

На правах рукописи

Бузова Мария Александровна

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Самара – 2013

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Концерн «Автоматика» и Федеральном государственном унитарном предприятии Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт радио.

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор

Букашкин Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты:

Давидович Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов, профессор кафедры радиотехники и электродинамики.

Казанский Николай Львович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт систем обработки изображений Российской академии наук, г. Самара, заместитель директора по научной работе.

Крутов Александр Фёдорович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет», г. Самара, проректор по научной работе.

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», г. Казань.

Защита диссертации состоится 15 мая 2013 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.218.08 при ФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет» по адресу: 443011, г. Самара, ул. акад. Павлова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СамГУ.

Автореферат разослан " " апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.218.08

Зайцев В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Методы, алгоритмы и программные средства математического моделирования являются существенной неотъемлемой частью современных технологий решения широкого класса научных и технических проблем фундаментального и прикладного характера, включая исследование естественнонаучных, технических и иных объектов.

Современные технические объекты, применительно к которым приходится решать задачи моделирования электродинамических систем, достаточно часто характеризуются компактным размещением излучающих, переизлучающих и сторонних тел существенно различных конфигураций и геометрических размеров. В этих условиях характеристики каждого излучающего элемента существенно зависят от других элементов, а также от окружающих рассеивателей, поэтому их совокупность должна рассматриваться и моделироваться как единая *сложная электродинамическая система*.

Постоянно возрастающие требования к качеству, достоверности и точности результатов прикладных исследований и технических решений предполагают максимально полный и точный учет геометрических и электрофизических характеристик всех составных частей соответствующей сложной электродинамической системы. Это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к адекватности электродинамических моделей и точности расчетных методов, а также к их ресурсоемкости и эффективности.

Современные методы и программные средства математического моделирования электродинамических систем представлены, в основном, набором объектно-ориентированных частных методов, каждый из которых эффективен для определенного ограниченного класса излучающих объектов. Однако, для получения высокой точности и одновременно – высокой эффективности расчетов, к различным элементам анализируемой электродинамической системы должны применяться, вообще говоря, различные математические модели и соответственно различные методы анализа.

В рамках решения указанной проблемы в последние годы разработаны и продолжают разрабатываться различные комбинированные методы анализа. По мере разработки этих методов все острее ощущается настоятельная необходимость не только дальнейшего развития в области конвергенции частных методов математического моделирования и анализа, но и глубокого научного обобщения основных закономерностей в указанной области исследований на основе системного подхода.

Таким образом, в настоящее время существует актуальная **крупная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение** – проблема создания системы методов математического моделирования, позволяющей обеспечить максимально высокую эффективность и точность расчетов для сложных электродинамических систем, содержащих большое число разнообразных излучающих и переизлучающих элементов.

Состояние вопроса в рассматриваемой области характеризуется следующими основными достижениями.

Объектно-ориентированные частные методы математического моделирования в современной научной практике представлены методами, основанными на решении краевых задач с помощью дифференциальных уравнений, с помощью интегральных уравнений (ИУ), и методами на основе квазиоптических моделей.

Решение краевых задач для дифференциальных уравнений реализовано в различных вариантах метода конечных элементов, конечно-разностной аппроксимации и т.д. Подобные подходы эффективны преимущественно для внутренних электродинамических задач. Для внешних задач их ресурсоемкость оказывается заведомо избыточной, поэтому в рамках настоящей работы указанные методы не рассматриваются.

Методы на основе ИУ можно разделить на методы, основанные на строгой исходной постановке задачи относительно поверхностных источников, и методы на основе постановки задачи относительно эквивалентных источников. Выбор конкретного вида используемого ИУ обычно осуществляется в зависимости от геометрии анализируемых рассеивателей по критерию обеспечения требуемой точности расчетов при приемлемых вычислительных затратах.

В числе методов на основе строгой исходной постановки задачи следует отметить методы сингулярных ИУ. В рамках этих методов обычно первоначально используются ИУ с точными ядрами, которые затем сводятся к сингулярным уравнениям. Однако указанные методы недостаточно универсальны в смысле пространственных форм и относительно ресурсоемки.

При анализе поверхностных рассеивателей задача, как правило, решается относительно поверхностных источников с использованием векторных ИУ. Методы, относящиеся к данной группе, развивались в работах Е.Н. Васильева (1998), А.Г. Давыдова (2006), Е.В. Захарова (1998), В.Д. Купрадзе (1951), Г.Т. Маркова (1983), В.А. Неганова (2012), Ю.В. Пименова (2006), В.А. Фока (1970), Р. Митры (R. Mittra) (2006) и многих других ученых. При этом для анализа поверхностных рассеивателей незамкнутой формы небольших электрических размеров чаще всего применяются двумерные ИУ с точными ядрами, имеющие смысл граничных условий для тангенциальных компонент электрического поля (уравнения первого рода). Для анализа поверхностных рассеивателей замкнутой формы небольших электрических размеров могут применяться двумерные ИУ с точными ядрами как первого, так и второго рода, имеющие смысл граничных условий для тангенциальной компоненты магнитного поля.

В числе методов на основе постановки задачи относительно эквивалентных источников следует отметить большую группу методов, использующих тонкопроволочное приближение и приводящих к ИУ Фредгольма первого рода, имеющим смысл граничного условия для тангенциальной компоненты электрического поля. Подобные методы развивались в работах

Л.В. Глазговерта (1963), С.Н. Разинькова (2011), А.В. Рунова (1989), В.В. Юдина (2009), Дж.Дж. Бурке (G.J. Burke) (1981), Е. Галлена (E. Hallen) (1938), Р. Митры (R. Mittra) (2006), А.Дж. Подджио (A.J. Poggio) (1981), Дж.Х. Ричмонда (J.H. Richmond) (1969), Р.Ф. Харрингтона (R.F. Harrington) (1995) и многих других ученых. Для частичного снятия ограничений, связанных с некорректностью соответствующей задачи по Адамару, используются общие и проблемно-ориентированные методы регуляризации. Для электродинамического анализа толстых линейных проводников более эффективно применение уравнений Фредгольма второго рода. Что же касается использования эквивалентных источников для анализа поверхностных рассеивателей, то такие идеи высказывались достаточно давно в работах Е.Н. Васильева (1998), однако до практического применения они так и не были доведены.

Численное решение ИУ и их систем осуществляется известными методами, наиболее распространенным из которых является метод моментов при соответствующем выборе базисных и весовых функций.

В число принципиально приближенных методов математического моделирования, так или иначе основанных на оптических представлениях и до сих пор применяемых при анализе электрически протяженных поверхностных рассеивателей, входят апертурный метод, методы геометрической и физической оптики (ФО), геометрической и физической теории дифракции, метод единообразной геометрической теории дифракции, метод пристрелки и др. Асимптотические методы были развиты в работах Л.А. Вайнштейна (1966), Г.А. Гринберга (1957), П.Я. Уфимцева (2009), В.А. Фока (1970), К.А. Баланиса (C.A. Balanis) (2002), Дж.Б. Келлера (J.B. Keller) (1957), Т. Схио (T. Shijo) (2008), Р. Тиберио (R. Tiberio) (2004), Ю.З. Юмула (Y.Z. Umul) (2006) и других ученых.

Комбинированные методы моделирования сложных электродинамических систем, основанные на совместном использовании традиционных приближенных методов и методов ИУ, достаточно широко представлены в современной научной практике.

Комбинированные методы впервые были предложены в начале 1970-х годов Дж.А. Тайлом (G.A. Thiele) и его коллегами. Наиболее распространены из них являются методы на основе комбинирования методов геометрической теории дифракции и ИУ (так называемые «полевые» методы), а также методы на основе комбинирования методов ФО и ИУ (так называемые «токовые» методы).

В работах Дж.А. Тайла (G.A. Thiele) и Т.Х. Ньюхауса (T.H. Newhouse) (1975, 1992) «полевой» подход использовался для расчета дифракции на телах произвольной формы. В работах Ф.А. Молинета (F.A. Molinet) (1978, 2005) данный подход был развит в части итерационной процедуры решения ИУ. В работах А. Монорчио (A. Monorchio) и Р. Митры (R. Mittra) (1998, 2006) были объединены методы в частотной и во временной областях.

В работах Л.Н. Меджейси-Митсчанга (L.N. Medgyesi-Mitschang) и

Д.-С. Ванга (D.-S. Wang) (1989) «токовый» комбинированный метод использовался для анализа тел вращения. В работах Р.Е. Ходжеса (R.E. Hodges) и Ю. Рахмат-Самии (Y. Rahmat-Samii) (1997) использовалась итерационная процедура для решения ИУ. В работах М. Джорджевича (M. Djordjevic) и Б.М. Нотароса (B.M. Notaros) (2005) комбинация методов ИУ и ФО использовалась для анализа трехмерных тел произвольной формы. Существенное развитие «токовые» комбинированные методы получили в работах У. Якобуса (U. Jakobus) и Ф.М. Лендсторфера (F.M. Landstorfer) (1995, 2003).

В целом проведенный обзор литературы показал, что проблема создания целостной системы методов и средств математического моделирования сложных электродинамических систем, содержащих большое число разнообразных излучающих и переизлучающих элементов, до настоящего времени не решена. В рамках решения указанной проблемы должны быть решены задачи разработки классификации систем, проведения подробного анализа, систематизации и классификации существующих комбинированных методов решения электродинамических задач, а также разработки новых методов математического моделирования сложных электродинамических систем.

Цель работы – разработка системы методов математического моделирования сложных электродинамических систем на основе комбинирования интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода, двумерных интегральных уравнений и физико-оптических моделей.

