

На правах рукописи



Паршин Юрий Николаевич

**ПЕЧАТНЫЕ МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЁТКИ
С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯМИ
И ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ ДИПОЛЬНОГО ВИДА**

Специальность 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Научный руководитель: **Горбачев Анатолий Петрович**, доктор технических наук, доцент, НГТУ, профессор кафедры радиоприёмных и радиопередающих устройств

Официальные оппоненты: **Пономарев Леонид Иванович**, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва;

Балзовский Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Защита диссертации состоится «20» сентября 2022 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/g9xcavdn>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Многолучевые фазированные антенные решётки (ФАР), являясь одним из классов излучающих СВЧ систем, характеризуются рядом существенных особенностей, способствующих их востребованности уже многие десятилетия. Так, при линейной поляризации излучения обеспечивается качественная, устойчивая и поляризационно селективная радиосвязь между абонентами, положение в пространстве которых не изменяется достаточно длительное время: вахтовые посёлки геологов, нефте- и газодобывающие бригады, мобильные отряды МЧС, развёрнутые для ликвидации природных катаклизмов (лесные пожары, наводнения и разливы рек, сходы лавин, оползни и обвалы грунта, землетрясения). Кроме того, такие ФАР в волноводном исполнении широко применялись и в радиолокационной технике с конца 40-ых годов XX века. И вряд ли эти ФАР, будучи модернизированными, утратили свою актуальность в радиолокационных системах настоящего времени. Степень проработанности вопросов упомянутой проблематики весьма высока, о чём свидетельствуют работы ведущих журналов по радиоэлектронике СВЧ, а также доклады на конференциях и защищённые в последние годы диссертации. Вместе с тем, комплексная миниатюризация элементной базы и совершенствование технологии интегрально-групповых методов микроэлектроники и печатного монтажа, создают как новые пути модернизации многолучевых ФАР, так и говорят о неугасающем интересе к поиску новых системно-технических и конструкторско-технологических решений в данной области антенной техники, включая системы беспроводного доступа, связи и радиолокационные станции (РЛС) кругового и секторного типов.

Степень проработанности проблемы. Тематикой линейно поляризованных ФАР занимались и внесли неоценимый вклад следующие российские и зарубежные основоположники таких исследований: Пистолькорс А.А., Бахрах Л.Д., Воскресенский Д.И., Айзенберг Г.З., Марков Г.Т., Сазонов Д.М., Сестрорецкий Б.В., Вендик О.Г., Шатраков Ю.Г., Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Kraus J.D., Schelkunoff S.A., Hansen R.C., King R.W.P., Balanis C.A. и др. Начатые ими изыскания были успешно продолжены отечественными исследователями. В их числе: Каплун В.А., Бей Н.А., Пономарёв Л.И., Гостюхин В.Л., Гринёв А.Ю., Воронин Е.Н., Кошелёв В.И., Беличенко В.П., Чебышев В.В., Парнес М.Д., Останков А.В. и др. Однако, обзор нынешнего состояния конструкторско-компоновочных и системно-технических решений в области проектирования печатных многолучевых линейно поляризованных ФАР демонстрирует тот факт, что все они содержат пассивные многоплечие/многовходовые диаграммообразующие устройства (ДОУ), выходы которых запитывают излучатели линейно поляризованных волн, скомпонованные в фазированную антенную решётку, часто называемую «антенным полотном». При этом, в качестве излучателей широко применяются классические полуволновые центрально-питаемые диполи, реализованные либо вытянутыми линейными, либо свёрнутыми в «меандр» или ему подобную структуру. Вместе с тем, реализация упомянутых излучателей, когда сигнал подводится не к смежным, а к удалённым концам плеч диполя, открывает дополнительные степени свободы при проектировании

многолучевых ФАР, когда на подложке антенного полотна требуется разместить дополнительные СВЧ элементы для коммутации и реконфигурации решётки.

За последние 5 лет по тематике многолучевых ФАР сотрудниками НГТУ и автором настоящей диссертационной работы опубликован ряд работ, в которых предложены и апробированы новые подходы и конструкторско-компоновочные решения в проектировании печатных многолучевых ФАР. На базе полученных результатов изготовлены модифицированные дифференциальные фазовращатели, широкополосность которых превышает все известные аналоги. А по результатам исследований новых излучателей дипольного вида реализованы «в металле» полностью печатные (т.е., без каких-либо соединительных коаксиальных кабелей) конструкции 4- и 8-лучевых ФАР высокой степени готовности к адаптации к сложным посадочным местам на объектах их установки (кузов автомобиля, борт летательного аппарата). Ряд топологий печатных узлов и излучателей этих ФАР защищены патентами Российской Федерации, опубликованы в зарубежных журналах наукометрических баз «Web of Science» и «Scopus», а также в отечественных журналах из перечня «ВАК».

Цель работы – совершенствование элементной базы и модернизация линейно поляризованных многолучевых ФАР с помощью оптимизации возможных вариантов построения, компоновки направленных ответвителей, фазовращателей и излучателей при печатном исполнении их всех на единственной диэлектрической подложке

Задачи диссертационной работы:

1. Провести, начиная с основополагающих работ зарубежных авторов (*J.L. Butler, J. Blass, J. Nolen*) начала 60-х годов XX века, обзор многолучевых ФАР с центрально-питаемыми дипольными излучателями (*center-fed dipole radiators*).

2. Синтезировать новый печатный дифференциальный фазовращатель на полуволновых отрезках электромагнитно связанных полосковых линий с ТЕМ волнами, отличающийся от аналогов наибольшей широкополосностью.

3. Выполнить электродинамический анализ модифицированных печатных излучателей: центрально-питаемого дипольного излучателя с симметрирующим устройством типа «ласточкин хвост» и многоэлементного излучателя дипольного вида с концевым питанием. На его основе предложить методику формирования начального облика антенного полотна печатных многолучевых ФАР.

4. Выработать подходы к модификации конструкторско-компоновочных схем ДОУ Батлера, в которых применены синтезированные в работе сверхширокополосные печатные дифференциальные фазовращатели с кольцевым печатным проводником.

5. Провести трёхмерное электродинамическое моделирование, как фазовращателей и излучателей, так и всей многолучевой ФАР в целом, позволяющее сразу изготовить их конструкции, минуя стадию технологической отработки печатных изделий. Провести экспериментальные исследования в сертифицированной безэховой камере.

Объектом исследования являются полностью планарные линейно поляризованные многолучевые фазированные антенные решётки с излучателями дипольного вида.

Предметом исследования являются электродинамическая модель печатного многоэлементного излучателя дипольного вида и конструкторско-компоновочные схемы модифицированных диаграммообразующих устройств модернизированных многолучевых ФАР, реализованных без каких-либо соединительных кабелей.

Методы исследования. Используются пакеты трёхмерного полноволнового электродинамического моделирования «CST STUDIO SUITE» и прикладного математического моделирования «MathCAD». Получение аналитических соотношений для токов, напряжений и матриц рассеяния дифференциальных фазовращателей на электромагнитно связанных линиях основано на методе декомпозиции сложных СВЧ цепей при условии одномодового режима распространения ТЕМ волн. В соответствующих подразделах, посвящённых электромагнитному излучению модулей и ФАР в целом, задействованы метод наводимых ЭДС, теорема перемножения в теории антенн, уравнения Максвелла, а также теория дифференциальных уравнений и интегральное исчисление, включая теорию функций комплексного переменного.

