

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.396.67

ЕГОРОВ
Юрий Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ
ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПОКЛИНГТОНА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Минск 2020

Работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель **Гладейчук Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиотехники учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Официальные оппоненты: **Вилькоцкий Марат Антонович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий в образовании 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 «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Защита диссертации состоится 14 мая 2020 г. в 14.00 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, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан 13 апреля 2020 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.15.02
кандидат технических наук, доцент



Т. А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Проволочные антенны представляют собой отдельный класс антенн и широко применяются в различных областях радиотехники. Проектирование проволочных антенн предполагает решение задачи синтеза, заключающейся в отыскании геометрических параметров излучателя: длины, поперечных размеров, конфигурации проводников и их положения в пространстве.

В настоящее время благодаря развитию вычислительной техники наибольшее распространение получил параметрический синтез, что подтверждается быстрым развитием систем электромагнитного моделирования антенно-фидерных и СВЧ-устройств. Электродинамический расчет является основной частью процедуры параметрического синтеза и в основном определяет ее эффективность. В этой связи к математической модели антенны предъявляется ряд требований: высокая достоверность расчета характеристик и параметров, экономичность с точки зрения вычислительных затрат, универсальность по отношению к геометрии объекта.

Высокая достоверность результатов электродинамического расчета достигается применением строгих вычислительных методов. Так, в практике проектирования проволочных антенн хорошо себя зарекомендовал метод интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении. Математические модели на его основе поддаются реализации, достаточно универсальны и требуют относительно небольших вычислительных ресурсов. Основной недостаток указанного метода – неустойчивость вычислительных алгоритмов, что требует проверки полученных результатов на сходимость и достоверность. Таким образом, решение этой проблемы является одним из направлений развития метода интегральных уравнений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами

Содержание диссертационной работы соответствует пункту 3 приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166, «Промышленные и строительные технологии и производство: технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника», и

выполнялась в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» на инициативной основе.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является повышение эффективности электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии на основе интегрального уравнения Поклингтона.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор методов решения интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении.

2. Исследовать ядро интегрального уравнения Поклингтона для тонких криволинейных проводников.

3. Разработать и реализовать математическую модель для численного электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии.

4. Исследовать решение интегрального уравнения на устойчивость и достоверность для установления рациональной сегментации проводников и возможности сокращения размерности системы линейных алгебраических уравнений.

Объект исследования – проволочные антенны произвольной геометрии.

Предмет исследования – радиотехнические характеристики и параметры проволочных антенн.

Научная новизна

1. Установлены особенности ядра интегрального уравнения Поклингтона, заключающиеся в увеличении скорости изменения его действительной части вблизи точек излома проводников пропорционально углу излома и одинаково плавном изменении мнимой части на всех участках геометрии антенны. Учет указанных особенностей при решении интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова-Боголюбова позволяет использовать минимальное количество опорных точек численного интегрирования для расчета коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений в диапазоне допустимых длин сегментов с заданной погрешностью и минимизировать влияние ошибок интегрирования на решение системы линейных алгебраических уравнений.

2. Предложен критерий устойчивости решения интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова-Боголюбова по максимуму

зависимости усредненного в диапазоне частот числа обусловленности системы линейных алгебраических уравнений от значения длины сегментов, позволяющий снизить погрешность расчета основных радиотехнических параметров антенн (входного сопротивления, коэффициента направленного действия, параметров диаграммы направленности) в сравнении со случаем применения критерия устойчивости по составляющим входного сопротивления. Показано, что рациональное значение длины сегментов составляет 1,3–1,4 его радиуса. Установлено, что использование указанного критерия для решения тестовых задач приводит к снижению погрешности расчета входного сопротивления антенн в 4 раза по активной и в 7 раз по реактивной составляющей.

3. Установлена зависимость значения максимально допустимой длины сегментов пассивного проводника от его длины и радиуса. Полученное аналитическое выражение позволяет априорно определять необходимую сегментацию пассивных проводников антенны, обеспечивая при этом заданную точность решения при сокращении времени моделирования за счет уменьшения размерности системы линейных алгебраических уравнений и отсутствия необходимости проверки решения на устойчивость.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии на основе интегрального уравнения Поклингтона и метода Крылова–Боголюбова, отличающаяся применением критерия устойчивости решения по максимуму зависимости усредненного в диапазоне частот числа обусловленности системы линейных алгебраических уравнений от длины сегментов проводников, учитывающая особенности ядра интегрального уравнения (увеличение скорости изменения его действительной части вблизи точек излома проводников пропорционально углу излома и одинаково плавное изменение мнимой части на всех участках геометрии антенны) и обеспечивающая снижение погрешности расчета основных радиотехнических параметров проволочных антенн в 3 и более раз по сравнению с методикой, применяющей критерий устойчивости по составляющим входного сопротивления.

2. Результаты численного электродинамического расчета многоэлементных проволочных антенн и регрессионная зависимость рациональной длины сегментов пассивных проводников антенны от отношения их длины к радиусу, обеспечивающая возможность выбора единственного варианта сегментации пассивных проводников независимо от

сегментации активного проводника и проведения проверки решения на устойчивость, что позволяет сократить размерность части системы линейных алгебраических уравнений, соответствующей пассивным проводникам антенны, в 3,8–5,3 раза.

Личный вклад соискателя ученой степени

Результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно и включают: разработку и реализацию математической модели для численного электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии; исследование устойчивости и достоверности решения интегрального уравнения на основе тестовых задач; установление критерия устойчивости решения и рациональной сегментации проводников антенны.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом В. В. Гладейчуком.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались на: 45-й и 46-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (Минск, 2009, 2010 гг.); 10-й и 11-й военно-научной конференции учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» (Минск, 2009, 2011 гг.); Республиканском научно-техническом семинаре учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» «Актуальные вопросы современной теории и техники антенн» (Минск, 2011 г.); 8-й и 9-й Международной научно-практической конференции авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (Минск, 2018, 2019 гг.); Международной военно-научной конференции учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» «Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях» (Минск, 2019 г.).

Опубликование результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, среди которых 5 статей в рецензируемых научных журналах, 2 в сборниках материалов научно-технических конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 2,4 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части из четырех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Полный объем работы составляет 132 страницы, из них 83 страницы основного текста, 44 рисунка на 34 страницах, 4 таблицы на 2 страницах, список используемых литературных источников из 93 наименований на 7 страницах, список публикаций автора из 7 наименований на 1 странице, 3 приложения на 5 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обосновывается актуальность научных исследований в области методов электродинамического расчета проволочных антенн и сформулированы задачи исследования.

