

На правах рукописи



**КРЮКОВ Дмитрий Юрьевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН  
ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ ДИФРАКЦИОННОГО ТИПА ЗА СЧЕТ  
НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОФИЛЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО РАСКРЫВА**

Специальность: 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель **Останков Александр Витальевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехники

Официальные оппоненты: **Овчинникова Елена Викторовна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиофизика, антенны и микроволновая техника», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (г. Москва)

**Разиньков Сергей Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Самара)

Защита состоится 24 сентября 2026 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «09» июля 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Фёдоров Сергей Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Динамично развивающееся научное направление техники и технологии дифракционных антенных решеток берет свое начало с 70-х годов XX-го века. В это время под руководством академика В.П. Шестопалова были проведены основополагающие теоретические и экспериментальные исследования рассеяния поверхностных волн диэлектрического волновода (ДВ) на дифракционной решетке (ДР) с пространственной периодичностью и периодом решетки, соизмеримым с длиной дифрагирующей волны. Результаты исследований убедительно показали возможность эффективного преобразования энергии неоднородных плоских электромагнитных волн в энергию излучаемой объемной радиоволны и управления такими ее характеристиками, как направление излучения и поляризация. Дальнейшее развитие научно-исследовательской работы в этой области позволило получить высоконаправленное электромагнитное излучение в окружающее свободное пространство и, как следствие, открыло перспективы использования этого явления в антенной технике.

Наиболее важное и перспективное направление дальнейшего развития теории и техники антенн дифракционного излучения (АДИ) может быть основано на исследовании свойств квазипериодических открытых излучающих структур. Подобные структуры являются особым классом электродинамических сред, у которых в направлении распространения поверхностной волны неравномерно изменяется профиль излучающего раскрыва. В антеннах вытекающей волны дифракционного типа (АВВДТ) профилирование излучающего раскрыва может быть реализовано как вариацией шага расположения отражающих элементов ДР (каналов в гребенчатой структуре, металлических лент или щелей), так и изменением физических и/или геометрических параметров входящих в нее элементов (диэлектрической проницаемости слоев структуры, расстояния между линией возбуждения и ДР).

Квазипериодический профиль позволяет существенно улучшить характеристики АВВДТ за счет пространственной и частотной коррекции направленных и энергетических свойств излучающего раскрыва. При отказе от строгой периодичности ДР появляется возможность подавления побочных максимумов диаграммы направленности (ДН) и бокового излучения, снижения угло-частотной чувствительности и формирования поперечного излучения при одностороннем возбуждении АВВДТ, коррекции фазового распределения поля на излучающем раскрыве. Одновременно с этим целенаправленное изменение расстояния в направлении распространения поверхностной волны позволяет гибко управлять степенью связи между питающей линией и ДР, обеспечивая реализацию требуемого амплитудного распределения поля на апертуре антенны и/или заданный входной импеданс.

Таким образом, тема разработки методик улучшения характеристик АВВДТ за счет неравномерности профиля излучающего раскрыва в настоящее время представляется актуальной. Обозначенная тема тесно связана с необходимостью совершенствования существующих подходов к анализу и параметрическому синтезу АВВДТ при помощи теоретических и экспериментальных методов исследования.

**Степень разработанности темы.** Значительный вклад в теорию и практику построения АВВДТ внесли ученые: В.П. Шестопалов, С.Д. Андреенко, А.П. Евдокимов, В.В. Крыжановский, С.А. Провалов, Ю.Б. Сидоренко, С.А. Шило, Д.И. Воскресенский, Е.И. Нефедов, С.Е. Банков, В.И. Юдин, А.И. Климов, Ю.Г. Пастернак, А.В. Останков, Ю.Е. Седельников, Ю.Б. Нечаев, С.А. Стешенко, М. Ando, Y.H. Cho,

W. J. Byun, M. S. Song, V. Manasson, M. Felman. Однако анализ общедоступных литературных источников свидетельствует о весьма ограниченном количестве научных работ и трудов, в которых были бы представлены математически строгие или экспериментальные данные об электрических характеристиках АВВДТ, спроектированных на основе квазипериодического профиля излучающего раскрыва. Существующие аналитические методы расчета во многом базируются на исследовании общей теории антенных решеток и результатах теоретических исследований модельных задач дифракции волн на периодических структурах, что позволяет производить достоверный анализ лишь типовых конструкций антенн. Недостатки имеющихся методов расчета прежде всего обусловлены ограниченным количеством информации о реальных физических процессах, происходящих в АДИ. Так, например, в настоящее время отсутствует сколько-нибудь достоверная численная модель дифракции поверхностной волны планарного ДВ (ПДВ) на гребенке, плоскость раскрыва которой ориентирована под углом к боковой поверхности ПДВ. Также не существует математической модели для точной оценки величины фазовых искажений в АВВДТ.

**Цель** диссертационной работы заключается в развитии методов анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем излучающего раскрыва, а также разработке методик расчета и проектирования, позволяющих создавать антенны с улучшенными характеристиками или параметрами.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1) провести анализ текущего состояния и перспектив развития теории и техники АДИ;

2) дополнить одну из существующих моделей анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем излучающего раскрыва математическим аппаратом для расчета амплитудно-фазового распределения (АФР);

3) разработать методику энергетического расчета, позволяющую улучшить показатели направленности в АВВДТ за счет вариации расстояния между линией возбуждения и ДР по заданному амплитудному распределению поля;

4) исследовать особенности формирования поперечного излучения в АВВДТ при одностороннем способе возбуждения раскрыва и введении на периоде дополнительной неоднородности, смещенной относительно основной;

5) исследовать возможность повышения эффективности АВВДТ с гребенчатой решеткой на основе однопроводной нерегулярной линии передачи за счет применения оптимального устройства возбуждения;

6) разработать высокотехнологичные конструкции АВВДТ с улучшенными характеристиками.

**Объектом исследования** являются АВВДТ с неравномерным профилем излучающего раскрыва.

**Предмет исследования** составляют АВВДТ, содержащие питающую линию на основе ПДВ или однопроводной линии передачи, а также отражательные гребенчатые и ленточные решетки различной конфигурации.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

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 коэффициент полезного действия (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.

**Теоретическая значимость работы** заключается в следующем:

– существующая численно-аналитическая модель для анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем излучающего раскрыва дополнена математическим аппаратом для расчета АФР на раскрыве антенны;

– разработана методика энергетического расчета антенны с изменяющимся вдоль раскрыва расстоянием между питающей линией и ДР по заданному амплитудному распределению поля, представляющая собой дальнейшее развитие существующей численно-аналитической модели для анализа и синтеза АВВДТ;

– предложена методика приближенной оценки фазовых искажений поля на апертуре и разработана методика их коррекции за счет изменения шага расположения неоднородностей в ДР;

– разработана численно-аналитическая экспресс-модель для проектирования АВВДТ на основе решетки с неэквидистантным расположением нескольких металлических лент (щелей) на периоде ДР.

**Практическая значимость результатов работы** заключается в том, что на их основе:

– применительно к АВВДТ с периодической гребенчатой решеткой реализован способ введения на периоде дополнительной канавки и предложены варианты увеличения КПД антенны с подобным раскрывом за счет оптимизации положения дополнительной канавки относительно основной и подбора ее глубины;

– разработана и верифицирована комплексная методика проектирования и автоматизированного расчета АВВДТ с неравномерным профилем на основе гребенчатой решетки;

– разработаны высокотехнологичные конструкции АВВДТ с улучшенными характеристиками.

**Методология и методы исследования.** При выполнении исследований использовались методы скалярной теории дифракции электромагнитных волн, вычислительные методы электродинамики, методы линейной алгебры и численные методы математического анализа, методы параметрической оптимизации (генетический алгоритм, метод роя частиц), высокоуровневое программирование, электродинамическое

моделирование на основе метода конечного интегрирования во временной области с применением современных систем автоматизированного проектирования.

### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту.**

1. Модифицированная численно-аналитическая модель для анализа и синтеза АВВДТ с неравномерным профилем распределительно-излучающей системы позволяет в среднем на два порядка сократить временные затраты на расчет АФР по сравнению с методом усеченного интегрирования спектральной плотности при обеспечении соизмеримой точности вычислений. Модель следует использовать для экспресс-анализа на ранних этапах проектирования антенн.

2. Методика энергетического расчета АВВДТ с изменяющимся вдоль раскрыва прицельным расстоянием по заданному амплитудному распределению поля позволяет достичь при проектировании антенн улучшенные показатели направленности, обеспечивающие минимизацию уровня боковых лепестков (УБЛ) при максимизации коэффициента усиления (КУ). В частности, у АВВДТ с гребенчатой решеткой из 22 канавок одинаковой ширины и глубины оптимизация расстояния позволила сформировать остронаправленный главный лепесток ДН, снизить УБЛ на 70% и одновременно увеличить КУ почти на 10% по сравнению со случаем постоянного прицельного расстояния. Методика ориентирована на расчет квазипериодических АВВДТ диапазона СВЧ или КВЧ.

