На правах рукописи

Deef

Лысенко Николай Александрович

# ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ МЕТОД РАСЧЁТА ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ АПЕРТУРЫ ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет» на кафедре электроники физического факультета

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, доцент Усков Григорий Константинович
Официальные оппоненты:	Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж), научно-исследова- тельский испытательный институт радиоэлектрон- ной борьбы, ведущий научный сотрудник
	Табаков Дмитрий Петрович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образо- вательное учреждение высшего образования «По- волжский государственный университет телеком- муникаций и информатики» (г. Самара), факультет телекоммуникаций и радиотехники, кафедра радиоэлектронных систем, профессор
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образо- вательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегород- ский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" (ННГУ)

Защита состоится «26» декабря 2019 года в 15 часов 10 минут на заседании диссертационного совета Д 212.038.20 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, дом 1, физический факультет, аудитория 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте: <u>http://www.science.vsu.ru/disserinfo&cand=3245</u>

Автореферат разослан «\_\_\_\_» ноября 2019 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.038.20, канд. физ.-мат. наук

Степкин Владислав Андреевич

#### Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию и совершенствованию пространственно-временного метода расчёта импульсных характеристик (РИХ) апертурных излучателей для анализа электромагнитного (ЭМ) поля в пространстве перед апертурой при её возбуждении сверхширокополосными импульсными сигналами нано- и субнаносекундной длительности.

Актуальность. Развитие науки и технологий сверхвысоких частот (СВЧ) способствовало тому, что применение сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов выделилось в отдельное научно-техническое направление радиофизики, требующее более глубокого исследования методов формирования, излучения, приёма и обработки таких сигналов. Для передачи СШП сигналов в основном используют апертурные излучатели. Такой тип излучателей представляет собой разнообразные модификации зеркальных антенн, рупорные антенны всевозможных форм и профилей, открытые волноводы, планарные и конформные антенные решётки, а также линзовые антенны. Классическая теория анализа излучения и распространения электромагнитных сигналов хорошо известна, однако её применение для синтеза СШП излучателей во временной области зачастую становится слишком громоздким и некорректным.

Прогресс в областях радиолокации, связи и радиоастрономии в 1960-х годах стимулировал создание апертурной теории, основанной на подходах физической оптики. Эта теория позволяет проводить анализ и расчёт характеристик зеркальных излучателей и антенных решёток с достаточной точностью для практического применения. Зачастую можно воспользоваться апертурной теорией для анализа некоторых рупорных излучателей, обладающих большой поверхностью излучения относительно пространственных размеров импульсных сигналов.

В 1989 году впервые был предложен способ синтеза импульсной характеристики (ИХ) произвольной апертуры в ближней зоне, основанный на апертурной теории. Метод расчёта ИХ позволил вычислять временные отклики ЭМ поля в любой точке перед излучателем путём математической операции свёртки импульсного сигнала, возбуждающего апертуру, с её аналитической ИХ.

На протяжении двух следующих десятилетий область применения метода расчёта ИХ для анализа ЭМ полей существенно расширялась. За рубежом такой метод исследовался и применялся в различных областях радиофизики. Здесь можно отметить работы Карла Баума, использовавшего предложенный теоретический подход для анализа поля импульсного сигнала, и группу французских учёных (Р.Оливьера и М.Элье), применивших метод расчёта ИХ для исследования параболических излучателей. Значительная доля статей посвящалась самому методу анализа ЭМ полей и способах его применения. В таких публикациях авторы преимущественно исследовали и разрабатывали новые типы излучателей с различной формой апертуры, а также осуществляли научный поиск новых методов измерения характеристик антенн в ближней зоне малыми и большими зондовыми антеннами без использования безэховой камеры. Были исследованы критерии дальней зоны, ограничения на минимальный размер апертуры при излучении СШП сигнала. Несколько позже были опубликованы работы, в которых введено понятие освещённости круглой апертуры или распределения

мгновенных значений напряжённости ЭМ поля и получены ИХ в ближней и дальней зонах для различных распределений.

Метод расчёта ИХ является аналитическим, следовательно его результаты позволяют получить физическую интерпретацию процессов излучения и распространения СШП импульсных сигналов. При расчёте конкретных излучателей требуется уточнение метода и определение критерия применимости, что является особо важным при разработке новых систем СШП радиолокации и радиосвязи. Таким образом, развитие методов анализа ЭМ полей апертурных излучателей, оперирующих СШП нано- и субнаносекундными импульсными сигналами, представляется актуальным и требует дальнейшего исследования.

Степень разработанности темы. В отмеченных выше работах считалось, что критерием, определяющим возможность использования метода расчёта ИХ для анализа ЭМ полей апертурных излучателей, является соотношение  $D\gg\lambda_{max}$  (где D – размер апертуры,  $\lambda_{max}$  – наибольшая длина волны сигнала), которое в случае импульсного сигнала, локализованного в узкой области пространства, можно переписать в виде:  $D \gg \tau c$  (где  $\tau$  – длительность импульса). Однако, этот критерий не является вполне определённым относительно точности метода расчёта ИХ при пограничных соотношениях. Также отмечается, что множитель, определяющий вклад элементарного излучателя апертуры в ЭМ поле точки наблюдения (далее – поляризационный множитель), использовался только для вертикального или горизонтального отклонения от центральной оси. Распределение мгновенных значений напряжённости поля по апертуре при излучении импульсного сигнала рассматривалось только для круглых, а для прямоугольных и произвольных апертур считалось постоянным. Применение метода расчёта ИХ для исследования более сложных структур и радиосистем, в отличие от плоской апертуры, освещено в литературе недостаточно полно и касается в основном анализа круглых плоских апертур зеркальных параболических антенн.