В **первой главе** проведен анализ существующих методов расчета проволочных антенн. В результате предпочтение отдано интегральному уравнению (ИУ) Поклингтона для тонкого проводника произвольной геометрии:

$$\int_L I(s')K(s,s')ds' = i \frac{k}{\rho_0} \vec{E}_\tau(s), \quad (1)$$

$$K(s,s') = \frac{\partial^2 G(s,s')}{\partial s \partial s'} - k^2 G(s,s') \vec{s}_0 \vec{s}'_0, \quad (2)$$

где L – длина проводника; $I(s')$ – искомая функция тока; $K(s,s')$ – ядро ИУ; s, s' – криволинейные координаты точек наблюдения и истока на оси проводника; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\rho_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$ – волновое сопротивление свободного пространства; $\vec{E}_\tau(s)$ – касательная составляющая первичного электрического поля; $G(s,s') = e^{-ikr}/4\pi r$ – функция Грина

свободного пространства; $r = \sqrt{(\vec{s} - \vec{s}')^2 + r_0^2}$ – расстояние между точками наблюдения и истока; \vec{s} , \vec{s}' – радиус-векторы точек наблюдения и истока; r_0 – радиус проводника; \vec{s}_0 , \vec{s}'_0 – единичные векторы, касательные к проводнику.

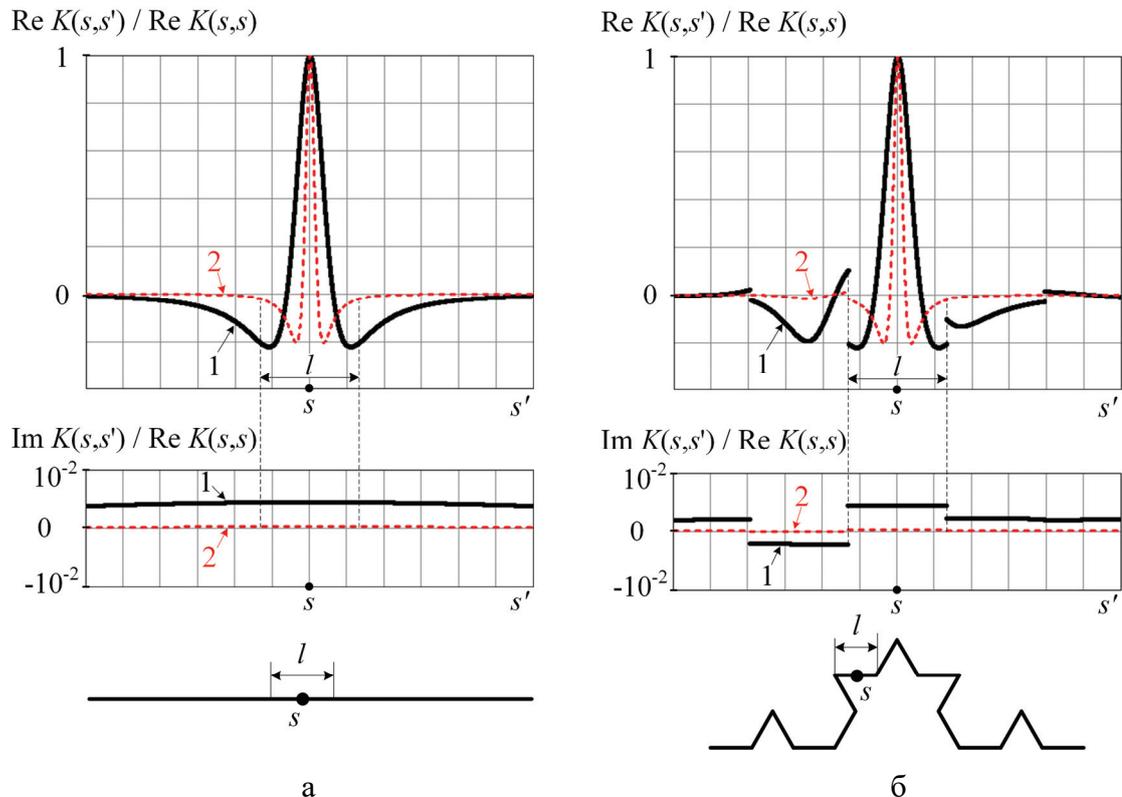
Во **второй** главе представлено решение ИУ Поклингтона методом Крылова–Боголюбова, позволяющим перейти к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), определяемых в виде:

$$\sum_{n=1}^N I_n K_{mn} = i \frac{k}{\rho_0} E_\tau(s_m), \quad (3)$$

$$K_{mn} = \int_{\Delta L_n} K(s_m, s') ds', \quad (4)$$

где I_n – коэффициенты разложения тока в ряд по кусочно-постоянным функциям; K_{mn} – коэффициенты СЛАУ; N – количество сегментов; s_m – координата центра сегмента с номером $m \in [1, N]$; ΔL – длина сегментов.

Проведено исследование ядра (2) для участков проводников различной конфигурации: прямолинейной и с изломами (рисунок 1).



а – прямолинейный проводник; **б** – кривая Коха

$$1 - l = 0,1\lambda = 3r_0, \quad 2 - l = 0,1\lambda = 8r_0$$

Рисунок 1. – Сечение рельефа ядра ИУ для проводников различной конфигурации

В результате установлены особенности, заключающиеся в увеличении скорости изменения действительной части ядра вблизи точек излома проводников пропорционально углу излома и в одинаково плавном изменении его мнимой части на всех участках геометрии антенны.

С учетом указанных особенностей разработаны рекомендации по построению алгоритмов численного интегрирования на основе квадратурных формул с минимально необходимым числом опорных точек, допускающие произвольные геометрические соотношения в конструкциях криволинейных проводников с учетом тонкопроволочного приближения и обеспечивающие расчет коэффициентов СЛАУ (4) с относительной погрешностью не хуже 10^{-8} в диапазоне допустимых длин сегментов. Это позволяет минимизировать влияние погрешности численного интегрирования на решение СЛАУ при использовании восьмиразрядных чисел с плавающей точкой.