3. Методика формирования поперечного излучения в АВВДТ с модифицированным раскрывом при одностороннем способе возбуждения позволяет увеличить КПД антенны за счет оптимизации положения дополнительной канавки относительно основной и подбора ее глубины. В частности, для АВВДТ с гребенчатой решеткой из 20 канавок глубиной  $h$  при введении на периоде дополнительной канавки глубиной  $0,625h$  (смещенной относительно основной на четверть длины волны в ПДВ) обеспечивается КПД более 98% при уровне боковых лепестков (УБЛ) «минус» 15 дБ. Дальнейшая оптимизация расположения системы дополнительных канавок позволяет повысить расчетный КПД антенны до 99,8% и снизить УБЛ до «минус» 17,6 дБ.

4. Высокотехнологичная конструкция АВВДТ, состоящая 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, позволяет на частоте 2,4 ГГц сформировать веерную ДН (в горизонтальной ( $H$ -) плоскости), а также обладает высоким КПД (94%) и коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН), близким к единице. Конструкция АВВДТ характеризуется возможностью гибкой настройки электрических параметров.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основные теоретические и практические результаты работы использованы в АО НПП «Автоматизированные системы связи» (г. Воронеж) при разработке высокотехнологичных антенн беспроводной связи для радиоаппаратуры СВЧ и КВЧ диапазонов. Ряд результатов внедрен в учебный процесс ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж) и Ордена Трудового Красного Знамени ФГБОУ ВО «Московский технический университет связи и информатики» (г. Москва).

**Достоверность и обоснованность** основных положений диссертации базируется на корректном использовании как традиционных, основанных на строгих электродинамических подходах и принципах, так и сравнительно новых вычислительных методов электродинамики, положенных в основу функционирования систем полномасштабного моделирования антенн и СВЧ-устройств. Адекватность и точность выполненных

математических расчетов и сформулированных гипотетико-дедуктивным методом выводов подтверждается результатами соответствующих экспериментальных исследований, проведенных посредством электромагнитного полноволнового моделирования.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационного исследования представлены на конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, 2015), Международной научно-практической конференции «Развитие личности как стратегия современной системы образования» (Воронеж, 2016), XXIII, XXIV, XXVII, XXVIII, XXX и XXXI Международных научно-технических конференциях «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2017, 2018, 2021, 2022, 2024, 2025), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС» (Воронеж, 2019), Международной научно-практической конференции «Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы» (Воронеж, 2024).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 научная работа, включая 8 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в изданиях, индексируемых в реферативно-библиографической базе Scopus, и 10 докладов на научно-технических конференциях.

**Личный вклад автора** в получение результатов, изложенных в диссертации, заключается в разработке новых и модификации существующих методов расчета и методик проектирования АВВДТ; расчете конструктивных параметров исследуемых антенн посредством модифицированной численно-аналитической модели, разработке геометрических конструктивов антенн в системах автоматизированного проектирования, электродинамическом моделировании антенн, оптимизации их параметров и характеристик на основе известных и предложенных в работе методик, а также численных расчетов, моделировании эксперимента, обработке полученных данных и сопоставлении с предварительно рассчитанными; анализе результатов моделирования антенн, обсуждении результатов.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует пп. 1 «Решение внешних и внутренних дифракционных задач электродинамики для анализа и синтеза высокоэффективных антенн и микроволновых устройств, определения их предельно-достижимых характеристик, возможных путей построения и т.д.», 3 «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами», 9 «Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения» паспорта специальности 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемых источников, включающего 150 наименований, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 219 страницах, содержит 101 рисунок и 5 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обусловлена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены сведения об апробации основных положений и выводов диссертации, ее структуре и степени разработки, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе изучения открытых источников проведен анализ конструкций и электрических характеристик широко распространенных типов дифракционных антенн. Установлено, что наибольшее распространение для практического применения получили плоские АВВДТ. Они обладают малыми массогабаритными характеристиками, простотой конструкции и технологичностью изготовления, имеют сравнительно высокий КПД. Представлен обзор современных компьютерных программ и методов трехмерного электромагнитного моделирования. Приведены математические соотношения для расчета основных электрических характеристик дифракционной антенны, представляющей собой накрытую слоем диэлектрика периодическую отражательную гребенку с прямоугольными канавками. Сформулированы рекомендации по имитационному моделированию АВВДТ, обеспечивающие корректное геометрическое представление проектируемого устройства в расчетной области, выбор граничных условий и плотности сетки разбиения пространства.

**Во второй главе** поставлена задача структурно-параметрического синтеза и оптимизации антенн вытекающей волны, содержащих гребенчатые ДР. Сформулированы рекомендации по выбору наилучшего способа возбуждения поверхностной волны ПДВ, снижению поляризационной чувствительности, обеспечению приемлемой ширины главного лепестка ДН и снижению УБЛ за счет геометрических модификаций, приводящих к неравномерности профиля излучающего раскрыва АВВДТ.

Проведена модификация известной математической модели АВВДТ, содержащей гребенчатую ДР, имитируемую конечным числом прямоугольных канавок в про-

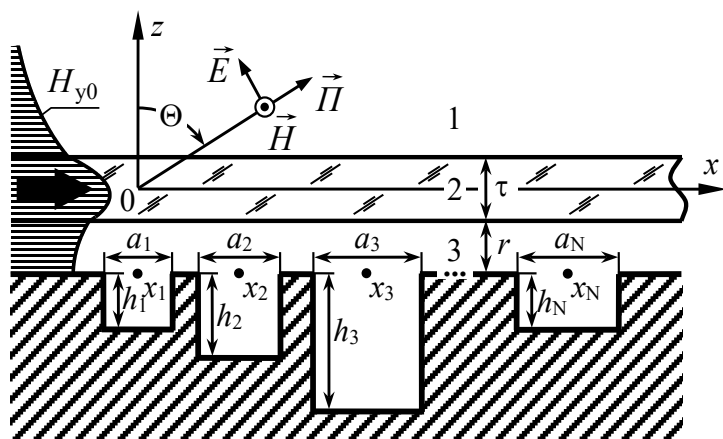


Рисунок 1 – Геометрия полотна АВВДТ при фиксированном расстоянии  $r$

водящем экране и возбуждаемую заданной волной ПДВ (рис. 1). Сущность модификации заключается в дополнении модели аппаратом для расчета АФР на раскрыве АВВДТ с неравномерным профилем гребенчатой решетки на основе интеграла Кирхгофа.

Учитывая, что единственная магнитная компонента поля над антенным полотном – в области 1 (рис. 1), возникающего за счет дифракции заданной поверхностной волны на элементах решетки, обла-

дает непрерывным пространственным спектром. Следовательно, она представима в виде интегрального разложения Фурье по плоским волнам:

$$H_y^{(1)} = \int_{-\infty}^{+\infty} A_E(\beta) \cdot \exp[j\gamma(\beta)(z - \tau/2)] \cdot \exp(j\beta x) d\beta, \text{ где } A_E(\beta) \text{ – комплексная спектральная}$$

плотность магнитного поля, пропорциональная комплексной амплитуде плоской парциальной волны:

$$A_E(\beta) = \frac{j}{2\pi \cdot \mu_E(\beta) \gamma(\beta)} \sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^{+\infty} D_{mE}^{(k)} \zeta_m^{(k)} \sin(\zeta_m^{(k)} h_k) \cdot I_{mE}^{(k)}(\beta),$$

где  $\beta$  и  $\gamma(\beta) = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}$  постоянные распространения вдоль осей  $Ox$  и  $Oz$  соответственно,  $D_{mE}^{(k)}$  – неизвестные комплексные амплитуды волноводных мод канавок, определяемые в результате решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ),

$\zeta_m^{(k)} = \sqrt{k_0^2 - (m\pi/a_k)^2}$  – постоянная распространения  $m$ -й моды канавки в направлении Oz,  $\mu_E(\beta) = \cos[\eta(\beta)\tau] \cdot \exp[-j\gamma(\beta)r] \cdot \left[ 1 - j \operatorname{tg}[\eta(\beta)\tau]/2 \cdot (\gamma(\beta)\varepsilon_\tau [1 - \exp(j2\gamma(\beta)r)]/\eta(\beta) + \gamma(\beta)\varepsilon_\tau [1 + \exp(j2\gamma(\beta)r)]/\eta(\beta)) \right]$ ,  $I_{mE}^{(k)}(\beta) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{mE}^{(k)}(x) \exp(-j\beta x) dx$ ,  $f_{mE}^{(k)}(x)$  – функция, обеспечивающая выполнение граничных условий на металлических стенках канавки.