**Целью диссертационной работы** является развитие пространственно-временного метода расчёта импульсных характеристик для анализа электромагнитных полей апертурных излучателей различных форм при их возбуждении сверхширокополосными импульсными сигналами нано- и субнаносекундной длительности.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1. Исследовать метод расчёта импульсных характеристик апертурных излучателей для определения его условия применимости и оценки вычислительной сложности.

2. Получить аналитическое выражение поляризационного множителя с учётом диаграммы направленности элементарного излучающего элемента апертуры и расположения точки наблюдения.

3. Исследовать распределение мгновенных значений напряжённости ЭМ поля на прямоугольной апертуре TEM-рупора и получить его аналитическое описание. Модифицировать и исследовать метод расчёта импульсных характеристик для прямоугольной апертуры TEM-рупора с учётом распределения мгновенных значений напряжённости в апертуре.

4. Разработать теоретическую модель СШП канала связи, позволяющую

рассчитывать сигнал на выходе приёмного тракта по сигналам на входе передающей антенны и проверить результаты численными методами.

5. Разработать экспериментальную установку СШП канала связи с двумя ТЕМ-рупорами и провести измерения для сравнения, проверки и подтверждения возможности использования метода расчёта ИХ.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Разработана модель плоской круглой апертуры для численного анализа напряжённости ЭМ поля. На основе сравнения результатов с методом расчёта импульсных характеристик предложен критерий применимости аналитического метода для анализа ЭМ полей апертурных излучателей, возбуждённых СШП импульсными сигналами.

2. Получено аналитическое выражение для поляризационного множителя с учётом диаграммы направленности элементарного излучающего элемента апертуры. Явный вид поляризационного множителя использован для уточнения расчёта поля импульсного сигнала методом импульсных характеристик.

3. Впервые предложена аналитическая форма спадающего к краям распределения мгновенных значений напряжённости в раскрыве прямоугольной апертуры TEM-рупора с неоднородным диэлектрическим заполнением. Полученная зависимость позволила модифицировать метод расчёта импульсных характеристик для анализа электромагнитного поля, излучаемого TEM-рупором.

4. Разработана модель СШП канала связи, позволяющая рассчитывать сигнал на выходе приёмного тракта с учётом выявленных аналитических выражений. Предложена экспериментальная установка и проведены измерения импульсного сигнала на выходе СШП канала связи, подтверждающие теоретическую модель.

5. Показано, что при излучении и приёме СШП импульсного сигнала субнаносекундной длительности ЭМ поле определяется суперпозицией прямой волны, излучённой апертурой, и противофазной волны, связанной с отражением от границ апертуры.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в развитии аналитических методов радиофизики применительно к задачам излучения СШП сигналов, в том числе в совершенствовании методов расчёта пространственно-временных зависимостей ЭМ полей. Полученные в работе результаты позволяют повысить точность расчёта апертурных излучателей при их возбуждении СШП импульсными сигналами, а также расширить область применения метода расчёта ИХ. Представленные результаты могут быть использованы в различных областях радиофизики: для исследования и разработки апертурных излучателей с заданными характеристиками, для проведения измерений параметров излучателей без использования безэховых камер, для оценки ЭМ импульсных полей СШП апертурных излучателей в ближней и дальней зонах, для моделирования приёмо-передающих систем радиолокации и связи. Выявленные аналитические выражения и их численное и экспериментальное подтверждение представляют отдельный практический интерес с точки зрения их использования при расчёте и оптимизации характеристик излучения реальных радиоустройств. Показано, что использование метода расчёта ИХ позволяет существенно сократить время анализа ЭМ поля по сравнению с численным моделированием.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы апертурной теории, физической оптики и теории дифракции, методы математического и численного моделирования электродинамических систем. При построении аналитических моделей апертурных излучателей и выводе поляризационного множителя были использованы методы математического анализа, экспериментальные методы радиофизики и теории электрических цепей. Для оценки критерия применимости метода расчёта ИХ и сравнения теоретических зависимостей с экспериментальными использовались методы статистической радиофизики. Электродинамическое моделирование производилось с помощью численного метода конечных интегралов решения системы уравнений Максвелла. Обработка сигналов осуществлялась в математическом пакете Matlab.

Достоверность результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата и обоснованных физических моделей и методов; соответствием теоретически рассчитанных импульсных характеристик и откликов ЭМ поля с результатами, полученными в ходе численного моделирования и экспериментальной работы; совпадением новых результатов, полученных аналитически, с частными случаями, принятыми в литературе; систематической воспроизводимостью результатов анализа; использованием классических методов измерения и обработки сигналов.

Внедрение научных результатов. Работа выполнялась при поддержке программы «У.М.Н.И.К.» Фонда содействия инновациям (договоры №5349ГУ1/2014 от 24.03.2015 и №10478ГУ2/2016 от 25.08.2016), премии Молодёжного правительства Воронежской области (2015 г.), грантов Президента для молодых докторов наук (договоры №МД-6872.2018.9, № МД-7902.2016.9), ФЦП «Разработка методов выявления латентных технологических дефектов полупроводниковой элементной базы приёмопередающей электронной аппаратуры на сверхширокополосных импульсных сигналов» (Соглашение основе N⁰ 14.514.11.4079), ФЦП «Разработка сверхширокополосных импульсных систем связи для обеспечения помехозащищённого доступа к широкополосным мультимедийным услугам» (Соглашение №14.В37.21.0620).

