

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.67

СУХАЧЕВСКИЙ
Павел Вячеславович

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОЛОЧНЫХ
АНТЕНН И РАССЕЙВАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМ СИГНАЛОМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Юрцев Олег Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Вилькоцкий Марат Антонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и основ электроники учреждения образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка»

Малый Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент, декан факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация **ОАО «АЛЕВКУРП»**

Защита состоится 27 июня 2019 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovnet@bsuir.by, тел. +375172938989.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «__»_____ 2019 г.

**И.о. ученого секретаря
совета по защите диссертаций Д 02.15.02
доктор технических наук, профессор**

А.А. Борискевич

ВВЕДЕНИЕ

В связи с разработкой в Республике Беларусь радиолокационных станций (РЛС) метрового диапазона длин волн востребованным является исследование электродинамических характеристик антенных устройств и радиолокационных объектов (РЛО) в этом диапазоне. Для определения искажений сверхширокополосных радиосигналов (СШПРС) при прохождении через антенны, распознавания антенных устройств на местности и определения их положения в пространстве в диссертации были проанализированы электродинамические характеристики в пространственно-временной области. Дешевым способом получения характеристик рассеяния антенн и РЛО по сравнению с реальным экспериментом, является численное моделирование, которое использовалось в диссертационной работе [1 – 20]. В литературе в недостаточном объеме представлены вопросы, касающиеся численного решения задач прохождения СШПРС через антенны и рассеяния СШПРС антеннами и другими РЛО. В известных программах электродинамического моделирования (CST, ANSYS HFSS, FEKO) эти задачи не решены. В диссертационной работе подробно изучены особенности прохождения СШПРС через проволочные антенны. В работе впервые проведен анализ коэффициентов передачи «пространство – вход фидера» директорной, кольцевой и рамочной антенн. Установлено, что рамочная антенна с переключаемой поляризацией пригодна для приема и передачи СШПРС наносекундной длительности. Выявлены закономерности в рассеянии СШПРС антеннами и другими РЛО в метровом диапазоне длин волн. Решение задачи рассеяния СШПРС имеет прикладное значение: характеристики рассеяния антенн и объектов радиолокации можно использовать для создания базы данных, решающей задачу распознавания антенных систем и РЛО, движущихся на баллистической траектории либо под воздействием силы вектора тяги двигателя.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами) и темами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 13 «Безопасность человека, общества и государства» Приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12.03.2015, а также пункту «Технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника» раздела 3 «Промышленные и строительные технологии и производство» Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22.04.2015.

Исследования проводились:

- при выполнении контракта в интересах иностранного заказчика № Т024/2009РМ301-207 предприятием ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации», работающим по заказам ГВПК Республики Беларусь (Акт о практическом использовании результатов диссертационных исследований в ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации», приложение А);
- при выполнении контракта в интересах иностранного заказчика № 160207-08МВУ0063 предприятием РНПУП «Центр радиотехники НАН Беларуси» (Акт о практическом использовании результатов научных исследований в промышленных разработках военного и двойного назначения, приложение Б).

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка численной модели прохождения сверхширокополосного сигнала через антенны в режиме приема и рассеяния сигнала антеннами и другими радиолокационными объектами, исследование закономерностей в этих процессах.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана численная модель для анализа изменения СШПРС при прохождении через проволочные антенны, позволяющая рассчитывать входное сопротивление антенн в режиме передачи, КСВ на входе антенн, коэффициент передачи СШПРС через антенну в режиме приема.

2. Разработана численная модель для расчета характеристик рассеяния антенн и РЛО, позволяющая: численно анализировать рассеянное электромагнитное поле от типовых антенн и РЛО в метровом диапазоне длин волн, РЛО также и в сантиметровом диапазоне длин волн; по рассеянному полю от антенн и РЛО рассчитывать их эффективную площадь рассеяния (ЭПР) в полном поляризационном базисе; строить зависимости ЭПР от угла наблюдения на заданной частоте и амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) для заданного угла наблюдения.

3. Рассмотрены различные типы проволочных антенн. На примере директорной и рамочных антенн выявлены закономерности при прохождении СШПР наносекундной длительности через антенны, рассмотрено влияние геометрических параметров антенн на АЧХ.

4. Исследованы закономерности рассеяния СШПРС антеннами в метровом диапазоне длин волн и РЛО в метровом и сантиметровом диапазонах длин волн.

Объектом исследования являются электродинамические характеристики антенн и объектов радиолокации при их облучении СШПРС.

Предмет исследования – закономерности изменения СШПРС при прохождении через антенны и при рассеянии от антенн и РЛО в зависимости от параметров геометрии, положения в пространстве, облучающего СШПРС.

Научная новизна

1. Разработана численная модель [12, 15] электродинамических характеристик проволочных антенн при прохождении через них сверхширокополосного радиосигнала. Численная модель позволяет: рассчитывать КСВ и входное сопротивление проволочных излучателей; осуществлять расчет коэффициента передачи «пространство – вход фидера».

2. Разработана численная модель [1 – 11, 13, 14, 16 – 20] анализа процесса рассеяния сверхширокополосного радиосигнала проволочными антеннами и другими РЛО. Использование этой численной модели позволяет выявить особенности в рассеянном радиосигнале с заданной несущей частотой и формой огибающей при его рассеянии от антенн и других РЛО.

3. В разработанных численных моделях в отличие от известных программ электродинамического моделирования FEKO, CST, ANSYS HFSS реализованы решения задач анализа процессов прохождения СШПРС через антенну [12, 15] и рассеяния СШПРС антеннами и другими радиолокационными объектами [2, 8, 20].

4. На основе разработанных численных моделей создана методика численного моделирования процессов прохождения СШПРС через антенну и рассеяния СШПРС антеннами и другими РЛО, которая использована в диссертации для исследования закономерностей в этих процессах [12, 15].

5. Исследованы закономерности при прохождении сверхширокополосного радиосигнала наносекундной длительности через директорную и рамочные антенны [15]. На примере рамочной антенны с переключаемой поляризацией показано, что при линейном характере зависимости коэффициент передачи антенны от частоты антенна может быть пригодна для приема СШПРС наносекундной длительности. Отмечено, что при совпадении несущей частоты f_n сверхширокополосного радиосигнала и собственной резонансной частоты f_r антенны огибающая сверхширокополосного радиосигнала, рассеянного от антенны, искажается незначительно, а при несовпадении f_n и f_r изменяется существенно. Выявленную особенность можно использовать для удаленного определения резонансной частоты антенны по рассеянному от нее сверхширокополосному радиосигналу. На примере цилиндра, конуса, крылатых ракет, истребителя определено, что в огибающей рассеянного сверхширокополосного радиосигнала содержится информация о геометрических параметрах этих объектов.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика решения задач прохождения СШПРС через проволочную антенну произвольной конструкции и рассеяния СШПРС антеннами и другими РЛО, содержащая разработанные численные модели этих процессов.