Тогда интегральное представление поля дифракции  $H_y^{(1)}$  может быть эквивалентно заменено преобразованием Фурье от произведения двух функций  $g_1(\beta)$  и  $g_2(\beta)$ , где  $g_1(\beta) = \exp(j[\beta x + \gamma(\beta)(z - \tau/2)])/\gamma(\beta)$ ,  $g_2(\beta) = 2\pi \cdot A_E(\beta)\gamma(\beta)$ . Исходя из того, что спектр произведения функций  $g_1(\beta)$ ,  $g_2(\beta)$  соответствует интегральной свертке их спектров, и учитывая вклад, вносимый в формирование результирующего поля дифракции магнитной компонентой поля первичной (заданной) поверхностной волны окончательное выражение для расчета АФР в конечном числе точек на раскрыве запишем в виде:

$$H_y^{(1)}(x, z) = \sum_{k=1}^N \left[ \int_{x_k - a_k/2}^{x_k + a_k/2} \frac{j/2 \cdot H_0^{(1)}(k_0 \sqrt{(x - \xi)^2 + (z - \tau/2)^2})}{\mu_E \left[ k_0 \sin(\arctg[(x - \xi)/(z - \tau/2)]) \right]} \sum_{m=0}^{+\infty} D_{mE}^{(k)} \zeta_m^{(k)} \sin(\zeta_m^{(k)} h_k) \cdot f_{mE}^{(k)}(\xi) d\xi \right] + H_0 \exp[j\gamma_0(z - \tau/2)] \exp(j\beta_0 x) \cdot [\cos(\gamma_0 r) \cos(\eta_0 \tau) - (\gamma_0 \varepsilon_\tau / \eta_0) \sin(\gamma_0 r) \sin(\eta_0 \tau)],$$

где  $\eta(\beta) = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_\tau - \beta^2}$  – постоянная распространения (вдоль оси Oz) плоской парциальной волны в ПДВ,  $\beta_0$  – постоянная распространения первичной волны вдоль оси Ox,  $\gamma_0 = \gamma(\beta_0)$ ,  $\eta_0 = \eta(\beta_0)$ ,  $H_0^{(1)}(x)$  – функция Ганкеля первого рода нулевого порядка,  $H_0$  – константа, равная комплексной амплитуде первичной волны.

Интеграл в полученном выражении вычисляется при помощи стандартных квадратур с предварительным устранением логарифмической особенности функции Ганкеля. Достоверность предложенной методики подтверждена путем ее многократного применения и сравнения с известным методом усеченного интегрирования комплексной спектральной плотности поля над ПДВ (область 1, рис. 1). В частности, для расчета АФР на раскрыве АВВДТ с ДР, содержащей 30 канавок одинаковой ширины, сгенерирован набор из 3000 точек, в 762 из которых были рассчитаны значения поля дифракции непосредственно над канавками гребенки. Распределения амплитуды (рис. 2, а) и фазы (рис. 2, б) поля  $H_y^{(1)}$  свидетельствуют о согласованности результатов, полученных предложенным способом расчета поля в приближении Кирхгофа и методом усеченного интегрирования.

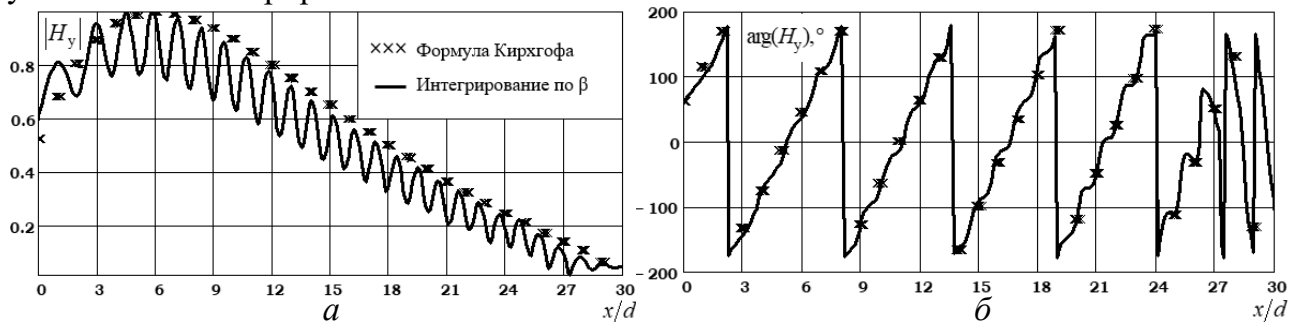


Рисунок 2 – Нормированное амплитудное (а) и фазовое (б) распределения

Наблюдаемые различия между распределениями обусловлены, прежде всего, дискретным характером вычисления значений поля по методу интеграла Кирхгофа и

эффектом Гиббса, проявляющимся при использовании метода усеченного интегрирования спектральной плотности. Важным преимуществом предложенного способа является значительное быстродействие. По результатам контрольных измерений скорость расчета АФР по методике на основе интеграла Кирхгофа оказывается на два порядка выше, чем по методу усеченного интегрирования комплексной спектральной плотности. Малые временные затраты при соизмеримой точности вычислений гарантируют предложенной методике расчета АФР предпочтительность использования на ранних этапах проектирования антенных устройств. Заметим, что экспресс-расчет АФР на раскрытие антенны позволяет контролировать форму ДН, уровень бокового излучения, КУ и др., что критично для настройки АВВДТ.

Предложена методика улучшения показателей направленности АВВДТ с гребенчатой ДР и ПДВ на основе реализации продольного изменения профиля распределительно-излучающей системы (рис. 3) за счет вариации расстояния между ПДВ и ДР (прицельного расстояния  $r$ ) по заданному амплитудному распределению поля. В основе методики лежит энергетический метод расчета, в соответствии с которым канавки ДР порождают дискретное амплитудное распределение, а первичная волна возбуждения, распространяясь вдоль ПДВ, затухает из-за излучения. При этом одна канавка вносит затухание, соответствующее отклику периода ДР. Следовательно, если мощность первичной волны, падающей на  $k$ -ю канавку, составляет  $P_{\text{пад}}^{(k)}$ , то мощность, возбуждающая последующую канавку, равна

$$P_{\text{пад}}^{(k+1)} = P_{\text{пад}}^{(k)} - (P_{\text{изл}}^{(k)} + P_{\text{отр}}^{(k)} + P_{\downarrow}^{(k)}) = P_{\text{пад}}^{(k)}(1 - p_k - R_k - \Delta_{\delta}) = P_{\text{прош}}^{(k)},$$

где  $P_{\text{изл}}$  – излучаемая антенной мощность,  $P_{\text{отр}}^{(k)}$  – мощность волны, отраженной от  $k$ -й канавки ( $R_k$  – коэффициент отражения),  $P_{\downarrow}^{(k)}$  – мощность потерь, обусловленная взаимодействием волны возбуждения с  $k$ -й канавкой,  $\Delta_{\delta} = P_{\downarrow}^{(k)} / P_{\text{пад}}^{(k)}$  – относительные потери мощности,  $P_{\text{прош}}$  – прошедшая к периферии мощность.

Примем допущение, что гребенчатая ДР предварительно оптимизирована по критерию минимума коэффициента отражения ( $R_k \rightarrow 0$ ) за счет выбора оптимальной ширины и глубины канавок. Тогда коэффициенты отбора мощности  $p_k$  полностью определяются заданным нормированным дискретным амплитудным распределением поля  $v(k)$ , коэффициентом прохождения  $T_{\rightarrow}$  и потерями мощности в ПДВ  $\Delta_{\delta}$ :

$$p_k = \left[ (1 - T_{\rightarrow}) / \prod_{m=1}^{k-1} (1 - p_m - \Delta_{\delta}) \right] \cdot \left( v^2(k) / \sum_{k=1}^N v^2(k) \right).$$

В качестве исходных данных для реализации предложенной методики, помимо заданного амплитудного распределения на раскрытие, используется зависимость отбора мощности в АВВДТ  $P_{\text{пад}} / P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}}^{(1)} / P_{\text{пад}}^{(N+1)} = 1 / T_{\rightarrow}$  от прицельного расстояния  $r$ . На рис. 4, а представлена кривая отбора мощности, полученная при помощи модифи-

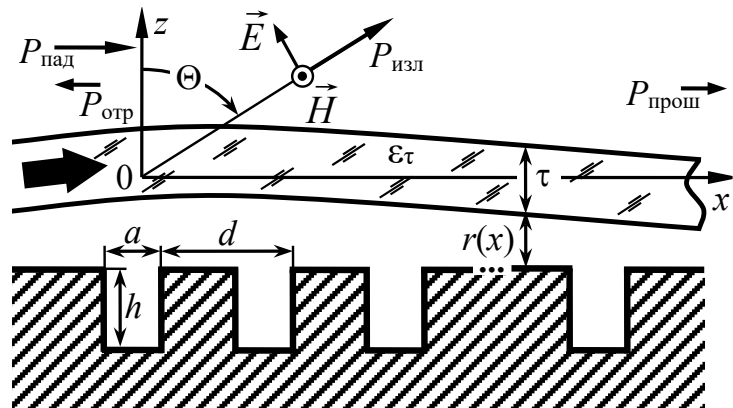


Рисунок 3 – Геометрия полотна АВВДТ при  $r(x)$

цированной математической модели. Из рис. 4, а видно, что на начальном участке кривой (при изменении прицельного расстояния  $r$  от 0 до 10,5 мм) имеют место выраженные провалы. Их наличие обусловлено, вероятно, значительной электродинамической связью гребенки с ПДВ. Для обеспечения оптимальной закономерности изменения прицельного расстояния  $r(x)$  необходимо выбрать наиболее протяженный и близкий к линейному закону изменения участок кривой отбора.