Основные положения, выносимые на защиту. В соответствии с пунктами 2, 3 и 7 паспорта специальности «01.04.03 – Радиофизика» на защиту выносятся:

1. Результаты исследования метода расчёта импульсных характеристик апертурных излучателей при возбуждении сверхширокополосными импульсными сигналами нано- и субнаносекундной длительности для анализа электромагнитного поля.

2. Выявленные закономерности и явный вид поляризационного множителя, позволившие произвести уточнения аналитического метода расчёта импульсных характеристик.

3. Результаты исследования распределения мгновенных значений напряжённости поля в прямоугольной апертуре TEM-рупора с неоднородным диэлектрическим заполнением и модифицированный метод расчёта импульсных характеристик с учётом полученных аналитических выражений.

4. Модель канала связи для расчёта сигнала на выходе приёмной антенны по заданному сверхширокополосному импульсному сигналу на входе передающего апертурного излучателя и результаты её теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: XIII, XVI Международные научно-технические конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2018; Казань, 2015), III, VI Всероссийские Микроволновые конференции (Москва - 2015, 2018), СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо» (Севастополь, 2015), XIX, XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV Международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2013-2019 гг.), 20-й и 21-й Международные конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2013-2014 гг.), Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика (Воронеж, 2014), Научные сессии ВГУ (Воронеж, 2016-2019 гг.)

Личный вклад автора. Основной объём работы и ключевые результаты были выполнены и получены автором лично. Формулировка проблематики, постановка задач и обсуждение результатов исследования выполнялись с непосредственным участием научного руководителя. Автором лично были проведены: вывод теоретических зависимостей, численное моделирование, написание многочисленных программ аналитического расчёта и обработки результатов в математической среде Matlab, планирование и выполнение эксперимента.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 19 научных работ, из них 3 статьи в рекомендованных ВАК РФ рецензируемых научных изданиях (включая 1 публикацию, индексируемую базами Scopus и Web of Science), 2 патента РФ на полезную модель, 14 материалов и тезисов конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Полный объём диссертации составляет 151 страницу, включая 88 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 160 наименований.

#### Основное содержание работы

**Во введении** сформулирована актуальность работы, поставлена цель и задачи диссертации, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности исследования, апробация работы, личный вклад автора.

**Первая глава** диссертации посвящена теоретическому и численному анализу ЭМ поля круглого плоского апертурного излучателя в ближней зоне. В начале главы приведён краткий литературный обзор исследуемой научной области, в котором затронуты все аспекты четырёх глав: развитие СВЧ технологий и появление апертурной теории, способы минимизации разности фаз в апертуре с помощью диэлектрических линз, численные методы моделирования электродинамических процессов и их недостатки, использование аналитического метода

расчёта ИХ апертурных излучателей для нахождения характеристик антенн. Продемонстрированы широкие перспективы развития и внедрения СШП систем, сделано заключение, что разработка аналитических методов исследования апертурных излучателей, оперирующих СШП импульсными сигналами, является наукоёмкой и технологически актуальной.

В диссертации представлен теоретический метод расчёта ИХ, основанный на апертурной теории в приближении физической оптики и теории дифракции, для круглой плоской апертуры параболической антенны, а также рассмотрены его особенности с целью дальнейшего исследования. Показано, что отклики ЭМ поля перед апертурой могут быть вычислены с помощью свёртки возбуждающего импульсного сигнала и ИХ апертуры излучателя:

$$S_{\vec{E}}(\vec{r},t) = S_{in}(t) \otimes \frac{\partial H(\vec{r},t)}{\partial t} = S_{in}(t) \otimes h(\vec{r},t). \tag{1}$$

Здесь и далее  $H(\vec{r}, t)$  – первообразная импульсной характеристики (ПИХ), функция  $h(\vec{r}, t)$  – импульсная характеристика (ИХ) апертуры, знак  $\otimes$  – знак временной свёртки. Также в ходе обзора теоретического метода выявлено, что ИХ апертурного излучателя  $h(\vec{r}, t)$  вычисляется с помощью интеграла по поверхности:

$$h(\vec{r},t) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} g(\overrightarrow{r_a} \in C_a) \cdot \alpha(\overrightarrow{r},\overrightarrow{r_a} \in C_a) d\varphi \right], C_a \cap S_a \neq , ct \ge z,$$
(2)

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор из центра апертуры до точки наблюдения, контур интегрирования  $C_a$  – окружность с радиусом  $r_{ct} = \sqrt{(ct)^2 - z^2}$  с центром в точке  $\vec{r_0}$  (проекции вектора  $\vec{r}$  на плоскость апертуры),  $\vec{r_a}$  представляет набор точек на апертуре, по которым проводится интегрирование, то есть любой вектор из центра до контура  $C_a$ , t – время измерения поля,  $g(\vec{r_a})$  – функция освещённости апертуры,  $\alpha(\vec{r},\vec{r_a})$  – поляризационный множитель,  $S_a$  – поверхность апертуры, z – расстояние до точки наблюдения от апертурной плоскости. Выделен и обоснован классический критерий применимости метода расчёта ИХ, который представляет собой соотношение  $D \gg \lambda_{max}$ , где D – размер апертуры,  $\lambda_{max}$  – наибольшая длина волны используемого сигнала, которое в случае импульсного сигнала, локализованного в узкой области пространства, можно переписать в виде:  $D \gg \tau c$  (где  $\tau$  – длительность импульса). При увеличении пространственного размера сигнала  $\tau c$  и его превышения длительности ИХ апертуры нарушается идентичность временного отклика ЭМ поля и ИХ апертуры – количество выбросов и их положение во времени в сигнале напряжённости, полученного свёрткой, не соответствует самой импульсной характеристике.

