

Вереysкая ул., 41, Москва, 121471
Телефон: (495) 276-29-01, 276-29-80
Факс: (495) 276-29-81
e-mail: antey@almaz-antey.ru



Vereyskaya str., Moscow, Russia, 121471
Phone: (495) 276-29-01, 276-29-80
Fax: (495) 276-29-81
e-mail: antey@almaz-antey.ru

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор –
заместитель генерального директора
д.т.н., профессор
П.А. Созинов



» _____ 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» на диссертационную работу Алексея Сергеевича Алексеичева «Печатные двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбудителя дипольного вида», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Актуальность темы диссертационной работы

Формирование потенциала радиотехнических систем с линейной поляризацией излучаемых радиоволн сверхвысоких частот (СВЧ), достигаемое, как правило, за счет увеличения выходной мощности генерирующих модулей, а также широкополосности и направленности их антенн при жестких требованиях к уровню нежелательных излучений в пределах главного лепестка диаграммы направленности – актуальная научно-техническая проблематика, имеющая широкий спектр разнообразных приложений. Создание устройств СВЧ большой функциональной сложности, соответствующих упомянутым

сферам применения и содержащих от сотни до нескольких тысяч модулей, предъявляет все возрастающие требования не только к элементной базе аналоговых и цифровых блоков, но и к базовым линейно поляризованным излучающим модулям антенных комплексов в отношении широкополосности, миниатюризации и адаптации к современным конструкторско-технологическим возможностям интегрально-групповых методов реализации микроэлектроники и печатного монтажа. Это, в свою очередь, закономерно требует совершенствования методов анализа, синтеза и оптимизации полосковых и микрополосковых излучающих структур новой/модернизированной архитектуры, проектирование которых могло бы быть осуществлено автоматизированными методами при максимальном совмещении в одной конструктивно-компоновочной единице нескольких выполняемых операций по формированию радиосигнала. Эти задачи характерны для современного этапа развития микроволновой радиолокации и требуют постоянного внимания и усилий по их комплексному разрешению.

В этой связи приобретает несомненную актуальность задача создания/модернизации компактных печатных излучателей, когда с одной планарной заготовки формируются требуемые диаграммы направленности в нескольких разнесенных частотных поддиапазонах при приемлемом согласовании излучателя с источником сигнала одновременно в каждом из них. Тем самым создаются предпосылки к существенному сокращению габаритно-массовых показателей антенных систем и упрощению решения задач по их компоновке на объекте установки за счет более рационального размещения излучателей по многочастотной апертуре антенного полотна. При этом повышается надежность и ремонтпригодность многочастотных антенн за счет уменьшения числа питающих фидеров от нескольких штук (в случае применения однодиапазонных излучателей) до одного (когда применяется многодиапазонный излучатель).

Директорные антенны являются одними из многих линейно поляризованных излучателей многоэлементных антенн с ярко выраженной направленностью. Несмотря на значительный прогресс в их проектировании не снижается внимание к совершенствованию процедур их расчёта и последующего решения конструкторско-компоновочных задач с учетом специфики объектов установки и условий эксплуатации. Печатное исполнение директорных излучателей создает предпосылки к достижению автоматизации процесса их изготовления с малым уровнем брака, когда десятки/сотни излучателей реализуются в одном технологическом цикле с использованием групповых технологий микроэлектроники и полосковых микросхем сверхвысоких частот, включая технологии трёхмерной диэлектрической печати (послойного наращивания) с последующим нанесением проводящего гальванопокрытия на участках фрагментов трассировки.

Поэтому диссертационная работа С.А. Алексеичева, в которой решаются задачи, возникающие при проектировании нового семейства печатных двухдиапазонных директорных антенн с концевым питанием возбуждителей дипольного вида, является актуальной в области антенной техники диапазона СВЧ.

Анализ содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы и трёх приложений. Объём и оформление работы (205 страниц, 148 рисунков и 18 таблиц) соответствует требованиям и положениям ВАК РФ для диссертаций, представленных на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Введение диссертационной работы отражает характеристику базовых критериев, использующихся при проектировании директорных антенн, как с классическими электрическими вибраторами, так и новыми излучателями дипольного вида. В нём обоснована актуальность темы диссертационного

исследования в увязке с всё возрастающими требованиями системно-технического и конструкторско-технологического характера, описаны его цель и задачи, охарактеризован состав и структура работы, определены научная новизна и практическая значимость её результатов, сформулированы четыре положения, выносимые на защиту. В нём же приведены сведения об апробации развитых соискателем подходов, а также перечислены работы, в которых опубликованы основные результаты, полученные автором в ходе его исследований.

Первый раздел содержит ретроспективный обзор опубликованных работ, посвящённых дипольным директорным антеннам, а также проведен их анализ, в котором оценивается степень проработанности проблемы создания/модернизации печатных директорных антенн, работающих как в однодиапазонном, так и в двух/многодиапазонном режимах. Показано, что подавляющее большинство из них содержит в качестве возбудителя классические полуволновые диполи, питание которых осуществляется в их центрах на смежных клеммах. Непосредственная близость этих клемм в компоновочных схемах антенн СВЧ приводит к заметным затруднениям конструктивно-технологического характера по причине весьма плотной трассировки печатных фрагментов питающих линий и согласующе-симметрирующих узлов диполей, что зачастую приводит к ощутимому росту входного коэффициента отражения и уровня диссипативных потерь в печатных проводниках и диэлектрике подложки. Отмечено, что в качестве одного из возможных средств упрощения трассировки и снижения потерь является использование концевое питания похожего на диполь линейного излучателя, когда подведение мощности источника СВЧ сигнала осуществляется на концах возбудителя дипольного вида. Такой подход к реализации возбудителей находится сейчас в стадии становления, начавшейся ранее. В ходе этих работ получены 5 патентов Российской Федерации и защищена одна кандидатская диссертация, – её автор Д.А. Бухтияров. Однако, как патенты, так и

диссертация были связаны с проектированием директорных антенн лишь в однодиапазонном режиме работы.

Завершается раздел развёрнутой характеристикой предстоящих исследований двухдиапазонного режима, в ходе которых предстоит выявить и проанализировать ключевые особенности электродинамических характеристик таких возбuditелей в обозначенном режиме, а затем на базе полученных результатов предложить методику проектирования директорных антенн, использующих двухдиапазонные возбuditели.

Во втором разделе процедуры решения внутренней и внешней задач для классического электрического вибратора/диполя обобщены на двухдиапазонные излучатели дипольного вида с концевым возбуждением гармоническим СВЧ напряжением. При этом обе задачи впервые решены для произвольных длин обоих близкорасположенных линейных излучателей с цилиндрическими проводниками. Для внутренней задачи здесь сначала сформирована система гармонических функций продольной координаты вдоль плеч излучателей, а затем на основе решения внутренней задачи сформулированы граничные условия для продольной составляющей векторной напряжённости электрического поля у поверхности плеч проволочных излучателей дипольного вида. Последующее трехэтапное интегрирование по частям на основе интегральных соотношений метода наводимых электродвижущих сил с предложенной автором заменой переменных интегрирования позволяет записать в замкнутой форме выражения для элементов матрицы сопротивлений четырёхполюсника СВЧ, который моделирует электромагнитное взаимодействие двух близкорасположенных излучателей дипольного вида в весьма широкой полосе частот. В результате, по введённой в рассмотрение соискателем целевой функции излучателя формируется информация об антенных характеристиках двухдиапазонного возбuditеля на конкретных частотах, включая комплексное входное сопротивление, пространственную диаграмму направленности, входной

коэффициент отражения/КСВН и коэффициент направленного действия (КНД). При этом соискателем впервые представлены номограммы, позволяющие судить о предельно достижимых (потенциальных) соотношениях между направленностью, согласованием и длинами обоих близко расположенных излучателей дипольного вида с концевым питанием.

Третий раздел посвящён решению задачи поиска экстремума совокупности физически реализуемых параметров двухдиапазонного возбудителя на множествах длин элементов, расстояний между ними и рабочих частот. Показано, что требования к двухдиапазонному режиму работы по согласованию могут быть конкретизированы в математических выражениях и подвергнуты нелинейной параметрической оптимизации в рамках разработанного автором четырёхэтапного алгоритма. На первом этапе он включает в себя процедуру расчёта основных электродинамических характеристик двухдиапазонного возбудителя и отдельную нелинейную оптимизацию длин и межэлементных расстояний. На втором этапе выполняется параметрическая оптимизация «тонкопроволочной» модели двухдиапазонной директорной антенны, в ходе которой реактивная составляющая её входного импеданса «обнуляется». Это позволяет перейти к третьему этапу, когда осуществляется пересчёт «цилиндрической» геометрии «тонкопроволочной» модели в печатный эквивалент, где заложены условия конструкторско-технологических требований/ограничений отечественной радиопромышленности. По завершении работы третьего этапа алгоритма осуществляется заключительная/финишная верификация размеров топологии двухдиапазонной директорной антенны в системе трёхмерного полноволнового электродинамического моделирования «CST Studio Suite», позволяющей с высокой степенью точности учесть в числе прочего такие особенности реализации топологии двухдиапазонного возбудителя, как скачки ширины полосковых линий, их изгибы и повороты назад, расположение линий в разных уровнях на печатной плате (то есть, лицевая и обратная её стороны),

согласованные микрополосково-щелевые переходы, слабо отражающие сквозные металлизированные отверстия и боковые короткозамыкающие полосковые перемычки.

В четвёртом разделе поставлены и решены задачи параметрической оптимизации двухдиапазонных возбuditелей с целью выявить предельно достижимые возможности разнесения рабочих поддиапазонов. Такие оценки востребованы при проработке компоновочных схем многофункциональных радиолокационных комплексов и их фрагментов на этапе формирования перспективных обликов. Обоснованность и достоверность оценок потенциальных характеристик излучения двухдиапазонных директорных антенн автор усматривает в использовании в процессе исследований пакетов решения многокритериальных задач на базе генетического алгоритма с элитарным принципом и явным механизмом отбора решений в весьма широких интервалах варьирования ключевых параметров антенн данного класса. Полученные результаты и оценки создают ощущение завершенности в поисках оптимальных решений двухдиапазонных возбuditелей дипольного вида, когда границы их возможностей по согласованию и разнесению поддиапазонов вполне обоснованы.

Пятый раздел посвящён электродинамическому моделированию печатных двухдиапазонных директорных антенн в совокупности с соответствующими согласующе-симметрирующими устройствами, которые являются неотъемлемой частью интегрированного двухдиапазонного излучающего модуля. При этом соискатель руководствовался тем, что согласующе-симметрирующие устройства должны быть хорошо известны, по-возможности конструктивно-технологически отработаны и с целью обеспечения унификации входили бы в номенклатуру изделий, рекомендованных отраслевыми нормативными документами. Поскольку совокупность требований, предъявляемых к проектируемым антеннам, зачастую варьируется в широких пределах, то соискателем были выбраны двухшлейфные и микрополосково-

щелевые делители мощности в отношении 1:1, а также переход от несимметричной полосковой линии к симметричной/балансной полосковой линии с общей заземлённой металлизацией в центральном слое трёхуровневой полосковой структуры с двумя несущими диэлектрическими слоями, плотно прилегающими друг к другу. В процессе оптимизации целевых функций, образованных взвешенным суммированием параметров согласования, разнеса частотных поддиапазонов и КНД с соответствующими весовыми коэффициентами, автор обоснованно задал поля допусков на ширину печатных проводников и расстояние между ними при практически 100-процентной их корреляции, учёл разброс диэлектрической проницаемости в партиях фольгированных листовых диэлектриков различных поставщиков, а также принял во внимание технологические допуски на точность реализации расчётных ширин и зазоров в печатных фрагментах антенны. В результате удалось обеспечить реализацию антенных характеристик трёх интегрированных двухдиапазонных излучающих модулей с питанием от стандартного коаксиального кабеля через типовые коаксиально-полосковые переходы. При этом без ужесточения полей допусков были соблюдены конструкторско-технологические нормы и требования к стандартным диэлектрикам типа ФАФ-4Д и технологическим процессам фотолитографии и травления медной фольги с пробельных мест. Примечательно, что в компоновочных схемах всех трёх модулей отсутствуют сквозные металлизированные отверстия, формирование которых требует операции сверления твёрдосплавными свёрлами, последующую ультразвуковую очистку стенок отверстий от металлической стружки и заусенцев, а также химико-гальваническую металлизацию отверстий на всю их глубину.

В шестом разделе, посвящённом верификации характеристик разработанных двухдиапазонных директорных антенн, представлены результаты экспериментальных исследований в сертифицированной безэховой камере на поверенном оборудовании, расположенной на территории

новосибирского АО «НПО НИИИП – НЗиК» дочерней организации АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей». Сами экспериментальные образцы были изготовлены на сертифицированном новосибирском заводе печатных плат «Электроконнект» (www.pselectro.ru). При этом следует отметить, что наряду с ранее выполненным назначением полей допусков на размеры печатных фрагментов и диэлектрическую проницаемость заготовок, в данном разделе соискателем были приняты меры к обеспечению в самом программном пакете «CST Studio Suite» устойчивой сходимости итерационного процесса оптимизации без сбоев и ошибок при числе варьируемых параметров до 20. В результате экспериментальные исследования подтвердили вполне приемлемое совпадение между собой расчётных и измеренных характеристик двухдиапазонных директорных антенн с концевым питанием возбуждателей дипольного вида.

В заключении перечислены достигнутые результаты работы и сделаны основные выводы по их итогам.

Оценка обоснованности и достоверности научных положений и результатов работы

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы основывается на адекватном применении электродинамических методов анализа излучателей электромагнитного поля с линейными цилиндрическими/ленточными проводниками, корректном использовании матричного аппарата анализа многополюсных электрических цепей СВЧ с распределёнными по длине параметрами, иерархической структуре системного построения алгоритмов нелинейной параметрической оптимизации при генетическом подходе к отбору лучших решений, использовании вычислительных методов электродинамики, в том числе реализованных в проверенном временем пакете «CST Studio Suite». Они подтверждаются также результатами аккуратно выполненных экспериментальных исследований.

Кроме того, усовершенствованная соискателем методика анализа и синтеза новых двухдиапазонных возбuditелей с произвольными длинами обоих излучателей дипольного вида верифицирована совпадением её результатов с ранее опубликованными работами и патентами сотрудников НГТУ, касающихся однодиапазонных возбuditелей.

Научная новизна результатов работы

Научная новизна итогов работы обусловлена тем, что классический электродинамический метод наводимых электродвижущих сил при анализе близко расположенных и электромагнитно связанных линейных излучателей объединён с предложенной в работе пошаговой итерационной процедурой расстановки исследованного автором двухдиапазонного возбuditеля, рефлектора и нескольких директоров по своим позициям как на диэлектрической подложке печатной, так и на несущей стреле объёмной директорной антенны. В результате диссертанту удалось на системном уровне выработать новую методику проектирования с единых позиций двухдиапазонной директорной антенны, включающих требования согласования и направленности излучения в каждом поддиапазоне 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 значимость результатов работы

Предложенные в работе двухдиапазонные директорные антенны, являясь линейно поляризованными излучателями, имеют однозначное и устойчиво воспроизводимое от образца к образцу при тиражировании положение фазового центра на антенном полотне. Это создаёт весомые предпосылки к повышению точности оценивания координат объектов при применении таких антенн в радиотехнических системах пеленгации и в радиолокации. При этом частоты

зондирующих сигналов могут изменяться/переключаться лишь за счёт электронной коммутации только в активных модулях системы без каких-либо переключений в самом антенном полотне. Это способствует уменьшению рисков срыва радиосвязи между корреспондентами и принятия ошибочных решений в динамичной помеховой обстановке, характерной для многих современных ситуаций практически предельного использования радиочастотного ресурса и радиоэлектронного противодействия. Внедрение/практическое использование защищаемых положений диссертационной работы в ряде аванпроектов уже сейчас свидетельствует о полезности полученных соискателем результатов и обуславливает весомый задел по их применению в перспективных задачах телекоммуникаций, навигации и радиолокации. Работа найдёт применение также при выполнении проекта, поддержанного грантом РФФИ «Компактная антенная решётка с веерной направленностью для мониторинга поверхности Земли, её загрязнения и наличия очагов возгорания с борта беспилотного летательного аппарата» № 20-37-90018, заканчивающимся в августе 2022 года.

Апробация результатов работы и публикации.

Результаты диссертационных исследований систематически, докладывались соискателем на ежегодных научно-технических конференциях, в числе которых 8 международных, включая 5 с публикацией текстов докладов в базе данных «IEEEExplore» и индексируемых наукометрической системой «SCOPUS». Ключевые положения, являющиеся основой выполненного автором обобщения классической электродинамической теории излучения директорных антенн на предложенные в работе двухдиапазонные возбудители дипольного вида с концевым питанием, сформулированы и развиты соискателем в 8-ми работах в журналах из Перечня, рекомендованного ВАК РФ. Часть вышеупомянутых положений опубликована также в англоязычных журналах 1-го и 3-го квартилей (таких работы две), индексируемых в «Web of Science». В

этих работах сформулированы основные этапы разработанной автором методики проектирования двухдиапазонных директорных антенн. Применение этих методик проиллюстрировано также в 5-ти научно-технических отчётах по зарегистрированной в отечественной базе данных инициативной госбюджетной работе «Исследование вопросов построения элементов и узлов двухчастотных фазированных антенных решёток» с регистрационным номером АААА-А17-117091370026-3 от 13.09.2017 года, а также в отчётах по гранту Минобрнауки № 8.6847.2017/БЧ (2017-2019 гг.) и Договору о научно-техническом сотрудничестве между НГТУ и «Всероссийским НИИ радиоаппаратуры» (ВНИИРА, г. С.-Петербург). Часть компоновочно-технологических решений при реализации узлов двухдиапазонных директорных антенн при концевом питании их возбуждителей защищена двумя патентами и одним свидетельством о регистрации топологии Российской Федерации, в которых соискатель является одним из соавторов с принадлежащим ему вкладом в равной мере.

Замечания по работе

В процессе обсуждения результатов работы выявились следующие недостатки.

1. В диссертации недостаточно внимания уделено вопросу одинаковости ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности в Е- и Н-плоскостях одновременно в обоих частотных диапазонах. Между тем, в ряде разработок одинаковость ДНА может быть весьма востребовано.

2. Имеется разная степень глубины проработки вопросов. Так, с целью сокращения продольных габаритов низкочастотного излучателя он свёрнут в меандр. В тоже время, расстояние между рефлектором (роль которого играет верхняя кромка сплошной металлизации обратной стороны подложки) и двухдиапазонным возбуждителем в разных диапазонах, по-видимому, должно также быть разным. Поэтому если выполнить в форме меандра также и кромку металлизации подложки, тогда верхняя часть меандра (пусть даже она будет

прерывистой) играла бы роль высокочастотного (более близкого к возбуждателю) рефлектора, а нижняя (более глубокая) его часть – низкочастотного, более удалённого от возбуждателя.

3. Имеется некоторая неполнота представления размерно-конструктивных данных экспериментальных образцов. Так, на рисунках 5.21, 5.29, 5.42, 5.44 и 5.51 приведены размеры печатных фрагментов топологий антенн. Однако допуски на эти размеры не указаны, что может затруднить на этапе реализации выбор параметров технологического процесса травления фольги с пробельных мест подложек.

4. Наличие отдельных пунктуационных неточностей, например: на стр. 96 – обозначения эллиптических интегралов приведены не на уровне строк текста; на стр. 149 – номер рисунка должен быть 5.34, а не 2.34.

Однако отмеченные недостатки не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа представляет собой законченное самостоятельно выполненное научно-квалификационное исследование, в котором с использованием системного подхода решена актуальная для области антенной техники сверхвысоких частот задача создания методики проектирования с единых позиций двухдиапазонных печатных директорных антенн с концевым питанием возбуждателей дипольного вида. При этом в достаточной мере учтены отечественные конструкторско-технологические нормы и требования групповых технологий микроэлектроники и полосковых микросхем сверхвысоких частот.

Автореферат диссертационной работы отражает основное содержание её разделов. В нём имеются все предусмотренные Положением ВАК позиции, достаточно подробно освещены основные научные результаты, выработанные подходы и защищаемые положения, в том числе процедуры синтеза

двухдиапазонных печатных директорных антенн с концевым питанием возбуждителей дипольного вида.

Вывод: Работа соответствует требованиям Высшей Аттестационной Комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Алексейцев Сергей Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Отзыв ведущей организации на диссертационную работу и её автореферат рассмотрен и одобрен на заседании Научно-технического совета АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» протокол от 02.06.2021 № 01/06/2021.

Директор Департамента научно-технического развития, к.т.н., с.н.с.



В.И. Добридень

Начальник 3 отдела Службы координации НИОКР и системного анализа Департамента научно-технического развития



П.В. Стародымов