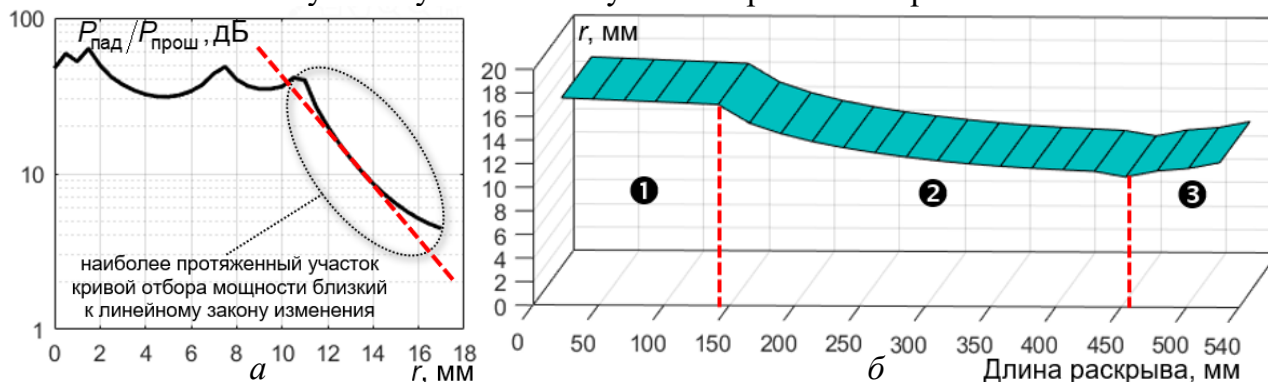


Рисунок 4 – Зависимости отбора мощности (а) и продольного изменения расстояния  $r$  (б)

Суть предлагаемой методики заключается в выборе такого прицельного расстояния  $r_k$  для каждого  $k$ -го периода ДР, которое обеспечивало бы необходимую интенсивность отбора мощности  $K_{\rightarrow}^{(k)} = P_{\text{пад}}^{(k)} / P_{\text{пад}}^{(k+1)}$  для каждой  $k$ -й канавки решетки. Для ее реализации, в предположении, что на вход антенны поступает единичная мощность ( $P_{\text{пад}}^{(1)} = 1$ ), выполняется расчет интенсивности отбора  $K_{\rightarrow}^{(k)}$  для каждой  $k$ -й канавки с учетом заданного дискретного амплитудного распределения поля  $v(k)$ , установленных коэффициентов отбора мощности  $p_k$ , коэффициента прохождения  $T_{\rightarrow}$  и потерь мощности в ПДВ  $\Delta_{\delta}$ . Затем по рассчитанной интенсивности отбора  $K_{\rightarrow}^{(k)}$  восстанавливается прицельное расстояние  $r_k$ . На рис. 4, б представлена зависимость продольного изменения прицельного расстояния  $r(x)$ , полученная для АВВДТ, состоящей из накрытой ПДВ эквидистантной гребенчатой ДР с 22-мя канавками одинаковой ширины и глубины. Прицельное расстояние, соответствующее линейному участку зависимости отбора мощности (рис. 4, а), варьируется в пределах от 10,5 до 17 мм применительно к длине излучаемой волны равной 32 мм.

На рис. 5 представлена ДН антенны с продольной вариацией прицельного расстояния в соответствии с показанной на рис. 4, б закономерностью  $r(x)$  для частоты 9,5 ГГц. Максимальный УБЛ составляет «минус» 13,1 дБ, КУ – 22,1 дБ. Ширина ДН в вертикальной ( $E$ -) плоскости  $3,4^\circ$ , направление максимального излучения  $\Theta_m = 103,3^\circ$ . Реализованная вариация прицельного расстояния  $r(x)$  позволяет снизить УБЛ на 70% (на 5,2 дБ) и одновременно увеличить КУ почти на 10% (на 1,4 дБ) по сравнению со случаем равномерного зазора между ПДВ и ДР. Неравномерный профиль ПДВ приводит к улучшению фокусировки излучения в пределах главного лепестка ДН без изменения направления максимального излучения – антенна становится более остронаправленной (рис. 5). Амплитудное распределение на раскрытии оптимизируется и обладает формой схожей с «косинусом на пьедестале», что обеспечивает баланс между высоким КУ и относительно низким УБЛ, сохраняя при этом достаточно высокую эффективность антенны. КСВН антенны на частотах 9-10 ГГц изменяется в пределах от 1,7 до 1,8, КПД составляет от 87 до 90%.

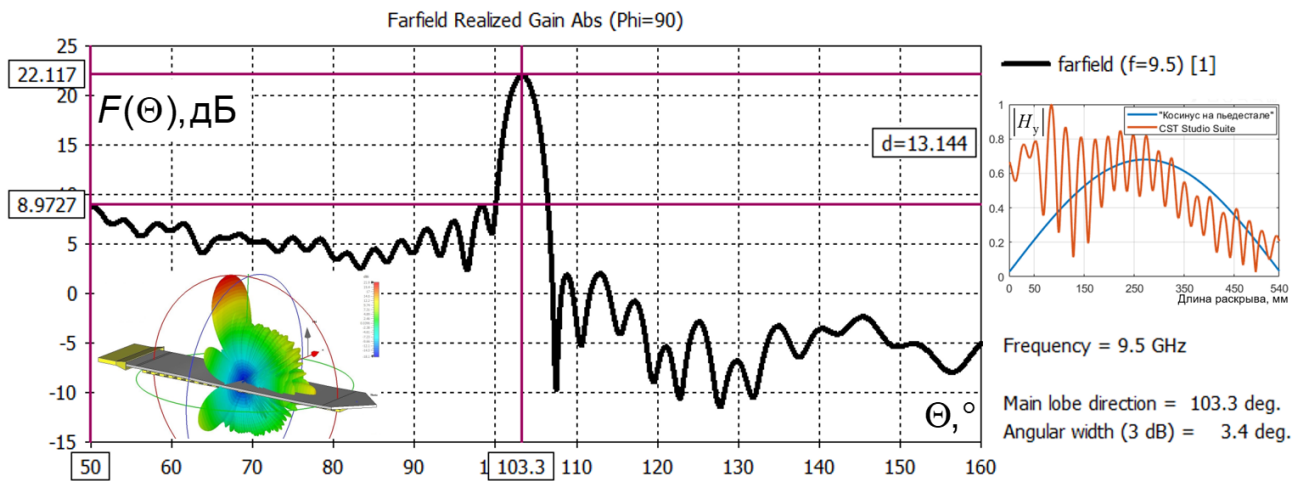


Рисунок 5 – ДН и амплитудное распределение поля на раскрыве антенны

Проведена оценка фазовых ошибок в АВВДТ после вариации прицельного расстояния, разработана и апробирована методика уменьшения фазовых искажений за счет изменения шага расположения канавок  $d$  в гребенчатой решетке. Перерасчет расстояний между канавками  $d'$  предлагается проводить в соответствии с выражением  $d' = [(\Delta\varphi_k + 2\pi)/2\pi d - \sin \Theta_m / \lambda_0]^{-1}$ , учитывающим сдвиг фазы  $\Delta\varphi_k$  за квазипериод ДР  $d$ , среднюю длину излучаемой (принимаемой) волны  $\lambda_0$ , направление максимального излучения (приема)  $\Theta_m$ .

Установлено, что для коррекции фазового распределения в гребенчатых решетках целесообразно изменять ширину ламелей, оставляя ширину канавок неизменной. Из сопоставления кривых на рис. 6, *a* (до коррекции) и *b* (после коррекции) следует, что предлагаемая методика обеспечивает сглаживание фазового распределения на отдельных участках раскрыва за счет снижения уровня осцилляций характерных для фазовых искажений.