Обоснованность и достоверность результатов следует из использования проверенного временем метода наводимых ЭДС в анализе излучателей дипольного вида с проводниками произвольной формы, классического метода декомпозиции сложных многополюсных цепей СВЧ с использованием матриц рассеяния в одномодовом режиме ТЕМ волн, использования лицензированных математических пакетов. Корректность полученных результатов подтверждается сравнением их с опубликованными другими исследователями результатами, связанными с предельными соотношениями для дифференциальных фазовращателей на связанных полосковых линиях, а также для диполей, реализованных в печатном исполнении.

Научная новизна работы

1. Обобщена классическая электродинамическая теория излучения диполей с прямолинейными цилиндрическими проводниками на печатные излучатели дипольного вида, интегрированными с симметрирующими устройствами, структура которых предложена в работе.

2. Выполнен синтез максимально широкополосных печатных дифференциальных фазовращателей на полуволновых отрезках электромагнитно связанных линий с кольцевым проводником.

3. Созданы, в рамках развитого в работе системного подхода, модифицированные диаграммообразующие устройства Батлера с использованием синтезированных максимально широкополосных фазовращателей.

4. Разработаны процедуры формирования полностью печатных (без каких-либо соединительных коаксиальных кабелей) многолучевых ФАР на основе электродинамических моделей печатных излучателей дипольного вида, эскизных обликов ответвителей и максимально широкополосных дифференциальных фазовращателей, созданных в рамках существования одномодового режима распространения ТЕМ волн.

Теоретическая значимость работы

1. Расширена область знаний об электродинамических характеристиках модифицированных печатных дипольных излучателей с симметрирующими устройствами, структура которых предложена в работе.

2. Синтезированы дифференциальные фазовращатели с максимальной широкополосностью и улучшенными компоновочными характеристиками диаграммообразующих устройств Батлера.

Практическая значимость работы

Разработаны законченные в конструкторско-компоновочном плане печатные многолучевые ФАР с высокой степенью готовности к установке в перспективные изделия радиолокационной, инфокоммуникационной и беспроводного доступа.

Положения, выносимые на защиту

1. Трёхэтапная модель синтеза, включающая математическое моделирование, расчёт начальных геометрических размеров проводной модели и её параметрическую оптимизацию при электродинамическом моделировании, позволяет разработать конструкции сверхширокополосных дифференциальных фазовращателей на электромагнитно связанных полосковых линиях передачи с предельным разбросом отклонений фазовых сдвигов 3° от номинальных значений в частотной полосе порядка 70%.

2. В многоэлементном излучателе, содержащем пять параллельно соединённых элементарных излучателей дипольного вида с концевым питанием, геометрическая длина которых прогрессивно уменьшается, происходит изменение входного импеданса всего многоэлементного излучателя за счёт влияния взаимных импедансов между элементами и, как следствие, форма частотной характеристики входного коэффициента отражения становится более равномерной в рабочей полосе частот. При этом интерференция электромагнитных полей пяти элементарных излучателей приводит к возрастанию коэффициента усиления на 2,1 дБ.

3. Интегрирование синтезированных дифференциальных фазовращателей в каналы, предложенных в работе, печатных диаграммообразующих устройств Батлера, позволяет, при равнозначных технических характеристиках, увеличить полосу рабочих частот 4-канального устройства с 9% до 36%, а 8-канального устройства до 49%.

4. Применение многоэлементных печатных излучателей дипольного вида создаёт предпосылки для повышения коэффициента усиления лучей до 12 дБ при одновременном обеспечении малых уровней коэффициентов отражения от входов ДОУ в полосе частот 11% при отсутствии каких-либо соединительных коаксиальных кабелей в их конструктивно-компоновочной иерархии, обеспечивая тем самым дополнительные степени свободы.

Реализация и внедрение результатов исследования

Диссертационная работа обобщает результаты госбюджетных НИР, выполненных на кафедре «Радиоприёмные и радиопередающие устройства» НГТУ согласно Договору о научно-техническом сотрудничестве между НГТУ и «Всероссийский НИИ радиоаппаратуры» (ВНИИРА). Работа поддержана грантами: Новосибирский государственный технический университет (НГТУ) «Разработка печатной антенной решетки S-диапазона с нестандартными

излучающими элементами для специальных задач радиолокационного сегмента», № С21-16; Фонд содействия инновациям по программе УМНИК «Разработка цифровых двухдиапазонных антенных решеток для беспилотных летательных аппаратов» № 77332.

Полученные в диссертации результаты использованы на наукоёмком предприятии г. Новосибирска: АО «НПО НИИИП-НЗиК». Результаты работы в части методик проектирования печатных многолучевых ФАР используются в учебном процессе кафедры «Радиоприёмные и радиопередающие устройства» НГТУ.

Личный вклад автора заключается в том, что им был выполнен электродинамический анализ печатных излучателей дипольного вида. Полученные в рамках данного анализа результаты были им обобщены на многолучевые линейные эквидистантные антенные решётки, что позволило сформировать процедуры построения/компоновки антенных полостей полностью планарных ФАР с учётом конструкторско-технологических норм отечественной радиопромышленности. Автором лично получены математические соотношения для ключевых характеристик максимально широкополосных печатных дифференциальных фазовращателей на электромагнитно связанных линиях с ТЕМ волной. Им были самостоятельно верифицированы полноволновым 3-D моделированием все модифицированные базовые элементы ДООУ / матриц Батлера, также им была разработана конструкторская документация, по которой на сертифицированном заводе печатных плат ООО «Электроконнект» были изготовлены полностью печатные 4- и 8-лучевые ФАР с высокой степенью готовности к установке в инфокоммуникационные средства СВЧ. Все экспериментальные исследования в сертифицированной безэховой камере выполнены также лично автором.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2019, 2020, 2021; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона», Новосибирск, НГТУ, 2018, 2019, 2021; II всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов «Science Research Practice», Новосибирск, 2018; III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019. XXI Международная научно-техническая конференция: «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», Казань, 2019; XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 21 – 24 апреля 2020; 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering, PIERE 2020; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы. Из них 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в перечень «ВАК», 1 статья базы данных «Web of Science» 3-го квартиля, 13 работ опубликовано в сборниках всероссийских и международных конференций, индексируемых в «Scopus» и «РИНЦ», получено 2 патента на изобретения.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии». Полученные в ней результаты соответствуют паспорту специальности по следующим пунктам: п. 2 «Исследование характеристик антенн и СВЧ устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.»; п. 3 «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных устройств СВЧ, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы из 113 наименований и 3 приложений. Текст диссертации изложен на 198 страницах, поясняется 150 рисунками и 10 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований с учётом современных тенденций и воззрений в области антенной техники СВЧ, когда ключевые положения системного подхода к проектированию радиотехнических и телекоммуникационных систем должны быть дополнены детально отработанными процедурами создания перспективной элементной базы в печатном или микроэлектронном исполнении с высоким процентом выхода годных изделий, реализуемых типовыми операциями формообразования на современном технологическом оборудовании предприятий отечественной радиопромышленности. При этом ставится цель и конкретизируются задачи диссертационного исследования с развёрнутой характеристикой научной новизны и практической значимости работы.