Установлено, что интеграл в выражении (4) для диагональных элементов определяется по 32 узловым точкам, а при длине сегмента $\Delta L > 3,5r_0$ его следует дополнительно разбить на два одинаковых участка. При значениях $\Delta L > 10r_0$ необходимое число узловых точек или дополнительных участков разбиения возрастает (функция ядра резко осциллирует в центре интервала интегрирования), поэтому использование алгоритма с заранее выбранным числом узлов в этом случае нецелесообразно.

Для элементов, лежащих в окрестности точки истока s на удалении $R_1 \leq 0,5\Delta L_n$, интеграл вычисляется по 32 точкам; $R_2 \leq \Delta L_n$ – по 16 точкам; $R_3 \leq 2\Delta L_n$ – по 6 точкам; $R_4 \leq 3,5\Delta L_n$ – по 4 точкам; $R_5 \leq 5\Delta L_n$ – по 3 точкам; $R_6 > 5\Delta L_n$ – по 2 точкам. При этом под удалением R понимается расстояние между точкой истока и серединой интервала интегрирования ΔL_n .

При расчете мнимой части коэффициентов СЛАУ на всех интервалах, удовлетворяющих условию $\Delta L < 0,1\lambda$, вычисление интеграла с указанной погрешностью достаточно выполнять по двум точкам, а при $\Delta L < 0,02\lambda$ – по одной. Таким образом, в случае прямолинейного проводника, разбитого как минимум на 11 сегментов, интегрирование по двум точкам позволяет сократить количество слагаемых в квадратурной формуле. При этом их общая сумма, необходимая для расчета элементов одной строки матрицы СЛАУ, уменьшается на число, составляющее от 52 до 74 в зависимости от положения интервала интегрирования. В случаях криволинейных проводников с изломами или вычисления интеграла по одной точке сокращение количества необходимых математических операций проявляется в еще большей степени.

Третья глава посвящена изучению устойчивости и достоверности решения ИУ Поклингтона методом Крылова–Боголюбова. С этой целью выполнено решение тестовых задач для линейных симметричных вибраторов

(рисунок 2) из проводников разного радиуса при различных значениях длины сегментов. Данные для сравнительного анализа взяты из справочника «Таблицы входных сопротивлений вибраторных антенн», изданного под редакцией Л. Д. Бахраха (2005 г.). Дополнительная верификация выполнена с помощью программы моделирования проволочных антенн MMANA.

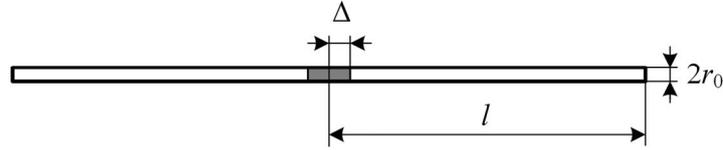


Рисунок 2. – Линейная симметричная вибраторная антенна

В рамках исследования рассмотрены три вибратора разной толщины: $l/r_0 = 40; 70; 100$. Расчеты их входного сопротивления проведены в диапазоне $l = (0,01...0,55)\lambda$. Сегментация проводников реализована равномерно при различных значениях длины сегментов $\Delta L \approx (1...4)r_0$. Первичное поле в зазоре возбуждения 2Δ задано моделью δ -генератора. В результате для каждого вибратора получено семейство характеристик *входного сопротивления* $Z_{\text{вх.р}}(l/\lambda, \Delta L/r_0) = R_{\text{вх.р}} + iX_{\text{вх.р}}$ и *числа обусловленности СЛАУ* $\mu(l/\lambda, \Delta L/r_0)$.

Оценка степени соответствия расчетных и тестовых характеристик выполнена путем вычисления средней относительной погрешности определения активной и реактивной составляющих входного сопротивления в диапазоне $l = (0,01...0,55)\lambda$ по 55 доступным тестовым отсчетам:

$$\overline{\Delta R}_{\text{вх}}(\Delta L/r_0) = \frac{1}{55} \sum_{l/\lambda=0,01}^{0,55} \left| 1 - \frac{R_{\text{вх.р}}(l/\lambda, \Delta L/r_0)}{R_{\text{вх.т}}(l/\lambda, \Delta L/r_0)} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

$$\overline{\Delta X}_{\text{вх}}(\Delta L/r_0) = \frac{1}{55} \sum_{l/\lambda=0,01}^{0,55} \left| 1 - \frac{X_{\text{вх.р}}(l/\lambda, \Delta L/r_0)}{X_{\text{вх.т}}(l/\lambda, \Delta L/r_0)} \right| \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $R_{\text{вх.р}}, X_{\text{вх.р}}$ – расчетные значения; $R_{\text{вх.т}}, X_{\text{вх.т}}$ – тестовые значения.

Для оценки устойчивости решения по числу обусловленности СЛАУ вычислены средние в диапазоне частот нормированные значения этого параметра при тех же условиях, что и в (5), (6):

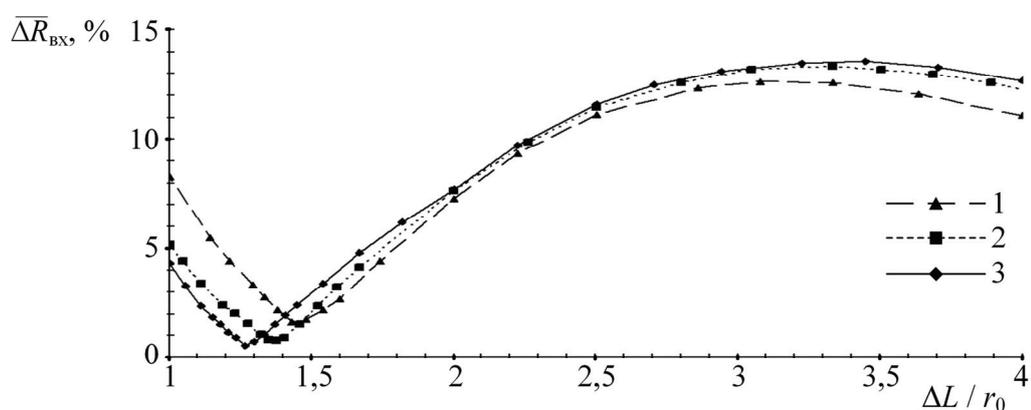
$$\overline{\mu}(\Delta L/r_0) = \frac{1}{55} \sum_{l/\lambda=0,01}^{0,55} \frac{\mu(l/\lambda, \Delta L/r_0)}{\mu_{\text{max}}}, \quad (7)$$

где μ_{max} – максимальное значение ряда $\mu(l/\lambda, \Delta L/r_0)$ при $l/\lambda = \text{const}$.

