простотой, повторяемостью характеристик, компактностью, не содержит настроечных элементов. Поскольку конструкция не содержит металлических деталей, соприкасающихся друг с другом, это позволяет также уменьшить уровень вносимых пассивных интермодуляционных искажений.

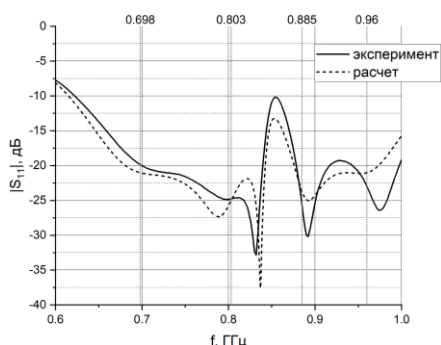


(а)

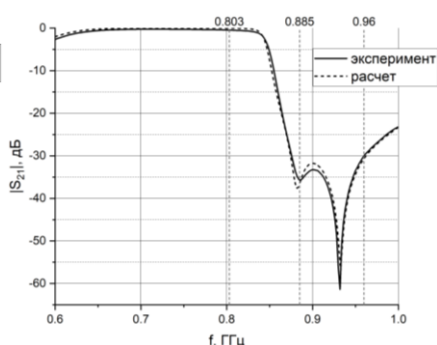


(б)

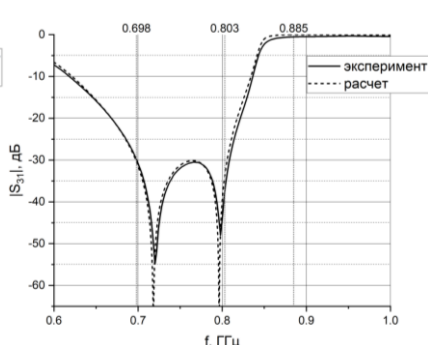
Рис. 15. Фото пары диплексеров диапазона 698-806 / 885-960 МГц для двух поляризаций ($\pm 45^\circ$); (а) – общий вид, (б) – вид с торца



(а)



(б)

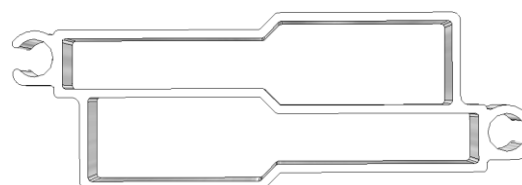


(в)

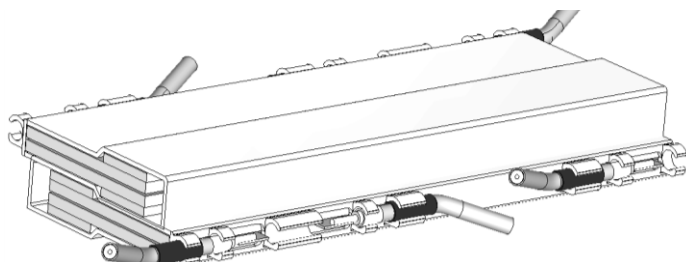
Рис. 16. Экспериментальные и расчетные характеристики разработанного диплексера диапазона 698-806 / 885-960 МГц; (а) – $|S_{11}|$, (б) – $|S_{21}|$, (в) – $|S_{31}|$.



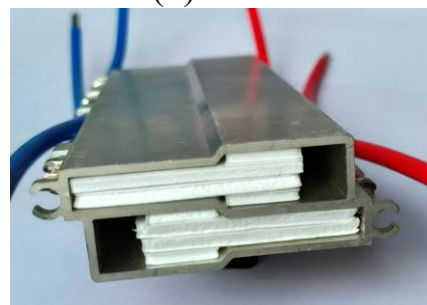
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 17. Диплексер диапазона 1710-1830 / 1885-2025 МГц: (а) топология, (б) сечение корпуса, (в), (г) диплексер в собранном виде