Разработанные численные модели отличаются от известных программ CST Microwave Studio, ANSYS HFSS, FEKO тем, что в них решены задачи прохождения СШПРС через проволочные антенны и рассеяния СШПРС.

2. Новые, не описанные в литературе закономерности:

– особенности влияния геометрии различных типов антенн, их частотных характеристик, формы огибающей и частоты облучающего СШПРС на коэффициент прохождения через антенну. В частности, для диапазона метровых длин волн показано, что при уменьшении длительности облучающего СШПРС с несущей частотой $f_n = 168$ МГц с 100 до 10 нс максимальный уровень (U_{\max}) СШПРС в фидерах антенн: директорной – падает на 10 дБ; кольцевой – падает на 14 дБ, для рамочной – изменяется незначительно;

– особенности влияния геометрии различных типов антенн и других радиолокационных объектов, формы огибающей и частоты зондирующего СШПРС на рассеянный сигнал. При изменении несущей частоты СШПРС длительностью 100 нс с 168 до 250 МГц изменяется форма и максимальный уровень (U_{\max}) рассеянного СШПРС в случае: директорной антенны U_{\max} падает на 14 дБ; кольцевой – на 6 дБ; рамочной – изменяется незначительно;

– особенности влияния размеров крылатых ракет и истребителя F-16 Fighting Falcon на их средние и медианные значения ЭПР.

Личный вклад соискателя ученой степени

Соискателем самостоятельно разработана численная модель, положенная в основу работы. Разработанное программное обеспечение позволяет моделировать различные типы антенн и РЛО произвольной геометрии при любом положении точечных источников излучения и приема сигнала. Поляризация зондирующего колебания может быть вертикальной либо горизонтальной. Соискатель выполнил основную часть исследований, вошедших в диссертацию. Провел анализ полученной информации и сформулировал конечные результаты.

Основным соавтором в опубликованных работах является научный руководитель – доктор технических наук, профессор О.А. Юрцев, который оказал существенную помощь в определении направлений исследований и разработке численной модели.

Совместно с В.В. Кедой, А.Г. Романовичем и Ю.Ю. Бобковым проводились исследования характеристик рассеяния проволочных антенн во временной области.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Теоретические и практические результаты исследований, вошедших в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2–5 июня 2014 г.); 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS) (Харьков, Украина, 15–19 сентября, 2014 г.); XXI Международная научно-техническая конференции «Радиолокация, навигация, связь (RLNC*2015)» (Воронеж, 14–16 апреля 2015 г.); IV Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 1–4 июня 2015 г.); XIII Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов» (Казань, 21–25 сентября – 2015 г.); X Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 21–23 ноября 2016 г.); 7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (Минск, 20–22 мая 2017 г.); 12-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2016» (Севастополь, 14–18 ноября 2016 г.); 13-я Международная молодежная научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2017» (Севастополь, 20–24 ноября 2017 г.); VIII международная научно-практическая конференция «Инновации в науке и практике» (Барнаул, 27 мая 2018 г.); VII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 28–31 мая 2018 г.); X международная научно-практическая конференция «Перспективы развития науки в современном мире» (Уфа, 22 сентября 2018 г.); 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), IEEE, (Одесса, Украина, 4–7 сентября, 2018 г.); 14-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2018» (Севастополь, 22–26 октября, 2018 г.); XII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 26–28 ноября 2018 г.); VI Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 28–30 ноября 2018 г.).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ. Среди них 3 статьи в научных рецензируемых журналах из перечня ВАК и 1 статья в материалах международного научного сообщества IEEE общим объемом 1,2 авторского листа, 12 публикаций в виде статей (общий объем 3,2 авторского

листа) и 4 тезиса в сборниках трудов и материалов международных и республиканских научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений, введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и восьми приложений. Полный объем работы составляет 168 страниц, из них 88 страниц основного текста, 87 рисунков на 45 страницах, 8 таблиц на 3 страницах, 8 приложений на 17 страницах, список используемых литературных источников из 147 наименований на 12 страницах, список публикаций автора из 20 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность научных исследований, проведенных в диссертации, показана необходимость детального исследования закономерностей в изменении сверхширокополосных радиосигналов при прохождении через антенны и при рассеянии антеннами и другими радиолокационными объектами, отражено место диссертации среди других работ.

В **первой главе** проведен обзор работ, посвященных теориям прохождения импульсных сигналов через антенны и рассеяния электромагнитной волны антеннами и другими радиолокационными объектами. Приведены основные методы, которые используются для аналитического и численного расчета электродинамических характеристик антенн и других радиолокационных объектов. На основании проведенного обзора выделен ряд вопросов, требующих дополнительного исследования, сформулирована цель и задачи диссертационной работы.

Исследование изменения формы огибающей СШПРС при прохождении через антенны в литературе описано не в полной мере. Необходим строгий численный метод для решения данной задачи. В настоящей диссертации предлагается методика решения задачи прохождения СШПРС через антенны в фидер на примере директорной и рамочных антенн.

В связи с разработкой в Республике Беларусь и странах СНГ РЛС метрового диапазона длин волн актуальным является исследование усредненных и медианных ЭПР антенн и РЛО в зависимости от угла и частоты в метровом диапазоне длин волн и их сравнение с данными сантиметрового диапазона длин волн. Антенные решетки многих современных радиолокаторов состоят из излучателей с управляемой поляризацией. Востребованными являются исследования случаев согласованной и несогласованной поляризации антенн приемника сигналов РЛС и рассеянной от антенн либо РЛО ЭМВ. Во многих современных РЛС используются зондирующие узкополосные сигналы. Но потенциально высокие информационные возможности совместно с

характеристиками скрытности СШПРС по сравнению с узкополосными сигналами позволяют применять их в устройствах радиолокации, связи, в различных сферах гражданской обороны и борьбы с терроризмом. Исследование закономерностей при изменении формы огибающей СШПРС в случае рассеяния некоторым объектом в литературе представлено недостаточно полно. В настоящей работе проведены такие исследования.

Актуальным является создание базы данных для распознавания радиолокационных объектов, движущихся на баллистической траектории либо под воздействием вектора силы тяги двигателя. В литературе отсутствуют данные по широко применяемым крылатым ракетам, например AIM-120 AMRAAM и AGM-88 HARM, в метровом диапазоне длин волн. Расширение базы данных по характеристикам рассеяния крылатых ракет и РЛО для их распознавания в VHF- и X-диапазонах является важной проблемой, поэтому в диссертации она частично рассмотрена.