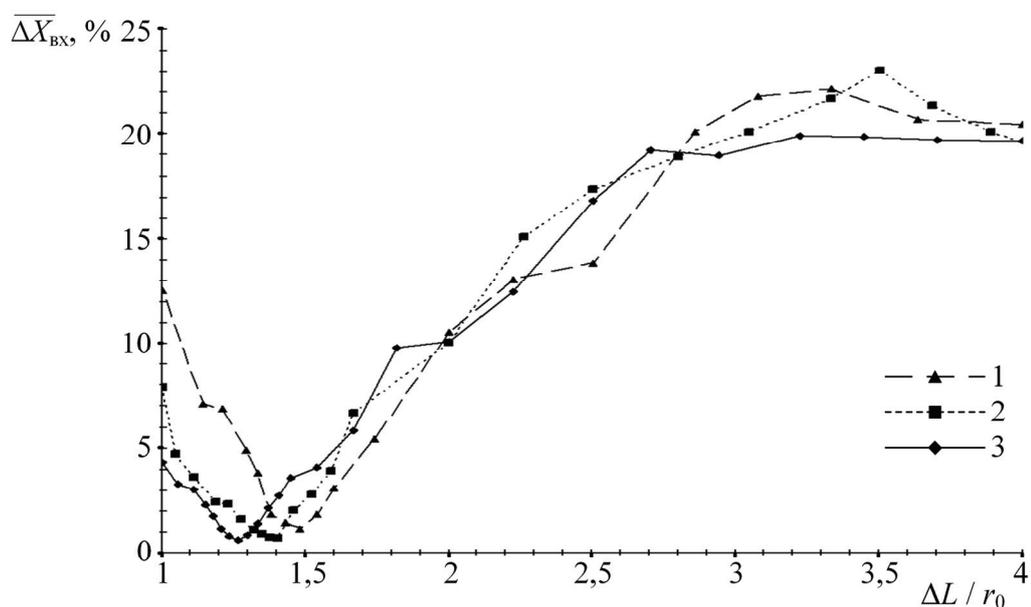
Графики полученных характеристик (5)–(7) представлены на рисунках 3, 4 и показывают следующее:

1. На интервале $\Delta L \approx (2,5 \dots 4)r_0$ имеет место сходимость решения по входному сопротивлению (рисунок 3), но значение средней погрешности его расчета достаточно велико и составляет примерно 13% по $R_{\text{вх}}$ и 21% по $X_{\text{вх}}$.

2. Для вибраторов разной толщины кривые $\bar{\mu}(\Delta L/r_0)$ идентичны друг другу и плавно сходятся к экстремумам, сосредоточенным на узком интервале $\Delta L \approx (1,3 \dots 1,4)r_0$ (рисунок 4). При этом находящиеся на данном интервале значения средних относительных погрешностей $\overline{\Delta R}_{\text{вх}}(\Delta L/r_0)$ и $\overline{\Delta X}_{\text{вх}}(\Delta L/r_0)$ близки к минимальным и составляют примерно 1–3% (рисунок 3).



а



б

а – по активной составляющей; б – по реактивной составляющей

1 – $l = 40r_0$; 2 – $l = 70r_0$; 3 – $l = 100r_0$

Рисунок 3. – Средняя относительная погрешность входного сопротивления

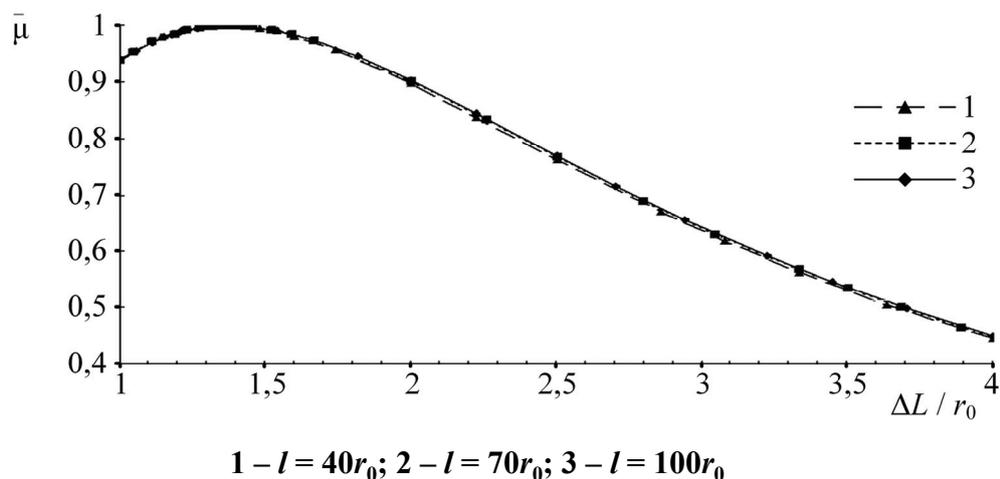


Рисунок 4. – Среднее нормированное число обусловленности СЛАУ

В результате установлен критерий устойчивости решения по максимуму зависимости усредненного в диапазоне частот нормированного числа обусловленности СЛАУ от длины сегментов проводников. Критерий определяет рациональное значение длины сегментов $\Delta L \approx (1,3 \dots 1,4)r_0$ и позволяет снизить погрешность расчетов примерно в 4 раза по $R_{вх}$ и в 7 раз по $X_{вх}$ в сравнении со случаем использования критерия устойчивости по составляющим входного сопротивления.

Применение предложенного критерия устойчивости решения ИУ Поклингтона методом Крылова–Боголюбова и учет установленных особенностей ядра ИУ в алгоритмах вычисления коэффициентов СЛАУ представляют новую методику электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии, обеспечивающую высокую достоверность результатов моделирования в широком диапазоне частот при использовании фиксированных параметров сегментации.

Результаты рассмотренных тестовых задач доказывают высокую сопоставимость метода Крылова–Боголюбова с численно-аналитическим методом Эминова по качеству решения ИУ Поклингтона. Однако, по сложности реализации и потенциальной универсальности к геометрии антенны разработанная методика обладает весомым преимуществом.

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования проволочных антенн различных конструкций.

Для установления рациональной сегментации проводников и возможности сокращения размерности системы линейных алгебраических уравнений проведено исследование математической модели двухэлементного проволочного излучателя (рисунок 5).