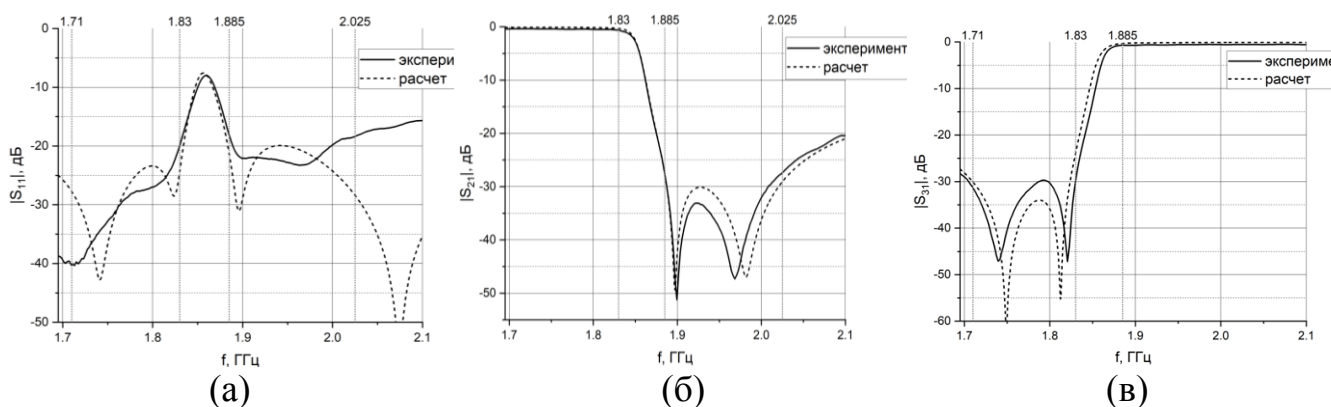


Рис. 18. Частотные характеристики диплексера диапазона 1710-1830 / 1885-2025 МГц: (а) - $|S_{11}|$, (б) - $|S_{21}|$, (в) - $|S_{31}|$.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. Разработана и экспериментально протестирована новая двухполяризационная антенна диапазона 1710-2170 МГц для базовых станций мобильной связи, работающих в угловом секторе 60° . Излучатели АР имеют цельнометаллическую конструкцию и реализованы на основе четырех петлевых вибраторов, формирующих две наклонные поляризации $\pm 45^\circ$. Предложен метод стабилизации ширины ДН АР с рабочей полосой до 25%, основанный на разбиении АР на три подрешетки. Экспериментально подтверждены высокие характеристики АР. Ширина ДН по уровню половинной мощности в рабочей полосе частот равна $2\theta_{0.5} = 36^\circ \pm 2.3^\circ$.

2. Предложена и экспериментально исследована новая двухполяризационная АР для базовых станций диапазона 1710-2690 МГц и углового сектора 60° . В качестве элемента АР использован широкополосный цельнометаллический излучатель оригинальной конструкции на скрещенных диполях, формирующий две наклонные поляризации $\pm 45^\circ$. Предложен и реализован для данной АР новый метод стабилизации ширины ДН в полосе частот до 45%. Ключевым элементом АР является разработанный оригинальный трехканальный несимметричный частотно-зависимый делитель мощности на МПЛ. Экспериментальные результаты показывают высокие характеристики разработанной АР. Изменение ширины ДН по уровню половинной мощности в рабочей полосе частот составляет около 6.8° .

3. Разработана и экспериментально исследована новая двухдиапазонная антенна для базовых станций диапазона 690-960 МГц / 1710-2690 МГц и углового сектора 120° . Антенна выполнена на основе интегрированной апертуры и состоит из двухэлементной АР излучателей нижнего диапазона 690-960 МГц в центре

апертуры и двух четырехэлементных АР верхнего диапазона 1710-2690 МГц, расположенных по краям апертуры. Излучатели нижнего диапазона выполнены на основе четырех петлевых диполей в печатном исполнении, формирующих две наклонные поляризации $\pm 45^\circ$. Двухполяризационные излучатели верхнего диапазона представляют собой цельнометаллические скрещенные диполи с металлической пластинкой на диэлектрических держателях, вынесенной над диполями, что позволяет сузить ДН. Печатная конструкция НЧ излучателей и модифицированная конструкция ВЧ излучателей позволяют уменьшить взаимную связь элементов АР.

4. Предложена новая модификация диплексеров на встречно-штыревых резонаторах для базовых станций. Конструкция диплексера включает два канальных фильтра на встречно-штыревых резонаторах и согласующую цепь на Т-образном разветвлении коаксиальной линии с прямоугольным сечением. Фильтры и согласующая цепь выполнены в виде единого элемента (корпуса), который не содержит отделяющихся частей. Предложен метод формирования полюса затухания в характеристике для улучшения развязки. Успешно разработаны, изготовлены и протестированы диплексеры диапазонов 690-862/880-960 МГц, 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц.

