

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
доктор технических наук, доцент
Брованов Сергей Викторович



2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Диссертация «Печатные двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбудителя дипольного вида» выполнена на кафедре «Радиоприемные и радиопередающие устройства».

В период подготовки диссертации соискатель Алексейцев Сергей Александрович являлся аспирантом очной формы обучения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на кафедре «Радиоприемные и радиопередающие устройства» (РПиРПУ) по направлению подготовки 11.04.01 – «Радиотехника», нормативный период обучения с 01.09.2018 года по 31.08.2022 года.

В 2018 году окончил с отличием магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по направлению 11.04.01 – «Радиотехника».

Справка № 519 о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2021 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент Горбачев Анатолий Петрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский

государственный технический университет», кафедры «Радиоприемные и радиопередающие устройства», профессор кафедры.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

1. Оценка выполненной соискателем работы

Диссертационная работа Алексея Сергеевича Алексеичева является научно-квалификационной работой, в которой электродинамическая теория классических директорных антенн обобщена на новые двухдиапазонные директорные антенны с возбудителями дипольного вида, питаемыми на удалённых клеммах обеих половин излучателя. На базе выполненного обобщения решён ряд новых актуальных задач по разработке алгоритмов оптимизации и методик проектирования печатных двухдиапазонных директорных антенн различных диапазонов волн. Работа вносит вклад в дальнейшее развитие электродинамической теории двухдиапазонных директорных антенн с учётом конструкторско-технологических особенностей компоновочных схем многодипольных антенн в печатном исполнении. Полученные теоретические результаты позволяют проектировать директорные антенны с приемлемой направленностью и малыми диссипативными потерями в печатном исполнении на фольгированных листовых диэлектрических материалах с соблюдением норм и требований современных российских технологий. Это позволит существенно расширить область применения двухдиапазонных директорных антенн и пополнить номенклатуру базовых излучателей для радиотехнических устройств и систем радиолокации, радионавигации и телекоммуникаций.

2. Актуальность темы диссертационного исследования

Известно, что директорные антенны являются базовыми излучателями (элементной базой) антенных систем радиотехнических комплексов микроволнового диапазона с линейной поляризацией радиоволн, включая изделия с цифровым диаграммообразованием и синтезированной апертурой. При этом в настоящее время ключевым требованием является комплексная миниатюризация не только электрогерметичных аналого-цифровых и цифро-аналоговых узлов и блоков, но и самих базовых излучающих модулей, окружённых свободным безграничным пространством, где не может быть речи о какой-либо электрогерметичности.

Поэтому актуальны вопросы разработки компактных двухдиапазонных директорных антенн радиосистем сверхвысоких частот (СВЧ) в плане реализации большего числа степеней свободы в пределах одной

конструктивно-компоновочной единицы, что позволяет существенно снизить габариты антенных систем и упростить решение компоновочных задач на объекте установки как за счет сокращения размеров размещаемых конструктивно законченных узлов, так и их количества, так как одна двухдиапазонная антенна в состоянии заменить две однодиапазонных. Использование возбуждателей дипольного вида, питаемых на их удалённых концах, позволяет освободить площадь печатной заготовки в центральной области излучателя от каких-либо проводников, навесных компонентов и подводящих энергию СВЧ полосковых/микрорословых линий передачи, чем создаются предпосылки для повышения степени линейности поляризации излучения и уменьшения входного коэффициента отражения. При этом также повышается надежность и ремонтпригодность антенных систем, находящихся в большинстве случаев под непосредственным воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды (дождь, снег, иней, пыль, насекомые и т.п.).