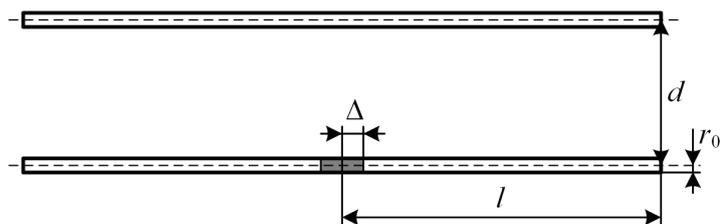


Рисунок 5. – Двухэлементный проволочный излучатель

Решение внутренней задачи выполнено в частотном диапазоне с десятикратным перекрытием ($l = (0,1...1)\lambda$) при различных значениях радиуса провода ($l = (50...500)r_0$). Устойчивость решения проверена оценкой его сходимости по входному сопротивлению и числу обусловленности СЛАУ в зависимости от длины сегментов ΔL .

В результате установлено, что среднее в диапазоне частот нормированное число обусловленности СЛАУ при любых соотношениях $2l/r_0$ сходится на интервале $\Delta L \approx (1,3...1,4)r_0$. Сходимость же по составляющим входного сопротивления в основном сохраняется на интервале $\Delta L \approx (3...5)r_0$, в пределах которого их значения имеют существенные отличия от тех, что наблюдаются на участке сходимости по числу обусловленности СЛАУ. Полученные данные полностью соответствуют результатам моделирования симметричного вибратора и являются свидетельством универсальности предложенного критерия устойчивости по отношению к геометрии проволочной антенны.

В связи с тем, что использование сегментов малой длины приводит к СЛАУ большой размерности, исследованы возможные варианты сокращения их количества при условии сохранения высокой достоверности решения ИУ. В результате установлено, что это возможно при использовании сегментов увеличенной длины на пассивном проводнике антенны и неизменной сегментации ее активного элемента.

Количественная оценка соответствия своим исходным значениям параметров модели с увеличенной длиной сегментов на пассивном проводнике выполнена путем вычисления средней в диапазоне частот относительной погрешности решения по числу обусловленности СЛАУ и составляющим входного сопротивления:

$$\overline{\Delta\mu}(\Delta L') = \frac{1}{n_\lambda} \sum_{l/\lambda} \left| 1 - \frac{\mu(l/\lambda, \Delta L'/r_0)}{\mu(l/\lambda, \Delta L_\mu/r_0)} \right| \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$\overline{\Delta R}_{\text{BX}}(\Delta L') = \frac{1}{n_\lambda} \sum_{l/\lambda} \left| 1 - \frac{R_{\text{BX}}(l/\lambda, \Delta L'/r_0)}{R_{\text{BX}}(l/\lambda, \Delta L_\mu/r_0)} \right| \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$\overline{\Delta X}_{\text{BX}}(\Delta L') = \frac{1}{n_\lambda} \sum_{l/\lambda} \left| 1 - \frac{X_{\text{BX}}(l/\lambda, \Delta L'/r_0)}{X_{\text{BX}}(l/\lambda, \Delta L_\mu/r_0)} \right| \cdot 100\%, \quad (10)$$

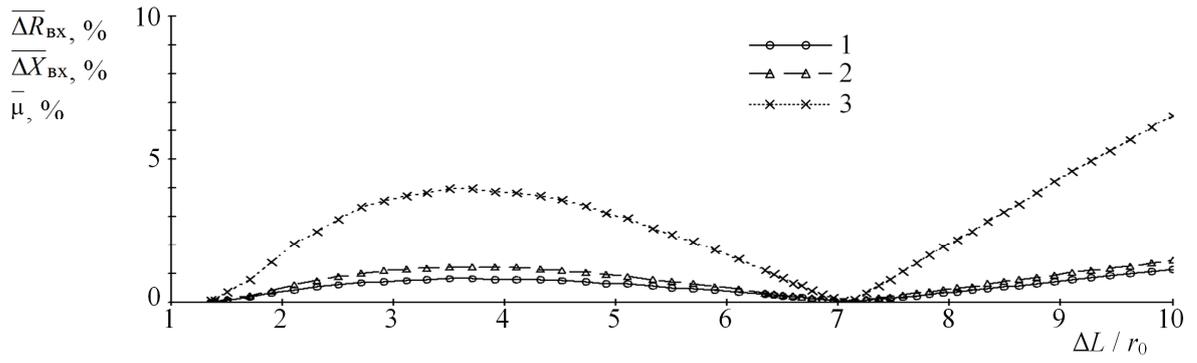
где n_λ – количество отсчетов по l/λ ; $\Delta L' > \Delta L_\mu$ – длина сегментов на пассивном проводнике; $\Delta L_\mu = (1,3 \dots 1,4)r_0$ – исходная длина всех сегментов на усредненном интервале сходимости числа обусловленности СЛАУ.

Результаты расчета в виде графиков представлены на рисунке 6 и показывают, что с увеличением $\Delta L'$ все оцениваемые параметры сначала расходятся, а затем синхронно возвращаются к исходным значениям с высокой степенью соответствия. Длина сегментов пассивного проводника, при которой наблюдается данный эффект, очевидно, является рациональной, а ее значение $\Delta L'_{\text{rat}}$ зависит от отношения l/r_0 . С увеличением $\Delta L'$ свыше $\Delta L'_{\text{rat}}$ средние погрешности снова возрастают.