В первом разделе оценивается степень проработанности проблемы совершенствования и модернизации печатных многолучевых линейно поляризованных ФАР с излучателями дипольного вида. В ходе ретроспективного обзора литературы проводится анализ достоинств и слабых сторон, ранее разработанных ФАР упомянутого класса. При этом значительное внимание уделяется схемно-техническим и конструкторско-технологическим особенностям реализации печатных дифференциальных фазовращателей (ДФВ), тщательность отработки которых оказывает существенное влияние на формирование направленного излучения всей решётки (иными словами: на направления главных лучей решётки по азимуту в горизонтальной плоскости). Это обусловлено тем, что модернизированные печатные излучатели дипольного вида характеризуются, как правило, вполне приемлемой воспроизводимостью/повторяемостью излучательных характеристик от образца к образцу, так как ширины их диаграмм направленности по уровню половинной мощности весьма значительны (порядка 60 градусов). При этом, требуемая точность формирования фазовых сдвигов в ДФВ составляет не более $\pm 1,5$ градусов, причем такая точность должна быть обеспечена в относительной полосе частот порядка 70%. Достичь такой широкополосности на текущем этапе развития антенно-фидерной техники возможно только при использовании в фазовращателях хорошо (в пределе: идеально) согласованных с

трактом противонаправленных (по другой терминологии: с направленностью 2-го типа) печатных направленных ответвителей на отрезках электромагнитно связанных линий передачи (рисунок 1). Кроме того, в обзоре проанализированы ключевые особенности излучателей дипольного вида, использовавшихся в ранее опубликованных работах. На основе обобщения с позиций системного подхода намечаются пути реализации новых/модернизированных излучателей (рисунок 2, а, б), которые будут способствовать возрастанию точности установки лучей ФАР в требуемых направлениях окружающего пространства при повышенных показателях производственной и эксплуатационной технологичности.

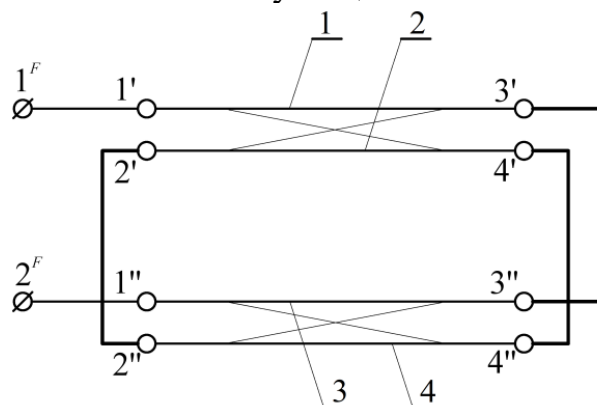


Рисунок 1 – Дифференциальный фазовращатель

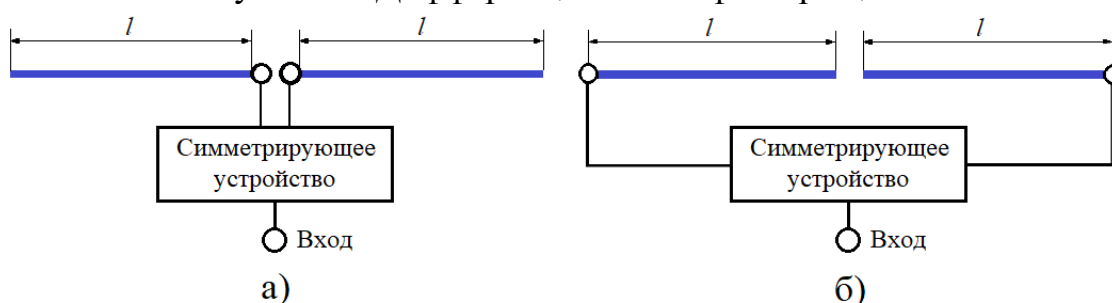


Рисунок 2 – Структурные схемы излучателей дипольного вида: а) центрально-питаемый; б) с концевым питанием

Второй раздел посвящён синтезу печатных ДФВ новой структуры, широкополосность которых превышает такую у всех ранее опубликованных фазовращателей и составляет относительную полосу частот порядка 70%. Предлагаемая структура, выполненная на электромагнитно связанных линиях с дополнительно введённым кольцевым полосковым проводником, позволяет реализовать минимально возможную на сегодняшний день неравномерность фазочастотных характеристик в трактах многолучевой антенны ($\pm 1,5^\circ$) и, тем самым, повысить точность установки главных лучей ФАР в требуемых направлениях окружающего пространства.

Поскольку предлагаемые ДФВ проектировались на основе направленных ответвителей, то целесообразно было систематизировать и конкретизировать известные результаты исследований самих направленных ответвителей (НО) на связанных линиях. После цикла работ и этапа схемно-конструкторского проектирования и электродинамического моделирования был получен четвертьволновый НО, обеспечивающий в рабочей полосе частот 2...2,4 ГГц

коэффициент передачи $-3,15 \pm 0,02$ дБ и разность фазовых набегов между выходными контактами $90 \pm 0,5^\circ$.

Идея построения ДФВ, описываемого во втором разделе, основана на результатах из работы [77]. В работе [77] представлен анализ нетрадиционных всепропускающих четырёхполосников СВЧ на связанных линиях. Структурная схема (рисунок 1), содержит следующие наименования участков: $1^F, 2^F$ – вход и выход ДФВ; 1, 2 – связанные линии первого восьмиполосника; $1', 2', 3', 4'$ – плечи первого восьмиполосника; 3, 4 – связанные линии второго восьмиполосника; $1'', 2'', 3'', 4''$ – плечи второго восьмиполосника.

Формируемый в связанных линиях 1 и 3 СВЧ ток, за счёт связи с кольцевым проводником (связанные линии 2 и 4), создаёт в кольцевом проводнике наведённый циркулирующий ток.

Расчёт оптимальных коэффициентов связи в восьмиполосниках k_{12} и k_{34} проводился в пакете «MathCAD» для ДФВ с фазовыми сдвигами $22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 90^\circ$ с отклонениями $\pm 0^\circ, \pm 2^\circ, \pm 4^\circ, \pm 6^\circ, \pm 8^\circ, \pm 10^\circ$. Согласно математическому моделированию ФЧХ $\psi(f)$ ДФВ разнится с линейным законом на $\pm 2^\circ$ в полосе частот около полторы октавы. На рисунке 3 представлена топология ДФВ с фазовым сдвигом 45° , построенная на основе направленных ответвителей соединённых таким образом, что на обратной стороне диэлектрической плёнки связанные линии формируют кольцевой проводник. Расчёты проводились для использования диэлектрических материалов ФАФ-4Д и Ф4МБСФ с относительной диэлектрической проницаемостью 2,5.

Размеры, представленные на рисунке 3 (в миллиметрах):