Во **второй главе** описана математическая модель объекта радиолокации, включая антенны, при его облучении СШПРС. Математическая модель включает в себя описание решения внутренней и внешней задач. Внутренняя задача для проволочной антенны решается при помощи интегрального уравнения Поклингтона. К этому уравнению применяется процесс Бубнова-Галеркина с использованием кусочно-постоянных базисных и весовых функций. Внешняя задача решается методом векторного потенциала.

Для численной оценки параметров принимаемого СШПРС (амплитуды, формы огибающей, частотного спектра) необходимо по заданному в пространстве СШПРС определить СШПРС в фидере, подключенном к антенне, принимающей этот импульс. Принимаемый СШПРС в точке расположения приемной антенны имеет определенную форму огибающей и комплексную амплитуду в максимуме, равную \dot{E}_s . После прохождения через антенну в фидере форма СШПРС будет другой, а амплитуда равной \dot{E}_f . Под модулем коэффициента передачи «пространство – вход фидера» K_{sf} понимается величина

$$K_{sf} = \left| \frac{\dot{E}_f}{\dot{E}_s} \right|. \quad (1)$$

Для решения задачи прохождения СШПРС через антенну предложена следующая методика определения модуля коэффициента передачи K_{sf} :

1. Принимаемый СШПРС раскладывается в дискретный ряд Фурье в частотном диапазоне $f_{\min} \dots f_{\max}$. В результате определяются амплитуды и фазы временных гармоник с номерами f_n , где $1 \leq n \leq N$, N – число анализируемых частотных гармоник.

2. Методом интегральных уравнений с использованием тонкопроволочного приближения решается задача возбуждения антенны на

частотах f_n и находится входное сопротивление $Z_a(f_n)$ как отношение заданного напряжения возбуждения к току в сегменте возбуждения, который является входом антенны.

3. Методом интегральных уравнений решается задача рассеяния заданного СШПРС на тех же частотах f_n и находится комплексный ток в сегменте возбуждения как функция частоты – $I_a(f_n)$.

4. По найденным $Z_a(f_n)$ и $I_a(f_n)$ находится комплексное напряжение в сегменте возбуждения как функция частоты – $U_a(f_n) = Z_a(f_n) \cdot I_a(f_n)$. Напряженность электрического поля в сегменте возбуждения равна $E_a(f_n) = U_a(f_n)/\Delta$, где Δ – длина сегмента возбуждения.

5. Определяется модуль комплексного коэффициента передачи «пространство – вход антенны» как функция частоты по формуле

$$K_{sa}(f_n) = \left| \frac{E_a(f_n)}{E_s} \right|, \quad (2)$$

где E_s – амплитуда СШПРС в пространстве.

6. По входному сопротивлению антенны в режиме передачи $Z_a(f_n)$ и волновому сопротивлению подключенного к антенне фидера R_n находится коэффициент отражения G от соединения «вход антенны – вход фидера» как функция частоты по известной формуле

$$G(f_n) = \frac{\frac{Z_a(f_n)}{R_n} - 1}{\frac{Z_a(f_n)}{R_n} + 1}, \quad (3)$$

Модуль коэффициента передачи соединения «вход антенны – вход фидера» определяется выражением

$$K_{af}(f_n) = \sqrt{1 - |G(f_n)|^2}. \quad (4)$$

7. По найденным коэффициентам передачи $K_{sa}(f_n)$ и $K_{af}(f_n)$ определяется модуль искомого коэффициента передачи «пространство – вход фидера» как функция частоты:

$$K_{sf}(f_n) = K_{sa}(f_n) \cdot K_{af}(f_n). \quad (5)$$

8. Спектр СШПРС в фидере определяется перемножением комплексного спектра СШПРС в пространстве, найденного в пункте 1, и модуля коэффициента передачи $K_{sf}(f_n)$.

9. По найденному спектру СШПРС в фидере с помощью обратного дискретного преобразования Фурье определяется СШПРС в фидере.

10. По амплитудам спектра СШПРС в фидере S_f и спектра зондирующего СШПРС S_s на несущей частоте f_n определяется коэффициент ослабления СШПРС при прохождении его через антенну:

$$B_{sf} = S_s(f_n) / S_f(f_n). \quad (6)$$

В предложенной методике не учитывается фазочастотная характеристика соединения «вход антенны – вход фидера». Поэтому коэффициент ослабления получается заниженным.

Задача рассеяния СШПРС на некотором объекте решается в несколько этапов:

1. По облучающей монохроматической электромагнитной волне заданной частоты f определяется ток в проводнике. Используется метод моментов: интегральное уравнение для тока в тонком проводнике Поклингтона, импульсные функции в качестве базисных и весовых.

2. По найденному току в проводнике определяется поле рассеяния с использованием метода векторного потенциала.

3. По полю рассеяния определяется одно- и двухпозиционная ЭПР как функция частоты.

4. Заданный СШПРС с использованием прямого преобразования Фурье (приложение В) раскладывается в конечный ряд временных гармоник.

5. Определяется отклик объекта на каждую гармонику, т. е. спектр рассеянного СШПРС.

6. По найденному ряду гармоник рассеянного поля с помощью обратного преобразования Фурье синтезируется рассеянный СШПРС.

В **третьей главе** описана разработанная численная модель (CARO) и сделана ее верификация. Результаты, полученные в разработанной численной модели, согласуются с результатами известных программ CST и FEKO.

С помощью программы CARO может быть решена задача прохождения СШПРС через проволочную антенну. Численная модель позволяет анализировать характеристики рассеяния антенн и РЛО в частотной и временной областях. В качестве зондирующего сигнала могут быть заданы радиоимпульсы: с трапецеидальной, прямоугольной и гауссовой формой огибающих. Зондирующим сигналом может быть единичный импульс.

Наличие разработанной численной модели позволяет расширить приложение теории рассеяния на антенны и РЛО произвольных форм и дает возможность осуществить ряд исследований:

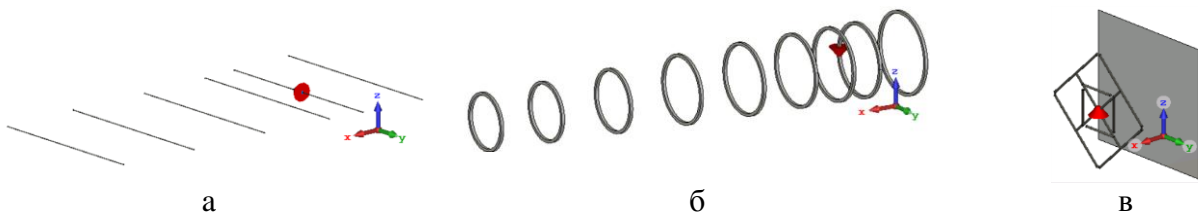
1. Оценить изменение формы огибающей СШПРС при их прохождении через антенны.

