

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального директора
по научной работе – Генеральный
конструктор, к.т.н., доцент

В.М.Король

10 2018 г.



О Т З Ы В

ведущей организации АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» на диссертационную работу Бухтиярова Дмитрия Андреевича «*Печатные директорные антенны с концевым и центрально-концевым питанием возбuditелей дипольного вида*», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии»

Актуальность темы диссертационной работы

При разработке и модернизации антенных устройств систем передачи и обработки информации с линейной поляризацией радиоволн на первый план выдвигаются изыскание и создание условий для увеличения коэффициента усиления антенн при возрастающей тенденции комплексной миниатюризации базовых излучающих модулей. Эти вопросы также существенны при создании многоэлементных фазированных антенных решеток. При этом проектирование и модернизация излучающих модулей должны быть максимально точными, поскольку их реализация требует существенных затрат времени и финансовых средств. В связи с этим детальная экспериментальная доводка излучающих модулей рассматривается как нежелательный сдерживающий фактор. Поэтому актуальной является проблематика, связанная с разработкой математической, программной и методологической базы эффективного проектирования антенных устройств с использованием современных ЭВМ и систем полномасштабного трёхмерного электродинамического моделирования.

Директорные антенны весьма заметны в ряду линейно поляризованных базовых излучателей. Несмотря на значительный прогресс в их проектировании, не снижается внимание к их модернизации и совершенствованию, в том числе в плане обеспечения дополнительных степеней свободы и миниатюризации при решении конструктивно-

компоновочных задач с учетом специфики объектов установки и условий эксплуатации. Печатное исполнение директорных излучателей, позволяет получить высокий процент выхода годных изделий при использовании групповых технологических процессов микроэлектроники и полосковых микросхем сверхвысоких частот.

Таким образом, диссертационная работа Д.А.Бухтиярова, в которой решаются задачи, возникающие при проектировании нового класса печатных директорных антенн с концевым и центрально-концевым питанием возбуждителей дипольного вида, является актуальной для области техники СВЧ.

Анализ содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем и оформление работы соответствует требованиям и положениям ВАК РФ для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Введение диссертационной работы содержит краткую характеристику системного подхода в проектировании директорных антенн с электрическими вибраторами (диполями). В нем обоснована актуальность темы предстоящих исследований, определены их цель и задачи, охарактеризован состав и структура работы, квалифицированы научная новизна и практическая значимость её результатов, изложены положения, выносимые на защиту. Там же перечислены конференции, на которых апробированы развитые автором подходы, а также приведён перечень работ, в которых опубликованы основные результаты, полученные в ходе исследований.

Первая глава содержит обзор публикаций, посвященных дипольным директорным антеннам, и проведен их сравнительный анализ. Установлено, что большинство из них содержит в качестве возбудителя полуволновые диполи, питаемые в центре на их смежных клеммах. В диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн это приводит к затруднениям конструктивно-технологического характера вследствие весьма плотной трассировки печатных фрагментов в области смежных клемм дипольного возбудителя, что может приводить к росту входного коэффициента отражения и уровня диссипативных потерь. В качестве эффективного средства для решения этой проблемы автор предлагает провести углублённую проработку вопросов конструирования директорных антенн, основанных на концевом и центрально-концевом питании, когда подача/подведение излучаемого сигнала

осуществляется на концах (одном, если второй остается в центре диполя, или обоих) возбuditеля дипольного вида.

Завершается глава обобщенной характеристикой предстоящих исследований, в ходе которых предстоит выявить и проанализировать особенности электродинамических характеристик таких возбuditелей, а затем, на основании полученных результатов, предложить методику проектирования директорных антенн, использующих упомянутые возбuditели.

Во второй главе процедуры решения внутренней и внешней задач для классических центрально-питаемых дипольных антенн обобщены на излучатели дипольного вида с концевым и центрально-концевым возбуждением гармонической электродвижущей силой. При этом обе задачи впервые решены для произвольной ориентации плеч/половин излучателей с концевым и центрально-концевым питанием. Предлагаемые электродинамические процедуры осуществлены автором с использованием дифференциальных уравнений для неизвестных пока распределений токов проводимости вдоль произвольно ориентированных плеч излучателей, а также на основе интегральных соотношений метода наводимых электродвижущих сил для собственных и взаимных элементов матрицы сопротивлений многополюсника СВЧ, который моделирует электромагнитное взаимодействие обеих половин излучателей. В результате, во введенной в рассмотрение соискателем матрице конфигураций анализируемого излучателя формируется информация о его антенных характеристиках на конкретных частотах, включая комплексный входной импеданс, пространственную диаграмму направленности, входной коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), а также коэффициент направленного действия (КНД).

Третья глава посвящена синтезу директорных антенн с возбuditелями дипольного вида, основанному на использовании вычислительных сред "MathCAD" и "MATLAB". Совмещение преимуществ каждого из этих программных продуктов формирует эффективную стратегию проведения синтеза. Эта стратегия включает в себя одновременное достижение на требуемой частоте наилучшего согласования антенны с внутренним вещественным сопротивлением источника сигнала (волновым сопротивлением питающего коаксиального кабеля) и максимально достижимого КНД в направлении директоров синтезируемой антенны с возбuditелями, исследованными в главе 2. Каждое из двух вышеупомянутых требований (а именно: согласование и КНД) характеризуется своим

частным критерием (частной целевой функцией), а их взвешенная сумма с весовыми коэффициентами, имеющими смысл штрафных, формирует итоговую аддитивную целевую функцию, подлежащую нелинейной параметрической оптимизации. В результате, с единых позиций, отражающих заданные тактико-технические требования, соискателем впервые синтезированы двух-, трёх- и четырёхэлементные уединённые (отдельно стоящие в окружающем свободном пространстве) директорные антенны с цилиндрическими проводниками возбuditеля дипольного вида, рефлектора и директоров, а затем полученные результаты адаптированы им к печатному исполнению при кабельном возбуждении и к питанию прямоугольными и круглыми волноводами.

В четвертой главе охарактеризованы особенности этапов проектирования и представлены результаты экспериментальных исследований печатных директорных антенн с возбuditелями дипольного вида. Соискателем отмечается, что совокупность требований, предъявляемых к проектируемым директорным антеннам зачастую весьма разнообразна. И это повлияло на номенклатуру экспериментальных образцов, которые были выбраны им для изготовления на новосибирском заводе печатных плат «Электроконнект» (www.pselectro.ru) и последующих измерений в безэховой камере на поверенном оборудовании, проведенных в новосибирском АО «НПО НИИИП – НЗиК» концерна «Алмаз-Антей». При этом начальные/стартовые облики печатных топологий всех антенн дополнительно корректировались/оптимизировались в конечно-элементном программном комплексе трёхмерного электродинамического моделирования “CST Studio Suite”. В процессе оптимизации суммарных целевых функций соискателем адекватно заданы пределы варьирования конструктивно-технологических параметров (как то: минимально допустимые ширины печатных проводников и расстояний между ними, разброс диэлектрической проницаемости в партии фольгированных листов, технологические допуски на точность реализации расчётных ширин проводников и т.п.), а также приняты меры к обеспечению в самом комплексе “CST Studio Suite” устойчивой сходимости процесса оптимизации без сбоев и ошибок при числе варьируемых параметров до 20. Выполненные затем экспериментальные исследования подтвердили совпадение между собой расчётных и измеренных характеристик директорных антенн с концевым и центрально-концевым питанием возбuditелей дипольного вида.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы и сделаны соответствующие выводы.

Оценка обоснованности и достоверности научных положений и результатов работы

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы следуют из корректного использования электродинамических методов исследования излучателей электромагнитного поля с линейными проводниками, грамотного применения матричного аппарата анализа распределённых многополюсных цепей СВЧ, системного построения стратегии нелинейной параметрической оптимизации с ограничениями на варьируемые параметры, использования вычислительных методов прикладной электродинамики, в том числе реализованных в применяемом соискателем и широко распространенном пакете “CST Studio Suite”, а также подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Кроме того, модифицированная соискателем методика анализа и синтеза излучателей с произвольной ориентацией проводников верифицирована совпадением её результатов с ранее опубликованными работами сотрудников НГТУ и других, в том числе зарубежных, авторов, касающимися классических центрально-питаемых диполей.

Научная новизна результатов работы

Научная новизна работы заключается в обобщении классической электродинамической теории дипольных директорных антенн на директорные антенны с концевым и центрально-концевым питанием возбуждателей дипольного вида, в ходе которого классический метод наводимых электродвижущих сил при анализе близко расположенных и электромагнитно связанных линейных излучателей органически объединён с предложенной в работе стратегией расстановки возбуждателя дипольного вида, рефлектора и директоров по своим позициям как в свободном пространстве, так и на диэлектрической подложке печатной заготовки, в том числе вблизи проводящих стенок прямоугольных и круглых волноводов, используемых для питания возбуждателей. В результате, соискателю удалось на системном уровне выработать новую методику проектирования печатных директорных антенн с возбуждателями дипольного вида, результаты которой с высокой степенью вероятности близки к глобальному оптимуму в плане геометрических длин печатных проводников, зазоров и расстояний между ними.

Практическая значимость результатов работы

Возможность реализации модифицированных соискателем компактных печатных директорных антенн, компоновочные схемы которых характеризуются большим числом степеней свободы и более гибкой вследствие этого адаптацией к сложным посадочным местам на объектах установки, включая антенные полотна фазированных антенных решеток. Внедрение ряда защищаемых положений диссертационной работы подтверждено соответствующими Актами при реализации аванпроектов, что уже сейчас свидетельствует о практической полезности полученных соискателем результатов и обуславливает весомый задел по их применению в перспективных задачах телекоммуникаций, радионавигации и радиолокации.

Апробация результатов работы и публикации

Результаты диссертационных исследований регулярно докладывались соискателем на ежегодных научно-технических конференциях, из которых 4 международные, включая 3 под эгидой IEEE, индексируемых наукометрическими системами "SCOPUS" и "Web of Science". Ключевые положения, положенные в основу обобщения известной классической теории центрально-питаемых дипольных возбудителей директорных антенн на предлагаемые в работе возбудители дипольного вида с концевым и центрально-концевым их питанием, сформулированы и развиты соискателем в 6-ти работах в журналах, включенных в перечень ВАК. В этих же работах предложены основные этапы разработанной соискателем методики проектирования директорных антенн нового класса. Применение этих методик освещено также в отчётах по 2-м зарегистрированным в российской базе данных поисковым госбюджетным работам «*Исследование вопросов построения элементов и узлов активных фазированных антенных решеток*» за государственным регистрационным номером 01201177759 от 07.11.2011 года и «*Исследование вопросов построения элементов и узлов двухчастотных фазированных антенных решеток*» с регистрационным номером АААА-А17-117091370026-3 от 13.09.2017 года, а также в отчетах по 3-м грантам Минобрнауки № 7.1667.2011 (2011-2012 годы), № 629 (2014-2016 годы) и № 8.6847.2017/БЧ (2017 год – настоящее время). Часть конструкторско-компоновочных решений при концевом питании возбудителей защищена патентом Российской Федерации, где соискатель является одним из трёх соавторов с принадлежащим ему вкладом в равной мере. Кроме того, по результатам исследований соискателя в составе творческих коллективов получены 2 Свидетельства о

регистрации топологий антенн с вкладом, принадлежащим членам коллективов также в равной мере.

Автореферат диссертационной работы в достаточной мере отражает её содержание. В нём наличествуют все предусмотренные Положением ВАК разделы, излагаются основные научные результаты, выработанные подходы и защищаемые положения, включая характеристику процедур синтеза директорных антенн с концевым и центрально-концевым питанием возбуждителей дипольного вида.

Замечания по работе

В ходе обсуждения работы выявились следующие недостатки.

1. Недостаточно отражены вопросы, связанные с анализом полей кроссполяризации излучателей дипольного вида при концевом и центрально-концевом возбуждениях, а также при печатном исполнении излучателей. Отсутствуют результаты моделирования и экспериментов по оценке уровней полей кроссполяризации, в том числе, в направлениях, не лежащих в «главных» сечениях пространственных диаграмм направленности.
2. Обращает на себя внимание неодинаковость глубины теоретической проработки вопросов, связанных с анализом топологии излучателей. Так, выбор ширины излучающих проводников обоснованно проведен соискателем с использованием электродинамических формул перехода от объёмных цилиндрических проводников в свободном пространстве к их печатным эквивалентам, в то время как выбор формы печатных пьедесталов под подводящими линиями директорной антенны (рис. 4.11) проработан недостаточно.
3. В работе не проведен анализ влияния технологических разбросов размеров излучателей и физических свойств диэлектрических подложек на сходимость оптимизационных процедур при синтезе излучателей.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

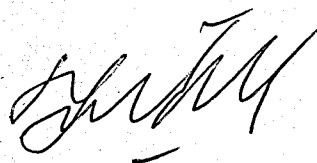
Заключение

Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная для области антенной техники задача разработки методики проектирования с единых позиций директорных антенн с концевым и центрально-концевым питанием возбuditелей дипольного вида с учётом отечественных конструкторско-технологических норм и требований групповой технологии микроэлектроники и полосковых микросхем сверхвысоких частот. Работа соответствует требованиям Высшей Аттестационной Комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бухтияров Дмитрий Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой 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 «ВНИИРА» 24 октября 2018 г.

Члены комиссии:

Ученый секретарь АО
«ВНИИРА», д.т.н., профессор,
заслуженный деятель науки РФ



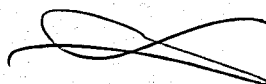
Ю.Г.Шатраков

Начальник НИС, к.т.н.



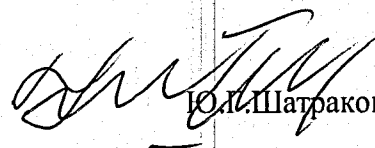
О.Ю.Платонов

Главный специалист, кандидат
технических наук



М.И.Ривкин

Ученый секретарь НТС,
д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ



Ю.Г.Шатраков