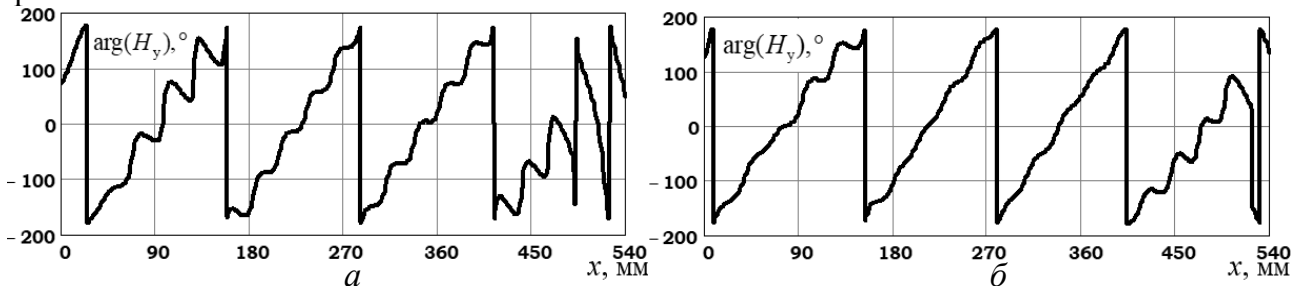


Рисунок 6 – Фазовое распределение до коррекции искажений (*a*) и после (*b*)

В ходе экспериментальных исследований установлено, что коррекция фазового распределения позволяет снизить максимальный УБЛ, повысить симметрию ДН, а также обеспечить требуемое направление максимума излучения. Здесь и далее под экспериментальными исследованиями подразумевается полноволновое электромагнитное моделирование с использованием коммерческого симулятора, обеспечивающего высокую достоверность, точность и повторяемость результатов.

**В третьей главе** разработана методика проектирования АВВДТ с неравномерным профилем распределительно-излучающей системы на основе ПДВ и гребенчатой решетки. Предлагаемая методика включает в себя шесть последовательных этапов проектирования, представляющих собой рекомендации по выбору электродинамической схемы АВВДТ, определению относительной диэлектрической проницаемости материала ПДВ  $\epsilon_r$  и его электрической толщины  $\tau/\lambda$ , выбору конструкции узла воз-

буждения и ее расчету, выбору геометрических параметров гребенчатой решетки, реализации необходимого амплитудного распределения на излучающем раскрыве за счет продольной вариации и расчету основных электрических параметров с учетом направленности в  $H$ -плоскости, полноволновому моделированию рассчитанного прототипа антенны в симуляторе. Методика применима к коротковолновой части СВЧ и длинноволновой части КВЧ диапазонов.

Проведены экспериментальные исследования по оценке влияния конечных размеров ПДВ и условий его несовершенного возбуждения на электрические характеристики, а также форму амплитудного и фазового распределений в АВВДТ с различными законами продольного изменения глубины канавок. Для трех исследуемых образцов антенн получены фазовые распределения поля на апертуре, подтверждающие наличие фазовых искажений, не учитываемых модифицированной численно-аналитической моделью. В наибольшей степени влияние фазовых ошибок проявляется в увеличении фона бокового излучения и искажениях формы ДН, таких как «заплывание» минимумов излучения и смещении максимума ДН относительно плоскости раскрыва (рис. 7). Возникающие фазовые искажения, по-видимому, вызваны неоптимальностью рупорного устройства возбуждения, нарушениями линейного закона изменения фазы вследствие проявления электромагнитных свойств материалов и ограниченности размеров антенного полотна, продольной вариацией глубины канавок.

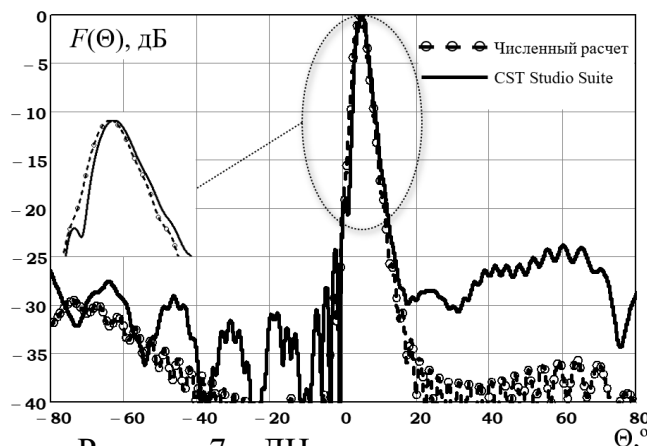


Рисунок 7 – ДН, демонстрирующая наличие фазовых искажений

Полученные результаты показывают, что численно-аналитическая модель не учитывает эффекты, связанные с конечными размерами распределительно-излучающей системы АВВДТ в направлении регулярности канавок, потери мощности в материалах ПДВ (за исключением методики энергетического расчета) и ДР, а также предполагает идеальные условия возбуждения раскрыва (неизменность заданной волны возбуждения в продольном направлении). Несмотря на имеющиеся ограничения модифицированная численно-аналитическая модель и дополняющие ее методики позволяют производить близкий к достоверному расчет основных электрических характеристик рассматриваемого типа антенн с произвольной конфигурацией излучающего раскрыва и на его основе – проектирование АВВДТ.

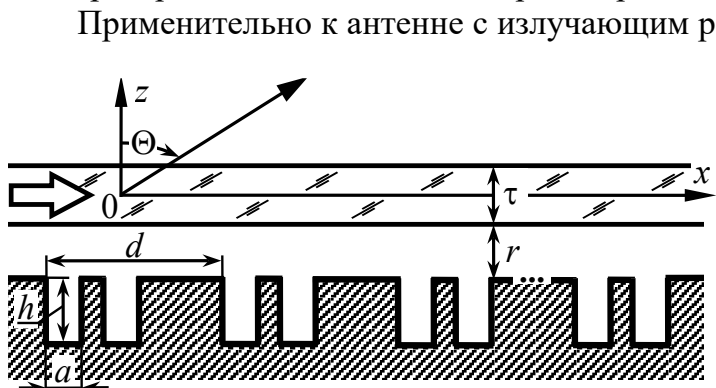


Рисунок 8 – Размещение дополнительной канавки

Применительно к антенне с излучающим раскрывом в виде ПДВ, нагруженного периодической гребенчатой решеткой, разработана и апробирована методика устранения брегговской дифракции, ухудшающей излучательную способность (КПД) в поперечном направлении, за счет введения на периоде дополнительной канавки на удалении четверти длины волны от основной канавки (рис. 8). Установ-

лено, что при появлении на периоде дополнительной канавки, эквивалентной по размерам основной канавке, приращение излучательной способности антенны не столь существенно. Предложены варианты увеличения КПД антенны с модифицированным раскрывом за счет оптимизации положения дополнительной канавки относительно основной и/или подбора глубины дополнительной канавки. В частности, для типовой конфигурации излучающего раскрыва установлено, что оптимальная глубина дополнительных канавок, расположенных по соседству с основными канавками, составляет  $0,1\lambda_0$  или  $0,625h$ , где  $h$  – глубина основных канавок. Оптимизируемый раскрыв при этом обеспечивает КПД в 98%. Максимальный УБЛ составляет «минус» 15 дБ, эффективность излучения – 63%. Выявлено, что оптимальная отстройка системы дополнительных канавок глубиной  $0,1\lambda_0$  относительно основных канавок ДР глубиной  $0,16\lambda_0$  составляет  $0,27\lambda_0$ . АВВДТ в этом случае обладает бóльшим почти на 2% КПД и меньшим на 2,6 дБ УБЛ. Приращение излучательной способности и эффективности излучения АВВДТ при оптимизации глубины дополнительных канавок значительно выше, чем в случае подбора расстояния между дополнительными и основными канавками.

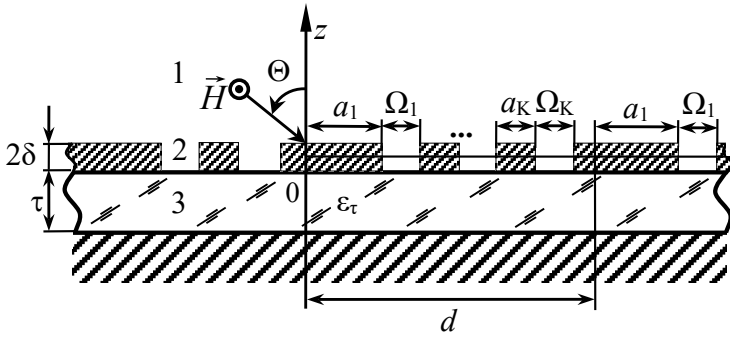


Рисунок 9 – Геометрия ленточной решетки с несколькими щелями на периоде

Методом частичных областей с использованием процедуры переразложения Фурье и специальной модальной функции, автоматически обеспечивающей граничные условия поля на металлических лентах, решена задача дифракции плоской однородной  $H$ -поляризованной электромагнитной волны на одномерно-периодической ленточной решетке, содержащей несколько щелей

(лент) на периоде (рис. 9). Результирующая СЛАУ имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{n=-N_1}^{N_2} A_n \cdot (-j\Phi_{+nv} + \Delta_n^v \gamma_n) + jF_n \cdot [-\Phi_{+nv} \cos(\eta_n \tau) - \Delta_n^v \eta_n \sin(\eta_n \tau)/\varepsilon_\tau] = j\Phi_{+0v} + \Delta_v^0 \gamma_v; \\ \sum_{n=-N_1}^{N_2} A_n \cdot (j\Phi_{-nv} + \Delta_n^v \gamma_n) + jF_n \cdot [-\Phi_{-nv} \cos(\eta_n \tau) + \Delta_n^v \eta_n \sin(\eta_n \tau)/\varepsilon_\tau] = -j\Phi_{-0v} + \Delta_v^0 \gamma_v, \end{cases}$$