2. Численно проанализировать характеристики рассеяния в частотной и временной областях, а также создать базу данных для распознавания радиолокационных объектов, движущихся на баллистической траектории, либо под воздействием вектора силы тяги двигателя при постановке пассивных помех в виде облака пассивных дипольных отражателей.

Четвертая глава посвящена исследованию электродинамических характеристик антенн и радиолокационных объектов при их облучении СШПРС. В работе в качестве примеров использования разработанной численной модели и реализующего ее программного обеспечения анализируются часто применяемые проволочные антенны:

- 1) директорная антенна (рисунок 1, а);
- 2) кольцевая антенна, состоящая из системы колец (рисунок 1, б);
- 3) рамочная антенна с переключаемой поляризацией (рисунок 1, в).

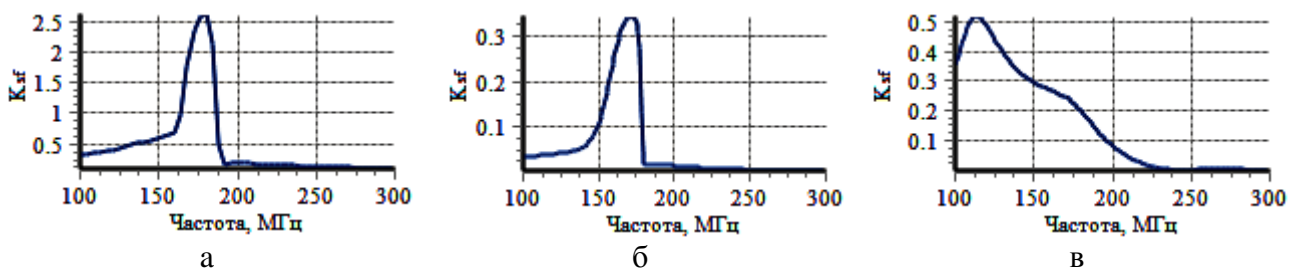
К антеннам подключена нагрузка R_n , имеющая входное сопротивление 50 Ом.



а – директорная; б – кольцевая; в – рамочная
Рисунок 1. – Проволочные антенны

Коэффициенты передачи «пространство – вход фидера» (K_{sf}) кольцевой, директорной и рамочной антенн при согласованных поляризациях антенны и падающей электромагнитной волны изображены на рисунке 2.

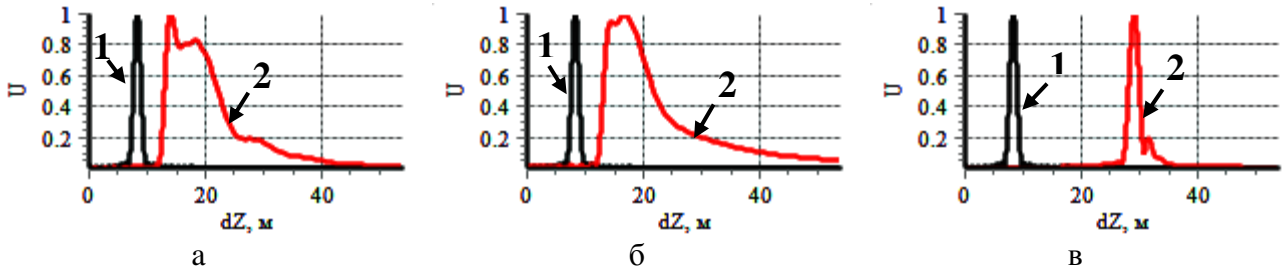
На рисунке 2, в функция зависимости K_{sf} от частоты рамочной антенны в полосе частот 120–220 МГц, в отличие от K_{sf} кольцевой (рисунок 2, а) и директорной (рисунок 2, б) антенн, отличается незначительно от линейной зависимости.



а – для директорной; б – для кольцевой; в – для рамочной
Рисунок 2. – Модули коэффициентов передачи «пространство – вход фидера» проволочных антенн, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$

На рисунке 3 показаны огибающие СШПРС в пространстве и фидере директорной, кольцевой и рамочной антенн. Длительность зондирующего

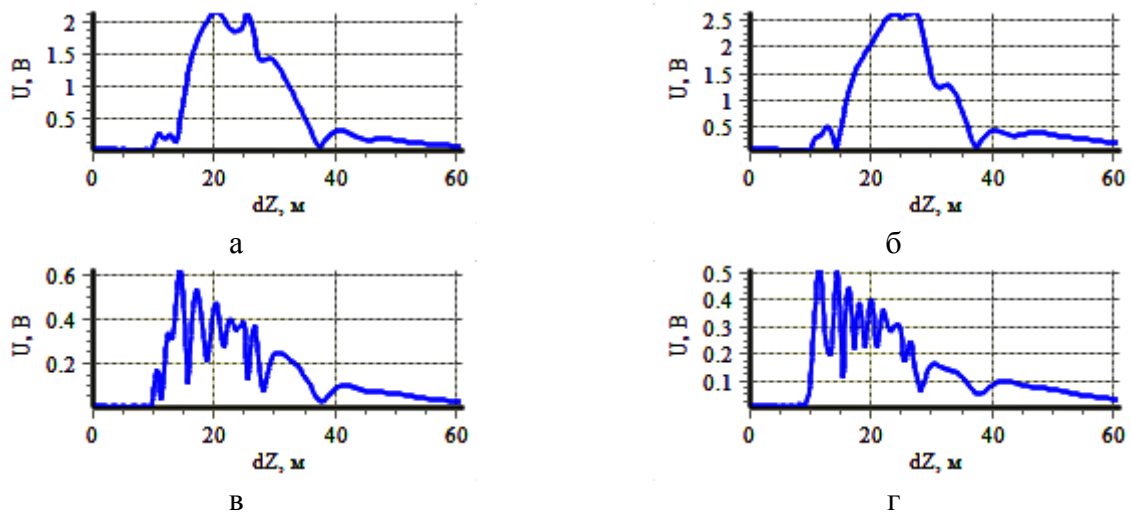
СШПРС $\tau = 10$ нс, несущая частота $f_n = 168$ МГц. Огибающие СШПРС представлены в пространственной области, где U – напряжение, $dZ = 0,5 \cdot ct$ – координата, вдоль которой распространяется ЭМВ, c – скорость света. Огибающая СШПРС в фидере рамочной антенны искажена меньше всего по сравнению с огибающими СШПРС в фидерах директорной и кольцевой антенн.



а – для директорной; б – для кольцевой; в – для рамочной;
1 – пространство; 2 – фидер

Рисунок 3. – Нормированные огибающие СШПРС

В качестве примера использования разработанной численной модели для решения задачи рассеяния СШПРС на рисунке 4 представлены рассеянные от директорной антенны СШПРС при различных несущих частотах f_n , $\tau = 10$ нс, поляризации передатчика и приемника сигналов горизонтальные.