Для проверки аналитического метода расчёта ИХ в диссертации разработана численная модель плоской круглой апертуры, излучающей плоскую линейно поляризованную вдоль оси Y волну (рис.1). На границах счётной области задавались идеально согласованные поглощающие слои с целью предотвращения переотражений. Радиус круглой металлической пластины R = 0.5 м. В работе производилось моделирование методом конечных интегралов во временной области (МКИ). В результате рассчитывались мгновенные распределения поля перед апертурой и временные реализации электрического поля в точках на зондах. Обнаружено, что излучённое круглой апертурой поле состоит из: основной волны – 1, совпадающей по форме с апертурой, и граничной тороидальной волны – 2, связанной с переотражением от границ и краевыми эффектами (рис.2).

С использованием численных результатов произведено выделение ИХ круглой апертуры из полученных откликов поля на зондах и возбуждающему СШП сигналу для сравнения с аналитической ИХ. Применялась регуляризация по методу А. Н. Тихонова при расчёте отношения спектров. ИХ-ки, вычисленные таким образом, качественно совпали с аналитическими, однако количественное сравнение не представлялось возможным вследствие ошибок регуляризации, занижающей вклад спектральных компонент малой величины.



Рисунок 1 – Схема модели круглой апертуры для численного анализа.



Рисунок 2 – Отражение плоской волны от круглой пластины.



Рисунок 3 – Сигналы, полученные при помощи метода расчёта ИХ (сплошные серые линии) и численно (пунктирные чёрные линии) для разных значений  $r_0$ .

Поскольку количественно сравнить ИХ-ки было невозможно, далее проведён расчёт и сравнение непосредственно временных реализаций ЭМ полей, полученных аналитическим и численным методом, для точек наблюдения с различным смещением от центральной оси и удалением от апертурной плоскости. В качестве возбуждающих сигналов использовались двуполярные гауссовские сверхкороткие импульсы (СКИ) длительностью  $\tau$  от 170 пс до 25 нс. Считалось, что мгновенное распределение напряжённости постоянно  $g(\vec{r}_a) = 1$ , а поляризационный множитель  $\alpha(\vec{r}, \vec{r}_a) = \cos(\gamma)$ , где  $\gamma$  – угол между перпендикуляром к апертурной плоскости и радиус-вектором интегрирования. Аналитические отклики вычислялись с помощью свёртки по формулам (1), (2). Полученные двумя методами сигналы при разных смещениях от оси и фиксированном удалении  $z_0 = 0.5R$ , пример которых показан на рис.3, демонстрировали хорошее согласование. Оценка среднего относительного отклонения между результатами методов выполнялась по формуле:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \frac{\left| S_{\text{числ.мод.}}[i] - S_{\text{meop.}}[i] \right|}{max[S_{\text{числ.мод.}}(t)]},\tag{3}$$



Рисунок 4 – Графики зависимости среднего относительного отклонения  $\varepsilon$  от соотношения  $\tau c/R$  для разных смещений  $r_0$  по оси X.

где  $N_T$  – количество временных отсчётов за временной промежуток Т. В результате были получены зависимости  $\varepsilon = \varepsilon(\tau c/R)$ , показанные на рис.4. По критерию среднего относительного отклонения  $\varepsilon = 1\%$  определялось пороговое значение  $\tau c/R$ , что соответствовало пространственной области  $\tau c = 0.255$  м. Таким образом, граница области применимости аналитического метода расчёта ИХ может быть записана в виде  $R > 2\tau c$ , что гарантировано обеспечивает совпадение результатов теоретической оценки излучения ЭМ волны плоской апертурой с численным моделирова-

нием МКИ в пределах 1%. При этом на аналитический метод расчёта ИХ накладывается менее строгое условие, чем в ранее опубликованных работах.

Также в диссертации выполнена оценка временной вычислительной сложности метода расчёта ИХ и численного МКИ. После построения двух зависимостей времени вычисления от объёма входных данных обнаружено, что оба метода имеют линейную асимптотическую сложность O(n). Однако, метод расчёта ИХ имеет ряд преимуществ: позволяет исследовать зависимости различных параметров излучающих структур в аналитическом виде; требует значительно меньшее количество времени; его точность растёт с увеличением расстояния до апертурной плоскости; при изменении входного сигнала он позволяет получить отклики ЭМ поля в тех же точках практически моментально путём свёртки.

Во второй главе исследованы особенности поляризационных множителей  $\alpha(\vec{r},\vec{r_a})$  при расчёте импульсных характеристик апертурного излучателя.

В начале главы описаны различные поляризационные множители, использующиеся в литературе:  $\alpha(\vec{r}, \vec{r_a}) = 1; \cos(\gamma); (\cos(\gamma) + 1)/2$ . Показано, что эти множители описывают основную волну вблизи апертуры неточно, поскольку не учитывают диаграмму направленности элементарного излучателя при интегрировании по формуле (2), то есть  $\alpha(\vec{r}, \vec{r_a})$  должен зависеть от угла  $\varphi$ . В связи с этим далее представлен процесс нахождения общего вида поляризационного множителя основной волны, учитывающего не только расстояние до апертуры излучателя и положение относительно оси, но также и конкретное положение точки на апертуре, по которой ведётся интегрирование (рис.5). В работе считалось, что излучающая поверхность состоит из бесконечного количества простейших диполей, направленных вдоль оси Y и ограниченных краями этой поверхности. Так как диаграмма направленности диполя представляет собой круглый тор, осуществлялся поиск его произвольного сечения. Найденный явный вид поляризационного множителя был подставлен в формулу (2) при постоянном распределении мгновенных значений напряжённости  $g(\vec{r_a}) = 1$ :

$$h(\vec{r},t) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{4} \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \sqrt{1 - \sin\gamma \cdot \sin\varphi} \, d\varphi \right],\tag{4}$$

здесь  $\alpha(\gamma, \varphi) = \sqrt{1 - \sin \gamma \cdot \sin \varphi}$  – выявленный поляризационный множитель, сводящийся к описанным ранее при экстремальных значениях углов  $\gamma$  и  $\varphi$ . Интеграл по контуру распадается на сумму по четвертям, поскольку существует ряд ограничений на параметры эллиптического интеграла второго рода (4).

Таким образом, были рассчитаны ИХ плоской круглой апертуры по формуле (4) с учётом полученного поляризационного множителя и двух других, принятых в литературе. По формуле (1) аналитически вычислены отклики поля. Проведено численное моделирование МКИ и получены отклики ЭМ поля на зондах внутри прожекторного луча. Затем результаты аналитического и численного расчётов основной волны (рис.6) сравнивались математически по формуле (3). Показано, что использование предложенного поляризационного множителя повышает точность вычислений в 1.5 раза при оценке временной реализации ЭМ поля основной волны и в 5 раз при оценке максимального значения напряжённости основной волны в ближней зоне прожекторного луча.



Рисунок 5 – Круглая апертура  $S_a$ , контур  $C_a$ , различные диаграммы направленности  $\alpha(\gamma, \varphi)$  в зависимости от угла интегрирования  $\varphi$ .



Рисунок 6 – Сигналы основной волны, полученные численно (пунктирная линия), и свёртки с теоретическими ИХ при  $z_0 = 0.2R; \theta = \pi/4.$ 

В третьей главе представлен анализ ЭМ поля прямоугольной апертуры при излучении СШП импульсных сигналов. Для этого рассмотрен СШП ТЕМ-рупор (рис.7) как пример излучателя с прямоугольной апертурой. На основе теории геометрической оптики предложен способ минимизации разности фаз волнового фронта в апертуре с помощью неоднородного диэлектрического заполнения пространства раскрыва (линзы):

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\psi) = \boldsymbol{\varepsilon}_{max} \cos^2 \psi, \tag{5}$$

 $\varepsilon_{max}$  – диэлектрическая проницаемость материала в главном направлении излучения,  $\psi$  – угол направления распространения луча. Выполнено численное моделирование МКИ для проверки и подтверждения способа выравнивания волнового фронта (рис.8). Также в моделировании определено распределение мгновенных значений напряжённости поля в апертуре излучателя  $g(\vec{r_a})$ .



Рисунок 7 – Анализируемый ТЕМ-рупор с диэлектрическим заполнением.

Изготовлена практическая реализация модели ТЕМ-рупорного излучателя с неоднородным диэлектрическим заполнением (рис.9). Распределение поля и фазы в раскрыве экспериментального образца было измерено на специализированном программно-аппаратном комплексе EM-Scan RF Expert. В ходе сравнения с распределениями из численной модели установлено, что экспериментальный образец идентичен модели с некоторой погрешностью,

привнесённой технологией изготовления. Одночастотные распределения напряжённости поля (рис.10) и фаз совпадают, при этом разность фаз в области, на которую приходится более 80% мощности волны, составляет менее 10 градусов.

По аналогии с круглой апертурой проведён обзор метода расчёта ИХ для анализа ЭМ поля прямоугольной апертуры. Подробно описаны три случая расположения точки наблюдения относительно границ апертуры и вычисление ИХ по формуле (2). На основе результатов модели и измерения впервые предложена аналитическая форма распределения мгновенных значений напряжённости поля в прямоугольной апертуре:

$$g(\overrightarrow{r_a}) = \left(1 - \frac{(r_{ct}\cos(\varphi) - |x_0|)^2}{(a/2)^2}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{(r_{ct}\sin(\varphi) - |y_0|)^2}{(b/2)^2}\right)^m, \tag{6}$$

где a и b – размеры прямоугольной апертуры, n и m – показатели скорости спада по той или иной координате,  $x_0$  и  $y_0$  – координаты точки наблюдения в апертуре,  $r_{ct}$  – расстояние от её проекции до точки интегрирования,  $\varphi$  – угол между  $r_{ct}$  и положительным направлением оси Х. Выполнено сравнение аналитического распределения (6) с численной моделью (рис.11) и получено совпадение для найденных степеней в выражении (6): n = 4, m = 1. Рассчитаны ИХ прямоугольной апертуры с учётом предложенного спадающего к краям распределения  $g(\vec{r_a})$ . Затем проведено сравнение результатов расчёта откликов ЭМ поля при излучении СШП импульсного сигнала ТЕМ-рупором численным МКИ и аналитическим методом расчёта ИХ. Анализ производился как для нескольких расстояний от апертурной плоскости излучателя, так на разных смещениях относительно центральной оси излучателя. Обнаружено, что результаты, рассчитанные разными методами, совпадают (рис.12). Показано, что при выполнении соотношений пространственного размера сигнала и апертуры  $2\tau c < a$  внутри прожекторного луча теоретический метод расчёта ИХ обладает высокой точностью.



Рисунок 8 – Распределение интенсивности электрического поля в горизонтальной плоскости рупора.



Рисунок 9 – Внешний вид изготовленного ТЕМ-рупора (фотография).



Рисунок 10 – Одночастотные распределения интенсивности поля ТЕМ-рупора: измеренные (поверхность) и в модели (сетка) для 1 ГГц и 6 ГГц.



Рисунок 11 – Распределения поля в модели (поверхность) и в теории (сетка).



Рисунок 12 – Сигналы на зондах, полученные численно (пунктирные линии) и аналитически (сплошные линии) для  $x_0 = 0a; 0.25a$ .

**В четвёртой главе** разработана модель СШП канала связи и проведено экспериментальное исследование для сравнения результатов расчёта сигнала на выходе приёмной антенны различными методами.

Построена и описана модель СШП канала связи, в который входят излучатель, свободное пространство и приёмник (рис.13). В качестве моделей излучателей использовались ТЕМ-рупоры, описанные в третьей главе.

Выполнено численное моделирование МКИ СШП канала связи в два этапа. В качестве входного импульсного сигнала использовался двуполярный СКИ от 1 ГГц до 6 ГГц. Сначала был получен сигнал напряжённости на зонде дальнего поля на некотором расстоянии от апертуры излучателя. Затем этот сигнал использовался в качестве возбуждающего в плоской волне, распространяющейся в направлении к приёмному ТЕМ-рупору. В результате вычислен сигнал на выходе приёмной антенны для различных расстояний между апертурами.

По результатам численного моделирования предложен метод учёта искажений входного импульса при прохождении структуры излучателя с использованием регуляризации по Тихонову. Это позволило связать сигнал напряжённости, возбуждающий апертуру (точка  $P_2$ ), и сигнал на входе в излучатель (точка  $P_1$ ) через ИХ структуры. Способ показал высокую точность восстановления временной реализации электрического поля в апертуре.

Методом расчёта ИХ с учётом выявленного поляризационного множителя и предложенного мгновенного распределения напряжённости поля были вычислены ИХ излучающей апертуры, связывающие поле в точке  $P_2$  и в точке  $P_3$ :

$$h(\vec{r},t) = \frac{d}{dt} \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left( 1 - \frac{(r_{ct}\cos(\varphi) - |x_0|)^2}{(a/2)^2} \right)^4 \cdot \left( 1 - \frac{(r_{ct}\sin(\varphi) - |y_0|)^2}{(b/2)^2} \right)^1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \gamma \sin^2 \varphi} \, d\varphi \right].$$
(7)

Таким образом, получен выходной сигнал с учётом принципа взаимности:

$$S_{receive}(t) = S_{in}(t) \otimes h_{TEM}(t) \otimes h(t) \otimes h_{TEM}(t),$$
(8)

где  $S_{in}(t)$  – входной сигнал в точке  $P_1$ ,  $h_{TEM}(t)$  – ИХ ТЕМ-рупоров, h(t) – ИХ прямоугольной апертуры и свободного пространства, вычисленная в Matlab по формуле (7). Рассчитанные аналитически и численно выходные сигналы, показанные на рис.14, совпадают по времени задержки и по форме.



Рисунок 13 – Схема упрощённого представления СШП канала связи.



Разработана экспериментальная установка для измерения сигнала на выходе СШП канала связи, блок-схема которой показана на рис.15. В качестве излучателей применялись ТЕМрупоры, предложенные и исследованные в третьей главе. Генератор СКИ представлял собой схемотехническое решение, основанное на диодах с накоплением заряда, которые позволяли в момент восстановления обратного сопротивления формиро-СКИ за счёт передачи вать

магнитной энергии индуктивности в нагрузку. Таким образом, на входе передающего ТЕМ-рупора формировался СКИ, представленный на рис.16. Этот же импульс использовался в качестве входного в методе расчёта ИХ по формуле (8).



Рисунок 15 – Блок-схема экспериментальной установки.

Результаты измерений сравнивались с полученными аналитическим методом расчёта ИХ для различных расстояний от 0.1 м до 3 м. Выход приёмного TEM-рупора (точка  $P_4$ ) подключался ко входу стробоскопического осциллографа Agilent DCA-X 86100. С запускающего генератора подавались синхронизирующие сигналы на осциллограф. Для минимизации переотражений измерения проводились вдали от посторонних предметов. Осциллограммы выходных сигналов СШП канала связи фиксировались в математическом пакете Matlab с усреднением регистрируемых импульсов для улучшения отношения сигнал-шум.