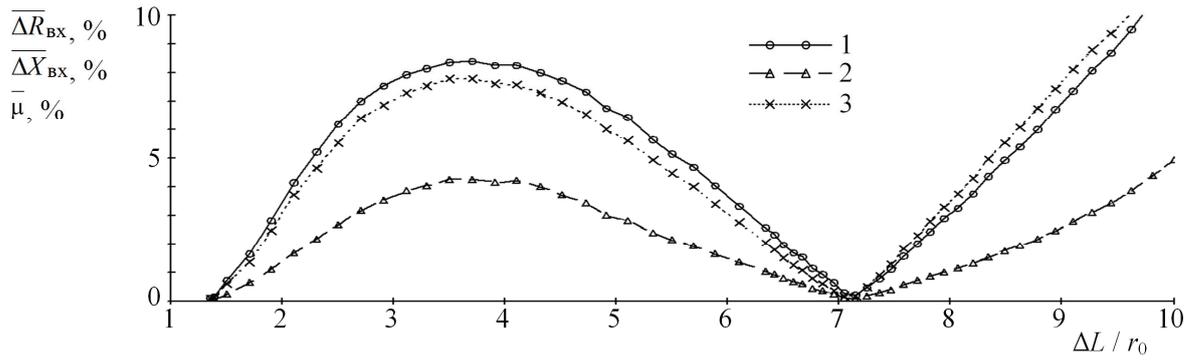
Показано, что степень расходимости результатов решения при изменении $\Delta L'$ зависит не только от толщины вибраторов, но и от расстояния d между ними. Так, при сокращении расстояния погрешности (8)–(10) в целом возрастают, но их значения в окрестности точки $\Delta L' = \Delta L'_{\text{rat}}$ остаются достаточно низкими, составляя единицы процентов и менее. Ухудшение качества решения при использовании коротких проводников (рисунок 6, г) обусловлено объективной невозможностью обеспечить строгое соблюдение требуемой длины сегментов.

Установлено, что величина $\Delta L'_{\text{rat}}$ зависит только от соотношения между длиной и радиусом пассивного проводника. Это обстоятельство дает возможность определить функциональную зависимость между указанными параметрами для априорного выявления рациональной сегментации антенны, обеспечивая тем самым сокращение времени моделирования.

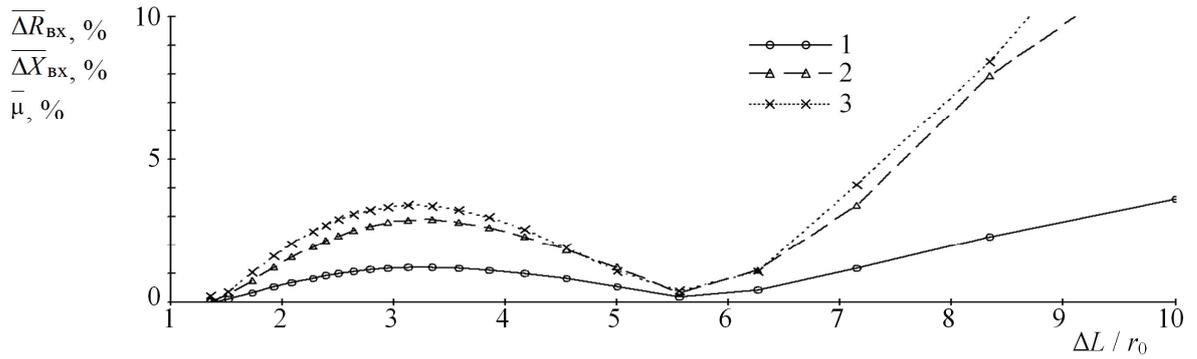
Вычисление искомых длин сегментов выполнено по критерию наименьшей погрешности решения, оцениваемой в соответствии с выражениями (8)–(10). Полученные результаты графически представлены на рисунке 7 в виде дискретных отсчетов $\Delta L'_{\text{rat}}$. Отмечается плавное увеличение рациональной длины сегментов на интервале $2l = L = (50 \dots 1500)r_0$, после которого (при $L > 1500r_0$) величина $\Delta L'_{\text{rat}}$ практически не изменяется по отношению к радиусу провода и примерно составляет $7,323r_0$.



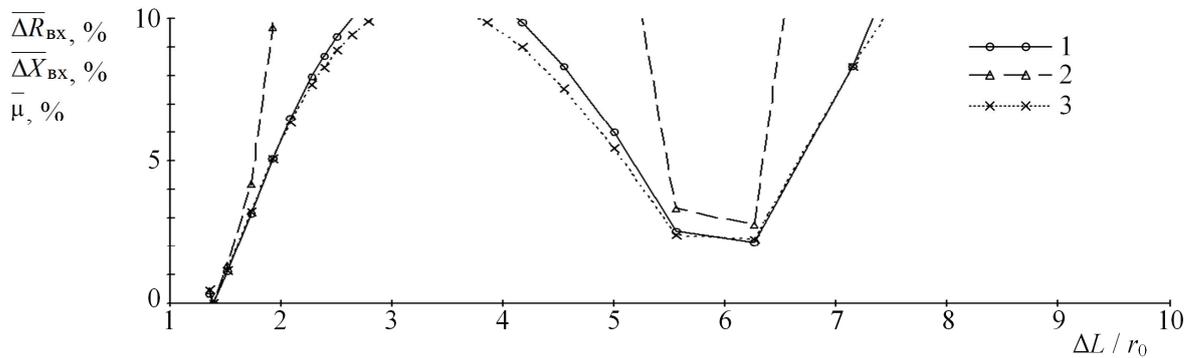
a



б



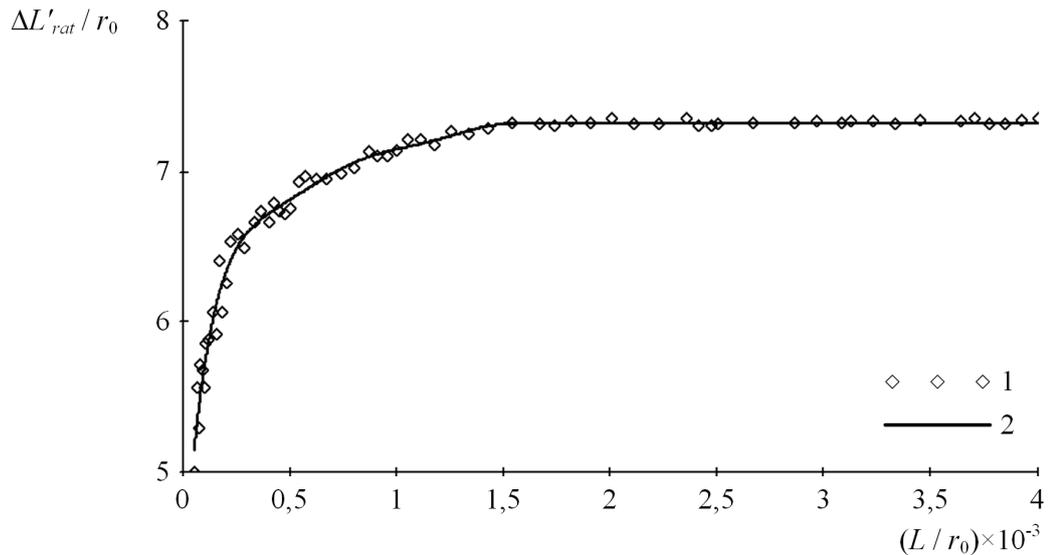
в



г

a – $d = l = 500r_0$; **б** – $d = 0,25l = 125r_0$; **в** – $d = l = 50r_0$; **г** – $d = 0,25l = 12,5r_0$
1 – $\overline{\Delta R_{BX}}$; **2** – $\overline{\Delta X_{BX}}$; **3** – $\overline{\mu}$