где  $v = \overline{-N_1, N_2}$ ,  $N_{1,2} = (M - 1/2) - \text{round}(d \sin(\Theta)/\lambda_0)$ ,  $M$  – целое нечетное число учитываемых пространственных гармоник (ПГ)  $n$  поля,  $m$  – номер (порядок) волноводной моды,  $\Phi_{\{+nv; -nv\}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=0}^{\infty} q_m^{(k)} \cdot I_{nm}^{(k)} \cdot J_{mv}^{(k)} \cdot \{ \text{tg}(q_m^{(k)} \delta); \text{ctg}(q_m^{(k)} \delta) \}$ ,  $\text{round}(\cdot)$  – операция

округления числа до ближайшего целого,  $I_{nm}^{(k)} = \Psi_{nm}^{(k)} / (1 + \Delta_m^0)$ ,  $J_{mv}^{(k)} = \Psi_{vm}^{*(k)}(\Omega_k/2d)$ ,  $\Psi_{vm}^{*(k)}$  – комплексное сопряжение  $\Psi_{vm}^{(k)}$ ,  $q_m^{(k)} = \sqrt{k_0^2 - (m\pi/\Omega_k)^2}$ ,  $\Omega_k$  – ширина  $k$ -й щели,  $k = \overline{1, K}$ ,  $\gamma_n = \sqrt{k_0^2 - \beta_n^2}$ ,  $\beta_n = k_0 \sin \Theta + 2\pi n/d$ ,  $\eta_n = \sqrt{k_0^2 \cdot \varepsilon_\tau - \beta_n^2}$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ,  $\Delta_n^0 = \{1, n=0; 0, n \neq 0\}$ ,

$$\Psi_{nm}^{(k)} = \exp \left\{ j \left[ \beta_n \sum_{i=1}^k \left( a_i + \frac{\Omega_i}{1 + \Delta_i^k} \right) + \frac{m\pi}{2} \right] \right\} \cdot \left[ \text{sinc} \left( \frac{\beta_n \Omega_k + m\pi}{2} \right) + (-1)^m \text{sinc} \left( \frac{\beta_n \Omega_k - m\pi}{2} \right) \right].$$

Представленная СЛАУ однозначно разрешается относительно комплексных амплитуд ПГ  $A_n$  и  $F_n$ , что позволяет проводить анализ и параметрический синтез излучающего раскрыва АВВДТ с несколькими металлическими лентами (щелями) разной ширины, в том числе с учетом неэквидистантного способа их размещения в пределах периода. При наличии одной щели на периоде ДР решение задачи совпадает с результатами, полученными другими авторами. Разработанная модель обладает простотой реализации и может быть использована для автоматизированного проектирования распределительно-излучающей системы АВВДТ, в основе которой использована металлодиэлектрическая ленточная решетка.

В четвертой главе предложена конструкция АВВДТ для базовой станции на основе однопроводной линии передачи с гребенчатой ДР (рис. 10, а) для работы в диапазоне 2-2,4 ГГц. Результаты экспериментов на основе полноволнового моделирования свидетельствуют о том, что антенна характеризуется низким КСВН, обладает веерной ДН в  $H$ -плоскости и высоким КПД.

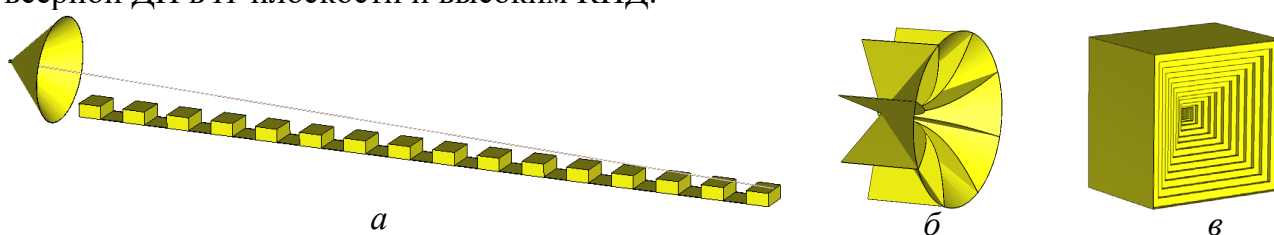
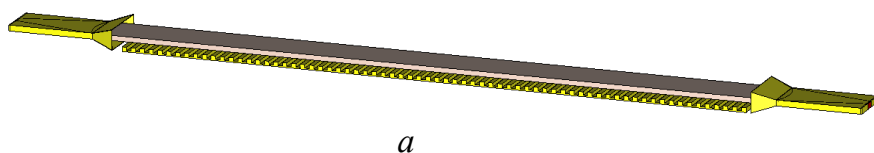


Рисунок 10 – Макет АВВДТ (а) и оптимизированные устройства возбуждения (б, в)

Проведены исследования шести различных устройств возбуждения однопроводной линии. Показано, что наилучшие электрические характеристики АВВДТ достигаются при возбуждении однопроводной линии коническим рупором с восемью элементами Вивальди (рис. 10, б) и прямоугольным ступенчатым диффузором (рис. 10, в). Направление максимума ДН в  $E$ -плоскости варьируется в пределах  $13^\circ$ , ширина главного лепестка ДН –  $4,7^\circ$ . КУ на частоте 2,4 ГГц достигает 14 дБ, УБЛ при этом равен «минус» 14 дБ. Среди преимуществ разработанной антенны следует выделить простоту конструкции и технологичность изготовления. В качестве недостатков следует указать значительную длину излучающего раскрыва для частоты 2,4 ГГц (около  $15\lambda_0$ ), а также необходимость использования герметичного корпуса для защиты распределительно-излучающей системы от воздействия окружающей среды.

Разработана узконаправленная линейная антенна для  $X$ -диапазона на основе периодической гребенчатой решетки, включающей относительно большое (69) число канавок (рис. 11, а). Экспресс-выбор конструктивных параметров АВВДТ выполнен на основе модифицированной численно-аналитической модели с использованием ключевых положений методики проектирования гребенчатых АВВДТ. Питание раскрыва антенны осуществляется прямоугольным волноводом сечением  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Расстояние между тефлоновым ПДВ и ДР всюду фиксировано. Предлагаемая конструкция АВВДТ, обладая площадью излучающего раскрыва не более 0,19 м<sup>2</sup>, характеризуется высокими КУ и КПД, а также низким КСВН и малыми тепловыми потерями. КСВН во всем рабочем диапазоне частот не превышает значения 1,3 (рис. 11, б). Из графика на рис. 11, в видно, что КПД антенны несколько снижается с увеличением частоты (с 88 до 76%). Направления максимума главных лепестков ДН для частот 9,3 и 9,4 ГГц отличаются не более чем на  $1^\circ$ . Поскольку ширина главного лепестка ДН в вертикальной ( $E$ -) плоскости по уровню «минус» 3дБ составляет  $1^\circ$  (рис. 11, г), главные лепестки ДН на указанных частотах пересекаются по уровню «минус» 3 дБ. Тепловые потери в АВВДТ не превышают 0,6-0,7 дБ.



Параметр	9,3 ГГц	9,4 ГГц
КУ	31,7 дБ	31,7 дБ
КПД	85%	81%
КСВН	1,2	1,2

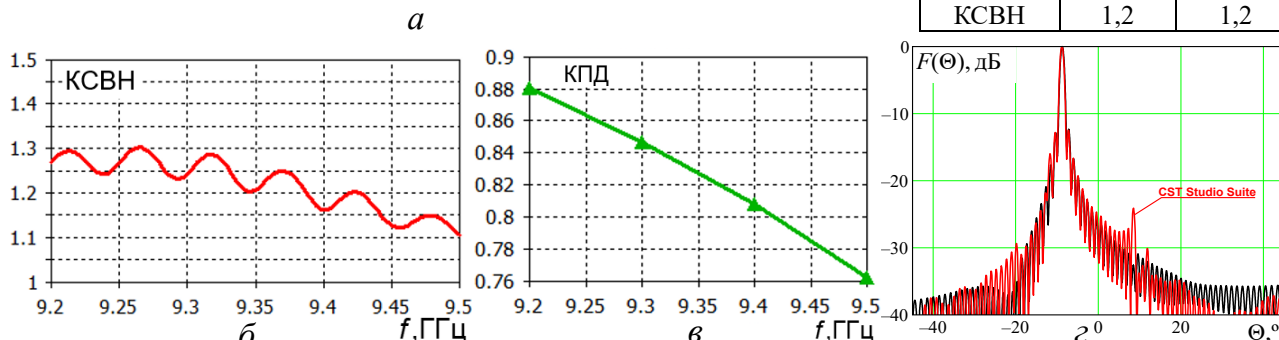


Рисунок 11 – Макет АВВДТ (а), частотные зависимости КСВН (б) и КПД (в), ДН (г)