$$B = 19,8; \quad C = 37,6; \quad b = 0,23; \quad t_F = 0,035;$$

$$w_0 = 2,3; \quad w = 1,15; \quad D_{\min} = 5,5; \quad s_K = 0,5;$$

$$s_{13} = 6,5; \quad s_{24} = 5,1; \quad s_{12} = s_{34} = 0,7; \quad l = 22.$$

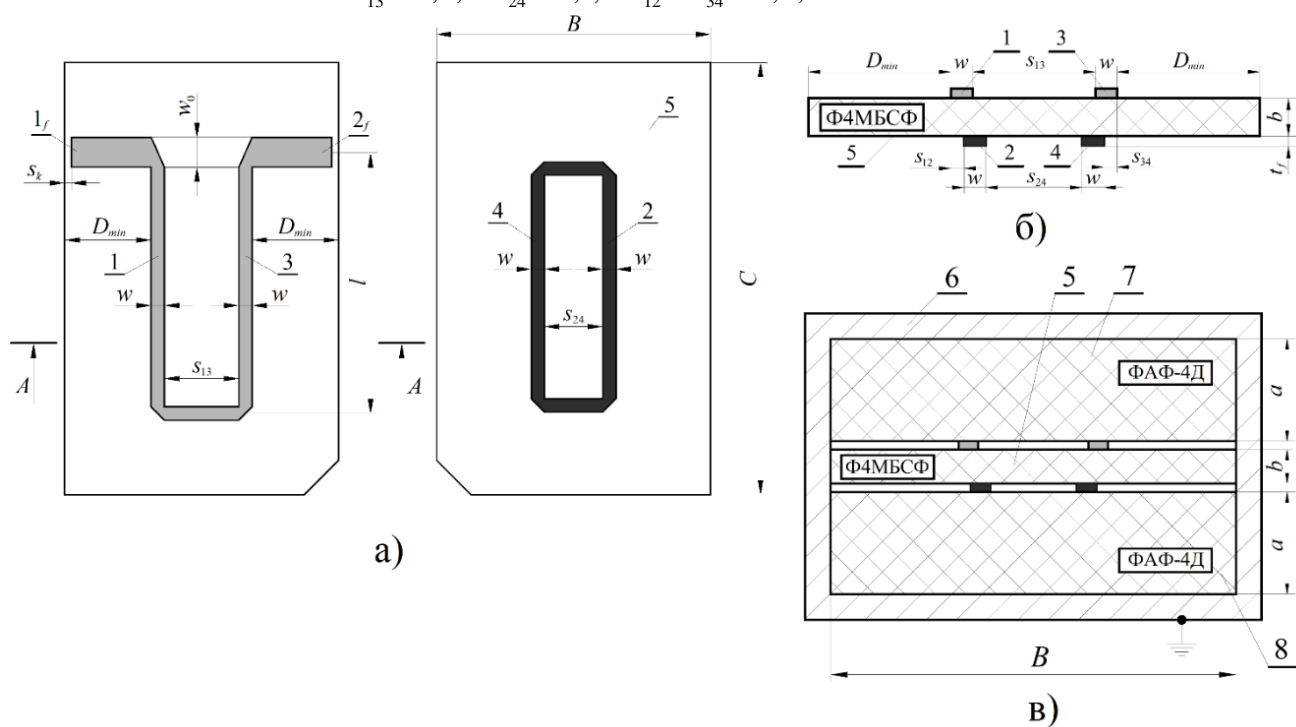


Рисунок 3 – Структура ДФВ: а) топология двухсторонней печатной платы ДФВ; б) поперечное сечение ДФВ; в) поперечное сечение ДФВ в корпусе

После трёхмерного полноволнового моделирования в пакете «CST STUDIO SUITE» и оптимизации АЧХ, ФЧХ посредством изменения геометрических параметров методом доверительных интервалов была получена конечная топология ДФВ (рисунок 4, а) для фазового сдвига $45 \pm 1,5^\circ$ (рисунок 4, б, сплошная линия – моделирование, штриховая линия – эксперимент). Аналогичным образом были проведены расчёты размеров и электродинамических характеристик ДФВ $22,5 \pm 1,5^\circ$ и $67,5 \pm 1,5^\circ$, которые изложены в результатах диссертационной работы.

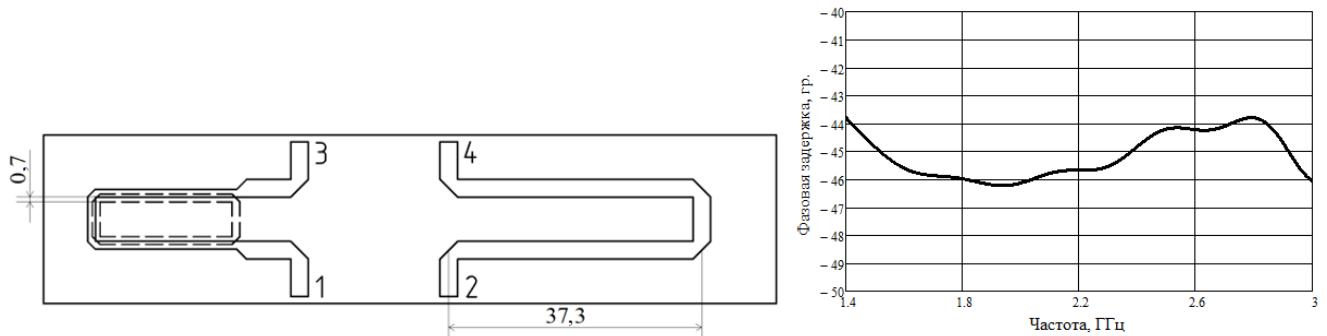


Рисунок 4 – Топология ДФВ и соответствующая ему фазовая задержка $45 \pm 1,2^\circ$ (сплошная линия – моделирование, штриховая линия – эксперимент)

Аналогичным образом могут быть рассчитаны ДФВ на любую задержку в достаточно широкой полосе частот порядка 70%.

В третьем разделе представлены печатные центральнопитаемый дипольный излучатель (рисунок 2, а), излучатель дипольного вида с концевым питанием (ИДВКП) (рисунок 2, б) и многоэлементный ИДВКП (рисунок 5).

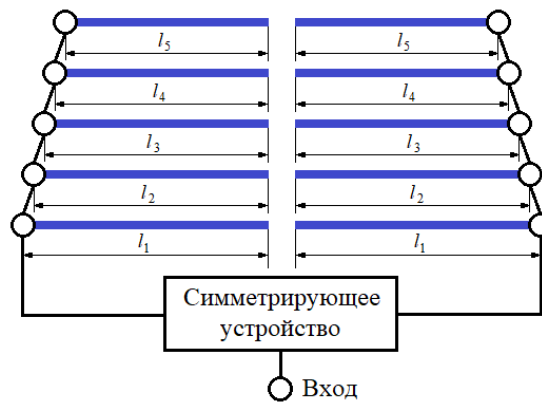


Рисунок 5 – Структурная схема многоэлементного ИДВКП

В качестве диэлектрического материала для моделей излучателей использован двусторонне фольгированный ФАФ-4Д с относительной диэлектрической проницаемостью 2,5, имеющий толщину 1,5 мм (толщина металлизации 35 мкм). Электродинамический анализ моделей вышеназванных излучателей в программе «CST STUDIO SUITE» показал вполне приемлемые результаты. На рисунке 6 представлены топологии трёх типов излучателей, на рисунке 7 – графики коэффициентов отражения по входам излучателей, на рисунке 8 – диаграммы направленности (ДН) трёх типов излучателей в плоскости E -вектора.

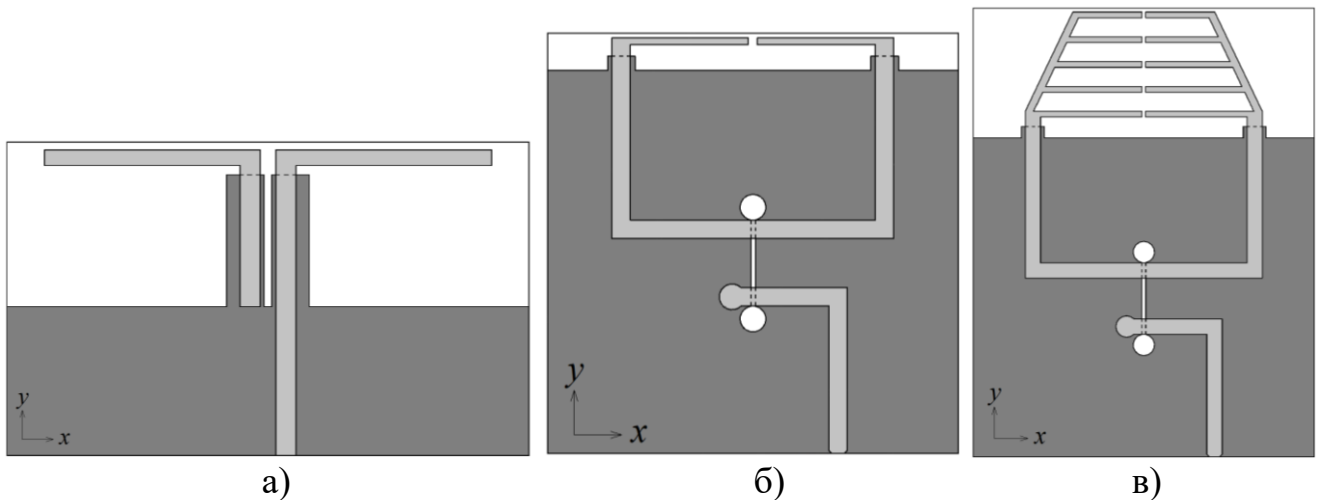


Рисунок 6 – Топологии антенн: а) дипольный излучатель с центральным питанием; б) ИДВКП; в) многоэлементный ИДВКП