Для достижения поставленной цели в работе выполнена следующая **программа исследований**:

- классификация и предварительный анализ сложных электродинамических систем;

- анализ и классификация существующих комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем;

- разработка математической модели системы, состоящей из тонких и толстых линейных проводников, и соответствующего комбинированного метода математического моделирования на основе интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода;

- разработка модифицированного комбинированного метода математического моделирования на основе физической оптики и интегрального уравнения первого рода;

- вывод новых интегральных уравнений второго рода относительно эквивалентного источника и учитывающего физико-оптическое решение;

- разработка математической модели электрически тонкого листового рассеивателя и соответствующего комбинированного метода математического моделирования на основе физической оптики и нового интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника;

- разработка математической модели слабо искривленного листового рассеивателя и соответствующего комбинированного метода математического моделирования на основе физической оптики и нового интегрального

уравнения второго рода, учитывающего физико-оптическое решение;

- исследования вопросов построения и реализации комбинированных методов;
- апробация, проверка работоспособности и оценка эффективности предлагаемых методов;
- разработка общего алгоритма математического моделирования сложных электродинамических систем;
- программная реализация разработанного алгоритма в виде комплексов проблемно-ориентированных программ;
- проведение комплексных расчетных и расчетно-экспериментальных исследований сложных электродинамических систем.

Методы исследований

Методы математической физики, функционального анализа, теории дифракции, физического эксперимента, численные методы.

Обоснованность и достоверность результатов работы

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются адекватностью использованных методов и построенных на их основе расчетных моделей. Достоверность результатов работы подтверждается результатами сопоставления решений, полученных разными методами, расчетных и экспериментальных данных, а также результатами внедрения разработанного общего алгоритма математического моделирования.

Научная новизна работы

1. Разработана система комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем, включающая классификацию сложных электродинамических систем по критерию различия подходов к их моделированию, принципы комбинирования интегральных уравнений и физико-оптических моделей, вновь разработанные и модифицированные комбинированные методы, позволяющая на единой методологической основе решать задачи моделирования сложных электродинамических систем произвольного состава и конфигурации и обеспечивающая при этом экономию вычислительных ресурсов.

2. Разработана математическая модель слабо искривленного листового рассеивателя конечной толщины на основе физической оптики и полученного автором интегрального уравнения второго рода, учитывающего физико-оптическое решение, которое в отличие от известных уравнений первого рода позволяет формировать сильно разреженные матрицы систем линейных алгебраических уравнений, а в отличие от известных уравнений второго рода позволяет вдвое сократить область определения искомой функции; разработан соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

3. Разработана математическая модель электрически тонкого листового рассеивателя на основе физической оптики и полученного автором интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника, которое в отличие от известных уравнений первого рода позво-

ляет формировать сильно разреженные матрицы систем линейных алгебраических уравнений, а в отличие от известных уравнений второго рода – включить особенности в ядре и сократить область определения искомой функции; разработан соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

4. Разработана математическая модель сложной электродинамической системы линейных проводников на основе интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода, позволяющая моделировать совокупность электрически тонких и толстых линейных проводников как единую электродинамическую систему и обеспечивающая рациональное сочетание достоинств уравнений различного вида; разработан соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

5. Разработан модифицированный комбинированный метод математического моделирования бесконечно тонких листовых рассеивателей на основе физической оптики и известного интегрального уравнения первого рода с точным ядром, отличающийся от известных аналогичных методов пересечением областей физической оптики и интегрального уравнения и обеспечивающий за счет этого сокращение вычислительных затрат.

6. Разработан общий алгоритм математического моделирования сложных электродинамических систем, реализующий разработанную систему комбинированных методов, обеспечивающий высокую эффективность моделирования произвольных сложных систем и позволяющий автоматизировать процедуру распределения частных методов по составным частям анализируемой системы.

7. Получены новые теоретические результаты в области математического моделирования сложных электродинамических систем, включая результаты исследований корректности задач по Адамару, проблемы интегрирования особенностей, общих свойств физико-оптических моделей и интегральных уравнений второго рода, а также новые результаты комплексных исследований проблем оптимизации размещения излучающих и переизлучающих элементов электродинамических систем.

Личный вклад автора

Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором лично. В научных трудах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат обоснование и разработка математических моделей и методов моделирования, разработка алгоритмов в рамках создания комплексов программ, а также формализация конкретных прикладных задач при проведении вычислительных экспериментов.

Практическая ценность результатов работы

1. Разработанная система комбинированных методов математического моделирования позволяет, при актуально имеющихся ресурсах вычислительной техники, осуществлять математическое моделирование существенно более крупных электродинамических систем, содержащих большое число

разнообразных излучающих и переизлучающих объектов.

2. Разработанный общий алгоритм математического моделирования сложных электродинамических систем, обеспечивающий автоматизацию выбора частных методов для различных составных частей моделируемой системы, существенно упрощает формализацию конкретных практических задач моделирования для самых различных технических систем.

3. Разработанные комплексы проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов позволяют обеспечить проведение комплексных исследований технических систем, включая определение характеристик сложных комплексов радиосвязи, радиовещания, радиолокации, дистанционной диагностики и мониторинга, решение задач обеспечения электромагнитной совместимости, электромагнитной безопасности, снижения радиолокационной заметности и др.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы успешно внедрены при выполнении работ по созданию специального программного обеспечения построения, расчета и анализа электродинамической модели антенных устройств с учетом влияния их ближнего окружения, при решении актуальных задач по оснащению новых и модернизации существующих объектов радиосвязи, при разработке конструкторской документации на передающие, азимутальные приемные и угломестные приемные антенные решетки радиолокационных станций диапазона ОВЧ.

Реализация результатов работы и достигнутый эффект подтверждены соответствующими актами.

Апробация результатов работы

Основные результаты по теме диссертационного исследования докладывались на *The 27th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics* (Williamsburg, Virginia, USA, 2011), *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications* (Cape Town, South Africa, 2012), *VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques* (Kyiv, Ukraine, 2011), *14th International Conference on Mathematical Methods In Electromagnetic Theory* (Kharkiv, Ukraine, 2012), X, XII – XV, XVII Международных научно-технических конференциях «*Радиолокация, навигация, связь*» (Воронеж, 2004, 2006 – 2009, 2011), II, IV – XI Международных научно-технических конференциях «*Физика и технические приложения волновых процессов*» (Самара, Нижний Новгород, Самара, Казань, Самара, Санкт-Петербург, Челябинск, Самара, Екатеринбург, 2003, 2005 – 2012), Международной научной конференции «*Излучение и рассеяние электромагнитных волн*» (Таганрог, 2011), 4-й Международной научно-практической конференции «*Актуальные проблемы радиофизики*» (Томск, 2012), 20-й Международной конференции «*СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии*» (Севастополь, 2010), V, VII Международных научно-технических конференциях «*Перспективные технологии в средствах передачи информации*» (Владимир, 2003, 2007), V, VII, IX Международных научно-технических конфе-

ренциях «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Самара, Казань, 2004, 2006, 2008), II, III Международных конференциях «Математическая физика и ее приложения» (Самара, 2010, 2012), LXIII, LXV научных сессиях, посвященных дню радио (Москва, 2008, 2010), XVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010» (Москва, 2010), V Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 2011), V Всероссийской научной конференции «Проблемы совершенствования и развития специальной связи и информации, предоставляемых государственным органам» (Орел, 2007), IX – XIII, XV, XVI, XVIII – XX Российских научных конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГАТИ, ПГУТИ с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных ВУЗов и организаций (Самара, 2002 – 2006, 2008, 2009, 2011 – 2013), Второй отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества» (Москва, 2008), Научно-технической конференции, посвященной 60-летию ФГУП НИИР (Москва, 2009), Конференции, посвященной международному году физики «Проблемы фундаментальной физики XXI века» (Самара, 2005), Московском электродинамическом семинаре (Москва, 2005), Научно-технических советах ОАО «Концерн «Автоматика», ФГУП НИИР и Филиала ФГУП НИИР-СОНИИР.

Основные результаты по теме диссертационного исследования поддержаны именной премией губернатора Самарской области для людей с ограниченными возможностями здоровья в номинации «Образование и наука» (2012), премией по поддержке талантливой молодежи, установленной указом президента РФ от 6.04.2006 г. № 325 «О мерах государственной поддержки талантливой молодежи» (2007), грантом № 1ТЗ.7П по результатам областного конкурса на предоставление грантов студентам, аспирантам и молодым ученым (2007).

Публикации

По тематике диссертационных исследований автором (лично и в соавторстве) опубликовано 108 печатных трудов. Основные научные и прикладные результаты диссертационной работы опубликованы в учебном пособии для ВУЗов (в соавторстве), изданном центральным издательством, в 62 научных статьях, в том числе, в 32 статьях в журналах, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», в 44 публикациях в форме тезисов докладов. Разработанное с использованием результатов диссертационной работы новое техническое решение защищено патентом России.

Перечень основных публикаций приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Общий объем работы составляет 449 страниц. Основная часть работы содержит 284 страницы машинописного текста,

131 рисунок на 85 страницах и 11 таблиц. Список литературы содержит 372 наименования.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель слабо искривленного листового рассеивателя на основе физической оптики и интегрального уравнения второго рода, учитывающего физико-оптическое решение, и соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

2. Математическая модель электрически тонкого листового рассеивателя на основе физической оптики и интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника и соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

3. Математическая модель сложной электродинамической системы, состоящей из тонких и толстых линейных проводников, на основе интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода и соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

4. Общий алгоритм математического моделирования сложных электродинамических систем, реализующий разработанную систему комбинированных методов, обеспечивающий высокую эффективность моделирования произвольных сложных систем и позволяющий автоматизировать процедуру распределения частных методов по составным частям анализируемой системы.

