

ОТЗЫВ

официального оппонента профессора кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем) Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г. Воронеж) доктора физико-математических наук, профессора РАЗИНЬКОВА Сергея Николаевича на диссертацию КРЮКОВА Дмитрия Юрьевича «Разработка методик улучшения характеристик антенн вытекающей волны дифракционного типа за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Общая информация о диссертации. Диссертация Крюкова Д.Ю. «Разработка методик улучшения характеристик антенн вытекающей волны дифракционного типа за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва» выполнена на кафедре радиотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет». Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Останков А.В.

На отзыв официальному оппоненту были представлены:

- диссертация общим объемом 219 листов формата А4, состоящая из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемых источников, включающего 150 наименований, и двух приложений;
- автореферат диссертации объемом содержательной части 1 печатный лист.

Актуальность темы диссертационного исследования. Современный этап развития антенной техники характеризуется интенсивным поиском конструктивных решений по созданию приемоизлучающих систем для устойчивого информационного обмена при наращивании плотности частотного распределения радиоканалов, увеличении размеров зон обслуживания абонентов и совершенствовании технологий создания преднамеренных деструктивных воздействий на информационно-телекоммуникационные сети.

Одно из перспективных направлений создания высокоэффективных антенных устройств диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) ориентировано на использовании эффекта преобразования поверхностных волн в объемные при дифракции неоднородных плоских электромагнитных волн на периодически размещенных нерегулярных структурах.

Конструкция антенны дифракционного излучения, нашедшая широкое применение в практике построения информационно-телекоммуникационных сетей, представляет собой периодическую отражательную решетку, покрытую слоем диэлектрика. Для возбуждения указанной структуры, представляющей собой антенну вытекающей волны дифракционного типа (АВВДТ), используется открытая часть волновода. За счет открытого характера распределительно-излучающей системы антенна обладает значительными энергетическими преимуществами перед микрополосковыми и волноводно-щелевыми антеннами, для которых характерно значительное снижение коэффициента полезного действия, обусловленное тепловыми потерями в полосковых и металлических вол-

новедущих структурах. Рациональный выбор вариантов исполнения таких антенн позволяет достичь высоких уровней угло-частотной и поляризационной чувствительности при ограничениях на массогабаритные показатели.

Разработка АВВДТ с улучшенными характеристиками базируется на использовании свойств квазипериодических и неэквидистантных дифракционных решеток. Подобные структуры представляют особый класс электродинамических сред, у которых в направлении распространения поверхностной волны изменяются шаг расположения и параметры элементов (канавок в гребенчатой структуре, диафрагм в круглом волноводе, диэлектрической проницаемости слоев структуры).

Научные исследования в области разработки методов улучшения характеристик АВВДТ за счет применения неравномерных структур распределительно-излучающих систем являются весьма востребованными. Неравномерная форма раскрыва позволяет создавать низкопрофильные конформные антенны для аэродинамических объектов, включая беспилотные летательные аппараты с малой массой полезной нагрузки.

Методические основы электродинамического анализа и синтеза АВВДТ, базирующиеся на положениях теории антенных решеток, заложены в трудах д.ф.-м.н. Шестопалова В.П. Электродинамические модели указанных приемоизлучающих структур, построенные в соответствии с положениями теории дифракции электромагнитных волн, представлены в работах д.т.н. Воскресенского Д.И., Климова А.И., Останкова А.В., Пастернака Ю.Г., д.ф.-м.н. Нефедова Е.И.

Вместе с тем, развитые подходы к построению АВВДТ могут применяться только для нахождения характеристик и параметров эквидистантных конструкций, поскольку при их разработке в полной мере не учтен ряд факторов.

1. При выборе закономерностей продольного изменения формы и размеров элементов дифракционной решетки и периода излучающего раскрыва достигается улучшение направленных и энергетических свойства антенн, а также характеристик структур, содержащих строго периодические решетки.

2. Вследствие отказа от строгой эквидистантности дифракционной решетки открываются возможности ослабления бокового излучения в диаграмме направленности, снижения угло-частотной чувствительности АВВДТ и реализации расширенной полосы частот при фиксированном направлении излучения, коррекции фазового распределения поля возбуждения на излучающем раскрыве.

3. Применение неравномерного в направлении распространения поверхностной волны профиля распределительно-излучающей системы позволяет более гибко контролировать степень связи планарного диалектического волновода и дифракционной решетки и за счет управления ею формировать требуемое амплитудное распределение поля на апертуре антенны или заданный входной импеданс.

Таким образом, тема диссертационного исследования Крюкова Д.Ю. «Разработка методик улучшения характеристик АВВДТ за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва», посвященной совершенствованию методических основ проектирования и технологий построения нового класса антенн с существенно улучшенными характеристиками, является актуальной.

Степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В диссертации на основании выполненных автором исследований решена научная задача разработки методик определения характеристик АВВДТ с неравномерными профилями излучающих раскрывов и нахождения параметров их конструкций для реализации требуемых показателей пространственно-частотной избирательности передачи-приема сигналов.

Содержание работы, раскрывающее суть полученных автором научных результатов, сформулированных на их основе выводов и рекомендаций, изложено в четырех главах.

В первой главе диссертации проведен анализ современного состояния и тенденций совершенствования, получены оценки перспектив построения АВВДТ. Выполнен обзор компьютерных программ (пакетов) электродинамического моделирования и представлены аналитические выражения для нахождения характеристик дифракционной антенны в виде периодической отражательной гребенки с прямоугольными канавками, покрытой слоем диэлектрического материала. Обоснованы рекомендации по построению имитационных моделей антенн на основе совместного применения методов аналитического расчета и численного решения краевых задач при корректном представлении проектируемых устройств в расчетной области и выборе сетки разбиения пространства с достижением установленной точности нахождения значений показателей пространственно-частотной избирательности передачи-приема сигналов и выполнении ограничений на вычислительные ресурсы.

Во второй главе диссертации выполнена постановка задачи структурно-параметрического синтеза антенн вытекающей волны с гребенчатыми дифракционными решетками. Сформулированы рекомендации по выбору способа возбуждения поверхностной волны планарного диэлектрического волновода и модификации профиля излучающего раскрыва в интересах снижения поляризационной чувствительности, достижения требуемой ширины главного луча при пониженном уровне боковых лепестков диаграммы направленности АВВДТ.

Разработаны методики оптимизации показателей направленности АВВДТ за счет изменения профиля распределительно-излучающей системы при вариациях расстояния между гребенчатой дифракционной решеткой и планарным диэлектрическим волноводом по заданному амплитудному распределению поля, уменьшения фазовых ошибок путем изменения шага расположения канавок в гребенчатой решетке при переменном прицельном расстоянии.

В третьей главе диссертации разработана методика построения АВВДТ с неравномерным профилем распределительно-излучающей системы на основе планарного диэлектрического волновода и дифракционной решетки гребенчатого типа. С использованием серии вычислительных экспериментов на базе коммерческого симулятора получены оценки влияния конечных размеров волновода и условий его возбуждения на форму амплитудного и фазового распределений в АВВДТ с различными законами продольного изменения глубины канавок.

В четвертой главе диссертации разработаны и с применением компьютерных программ (пакетов) электродинамического моделирования исследованы АВВДТ:

- на основе однопроводной линии передачи с гребенчатой дифракционной решеткой при различных устройствах возбуждения;
- на основе периодической гребенчатой решетки с большим числом канавок;
- на основе симметричных ленточных решеток.

Установлены закономерности изменения коэффициентов стоячей волны по напряжению и коэффициентов полезного действия антенн при различных видах топологии и геометрических размерах распределительно-излучающих систем. Определены области эффективного применения АВВДТ с обоснованными параметрами конструкции в радиотехнических устройствах и информационно-телекоммуникационных системах.

К числу наиболее значимых научных результатов, полученных автором на основании выполненных исследований и использованных для формулировки положений, выдвигаемых для публичной защиты, относятся:

- численно-аналитическая модель для анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем распределительно-излучающей системы;
- методика определения конструктивных параметров АВВДТ с изменяющимся вдоль раскрыва прицельным расстоянием по заданному амплитудному распределению возбуждающего электрического поля;
- методика формирования поперечного излучения в АВВДТ с модифицированным раскрывом при одностороннем способе возбуждения;
- предложения по конструкции АВВДТ, состоящей из устройства возбуждения в виде прямоугольного ступенчатого диффузора, периодической гребенчатой решетки и однопроводной нерегулярной линии передачи на основе центральной жилы коаксиального кабеля с тефлоновой изоляцией.

Указанные результаты и тематика диссертации Крюкова Д.Ю. соответствуют направлениям исследований, определенным паспортом специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии:

- по пункту 1 (в части решения внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн, определения их предельно достижимых характеристик, возможных путей построения);
- по пункту 3 (в части исследования и разработки новых антенных систем с существенно улучшенными параметрами);
- по пункту 9 (в части разработки методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем широкого применения).

Высокая степень обоснованности научных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных автором, определяется тем, что они получены с использованием современных методов теории волновых процессов, дифракции электромагнитных волн, электродинамики и методов моделирования сложных приемоизлучающих структур.

Достоверность и новизна научных результатов, выводов и рекомендаций. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- применением теоретически обоснованных и прошедших апробацию методов исследования, сертифицированных средств для проведения вычислительных экспериментов;

- корректным выбором ограничений, допущений и исходных данных из практики разработки антенных систем и изыскания технических решений по их интеграции в состав радиоэлектронной аппаратуры.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается ясной физической трактовкой выявленных эффектов, их соответствием общим физическим закономерностям, совпадением результатов теоретических исследований с данными, полученными в ходе вычислительных экспериментов с применением высокоэффективного симулятора. Частные результаты исследования, использованные для выполнения контрольных расчетов по разработанным методикам, согласуются с результатами, полученными альтернативными способами и содержащимися в работах других авторов.

Обоснование полученных результатов проводилось на основе фундаментальных принципов современной науки. Значения характеристик и параметров антенн получены с использованием сертифицированных вычислительных средств и базовых технологий для электродинамического моделирования, анализа и синтеза приемаизлучающих структур.

Научная новизна результатов исследования заключается в совершенствовании методик анализа и синтеза АВВДТ с неравномерными профилями гребенчатых решеток с использованием модифицированной модели дифракции поверхностной волны и метода энергетического расчета характеристик, позволившем обеспечить требуемую точность установления конструктивных параметров при ограничениях на вычислительные ресурсы.

Теоретическая значимость работы определяется развитием методических основ для решения задач дифракции электромагнитных волн в интересах анализа и синтеза высокоэффективных антенн, определения их предельно достижимых характеристик, возможных путей построения, разработки методов автоматизированного проектирования и оптимизации АВВДТ.

Практическая значимость работы состоит в разработке предложений по проектированию и обосновании конструктивно-технических решений в интересах построения АВВДТ с показателями пространственно-частотной избирательности передачи-приема сигналов, удовлетворяющими современным тактико-техническим требованиям к радиотехническим устройствам и информационно-телекоммуникационным системам.

Численно-аналитическая модель для анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем распределительно-излучающей системы позволяет сократить затраты времени на расчет амплитудно-фазового распределения токов приемаизлучающей структуры при точности вычислений, соизмеримой с показателями, достижимыми при использовании классического метода усеченного интегрирования спектральной плотности процесса. В результате становится возможным многоальтернативное рассмотрение вариантов построения антенн с вариативными комбинациями конструктивных параметров.

Методика определения конструктивных параметров АВВДТ с изменяющимся вдоль раскрыва прицельным расстоянием по заданному амплитудному распределению возбуждающего электрического поля позволяет проектировать

приемоизлучающие структуры с улучшенными показателями направленности. Автором продемонстрированы возможности снижения боковых лепестков диаграммы направленности на 70% при одновременном увеличении коэффициента усиления антенны на 10% по сравнению с показателями, достижимыми при постоянном прицельном расстоянии.

Методика формирования поперечного излучения при одностороннем способе возбуждения АВВДТ с модифицированным раскрывом позволяет увеличить ее коэффициент полезного действия свыше 98% при одновременном снижении уровня боковых лепестков диаграммы направленности до -15 дБ и более.

Предложения по конструкции АВВДТ с устройством возбуждения в виде прямоугольного ступенчатого диффузора, периодической гребенчатой решеткой и однопроводной нерегулярной линией передачи на основе центральной жилы коаксиального кабеля с тефлоновой изоляцией позволяют достичь коэффициента стоячей волны по напряжению 1,3 при повышении коэффициента полезного действия до 94%.

Предложенные автором решения строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными результатами в области электродинамического анализа и параметрического синтеза антенн дифракционного типа.

Основные результаты диссертации прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных форумах по тематике исследования и в полной мере опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

Представленные в диссертации методы и методики АВВДТ обеспечивают высокую точность определения показателей эффективности передачи-приема сигналов, что, в свою очередь, позволяет снизить ресурсные и временные затраты на изготовление, экспериментальные исследования и настройку опытных образцов радиоэлектронной аппаратуры.

Наглядной иллюстрацией практической значимости научных результатов, исследования является их широкомасштабное внедрение:

- в акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) при проектировании и разработке высокотехнологичных антенн беспроводной связи;
- в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» при изготовлении макетов дифракционных антенн и проведении лабораторных занятий по дисциплинам радиотехнического профиля;
- в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский Ордена Трудового Красного Знамени технический университет связи и информатики» при проведении лабораторного практикума по дисциплине «Радиотехнические системы».

Корректно выстроенная последовательность решения поставленных задач позволила соискателю достичь цели исследования. Стил изложения материалов работы ясный, лаконичный; научная терминология в области теории и техники антенн и смежных областях исследования используется правильно; сим-

волика формульных обозначений соответствует принятой в современной тематической научной литературе.

Автореферат правильно отражает суть и содержание диссертации. В нем в лаконичной форме ясно изложены основные идеи и выводы по работе, показаны определяющий вклад соискателя в проведенные исследования, степень новизны и практическая значимость результатов.

Замечания и недостатки диссертационной работы. К числу основных замечаний и недостатков работы, на наш взгляд, относятся следующие.

1. При анализе степени разработанности темы диссертационного исследования автор ограничился перечислением фамилий ведущих ученых, деятельность которых связана с проектированием АВВДТ, детально не раскрыв суть проблемных вопросов, обусловивших потребность решения научной задачи.

2. Имеет место неполное соответствие между формулировками задач исследования, научных результатов и авторскими оценками их научной новизны. При этом не представляется целесообразным определять вопросы «анализа текущего состояния и перспектив развития теории и техники АВВДТ» в качестве самостоятельной задачи исследования. Ее решение не может привести к получению нового научного результата, а несоответствие в практике и науке при разработке и исследовании антенн установлено при обосновании актуальности темы диссертационного исследования. Формулировки научной новизны результатов исследования желательно дополнить описанием оригинальных методических приемов, отражающих суть развития ранее известных подходов к анализу и синтезу конструкций АВВДТ.

3. Представление модифицированной численно-аналитической модели АВВДТ в разделе 2.4 главы 2 не позволяет установить способ нахождения идеализированной зависимости отбора мощности от прицельного расстояния в электродинамической структуре «планарный диэлектрический волновод – гребенчатая дифракционная решетка» (рис. 2.6).

4. При представлении аналитического выражения (2.50) не приводятся пояснения, касающиеся учета потерь при вычислении значений коэффициента затухания в планарном диэлектрическом волноводе. Величина фактора потерь зависит от типа волны в диэлектрике; в источниках, включенных в список используемой при подготовке диссертации литературы, изложены способы ее расчета для различных типов волн.

5. Представляется целесообразным оценить степень взаимного влияния секторных антенн на основе однопроводной линии передачи с гребенчатой дифракционной решеткой при их размещении в составе одной базовой станции.

Вместе с тем, указанные недостатки, непосредственно не охватывающие положения, выдвигаемые для публичной защиты, существенно не снижают качества выполненной работы и не ставят под сомнение ее положительную оценку.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. На основе анализа диссертации Крюкова Д.Ю. «Разработка методик улучшения характеристик АВВДТ за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва» сделаны следующие выводы.

1. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная задача разработки методик определения характеристик АБВДТ с неравномерными профилями излучающих раскрывов и нахождения параметров их конструкций для реализации требуемых показателей пространственно-частотной избирательности передачи приема сигналов. Решение указанной научной задачи имеет значение для совершенствования методических основ анализа и синтеза высокоэффективных антенн, определения их предельно достижимых характеристик, возможных путей построения, разработки методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем широкого применения в соответствии с пунктами 1, 3 и 9 паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

2. Диссертация является завершенной научной работой, обладающей внутренним единством, содержит новые научные результаты, нашедшие практическое использование при исследовании и создании АБВДТ, удовлетворяющих современным тактико-техническим требованиям, и свидетельствующие о личном вкладе автора в науку.

3. Работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Крюков Д.Ю., достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Выражаю согласие с включением моих персональных данных в аттестационное дело соискателя Крюкова Д.Ю. и их дальнейшей обработкой.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, профессор
кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем)
Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Разиньков Сергей Николаевич

«31» июля 2026 года

Подпись д.ф.-м.н., профессора Разинькова С.Н. заверяю.

Начальник отдела кадров
Военного учебно-на
«Военно-воздушна
Н.Е. Жуковского и
кандидат военных в

но-воздушных сил
профессора
Воронеж)

«31» июля 2026 го

И.Чужин