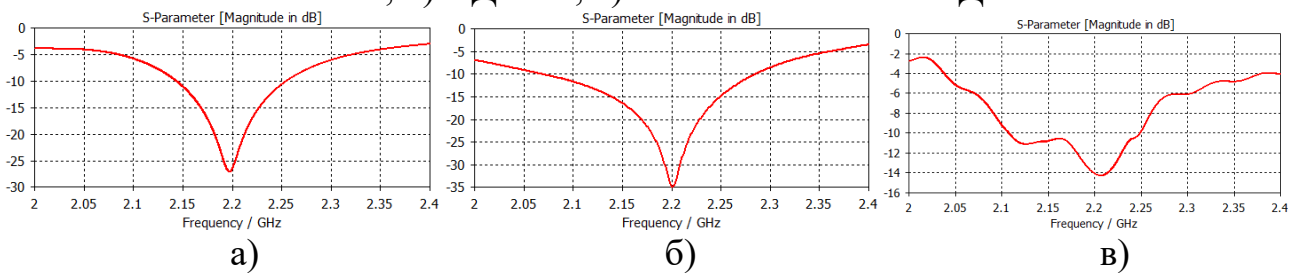


Рисунок 7 – Графики коэффициентов отражения по входам антенн: а) дипольный излучатель с центральным питанием; б) ИДВКП; в) многоэлементный ИДВКП

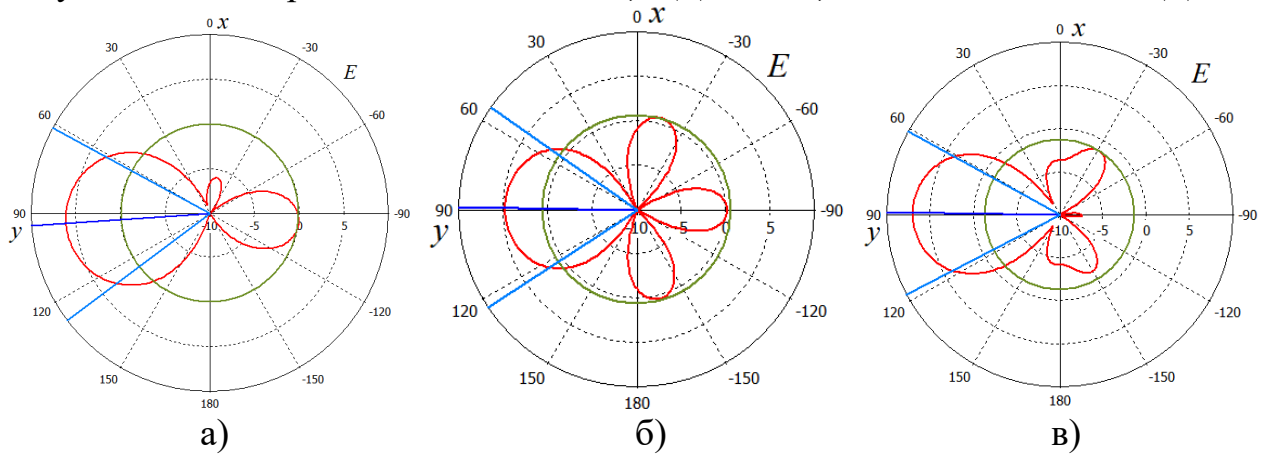


Рисунок 8 – Диаграммы направленностей антенн: а) дипольный излучатель с центральным питанием; б) ИДВКП; в) многоэлементный ИДВКП

По представленным выше характеристикам излучателей можно прийти к следующим выводам: излучатели с концевым питанием имеют частотную полосу согласования по уровню -10 дБ на 5% больше, чем излучатель с центральным питанием; уровень усиления главного лепестка многоэлементного ИДВКП по сравнению с ИДВКП увеличен на 2,18 дБ и составил 6,93 дБ, а по сравнению с излучателем с центральным питанием больше на 0,83 дБ.

В диссертационной работе при помощи метода наводимых ЭДС получены импедансные характеристики многоэлементного ИДВКП.

В четвертом разделе представлены математическое описание и электродинамическое моделирование ДОО Батлера 4×4 и 8×8 с двумя модификациями: для узкополосной работы (статические фазовращатели) «ДОО

4x4»; для широкополосной работы в полторы октавы (модифицированные дифференциальные фазовращатели) «ДОУ 4x4 (ДФВ)» и «ДОУ 8x8 (ДФВ)». Топологии ДОУ представлены на рисунке 9, где светло-серым цветом обозначена металлизация на лицевой стороне диэлектрической плёнки, а тёмно-серым цветом – металлизация на обратной стороне.

Проведя электродинамическое моделирование, были получены следующие характеристики: коэффициент передачи «ДОУ 4x4» $-6,05 \pm 1,1$ дБ, «ДОУ 4x4 (ДФВ)» $-6,2 \pm 0,6$ дБ, «ДОУ 8x8 (ДФВ)» $-9,4 \pm 1,4$ дБ; максимальное отклонение от номинальных фазовых сдвигов в пределах 8° ; развязка между входами не более $-14,3$ дБ; коэффициенты отражения по входам не более -11 дБ; рабочая полоса частот «ДОУ 4x4» 2,1...2,3 ГГц, «ДОУ 4x4 (ДФВ)» 1,8...2,6 ГГц, «ДОУ 8x8 (ДФВ)» 1,65...2,7 ГГц.