а – $f_n = 160$ МГц; б – $f_n = 175$ МГц; в – $f_n = 120$ МГц; г – $f_n = 250$ МГц

Рисунок 4 – Огибающие СШПРС, рассеянного от директорной антенны,
 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$

Из рисунка 4 следует, что форма огибающей рассеянного СШПРС существенно зависит от отношения f_r/f_n . При отношении f_r/f_n близком к единице рассеянный СШПРС искажаются в меньшей степени по сравнению с рассеянными СШПРС, для которого $f_r/f_n > 0,7$ и $f_r/f_n < 1,4$: по рассеянному СШПРС можно оценить резонансную частоту директорной антенны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В процессе работы над диссертацией разработана численная модель, позволяющая с использованием метода интегральных уравнений для тока в тонких проводниках и метода векторного потенциала, численно:

– решать задачу прохождения СШПРС через антенны в фидер [12, 15], анализировать коэффициент «пространство – вход фидера» и коэффициент ослабления СШПРС;

– решать задачу рассеяния СШПРС антеннами и другими радиолокационными объектами [1 – 11, 13 – 20], анализировать их ЭПР в зависимости от частоты и угла наблюдения, определять усредненную и медианную ЭПР в заданном секторе углов в зависимости от частоты, рассчитывать ЭПР группы объектов (истребителя и облака пассивных дипольных отражателей) без учета взаимного влияния между ними.

Характеристики рассеяния в оптической области определяются методом физической оптики с учетом дифракции от ребер. Комплексное рассеянное от гладких поверхностей поле определяется с помощью решения уравнения Кирхгофа-Гельмгольца методом Гордона. Численная модель дифракции плоской волны на металлическом клине [14] построена на известном решении задачи рассеяния на острой кромке, приведенным в работе П.Я. Уфимцева.

Характеристики рассеяния антенн и других радиолокационных объектов могут быть получены путем импортирования в разработанную численную модель рассеянного комплексного поля из известных программ электродинамического моделирования FEKO и CST.

Геометрия анализируемых объектов строится в среде с открытым кодом GMSH [2, 4] и импортируется в разработанную численную модель. Облако пассивных дипольных отражателей может быть импортировано из разработанной численной модели в программу CST.

Разработанная численная модель CARO отличается от известных, часто применяемых программ FEKO, ANSYS HFSS, CST Microwave Studio тем, что в ней реализованы решения задачи прохождения СШПРС через проволочные антенны и рассеяния СШПРС. Во многих современных программах электродинамического моделирования при решении задачи рассеивания в качестве облучающего сигнала используется видеоимпульс. В этом случае максимум спектра расположен вблизи нулевой частоты. В диссертации рассмотрена задача рассеяния СШПРС с заданной формой огибающей и заданной частотой заполнения. В таком случае можно получить решение задачи, более информативное по признакам, появляющимся при рассеянии СШПРС антенной либо РЛО. При использовании СШПРС для зондирования при приеме рассеянного СШПРС в полосе частот, включающей несущую частоту зондирующего СШПРС, более эффективно используется энергия этого импульса.

2. С помощью предложенного в диссертации метода, реализованного в программе CARO для решения задач прохождения СШПРС через антенну и рассеяния СШПРС антеннами и другими радиолокационными объектами, в диссертации:

А) Рассчитаны коэффициенты передачи «пространство – вход фидера» K_{sf} директорной, кольцевой и рамочной антенн при прохождении СШПРС через антенну. Обнаружено, что зависимость K_{sf} от частоты широкополосной рамочной антенны с переключаемой поляризацией [15] в диапазоне частот 120–220 МГц отличается несущественно от линейной зависимости. Рамочная антенна, в отличие от рассмотренных директорной и кольцевой антенн, пригодна для приема и передачи СШПРС. При прохождении СШПРС с несущей частотой 168 МГц и длительностью 10 нс через рамочную антенну огибающая СШПРС изменяется несущественно и значительно меньше, чем в случае прохождения этого СШПРС через директорную и кольцевую антенны. Проанализирована зависимость коэффициента ослабления B_{sf} от ширины спектра СШПРС для рамочной антенны. Показано, что при уменьшении длительности зондирующего СШПРС с 25 до 15 нс коэффициент B_{sf} для рамочной антенны с переключаемой поляризацией изменяется менее чем на 0,25 дБ, а для директорной – на 4 дБ. В радиолокации уменьшение длительности зондирующих СШПРС является актуальной проблемой. Для этого необходимо анализировать K_{sf} и B_{sf} антенных устройств. Для приема и передачи СШПРС антенными устройствами коэффициент передачи K_{sf} должен иметь линейный характер в как можно большем диапазоне частот, а коэффициент B_{sf} не должен зависеть от ширины спектра зондирующего СШПРС. Предложенный метод решения задачи прохождения СШПРС через антенну дополняет теорию антенн [12, 15].

Б) На примере директорной антенны показано, что форма рассеянного СШПРС существенно зависит от ориентации антенны [1, 7 – 9, 20]. Эту особенность можно использовать для определения ориентации антенны в пространстве. Выявлено, что уровень рассеянного кольцевой антенной СШПРС больше, чем уровень рассеянного СШПРС директорной антенной. Это связано с тем, что у кольцевой антенны КНД больше, чем у директорной. Определено, что чем ближе несущая частота СШПРС f_n к резонансной частоте директорной и кольцевой антенн, тем больше уровень и меньше искажения огибающей рассеянного СШПРС. Данный признак можно использовать для определения резонансной частоты антенны по рассеянному от антенны СШПРС. Огибающие рассеянного от рамочной антенны СШПРС искажены в меньшей степени, чем огибающие рассеянного СШПРС от директорной и рамочной антенн [2]. Это объясняется тем, что рамочная антенна является более широкополосным устройством по сравнению с директорной и кольцевой антеннами.

3. Применение численных методов позволяет расширить приложение теории рассеяния на антенны произвольных форм. Для численного анализа характеристик рассеяния антенн в частотной области использовался метод, основанный на решении интегрального уравнения Поклингтона. Определено,

что зависимость средней ЭПР от частоты в секторе углов $\theta = 90^\circ$, $\varphi = [0-90]^\circ$ для директорной антенны существенно зависит от номинала входного сопротивления нагрузки R_n , подключенного к антенне [20]. Аналогичная закономерность наблюдается и для медианной ЭПР. Эти особенности необходимо учитывать при проектировании антенных устройств. Частотные характеристики (зависимости ЭПР от частоты, ЧХ) сильно зависят от ориентации директорной и рамочной антенн в пространстве [2]. В секторе углов $\theta = 90^\circ$, $\varphi = [0-90]^\circ$ в рабочей полосе частот 172–186 МГц директорной антенны, где КСВ < 2 , уровень усредненной и медианной ЭПР при $R_n = 50$ Ом значительно меньше, чем при $R_n = 0$ Ом. Данная особенность вызвана тем, что при $R_n = 50$ Ом часть энергии падающей ЭМВ проходит в фидер директорной антенны, а часть рассеивается в пространстве. При $R_n = 0$ Ом вся энергия падающей электромагнитной волны рассеивается в пространстве. При согласованных поляризациях антенны и падающей ЭМВ аналогичная закономерность наблюдается и для кольцевой антенны. Для кольцевой антенны зависимость медианной ЭПР от частоты при несогласованных поляризациях антенны и падающей ЭМВ более информативна, чем усредненная: экстремум медианной ЭПР находится вблизи резонансной частоты антенны. Выявленные закономерности в ЧХ директорной, кольцевой и рамочной антенн [15] могут быть использованы для удаленного определения рабочей полосы частот этих типов антенн.

4. Исследование рассеяния СШПРС от РЛО является важной проблемой. Актуальной является задача распознавания классов целей, движущихся на баллистической траектории, либо под воздействием вектора силы тяги двигателя с помощью СШПРС, рассеянных от РЛО [3, 4 10, 11, 13, 14, 16, 18]. На примере:

А) Цилиндра и объекта конической формы (боевой части ракеты LGM-30G Minuteman III) проанализированы рассеянные от них СШПРС. При несущей частоте зондирующего СШПРС $f_n = 200$ МГц, длительности $\tau = 5$ нс, ширине полосы частот 100–300 МГц (относительная ширина полосы частот близка к единице – зондирующий сигнал является сверхширокополосным) видно, что огибающие СШПРС, рассеянных от рассматриваемых объектов, сильно зависят от направления наблюдения. Огибающие СШПРС, рассеянных от цилиндра и LGM-30G Minuteman III, для заданного направления наблюдения отличаются по форме и уровню. Показано, что информация о размерах цилиндра и объекта конической формы содержится в огибающих рассеянных от них СШПРС [4].

Б) Крылатых ракет AIM-120 AMRAAM и AGM-88 HARM [3, 18] исследованы спектры рассеянных от них СШПРС. Для ракеты AIM-120 AMRAAM [13] при согласованной поляризации антенн приемника и передатчика сигналов для углов наблюдения $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, при длительности зондирующих СШПРС по уровню $0,707$ $\tau = 10$ нс и несущих частотах $f_n = 138$ МГц и $f_n = 200$ МГц: уровень боковых лепестков спектра зондирующих СШПРС вне полосы 100–300 МГц меньше $0,001$ В/Гц – большая часть энергии

выбранных зондирующих СШПРС сосредоточена в полосе 100–300 МГц. Огибающая рассеянного от крылатой ракеты AIM-120 AMRAAM СШПРС при $f_n = 138$ МГц сильно искажена и его максимальный уровень амплитуды меньше, чем максимальный уровень огибающей рассеянного СШПРС с несущей частотой $f_n = 200$ МГц. Это связано с тем, что максимальный уровень спектра зондирующего СШПРС при $f_n = 138$ МГц расположен не на резонансной частоте анализируемого объекта, а при $f_n = 200$ МГц – на резонансной. Для направления наблюдения $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ и зондирующего СШПРС с параметрами $f_n = 200$ МГц, $\tau = 10$ нс рассеянные от AIM-120 AMRAAM и AGM-88 HARM СШПРС отличаются. Для AIM-120 AMRAAM пространственная задержка между локальными экстремумами огибающей рассеянного СШПРС равна $\Delta Z = 1,7$ м, что приблизительно соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты AIM-120 AMRAAM $L_s = 1,6$ м. Уровень локальных экстремумов огибающей рассеянного СШПРС отличается на 2 дБ, потому что размеры стабилизаторов ракеты и крыльев ракеты отличаются незначительно. Для AGM-88 HARM $\Delta Z = 2,1$ м, что соответствует расстоянию между крыльями и стабилизаторами ракеты AGM-88 HARM $L_s = 2,1$ м. Уровень огибающей рассеянного СШПРС от крыльев превышает уровень огибающей рассеянного СШПРС от стабилизаторов потому, что размеры крыльев AGM-88 HARM превышают размеры стабилизаторов в два раза [2].

В) Истребителя F-16 Fighting Falcon [13, 16] проанализированы характеристики рассеяния во временной области. Модель истребителя создана в известной среде конструкторского проектирования SolidWorks и экспортирована в программу CST [13]. Для уменьшения радиолокационной заметности большинство современных истребителей имеют закругленные кромки крыльев и хвоста. Среда SolidWorks выбрана для создания модели истребителя, потому что в ней удобно описывать объекты криволинейными поверхностями. Расчет рассеянных СШПРС в программе CST требует написания дополнительной программы [13] на встроенном в CST языке макросов VBA, которая реализована в программе CARO на языке C++.

Поэтому результаты расчета комплексного поля $\dot{E}(\theta, \varphi, f, R)$, (f – частота, R – расстояние) экспортированы из программы электродинамического моделирования CST в оригинальную программу CARO. Пространственная длительность огибающих СШПРС, рассеянных истребителем, значительно больше, чем длительность огибающих СШПРС, рассеянных объектами конических и цилиндрических форм, и приблизительно соответствует размеру истребителя.

5. Проанализированы характеристики рассеяния во временной области истребителя с учетом и без учета геометрии облака дипольных отражателей (ОДО) [16]. Геометрия ОДО создана в программе CARO и экспортирована в программу CST, потому что в CST отсутствует возможность создания геометрии ОДО. Результаты расчета поля $\dot{E}(\theta, \varphi, f, R)$, (f – частота, R –

расстояние) экспортированы из CST в оригинальную программу CARO, потому что в CARO в отличие от CST в качестве зондирующего колебания можно задавать СШПРС. В CARO предусмотрен расчет характеристик рассеяния от группы объектов без учета взаимного влияния между элементами группы. Данный инструмент удобен для расчета характеристик рассеяния РЛО с учетом геометрии облака дипольных отражателей (ОДО), но без учета взаимного влияния между истребителем и ОДО. Центр ОДО удален от центра истребителя на 70 м. Размеры облака $30 \times 30 \times 20$ м, количество диполей в облаке 50. Длина диполей изменяется в пределах от 0,13 до 0,15 м.