5. Предложена эффективная комбинированная методика синтеза диплексеров на встречно-штыревых резонаторах, основанная на применении матриц связи.

6. Предложена новая конструкция диплексеров для случая узкой полосы частот между рабочими диапазонами (1-9%). Конструкция реализована на симметричных полосковых линиях с заполнением в виде вспененного диэлектрика с малым значением диэлектрической проницаемости. Оба канальных фильтра и согласующая цепь выполнены в виде разветвленного полоскового проводника с четвертьволновыми шлейфами, формирующими полюсы затухания. Поскольку синтезированные значения волновых сопротивлений шлейфов оказываются большими, ключевые особенности конструкции заключаются в реализации таких полосковых шлейфов. Новизна предложенного решения заключается в том, что 1) шлейфы свернуты в плоскую спираль, и 2) использован корпус сложного поперечного сечения, что позволило увеличить ширину полосковых проводников шлейфов и сделать их физически реализуемыми. В соответствии с предложенной концепцией успешно разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы диплексеры диапазонов 698-806 / 885-960 МГц и 1710-1830 / 1885-2025 МГц.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. Рудаков, В. А. Двухполяризационные антенные решетки базовых станций мобильной связи для работы в суженном угловом секторе / В. А. Рудаков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 37-45. – DOI 10.18127/j5604128-202501-04. – EDN OPTOBG. K2

2. Полосковые фильтры и диплексеры с корпусом сложного поперечного сечения для систем мобильной связи / В. А. Рудаков, В. А. Следков, Z. Li [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2025. – Т. 30, № 4. – С. 40-51. – DOI 10.18127/j5604128-202504-04. – EDN EPHWZN. K2

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science, RSCI

3. A novel high-performance diplexer for mobile communication base stations / K. Kobrin, M. Manuilov, V. Rudakov, Z. Li // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2021. – Vol. 35, No. 10. – P. 1273-1289. – DOI 10.1080/09205071.2021.1886998. – EDN UNFUWE. K1

4. Synthesis of a Wideband Diplexer Based on Interdigital Resonators for the Antennas of Mobile-Communication Base Stations / K. V. Kobrin, V. A. Rudakov, M. B. Manuilov [et al.] // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 64, No. 7. – P. 494-504. – DOI 10.1007/s11141-022-10150-x. – EDN HJKCSK. [*Русскоязычная версия*: Синтез широкополосного диплексера на встречно-штыревых резонаторах для антенн базовых станций мобильной связи / К. В. Кобрин, В. А. Рудаков, В. А. Следков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 548-559. – DOI 10.52452/00213462_2021_64_07_548. – EDN PNAJAH]. K1

Статьи в журналах, индексированных в РИНЦ

5. Синтез диплексера с близко расположенными полосами пропускания для систем мобильной связи / К. В. Кобрин, В. А. Рудаков, Z. Li [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2022. – Т. 27, № 6. – С. 28-37. – DOI 10.18127/j5604128-202206-04. – EDN KKLTWE.

Публикации в сборниках трудов конференций

6. Рудаков, В. А. Разработка антенных решеток с шириной луча 33 градуса по уровню половинной мощности / В. А. Рудаков, В. А. Следков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : [(КрыМиКо'2019) : 29-я международная Крымская конференция, 8-14 сентября 2019 г., Севастополь] : сборник научных трудов. Вып. 1. – Севастополь : СевГУ, 2019. – С. 232. [*Переводная версия*: Rudakov, V. Development of antenna arrays with a beam width 33 degrees at the level of half power / V. Rudakov, V. Sledkov // ITM Web of Conferences : 29th International

Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019). – 2019. – Vol. 30. – P. 05030. – DOI 10.1051/itmconf/20193005030].

7. Кобрин, К. В. Разработка диплексера диапазона 2.3-2.4/2.49-2.69 ГГц для базовых станций мобильной связи / К. В. Кобрин, В. А. Рудаков, М. Б. Мануилов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : [(КрыМиКо’2019) : 29-я международная Крымская конференция, 8-14 сентября 2019 г., Севастополь] : сборник научных трудов. Вып. 1. – Севастополь : СевГУ, 2019. – С. 239-240. [*Переводная версия*: Kobrin, K. Compact design of diplexer for base stations operating within frequency bands 2.3–2.4/2.49–2.69 GHz / K. Kobrin, V. Rudakov, M. Manuilov // ITM Web of Conferences : 29th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019). – 2019. – Vol. 30. – P. 06002. – DOI 10.1051/itmconf/20193006002]

8. A Novel Design of Wideband Diplexer for Base Station Applications / K. Kobrin, V. Rudakov, M. Manuilov [et al.] // 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) : Conference Proceedings, Divnomorskoe, 24-28 June 2019. – IEEE, 2019. – P. 148-151. – DOI 10.1109/RSEMW.2019.8792810.

9. A Novel Diplexer Design with Closely Situated Pass-bands for Base Stations of Mobile Communications / K. Kobrin, V. Rudakov, M. Manuilov [et al.] // Proceedings 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Russia, Moscow, November 25-27, 2020. – IEEE, 2020. – P. 176-179. – DOI 10.1109/RMC50626.2020.9312259.

10. Dual-polarized dipole array with controlled beam tilt and wide radiation pattern for multi-beam antenna of base stations / V. A. Rudakov, Z. Li, V. A. Sledkov [et al.] // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Krasnodar Region, Russia, June 28 – July 2, 2021 : Conference Proceedings. – IEEE, 2021. – P. 171-174. – DOI 10.1109/RSEMW52378.2021.9494048.

11. A Novel Compact Design of Filters and Diplexers with Metal Housing Having Complicated Cross Section / V. Rudakov, V. Sledkov, Z. Li, V. Taranenko, M. Manuilov // 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 26-30 June 2023. – IEEE, 2023. – P. 80-83. – DOI 10.1109/RSEMW58451.2023.10202146

12. Разработка диплексера с фильтрами на встречных стержнях для систем мобильной связи / К. В. Кобрин, В. А. Рудаков, В. А. Следков [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : [(КрыМиКо’2018) : 28-я международная Крымская конференция, 9-15 сентября 2018 г., Севастополь] : материалы конференции. Т. 3 : Секция 4/1: Антенные измерения ; Секция 4/2: Антенны систем связи и передачи информации ; Секция 4/3: Микрополосковые антенны и антенные решетки ; Секция 5: Пассивные компоненты. – Севастополь: СевГУ, 2018. – С. 753-758.

Патенты

13. Patent № WO2020143113A1 China, IPC codes H01Q1/36, H01Q9/16, H01Q3/30. Dual-polarized array antenna and application thereof: №

PCT/CN2019/077937 : International Filing Date 13.03.2019 : Publication Date 16.07.2020 / Sledkov V. A., Rudakov V., Li Z. ; Applicant: Guangdong Signtenna Communication Technology Co Ltd [Cn].

14. Patent № CN210668700U China, IPC codes H01Q 21/29, H01Q 21/06, H01Q 21/00, H01Q 19/10, H01Q 1/50, H01P 5/12. Dual-polarized antenna array and dual-polarized 2-beam antenna : № CN201921443239.0U : International Filing Date 30.08.2019 : Publication Date 02.06.2020 / Sledkov V. A., Rudakov V., Li Z. ; Applicant: Guangzhou Sinan Technology Co ltd.

15. Patent № CN110611175B China, IPC codes H01Q 21/29, H01Q 21/06, H01Q 21/00, H01Q 19/10, H01Q 1/50, H01P 5/12. Dual polarized antenna array and dual polarized 2-beam antenna : № CN201910822404.1A : International Filing Date 30.08.2019 : Publication Date 24.12.2019 / Sledkov V. A., Rudakov V., Li Z. ; Applicant: Guangzhou Sinan Technology Co ltd.

16. Patent № CN112186369B China, IPC codes H01Q 21/24, H01Q 1/36, H01Q 1/50, H01Q 23/00. Three-beam dual-polarized array antenna: № CN202010925674.8A : International Filing Date 04.09.2020 : Publication Date 05.01.2021 / Sledkov V. A., Rudakov V., Li Z. ; Applicant: Guangzhou Sinan Technology Co ltd.

