

## О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, профессора  
Пономарева Леонида Ивановича на диссертационную работу  
Паршина Юрия Николаевича  
*«Печатные многолучевые антенные  
решётки с модифицированными фазовращателями и излучателями  
дипольного вида»*,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

### **Актуальность темы исследования**

Задача, решаемая в диссертационной работе, может рассматриваться как разработка путей построения многолучевых фазированных антенных решёток (ФАР) с расширенными функциональными возможностями в печатном исполнении. Необходимость в таких антеннах определяется логикой развития современных средств телекоммуникаций, диктующей необходимость совершенствования антенн, входящих в состав средств связи и передачи мониторинговых данных. Бесспорное требование повышения технологичности их производства обуславливает выраженную целесообразность применения технологии многослойного печатного исполнения с минимальным числом сквозных переходных металлизированных отверстий между слоями.

Несмотря на то, что в современных многолучевых антеннах активно прорабатываются цифровые методы диаграммообразования с использованием программируемых или специализированных интегральных микросхем, полный переход на цифровые ФАР не всегда оправдан ввиду высокой стоимости законченных в конструктивном плане микроэлектронных приёмных модулей и аналого-цифровых преобразователей. Необходимость экономии средств с учётом заметного числа цифровых каналов приводит зачастую к созданию цифровых антенных систем с ограниченным покрытием лучами верхней (передней) полусферы. Поэтому вряд ли оправдано в настоящее время отказываться от совершенствования аналоговых многолучевых ФАР с печатными матрицами Батлера из-за высокой стоимости цифровой элементной базы.

Таким образом, целесообразность продолжения исследований и совершенствования методик проектирования аналоговых матричных

многолучевых ФАР с применением новых технических решений определяет тему диссертационной работы как актуальную.

### **Целевые индикаторы работы**

**Целью работы** является совершенствование печатных линейно поляризованных многолучевых ФАР с повышенным уровнем коэффициента усиления лучей за счёт использования модифицированных дипольных излучателей и дифференциальных фазовращателей (ДФВ), скомпонованных на единой диэлектрической подложке, способствующей повторяемости характеристик ФАР от образца к образцу при улучшенных показателях производственной технологичности ФАР.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа включает в себя введение, пять разделов, заключение, список литературы, насчитывающий 113 наименований и три приложения, изложенные на 198 страницах.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, формулируется цель и конкретизируются задачи для последующей научно-технической проработки с развёрнутой характеристикой научной новизны и практической значимости, излагаются научные положения, выносимые на защиту, приводятся сведения, характеризующие достоверность и апробацию полученных результатов.

**Первый раздел** носит обзорно-аналитический характер и содержит ретроспективный анализ отечественной и зарубежной литературы на предмет проработки вопросов создания, совершенствования и модернизации печатных многолучевых ФАР с излучателями дипольного вида, включая анализ их достоинств и слабых сторон. Подчёркивается, что структура и тщательность обработки печатных дифференциальных фазовращателей оказывает заметное влияние на формирование главных лепестков диаграмм направленности по каждому лучу/входу ФАР. Отмечается, что требуемую точность воспроизведения фазовых сдвигов отдельных ДФВ в относительной полосе частот порядка октавы (66%) удаётся обеспечить по данным литературных источников лишь при использовании направленных ответвителей, реализованных на отрезках симметричных электромагнитно связанных полосковых линий передачи с ТЕМ волнами. Кроме того, в обзоре проанализированы ключевые особенности излучателей дипольного вида, предложенных, запатентованных и интенсивно исследующихся в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) с участием соискателя последние 6 лет.