5. Результаты практической реализации научных и научно-прикладных результатов диссертационной работы, включая разработанные комплексы проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительных экспериментов и результаты проведенных на их основе комплексных исследований технических проблем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дан обзор состояния вопроса, сформулированы цель и программа исследований, описаны состав и структура работы, указаны используемые методы исследований, показаны обоснованность и достоверность результатов, показаны научная новизна и практическая ценность работы, указан личный вклад автора, описана реализация результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, даны сведения об апробации результатов работы и публикациях.

В главе 1 обоснована постановка задачи моделирования сложных электродинамических систем и рассмотрены методы ее решения.

Проанализирована общая постановка задачи анализа сложных электродинамических систем. Показано, что при традиционном подходе к данной проблеме взаимное влияние между разнородными частями системы вообще не учитывалось или учитывалось «в одну сторону». Однако для современных задач это оказывается явно недостаточным. Для корректного моделирования сложных электродинамических систем необходимо, во-первых, более

точно определить тип анализируемых объектов, а во-вторых, провести классификацию таких систем с целью построения наиболее адекватных методов их моделирования.

Под *сложными электродинамическими системами* понимаются совокупности элементов – рассеивателей электромагнитного поля, разнородных с точки зрения подходов к их математическому моделированию. В общем случае элементы таких систем имеют существенно различные пространственные формы, электрические размеры и электрофизические свойства.

С точки зрения геометрической формы в системах выделены элементы следующих классов: существенно тонкие линейные проводники; проводники, поперечные размеры которых достаточно велики; поверхностные рассеиватели произвольной незамкнутой формы небольших электрических размеров; поверхностные рассеиватели произвольной замкнутой формы небольших электрических размеров; слабо искривленные весьма протяженные поверхностные рассеиватели. В зависимости от классов рассеивателей, входящих в их состав, соответствующим образом классифицируются и сами сложные электродинамические системы.

Рассмотрены методы математического моделирования сложных электродинамических систем, включая методы ИУ и асимптотические методы решения. Проанализирована классификация методов моделирования.

Рассмотрены комбинированные методы решения электродинамических задач, основанные на «полевых» и «токовых» асимптотических методах. Проанализированы области и перспективы их применения, основные достоинства и недостатки.

Выполнен обзор программных комплексов, реализующих различные методы, в том числе, комбинированные.

Глава 2 посвящена разработке математической модели сложных электродинамических систем, состоящих из тонких и толстых линейных проводников, на основе ИУ Фредгольма первого и второго рода и соответствующего комбинированного метода математического моделирования.

Рассмотрена электродинамическая система, состоящая из тонких и толстых линейных проводников, обосновано использование тонкопроволочного приближения, осуществлен вывод уравнений Фредгольма первого и второго рода. В качестве уравнения первого рода использовалось уравнение Полингтона:

$$E_{\tau}^0(l) = i \int_L \left[\omega \mu_0 (\bar{\tau}(l) \bar{\tau}(l')) G(l, l') - \frac{1}{\omega \epsilon_0} \frac{\partial^2 G(l, l')}{\partial l \partial l'} \right] j(l') dl', \quad l \in L_1. \quad (1)$$

Уравнение второго рода может быть записано следующим образом:

$$\int_0^{2\pi} \bar{\varphi}_{0l}(l, \varphi) \bar{H}^0(l, \varphi) d\varphi = j(l) - \int_L \int_0^{2\pi} \bar{\varphi}_{0l}(l, \varphi) \bar{\varphi}_{0l'}(l', \varphi) \frac{\partial G(l, l')}{\partial R(l, l')} j(l') d\varphi dl', \quad (2)$$

$$l \in L_2.$$

Обоснована возможность и целесообразность комбинирования уравне-

ний (1), (2) на основе их объединения в систему ИУ первого и второго рода. На этой основе разработаны математическая модель системы и комбинированный метод математического моделирования.

Проведено исследование вопросов корректности задачи и устойчивости решения. Показано, что, если хотя бы одно из уравнений некорректно по Адамару, то будет некорректной и вся система уравнений. Однако, некорректность метода «компенсируется» областью его применения. Рассмотрены ограничения разработанного метода на величину радиусов проводников.

Выполнено тестирование разработанной математической модели и комбинированного метода на ее основе путем сравнения результатов расчета систем проводников различных радиусов, полученных предложенным и известными методами. Выполнено оценивание выигрыша в вычислительных ресурсах при использовании комбинированного метода. Отношение временных затрат в комбинированном методе и методе ИУ второго рода можно оценить следующим образом:

$$q = \delta + \frac{1 - \delta}{M}, \quad (3)$$

где δ – относительный удельный вес толстых проводников в системе;

M – число разбиений при численном интегрировании по контуру поперечного сечения толстых проводников.

Глава 3 посвящена разработке модифицированного комбинированного метода математического моделирования бесконечно тонких листовых рассеивателей на основе физической оптики и интегрального уравнения первого рода.

Выполнена постановка задачи рассеяния на электрически протяженных поверхностных рассеивателях. Показано, что для таких рассеивателей эффективно применение комбинированного метода на основе ИУ и ФО. Сформулированы основные принципы комбинирования методов ФО и ИУ: - метод ФО применяется для всей поверхности рассеивателя S^{PO} ; - метод ИУ применяется только для поверхности S^{IE} , являющейся относительно малой частью поверхности S^{PO} , на которой не выполняются условия применимости метода ФО; - метод ФО реализуется первым (этап 1), затем реализуется метод ИУ (этап 2); - решение задачи этапа 1 методом ФО выполняется при действии заданных сторонних источников; на этапе 2 в число сторонних источников включается и ток, найденный методом ФО.

Предложено использование наложения областей определения методов ФО и ИУ друг на друга. Обоснованы возможности увеличения размеров сегмента ИУ. Разработана модификация комбинированного метода на основе методов ИУ первого рода и ФО с наложением областей. Получены необходимые расчетные соотношения для матричных элементов.

Выполнено тестирование разработанного метода. Рассчитаны распределения тока на дисках большого радиуса различными методами. Выполнено сопоставление результатов расчетов, подтвердившее адекватность пред-

ложенного метода. Оценена экономия вычислительных затрат.

Предложена модификация метода ФО путем замены функции распределения тока на функцию распределения заряда. Положительный эффект от такой замены заключается в сокращении памяти компьютера.

Рассмотрены вопросы интегрирования особенностей в ИУ с поверхностными интегралами. Для интегрирования особых точек предложено использовать конечно-разностную аппроксимацию градиента скалярного потенциала.

В главе 4 приведены результаты разработки математической модели электрически тонкого листового рассеивателя на основе физической оптики и интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника и соответствующего комбинированного метода математического моделирования.

Изложены эвристические соображения по поводу возможности и целесообразности постановки задачи относительно эквивалентного источника.

Получено ИУ второго рода относительно эквивалентного источника:

$$\begin{aligned} \vec{n}_0 \times [\vec{H}^0(\vec{r}) - \vec{H}^0(\vec{r} - \vec{n}_0 \Delta)] = \vec{j}(\vec{r} - \vec{n}_0 \Delta/2) + \\ + \vec{n}_0 \times \int_S (\vec{K}_r(\vec{r}, \vec{r}') + \vec{K}_t(\vec{r}, \vec{r}')) \vec{j}(\vec{r}') ds', \quad \vec{r} \in S_1. \end{aligned} \quad (4)$$

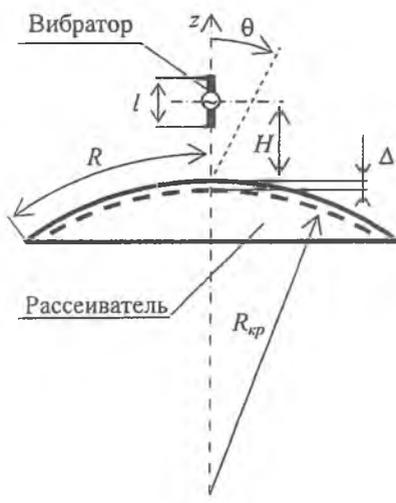


Рис. 1

Выполнены исследования уравнения второго рода относительно эквивалентного источника на предмет ограничений на кривизну рассеивателя. В ходе исследований анализировались рассеиватели различных размеров и формы. В качестве примера на рис.1 показан сферический сегмент, возбуждаемый элементарным вибратором. Установлено, что принципиальное ограничение на кривизну рассеивателя отсутствует, и существует только «мягкое» ограничение – метод работоспособен, но эффективность его снижается. На рис.2 приведен график зависимости электрического размера сегмента d_s/λ , при котором наступает стабилизация вычислительного процесса, от электрического радиуса кривизны.

Выполнены исследования уравнения второго рода относительно эквивалентного источника на предмет ограничений на толщину рассеивателя. Ограничение на толщину сверху обусловлено тем обстоятельством, что, начиная с некоторой толщины, существенным становится тот факт, что реально течет не один ток (эквивалентный), а два, разнесенные в пространстве на достаточно большое электрическое расстояние. Данное ограничение со-

ставляет $0,1 \dots 0,15 \lambda$. Ограничение снизу обусловлено проблемой вычисления «малых разностей». На рис.3 в качестве примера представлены диаграммы направленности системы, показанной на рис.1, при различной толщине рассеивателя. Видно, что при малой толщине при одинарной точности расчетов решение становится недостоверным. По результатам исследований ограничение на толщину снизу определено как $3 \cdot 10^{-4} \lambda$ (при двойной точности расчетов).