Анализ полученных результатов для 1, 2, 3 м показал: время задержки и время максимумов сигналов совпали; форма импульсов В виде «сомбреро» (дублет функции Гаусса) также совпала; скорость спада амплитуды импульсов с увеличением расстояния между апертурами оказалась одинаковой. Для наглядности на рис.17 построены два сигнала на выходе СШП канала связи для расстояния между апертурами 3 м. Наличие побочных колебаний в экспериментальном сигнале объясняется переот-

ражениями при измерении, а также неидеальностью СВЧ разъёмов, соединений кабелей. Искажения аналитических сигналов связаны с ошибкой оценки ИХ излучателей вследствие применения регуляризации. Таким образом, предложенная модель позволяет описывать СШП канал связи с использованием аналитического метода расчёта ИХ при выполнении критерия применимости.



Рисунок 17 – Сигнал на выходе приёмного ТЕМ-рупора, полученный методом расчёта импульсных характеристик (сплошная линия), и сигнал, полученный при проведении эксперимента (точечная линия).

#### Заключение

В диссертационной работе изложено всестороннее исследование и совершенствование пространственно-временного метода расчёта импульсных характеристик апертурных антенн, который рекомендуется использовать для анализа электромагнитных полей в пространстве перед апертурой излучателя. Автором исследовались две основные формы апертур – круглая и прямоугольная методом расчёта импульсных характеристик, а также разрабатывался подход к анализу СШП каналов связи таким методом. Основные результаты и выводы по работе заключаются в следующем.

1. Показано, что аналитический пространственно-временной метод расчёта импульсных характеристик для апертурных излучателей позволяет получать первообразные ИХ, а затем с помощью математической операции свёртки с сигналом в апертуре рассчитывать временную зависимость ЭМ поля в любой точке перед излучателем. В результате произведённого сравнения точности расчёта откликов ЭМ поля аналитическим и численным методами на разных расстояниях от апертурной плоскости и от оси апертуры предложен критерий применимости теории метода расчёта ИХ. Представлена оценка временной вычислительной сложности аналитического (расчёта ИХ) и численного (конечных интегралов во временной области) методов, на основе которой сделан вывод о преимуществах в скорости первого.

2. Проведён анализ используемых в литературе поляризационных множителей, предназначенных для анализа электромагнитного поля апертурного излучателя внутри прожекторного луча. Получен явный вид поляризационного множителя путём поиска радиуса сечения диаграммы направленности элементарного излучателя апертуры. Выявленный множитель увеличивает сходимость аналитического и численного метода в 1.5 раза при оценке временной реализации поля основной волны и в 5 раз при оценке максимального значения напряжённости основной волны.

3. Представлен способ минимизации разности фаз волнового фронта в апертуре СШП ТЕМ-рупорного излучателя путём заполнения пространства раскрыва неоднородным диэлектрическим материалом (линзой). Выполнено численное моделирование для проверки способа компенсации разности фаз и определено распределение мгновенных значений напряжённости поля в апертуре излучателя. Установлено, что распределения напряжённостей и фаз в апертуре для экспериментального образца и модели ТЕМ-рупора совпадают. Впервые предложена аналитическая форма распределения мгновенных значений напряжённости поля в прямоугольной апертуре и обнаружена высокая степень совпадения с численной моделью. В работе показано, что метод расчёта импульсных характеристик может быть использован для анализа электромагнитного поля внутри прожекторного луча прямоугольного апертурного излучателя при выполнении предложенного в работе соотношения пространственного размера импульсного сигнала и апертуры.

4. Выполнено численное моделирование СШП канала связи методом конечных интегралов, в результате которого рассчитан сигнал на выходе приёмной антенны для различных расстояний между апертурами, а также предложен метод учёта искажений входного импульса при прохождении структуры излучателя, что позволило связать возбуждающий сигнал апертуры и напряжение на входе излучателя. С использованием метода расчёта импульсных характеристик предложена аналитическая модель канала связи, позволяющая рассчитывать сигнал на выходе приёмной антенны по заданному СШП импульсному сигналу на входе передающего апертурного излучателя. Разработана экспериментальная установка для измерения выходных сигналов СШП канала связи при различных расстояниях между апертурами ТЕМ-рупоров, которые использовались в качестве излучателя и приёмника. В результате проведённой экспериментальной работы обнаружено совпадение измеренных выходных сигналов как с теоретическими, рассчитанных методом импульсных характеристик, так и с полученными в численном моделировании. На основе завершённого исследования делается заключение о возможности использования предложенной модели для описания СШП канала связи с использованием аналитического метода расчёта импульсных характеристик.

Соблюдая основные принципы научного метода исследования, диссертационная работа содержит необходимые элементы: теорию, компьютерное моделирование, эксперименты. Каждый элемент научного подхода подвергался анализу и обоснованию, а также представляется полной, самостоятельной единицей. Это свидетельствует о цельном и законченном научном исследовании.

Перспектива дальнейшего развития и разработки тематики диссертационной работы представляется в следующем:

1. Исследование формирования, процесса излучения и вывод соответствующих поляризационных множителей для волн, связанных с отражением от границ апертуры и затекания за неё, объединение результатов с полученными в текущей работе.

2. Распространение теории метода расчёта импульсных характеристик на более сложные и произвольные формы апертурных излучателей.

3. Теоретическое, численное и экспериментальное исследование СШП радиоканалов связи с наличием помех, шумов. Сопоставление результатов.