Несмотря на значительный прогресс в проектировании классических директорных антенн с центрально-питаемыми дипольными возбуждателями, а также наличие большого числа работ по различным их модификациям (меандровым, фрактальным, с использованием метаматериалов и другие), не снижается внимание к разработке печатных двухдиапазонных директорных антенн, где ключевыми являются всё возрастающие требования к габаритам и массе при одновременном обеспечении требуемой направленности и хорошего согласования с источниками СВЧ сигналов в обоих частотных диапазонах. При этом в рамках одной диэлектрической подложки интегрально-групповыми методами микроэлектроники и печатного монтажа реализуется вся двухдиапазонная излучающая структура. Печатные антенны сверхвысоких частот (дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны) весьма устойчивы к воздействию внешних дестабилизирующих факторов, таких как перепады температур от -60°C (верхние слои атмосферы) до $+60^{\circ}\text{C}$ (тропические широты), удары, линейные ускорения и прочее. Интегрально-групповые технологические методы реализации позволяют получить высокий процент выхода годных изделий в ходе их производства, когда десятки идентичных излучающих элементов реализуются в одном технологическом цикле обработки листовой диэлектрической заготовки. Поэтому разработка новых принципов построения печатных двухдиапазонных директорных антенн новой структуры и выработка методики их проектирования с учетом отечественных конструкторско-технологических ограничений на листовые диэлектрические материалы и процессы формирования топологии проводящего рисунка является

актуальной задачей настоящего диссертационного исследования. Её решение создаёт предпосылки для реализации различных, зачастую противоречивых, требований технического задания на проектирование современных антенных систем как коммерческого, так и общегражданского назначения (служба пожарной охраны и скорой помощи, мониторинг и ликвидация природных катаклизмов, радиосвязь в труднодоступных местностях). Наличие дополнительных степеней свободы облегчает интеграцию таких антенн с полупроводниковыми управляющими элементами, когда излучение электромагнитных волн совмещается с реконfigurацией характеристик по частоте, форме диаграммы направленности, поляризации и другим антенным параметрам.

3. Личное участие автора в получении результатов

Автором выполнено обобщение теории излучения классических директорных антенн на двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбуждателей дипольного вида. На основе этого обобщения и защищённых двумя патентами Российской Федерации совокупности существенных конструктивных признаков автором разработаны алгоритмы нелинейной параметрической оптимизации всех ключевых геометрических размеров предлагаемых в диссертационной работе печатных двухдиапазонных директорных антенн и проведено всеобъемлющее моделирование их электродинамических характеристик. Кроме того, автор принимал непосредственное участие в разработке конструкторско-технологической документации по созданию всех типов новых антенн, описанных в диссертационной работе, а также в их настройке и полномасштабных экспериментальных исследованиях в условиях компактного полигона внутри безэховой камеры.

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, получены лично автором. В работах, опубликованных в соавторстве с научным руководителем, автору принадлежат все решения поставленных в тех работах задач. В работах, опубликованных в соавторстве с другими авторами, Алексейцевым С.А. лично получены результаты, связанные с особенностями проектирования предлагаемых двухдиапазонных директорных антенн, их применением и перспективой их использования для решения тех или иных задач радиолокации и телекоммуникаций.

4. Степень достоверности результатов исследований

Достоверность полученных результатов обусловлена использованием классической электродинамической теории излучения (запаздывающие

векторные электродинамические потенциалы, метод наводимых электродвижущих сил, граничные условия на поверхности раздела двух сред, решение дифракционных задач и др.), корректностью исходных положений и математических преобразований при разработке алгоритмов оптимизации и проектирования начального облика новых директорных антенн, а также совпадением результатов электродинамического моделирования с известными частными случаями, опубликованными в предыдущих работах научного руководителя (в соавторстве с сотрудниками факультета РЭФ НГТУ), включая сопоставление данных, полученных расчетным и экспериментальным путем, в том числе положительными результатами апробации.

5. Научная новизна исследований

Научная новизна работы заключается в:

- 1) обобщении классической электродинамической теории многоэлементных директорных антенн на печатные двухдиапазонные директорные антенны с излучателями дипольного вида;
- 2) разработке в рамках развитого в работе системного подхода процедур возбуждения двухдиапазонных излучателей дипольного вида с концевым питанием;
- 3) совершенствовании методик синтеза двухдиапазонных директорных антенн с возбудителями дипольного вида и выводе соответствующих теоретических соотношений;
- 4) разработке процедур формирования печатных двухдиапазонных директорных антенн по эскизным обликам проводных моделей с возбудителями дипольного вида.

В процессе презентации аспирант С. А. Алексейцев подробно остановился на следующих четырёх защищаемых положениях:

1. Системный подход к проектированию директорных антенн, использующий инструменты классического электродинамического анализа излучающих структур методом наведенных ЭДС, позволяет выявить ключевые характеристики и алгоритмизировать процесс проектирования тонкопроволочной модели двухдиапазонных директорных антенн с концевым питанием возбудителя.

2. Применение концевого типа возбуждения к классическим диполям в решении задач проектирования новых двухдиапазонных директорных антенн возможно при конкретизации требований к используемому симметрирующему устройству, являющемуся неотъемлемой частью проектируемых антенн.

3. Четырехэтапная модель синтеза двухдиапазонных директорных антенн дипольного вида, включающая расчет начальных геометрических параметров проводной модели, ее оптимизацию в неспециализированном математическом пакете, интегрирование полученной модели возбудителя, пересчитанной в печатный эквивалент, с печатным симметрирующим устройством и оптимизацию финишной модели, позволяет разработать конструкции принципиально новых двухдиапазонных директорных антенн с измененными точками возбуждения излучателя дипольного вида.

4. Реализация печатной модели двухдиапазонной директорной антенны по эскизному облику проводной модели позволяет разграничить требования к направленности и уровню входного КСВН на первостепенные и второстепенные в рамках системного подхода, а печатное исполнение симметрирующего устройства обеспечивает относительную гибкость в минимизации уровня входного КСВН (в пределах 1.1 - 1.3) без заметного влияния на уровень КНД антенны (в пределах 2.7 - 4).

В итоге в работе получены следующие новые результаты:

1. Электродинамическая теория излучения и формирования диаграмм направленности с одновременным обеспечением согласования с источником сигнала обобщена на двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбудителей дипольного вида при условии их «тонкоцилиндричности» (другими словами: возбудители проводного типа).

2. Развита электродинамическая теория формирования направленного излучения печатных двухдиапазонных антенн данного класса при синусоидальном распределении тока вдоль проводящих ленточных проводников обеих половин возбудителя дипольного вида.

3. Обоснованы и предложены компоновочные схемы ансамбля параллельных линейных излучателей дипольного вида с концевым питанием, позволяющие улучшить согласование и создать предпосылки для повышения степени линейности поляризации излучения, а также упростить процедуру компоновки собственно возбудителя дипольного вида и согласующе-симметрирующего устройства в печатном интегрированном излучающем модуле.

4. Впервые выявлены ключевые особенности конструктивно-технологической реализации предложенных печатных двухдиапазонных директорных антенн и проведена их адаптация к современным конструкторско-технологическим требованиям микроэлектроники и полосковых микросхем.

5. На основе системного подхода выявлены особенности излучения и сформированы начальные облики компьютерных моделей печатных

двухдиапазонных директорных антенн с излучающими проводниками возбуждателей при концевом их питании для последующей оптимизации размеров и расстояний с использованием системы трёхмерного электродинамического моделирования «CST Studio Suite».

6. Практическая значимость исследований

Значение для практики заключается в формировании эффективных методик проектирования новых печатных двухдиапазонных директорных антенн с питающими полосковыми линиями, вынесенными на периферию печатного возбуждателя дипольного вида. В результате выполненного в работе обобщения классической электродинамической теории директорных антенн и выявленных особенностей двухдиапазонных конструктивно-компоновочных схем разработано семейство экспериментальных образцов двухдиапазонных директорных антенн в печатном исполнении на отечественном материале ФАФ-4Д. При концевом питании возбуждателей таких антенн центральная область подложек возле смежных клемм возбуждателя полностью свободна от каких-либо проводников и навесных элементов, причём используются противофазные равноамплитудные делители мощности, реализация которых давно отработана в радиопромышленности, что способствует смягчению конструктивно-компоновочных ограничений при модернизации и разработке новых антенных систем с линейной поляризацией излучения.

Высокая направленность при хорошем согласовании с питающим коаксиальным кабелем в обеих рабочих полосах частот достигнута за счет применения разработанных методик расчета и новых конструктивно-компоновочных схем, обеспечивающих существенное улучшение физической реализуемости элементов двухдиапазонных директорных антенн и позволяющих при разработке задавать в качестве исходных данных практически любые требуемые значения центральных частот рабочих диапазонов, включая требования стандартов мобильной связи и широкополосного доступа.

7. Ценность научных работ соискателя

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе по рекомендованному Высшей аттестационной комиссией «Перечню ведущих периодических изданий» опубликованы 8 научных работ, в которых изложены все положения, выносимые на защиту. Имеются также две англоязычные публикации 1-го и 3-го квартилей наукометрической системы «Web of Science». Работы

выполнены на современном теоретическом уровне с использованием электродинамической теории излучения дипольных директорных антенн при хорошем методическом и экспериментальном сопровождении, что позволяет использовать их для разработки новых поколений печатных двухдиапазонных директорных антенн и обоснованного применения компьютерных систем автоматизированного проектирования при их параметрической оптимизации. Полученные в работе результаты внедрены на предприятии г. Новосибирска АО «НПО НИИИП – НЗиК» концерна «ВКО «Алмаз-Антей», что подтверждается Актом о внедрении.

При проработке большинства ключевых вопросов также были задействованы:

1. Требования гранта РФФИ № 20-37-90018 «Компактная антенная решётка с веерной направленностью для мониторинга поверхности Земли, её загрязнения и наличия очагов возгорания с борта беспилотного летательного аппарата».

2. Технические индикаторы госбюджетной НИР «Исследование вопросов построения элементов и узлов двухчастотных фазированных антенных решеток», государственный регистрационный номер: АААА-А17-117091370026-3.

3. Перечень проблем и технические индикаторы Договора о научно-техническом сотрудничестве № 25/304 от 01 ноября 2016 года между АО «Всероссийский НИИ радиоаппаратуры» («ВНИИРА», г. С.-Пб.) и НГТУ по вопросам проектирования двухдиапазонных излучателей для телекоммуникационных систем.

Предложенные соискателем методики проектирования и экспериментальные устройства используются в учебном процессе НГТУ при подготовке студентов по направлениям 11.03.01 – «Радиотехника» и 11.03.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», что подтверждается Актом о внедрении в учебный процесс.

8. Полнота материалов диссертации, изложенных в работах соискателя

По результатам исследований опубликовано 26 научных работ: 8 статей в журналах Перечня ВАК; 2 статьи в рецензируемых зарубежных журналах 1-го и 3-го квартилей базы данных “Web of Science”; 16 докладов в трудах отечественных и международных симпозиумов и конференций; 2 патента на изобретение и 1 Свидетельство на топологию микросхем.

Научные статьи в журналах из перечня ВАК:

1. *Алексейцев С. А.*, Формирование стартового облика двухдиапазонной антенны на основе излучателей дипольного вида с концевым возбуждением для цифровых антенных решеток // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 12. С. 44-50.
2. *Алексейцев С.А., Горбачев А.П.*, Анализ согласования двухдиапазонного излучателя дипольного вида с концевым питанием и коаксиального кабеля. // Вопросы радиоэлектроники: 2020. № 4. С. 27-31.
3. *Алексейцев С.А., Горбачев А.П.* Частотно-перестраиваемая двухдиапазонная печатная антенна с коаксиально-щелевым симметрирующим устройством. // Вопросы радиоэлектроники: 2019. № 4. С. 60-64.
4. *Алексейцев С.А., Горбачев А.П.* Двухдиапазонный излучатель дипольного вида с концевым питанием. // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2019. № 1 (42). С. 18-30.
5. *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. pp. 35-42.
6. *Алексейцев С.А., Горбачев А.П.* Исследование статистического распределения согласования и коэффициента усиления печатного диполя на вольфрамите цинка // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 51-55.
7. *Алексейцев С.А., Горбачев А.П., Тарасенко Н.В.* Печатные дипольные излучатели для многочастотных антенных решеток. // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 56-61.
8. *Алексейцев С.А., Горбачев А.П., Тарасенко Н.В.* Модифицированные печатные двухдиапазонные дипольные излучатели. // Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей". 2017. № 3 (22). С. 46-50.