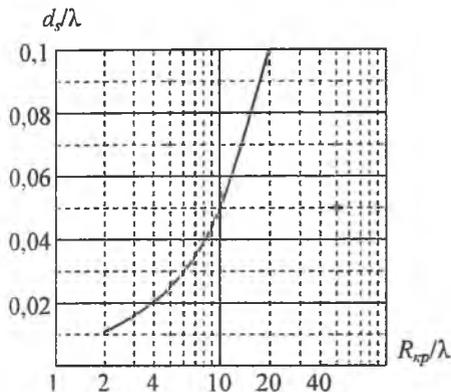


Рис.2

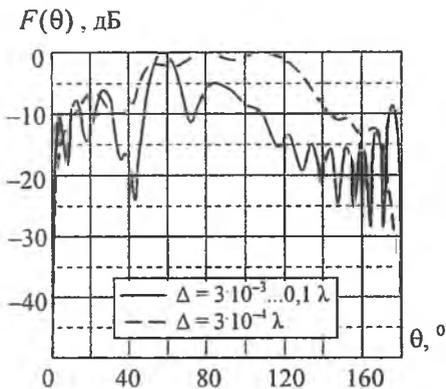


Рис.3

На основе полученного интегрального уравнения и метода физической оптики разработана математическая модель системы. Разработан комбинированный метод математического моделирования электрически тонких листовых рассеивателей на основе ФО и ИУ Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника. Комбинированный метод строится аналогично описанному в главе 3. В рамках метода уравнение (4) необходимо переписать в виде системы ИУ с учетом влияния областей ФО следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & H_i^0(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2) - H_i^0(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2) = j_\tau^{IE}(\bar{r}) + j_\tau^{PO}(\bar{r}) + \\
 & + \int_{S_n^{IE}} [K_\tau(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' + \bar{n}_0 \Delta/2) + K_\tau(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' - \bar{n}_0 \Delta/2)] j_\tau^{IE}(\bar{r}') ds' + \\
 & + \int_{S_n^{IE}} [K_u(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' + \bar{n}_0 \Delta/2) + K_u(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' - \bar{n}_0 \Delta/2)] j_i^{IE}(\bar{r}') ds' + \\
 & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq n}}^{M_2} \left[\int_{S_k^{IE}} K_\tau(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_\tau^{IE}(\bar{r}') ds' - \int_{S_k^{IE}} K_\tau(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_\tau^{IE}(\bar{r}') ds' \right] + \\
 & + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^{M_2} \left[\int_{S_k^{IE}} K_{II}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_i^{IE}(\bar{r}') ds' - \int_{S_k^{IE}} K_{II}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_i^{IE}(\bar{r}') ds' \right] + \\
 & + \int_S K_{I\tau}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_\tau^{PO}(\bar{r}') ds' - \int_S K_{I\tau}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_\tau^{PO}(\bar{r}') ds' +
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_S K_{\Pi}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_i^{PO}(\bar{r}') ds' - \int_S K_{\Pi}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_i^{PO}(\bar{r}') ds', \\
& H_{\tau}^0(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2) - H_{\tau}^0(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2) = j_{\tau}^{IE}(\bar{r}) + j_{\tau}^{PO}(\bar{r}) + \\
& + \int_{S_m^{IE}} [K_{\alpha}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' - \bar{n}_0 \Delta/2) + K_{\alpha}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' + \bar{n}_0 \Delta/2)] j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' + \\
& + \int_{S_m^{IE}} [K_{\tau\tau}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' - \bar{n}_0 \Delta/2) + K_{\tau\tau}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}' + \bar{n}_0 \Delta/2)] j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' + \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^{M_2} \left[\int_{S_k^{IE}} K_{\alpha}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' - \int_{S_k^{IE}} K_{\alpha}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' \right] + \\
& + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^{M_2} \left[\int_{S_k^{IE}} K_{\tau\tau}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' - \int_{S_k^{IE}} K_{\tau\tau}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' \right] + \\
& + \int_S K_{\alpha}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{PO}(\bar{r}') ds' - \int_S K_{\alpha}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{PO}(\bar{r}') ds' + \\
& + \int_S K_{\tau\tau}(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{PO}(\bar{r}') ds' - \int_S K_{\tau\tau}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{PO}(\bar{r}') ds'.
\end{aligned} \tag{6}$$

К системе уравнений (5), (6) необходимо добавить граничные условия в рамках метода ФО также с учетом влияния областей ИУ:

$$\begin{aligned}
& -2H_{\tau}^0(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2) = j_{\tau}^{PO}(\bar{r}) + \\
& + 2 \sum_{n=1}^{M_2} \int_{S_n^{IE}} K_{\tau}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' + 2 \sum_{n=1}^{M_2} \int_{S_n^{IE}} K_{\Pi}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds',
\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
& 2H_{\tau}^0(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2) = j_{\tau}^{PO}(\bar{r}) - \\
& - 2 \sum_{n=1}^{M_2} \int_{S_n^{IE}} K_{\alpha}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds' - 2 \sum_{n=1}^{M_2} \int_{S_n^{IE}} K_{\tau\tau}(\bar{r} + \bar{n}_0 \Delta/2, \bar{r}') j_{\tau}^{IE}(\bar{r}') ds'.
\end{aligned} \tag{8}$$

Рассмотрены вопросы формализации пространственных конфигураций рассеивателей. Обоснован выбор систем базисных и координатных функций. Разработан алгоритм упорядочения системы сегментов разбиения и формирования структуры системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Выведены формулы для расчета элементов расширенной матрицы СЛАУ. Разработан алгоритм решения СЛАУ.

Проведено тестирование разработанной математической модели и комбинированного метода на ее основе на модельных задачах путем сравнения с известными методами и программными комплексами. По результатам тестирования установлено, что модель адекватна, а метод работоспособен и достаточно эффективен.

Глава 5 посвящена разработке математической модели слабо искривленного листового рассеивателя на основе физической оптики и впервые введенного интегрального уравнения второго рода, учитывающего физико-оптическое решение, и соответствующего комбинированного метода мате-

матического моделирования.

Показано, что физико-оптическая модель представляет собой аппроксимацию нулевого порядка точной модели, описываемой интегральным уравнением второго рода. Это создает предпосылки для построения комбинированных методов, а также построения ИУ, учитывающих ФО решение.

Показано, что решение, получаемое методом ФО, представляет собой точное разностное решение – разность плотностей токов, текущих по лицевой и обратной поверхностям рассеивателя. Тем самым установлена априорная связь между токами на лицевой и обратной поверхностях рассеивателя:

$$2\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}) = \vec{j}_1(\vec{r} + \Delta\vec{n}_0) - \vec{j}_2(\vec{r}), \quad \vec{r} \in S_2. \quad (9)$$

Это открывает возможности по постановке задачи относительно плотности какого-то одного тока (на лицевой или обратной поверхностях).

На этой основе получено ИУ второго рода, учитывающее физико-оптическое решение:

$$\begin{aligned} \vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}) + 2 \int_{S_2} (\vec{K}_\tau^0(\vec{r}, \vec{r}') + \vec{K}_l^0(\vec{r}, \vec{r}')) [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] ds' = \\ = \vec{j}_1(\vec{r}) + \int_{S_1} (\vec{K}_\tau(\vec{r}, \vec{r}') + \vec{K}_l(\vec{r}, \vec{r}')) \vec{j}_1(\vec{r}') ds'. \end{aligned} \quad (10)$$

Выполнены исследования ИУ второго рода, учитывающего физико-оптическое решение, на предмет ограничений на кривизну рассеивателя. На рис.4 в качестве примера показаны диаграммы направленности для системы, показанной на рис.1, для $R_{sp} = 500 \lambda$. Для дополнительного тестирования полученные результаты сравнивались с результатами, полученными известными методами и программными комплексами. По результатам проведенных исследований ограничение на толщину снизу определено как $300 \dots 500 \lambda$. При этом выявлена высокая чувствительность к кривизне, так что область применения предлагаемого подхода фактически охватывает весьма слабо искривленные рассеиватели.

Выполнены исследования ИУ второго рода, учитывающего физико-оптическое решение, на предмет ограничений на толщину рассеивателя. Установлено, что ограничение сверху, обусловленное пространственным разномом токов на лицевой и обратной поверхностях, отсутствует. Ограничение снизу обусловлено проблемой вычисления «малых разностей». На рис.5 в качестве примера представлены диаграммы направленности системы, показанной на рис.1, при различной толщине рассеивателя. Видно, что при малой толщине решение становится недостоверным. По результатам проведенных исследований ограничение на толщину снизу определено как $3 \cdot 10^{-4} \lambda$ (при двойной точности расчетов).

На основе полученного интегрального уравнения и метода физической оптики разработана математическая модель системы. Разработан комбинированный метод математического моделирования на основе ФО и впервые выведенного ИУ второго рода, учитывающего физико-оптическое решение. Ком-

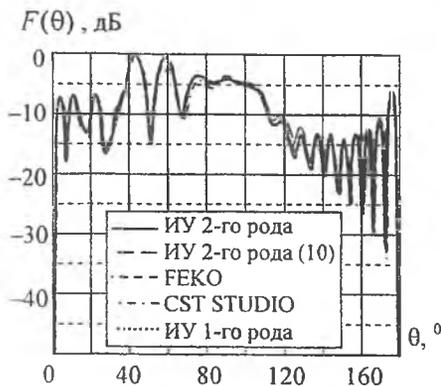


Рис.4

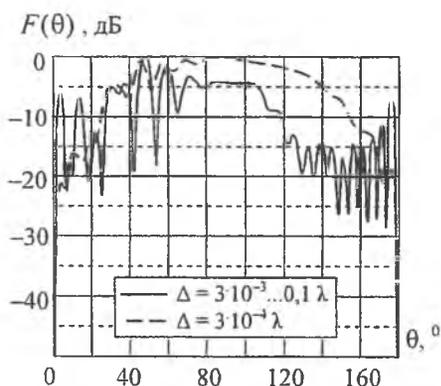


Рис.5

бинированный метод строится аналогично описанному в главе 3. В рамках метода уравнение (10) необходимо переписать в виде системы ИУ:

$$-H_i^0(\vec{r}) = j_{i'}^{IE}(\vec{r}) + j_{i'}^{PO}(\vec{r}) + \sum_{n=1}^{M_1} \left(\int_{S_n^{IE}} [K_u(\vec{r}, \vec{r}') + K_u(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{i'}^{IE}(\vec{r}') ds' + 2 \int_{S_n^{IE}} K_u(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{t}_0 ds' \right) + \quad (11)$$

$$+ \sum_{n=1}^{M_2} \left(\int_{S_n^{IE}} [K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') + K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{i'}^{IE}(\vec{r}') ds' + 2 \int_{S_n^{IE}} K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{\tau}_0 ds' \right) + \\ + \int_{S_1} K_u(\vec{r}, \vec{r}') j_{i'}^{PO}(\vec{r}') ds' + \int_{S_1} K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') j_{i'}^{PO}(\vec{r}') ds'$$

$$H_i^0(\vec{r}) = j_{i'}^{IE}(\vec{r}) + j_{i'}^{PO}(\vec{r}) - \sum_{n=1}^{M_2} \left(\int_{S_n^{IE}} [K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') + K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{i'}^{IE}(\vec{r}') ds' + 2 \int_{S_n^{IE}} K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{\tau}_0 ds' \right) + \quad (12)$$

$$+ \sum_{n=1}^{M_1} \left(\int_{S_n^{IE}} [K_u(\vec{r}, \vec{r}') + K_u(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{i'}^{IE}(\vec{r}') ds' + 2 \int_{S_n^{IE}} K_u(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{t}_0 ds' \right) + \\ + \int_{S_1} K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') j_{i'}^{PO}(\vec{r}') ds' + \int_{S_1} K_u(\vec{r}, \vec{r}') j_{i'}^{PO}(\vec{r}') ds'$$

К системе уравнений (11), (12) необходимо добавить граничные условия в рамках метода ФО также с учетом влияния областей ИУ:

$$-2H_i^0(\vec{r}) = j_{i'}^{PO}(\vec{r}) + \sum_{n=1}^{M_2} \left(\int_{S_n^{IE}} [K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') + K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{i'}^{IE}(\vec{r}') ds' + \int_{S_n^{IE}} K_u(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{t}_0 ds' \right) + \quad (13)$$

$$+ \sum_{n=1}^{M_1} \left(\int_{S_n^{IE}} [K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') + K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{i'}^{IE}(\vec{r}') ds' + \int_{S_n^{IE}} K_{\pi}(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{\tau}_0 ds' \right)$$

$$2H_i^0(\vec{r}) = j_r^{PO}(\vec{r}) - \left(-2 \sum_{n=1}^{M_1} \left[\int_{S_n^{IE}} [K_{rr}(\vec{r}, \vec{r}') + K_{rr}(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{ir}^{IE}(\vec{r}') ds' + \int_{S_n^{IE}} K_{rr}(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{e}_0 ds' \right] - \right. \\ \left. -2 \sum_{n=1}^{M_2} \left[\int_{S_n^{IE}} [K_{rr}(\vec{r}, \vec{r}') + K_{rr}(\vec{r}, \vec{r}' - \Delta \vec{n}_0)] j_{ir}^{IE}(\vec{r}') ds' + \int_{S_n^{IE}} K_{rr}(\vec{r}, \vec{r}') [\vec{n}_0 \times \vec{H}^0(\vec{r}')] \cdot \vec{e}_0 ds' \right] \right) \quad (14)$$

Рассмотрены вопросы формализации пространственных конфигураций рассеивателей. Получены все необходимые расчетные соотношения для расчета матрицы и свободных членов СЛАУ. Процедура решения СЛАУ строится так же, как в главе 4.

Проведено тестирование разработанных математической модели и комбинированного метода на модельных задачах. В качестве примера на рис.6 представлены диаграммы направленности вибратора вблизи круглого диска, полученные разными методами. По результатам тестирования установлено, что модель адекватна, а метод работоспособен и достаточно эффективен.

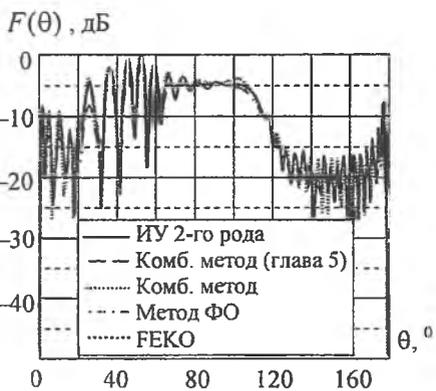


Рис.6

Анализ различного рода ограничений позволил оценить области рационального применения разработанных в главах 4, 5 комбинированных методов. Первый из них целесообразно применять для слабо искривленных листовых рассеивателей при толщине $\Delta = 3 \cdot 10^{-3} \dots 0,1 \lambda$, второй – для слабо искривленных листовых рассеивателей при толщине $\Delta = 0,1 \dots 0,2 \lambda$. Значение толщины $\Delta = 0,1 \lambda$, таким образом, является граничным. Интерес представляет вопрос о «сшивании» двух методов при граничном значении Δ . На рис.7 представлены соответствующие расчеты для вибратора с экраном. Из представленных данных видно, что решения, полученные разными методами, совпадают с графической точностью. Это означает, что «сшивание» методов наблюдается, и подтверждает достоверность проводимых рассуждений.

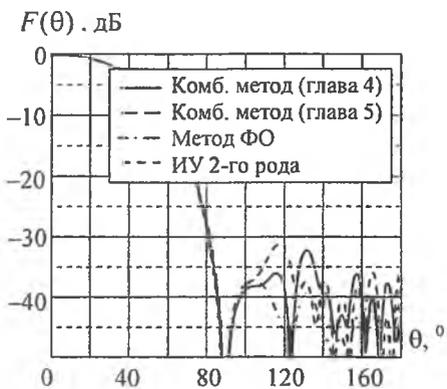


Рис.7

В главе 6 рассмотрены вопросы построения общего алгоритма математического моделирования сложных электродинамических систем.

Выполнено объединение всех полученных уравнений в единую расчетную систему:

$$-\bar{l}_0(t)\bar{E}^0(t) = \sum_{k=1}^{10} [A_{1k}(j_k)](t), \quad t \in L_1, \quad (15)$$

$$\int_0^{2\pi} \bar{\varphi}_0(\varphi, t) \bar{H}^0(\varphi, t) d\varphi = j_2(t) + \sum_{k=1}^{10} [A_{2k}(j_k)](t), \quad t \in L_2, \quad (16)$$

$$-\bar{l}_0(t, \tau) \bar{E}^0(t, \tau) = \sum_{k=1}^{10} [A_{3k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S_1, \quad (17)$$

$$-\bar{r}_0(t, \tau) \bar{E}^0(t, \tau) = \sum_{k=1}^{10} [A_{4k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S_1, \quad (18)$$

$$\bar{l}_0(t, \tau) (\bar{H}^0(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta) - \bar{H}^0(\bar{r})) = j_6(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta / 2) + \sum_{k=1}^{10} [A_{5k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S, \quad (19)$$

$$\bar{r}_0(t, \tau) (\bar{H}^0(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta) - \bar{H}^0(\bar{r})) = j_5(\bar{r} - \bar{n}_0 \Delta / 2) + \sum_{k=1}^{10} [A_{6k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S, \quad (20)$$

$$\bar{l}_0(t, \tau) \bar{H}^0(t, \tau) = j_7(t, \tau) + \sum_{k=1}^{10} [A_{7k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S', \quad (21)$$

$$\bar{r}_0(t, \tau) \bar{H}^0(t, \tau) = j_8(t, \tau) + \sum_{k=1}^{10} [A_{8k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S', \quad (22)$$

$$-2\bar{l}_0(t, \tau) \bar{H}^0(t, \tau) \operatorname{sgn}[\bar{n}_0(\bar{r} - \bar{r}')] = j_9(t, \tau) + \sum_{k=1}^8 [A_{9k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S_2, \quad (23)$$

$$2\bar{r}_0(t, \tau) \bar{H}^0(t, \tau) \operatorname{sgn}[\bar{n}_0(\bar{r} - \bar{r}')] = j_{10}(t, \tau) + \sum_{k=1}^8 [A_{10k}(j_k)](t, \tau), \quad t, \tau \in S_2. \quad (24)$$

Операторы A_{mn} определены как операторы соответствующих ИУ для отдельных областей. Операторы $A_{юн}$ получены из операторов A_{mn} соответствующим изменением формализации граничного условия. В таблице 1 показано соответствие между операторами и областями сложной электродинамической системы.

Таблица 1.

В \ ИУ	L_1	L_2	S_1	S	S'	S_2
L_1	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}
L_2	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{25}	A_{26}
S_1	A_{31}, A_{41}	A_{32}, A_{42}	A_{33}, A_{43}	A_{34}, A_{44}	A_{35}, A_{45}	A_{36}, A_{46}
S	A_{51}, A_{61}	A_{52}, A_{62}	A_{53}, A_{63}	A_{54}, A_{64}	A_{55}, A_{65}	A_{56}, A_{66}
S'	A_{71}, A_{81}	A_{72}, A_{82}	A_{73}, A_{83}	A_{74}, A_{84}	A_{75}, A_{85}	A_{76}, A_{86}
S_2	A_{91}, A_{101}	A_{92}, A_{102}	A_{93}, A_{103}	A_{94}, A_{104}	A_{95}, A_{105}	—

Разработаны процедуры формализации геометрии сложных электродинамических систем. В качестве метода решения полученной системы ИУ

обосновано использование метода коллокации при двух базисах: кусочно-синусоидальном для проволочных рассеивателей и RWG для поверхностных рассеивателей. Предложено несколько моделей источников возбуждения.