Рисунок 6. – Средние относительные погрешности параметров



1 – дискретные значения; 2 – регрессия

Рисунок 7. – Рациональная длина сегментов пассивного проводника

Регрессия дискретных значений $\Delta L'_{rat}$ выполнена на интервале их изменения $L = (50 \dots 1500)r_0$ с помощью полинома 7-й степени:

$$\frac{\Delta L'_{rat}}{r_0} \left(\frac{L}{r_0} \right) = \sum_{i=0}^7 C_i \cdot \left(\frac{L}{r_0} 10^{-3} \right)^i, \quad (11)$$

где $C_0 = 4,30326$; $C_1 = 20,31864$; $C_2 = -75,29788$; $C_3 = 154,77048$;
 $C_4 = -180,88785$; $C_5 = 119,77222$; $C_6 = -41,79013$; $C_7 = 5,96072$.

Показано, что применение предложенной рациональной сегментации пассивного проводника антенны позволяет сократить количество его сегментов примерно в 3,8 раза при $L = 50r_0$ и в 5,3 раза при $L = 1500r_0$ в сравнении со случаем использования сегментов длиной $\Delta L \approx (1,3 \dots 1,4)r_0$.

С целью верификации разработанной методики электродинамического расчета проволочных антенн и установленных закономерностей для определения их рациональной сегментации проведено решение тестовых задач для двухэлементного направленного излучателя 30-метрового диапазона и семиэлементной директорной антенны DL6WU диапазона 144–146 МГц (конструкции описаны в книге К. Ротхаммеля «Антенны», 2007 г.). Полученные результаты показывают, что предложенный критерий устойчивости решения по максимуму зависимости усредненного в диапазоне частот нормированного числа обусловленности СЛАУ от длины сегментов проводников универсален по отношению к геометрии излучателя, обеспечивает высокую достоверность полученных результатов и более чем

в 3 раза снижает погрешность расчета основных параметров антенн (входного сопротивления, коэффициента направленного действия (КНД), параметров диаграммы направленности) в сравнении со случаем использования критерия устойчивости по составляющим входного сопротивления. Кроме этого, применение выражения (11) позволяет выбрать единственный вариант сегментации пассивных проводников указанных антенн независимо от сегментации активного проводника и проведения проверки решения на устойчивость, что позволяет сократить размерность части СЛАУ, соответствующей пассивным проводникам, примерно в 5 раз.

На основе полученных научных результатов диссертации решена задача параметрического синтеза плоской двухзаходной спиральной антенны, предназначенной для работы в диапазоне частот 1–18 ГГц. Проведенные численное моделирование и экспериментальное исследование подтверждают превосходство разработанной методики в точности электродинамического расчета над методикой, использующей критерий устойчивости по составляющим входного сопротивления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведено исследование устойчивости и достоверности решения ИУ Поклингтона методом Крылова–Боголюбова по входному сопротивлению и числу обусловленности СЛАУ на основе тестовых задач для проволочных антенн различных конструкций. В результате установлен новый критерий устойчивости по максимуму зависимости усредненного в диапазоне частот нормированного числа обусловленности СЛАУ от длины сегментов проводников. Показано, что указанный критерий универсален по отношению к геометрии проволочной антенны, определяет рациональное значение длины сегментов, составляющее 1,3–1,4 радиуса проводника, и позволяет в 3 и более раз снизить погрешность расчета основных параметров проволочных антенн (входного сопротивления, КНД, параметров диаграммы направленности) в сравнении со случаем использования критерия устойчивости решения по составляющим входного сопротивления [2–7].

2. Доказана возможность сокращения числа сегментов пассивных проводников многоэлементных проволочных антенн при решении ИУ Поклингтона методом Крылова–Боголюбова с использованием критерия устойчивости по максимуму зависимости усредненного в диапазоне частот числа обусловленности СЛАУ от длины сегментов, обеспечивая при этом заданную точность решения [4, 5].

3. Установлена зависимость между максимально допустимой длиной сегментов пассивного проводника и его геометрическими параметрами (длиной и радиусом). Полученное аналитическое выражение обеспечивает возможность выбора единственного варианта сегментации пассивных проводников независимо от сегментации активного проводника и проведения проверки решения на устойчивость, что позволяет сократить размерность части СЛАУ, соответствующей пассивным проводникам антенны, в 3,8–5,3 раза [5].

4. Исследовано ядро ИУ Поклингтона для тонких проводников различной конфигурации. В результате установлены особенности, заключающиеся в увеличении скорости изменения действительной части ядра вблизи точек излома проводников пропорционально углу излома и одинаково плавном изменении его мнимой части на всех участках геометрии антенны. С учетом указанных особенностей разработаны рекомендации по построению алгоритмов численного интегрирования на основе квадратурных формул с минимально необходимым числом опорных точек, допускающие произвольные геометрические соотношения в конструкциях криволинейных проводников с учетом тонкопроволочного приближения и обеспечивающие расчет коэффициентов СЛАУ с заданной погрешностью в диапазоне допустимых длин сегментов, что позволяет минимизировать влияние погрешности численного интегрирования на решение СЛАУ [1].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная методика и реализующая ее компьютерная программа EDAWA могут использоваться для проектирования и электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии, а также в составе перспективных систем автоматизированного проектирования проволочных антенн. Компьютерная программа EDAWA зарегистрирована в Национальном центре интеллектуальной собственности, что подтверждается соответствующим свидетельством.

В Центре 1.9 «Научно-образовательный инновационный центр СВЧ технологий и их метрологического обеспечения» (БГУИР) с использованием компьютерной программы EDAWA решена задача параметрического синтеза плоской двухзаходной спиральной антенны для работы в диапазоне частот 1–18 ГГц с целью построения пассивной широкополосной антенной системы для обнаружения и пеленгации источников радиоизлучений, что подтверждается актом о практическом использовании результатов исследований.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Егоров, Ю. Н. Математическая модель проволочных фрактальных антенн произвольной геометрии / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Электроника ИНФО. – 2015. – № 6 (120). – С. 51–55.