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

1. *Alekseytsev S.A., Gorbachev A.P.* «The novel printed dual-band quasi-Yagi antenna with end-fed dipole-like driver» // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, no. 5. pp. 4088-4090. May 2020.

2. *S. A. Alekseytsev , D. A. Bukhtiyarov , A. P. Gorbachev & D. S. Vilmitsky*. The novel two-port hybrid ring dipole-like antenna with simultaneous sum and difference radiation patterns, // *Electromagnetics*. 40:8. pp. 554-562, 2020.

Патенты:

1. Патент № 2712798, Алексейцев С.А. Горбачев А.П. «Двухдиапазонная антенна». Дата государственной регистрации 31.01.2020 г., Бюл. № 4.
2. Патент № 2743624, Алексейцев С.А., Бухтияров Д.А., Горбачев А.П., Полякова М.В. «Торцевая антенна дипольного вида». Дата государственной регистрации 20.02.2021 г., Бюл. № 5.

Свидетельства о государственной регистрации топологий:

1. Горбачев А.П., Алексейцев С.А., Бухтияров Д.А., Агучин В.В. «Линейно поляризованная антенна». Свидетельство о регистрации топологии микросхемы РФ № 2016630135, 3 октября 2016 года.

Апробация проводилась на следующих конференциях: International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2018, 2019, 2020; Международная научно-техническая конференция «АПЭП», Новосибирск, 2016, 2018; Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона», Новосибирск, НГТУ, 2017, 2018, 2019; Международная научно-техническая конференция аспирантов и магистрантов “Progress Through Innovation”, Новосибирск, 2017, 2019; III научный Форум «Телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2019» в рамках XXI Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций», Казань, 2019; XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 21 – 24 апреля 2020; 1st International Conference “Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE-2020)”, Новосибирск, 2020.

Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве статьях и докладах составляет не менее 60%. Он заключается в том, что им лично был выполнен электродинамический анализ возбудителей дипольного вида с нестандартным типом возбуждения. Соискателем лично получены все математические соотношения для ключевых электродинамических характеристик исследованных в работе антенн. Им же были разработаны и изготовлены эскизные проекты и образцы двухдиапазонных печатных директорных антенн высокой степени готовности для передачи в опытное производство. Экспериментальные исследования всех этих образцов также выполнены лично автором.

9. Специальность, которой соответствует диссертация

Представленная диссертационная работа выполнена на актуальную тему в области антенной техники, содержит самостоятельные исследования автора и является законченной научно-исследовательской работой, соответствующей специальности 05.12.07 - «Антенны, СВЧ устройства и их технологии» по областям исследований: 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.» и 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».

Выдвинутые соискателем в процессе обобщения классической теории директорных антенн положения являются вкладом в теорию излучения двух/многодиапазонных антенн. Предложенные в работе методики проектирования и компоновочные схемы двухдиапазонных директорных антенн с новым типом возбудителя дипольного вида, а также выявленные особенности их конструктивно-технологической реализации, обеспечивают приемлемые на сегодняшний день направленные свойства и хорошее согласование с источниками СВЧ сигналов при использовании исключительно отечественных технологий микроэлектроники и полосковых микросхем, не требующих разработки нестандартного технологического оборудования и оснастки.

10. Общее заключение

Диссертационная работа «Печатные двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбудителя дипольного вида» Алексея Сергеевича Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Радиоприёмные и радиопередающие устройства» Новосибирского государственного технического университета.

Присутствовало на заседании 15 чел., в том числе 6 докторов технических наук и 6 кандидатов технических наук. Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 3 от 01 апреля 2021 года.

Председатель расширенного заседания кафедры
«Радиоприемные и радиопередающие устройства»,
заведующий кафедрой
«Радиоприемные и радиопередающие устройства»
доктор технических наук, доцент

М.А. Степанов

Секретарь расширенного заседания кафедры
«Радиоприемные и радиопередающие устройства»,
доцент кафедры
«Радиоприемные и радиопередающие устройства»,
кандидат технических наук

И.С. Савиных

Подписи Степанова М.А. и Савиных И.С. заверяю.

Начальник отдела кадров Новосибирского государственного технического
университета

Пустовалова Ольга Константиновна



2021 года