При параметрах СШПРС $\tau = 20$ нс, $f_n = 200$ МГц и согласованных поляризациях антенн приемника и передатчика сигналов при расчете характеристик рассеяния истребителя без учета геометрии ОДО в огибающей рассеянного СШПРС присутствует одна группа локальных экстремумов, пространственная длительность которой соответствует размеру истребителя. При моделировании истребителя с учетом геометрии ОДО – две группы локальных экстремумов. Длительность в пространстве одной из групп составляет 15 м, что соответствует размеру истребителя, а длительность второй группы – 30 м, что соответствует размеру ОДО в направлении распространения ЭМВ. Очередность групп локальных экстремумов соответствует расположению истребителя и ОДО относительно направления распространения ЭМВ. Расстояние между группами локальных экстремумов составляет приблизительно 60 м, что соответствует расстоянию между центрами истребителя и ОДО. Различия в длительностях групп локальных экстремумов можно использовать для идентификации истребителя на фоне облака дипольных отражателей. При несогласованных поляризациях антенн приемника и передатчика сигналов при моделировании истребителя на фоне ОДО в рассеянном СШПРС присутствует только информация об ОДО. Данную особенность при применении широкополосных антенных устройств [15], можно использовать для распознавания истребителя на фоне ОДО.

Рекомендации по практическому использованию результатов

В связи с активной разработкой в Республике Беларусь РЛС и недостаточным объемом данных в литературе полученные результаты могут иметь непосредственное практическое применение при проектировании РЛС метрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Актуальной является численная оценка изменения формы СШПРС при прохождении через проволочные антенны произвольной конструкции. В диссертации предложен метод решения этой задачи. Показано, что в СШПРС, рассеянном от антенн и других радиолокационных объектов, содержится информация об этих объектах. Эту информацию можно использовать для создания базы данных антенных устройств и других радиолокационных объектов с целью их распознавания.

Разработанную математическую модель и реализующий ее пакет программ CARO целесообразно использовать для проектирования антенных

устройств при анализе изменения огибающей СШПРС при прохождении сигнала через антенну и оценке характеристик рассеяния антенн и других радиолокационных объектов.

На предприятии ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации» в рамках контракта с иностранным заказчиком были использованы (приложение А):

1) программа численного моделирования процесса рассеяния широкополосного радиоимпульса системой диполей и программа численного моделирования процесса рассеяния монохроматического сигнала тестовыми радиолокационными объектами методом интегральных уравнений;

2) результаты численного моделирования рассеяния широкополосного сигнала системой диполей.

На предприятии РНПУП «Центр радиотехники НАН Беларуси» при выполнении Части А (НИОКР «Разработка системы автоматического распознавания классов целей для трехкоординатного обзорного радиолокатора VHF-диапазона») контракта с зарубежным заказчиком применены (приложение Б):

1) методика и программа численного анализа рассеяния импульсной электромагнитной волны радиолокационными объектами;

2) результаты численного анализа характеристик рассеяния узкополосного и широкополосного сигналов аэродинамическими радиолокационными объектами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Сухачевский, П.В. Закономерности рассеяния импульсной электромагнитной волны системой диполей / П.В. Сухачевский // Электроника инфо. – 2016, № 6(132). – С. 59-62.

2. Сухачевский, П.В. Численный анализ рассеяния импульсного сигнала от антенн и радиолокационных объектов / П.В. Сухачевский // Доклады БГУИР. – 2018, № 1(111). – С. 65-71.

3. Сухачевский, П.В. Анализ спектральным методом рассеяния импульсного сигнала от крылатых ракет в VHF-диапазоне / П.В. Сухачевский // Доклады БГУИР. – 2018, № 6(116). – С. 86-92.

Статьи в сборниках трудов и материалов конференций

4. Sukhacheuski, P. Spectral method analysis of radio-frequency pulse signal scattering from cylindrical and conical shapes object in the VHF Band / P. Sukhacheuski // Materials of a conference “9th International Conference on

Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals”. – Odessa, Ukraine: IEEE, 2018. – UWBUSIS. – P. 156-160.

5. Юрцев, О.А. Рассеяние радиоимпульса линейным диполем / О.А. Юрцев, П.В. Сухачевский, В.В. Кеда // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – Т. 1. – С. 252-256.

6. Yurtsev, O.A. The scattering of radio-frequency pulse signal on a thin wire / O.A. Yurtsev, Y.Y. Bobkov, P. Suhachevsky // Materials of a conference «7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals». – Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2014. – UWBUSIS. – P. 127-129.

7. Юрцев, О.А. Рассеяние широкополосного радиосигнала системой диполей / О.А. Юрцев, П.В. Сухачевский // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – Т. 2. – С. 188-192.

8. Рассеяние широкополосного радиосигнала проволочной антенной / О.А. Юрцев, Ю.Ю. Бобков, А.Г. Романович, П.В. Сухачевский // Материалы XXI международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2015. – RLNC*2015. – С. 392-402.

9. Сухачевский, П.В. Анализ рассеяния широкополосного сигнала системой диполей спектральным методом / П.В. Сухачевский, О.А. Юрцев // Материалы XIII международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – Казань: ООО «Новое знание», 2015. – Т. 1. – С. 64-66.

10. Сухачевский, П.В. Рассеяние широкополосного сигнала объектом радиолокации / П.В. Сухачевский // Сборник трудов X Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – Москва: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2016. – Т. 1. – С. 293-297.

11. Сухачевский, П.В. Численный анализ рассеяния импульсного сигнала от объекта радиолокации цилиндрической формы / П.В. Сухачевский // Материалы конференции «7-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения». – Минск: ГВПК РБ, 2017. – Т. 2. – MILEX-2017. – С. 129-136.

12. Юрцев, О.А. Похождение сверхширокополосного электромагнитного импульса через проволочную антенну / О.А. Юрцев, П.В. Сухачевский // Материалы VIII международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике». – Барнаул: ООО Дендра, 2018. – Т. 3. – С. 277-285.

13. Сухачевский, П.В. Анализ спектральным методом рассеяния сигнала от крылатой ракеты и истребителя в VHF-диапазоне / П.В. Сухачевский // Материалы VII Всероссийской научно-технической

конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – Т. 1. – С. 431-435.

14. Сухачевский, П.В. Анализ спектральным методом решения задачи рассеяния радиоимпульса В Х-Диапазоне / П.В. Сухачевский // Материалы X международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки в современном мире». – Уфа: ООО Дендра, 2018. – Т. 1. – С. 28-38.

15. Сухачевский, П.В. Прохождение сверхкороткого радиоимпульса через проволочные антенны / П.В. Сухачевский, О.А. Юрцев // Сборник трудов конференции «VI Всероссийская микроволновая конференция». – Москва: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2018. – Т. 1. – С. 209-213.

16. Сухачевский, П.В. Рассеяние широкополосного сигнала объектом радиолокации на фоне пассивных помех / П.В. Сухачевский // Сборник трудов XII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – Москва: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2018. – Т. 1. – С. 181-185.

17. Юрцев, О.А. Анализ рассеянного поля диполя в пространственно-временной области / О.А. Юрцев, П.В. Сухачевский, В.В. Кеда // Материалы конференции «Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР». – Минск: БГУИР, 2014. – Т. 1. – С. 66-67.