**Во втором разделе** выполнен синтез печатных дифференциальных фазовращателей новой структуры, защищённой патентом Российской Федерации № 2729513 (2020 год). Синтезируемая структура выполнена на электромагнитно связанных линиях передачи с ТЕМ волнами. В процессе декомпозиции этого фазовращателя сформирована его эквивалентная схема, содержащая два четвертьволновых направленных ответвителя, вторичные печатные линии которых соединены между собой так, что образуют замкнутый кольцевой проводник в форме вытянутого прямоугольника. При этом допущение о существовании/распространении в линиях поперечных ТЕМ волн не является сдерживающим фактором, так как это условие широко используется в мировой практике печатной реализации полосковых узлов СВЧ вплоть до частот 10 ГГц. В результате использования аналитического описания всех узлов ДФВ с помощью матриц рассеяния, включая их блочное представление, соискателю удалось сформировать целевую функцию, адекватно описывающую новую структуру ДФВ с замкнутым кольцевым проводником. Последующая параметрическая оптимизация целевой функции многих вещественных переменных позволила соискателю протабулировать оптимальные коэффициенты электромагнитной связи отрезков полосковых линий предложенной структуры дифференциального фазовращателя. При этом имелось ввиду полностью печатное технологическое исполнение на стандартной отечественной тонкой двухсторонне фольгированной диэлектрической заготовке из высокооборотного диэлектрика ФАФ-4Д. Полученные в конце раздела результаты полноволнового трёхмерного электродинамического моделирования и экспериментальные исследования изготовленной конструкции ДФВ подтвердили адекватность основных этапов разработанного метода синтеза и позволили соискателю сделать заключение о том, что печатная реализация этих ДФВ не требует применения новых технологических приёмов и дополнительной технологической оснастки на производственных участках отечественной радиопромышленности.

**Третий раздел** посвящён системно-техническому и электродинамическому анализу ряда печатных линейно поляризованных излучателей дипольного вида, интегрированных с соответствующими модифицированными печатными симметрирующими устройствами на единой диэлектрической заготовке. Это позволяет реализовать непосредственное подключение полужёсткого коаксиального кабеля (являющегося несимметричной линией передачи) к излучателям дипольного вида, которые по своей природной сущности принадлежат к симметричным относительно «земли» нагрузкам. В разделе акцентируется внимание на

одном из инструментов электродинамического анализа антенн, а именно: метод наводимых электродвижущих сил (ЭДС) в теории проволочных антенн с цилиндрическими проводниками. На примере пятиэлементного излучателя дипольного вида с концевым питанием конкретизируется его математическая модель и формируются уравнения для собственных и взаимных импедансов каждого из пяти элементов. Затем определяются выражения для комплексных входных мощностей пятиэлементной системы, и находится её входное комплексное сопротивление для случая одного источника возбуждения. Последующий этап позволяет рассчитать импедансные и излучательные характеристики 5-элементного (в принципе: с произвольным числом элементов) излучателя дипольного вида с концевым питанием, а также и всех других излучателей, упомянутых в данном разделе. Отличительной особенностью их всех является доработка/модернизация их структуры под обязательные требования формирования/компоновки антенного полотна эквидистантной линейной ФАР с линейно поляризованными излучателями. Результаты полноволнового трёхмерного электродинамического моделирования и последующие экспериментальные исследования печатных многолучевых ФАР подтвердили приемлемость и корректность выбранного автором подхода.

**В четвёртом разделе** решены вопросы, связанные с непосредственной разработкой отдельных печатных фрагментов/узлов решётки, а также исследованы особенности предложенных соискателем в патенте РФ № 2757538 (2021 год) компоновочных схем диаграммообразующих устройств Батлера и соответствующих им антенных полотен многолучевых ФАР в целом. При этом дан анализ учёта этих особенностей при построении компоновочных схем четырёх- и восьми-лучевых ФАР. В этом разделе соискатель использует весьма рациональный подход, когда на начальной стадии компоновки полностью печатной ФАР формируется и рассчитывается так называемый «стартовый облик», осуществляемый с использованием системно-технического подхода к реализации антенн СВЧ, ряда упрощающих допущений и некоторого количества элементов эвристических представлений, зависящих от опыта работы исследователя. И лишь затем производятся уточнения (образно выражаясь, «шлифовка») в сформированной топологии всей ФАР с использованием весьма гибкого и производительного пакета трёхмерного электродинамического моделирования “CST Studio Suite”. Такой подход не только экономит вычислительные ресурсы, но и характеризуется тем, что на начальной стадии проектирования выбор предварительных значений параметров и геометрических размеров конструкции ФАР осуществляется осознанно с

привлечением классических положений системного подхода в теории антенн, сформулированных ещё в «докомпьютерную» эпоху.

**Экспериментальным исследованиям многолучевых ФАР посвящён пятый раздел.** В нём представлены результаты измерений, полученных на поверенном оборудовании, установленном в сертифицированной безэховой камере Новосибирского АО «НИИИП-НЗиК», подведомственного Концерну «ВКО «Алмаз-Антей»». Увеличение коэффициента усиления в лучах разработанных ФАР в среднем на 2 дБ при приемлемом согласовании всех их входов с питающими коаксиальными кабелями волнового сопротивления 50 Ом достигнуто за счёт печатной реализации новых конструктивно-компоновочных схем, что обеспечивает беспрепятственную реализуемость таких ФАР на центральных частотах 2...4 ГГц, включая требования стандартов мобильной связи и широкополосного доступа в Интернет.

Выводы по разделам и самой диссертационной работе чётко сформулированы и подтверждены результатами электродинамического моделирования и экспериментами, а оформление материалов соответствует требованиям, предъявляемым к квалификационным работам. Автореферат в полной мере отражает структуру и содержание диссертационной работы.

### **Новизна результатов, выводов, рекомендаций и оценка значимости материалов диссертационной работы**

Рассматривая данную работу в целом, можно констатировать, что она выполнена на современном уровне. При этом целесообразно подчеркнуть, что из имеющейся научно-технической литературы вполне ясно, что следует сделать в принципе при модернизации/совершенствовании многолучевых ФАР. Но одновременно это же означает, что соответствующие подходы, методы и технические решения существенно зависят от выбора элементной базы ФАР, диапазона рабочих частот, объекта установки и ряда других обстоятельств конкретных технических заданий, превращая задачи совершенствования в многофакторные. Успешное решение таких задач, даже частичное, представляет собой совокупность трудоёмких и насыщенных новизной научно-технических решений, которые во многих случаях опираются на трудно формализуемые процедуры, носящие эвристический характер и зависящие от накопленного опыта работы исполнителей проектов. При этом системный, научно обоснованный выбор направления очередного этапа в сочетании с развитыми методами оптимизации, моделирования и технологической реализации содержит в

себе хорошие потенциальные возможности. Представляется, что перечисленное выше, нашло своё место в данной диссертационной работе, квалифицируя её новизну, выводы, рекомендации и их значимость как достойные и заслуживающие поддержки.

Так, в первом защищаемом положении соискателем предложена трёхэтапная процедура синтеза сверхширокополосных дифференциальных фазовращателей на связанных полосковых линиях. Второе защищаемое положение обосновывает возможность достижения равномерной частотной характеристики согласования и возрастание коэффициента усиления на 2,1 дБ за счёт электромагнитного взаимодействия предложенных соискателем пяти близко расположенных и параллельно соединённых элементарных излучателей дипольного вида с концевым питанием, геометрическая длина которых прогрессивно уменьшается. В третьем положении доказано увеличение относительной полосы рабочих частот диаграммообразующих устройств Батлера до 36% при числе каналов 4 и до 48% при 8-ми каналах. Использование предложенных ДООУ и многоэлементных излучателей дипольного вида позволяет, согласно положению 4, реализовать полностью печатные многолучевые ФАР с коэффициентами усиления в лучах до 12 дБ при малых уровнях коэффициентов отражений от входов 8-канальных решёток в относительной полосе частот 11%.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Достоверность результатов работы основана на непротиворечивом выборе логических решений, адекватном математическом аппарате теории электромагнитного излучения и линейных электрических цепей СВЧ, проверенных временем численных и аналитических методов. Результаты работы отвечают критериям воспроизводимости и повторяемости, а количественное и качественное совпадение результатов анализа, синтеза и экспериментальных исследований вполне убедительно. В частности, работоспособность предложенных топологий полностью печатных восьми-лучевых антенных решёток свидетельствует о корректности теоретических выкладок.

#### **Общая оценка диссертационной работы**

Представленная работа характеризуется достаточной полнотой представления теоретических и экспериментальных результатов, свидетельствующих о её завершённости.

Вместе с тем, по диссертационной работе имеется ряд замечаний.

Так, в подразделе 3.3 рассматривается 5-элементный излучатель дипольного вида с концевым питанием. Однако при этом соискателем не получены аналитические выражения в замкнутой форме для расчёта входного коэффициента отражения таких излучателей, в том числе при произвольном числе элементов.

Далее, в работе теоретически, включая 3-D электромагнитное моделирование в пакете “CST Studio Suite” и экспериментально исследовались линейные эквидистантные антенные решётки с равноамплитудным распределением возбуждения вдоль излучателей антенного полотна. Это обеспечивает уровень боковых лепестков лишь (-13,2) дБ. Представляется целесообразным оценить возможность применения предложенной соискателем и запатентованной в Российской Федерации компоновочной схемы диаграммообразующего устройства Батлера и для формирования неравноамплитудного (например, Дольф-Чебышевского) распределения мощностей вдоль излучателей, что способствовало бы заметному снижению уровня боковых лепестков.

Имеются замечания и к иллюстрациям в работе. Так, на рисунках 3.7 и 3.13 представлены топологии излучателей дипольного вида, реализованные на обеих сторонах листового диэлектрика, облицованного изначально медной фольгой. На этих рисунках указаны необходимые размеры печатных фрагментов, но какой именно фрагмент соединяется с корпусом объекта установки (иными словами, с «землёй») – не указано. Поэтому приходится догадываться: где устанавливается коаксиально-полосковый соединитель, и с какими фрагментами топологии соединяются гальванически (например, пайкой) корпус разъёма и его центральный штырёк.

Кроме того, в работе встречаются стилистические погрешности. Например, на стр. 92 записано: «Проведя исследование, получилась зависимость...».

Отмеченные замечания носят локальный характер и не снижают общего положительного впечатления о работе, её научных результатах, защищаемых положениях, методиках проектирования и не вызывают сомнений в её поддержке.

## **Выводы**

Диссертационная работа Юрия Николаевича Паршина *«Печатные многолучевые антенные решётки с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида»* является законченным самостоятельно выполненным поисковым исследованием, представляющим

значимый научный и прикладной интерес, характеризуется рядом обоснованных научных положений, выводов и рекомендаций, изложен технически грамотным языком. Публикации и автореферат достаточно полно отражают содержание и основные результаты работы. Диссертация удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 с учётом дополнений Постановлений Правительства от 21.04.2016 года № 355, от 02.08.2016 года № 748, от 29.05.2017 года № 650 и от 28.08.2017 года № 1024.

Автор работы Паршин Юрий Николаевич вполне состоялся как квалифицированный исследователь, способный самостоятельно ставить и решать современные задачи в области антенной техники СВЧ, и потому заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

д.т.н., профессор



Л.И. Пономарев

### Сведения

Пономарев Леонид Иванович, доктор технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии», профессор кафедры «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

Телефон: +7 (499) 158-47-40.

E-mail: mai4062@mail.ru

Подпись профессора Л.И. Пономарева заверяю.

Директор дирекции института № 4  
«Радиоэлектроника, инфокоммуникации  
и информационная безопасность» МАИ

канд. техн. наук



В.В. Кирдяшкин

«17» июня 2022 г.