17. Patent № CN213150976U China, IPC codes H01P 1/04, H01P 11/00. Connecting device for coaxial cable and strip line and high-frequency equipment: № CN202021921842.8U : International Filing Date 04.09.2020 : Publication Date 07.05.2021 / Sledkov V. A., Rudakov V., Li Z. ; Applicant: Guangzhou Sinan Antenna Design Institute Co ltd.

18. Patent № CN209434383U China, IPC codes H01Q 1/36, H01Q 3/30, H01Q 9/16, H01Q 19/18, H01Q 21/00, H01Q 21/06. Double polarization array antenna, two beam antenna battle array structures and two beam antennas : № CN201920028261.2U : International Filing Date 08.01.2019 : Publication Date 24.09.2019 / Sledkov V. A., Rudakov V., Li Z. ; Applicant: Guangdong Sinan Communication Technology Co Ltd.

19. Patent № CN218569186U China, IPC codes H01P 1/203. Filter with tubular conductive shell : № CN202221804187.7U : International Filing Date 13.07.2022 : Publication Date 03.03.2023 / Li Z., Rudakov V. ; Applicant: Guangzhou Sinan Technology Co ltd.

20. Patent № CN115377701A China, IPC codes H01Q 15/24, H01Q 5/28, H01P 1/203, H01Q 1/24, H01Q 5/30. Base station antenna strip line duplexer : № CN202210818505.3A : International Filing Date 13.07.2022 : Publication Date 22.11.2022 / Li Z., Rudakov V. ; Applicant: Guangzhou Sinan Technology Co ltd.

21. Patent № CN115377632A China, IPC codes H01P 1/203. Frequency selective device comprising a tubular conductive housing having a polygonal cross-section : № CN202210818580.XA : International Filing Date 13.07.2022 : Publication Date 22.11.2022 / Li Z., Rudakov V. ; Applicant: Guangzhou Sinan Technology Co ltd.

Список цитированной литературы

1. Yejun He and Wei Tian, A broadband dual-polarized base station antenna element for European Digital Dividend, CDMA800 and GSM900 applications // 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Year: 2017, Pages: 659 – 663.
2. Yejun He and Yadong Yue, A novel broadband dual-polarized dipole antenna element for 2G/3G/LTE base stations // IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Year: 2016, Pages: 102 – 106.
3. Yejun He, Zhengzheng Pan, Xudong Cheng, Yuan He, Jian Qiao and Manos M. Tentzeris, A Novel Dual-Band, Dual-Polarized, Miniaturized and Low-Profile Base Station Antenna // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.:63, Issue: 12, Dec. 2015.
4. Guanfeng Cui, Shi-Gang Zhou, Gang Zhao, and Shu-Xi Gong, A Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna for Base Station Application // Progress In Electromagnetics Research, Vol. 64, p.61–70, 2016.
5. H. Huang, Y. Liu, and S. Gong A novel dual-broadband and dualpolarized antenna for 2G/3G/LTE base stations // IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 64, N. 9, Sep. 2016, pp. 4113-4118.
6. He Huang, Ying Liu, and Shuxi Gong, A Dual-Broadband, Dual-Polarized Base Station Antenna for 2G/3G/4G Applications // IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol. 16, 2017.
7. Y. He, W. Tian and L. Zhang, A Novel Dual-Broadband Dual-Polarized Electrical Downtilt Base Station Antenna for 2G/3G Applications // IEEE Access, vol. 5, pp. 15241-15249, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2720591.
8. Zhang X.Y., Xue D., Ye L.H., Pan Y.M., Zhang Y. Compact Dual-Band Dual-Polarized Interleaved Two-Beam Array With Stable Radiation Pattern Based on Filtering Elements // IEEE Trans. on Antennas and Propag., V. 65, No. 9, September 2017, pp. 4566 - 4575.
9. Xia Lei, Song Lei, Wu Bian, Bo Xiaodong and Chen, Jianzhong, Double-layer suspended stripline resonator with high quality factor for base-station diplexer application // Electronics Letters Vol. 54, No 8, pp. 513–515, 2018 doi:10.1049/el.2018.0388.
10. Miyazaki, M., Asao, H., and Ishida, O. A Broadband Dielectric Diplexer using a Snaked Strip-Line // IEEE MTT-S Digest, 1991, pp. 551-554.
11. Sieganschin, A., Tegowski, B., Jaschke, T. and Jacob, A. F. Compact Diplexers With Folded Circular SIW Cavity Filters // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, vol. 69(1), pp. 11-18.