2. Егоров, Ю. Н. Оценка устойчивости численного решения интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова-Боголюбова / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 2 (51). – С. 55–61.

3. Егоров, Ю. Н. Методика численного решения задачи токораспределения для проволочных антенн методом интегральных уравнений / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Доклады БГУИР. – 2017. – № 4 (106). – С. 56–61.

4. Егоров, Ю. Н. Методика численного электродинамического анализа двухэлементного проволочного излучателя / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Доклады БГУИР. – 2018. – № 4 (114). – С. 71–78.

5. Егоров, Ю. Н. Электродинамический анализ директорной антенны методом интегральных уравнений с сокращением числа сегментов разбиения пассивных проводников / Ю. Н. Егоров // Доклады БГУИР. – 2019. – № 5 (123). – С. 94–100.

Тезисы докладов

6. Егоров, Ю. Н. Оценка устойчивости численного решения задачи токораспределения для проволочных антенн / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации: сб. тез. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. авиац. фак. учреждения образования «Воен. акад. Респ. Беларусь», Минск, 23–24 мая 2018 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – С. 264–265.

7. Егоров, Ю. Н. Моделирование плоской двухзаходной спиральной антенны для работы в составе радиоэлектронных систем специального назначения / Ю. Н. Егоров, В. В. Гладейчук // Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях: тез. докл. Междунар. воен.-научн. конф. учреждения образования «Воен. акад. Респ. Беларусь», Минск, 17–18 апр. 2019 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – С. 276.

РЭЗІЮМЭ

Ягораў Юрий Мікалаевіч

Мадэляванне драцяных антэн адвольнай геаметрыі на аснове інтэгральнага раўнання Паклінгтона

Ключавыя словы: драцяныя антэны, інтэгральнае раўнаньне Паклінгтона, лікавыя метады.

Мэта працы: павышэнне эфектыўнасці электрадынамічнага разліку драцяных антэн адвольнай геаметрыі на аснове інтэгральнага раўнання Паклінгтона.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: колькаснае мадэляванне метадам момантаў, эксперымент, вектарны аналізатар ланцугоў Anritsu MS 4644B.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны крытэрыі устойлівасці рашэння інтэгральнага раўнання Паклінгтона метадам Крылова–Багалюбава, які забяспечвае зніжэнне хібнасці электрадынамічнага разліку драцяных антэн адвольнай геаметрыі. Атрыман аналітычны выраз, які дазваляе апрыёрна вызначаць неабходную сегментацыю пасіўных правадыроў антэны, забяспечваючы пры гэтым зададзеную дакладнасць рашэння з скарачэннем часу мадэлявання за кошт памяншэння памернасці сістэмы лінейных алгебраічных раўнанняў і адсутнасці неабходнасці праверкі рашэння на ўстойлівасць. Устаноўлены асаблівасці ядра інтэгральнага раўнання Паклінгтона, улік якіх дазваляе выкарыстоўваць мінімальную колькасць апорных кропак колькаснага інтэгравання для разліку каэфіцыентаў сістэмы лінейных алгебраічных раўнанняў з зададзенай хібнасцю.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваная методдыка і кампутарная праграма, якая яе рэалізуе, могуць выкарыстоўвацца для электрадынамічнага разліку драцяных антэн адвольнай геаметрыі, а таксама ў складзе перспектыўных сістэм аўтаматызаванага праектавання.

Вобласць прымянення: праектаванне і аптымізацыя драцяных антэнных сістэм.

РЕЗЮМЕ

Егоров Юрий Николаевич

Моделирование проволочных антенн произвольной геометрии на основе интегрального уравнения Поклингтона

Ключевые слова: проволочные антенны, интегральное уравнение Поклингтона, численные методы.

Цель работы: повышение эффективности электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии на основе интегрального уравнения Поклингтона.

Методы исследования и использованная аппаратура: численное моделирование методом моментов, эксперимент, векторный анализатор цепей Anritsu MS 4644B.

Полученные результаты и их новизна: предложен критерий устойчивости решения интегрального уравнения Поклингтона методом Крылова-Боголюбова, обеспечивающий снижение погрешности электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии. Получено аналитическое выражение, позволяющее априорно определять необходимую сегментацию пассивных проводников антенны, обеспечивая при этом заданную точность решения с сокращением времени моделирования за счет уменьшения размерности системы линейных алгебраических уравнений и отсутствия необходимости проверки решения на устойчивость. Установлены особенности ядра интегрального уравнения Поклингтона, учет которых позволяет использовать минимальное количество опорных точек численного интегрирования для расчета коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений с заданной погрешностью.

Рекомендации по использованию: разработанная методика и реализующая ее компьютерная программа могут использоваться для электродинамического расчета проволочных антенн произвольной геометрии, а также в составе перспективных систем автоматизированного проектирования.

Область применения: проектирование и оптимизация проволочных антенных систем.

SUMMARY

Egorov Yury Nikolaevich

**Modeling wire antennas of arbitrary geometry
based on Pocklington's integral equation**

Keywords: wire antennas, Pocklington's integral equation, numerical methods.

Objective: increasing the efficiency of the electrodynamic calculation of arbitrary geometry wire antennas based on the Pocklington integral equation.

Research methods and equipment used: numerical simulation by the method of moments, experiment, vector network analyzer Anritsu MS 4644B.

Results and their novelty: for the solution for Pocklington's integral equation by the Krylov–Bogolyubov method a stability criterion is proposed, which reduces the error in the electrodynamic calculation of wire antennas with an arbitrary geometry. The analytical expression is obtained that allows a priori determination of the necessary segmentation of passive antenna conductors, while ensuring the given accuracy of the solution with reduced simulation time by reducing the dimensionality of the system of linear algebraic equations and eliminating the need to verify the stability of the solution. The features of the kernel of Pocklington's integral equation, the accounting of which enables the use of the minimum number of numerical integration reference points for calculate the coefficients of the system of linear algebraic equations with a given error, are established.

Usage recommendations: the developed methodology and the computer program that implements it can be used for the electrodynamic calculation of wire antennas of arbitrary geometry, as well as part of promising computer-aided design systems.

Applications area: design and optimization of wire antenna systems.

Егоров Юрий Николаевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВОЛОЧНЫХ АНТЕНН
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ
ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПОКЛИНГТОНА**

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.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6