Разработан общий алгоритм математического моделирования сложных электродинамических систем. Алгоритм содержит в себе элементы экспертной системы, составной частью которой является база знаний о классификации рассеивателей, позволяющая уже на раннем этапе ограничить пространство выбора того или иного метода математического моделирования. Для выполнения классификации в случае поверхностных рассеивателей использовалось дерево принятия решений об оптимальном с точки зрения использования вычислительных ресурсов методе математического моделирования.

Проведены исследования по оцениванию эффективности разработанного алгоритма математического моделирования. Показано, что сокращение затрат происходит за счет двух факторов: - закругление аппроксимации в области ИУ, которая включается в область ФО; - быстрое убывание интегрального члена ИУ второго рода при удалении точки источника от точки наблюдения. Последний эффект позволяет получать сильно разреженные матрицы СЛАУ и применять высокоэффективные технологии работы с такими СЛАУ. Однако, следует отметить, что изначально получающаяся матрица СЛАУ не является разреженной в строгом смысле, так как содержит не нули, а малые элементы. Для получения разреженной матрицы в данной работе искусственно пренебрегается частью элементов, т.е. часть малых элементов заменяется нулями. В качестве критерия отбрасывания элементов выбирается заданная величина удаления точки наблюдения от точки источника. Для получения погрешности решения 0,2 ... 0,3 % данная величина оценивается как 10 Δ .

Получена аналитическая оценка сокращения вычислительных затрат по сравнению с известным методом на основе ИУ первого рода:

$$\eta = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{1}{p_s^2} N, \quad (25)$$

где N – число сегментов разбиения; p_s – параметр, характеризующий закругление аппроксимации в области ИУ по сравнению с известным методом; α_1 , α_2 – постоянные множители.

При этом относительная эффективность разработанного алгоритма возрастает пропорционально увеличению площади области ИУ.

На основе численных экспериментов получены оценки погрешности различных методов. Погрешность определялась по амплитудным диаграммам направленности:

$$\delta_F = \sqrt{\int_0^\pi [F(\theta) - F_0(\theta)]^2 d\theta} / \sqrt{\int_0^\pi F_0^2(\theta) d\theta}. \quad (26)$$

Получена оценка погрешности разработанного алгоритма в зависимости от размера области ИУ (такая же оценка справедлива и для известных

комбинированных методов). На рис.8 представлен соответствующий график для диска радиусом 8λ . Данный график можно рассматривать как оценку по худшему случаю – при меньших радиусах погрешность получается примерно такой же, при больших радиусах она получается меньше.

Получена оценка погрешности разработанного алгоритма, обусловленная кривизной листового рассеивателя. На рис.9 показан соответствующий график для рассеивателя, показанного на рис.1, радиусом 10λ . Видно, что с уменьшением радиуса кривизны величина погрешности увеличивается, но, начиная с определенного момента, снова уменьшается, так как в этот момент происходит переход от ИУ второго рода к ИУ первого рода.

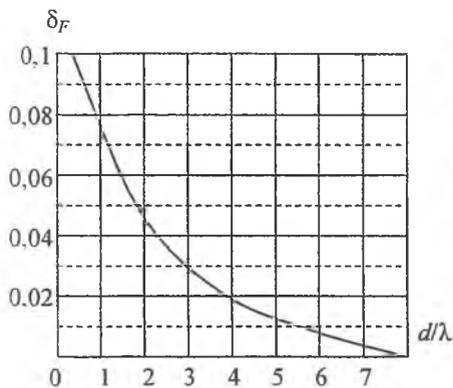


Рис.8

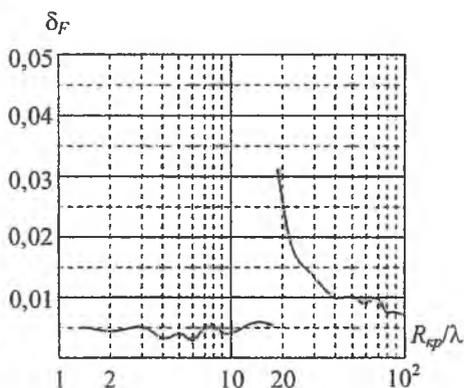


Рис.9

Получена оценка погрешности известного метода на основе ИУ первого рода, обусловленная отсутствием учета толщины листового рассеивателя (выигрыш разработанного алгоритма по точности за счет учета толщины).

Также в рамках численных экспериментов получены оценки вычислительных затрат при использовании различных методов.

Проведенные исследования убедительно показали, что разработанный алгоритм при моделировании достаточно протяженных рассеивателей обеспечивает значительное увеличение эффективности по сравнению с известными методами (сокращение вычислительных затрат на порядок и более при сохранении точности).

Выполнено численное тестирование разработанного алгоритма. Рассмотрен ряд модельных электродинамических задач, результаты решений которых сравнивались с решениями, полученными другими авторами, а также проверялись на соответствие общефизическим закономерностям. В качестве примера на рис.10 показано поле рассеяния от диска радиусом $2,5 \lambda$ толщиной $0,05 \lambda$, осесимметрично возбуждаемого перпендикулярным вибратором на расстоянии 2λ . На рис.11 показано распределение тока на поверхности диска. На рис.12 показана диаграмма направленности полуволнового вибратора на расстоянии $0,75 \lambda$ от рефлектора размером $\lambda \times \lambda$ толщиной $0,05 \lambda$. Полученные результаты соответствуют общефизическим закономер-

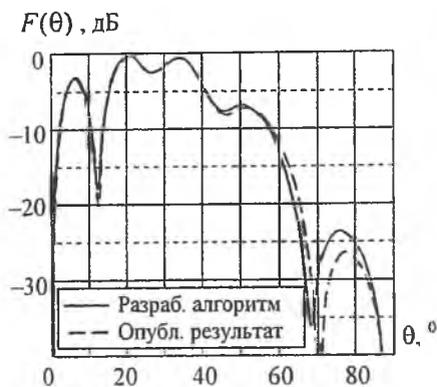


Рис.10

ностям и хорошо совпадают с ранее опубликованными результатами, что свидетельствует о корректности и работоспособности разработанного алгоритма.

Выполнено экспериментальное тестирование разработанного алгоритма. Проведены расчетно-экспериментальные исследования дифракции на металлических диске и экране, возбуждаемых вибраторами различной ориентации. Приведено описание экспериментальной установки, методики измерений, выполнена оценка погрешности.

Внешний вид экспериментальной установки показан на рис.13. Полученные экспериментальные результаты сравнивались с соответствующими расчетными значениями. В качестве примера на рис.14 показаны распределения поля для диска, возбуждаемого параллельным вибратором, на контуре, параллельном диску. Сравнение рас-

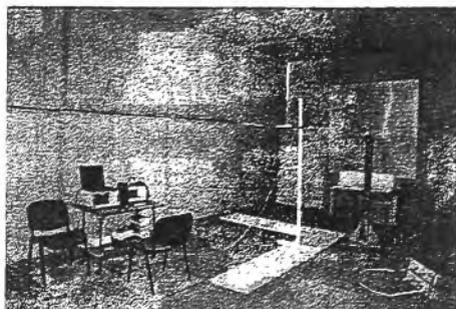


Рис.13

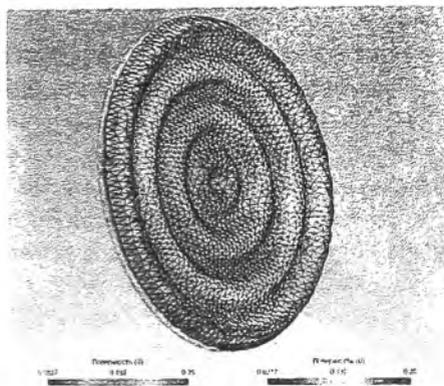


Рис.11

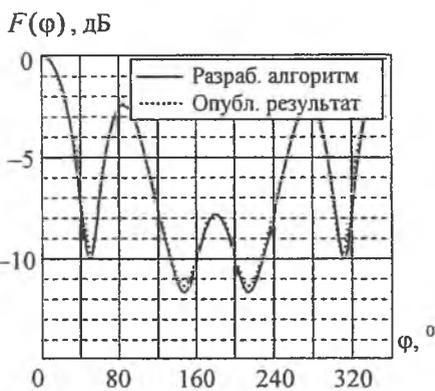


Рис.12



Рис.14

четных и экспериментальных данных подтвердило работоспособность разработанного алгоритма электродинамического анализа.

Глава 7 посвящена рассмотрению реализации общего алгоритма математического моделирования в виде комплексов проблемно-ориентированных программ и проведению на их основе комплексных исследований сложных антенных систем.

Предложенный общий алгоритм математического моделирования реализован в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения комплексных исследований ряда технических проблем.

Проведены комплексные исследования антенных систем, компактно размещаемых на подвижных объектах, включая рассмотрение вопросов оптимизации размещения сложных антенных систем на крыше автомобиля и на борту космического аппарата. Получены результаты численных расчетов характеристик антенн по назначению, а также применительно к задачам обеспечения электромагнитной совместимости. Проведены комплексные исследования антенных систем, компактно размещаемых на стационарных объектах, в целях оптимизации размещения и обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности. Проведены комплексные исследования крышевых антенных систем, результаты которых позволили оптимизировать положение антенн на объектах с учетом минимизации их негативного взаимного влияния и улучшения характеристик по назначению.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований, комплексных исследований антенных систем, а также реализации разработанного алгоритма математического моделирования убедительно подтвердили основные положения и выводы диссертационной работы.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана система комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем, включающая классификацию сложных электродинамических систем по критерию различия подходов к их моделированию, принципы комбинирования интегральных уравнений и физико-оптических моделей, вновь разработанные и модифицированные комбинированные методы. Разработанная система методов позволяет на единой методологической основе более эффективно по сравнению с известными методами решать задачи моделирования сложных электродинамических систем.

2. Разработана математическая модель сложной электродинамической системы, состоящей из тонких и толстых линейных проводников, на основе интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода. Математическая модель позволяет моделировать совокупность электрически тонких и толстых линейных проводников как единую электродинамическую систему

и обеспечивает рациональное сочетание достоинств уравнений различного вида. На основе предложенной модели разработан соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

3. Разработан модифицированный комбинированный метод математического моделирования бесконечно тонких листовых рассеивателей на основе физической оптики и известного интегрального уравнения первого рода с точным ядром с пересечением областей наложения граничных условий. Такой подход позволяет в области пересечения в качестве дополнительных сторонних источников для интегрального уравнения использовать токи, найденные с помощью метода физической оптики. Это, в свою очередь, позволяет увеличить размер сегмента разбиения при решении интегрального уравнения, и, следовательно, снизить ресурсоемкость моделирования.

4. Получено интегральное уравнение Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника для анализа электрически тонкого листового рассеивателя. Его преимуществом по сравнению с известными интегральными уравнениями первого рода является возможность формирования сильно разреженных матриц систем линейных алгебраических уравнений. Его преимуществами по сравнению с известными интегральными уравнениями второго рода являются отсутствие особенности в ядре и сокращение области определения искомой функции. Разработана математическая модель электрически тонкого листового рассеивателя на основе физической оптики и интегрального уравнения Фредгольма второго рода относительно эквивалентного источника. На основе предложенной модели разработан соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

5. Исследованы некоторые свойства физико-оптической модели. В развитие известного положения о том, что физико-оптическая модель представляет собой аппроксимацию нулевого порядка точной модели, описываемой интегральным уравнением второго рода, показано, что решение, получаемое методом физической оптики, представляет собой точное разностное решение – разность плотностей токов, текущих по лицевой и обратной поверхностям рассеивателя. Тем самым установлена априорная связь между токами на лицевой и обратной поверхностях рассеивателя. На этой основе получено интегральное уравнение второго рода, учитывающее физико-оптическое решение, для анализа слабо искривленного листового рассеивателя конечной толщины. Его преимуществом по сравнению с известными интегральными уравнениями первого рода является возможность формирования сильно разреженных матриц систем линейных алгебраических уравнений. Его преимуществом по сравнению с известными интегральными уравнениями второго рода является двукратное сокращение области определения искомой токовой функции. Разработана математическая модель слабо искривленного листового рассеивателя на основе физической оптики и интегрального уравнения второго рода, учитывающего физико-оптическое решение. На основе предложенной модели разработан соответствующий комбинированный метод математического моделирования.

6. Разработан общий алгоритм, реализующий разработанную систему комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем, обеспечивающий высокую эффективность моделирования произвольных сложных систем и позволяющий автоматизировать процедуру распределения частных методов по составным частям анализируемой системы.

7. Получены новые теоретические результаты в области математического моделирования сложных электродинамических систем. Показано, что, если хотя бы одно из интегральных уравнений в системе некорректно по Адамару, то будет некорректной и вся система уравнений. Предложена модификация метода физической оптики путем замены функции распределения тока на функцию распределения заряда. Рассмотрены вопросы интегрирования особенностей в интегральных уравнениях с поверхностными интегралами; для интегрирования особых точек предложено использовать конечно-разностную аппроксимацию градиента скалярного потенциала. Получены численные и аналитические оценки погрешности и вычислительных затрат разработанного алгоритма математического моделирования.

8. Предложенный общий алгоритм математического моделирования реализован в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для численных исследований антенных систем, компактно размещаемых на стационарных и мобильных объектах. С использованием разработанных программных комплексов проведены комплексные исследования технических проблем. Проведены численные исследования антенных систем в целях оптимизации размещения, обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности. Рассмотрены вопросы повышения эффективности методов расчета развязки между близко расположенными антеннами, оптимизации размещения вновь вводимого антенно-фидерного устройства на действующих объектах с различными видами радиосвязи, оптимизации размещения большого количества антенн подвижной радиосвязи на верхних площадках башен, определения вариантов локального размещения комплекса основных и резервных антенн подвижной радиосвязи двух диапазонов, учета влияния опор на характеристики антенн.

В приложении А представлены результаты экспериментальных исследований дифракции на металлических диске и экране.

В приложении Б приведены акты внедрения результатов диссертационной работы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в научных изданиях, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»

1. Бузова М.А., Юдин В.В. Электродинамический анализ излучающих систем с использованием функций распределения заряда // Антенны. 2003.

№1(68). С.19–25.

2. Бузова М.А. Интегральное уравнение Фредгольма второго рода для линейного вибратора, имеющее смысл граничного условия для магнитного поля // Антенны. 2003. №9(76). С.18–22.

3. Бузова М.А., Юдин В.В. Об использовании принципа сжимающих отображений при исследовании проблемы существования и единственности решения интегральных уравнений второго рода для линейных вибраторов // Антенны. 2003. №9(76). С.23–26.

4. Аронов В.Ю., Бузова М.А., Петров М.А. Проблема выбора вида интегрального уравнения при решении задач антенной электродинамики // Радиотехника. 2004. №1. С.57–63.

5. Бузова М.А. Инвариантность ядра и параметра уравнения Фредгольма 2-го рода для линейного вибратора относительно вида граничного условия // Радиотехника. 2004. №1. С.73–76.

6. Бузова М.А. Уравнение Фредгольма второго рода для проволочной структуры при неосесимметричном возбуждении // Антенны. 2004. №3. С.26–30.

7. Бузова М.А., Юдин В.В. Методика расчета входного импеданса проволочной антенны на основе уравнения баланса энергии // Антенны. 2004. №3. С.31–36.

8. Бузова М.А. Почти ортогональный базис на основе квазипериодических кусочно-синусоидальных функций в задачах анализа проволочных антенн // Радиотехника. 2005. №1. С.59–64.

9. Бузова М.А. О совместимости базиса и модели возбуждения в задачах антенной электродинамики // Радиотехника. 2005. №1. С.65–68.

10. Бузова М.А. О применении токового метода для нахождения поля, рассеянного на идеально проводящих телах с большими электрическими размерами // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. 2006. №3(43). С.41–50.

11. Бузова М.А. Электродинамический анализ проволочных антенн на основе системы уравнений Фредгольма первого и второго рода // Антенны. 2006. №10(113). С.11–15.

12. Бузова М.А. Границы применимости геометрической оптики и токового метода в задачах о рассеянии поля на протяженных слабо искривленных поверхностных рассеивателях // Радиотехника. 2006. №10. С.60–64.

13. Бузова М.А. Метод электродинамического анализа сложных металлических объектов на основе уравнений Фредгольма первого и второго рода и векторного интегрального уравнения с поверхностным интегралом // Антенны. 2007. №10(125). С.4–8.

14. Бузова М.А., Трофимов А.П. О границах применимости формул Френеля в задачах антенной электродинамики // Антенны. 2007. №10(125). С.9–12.

15. Бузова М.А. Интегральное уравнение второго рода и приближение Гюйгенса – Кирхгоффа в задачах о рассеянии электромагнитного поля на

протяженных идеально проводящих рассеивателях // Доклады академии наук. 2010. Т.431. № 4. С.471–474.

16. Бузова М.А., Минкин М.А., Юдин В.В. Перспективы использования комбинированных методов электродинамического анализа при оценивании радиозаметности радиолокационных целей // Антенны. 2010. №4(155). С.4–7.

17. Бузов А.Л., Бузова М.А., Трофимов А.П., Юдин В.В. Энергетика сверхнаправленных приемных кольцевых антенных решеток // Антенны. 2010. №4(155). С.8–15.

18. Бузова М.А., Трофимов А.П. Особенности программной реализации комбинированного метода электродинамического анализа поверхностных рассеивателей // Антенны. 2010. №4(155). С.43–46.

19. Бузова М.А. Эклектичные электродинамические системы // Труды НИИР. 2010. №2. С.22–25.

20. Бузова М.А. О возможности и целесообразности модификации метода физической оптики путем замены функции распределения тока на функцию распределения заряда // Труды НИИР. 2010. №4. С.14–17.

21. Бузова М.А. Некоторые свойства ядер уравнений Фредгольма второго рода // Вестник Сам. гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2011. №1(22). С.28–33.

22. Бузова М.А., Колояров И.А. Методики оценивания коэффициента усиления и коэффициента бегущей волны подземных антенн // Электросвязь. 2011. №5. С.32–34.

23. Бутенко В.В., Бузова М.А. Вопросы электродинамического анализа слабо искривленных тонких протяженных рассеивателей // Труды НИИР. 2011. №3. С.48–52.

24. Бузова М.А. Электродинамический анализ эклектичных антенных систем // Радиотехника. 2011. №11. С.55–59.

25. Бузова М.А. Электродинамический анализ поверхностных рассеивателей конечной толщины с помощью интегрального уравнения второго рода относительно эквивалентного тока // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т.14. №4. С.68–76.

26. Бузова М.А. Методы электродинамического моделирования эклектичных антенных систем // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 4. [Электронный ресурс] / <http://ire.cplire.ru/ire/apr12/4/text.pdf>.

27. Бузова М.А., Филиппов Д.В. Моделирование антенных систем, расположенных на крайне ограниченных участках подстилающей поверхности // Антенны. 2012. №6. С.47–51.

28. Бузова М.А., Юдин В.В. Оценка погрешности общего алгоритма электродинамического анализа эклектичных антенных систем // Антенны. 2012. №6. С.52–56.

29. Бузова М.А., Юдин В.В. Исследование вопросов сокращения вычислительных ресурсов при использовании интегральных уравнений второго

рода для анализа эклектичных антенных систем // Радиотехника. 2012. №6. С.82–86.

30. Бузова М.А., Филиппов Д.В., Юдин В.В. Моделирование процессов взаимодействия радиоволн с элементами сложных излучающих и переизлучающих систем // Известия ВУЗов. Физика. 2012. № 9/2. С. 70–71.

31. Бузова М.А., Трофимов А.П., Филиппов Д.В. Построение алгоритма анализа ЭМС сложных антенных комплексов с использованием современных электродинамических методов // Электросвязь. 2012. № 12. С. 40–43.

32. Бузова М.А., Букашкин С.А., Минкин М.А. Построение системы комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. 2013. № 3 (104). (в печати)

Публикации в других научных изданиях

33. Бузова М.А., Юдин В.В. Интегральное уравнение второго рода для линейного вибратора // Вестник СониИР. 2003. №1(3). С.22–27.

34. Бузова М.А. Модификация функции Грина в задачах анализа проволочных антенн на основе интегральных уравнений с приближенными ядрами // Вестник СониИР. 2003. №2(4). С.32–37.

35. Бузова М.А. Проблема «малых разностей» при использовании уравнения Фредгольма второго рода при электродинамическом анализе проволочных антенн // X международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, апрель 2004 г.). Воронеж, 2004. С.2047–2058.

36. Бузова М.А., Юдин В.В. Сведение задачи о рассеянии электромагнитного поля на существенно двумерном проводнике к задаче отыскания эквивалентного поверхностного источника // Вестник СониИР. 2004. №1(5). С.21–25.

37. Блатов И.А., Бузова М.А., Юдин В.В. Регуляризация уравнений Фредгольма первого рода на основе априорного ограничения вариации искомой функции в задачах антенной электродинамики // Вестник СониИР. 2004. №2(6). С.19–26.

38. Бузова М.А. О вырождении интегральных уравнений второго рода в тавтологические равенства в задачах о рассеянии электромагнитного поля на незамкнутых проводящих поверхностях // Вестник СониИР. 2004. №2(6). С.37–40.

39. Бузова М.А. Системы уравнений Фредгольма второго рода для задачи анализа поверхностных рассеивателей // Вестник СониИР. 2005. №3(9). С.32–37.

40. Бузова М.А., Юдин В.В. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений: Учебное пособие для ВУЗов. М.: Радио и связь, 2005. 172 с.

41. Бузова М.А., Юдин В.В. Проблема построения эффективных алгоритмов для решения задач дифракции на телах больших размеров с исполь-

зованием токового метода // Вестник СОНИИР. 2005. №4(10). С.28–32.

42. Бузова М.А., Юдин В.В. Комбинированный метод на основе уравнений Фредгольма первого и второго рода для исследования проволочных систем, содержащих тонкие и толстые проводники // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов V Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового. Самара, 2006. С.93.

43. Бузова М.А. О возможности и целесообразности комбинирования токового метода и метода интегрального уравнения при исследовании дифракции на рассеивателях с большими электрическими размерами // Вестник СОНИИР. 2006. №3(13). С.28–32.

44. Бузова М.А., Казанский Л.С. Электродинамический анализ поверхностных рассеивателей методами обобщенных эквивалентных цепей и уравнений Фредгольма второго рода // Вестник СОНИИР. 2007. №1(15). С.29–33.

45. Бузова М.А. Проблемы и перспективы применения тонкопроволочного моделирования в задачах антенной электродинамики // Вестник СОНИИР. 2007. №2(16). С.4–10.

46. Бузова М.А. Основные принципы комбинирования методов физической оптики и интегральных уравнений при электродинамическом анализе электрически протяженных поверхностных рассеивателей // Вестник СОНИИР. 2007. №3(17). С.44–50.

47. Бузова М.А. Электродинамическое моделирование протяженных поверхностных рассеивателей на основе интегральных уравнений первого рода // Труды LXIII научной сессии, посвященной дню радио (Москва, 14 – 15 мая 2008 г.). Москва, 2008. С.297–298.

48. Бузова М.А. Использование конечно-разностной аппроксимации градиента скалярного потенциала при интегрировании особенностей в задачах дифракции на поверхностных рассеивателях // Вестник СОНИИР. 2008. №2(20). С.50–53.

49. Бузов А.Л., Бузова М.А., Трофимов А.П. Программная реализация метода электродинамического анализа сложных антенных комплексов, основанного на комбинировании уравнений Фредгольма первого и второго рода, двумерных интегральных уравнений и физико-оптических моделей // Девятая международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТиТТ (Казань, 25-27 ноября 2008 г.): Тезисы докладов. Казань: КГТУ, 2008. С.296–297.

50. Бузова М.А. Решение задачи дифракции на металлическом диске с помощью различных методов // Вестник СОНИИР. 2009. №2(24). С.26–29.

51. Бузова М.А., Минкин М.А. Повышение эффективности методов расчета развязки между близко расположенными антеннами // Вестник СОНИИР. 2009. №2(24). С.30–34.

52. Бузова М.А., Юдин В.В. Учет влияния опор на характеристики ан-

тени на основе строгих электродинамических методов // Вестник Сониир. 2009. №2(24). С.35–41.

53. Патент № 2366044 Россия, МПК7 Н 01 Q 3/26. Способ формирования диаграммы направленности адаптивной антенной решетки / Бузов А.Л., Бузова М.А., Казанский Л.С., Юдин В.В. 27.08.09, Бюл. № 24.

54. Бузова М.А., Гончарук О.Б., Скоробогатов Е.Г. Экспериментальные исследования явления дифракции на плоских электрически протяженных экранах круглой и прямоугольной формы // Вестник Сониир. 2009. №3(25). С.54–60.

55. Бузова М.А., Юдин В.В. Электродинамическая модель бортового комплекса радиоэлектронных средств космического аппарата, ориентированная на использование комбинированных методов анализа // Труды НИИР. 2009. №4. С.45–48.

56. Бузова М.А. Модифицированный метод физической оптики // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио (Москва, 19 – 20 мая 2010 г.). Вып. LXXV. М., 2010. С.310–311.

57. Бузова М.А. Исследование свойств ядра интегрального уравнения Фредгольма второго рода, имеющего смысл граничного условия для тангенциальной компоненты магнитного поля, в задачах о рассеянии на идеально проводящих рассеивателях конечной толщины // Вторая международная конференция «Математическая физика и ее приложения»: Материалы междунар. конф. (Самара, 29 августа – 4 сентября, 2010 г.) / Под ред. Член-корр. РАН И.В. Воловича и д.ф.-м.н., проф. Ю.Н. Радаева. Самара: ООО «Книга», 2010. С.67–69.

58. Бузова М.А. Об использовании комбинированных методов электродинамического анализа при исследовании процессов взаимодействия антенн локальных группировок радиоэлектронных средств // 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрымКo'2010) (Севастополь, 13 – 17 сентября 2010 г.): материалы конференции в 2-х томах. Т.2. Севастополь: Вебер, 2010. С.585–586.

59. Buzova M.A. Experimental verification of new hybrid MM/PO method // The 27th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (March 27-31, 2011, Williamsburg, Virginia, USA). P.512–516. [Электронный ресурс].

60. Бузова М.А. Интегральное уравнение второго рода относительно суммарного тока в задачах электродинамического анализа листовых рассеивателей // XVII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 12 – 14 апреля 2011 г.). Воронеж, 2011. С.1300–1306.

61. Бузова М.А. Исследование рассеяния электромагнитных волн на листовых рассеивателях конечной толщины комбинированным методом // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С.316–319.

62. Бузова М.А. Интегральное уравнение второго рода, учитывающее физико-оптическое решение, в задачах электродинамического анализа поверхностных рассеивателей // X Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы. Самара: ОАО «Книга», 2011. С.145–146.

63. Buzova M.A. Method of electrodynamical analysis of complex antennas systems // VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques (September 20-23, 2011, Kyiv, Ukraine). P.285–287.

64. Бузова М.А. Вопросы математического моделирования эклектичных антенных систем // V Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 21 – 25 ноября 2011 г.). М.: ООО «Информпресс-94», 2011. С.44–47.

65. Бузова М.А. Исследования вопросов корректности задачи и устойчивости решения систем интегральных уравнений Фредгольма первого и второго рода // Третья международная конференция «Математическая физика и ее приложения» (Самара, 27 августа – 1 сентября 2012 г.): Материалы конф. / Под ред. И.В. Воловича и В.П. Радченко. Самара: СамГТУ, 2012. С.72–73.

66. Buzova M.A., Filippov D.V. Mathematical Methods for Modeling of Antenna Systems Located in Limited Space Areas // Proceedings of the 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Kharkiv, Ukraine, August 28-30 2012). P.489–491. [Электронный ресурс].

67. Buzova M.A. Efficiency of the Novel Hybrid Methods Based on Magnetic Field Integral Equations // Proceedings of the 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (Cape Town, South Africa, September 2-7 2012). P. 206–207. [Электронный ресурс].

68. Бузова М.А. Комбинированные методы математического моделирования сложных электродинамических систем // Физика и технические приложения волновых процессов: Труды XI Международной научно-технической конференции / Под общ. ред. Ю.Е. Мительмана. Екатеринбург: Из-во Урал. ун-та, 2012. С.17–18.