На основе развитого подхода к оптимизации амплитудного распределения на излучающем раскрыве установлена необходимость глубинного профилирования гребенчатой ДР и выявлена подходящая для этого линейная закономерность, в соответствии с которой глубина канавок увеличивается в направлении распространения возбуждающей раскрыв поверхностной волны ПДВ от 12,5 до 95% от исходной величины. Экспериментально подтверждено, что профилирование ДР позволяет снизить максимальный уровень бокового излучения, увеличить долю мощности, излученной антенной в пределах ширины главного лепестка ДН, и, как следствие, повысить КПД. В результате полномасштабного моделирования АВВДТ с изменяющейся глубиной канавок установлено, что в случае прицельного расстояния равного  $r = 0,37\lambda_0$  для частот 9,3 и 9,4 ГГц максимальный УБЛ составляет «минус» 18,4

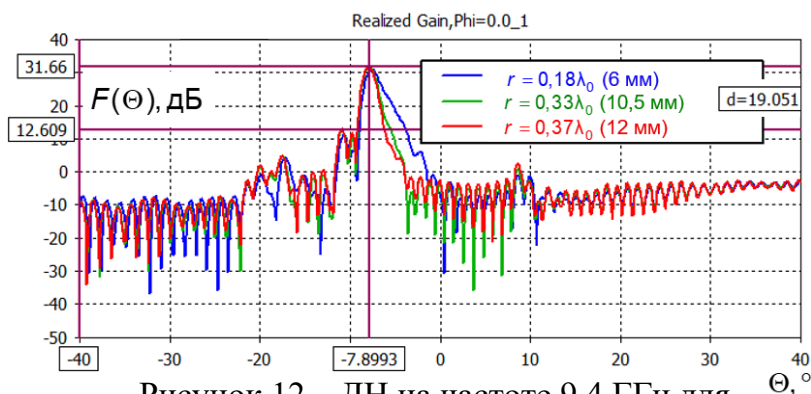


Рисунок 12 – ДН на частоте 9,4 ГГц для различных значений  $r$

и «минус» 18,8 дБ соответственно, КУ при этом 31,6 и 31,7 дБ (рис. 12). Ширина главного лепестка ДН в вертикальной ( $E$ -) плоскости по уровню «минус» 3 дБ увеличилась до 1,2°. КСВН не превышает 1,25, КПД равен 87 и 86% соответственно.

Показана возможность дополнительного уменьшения уровня бокового излучения за

счет оптимизации величины воздушного зазора между ПВД и ДР. Оптимизация прицельного расстояния с использованием метода роя частиц проводилась по критерию минимума УБЛ с условием не превышения ширины главного лепестка ДН в вертикальной ( $E$ -) плоскости полутора-двух градусов. Наилучшее ослабление бокового излучения для частот 9,3 и 9,4 ГГц было достигнуто при  $r = 0,875r_{\max}$  и составило «минус» 18,5 и «минус» 19,1 дБ соответственно (рис. 12). Значение КУ осталось практически без изменений. Ширина главного лепестка ДН в вертикальной ( $E$ -) плоскости не превысила 1,3°. Малая ширина главного лепестка ДН и относительно низкий УБЛ разработанной линейной АВВДТ может найти применение в радиолокационных станциях (РЛС) обнаружения наземных и маловысотных целей, а также навигационных РЛС воздушного и морского базирования.

Показана возможность реализации эффективной антенной системы на основе ПДВ, интегрированного с металлической периодической решеткой с канавками прямоугольного профиля в металлической пластине. Наличие металлического основания обеспечивает ме-

ханическую жесткость конструкции АВВДТ с распределительно-излучающей системой длиной  $61\lambda_0$ . Интегрирование ПДВ с ДР предполагает отсутствие зазора и заполнение канавок материалом ПДВ. Результаты полноволнового электродинамического моделирования интегрированной антенны подтверждают ее работоспособность и относительно высокий КПД в X-диапазоне. КПД составляет около 83-84%, тепловые потери не превышают 0,5 дБ. Максимум главного лепестка ДН на частоте 9,3 ГГц шириной  $1^\circ$  в вертикальной ( $E$ -) плоскости отклонен от направления нормали на угол  $6^\circ$ . Антенна обладает на этой частоте КУ равным 33 дБ. Максимальный УБЛ составляет около «минус» 12,1 дБ. КСВН в пределах полосы рабочих частот составляет менее 1,1.

Предложена и оптимизирована конструкция антенны для базовой станции стандарта радиосвязи 5G на основе

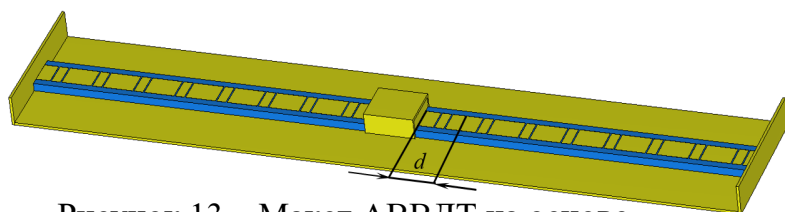


Рисунок 13 – Макет АВВДТ на основе симметричных ленточных решеток

двух симметричных ленточных решеток с центральным питанием (рис. 13). Антенна содержит устройство центрального возбуждения в виде открытого конца волновода сечением  $7,2 \times 3,4$  мм<sup>2</sup> и две, расположенные

на диэлектрической подложке из ламината Sivolam 245, симметричные металлические решетки длиной  $8d$  ( $d = 0,74\lambda_0$ ) каждая. С целью снижения УБЛ антенны в  $E$ -плоскости реализован режим короткого замыкания (КЗ) линии передачи, питающей излучающие элементы ленточной решетки. Для этого с торцов излучающий раскрыв ограничен медными пластинами с оптимизированными размерами. Такие отражающие элементы обеспечивают КЗ периферийных лент решеток на металлический экран ПДВ. При помощи модели для расчета АВВДТ с несколькими металлическими лентами (щелями) на периоде выбрана конфигурация раскрыва, содержащая две щели одинаковой ширины  $d/32$ : основная, на расстоянии  $0,38d$  от возбуждающего волновода, и дополнительная на  $0,25d$ . Величина смещения дополнительной щели от основной подобрана по критерию максимума КПД.

Полноволновое моделирование подтвердило, что максимум ДН в  $E$ -плоскости ориентирован по нормали к плоскости раскрыва ( $\Theta_m \approx 90^\circ$ ) и остается фиксированным при изменении рабочей частоты (рис. 14). Отсутствие частотной дисперсии достигнуто за счет центрального питания симметричных решеток. Ширина главного лепестка ДН в  $E$ -плоскости практически не изменяется в рассматриваемом частотном диапазоне и составляет около  $4^\circ$ . Ширина ДН в  $H$ -плоскости изменяется в пределах от  $77$  до  $80^\circ$ . КУ на частоте 27,9 ГГц достигает 18,6 дБ, УБЛ равен «минус» 14,1 дБ. КПД в верхней части полосы частот достигает более 90%.

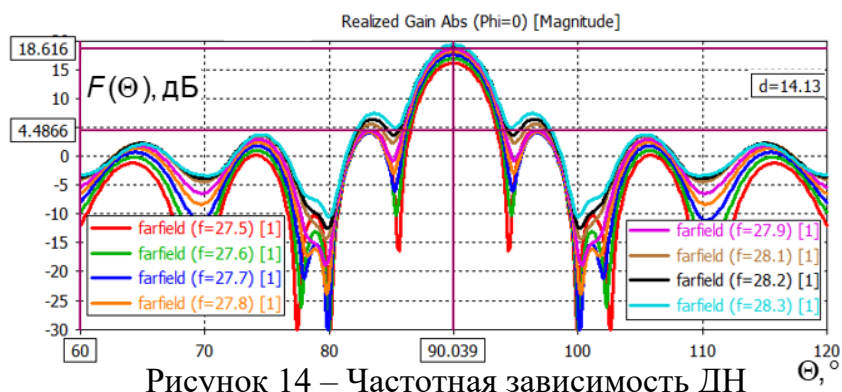


Рисунок 14 – Частотная зависимость ДН

КСВН в полосе 28,0-28,3 ГГц изменяется в пределах от 1,4 до 1,9.

В результате экспериментальных исследований на основе электродинамической симуляции установлено, что согласованное изменение ширины основной и до-

полнительной щелей на периоде раскрыва при сохранении расстояния между ними способствует снижению КСВН антенны и повышению КПД. Это достигается за счет влияния системы дополнительных щелей на коэффициент отражения от ленточной решетки. Выяснено, что уменьшение ширины щелей ленточной решетки до  $d/47$  способствует снижению КСВН на частоте 27,9 ГГц на 19%. КПД при этом увеличивается до 94% (рис. 15).

Предлагаемая конструкция АВВДТ, не содержащая дорогостоящих материалов и имеющая малые габаритные размеры, проста в изготовлении, эффективна на частотах ближе к 27,9 ГГц и может быть использована в качестве антенны для базовой станции стандарта радиосвязи 5G.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

**В приложении** приведены особенности формирования баланса мощностей антенны при электродинамическом моделировании, даны определения излучающей и общей эффективности моделируемых структур.

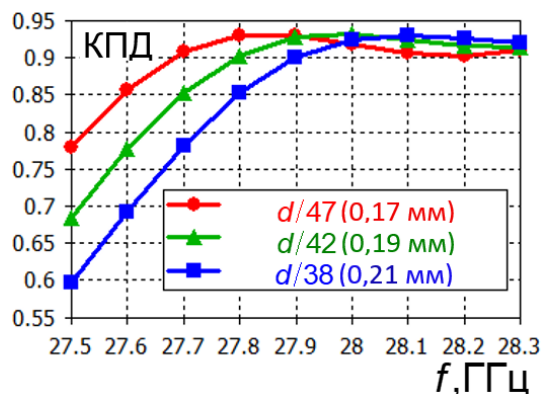


Рисунок 15 – КПД в зависимости от частоты и ширины щелей

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации получены следующие **основные результаты**:

1. 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.

2. 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 учета относительной мощности потерь в ПДВ. Это делает методику пригодной для синтеза квазипериодических раскрывов АВВДТ применительно к коротковолновой части СВЧ и КВЧ диапазонов. Для получения зависимости отбора мощности от прицельного расстояния для различных профилей излучающих раскрывов использована модифицированная численно-аналитическая модель для анализа и синтеза АВВДТ.

3. Разработана методика формирования высокоэффективного поперечного излучения в АВВДТ с модифицированным раскрывом при одностороннем способе возбуждения, позволяющая увеличить КПД антенны за счет оптимизации положения си-

стемы 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.

4. 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 КСВН равным 1,3, значительным КПД (94%), имеет веерный характер ДН (в  $H$ -плоскости) с шириной ДН в  $E$ -плоскости менее  $5^\circ$  и КУ – 14,5 дБ. Конструкция АВВДТ обеспечивает возможность гибкой настройки электрических характеристик.

5. 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  $1^\circ$ , 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.

6. 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.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Крюков Д.Ю. Высокотехнологичная антенна вытекающей волны на основе дифракционной решетки с периодической гребенчатой структурой / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, В.И. Юдин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 6. – С. 80-83. **(К2)**

2. Крюков Д.Ю. Рефлективный анализ возможностей и основных конструктивно-технических характеристик антенн дифракционного излучения на основе периодических замедляющих структур / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 95-103. **(К2)**

3. Крюков Д.Ю. Улучшение показателей направленности антенны дифракционного излучения методом вариации профиля излучающего раскрыва / Д.Ю. Крюков,

А.В. Останков, А.Ю. Чернышев, С.Ю. Дашян // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 79-90. **(К2)**

4. Подходы к вариации профиля излучающего раскрыва антенны вытекающей волны дифракционного типа для улучшения характеристик направленности / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, С.А. Антипов, К.А. Разинкин // Радиотехника. – 2022. – Т. 86. – № 7. – С. 25-32. **(К1)**

5. Антенные решетки с коммутационным сканированием для бортовых ретрансляторов систем радиорелейной связи / Д.Ю. Крюков, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин [и др.] // Радиотехника. – 2022. – Т. 86. – № 3. – С. 88-103. **(К1)**

6. Останков А.В. Диэлектрическая антенна вытекающей волны с поперечным излучением / А.В. Останков, Д.Ю. Крюков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20. – № 2. – С. 80-91. **(К2)**

7. Крюков Д.Ю. Коррекция фазовых искажений в периодической антенне вытекающей волны с нерегулярной распределительно-излучающей системой / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20. – № 1. – С. 61-68. **(К2)**

8. Интегрированная линейная антенна вытекающей волны с большим коэффициентом усиления / А.В. Останков, А.Ю. Чернышев, Д.Ю. Крюков, Ю.Е. Калинин // Радиотехника. – 2024. – Т. 88. – № 7. – С. 64-67. **(К1)**

#### **Публикации в изданиях, индексируемых в библиографической базе Scopus**

9. A method for calculating the characteristics of leaky wave antennas implemented by means of the open comb transmission lines / A.V. Ostankov, D.Y. Kryukov, A.V. Salnikova, O.V. Chernoyarov // International Journal on Communications Antenna and Propagation. – 2020. – Vol. 10, No. 6. – P. 360-370.

10. Evaluating the Efficiency of the Longitudinal Variation of the Distribution-Radiating System of the Leaky-Wave Antenna / D.Y. Kryukov, A.V. Ostankov, L. Golpaiegany, E.V. Chernoiarova // International Journal on Communications Antenna and Propagation. – 2024. – Vol. 14, No. 3. – P. 154-163.

11. High efficiency dielectric periodic leaky wave antenna in the transverse radiation mode / A.V. Ostankov, D.Y. Kryukov, A.Y. Chernyshev, O.V. Chernoyarov, E.V. Chernoiarova // International Journal on Communications Antenna and Propagation. – 2025. Vol. 15, No. 1. – P. 19-29.

#### **Работы, опубликованные в сборниках трудов конференций**

12. Крюков Д.Ю. Дисперсионное уравнение излучающей линии в виде диэлектрического слоя, экранированного металлической гребенкой / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // мат. конф. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2015. – Т. 3. – № 5-1(16-1). – С. 123-128.

13. Kryukov D.Yu. Leaky-wave antenna based on diffraction grating for the millimeter waveband / D. Yu. Kryukov // Развитие личности как стратегия современной системы образования: мат. Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 22-23 марта 2016 года. Том. Часть 2. – Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2016. – С. 397-398.

14. Крюков Д.Ю. Оптимизация характеристик антенны дифракционного излучения за счет глубинного профилирования одномерной квазипериодической гребенчатой решетки / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // Радиолокация, навигация, связь: сб.

тр. XXIII Междунар. научн.-техн. конф. В 3-х томах, Воронеж, 18-20 апреля 2017 года. Том 3. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2017. – С. 1054-1060.

15. Крюков Д.Ю. Особенности учета конечных размеров диэлектрического волновода и условий его несовершенного возбуждения в электродинамической модели антенны дифракционного излучения / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXIV Междунар. научн.-техн. конф. В 5-и томах, Воронеж, 17-19 апреля 2018 года. Том 4. – Воронеж: ООО «Вэлборн», 2018. – С. 188-200.

16. Крюков Д.Ю. Амплитудно-фазовое распределение поля антенны дифракционного излучения с неравномерным профилем излучающего раскрыва / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сб. мат. Всероссийская научн.-практ. конф. В 2-х частях, Воронеж, 23 мая 2019 года. Часть 1. – Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2019. – С. 304-308.

17. Крюков Д.Ю. Сканирующие антенные решетки для ретрансляторов связи на высокоподнятых аэростатных платформах / Д.Ю. Крюков, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVII Междунар. научн.-техн. конф., посвящ. 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. В 4-х томах, Воронеж, 28-30 сентября 2021 года. Том 3. – Воронеж: ВГУ, 2021. – С. 416-433.

18. Крюков Д.Ю. Расчет амплитудно-фазового распределения в раскрыве антенны вытекающей волны с неравномерным профилем / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVIII Междунар. научн.-техн. конф., посвященной памяти Б.Я. Осипова. В 6-ти томах, Воронеж, 27-29 сентября 2022 года. Том 5. – Воронеж: ВГУ, 2022. – С. 245-263.

19. Останков А.В. Узконаправленная интегрированная антенна вытекающей волны / А.В. Останков, Д.Ю. Крюков, В.С. Вагнер // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. мат. Междунар. научн.-практ. конф., Воронеж, 22–23 мая 2024 года. – Воронеж: Строки, 2024. – С. 67-70.

20. Крюков Д.Ю. Высокоскоростная линейная периодическая антенна вытекающей волны / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXX Междунар. научн.-техн. конф. В 5-ти томах, Воронеж, 16-18 апреля 2024 года. – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2024. – С. 1-10.

21. Крюков Д.Ю. Планарная антенна на основе симметричных ленточных решеток с центральным питанием / Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, Д.К. Проскурин // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXXI Междунар. научн.-техн. конф. В 6-ти томах, Воронеж, 15–17 апреля 2025 года. – Воронеж: ВГУ, 2025. – С. 22-31.

Подписано в печать 25.06.2026.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная 80 г/м<sup>2</sup>.

Усл. печ. л.: 1,3. Тираж 80 экз. Заказ № 5963

Типография «Вертикаль»

143002, Московская обл., г. Одинцово, Можайское шоссе, д. 13, корп. 2.