



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»
(ГУАП)**

Большая Морская ул., д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000
Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057
E-mail: common@aanet.ru; http://www.guap.ru
ОКПО 02068462; ОГРН 1027810232680
ИНН/КПП 7812003110/783801001

20.06.2022 № 54-2162/22

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГАУ ВО

«Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения», д.т.н., профессор,



Антохина Ю.А.

20.06.2022 г.

О Т З Ы В

ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на диссертационную работу Паршина Юрия Николаевича «Печатные многолучевые антенные решётки с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Актуальность темы диссертационной работы

Проектирование радиотехнических систем с линейной поляризацией излучаемых радиоволн сверхвысоких частот (СВЧ), базирующееся чаще всего на увеличении выходной мощности, широкополосности и росте коэффициентов усиления их антенн, – актуальная научно-техническая проблематика с широким спектром особенностей в различных приложениях. Создание устройств, соответствующих упомянутым сферам применения и содержащих зачастую сотни функциональных модулей, предъявляет все возрастающие требования не только к их структуре и компонентам, но и к базовым линейно поляризованным излучающим модулям в отношении широкополосности, миниатюризации и адаптации к современным возможностям интегрально-групповых методов реализации при широком использовании автоматизированных методов проектирования. Эти задачи характерны для современного этапа развития микроволновых технологий в телекоммуникациях и радиолокации,

обуславливая постоянное внимание к поиску новых подходов по их комплексному разрешению.

Многолучевые фазированные антенные решётки (ФАР) с использованием диаграммообразующих устройств (матриц) Батлера являются излучающими СВЧ системами, характеризующимися рядом известных особенностей, способствующих их востребованности уже более полувека с начала 1960-х годов. Наряду с устойчивой и поляризационно селективной радиосвязью между абонентами, находящимися достаточно продолжительное время в трудно доступных местах с неизменными долготой и широтой, матрицы Батлера широко применяются в многоканальных усилителях спутниковых телекоммуникационных систем с уплотнением каналов, обеспечивая существенную экономию ресурса бортовых источников энергии. Печатное исполнение модифицированных матриц Батлера и антенных полотен многолучевых ФАР из новых излучателей дипольного вида на единственной планарной заготовке (т.е., без каких-либо соединительных коаксиальных кабелей) создает предпосылки к повышению производственной и эксплуатационной технологичности, когда десятки/сотни элементов реализуются с использованием групповых технологий микроэлектроники и полосковых микросхем СВЧ.

Поэтому тема диссертационной работы Ю.Н. Паршина, в которой решаются задачи, возникающие при проектировании нового семейства печатных многолучевых антенн улучшенной архитектуры с использованием излучателей дипольного вида, является актуальной в области антенной техники.

Анализ содержания работы

В состав диссертационной работы входят введение, пять разделов, заключение, список литературы и три приложения. По объёму и оформлению (198 страниц, 150 рисунков и 10 таблиц) работа соответствует требованиям и положениям ВАК РФ для диссертаций, представленных на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Введение диссертационной работы содержит характеристику ключевых критериев, задействованных при проектировании и модернизации печатных многолучевых фазированных антенных решёток в рамках современных требований к миниатюризации и технологичности антенно-фидерных узлов. Там обоснована актуальность темы диссертационного исследования, определены его цель и задачи, охарактеризован состав и структура работы, показаны научная новизна и практическая значимость её результатов, сформулированы четыре положения, выносимые на предстоящую защиту. В

нём же приведены сведения об апробации предложенных соискателем подходов, а также перечислены работы, в которых опубликованы основные результаты, полученные автором в ходе данного диссертационного исследования.

Первый раздел содержит обзор ранее опубликованных отечественных и зарубежных работ, посвящённых многолучевым ФАР, а также проведён их сравнительный анализ, в ходе которого оценивается степень проработанности проблемы совершенствования и модернизации печатных многолучевых линейно поляризованных ФАР с излучателями дипольного вида. Охарактеризованы диаграммообразующие устройства Батлера, играющие ключевую роль в многолучевом диаграммообразовании, включая базовые излучатели, используемые для формирования антенного полотна таких ФАР. Отмечается, что во многих случаях в полотне ФАР используются классические полуволновые диполи с питанием в их центрах на смежных клеммах. Непосредственная близость этих клемм при печатной реализации диполей приводит к выраженным затруднениям конструктивно-технологического плана, когда приходится выполнять весьма плотную и насыщенную печатными фрагментами питающих линий трассировку вблизи центральных смежных клемм диполей. Неизбежные при плотной трассировке изгибы и повороты печатных проводников приводят к заметному росту входного коэффициента отражения и уровня диссипативных потерь в проводниках и диэлектрике. В качестве возможного средства упрощения трассировки и снижения потерь автором предлагается использовать в антенных решётках линейные излучатели дипольного вида с концевым питанием. Упомянутые излучатели с концевым питанием запатентованы в Новосибирском государственном техническом университете 10 лет назад и за истекшие годы успешно применены при проектировании печатных директорных антенн и волноводно-дипольных антенн на базе прямоугольного и круглого волноводов с доминантными типами волн. При этом успешно защищены две кандидатских диссертации Дмитрием Андреевичем Бухтияровым (2018) и Сергеем Александровичем Алексейцевым (2021). Завершается раздел характеристикой предстоящих исследований печатных многолучевых ФАР на основе таких излучателей дипольного вида.

Второй раздел посвящён особенностям проектирования печатных 3-децибельных направленных ответвителей и синтезу дифференциального фазовращателя на основе таких ответвителей, структура которого защищена патентом Российской Федерации. Синтезированный дифференциальный фазовращатель превосходит представленные в обзоре конструкции по полосе рабочих частот, которая составила 70% при предельном разбросе отклонений фазовых сдвигов 3° . Отличительной особенностью данного фазовращателя

является то, что он состоит из двух «тандемно» соединённых направленных ответвителей таким образом, что плечи ответвителей формируют кольцевой проводник на обратной стороне диэлектрической подложки. В кольцевом проводнике формируется наведённый ток, который и обеспечивает требуемую нелинейность фазового сдвига в широкой полосе частот. При этом был изготовлен полосковый фазовращатель для дифференциального фазового сдвига 45° (для центральной частоты 550 МГц), который затем экспериментально исследован при помощи векторного анализатора цепей «Обзор 804». Результаты эксперимента подтверждают, что электродинамическое моделирование с хорошей точностью представляет характеристики разработанных автором топологий дифференциальных фазовращателей на $22,5^\circ$, 45° и $67,5^\circ$ для центральной частоты 2,2 ГГц. Эти результаты позволили автору заключить, что разработанная им методика позволяет проектировать фазовращатели на произвольную фазовую задержку в достаточно широкой полосе частот, достигающей полутора октав.

Третий раздел посвящён проектированию интегрированных печатных дипольных излучателей и модифицированных излучателей дипольного вида с концевым питанием. Были спроектированы излучатели следующих видов: излучатель с центральным питанием диполя и симметрирующим устройством типа «ласточкин хвост»; излучатель дипольного вида с концевым питанием и симметрирующим устройством в виде щелевого делителя мощности; многоэлементный излучатель дипольного вида с концевым питанием и симметрирующим устройством в виде щелевого делителя мощности. Кроме этого, для последнего, при помощи метода наводимых ЭДС получены импедансные характеристики, позволяющие в конечном итоге рассчитать размеры излучателя. По завершении работы каждого подраздела осуществлена заключительная/финишная верификация размеров топологий излучателей в системе трёхмерного полноволнового электродинамического моделирования «CST Studio Suite». Многоэлементный излучатель дипольного вида с концевым питанием, представляющий из себя пять параллельно соединённых излучателей дипольного вида с концевым питанием, продемонстрировал вполне приемлемую характеристику согласования при увеличении коэффициента усиления на 2,2 дБ относительно уединённого одноэлементного излучателя дипольного вида с концевым питанием.

В четвёртом разделе разработаны и исследованы печатные диаграммообразующие устройства Батлера. Дополнительно отработан и оптимизирован узел пересечения линий с противоположных сторон печатной заготовки, который вносит негативный эффект в работу диаграммообразующего устройства за счёт электромагнитного взаимодействия

пересекающихся печатных проводников противоположных сторон заготовки. На основе классических структурных схем матриц Батлера 4x4 и 8x8, в состав которых были введены предложенные соискателем дифференциальные фазовращатели, были разработаны, спроектированы, смоделированы и оптимизированы диаграммообразующие устройства с двумя модификациями: устройства для узкополосной работы, включающие в себя статические фазовращатели (классические линии задержки), а также устройства для широкополосной работы в пределах полторы октавы, содержащие модифицированные дифференциальные фазовращатели. Все разработанные устройства не требуют при их практической реализации изготовления нестандартного оборудования и оснастки, что способствует повышению уровня производственной технологичности.

Пятый раздел посвящён верификации характеристик разработанных четырёхлучевых и восьмилучевых фазированных антенных решёток, в ходе которой представлены результаты экспериментальных исследований в сертифицированной безэховой камере на поверенном оборудовании, расположенной на территории новосибирского АО «НПО НИИИП – НЗиК» концерна «ВКО «Алмаз–Антей». Сами экспериментальные образцы были изготовлены на сертифицированном новосибирском заводе по изготовлению печатных плат «Электроконнект» (www.pselectro.ru). В результате экспериментальные исследования подтвердили вполне приемлемое совпадение между собой расчётных и измеренных характеристик многолучевых фазированных антенных решёток на основе модифицированных диаграммообразующих устройств Батлера и предложенных соискателем многоэлементных излучателей дипольного вида с концевым питанием.

В заключении оценены достигнутые результаты работы и сформулированы выводы по их итогам, которые свидетельствуют о завершённости намеченных в первом разделе исследований.

Достоверность научных положений и выводов работы

Обоснованность и достоверность полученных в ходе выполнения работы теоретических результатов базируется на адекватном применении электродинамических методов анализа излучателей электромагнитного поля с линейными ленточными проводниками, корректном использовании матричного аппарата анализа многополюсных электрических цепей СВЧ с распределёнными по длине параметрами, иерархической структуре системного построения диаграммообразующих устройств Батлера, а также электродинамической теории излучения линейных эквидистантных антенных решёток. Поскольку интегральные соотношения метода наводимых

электродвижущих сил (ЭДС) базируются на концепции синусоидального распределения тока проводимости вдоль линейного проводника, в работе выявлены и проанализированы ситуации, когда на части печатных проводников 5-тиэлементных излучателей дипольного вида возможны отклонения от названной концепции. В таких частных случаях автор работы обоснованно применил трёхмерную систему электродинамического моделирования “CST Studio Suite”. Сформулированные выводы подтверждаются также результатами аккуратно выполненных экспериментальных исследований. Кроме того, усовершенствованные соискателем методики анализа и синтеза новых дифференциальных фазовращателей и излучателей дипольного вида верифицированы совпадением их результатов с ранее опубликованными работами, патентами и защищёнными диссертациями других сотрудников ИГТУ, касающихся уединённых излучателей.

Научная новизна результатов

Научная новизна итогов работы обусловлена тем, что классический электродинамический метод наводимых ЭДС при анализе близко расположенных излучателей дипольного вида органически объединён с предложенной соискателем пошаговой итерационной процедурой реализации печатных проводников на единой диэлектрической подложке. В результате автору удалось на системном уровне выработать новую методику проектирования с единых позиций одно- и многоэлементных излучателей дипольного вида в составе антенного полотна многолучевой ФАР с модифицированными автором дифференциальными фазовращателями, включающей требования согласования и направленности излучения в каждом луче одновременно. Представляется, что полученные результаты с высокой степенью вероятности близки к глобальному экстремуму в плане ключевых значений геометрических длин излучающих проводников, зазоров и расстояний между ними.

Практическая ценность результатов работы

Излучатели дипольного вида, предложенные в работе, являются линейно поляризованными с фазовыми центрами, имеющими однозначное и устойчиво воспроизводимое от образца к образцу расположение на антенном полотне многолучевой ФАР. Это создаёт весомые предпосылки к повышению точности позиционирования объектов при использовании таких ФАР в радиотехнических системах пеленгации и в радиолокации. Возможность электронного переключения лучей (и, следовательно, частот зондирующих сигналов) только в активных модулях без какой-либо перестройки структуры/топологии самой

ФАР создаёт хорошие предпосылки для снижения рисков срыва радиосвязи и принятия ошибочных решений в сложной помеховой обстановке радиоэлектронного противодействия и практически предельного использования радиочастотного ресурса.

Внедрение/практическое использование защищаемых положений диссертационной работы в эскизном аван-проекте высокой степени готовности в наукоёмком Новосибирском АО «НПО НИИИП-НЗиК», подведомственном Концерну «Военно-космической обороны «Алмаз-Антей», уже сейчас свидетельствует о практической полезности полученных соискателем результатов и обуславливает задел по их применению в перспективных задачах телекоммуникаций, навигации и радиолокации, решаемых в госкорпорациях и акционерных обществах соответствующей направленности, в частности во ВНИИРА, г. Санкт-Петербург. Работа нашла применение при выполнении проекта, поддержанного грантом НГТУ «Разработка печатной антенной решётки S-диапазона с нестандартными излучающими элементами для специальных задач радиолокационного сегмента» № С21-16, а также в проекте Фонда содействия инновациям в НГТУ по программе УМНИК «Разработка цифровых двухдиапазонных антенных решёток для беспилотных летательных аппаратов» № 77332.

Апробация результатов работы и публикации.

Результаты проведенных исследований поэтапно и ежегодно, начиная уже с первого года обучения в магистратуре, докладывались соискателем на ежегодных научно-технических конференциях, индексируемых в “SCOPUS” и «РИНЦ» (13 докладов). Ключевые положения, являющиеся основой выполненного автором обобщения классической электродинамической теории излучения на предложенные в работе излучатели дипольного вида с концевым питанием и антенные решётки на их основе, сформулированы и развиты соискателем в 6-ти работах в журналах из Перечня, рекомендованного ВАК РФ. Часть вышеупомянутых положений, связанных с системным подходом в реализации сверхширокополосных дифференциальных фазовращателей и матриц Батлера на их основе, опубликована также в англоязычном журнале 3-го квартиля, индексируемого в цитатно-аналитической базе “Web of Science”. В этих же 7-ми работах сформулированы основные этапы разработанной автором методики проектирования многолучевых ФАР с излучателями дипольного вида при концевом их питании. Часть конструкторско-компоновочных решений при реализации узлов многолучевых антенных решёток защищена двумя патентами Российской Федерации, в которых соискатель является одним из двух соавторов с принадлежащим ему вкладом в равной мере.

В автореферате достаточно полно отражено основное содержание диссертационной работы. В нём имеются все предусмотренные Положением ВАК позиции, освещены основные научные результаты, выработанные подходы и защищаемые положения, в том числе процедуры синтеза дифференциальных фазовращателей и матриц Батлера с максимальной на сегодняшний день широкополосностью.

Замечания по работе

При обсуждении результатов работы выявились следующие недостатки.

1) Не нашли отражения вопросы влияния температуры окружающей среды на уровень кросс-поляризованного излучения, которое чувствительно к небольшим изменениям поперечных размеров печатных проводников излучателей дипольного вида при температурных вариациях от (-40) до (+60) градусов Цельсия.

2) Недостаточно подробно освещены вопросы обеспечения одинаковости ширины диаграммы направленности лучей по уровню половинной мощности в Е- и Н-плоскостях одновременно. Между тем, в ряде технических заданий такое обстоятельство может быть весьма востребовано.

3) Неодинаковость глубины теоретической проработки вопросов. Так, выбор оптимальных электрических параметров предложенных дифференциальных фазовращателей с кольцевым проводником проведен весьма обстоятельно. В то же время конкретизации выбора именно пяти элементов в многоэлементном излучателе дипольного вида с концевым питанием уделено гораздо меньше внимания.

4) Не в полной мере представлены данные, необходимые для изготовления экспериментальных образцов. Так, на рисунках 3.7 (стр. 80) и 3.13 (стр. 87) приведены размеры печатных фрагментов излучателей дипольного вида с концевым питанием. Однако найти информацию о допусках на эти размеры в тексте работы не удалось, что может затруднить на этапе реализации выбор временных параметров технологического процесса травления фольги с пробельных мест двухсторонне фольгированной диэлектрической заготовки.

Перечисленные замечания носят локальный характер и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа соответствует требованиям Высшей Аттестационной Комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям по техническим наукам, так как является законченной научно-квалификационной работой, в которой с позиций

системного подхода решена актуальная для области антенной техники СВЧ задача создания методики проектирования с единых позиций многолучевых антенных решёток на базе излучателей дипольного вида с концевым питанием, включая отработку процедур реализации конструкторско-компоновочных решений в рамках групповых технологий микроэлектроники и полосковых микросхем СВЧ с учётом отечественных норм и требований к облицованным медной фольгой листовым диэлектрикам.

Учитывая изложенное выше, считаем, что автор работы Паршин Юрий Николаевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Отзыв на диссертационную работу и её автореферат обсуждён и одобрен на заседании ученого совета института радиотехники, электроники и связи Санкт-петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, состоявшемся «16» июня 2022 года, протокол № 6.

Директор института
радиотехники, электроники и связи,
заведующий кафедрой,
доктор технических наук,
профессор



Бестугин А.Р.

Ученый секретарь ученого совета,
кандидат технических наук, доцент



Балышева О.Л.