# Основные публикации по теме диссертации

Список статей в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ

- Transient Far Fields of Aperture Antennas / S. P. Skulkin, N. A. Lysenko, G. K. Uskov, N. I. Kascheev // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18, № 5. – P. 1036-1040. DOI: 10.1109/LAWP.2019.2908455
- 2. Применение аналитического метода расчёта импульсно-переходной характеристики для анализа импульсного поля, излучённого круглой плоской апертурой / **Н. А. Лысенко**, А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, С. П. Скулкин // Радиотехника Синтез и анализ алгоритмов и устройств обработки сигналов. 2019. № 3. С. 52-57. DOI: 10.18127/j00338486-201903-08
- 3. Импульсное поле круглой плоской апертуры / **Н.А. Лысенко**, А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, С. П. Скулкин, Н. И. Кащеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2018. – Т. 21, № 3. – С. 43-49.

# Патенты, свидетельства о регистрации

4. Патент РФ № 169524. Широкополосная ТЕМ-рупорная антенна с неоднородным диэлектрическим заполнителем пространства раскрыва / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, **Н. А. Лысенко**, Г. К. Усков // ФГБОУ ВО «ВГУ» – № 2016129401, заяв. 18.07.2016, публ. 22.03.2017, Бюл. № 9. Патент РФ № 168095. Биконическая антенна с заполнением материалом с переменной диэлектрической проницаемостью / А. М. Бобрешов, Н. А. Лысенко, Е. А. Маркова, Г. К. Усков // ФГБОУ ВО «ВГУ» – № 2016129402, заяв. 18.07.2016, публ. 18.01.2017, Бюл. № 2.

### Материалы конференций, статьи в сборниках

- Оценка метода расчёта ИПХ для анализа импульсного поля круглой плоской апертуры / Н. А. Лысенко, А. М. Бобрешов, В. Е. Копытин, Г. К. Усков, и др. // Радиолокация, навигация, связь: XXV Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2019. – Т. 4. – С. 409-416.
- Критерий дальней зоны для круглой плоской апертуры с равномерным распределением поля / С. П. Скулкин, В. И. Турчин, Н. И. Кащеев, Н. А. Лысенко, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XXIV Международная научнотехническая конференция. – Воронеж, 2018. – Т. 4. – С. 83-88.
- Многолучевая ТЕМ-рупорная антенна с формированием направления линзой Люнеберга / А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, П. А. Кретов, Н. А. Лысенко, и др. // Радиолокация, навигация, связь: XXIV Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2018. – Т. 4. – С. 143-149.
- Исследование излучения импульса круглой апертурой / Н. А. Лысенко, А. М. Бобрешов, Г. К. Усков, С. П. Скулкин, и др. // VI Всероссийская Микроволновая конференция. – Москва, 2018. – С. 246-250.
- 10. Использование заполнения с неоднородной диэлектрической проницаемостью для выравнивания волнового фронта в биконической антенне / А. М. Бобрешов, Н. А. Лысенко, Е. А. Маркова, Г. К. Усков, и др. // Радиолокация, навигация, связь: XXII Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2016. – Т. 2. – С. 961-966.
- 11. Исследование направленных свойств ТЕМ-рупора при излучении сверхкоротких импульсов / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, **Н. А. Лысенко**, Г. К. Усков // Физика и технические приложения волновых процессов: XIII Международная научно-техническая конференция. – Казань, 2015. – С. 92-94.
- Влияние размеров апертуры ТЕМ-рупора на параметры излучённого сверхкороткого импульса / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, **Н. А. Лысенко**, И. И. Мещеряков, Г. К. Усков // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2015). – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 497-499.
- 13. Исследование направленных свойств ТЕМ-рупорной антенны с заполнением пространства раскрыва неоднородным диэлектриком в приближении геометрической оптики / А. М. Бобрешов, П. А. Кретов, Н. А. Лысенко, Г. К. Усков // III Всероссийская Микроволновая конференция. – Москва, 2015. – С. 191-195.
- 14. Разработка и реализация методов сверхширокополосной радиолокации / Г. К. Усков, **Н. А. Лысенко** // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Воронеж, 2014. С. 197-200.
- 15. Сверхширокополосный генератор опорных сверхкоротких импульсов на основе быстродействующей LVDS логики / А. М. Бобрешов, **Н. А. Лысенко**,

В. А. Степкин, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XXI Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2015. – Т. 2. – С. 940-945.

- 16. Генератор опорных импульсов на дифференциальной логике для корреляционного приёма СШП сигналов / А. М. Бобрешов, Н. А. Лысенко, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: ХХ Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2014. – Т. 3. – С. 1882-1886.
- 17. Генератор опорных сигналов с регулировкой длительности для сверхширокополосного корреляционного приёмника / Г. К. Усков, Н. А. Лысенко // 21-я международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2014»: сборник тезисов докладов. – Москва, 2014. – С. 188-190.
- 18. Дифференциальный преобразователь на ячейке Гилберта для использования в корреляционном приёмнике сверхширокополосных сигналов / Г. К. Усков, **Н. А. Лысенко** // 20-я международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов»: сборник тезисов докладов. – Москва, 2013. – Т. 2. – С. 29-32.
- 19. СШП преобразователь радиосигнала в дифференциальный на ячейке Гилберта / А. М. Бобрешов, **Н. А. Лысенко**, В. А. Степкин, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: XIX Международная научно-техническая конференция. – Воронеж, 2013. – Т. 1. – С. 309-314.

#### Лысенко Николай Александрович

# Пространственно-временной метод расчёта импульсной характеристики для анализа электромагнитного поля апертуры при излучении сверхширокополосных импульсных сигналов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук