

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора кафедры «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГБОУ ВО МАИ Овчинниковой Елены Викторовны на диссертационную работу Крюкова Дмитрия Юрьевича «Разработка методик улучшения характеристик антенн вытекающей волны дифракционного типа за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Актуальность темы диссертационного исследования.

Диссертационная работа Крюкова Дмитрия Юрьевича «Разработка методик улучшения характеристик антенн вытекающей волны дифракционного типа за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва» посвящена исследованию плоских антенн дифракционного излучения с квазипериодической (модифицированной) апертурой и разработке методик, позволяющих сократить временные затраты на анализ и синтез, повысить коэффициент полезного действия (КПД), снизить уровень боковых лепестков (УБЛ), скорректировать фазовые искажения и улучшить характеристики направленности в антеннах данного типа.

В основу антенн вытекающей волны дифракционного типа (АВВДТ) положен эффект преобразования поверхностных электромагнитных волн в объемные, наблюдаемый при дифракции неоднородных плоских волн на периодических или квазипериодических решетках. Преимуществами, выгодно отличающими планарные АВВДТ от иных видов антенн, являются простота и надежность конструкции, высокая технологичность изготовления с возможностью массового производства за счет повторяемости размеров, малые массогабаритные характеристики и низкие стоимостные показатели. АВВДТ может быть построена на основе простейшей электродинамической схемы, представляющей накрытую плоским диэлектрическим волноводом (ПДВ) периодическую дифракционную решетку (ДР). Возбуждение такой электродинамической структуры может быть реализовано открытым концом волновода или рупорным облучателем. По причине открытой металлодиэлектрической излучающей системы АВВДТ превосходят по энергетической эффективности микрополосковые и волноводно-щелевые антенны, для которых характерно значительное снижение КПД из-за тепловых потерь в полосковых и металлических волноведущих структурах.

АВВДТ находят широкое применение в современных радиолокационных станциях (РЛС) обнаружения и предотвращения столкновений с беспилотными воздушными судами, радиолокационном оборудовании, расположенном на морских и воздушных платформах, системах радиосвязи стандартов LTE (4G)/WiMAX и 5G. Эффективное функционирование современных РЛС и комплексов радиосвязи в СВЧ- и

КВЧ-диапазонах невозможно без использования антенн с высоким КПД, способных формировать в пространстве остронаправленные лучи диаграммы направленности (ДН). Применение в АВВДТ строго равномерного профиля излучающего раскрыва в реальных технических задачах не позволяет реализовать наилучшие характеристики антенны. По этой причине актуальной проблемой является установление оптимальной закономерности изменения профиля распределительно-излучающей системы, которая сможет обеспечить требуемую ширину главного лепестка ДН антенны при малом уровне бокового излучения.

Важно заметить, что среди открытых отечественных и зарубежных научных публикаций можно найти лишь общие рекомендации по синтезу АВВДТ с неравномерным профилем излучающего раскрыва, реализованных на основе ПДВ и гребенчатой ДР. При этом ряд направлений, позволяющих снизить УБЛ, расширить полосу рабочих частот при фиксированном направлении излучения, а также обеспечить трсбуемый вид амплитудно-фазового распределения, остаются недостаточно исследованными. В частности, существует весьма ограниченное число публикаций, учитывающих, что улучшение характеристик АВВДТ может быть выполнено за счет следующих геометрических модификаций профиля излучающего раскрыва:

1) изменения в направлении вытскания поверхностной волны глубины канавок ДР, а также шага их размещения;

2) вариации расстояния (зазора) между ПДВ и гребенчатой ДР.

Перечисленные обстоятельства подтверждают целесообразность и свидетельствуют о необходимости развития существующих подходов к анализу и синтезу АВВДТ с неравномерным профилем излучающего раскрыва, а потому диссертация Д.Ю. Крюкова является достаточно *современным и актуальным исследованием.*

Степень обоснованности и достоверности научных результатов, положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается:

1). применением известного и многократно апробированного метода частичных областей для решения задач дифракции плоской однородной H -поляризованной электромагнитной волны на одномерно-периодических гребенчатых и ленточных решетках;

2). использованием для расчета амплитудно-фазового распределения в раскрыве антенны методов усеченного интегрирования комплексной спектральной плотности поля дифракции и интеграла Кирхгофа;

3). корректным выбором диэлектрических свойств материалов, граничных условий и плотности сетки разбиения пространства,

обеспечивающих верное геометрическое представление моделируемых антенн в расчетной области электродинамического симулятора;

Достоверность защищаемых научных положений подтверждена:

1). расчетом характеристик антенн в современном электродинамическом симуляторе с решателем на основе метода конечного интегрирования во временной области;

2). сопоставлением результатов расчета характеристик антенн с результатами полноволнового моделирования;

3). практическим внедрением результатов диссертации, в частности, использованием предложенных методик проектирования в АО НПП «Автоматизированные системы связи» при разработке высокотехнологичных антенн беспроводной связи и расширении функциональных возможностей радиоаппаратуры СВЧ и КВЧ-диапазонов.

Основные результаты диссертационной работы в полной мере отражены в публикациях, общее количество которых составляет 21 научную работу, включая 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в изданиях, индексируемых в реферативно-библиографической базе Scopus, и 10 докладов на научно-технических конференциях.

Научная новизна результатов, положений, выводов, методик и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научной новизной обладают следующие результаты, полученные соискателем:

1. Разработан эффективный алгоритм расчета АФР в АВВДТ с неравномерным профилем гребенчатой решетки, основанный на использовании модификации модели дифракции поверхностной волны на раскрыве антенны; алгоритм отличается от классического интегрирования спектральной плотности поля использованием интеграла Кирхгофа, что позволяет значительно снизить временные затраты на расчет поля в фиксированных точках на раскрыве АВВДТ.

2. Разработана методика энергетического расчета АВВДТ при заданном амплитудном распределении поля, позволяющая улучшить характеристики направленности антенны; методика в отличие от известных методов энергетического расчета периодических антенн вытекающей волны существенно опирается на экспериментально полученную зависимость отбора мощности от расстояния между линией возбуждения и ДР, а также учитывает относительную мощность потерь в ПДВ.

3. Предложена методика формирования поперечного излучения в АВВДТ с модифицированным раскрывом при одностороннем способе возбуждения, позволяющая значительно увеличить КПД антенны, отличающаяся использованием процедуры оптимизации положения дополнительной канавки относительно основной и подбора глубины дополнительной канавки.

4. Установлена возможность повышения эффективности АВВДТ на основе однопроводной линии передачи с периодической гребенчатой решеткой за счет применения устройств возбуждения, отличных от классического конического рупора.

Значимость научных результатов, положений, выводов, методик и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Значимость результатов диссертационного исследования проявляется в том, что:

1). проведен анализ существующих прототипов плоских дифракционных антенн, в результате которого показана целесообразность разработки АВВДТ с улучшенными характеристиками за счет вариации профиля излучающего раскрыва;

2). выполнена модификация известной электродинамической модели для анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем распределительно-излучающей системы, заключающаяся в дополнении модели математическим аппаратом для экспресс-расчета АФР. Отличие разработанного аппарата от известных методов расчета заключается в представлении поля дифракции в конечном числе точек на излучающем раскрыве в соответствии с формулой Кирхгофа из скалярной теории дифракции. Предложенный способ расчета АФР значительно превосходит по быстродействию известный метод интегрирования спектральной плотности поля над излучающим раскрывом, обеспечивая соизмеримую точность вычислений, и может быть использован на ранних этапах проектирования, где требуется экспресс-анализ характеристик и показателей АВВДТ;

3). разработана методика энергетического расчета АВВДТ с изменяющимся вдоль раскрыва расстоянием между ПВД и ДР при заданном амплитудном распределении поля. Отличие предлагаемой методики от известных методов энергетического расчета заключается в использовании полученной на основе модифицированной численно-аналитической модели зависимости отбора мощности от прицельного расстояния и учете относительной мощности потерь в ПДВ. Это делает методику пригодной для синтеза квазипериодических раскрывов АВВДТ применительно к коротковолновой части СВЧ и КВЧ диапазонов;

4). разработана методика формирования высокоэффективного поперечного излучения в АВВДТ с модифицированным раскрывом при одностороннем способе возбуждения, позволяющая увеличить КПД антенны за счет оптимизации положения системы дополнительных канавок относительно основной и/или подбора глубины дополнительных канавок. Установлено, что приращение излучательной способности и эффективности излучения АВВДТ при оптимизации глубины системы дополнительных канавок выше, чем в случае подбора расстояния между дополнительными и основными канавками;

5). предложена высокотехнологичная АВВДТ с длиной раскрыва $15\lambda_0$, состоящая из устройства возбуждения в виде прямоугольного ступенчатого диффузора, периодической гребенчатой решетки и однопроводной линии передачи на основе центральной жилы коаксиального кабеля с тефлоновой изоляцией. Разработанная антенна на частоте 2,4 ГГц обладает коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) равным 1,3, значительным КПД (94%), имеет всерный характер ДН (в H -плоскости) с шириной ДН в E -плоскости менее 5° и КУ – 14,5 дБ. Конструкция АВВДТ обеспечивает возможность гибкой настройки электрических характеристик.

6). разработана узконаправленная линейная антенна X -диапазона на основе накрытой ПДВ периодической гребенчатой решетки. Предлагаемая конструкция АВВДТ, обладая площадью излучающего раскрыва менее $0,2 \text{ м}^2$, характеризуется высокими КУ и КПД, шириной ДН в E -плоскости не больше 1° , а также низким КСВН и малыми тепловыми потерями. Показана возможность эффективной реализации антенной системы на основе ПДВ, интегрированного с металлической периодической решеткой, образованной канавками прямоугольного профиля. Продемонстрирована возможность уменьшения уровня бокового излучения более чем на 6 дБ за счет глубинного профилирования ДР и последующей оптимизации величины зазора между ПВД и ДР;

7). разработана планарная АВВДТ для базовой станции стандарта 5G. Конструкция антенны содержит две симметричные металлические ленточные решетки, изготовленные на основе ламината Sivolam 245, и устройство центрального возбуждения в виде открытого конца волновода. КУ оптимизированной конструкции антенны в полосе частот 27,9-28,3 ГГц составляет от 16 до 19,3 дБ, а уровень бокового излучения не превышает «минус» 11,7 дБ. КПД в заявленной полосе частот составляет от 90 до 93%. Разработанная антенна характеризуется малыми габаритными размерами, простотой конструкции и технологичностью изготовления.

В основу диссертационной работы положены современные достижения отечественной и зарубежной теории и техники антенн и СВЧ-устройств, материалы работы свидетельствуют о ценности исследований автора для развития технологий проектирования, оптимизации и настройки антенных систем. Поставленные соискателем взаимосвязанные частные задачи диссертационного исследования решены, а представленная в диссертации совокупность результатов обеспечивает достижение цели исследования и свидетельствует о вкладе автора в науку.

Диссертация хорошо структурирована, стиль изложения текста работы соответствует научному. Рекомендации, пояснения и выводы, сформулированные в диссертационной работе, имеют строгую последовательность, смысловую точность и информативную насыщенность. Содержащиеся в тексте работы схемы, рисунки и таблицы достаточно наглядны. Соискатель корректно ссылается на результаты

исследований других авторов а, в частных случаях, приводит в диссертации результаты сравнения с ними.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы, позволяет судить о цели, задачах диссертационного исследования и достигнутых результатах. Приведенные в автореферате рисунки способствуют достоверному и критическому анализу полученных автором результатов.

Замечания и недостатки диссертации.

По содержанию диссертации можно высказать следующие замечания и недостатки:

1. Представленный в разделе 2.3 главы 2 алгоритм расчета АФР на раскрые АВВДТ методом интеграла Кирхгофа позволяет вычислить значения поля дифракции непосредственно над канавками гребенки, однако, соискателем не рассматривается вопрос об определении поля в области над ламелями решетки. Вместе с тем следовало бы провести интерполяцию, вычисленных в дискретных точках, значений поля.

2. Из текста диссертации не ясно каким способом проведена интерполяция значений прицельного расстояния, рассчитанных согласно разработанной методики энергетического расчета, для получения наилучшей закономерности $r(x)$ (рис. 2.12).

3. В разделе 4.3 главы 4 диссертации автор выполняет оптимизацию прицельного расстояния r по критериям минимума УБЛ и ширины главного лепестка ДН в E -плоскости не более двух градусов. Однако под «оптимизацией» правильнее понимать наличие у целевой функции множества перебираемых параметров, здесь же имеет место «перебор» значений одной переменной (прицельного расстояния r) из заданного интервала.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации Крюкова Дмитрия Юрьевича.

Выводы.

Диссертация Крюкова Дмитрия Юрьевича представляет собой законченное научное исследование, выполненное лично автором, содержащее достоверные, научно-обоснованные результаты и положения, обладающие научной новизной и практической ценностью. С учетом характера научных результатов, их теоретической и практической значимости следует сделать вывод о том, что в диссертации разработаны методы расчета и методики проектирования, внедрение которых позволяет создавать антенны с существенно улучшенными характеристиками и вносит заметный вклад в развитие теории и техники антенн дифракционного излучения.

Диссертация «Разработка методик улучшения характеристик антенны вытекающей волны дифракционного типа за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва» соответствует требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Крюков Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Радиофизика,
антенны и микроволновая техника»
ФГБОУ ВО МАИ, доктор технических наук
(научная специальность 2.2.14. (05.12.07)
Антенны, СВЧ-устройства и их технологии)

 Овчинникова Елена Викторовна

«08» сентября 2026 года

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

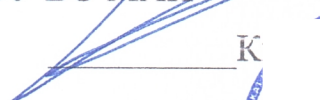
Телефон: 8-(499)-158-47-40.

Электронная почта: mai@mai.ru.

Против включения персональных данных, содержащихся в отзыве, в документы, связанные с защитой представленной диссертации, и их дальнейшей обработки не возражаю.

Подпись профессора Овчинниковой Елены Викторовны ЗАВЕРЯЮ:

Директор Дирекции Института № 4
«Радиоэлектроника, инфокоммуникации
и информационная безопасность»
ФГБОУ ВО МАИ

 Владимир Владимирович