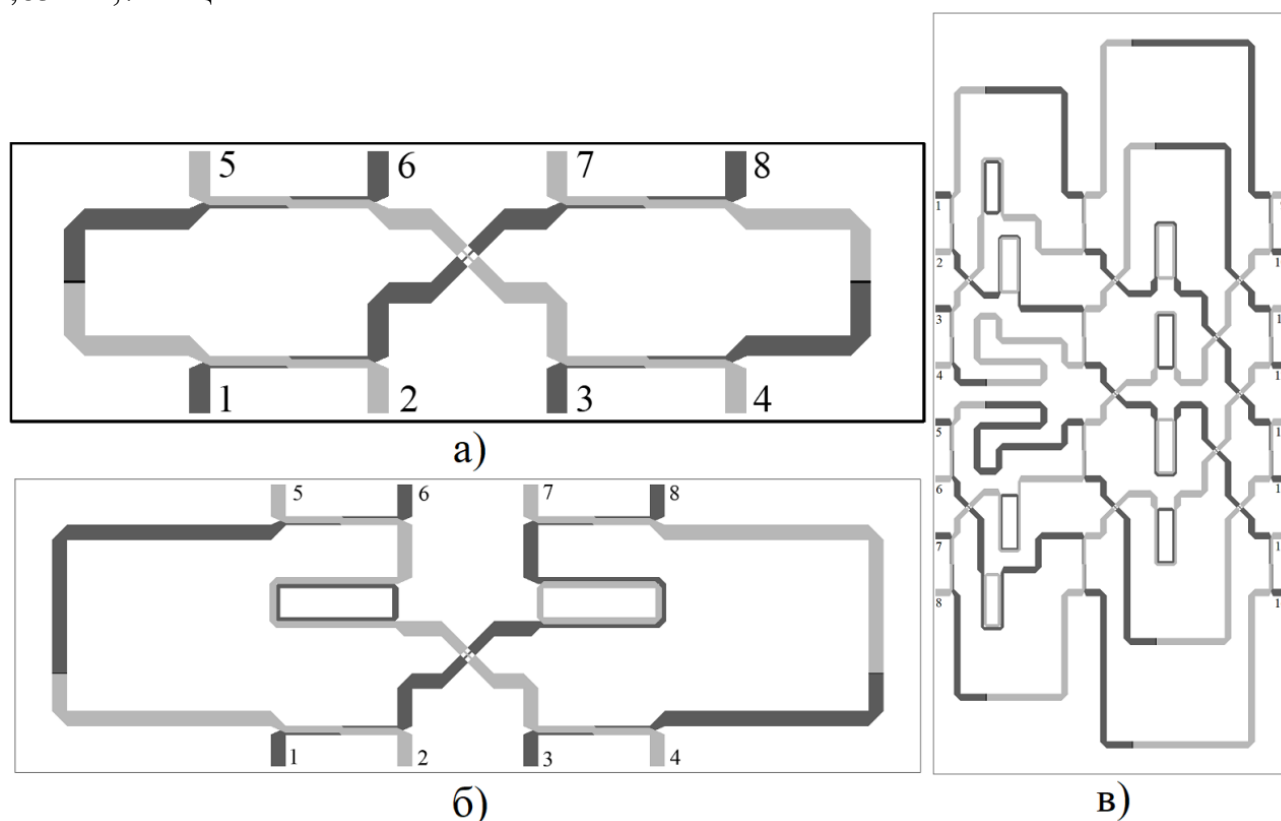


Рисунок 9 – Топологии ДОУ Батлера: а) 4x4 со статическими фазовращателями; б) 4x4 с модифицированными дифференциальными фазовращателями; в) 8x8 с модифицированными фазовращателями

В пятом разделе представлен сравнительный анализ результатов компьютерного полноволнового электродинамического моделирования и экспериментальных лабораторных исследований в безэховой камере четырёхлучевых и восьмилучевых фазированных антенных решёток. Антенные решётки скомбинированы из различных типов излучателей из раздела 3 и ДОУ Батлера из раздела 4 диссертации. В итоге получен следующий список исследованных фазированных антенных решёток:

1. 4-лучевая ФАР с дипольными излучателями с центральным типом питания, симметрирующим устройством типа «ласточкин хвост» и матрицей Батлера 4x4 со статическими фазовращателями;

2. 4-лучевая ФАР с дипольными излучателями с центральным типом питания, симметрирующим устройством типа «ласточкин хвост» и матрицей Батлера 4x4 с модифицированными дифференциальными фазовращателями;

3. 4-лучевая ФАР с излучателями дипольного вида с концевым питанием и матрицей Батлера 4x4 с модифицированными дифференциальными фазовращателями;

4. 4-лучевая ФАР с многоэлементными излучателями дипольного вида с концевым питанием и матрицей Батлера 4x4 с модифицированными дифференциальными фазовращателями;

5. 8-лучевая ФАР с излучателями дипольного вида с концевым типом питания и матрицей Батлера 8x8 с модифицированными дифференциальными фазовращателями;

6. 8-лучевая ФАР с многоэлементными излучателями дипольного вида с концевым питанием и матрицей Батлера 8x8 с модифицированными дифференциальными фазовращателями.

Результаты моделирования и экспериментальных исследований ФАР в безэховой камере с небольшой погрешностью коррелируются с теоретическими значениями характеристик, таких как коэффициенты отражений по входам ФАР, максимумы главных лепестков диаграмм направленностей и их направления, развязка между входными портами. На рисунке 10 представлены фотографии изготовленных ФАР в безэховой камере. В приложении А диссертационной работы приведены топологии металлизированных поверхностей каждой диэлектрической заготовки всех ФАР, перечень которых представлен выше.

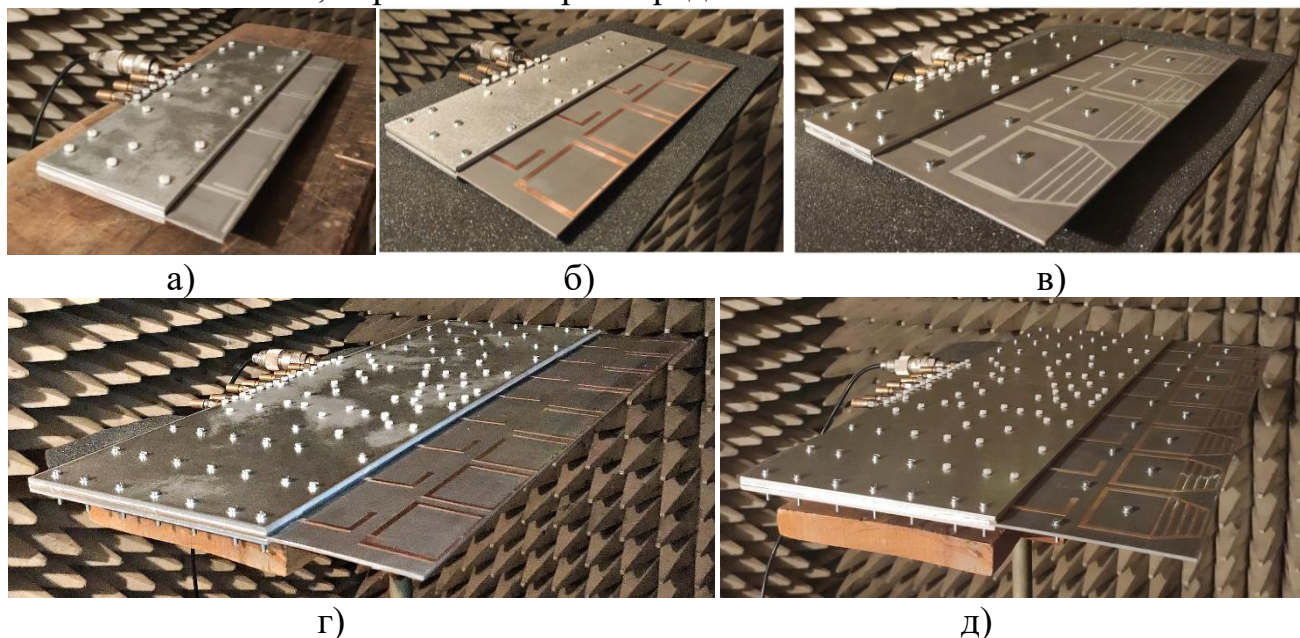


Рисунок 10 – ФАР в безэховой камере: а) № 2; б) № 3; в) № 4; г) № 5; д) № 6

На рисунках 11-13 представлены результаты экспериментального исследования 4-лучевой ФАР с ИДВКП и 8-лучевой ФАР с многоэлементными ИДВКП, измеренные в безэховой камере с помощью векторного анализатора цепей «Обзор-804». На рисунках 12, 13 отображены чёрными линиями теоретические направления углов, красными линиями ДН, полученные во время моделирования, а синими пунктирными линиями ДН, полученные в ходе эксперимента.

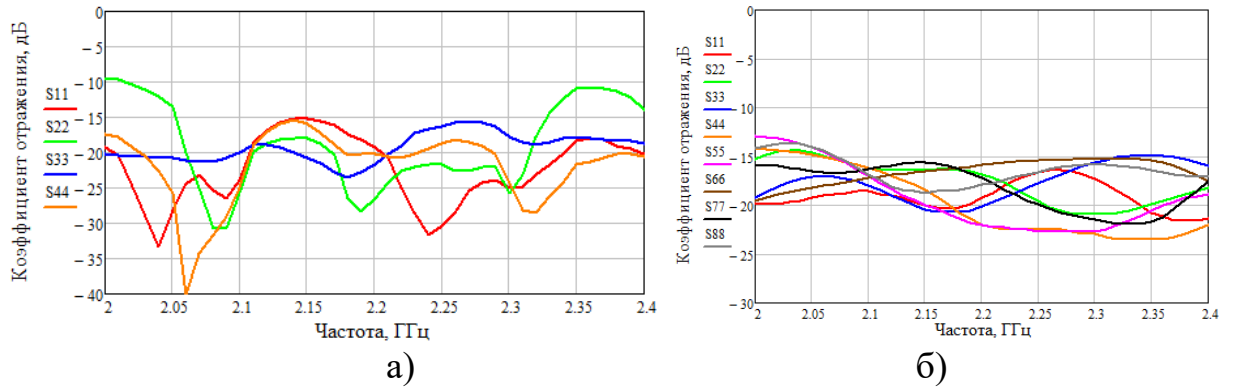


Рисунок 11 – Измеренный коэффициент отражения по входам: а) 4-лучевой ФАР с ИДВКП; б) 8-лучевой ФАР с многоэлементными ИДВКП

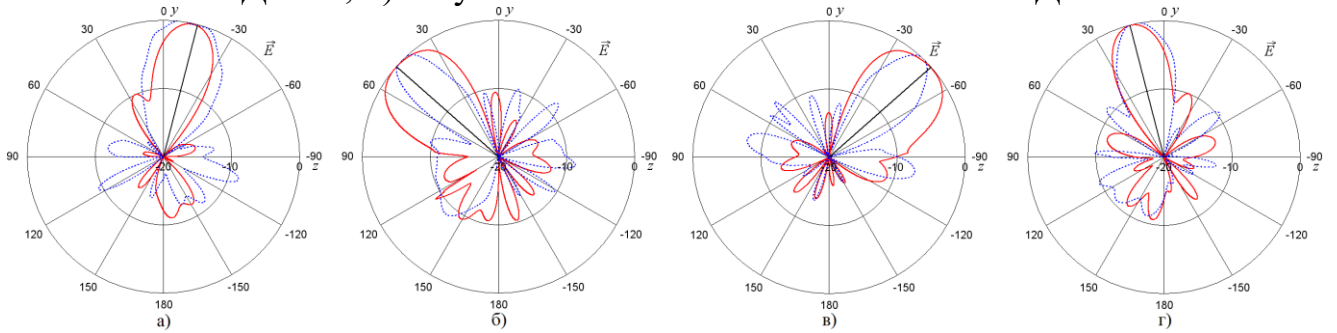


Рисунок 12 – Смоделированные и измеренные диаграммы направленности 4-лучевой ФАР с ИДВКП в плоскости E -вектора на частоте 2,2 ГГц по входам номер: а) один; б) два; в) три; г) четыре

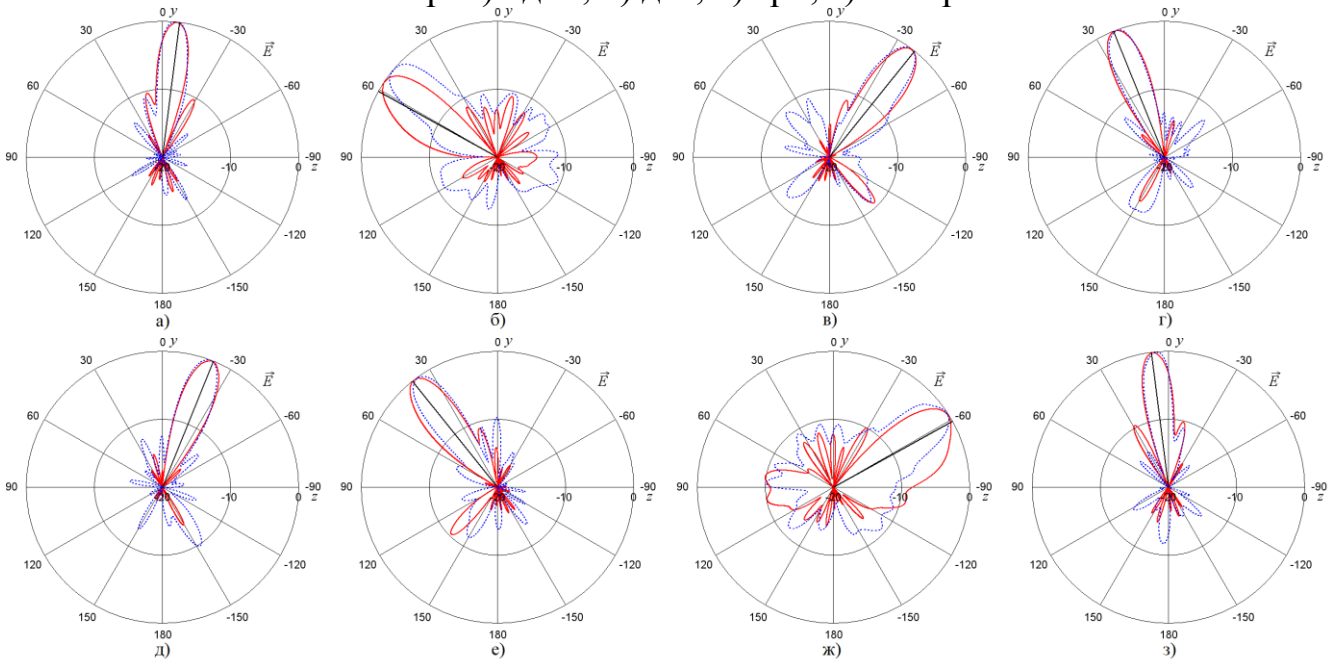


Рисунок 13 – Смоделированные и измеренные диаграммы направленности 8-лучевой ФАР с многоэлементными ИДВКП в плоскости E -вектора на частоте 2,2 ГГц по входам номер: а) один; б) два; в) три; г) четыре; д) пять; е) шесть; ж) семь; з) восемь

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная диссертационная работа посвящена проблемам печатных многолучевых фазированных антенных решёток с излучателями дипольного вида с концевым типом питания. В работе были достигнуты следующие результаты:

1. Проведён ретроспективный анализ проведенных исследований по данной тематике, начиная с 1955 года и по настоящее время.

2. Синтезирован новый печатный дифференциальный фазовращатель на полуволновых отрезках электромагнитно связанных полосковых линий с предельным разбросом отклонений фазовых сдвигов 3° от номинальных значений в частотной полосе порядка 70%.

3. Получены импедансные характеристики многоэлементного ИДВКП при помощи метода наводимых ЭДС. Представлены результаты электродинамического моделирования излучателей следующих видов: дипольного излучателя с центральным питанием; ИДВКП; многоэлементного ИДВКП.

4. Выработаны подходы к модификации конструкторско-компоновочных схем ДООУ Батлера. Представлены математическое описание и электродинамическое моделирование диаграммообразующих схем Батлера 4x4 и 8x8 с двумя модификациями: для узкополосной работы (статические фазовращатели) в полосе частот порядка 9%; для широкополосной работы (модифицированные дифференциальные фазовращатели) в полосах частот порядка 36% (ДООУ Батлера 4x4) и 48% (ДООУ Батлера 8x8).

5. Представлен сравнительный анализ результатов компьютерного электродинамического моделирования и экспериментальных лабораторных исследований в безэховой камере четырёхлучевых и восьмилучевых ФАР: 4-лучевая ФАР с дипольными излучателями с центральным типом питания и ДООУ Батлера 4x4 со статическими фазовращателями; 4-лучевая ФАР с ИДВКП и ДООУ Батлера 4x4 с модифицированными ДФВ; 4-лучевая ФАР с ИДВКП и ДООУ Батлера 4x4 с модифицированными ДФВ; 4-лучевая ФАР с многоэлементными ИДВКП и ДООУ Батлера 4x4 с модифицированными ДФВ; 8-лучевая ФАР с ИДВКП и ДООУ Батлера 8x8 с модифицированными ДФВ; 8-лучевая ФАР с многоэлементными ИДВКП и ДООУ Батлера 8x8 с модифицированными ДФВ.

Топологии, представленных в работе устройств рекомендованы к применению, как в качестве самостоятельных устройств, так и составных элементов для интеграции в СВЧ тракты связных, спутниковых, навигационных и радиолокационных систем.

Дальнейшие научные исследования будут направлены на улучшение технических и массогабаритных характеристик, предложенных в работе излучателей, фазовращателей, ДООУ и ФАР.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.* Печатная дипольная 8-лучевая антенная решетка с диаграммообразующей матрицей Батлера на связанных полосковых линиях // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 4. – С. 65-70.
2. *Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.* Проектирование 4-лучевой печатной фазированной антенной решетки с матрицей Батлера // Доклады Академии наук Высшей школы, НГТУ. – 2019. – № 3 (44). – С. 34-47.
3. *Алексейцев С.А., Бухтияров Д.А., Горбачев А.П., Паршин Ю.Н., Тарасенко Н.В.* Печатные двухдиапазонные излучатели дипольного вида с концевым питанием // Вестник Концерна ВКО "Алмаз - Антей". – 2019. – № 4 (31). – С. 35-42.
Имеется перевод, выполненный самой редколлегией в англоязычном выпуске журнала: *Alekseytsev S.A., Bukhtiyarov D.A., Gorbachev A.P., Parshin Yu.N., Tarasenko N.V.* Printed dual-band end-feed dipole radiators // Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation. – 2019. – № 4. – С. 35-42.
4. *Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.* Печатная четырёхлучевая фазированная антенная решётка с модифицированными дифференциальными фазовращателями // Вопросы радиоэлектроники. – 2020. – № 2. – С. 38-45.
5. *Паршин Ю.Н.* Печатный модифицированный дифференциальный фазовращатель // Вопросы радиоэлектроники. – 2021. – № 2. – С. 28-33.
6. *Алексейцев С.А., Паршин Ю.Н.* Электродинамика проводных двухдиапазонных излучателей дипольного вида с концевым типом возбуждения // Вестник Концерна ВКО "Алмаз - Антей". – 2021. – № 3. – С. 31-39.
Имеется перевод, выполненный самой редколлегией в англоязычном выпуске журнала: *Alekseytsev S.A., Parshin Yu.N.* Electrodynamics of dual-band end-fed wire dipole radiators // Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation. – 2021. – № 3. – С. 31-39.

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных «Web of Science»:

1. *Gorbachev A.P., Parshin Y.N.* All-pass phaser on a base of half-wave coupled-line section and its application // Microwave and Optical Technology Letters. – 2021. – Т. 63. – № 10. – С. 2570-2575.

Патенты:

1. Патент RU № 2729513 С1. Полосковый фазовращатель / *Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.* – Опубл. 07.08.2020, Бюл. № 22.
2. Патент RU № 2757538 С1. Диаграммообразующее устройство / *Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.* – Опубл. 18.10.2021, Бюл. № 29.

Сборники всероссийских и международных конференций:

1. *Горбачев А.П., Паршин Ю.Н.* Диаграммообразующая матрица Батлера 8x8 // Наука Промышленность Оборона. Труды XIX Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. – Новосибирск. – 2018. – С. 267-269.
2. *Parshin Y.N.* 8-ray antenna grid with diagram-forming Butler matrix // Science. Research. Practice. Proceedings 2018. IInd all Russia academic and research conference

- of graduate and postgraduate students December 20, 2018. Novosibirsk. NSTU. – 2019. – С. 161-163.
3. *Alekseytsev S.A., Bondareva A.V., Gorbachev A.P., Parshin Y.N.* An Investigation of Nontraditional Phased Array Components // 20th International Conference on Micro/Nanotechnologies and electron devices EDM 2019. – С. 160-165.
 4. **Паршин Ю.Н.** 4-лучевая антенная решетка на основе матрицы Батлера 4x4 с использованием фазовращателей Шиффмана // Наука Промышленность Оборона. Труды XX Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. – Новосибирск. – 2019. – Т. 2. – С. 259-263.
 5. *Alekseytsev S.A., Gorbachev A.P., Parshin Y.N.* An Investigation of Novel Active Phased Array Components // 14 International forum on strategic technology (IFOST 2019): proc., Tomsk, 14-17 Oct. 2019. – Tomsk: TPU Publ. House, 2019. – С. 177-182.
 6. **Паршин Ю.Н.** Матрица Батлера 4x4 с фазовращателями Шиффмана // III научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019. XXI Международная научно-техническая конференция: Проблемы техники и технологий телекоммуникаций. – Казань. – 2019. – С. 485-486.
 7. **Паршин Ю.Н.** Четырёхлучевая ФАР с матрицей Батлера и фазовращателями Шиффмана // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов. В 9-ти частях. Под редакцией А.В. Гадюкиной. – Новосибирск. – 2019. – Ч. 6. – С. 104-108.
 8. **Паршин Ю.Н.** Четырёхлучевая ФАР с излучателями концевоего типа // Сборник трудов XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». Томск. – 2020. – С. 93-95.
 9. *Alekseytsev S.A., Bondareva A.V., Gorbachev A.P., Parshin Y.N.* Towards the Study of High-Frequency Phased Antenna Array Components // 21th International Conference on Micro/Nanotechnologies and electron devices EDM 2020. – С. 87-93.
 10. *Alekseytsev S.A., Gorbachev A.P., Parshin Y.N.* An Analysis of Microwave Radiators in Order to Diminish the Array Scan Blindness // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE) – 2020. Novosibirsk. – 2020. – С. 64-68.
 11. **Parshin Y.N.** Wideband phase shifters at 22.5, 45 and 67.5 degrees // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE) – 2020. Novosibirsk. – 2020. – С. 84-87.
 12. **Паршин Ю.Н.** Фазированная антенная решётка на основе матрицы Батлера 4x4 с модифицированными фазовращателями // Наука Промышленность Оборона. Труды XXII Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. – Новосибирск. – 2021. – Т. 2. – С. 324-328.
 13. *Alekseytsev S.A., Gorbachev A.P., Parshin Y.N.* Printed Radiating and Radiation Pattern – Forming Elements for Digital Antenna Arrays Purposes // 22th International Conference on Micro/Nanotechnologies and electron devices EDM 2021. – С. 171-175.