18. Сухачевский, П.В. Характеристики рассеяния ракеты класса воздух-земля / П.В. Сухачевский // Материалы 12-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Севастополь: СевГУ, 2016. – Т. 1. – РТ-2016. – С. 48.

19. Сухачевский, П.В. Рассеяние электромагнитной волны цилиндром / П.В. Сухачевский // Материалы 13-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Севастополь: СевГУ, 2017. – Т. 1. – РТ-2017. – С. 73.

20. Сухачевский, П.В. Анализ спектральным методом рассеяния электромагнитной волны рамочной антенной с переключаемой поляризацией / П.В. Сухачевский // Материалы 14-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Севастополь: СевГУ, 2018. – Т. 1. – РТ-2018. – С. 93.

РЭЗІЮМЭ

Сухачэўскі Павел Вячаслававіч

Электрадынамічныя характарыстыкі драцяных антэн і расейвальнікаў пры іх апраменьванні звышшырокапалосным сігналам

Ключавыя словы: лікавае мадэляванне, тонкадрацяная мадэль, інтэгральнае ўраўнанне току, антэны, радыелакацыйны аб'ект, праходжанне звышшырокапалоснага радыесігналу праз антэну, расейванне, мятровы дыяпазон.

Мэта работы: распрацоўка лікавай мадэлі праходжання звышшырокапалоснага сігналу праз антэны ў рэжыме прыему і расейванні сігналу антэнамі і іншымі радыелакацыйнымі аб'ектамі, даследаванне заканамернасцяў у гэтых працэсах.

Метады даследавання: лікавы эксперымент на праграмным забеспячэнні, у аснове якога ляжыць распрацаваная лікавая мадэль.

Выкарыстаная апаратура. Мадэляванне праводзілася з дапамогай персанальнага камп'ютара з працэсарам i7-3930K, АЗП аб'емам 32 ГБ і аперацыйнай сістэмай Windows 7.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. У лікавых эксперыментах на прыкладзе дырэктарнай, кальцавой і рамачнай з кіраванай палярызацыяй антэн прааналізаваны іх электрадынамічныя характарыстыкі ў часовай вобласці. Прааналізаваны каэфіцыенты перадачы «прастора – ўваход фідара» дырэктарнай, кальцавой і рамачнай антэн. Ацэнены змены звышшырокапалосных радыесігналаў пры праходжанні праз драцяныя антэны. На прыкладзе драцяных антэн, аб'ектаў цыліндрычнай і канічнай формаў, крылатых ракет і знішчальніка (з улікам і без уліку воблака пасіўных дыпольных адбівальнікаў) прааналізаваны рассеяныя ад іх звышшырокапалосныя радыесігналы.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання. Атрыманыя вынікі могуць мець непасрэднае практычнае ўжыванне пры праектаванні і прагназаванні параметраў РЛС мятровага і сантымятровага дыяпазону даўжынь хваль. Распрацаваную матэматычную мадэль, якую рэалізуе пакет праграм CARO, мэтазгодна скарыстаць для праектавання антэнных прыстасаванняў для аналізу змены ЗШПРС пры праходжанні іх праз антэны і пры расейванні ад антэн і іншых радыелакацыйных аб'ектаў.

РЕЗЮМЕ

Сухачевский Павел Вячеславович

Электродинамические характеристики проволочных антенн и рассеивателей при их облучении сверхширокополосным сигналом

Ключевые слова: численное моделирование, тонкопроволочная модель, интегральное уравнение тока, антенны, радиолокационный объект, прохождение сверхширокополосного радиосигнала через антенну, рассеяние, метровый диапазон.

Цель работы: разработка численной модели прохождения сверхширокополосного сигнала через антенны в режиме приема и рассеяния сигнала антеннами и другими радиолокационными объектами, исследование закономерностей в этих процессах.

Методы исследования: численный эксперимент на программном обеспечении, в основе которого лежит разработанная численная модель.

Использованная аппаратура. Моделирование проводилось с помощью персонального компьютера с процессором i7-3930K, ОЗУ объемом 32 ГБ и операционной системой Windows 7.

Полученные результаты и их новизна. В численных экспериментах на примере директорной, кольцевой и рамочной с переключаемой поляризацией антенн проанализированы их электродинамические характеристики во временной области. Проанализированы коэффициенты передачи «пространство – вход фидера» директорной, кольцевой и рамочной антенн. Оценены изменения сверхширокополосных радиосигналов при прохождении через проволочные антенны. На примере проволочных антенн, объектов цилиндрической и конической форм, крылатых ракет и истребителя (с учетом и без учета облака пассивных дипольных отражателей) проанализированы рассеянные от них сверхширокополосные радиосигналы.

Рекомендации по использованию и область применения. Полученные результаты могут иметь непосредственное практическое применение при проектировании и прогнозировании параметров РЛС метрового и сантиметрового диапазонов длин волн. Разработанную математическую модель и реализующий ее пакет программ CARO целесообразно использовать для проектирования антенных устройств для анализа изменения СШПРС при прохождении их через антенны и при рассеянии от антенн и других радиолокационных объектов.

SUMMARY

Sukhacheuski Pavel Vyacheslavovich

Electrodynamic characteristics of wire antennas and diffusers when they are irradiated with an ultra-wideband signal

Keywords: numerical simulation, thin-wire model, integral current equation, antennas, radar object, passage of ultra wideband (UWB) radio signal through an antenna, scattering, VHF band.

Objective of the study: to develop a numerical model for passage of UWB signals through antennas in the receiving and scattering condition by antennas and other radar objects and to study the regular patterns in these processes.

Research methods: a numerical experiment on the software based on the developed numerical model.

Equipment used. The simulation was performed using a PC with i7-3930K processor, 32 GB RAM, Windows 7 operating system.

Results and their originality. The numerical experiments considered director-type, circular and loop antennas with controlled polarization and analyzed their time-domain electrodynamic characteristics. The "space-feeder input" transmission coefficients for director-type, circular and loop antennas were analyzed. Changes in the UWB radio signals in passage through wire antennas were estimated. Examples of wire antennas, objects of cylindrical and conical shapes, cruise missiles and a fighter (with and without passive dipole reflector clouds) were used to analyze the UWB radio signals scattered by them.

Recommendations for use and field of application. The obtained results can have direct practical application in designing and forecasting the parameters of VHF and SHF radars. The developed mathematical model and the CARO software which implements it are advisable to be used for designing antenna devices to analyze changes in UWB radio signals when they pass through antennas and when they are scattered by antennas and other radar objects.

Научное издание

Сухачевский Павел Вячеславович

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОЛОЧНЫХ
АНТЕНН И РАССЕИВАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМ СИГНАЛОМ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

Подписано в печать	Формат 60×84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.	Тираж экз.	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск