На правах рукописи

Келлер Юрий Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ НА СТРУКТУРАХ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕЛА И ТОНКИХ ПРОВОДНИКОВ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре исследования операций факультета прикладной математики и кибернетики ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Дмитренко Анатолий Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Нагорский Пётр Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор Гошин Геннадий Георгиевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится 30 октября 2008 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.267.08 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корп. 2, ауд. 102.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Отзывы на автореферат, в 2-х экземплярах, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ученому секретарю ТГУ Буровой Н.Ю.

Автореферат разослан 15 сентября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.267.08,
доктор технических наук, профессор А.В. Скворцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Задачи рассеяния электромагнитного поля на структурах, состоящих из диэлектрического тела и тонких проводников, возникают в различных областях науки и техники, например, в антенной технике и радиолокации. Тонкие проводники часто используются в качестве передающих и приёмных антенн. При расположении таких антенн вблизи диэлектрических тел возникает проблема оценки влияния диэлектрических тел на параметры антенны, решение которой требует решения поставленной задачи рассеяния. В радиолокации при оценке радиолокационной заметности сложного объекта часто возникает ситуация, когда часть объекта – это диэлектрическое тело с расположенными вблизи него тонкими проводниками. Расчет сечения рассеяния такой части объекта также требует решения поставленной задачи.

Спецификой электромагнитных процессов в структурах из нескольких тел является то, что вторичные токи на каждом из тел структуры наводятся не только возбуждающим (первичным) электромагнитным полем, но и полем вторичных токов всех соседних тел, т.е. вторичные токи всех тел структуры оказываются взаимосвязанными. В этом заключается суть электромагнитного взаимодействия тел структуры. Если тела структуры находятся далеко друг от друга, электромагнитным взаимодействием тел можно пренебречь и рассматривать рассеянное поле как наложение полей, рассеянных одиночными телами структуры.

Если расстояние между телами структуры много меньше длины волны возбуждающего поля, то электромагнитным взаимодействием тел структуры нельзя пренебречь. В этом случае совокупность тел структуры необходимо рассматривать как единое целое и решать граничную задачу для всей совокупности тел (в полной электродинамической постановке). Если структура состоит из диэлектрического тела и идеально проводящих проводников, эта граничная задача формулируется следующим образом: при заданном стороннем возбуждении найти решения уравнений Максвелла во внешней среде и внутри диэлектрического тела, удовлетворяющие граничным условиям как на поверхности диэлектрического тела, так и на поверхностях всех проводников, а также условиям излучения на бесконечности во внешней среде.

Анализ доступной нам литературы показал, что работы, в которых рассматривается решение задачи рассеяния электромагнитной волны на структурах, состоящих из диэлектрического тела в присутствии тонких проводников, отсутствуют. Поэтому актуальными являются разработка численных методов для моделирования электромагнитного рассеяния на обсуждаемой структуре, а также исследование её характеристик рассеяния.

В принципе, для моделирования электромагнитного рассеяния на обсуждаемых структурах применимы те же методы, что и для моделирования рассеяния на одиночном теле. Наиболее распространенными из них являются конечные методы, основанные на решении краевых задач в дифференциальной форме и методы интегральных уравнений, основанные на использовании

интегральных соотношений в теории электромагнитного поля. Решению задач дифракции с помощью конечных методов посвящены работы Вебба Д.П., Волакиса Ж.Л., Миттры Р., Мея К.К. и др. Применению метода интегральных уравнений для решения задач рассеяния электромагнитных волн посвящены работы Васильева Е.Н., Ильинского А.С., Кравцова В.В., Кресса Р., Свешникова А.Г. и др.

Однако эти методы обладают рядом недостатков. Основными из них являются следующие:

- для конечных методов – это необходимость распространения вычислений на всю рассматриваемую область пространства и получающиеся в результате этого чрезвычайно высокие, достигающие десятков тысяч, размерности систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ);
- для методов интегральных уравнений – это необходимость вычисления большого количества поверхностных или объемных интегралов при формировании матрицы соответствующей СЛАУ.

В последние годы для моделирования электромагнитного рассеяния в резонансном частотном диапазоне используют метод вспомогательных источников. Теоретические основы этого метода впервые были опубликованы в работах Купрадзе В.Д. (СССР) и Ясууры К. (Япония). В дальнейшем значительный вклад в развитие метода внесли Свешников А.Г., Еремин Ю.А., Кюркчан А.Г. (Россия), Хафнер Х. (Щвейцария), Левиатан Э. (Израиль) и др.

Суть этого метода заключается в том, что рассеянное поле в исследуемой области строится в виде суммы полей вспомогательных источников с неизвестными амплитудами, расположенных вне этой области. Поле, сформированное таким образом, удовлетворяет уравнениям Максвелла и условиям излучения на бесконечности. Неизвестные амплитуды определяются с использованием граничных условий.

Метод вспомогательных источников избегает проблем, свойственных конечным методам и методам интегральных уравнений. По этим причинам целесообразно использовать именно этот метод для моделирования электромагнитного рассеяния на рассматриваемых в диссертации структурах. Еще одной причиной такого выбора является накопленный ранее опыт использования метода вспомогательных источников для моделирования электромагнитного рассеяния на одиночном диэлектрическом теле и тонких проводниках.

Цель работы

Целью диссертации является математическое моделирование электромагнитного рассеяния в резонансной частотной области на структурах, состоящих из диэлектрического тела и расположенных вблизи него тонких проводников с помощью разработанной модификации метода вспомогательных источников.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обобщение вариантов метода вспомогательных источников, разработанных ранее для моделирования электромагнитного рассеяния на одиноч-

ном диэлектрическом теле и на структурах, состоящих из объёмных идеально проводящих тел и тонких проводников, на случай структур, состоящих из объёмного диэлектрического тела и расположенных вблизи него тонких проводников.

2. Исследование влияния параметров моделирования на точность моделирования и возможностей разработанной модификации метода вспомогательных источников для анализа закономерностей рассеяния конкретных структур.

Методы исследований

В ходе разработки и исследования модификации метода вспомогательных источников применялась теория дифференциальных уравнений в частных производных, аппарат теории матриц. Для решения задачи минимизации функционала невязки системы применялся метод сопряженных градиентов.

Достоверность

Достоверность результатов диссертации обеспечивается теоремами единственности решения задач рассеяния и проверяется контролем точности по критерию невязки граничных условий, а также совпадением полученных результатов в частных случаях с результатами других авторов, полученными иными методами.

Научная новизна работы

1. Впервые разработана модель поля, рассеянного структурой, состоящей из диэлектрического тела и тонких проводников.

2. В результате исследования влияния тонких проводников на бистатические сечения рассеяния диэлектрического тела установлено, что с помощью одного и особенно двух параллельных проводников, располагая их на соответствующем расстоянии, можно существенно уменьшить сечение обратного рассеяния диэлектрического тела.

3. Путем исследования влияния отклонений формы диэлектрического тела от осесимметричной на бистатические сечения рассеяния структуры, состоящей из диэлектрического тела и тонких проводников установлено, что даже небольшое отклонение формы тела от осесимметричной оказывает существенное влияние на сечение рассеяния в выделенном направлении.

Теоретическая значимость работы

Разработанная модификация метода вспомогательных источников может быть обобщена на случай более сложных структур, состоящих из нескольких диэлектрических тел в присутствии тонких проводников.

Практическая ценность работы

1. Создана программа для расчета характеристик рассеянного поля и контроля точности получаемых результатов.

2. Результаты анализа влияния объемного диэлектрического тела на распределение тока вдоль тонких проводников, расположенных вблизи тела, представляют интерес для специалистов в области разработки вибраторных антенн, предназначенных для работы вблизи диэлектрических объектов различной геометрической формы.

3. Результаты исследования влияния тонкого проводника на бистатические сечения рассеяния диэлектрического тела позволяют оценить изменения сечений рассеяния тел, которые возникают при размещении вблизи них проволочных антенн.

На защиту выносятся следующие положения

1. Модификация метода вспомогательных источников для математического моделирования электромагнитного рассеяния на структурах, состоящих из объемного диэлектрического тела и расположенных вблизи него тонких проводников.

2. Оптимальные в смысле достижения наивысшей точности решения при наименьших компьютерных затратах значения параметров моделирования.

3. Установленные в результате моделирования закономерности рассеяния электромагнитных волн на структурах, состоящих из диэлектрического эллипсоида и тонких проводников, и структурах, состоящих из одних тонких проводников.

Апробация работы

Основное содержание диссертации опубликовано в 17 работах, в том числе 6 статей, из них 4 в изданиях, рекомендованных списком ВАК. Полный список работ приведен в конце автореферата. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на:

1. IX Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и образование” (г. Томск, 25-29 апреля 2005г).

2. VII Международной школе-семинаре молодых ученых “Актуальные проблемы физики, технологий и инновационного развития” (Youth Phys’05) (г. Томск, 6-8 декабря 2005 г).

3. III Международной конференции студентов и молодых ученых “Перспективы развития фундаментальных наук” (г. Томск, 16-19 мая 2006 г).

4. X Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и образование” (г. Томск, 15-19 мая 2006 г).

5. IV Международной научно-практической конференции “Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития” (г. Томск, 31 октября – 3 ноября 2007 г).

Личный вклад соискателя

Теоретические основы изложенной в диссертации модификации метода вспомогательных источников разработаны соискателем совместно с научным руководителем. Компьютерная программа разработана и реализована соискателем самостоятельно. Все приведенные в диссертации и научных публикациях численные результаты также получены соискателем самостоятельно, научному руководителю принадлежит только определение направлений численных исследований.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, основного текста, заключения, списка использованной литературы (109 наименований). Основной текст состоит из трех глав, содержит 88 рисунков. Общий объем работы составляет 156 страниц, в том числе основной текст 144 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сделан обзор литературы, сформулированы цель работы, основные защищаемые положения, новизна, теоретическое и практическое значение выполненных исследований, отражены вопросы достоверности и апробации полученных результатов, приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе представлена математическая формулировка предложенной модификации метода вспомогательных источников для моделирования электромагнитного рассеяния на структурах, составленных из объемного диэлектрического тела и тонких проводников. Рассмотрен частный случай модификации, когда диэлектрическое тело отсутствует, а структура представляет собой совокупность непересекающихся тонких проводников. Дано описание компьютерной программы, реализующей представленную модификацию.

Геометрия задачи показана на рис. 1. Рассматривается стационарная задача рассеяния электромагнитного поля $\{\vec{E}_0, \vec{H}_0\}$ на структуре, состоящей из объемного диэлектрического тела D_i, ограниченного поверхностью S, с диэлектрической ε_i и магнитной μ_i проницаемостями и U тонких непересекающихся идеальных проводников, ограниченных поверхностями

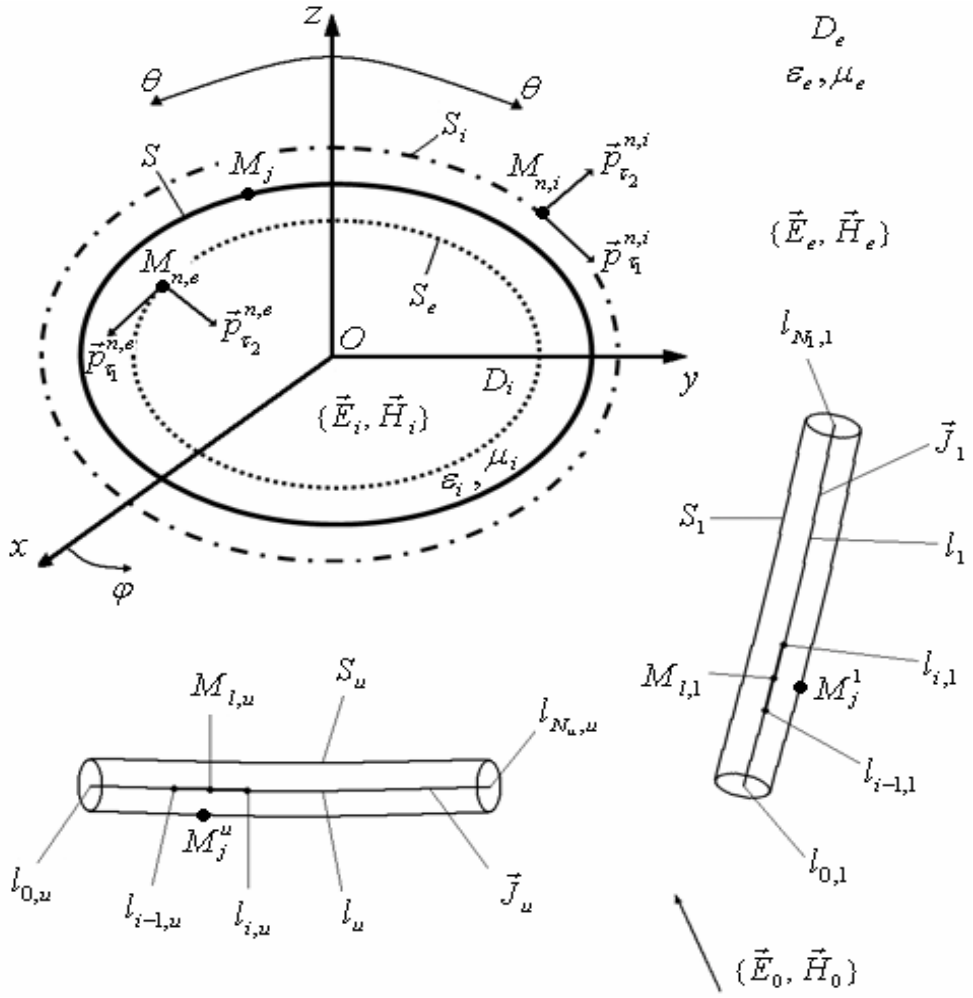

Рис. 1. Геометрия задачи

$S_u\,(u=1,2,...,U)$ и расположенных произвольным образом по отношению к телу D_i (зависимость от времени выбрана в виде $\exp(-i\omega t)$). Эта структура размещена в однородной безграничной среде D_e с диэлектрической и магнитной проницаемостями ε_e, μ_e в декартовой системе координат с центром, выбранным внутри диэлектрического тела. Требуется найти рассеянное поле $\{\vec{E}_e,\vec{H}_e\}$ в D_e.

Решение задачи строится следующим образом.

Вводятся две вспомогательные поверхности S_e и S_i, подобные поверхности диэлектрического тела S. Поверхность S_e расположена внутри диэлектрического тела, а поверхность S_i охватывает диэлектрическое тело. На поверхности S_e выбирается конечная совокупность точек $M_{n,e}$, в каждой из которых размещается пара вспомогательных независимых элементарных электрических диполей с моментами $\vec{p}_{\tau_1}^{\,n,e}$ и $\vec{p}_{\tau_2}^{\,n,e}$. Аналогичным образом на поверхности S_i выбирается конечная совокупность точек $M_{n,i}$, в каждой из которых размещается другая пара вспомогательных независимых элементарных электрических диполей с моментами $\vec{p}_{\tau_1}^{\,n,i}$ и $\vec{p}_{\tau_2}^{\,n,i}$. Внутри каждого из тонких проводников размещается непрерывно распределенный вспомогательный электрический ток.

Неизвестное рассеянное поле $\{\vec{E}_e,\vec{H}_e\}$ во внешней среде D_e представляется в виде суммы полей вспомогательных диполей, расположенных на вспомогательной поверхности S_e, и вспомогательных токов:

$$\begin{aligned}
&\vec{E}_e(M)=\frac{i\omega}{k_e^2}\{\sum_{n=1}^{N_e}\nabla\times(\nabla\times\vec{\Pi}_{n,e})+\sum_{u=1}^{U}\nabla\times(\nabla\times\vec{\Pi}_u)\},\\
&\vec{H}_e(M)=\frac{1}{\mu_e}\{\sum_{n=1}^{N_e}\nabla\times\vec{\Pi}_{n,e}+\sum_{u=1}^{U}\nabla\times\vec{\Pi}_u\},\\
&\vec{\Pi}_{n,e}=\Psi_e(M,M_{n,e})\vec{p}_\tau^{\,n,e},\ \vec{p}_\tau^{\,n,e}=p_{\tau_1}^{n,e}\vec{e}_{\tau_1}^{\,n,e}+p_{\tau_2}^{n,e}\vec{e}_{\tau_2}^{\,n,e},\\
&\vec{\Pi}_u=\int_{l_u}\Psi_e(M,M_{l,u})\vec{J}_u dl,\ M\in D_e.
\end{aligned}\tag{1}$$

Неизвестное рассеянное поле $\{\vec{E}_i,\vec{H}_i\}$ внутри диэлектрического тела представляется в виде суммы полей вспомогательных диполей, расположенных на вспомогательной поверхности S_i:

$$\begin{aligned}
&\vec{E}_i(M)=\frac{i\omega}{k_i^2}\sum_{n=1}^{N_i}\nabla\times(\nabla\times\vec{\Pi}_{n,i}),\ \vec{H}_i(M)=\frac{1}{\mu_i}\sum_{n=1}^{N_i}\nabla\times\vec{\Pi}_{n,i},\\
&\vec{\Pi}_{n,i}=\Psi_i(M,M_{n,i})\vec{p}_\tau^{\,n,i},\ \vec{p}_\tau^{\,n,i}=p_{\tau_1}^{n,i}\vec{e}_{\tau_1}^{\,n,i}+p_{\tau_2}^{n,i}\vec{e}_{\tau_2}^{\,n,i},\ M\in D_i.
\end{aligned}\tag{2}$$

В представлениях (1) и (2) $\Psi_e(M,M_{n,e})=\exp(ik_eR_{MM_{n,e}})/4\pi R_{MM_{n,e}}$; $\Psi_e(M,M_{l,u})=\exp(ik_eR_{MM_{l,u}})/4\pi R_{MM_{l,u}}$; $\Psi_i(M,M_{n,i})=\exp(ik_iR_{MM_{n,i}})/4\pi R_{MM_{n,i}}$;

$k_{e,i} = \omega\sqrt{\varepsilon_{e,i}\mu_{e,i}}$; $R_{MM_{n,e}}$ и $R_{MM_{l,u}}$ – расстояния от точки $M_{n,e}$ на вспомогательной поверхности S_e и точки $M_{l,u}$ на оси проводника с номером u до точки наблюдения M в D_e; $R_{MM_{n,i}}$ – расстояние от точки $M_{n,i}$ на вспомогательной поверхности S_i до точки M в D_i; $p_{\tau_1}^{n,e}$, $p_{\tau_2}^{n,e}$ $(n = 1,2,...,N_e)$ и $p_{\tau_1}^{n,i}$, $p_{\tau_2}^{n,i}$ $(n = 1,2,...,N_i)$ – неизвестные дипольные моменты; N_e и N_i – числа точек размещения диполей на вспомогательных поверхностях S_e и S_i; $\vec{J}_u$ $(u = 1,2,...,U)$ – неизвестные осевые вспомогательные токи; интегрирование в (1) проводится вдоль осей проводников l_u.

Представления (1) и (2) для рассеянных полей удовлетворяют уравнениям Максвелла и условиям излучения. Остаётся удовлетворить граничным условиям. Предварительно вводится кусочно-постоянная аппроксимация вспомогательных осевых токов. Линия l_u каждого тока $\vec{J}_u$ разбивается на N_u малых участков, в пределах каждого из которых ток можно считать постоянным, тогда выражение для $\vec{\Pi}_u$ в (1) можно приближенно записать в виде

$$\vec{\Pi}_u = \sum_{i=1}^{N_u} J_{u,i}\vec{e}_{u,i} \int_{l_{i-1,u}}^{l_{i,u}} \Psi_e(M, M_{l,u})dl, \tag{3}$$

где $J_{u,i}$ – величина тока на i-ом участке проводника с номером u, $\vec{e}_{u,i}$ – единичный вектор, направленный вдоль касательной в средней точке рассматриваемого участка, N_u – число участков разбиения осевого тока (элементов тока).

Далее строится СЛАУ для определения неизвестных дипольных моментов и элементов тока с использованием граничных условий на поверхностях диэлектрического тела и проводников, которые удовлетворяются методом коллокаций. Эта СЛАУ имеет вид

$$\begin{gathered}\vec{n}^{\,j} \times (\vec{E}_i^{\,j} - \vec{E}_e^{\,j}) = \vec{n}^{\,j} \times \vec{E}_0^{\,j},\ \vec{n}^{\,j} \times (\vec{H}_i^{\,j} - \vec{H}_e^{\,j}) = \vec{n}^{\,j} \times \vec{H}_0^{\,j},\ j = 1,2,...,L, \\ E_{e,u,l}^{j} = -E_{0,u,l}^{j},\ u = 1.2,...,U,\ j = 1,2,...,L_u.\end{gathered} \tag{4}$$

В верхней подсистеме j обозначает точку коллокации на поверхности диэлектрического тела; L – число точек коллокации на поверхности диэлектрического тела. В нижней подсистеме j обозначает точку коллокации на поверхности проводника с номером u; L_u – число точек коллокации на поверхности проводника с номером u; $E_{e,u,l}^{j}$ и $E_{0,u,l}^{j}$ – составляющие рассеянного и падающего полей, направленные вдоль осей проводников (азимутальными составляющими токов на поверхностях проводников пренебрегаем).

Задача решения системы (4) заменяется эквивалентной задачей минимизации функционала

$$\Phi = \sum_{j=1}^{L} \{ | \vec{n}^{\,j} \times (\vec{E}_i^{\,j} - \vec{E}_e^{\,j}) - \vec{n}^{\,j} \times \vec{E}_0^{\,j} |^2 + \frac{\mu_e}{\varepsilon_e} | \vec{n}^{\,j} \times (\vec{H}_i^{\,j} - \vec{H}_e^{\,j}) - \vec{n}^{\,j} \times \vec{H}_0^{\,j} |^2 +$$

$$+ \sum_{u=1}^{U} \sum_{j=1}^{L_u} | E_{e,u.l}^{j} + E_{0,u.l}^{j} |^2 , \qquad (5)$$

имеющего смысл квадрата нормы вектора невязки системы (4). Задача минимизации решается методом сопряженных градиентов.

После решения задачи минимизации функционала (5) все необходимые характеристики рассеянного поля определяются из (1).

Контроль точности полученного решения осуществляется на основе критерия невязки граничных условий. В качестве характеристики точности выбрано значение относительной нормы невязки граничных условий на совокупности точек, промежуточных по отношению к точкам коллокации, т.е. значения величины

$$\Delta = (\Phi' / \Phi_0)^{1/2}, \ \Phi_0 = \sum_{j'=1}^{L'} \{ | \vec{n}^{\,j'} \times \vec{E}_0^{\,j'} |^2 + \frac{\mu_e}{\varepsilon_e} | \vec{n}^{\,j'} \times \vec{H}_0^{\,j'} |^2 \} + \sum_{u=1}^{U} \sum_{j'=1}^{L'_u} | E_{0,u,l}^{j'} |^2 , \qquad (6)$$

где Φ' – значение функционала (5) на совокупности промежуточных точек, Φ_0 – значения нормы падающего поля на этой же совокупности точек, L' – число промежуточных точек, L'_u – число промежуточных точек на поверхности u-го проводника.

Во второй главе изложены результаты исследований влияния параметров моделирования и геометрических размеров рассеивателей на точность моделирования. В частности, изложены результаты исследований влияния взаимного расположения вспомогательных поверхностей на величину нормы невязки граничных условий на поверхностях структуры, влияния чисел элементов тока, чисел точек размещения вспомогательных диполей и чисел точек коллокации на поверхностях проводников и диэлектрического тела на эту же характеристику. Установлено, что наличие тонких проводников вблизи диэлектрического тела оказывает несущественное влияние на характер зависимости нормы невязки граничных условий от положения вспомогательных поверхностей. Оптимальные значения параметров подобия, обеспечивающие минимальные значения невязки граничных условий, при наличии тонких проводников такие же, как и для одиночного рассеивателя. Для K_e они лежат в интервале $0{,}5 < K_e < 0{,}7$. Значения параметра подобия K_i, большие 3, не оказывают существенного влияния на точность получаемого решения. Также установлено, что при увеличении числа элементов разбиения осевого тока происходит уменьшение нормы невязки граничных условий. Рекомендовано выбрать число элементов разбиения осевого тока не превышающим 40 на длину волны. Показано, что при оптимальном выборе расположения вспомогательных поверхностей имеет место монотонное убывание нормы невязки граничных условий с ростом числа точек размещения диполей и точек коллокации. Начиная с некоторого количества точек размещения диполей и точек коллокации на поверхности диэлектрического тела наступает состояние “насыщения”.

При дальнейшем увеличении числа точек размещения диполей и точек коллокации не происходит существенного повышения точности получаемого решения (уменьшения нормы невязки граничных условий). Состояние “насыщения” имеет место, когда расстояние между соседними точками коллокации имеет порядок $0{,}1\lambda$. На основании этого рекомендовано выбрать число точек коллокации на поверхности диэлектрического тела таким, чтобы расстояние между ними было приблизительно равно $0{,}1\lambda$. Изложены также результаты исследований зависимости нормы невязки граничных условий от длины проводника при фиксированных параметрах метода и диэлектрического тела и зависимости нормы невязки от геометрических размеров эллипсоида при фиксированных параметрах метода и длинах проводников.

В третьей главе продемонстрированы возможности разработанной модификации метода вспомогательных источников. Данный раздел начинается с изложения результатов сравнения распределений тока и бистатических сечений рассеяния, полученных с помощью предложенного метода, с опубликованными результатами других авторов (Марков Г.Т. Антенны. Л.: Госэнергоиздат, 1960; Harrington R.F. Time-Harmonic Electromagnetic Fields. New York: McGraw-Hill, 1961, Ch. 3; Rother T., Schidt K. The discretized Mie-formalism for plane wave scattering on dielectric objects with non-separable geometries // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 1996. – V. 55, №5. – P.615–625). Далее рассмотрено влияние тонких проводников на бистатические сечения рассеяния диэлектрического тела в форме эллипсоида. Помимо этого, рассмотрено влияние неосесимметричности диэлектрического тела на бистатические сечения рассеяния и влияние диэлектрического тела на распределение тока вдоль проводников. Большое внимание уделено также исследованию взаимного влияния тонких проводников на токовые распределения и бистатические сечения рассеяния.

Некоторые результаты представлены на рис. 2-3.

На рис. 2 показана зависимость сечения обратного рассеяния от расстояния между эллипсоидом и проводником (для структуры с одним проводником) или от расстояния между эллипсоидом и ближайшим к нему проводником (для структуры с двумя проводниками). Проводники расположены со стороны падающей волны симметрично относительно поверхности эллипсоида. Параметры эллипсоида, длины и радиусы проводников выбраны равными: $k_e a = k_e b = 3$, $k_e c = 4$, $\varepsilon_i / \varepsilon_e = 8$, $\mu_i / \mu_e = 1$, $l = 0{,}9\lambda$, $r = 0{,}02\lambda$. Параметры метода выбраны следующими: параметры подобия внутренней и внешней вспомогательных поверхностей $K_e = 0{,}6$, $K_i = 4$, количества точек размещения диполей на внутренней и внешней вспомогательных поверхностях $N_e = N_i = 676$, число точек коллокации L на поверхности эллипсоида выбрано равным 1352, количество элементов разбиения осевого тока проводника выбрано равным 35. Для последней структуры расстояние между проводниками Δz_1 сохранялось постоянным и равным $0{,}1\lambda$. Полуоси $k_e a$, $k_e b$ и $k_e c$

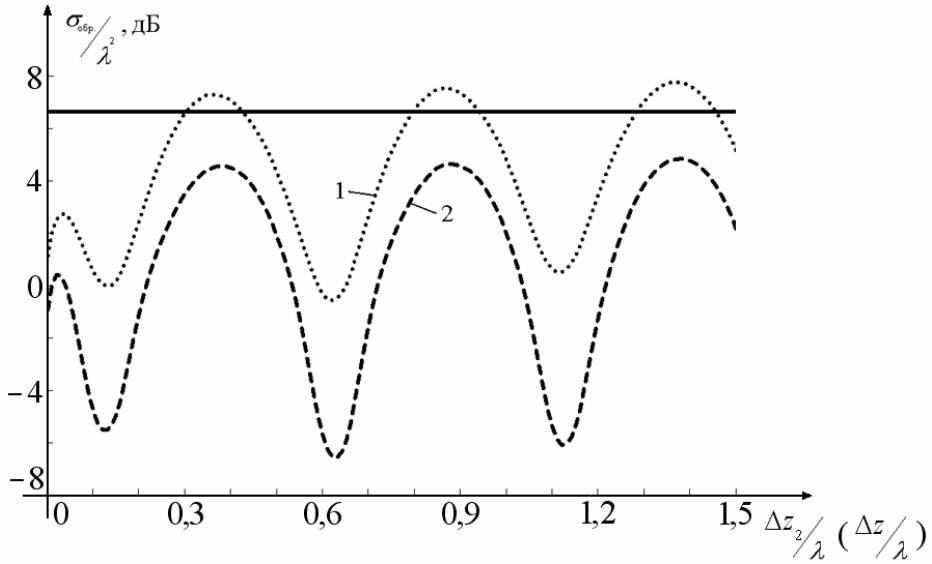

Рис. 2. Зависимость сечения обратного рассеяния от положения проводников относительно диэлектрического эллипсоида

направлены вдоль осей x, y и z соответственно, проводники ориентированы вдоль оси x. По оси абсцисс отложено расстояние в длинах волн от нижней точки эллипсоида до проводника (в случае двух проводников – расстояние до ближайшего проводника); по оси ординат – сечение обратного рассеяния $\sigma_{\text{обр.}}$, нормированное на квадрат длины волны, в децибелах. Кривая 1 относится к структуре, содержащей один проводник, кривая 2 – к структуре, содержащей два проводника. Сплошной прямой линией на рисунке показано сечение обратного рассеяния одиночного эллипсоида (эллипсоида без проводников).

Полученные результаты позволяют заключить, что с помощью одного и особенно двух параллельных проводников, располагая их на соответствующем расстоянии, можно существенно (на 10 и более децибел) уменьшить сечение обратного рассеяния диэлектрического тела.

Рис. 3 демонстрирует влияние неосесимметричности диэлектрического тела на бистатические сечения рассеяния структуры, состоящей из эллипсоида с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_i / \varepsilon_e = 8$ и одного проводника, находящегося на расстоянии $\Delta z = 0{,}1\lambda$ от поверхности эллипсоида со стороны падающей волны. Длина проводника была выбрана равной $0{,}9\lambda$, а радиус – равным $0{,}02\lambda$. Полуоси эллипсоида $k_e a$, $k_e b$ и $k_e c$ направлены вдоль осей x, y и z соответственно. Параметры метода были выбраны следующими: параметры подобия внутренней и внешней вспомогательных поверхностей $K_e = 0{,}6$, $K_i = 4$, количества точек размещения диполей на внутренней и внешней вспомогательных поверхностях $N_e = N_i = 484$, число точек коллокации L на поверхности эллипсоида выбрано равным 968, количество элементов разбиения осевого тока проводника выбрано равным 35. Результаты приведены в E-плоскости.

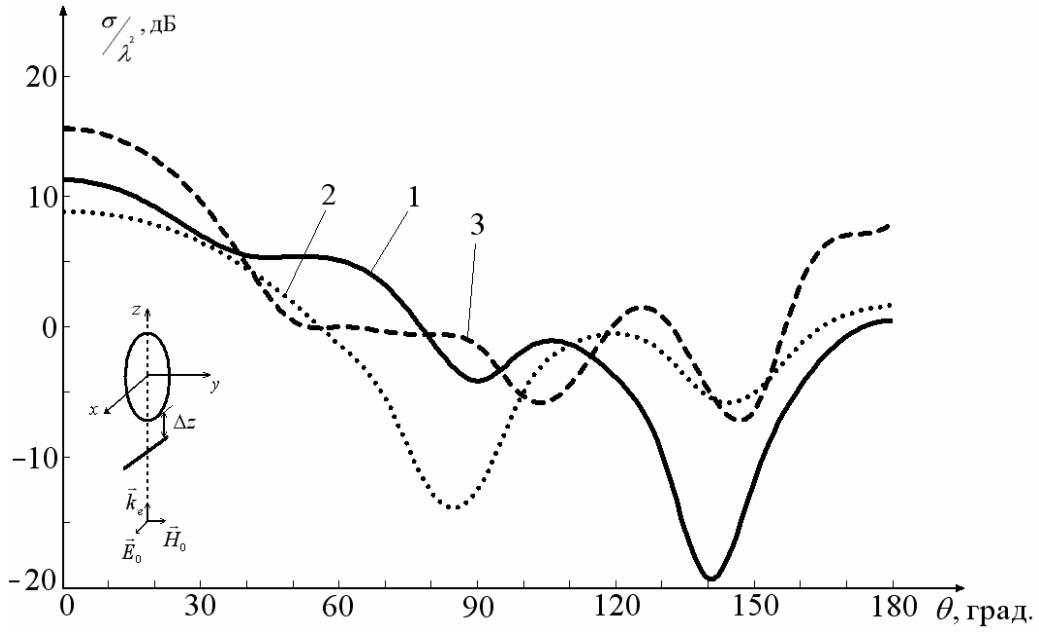

Рис. 3. Бистатические сечения рассеяния структуры из эллипсоида и проводника при различных значениях полуосей эллипсоида

Кривая 1 относится к случаю, когда эллипсоид характеризуется геометрическими параметрами $k_e a = k_e b = 3$, $k_e c = 4$, т.е. является осесимметричным телом; кривая 2 – к случаю, когда полуось $k_e a$ уменьшена на $0{,}05\lambda$, т.е. равна 2,68; кривая 3 – к случаю, когда полуось $k_e a$ уменьшена на $0{,}1\lambda$, т.е. равна 2,37; при этом значения полуосей $k_e b$ и $k_e c$ сохранялись неизменными. Таким образом, в последних двух случаях диэлектрическое тело (эллипсоид) теряет осевую симметрию.

Приведенные результаты показывают, что даже небольшое отклонение формы тела от осесимметричной оказывает существенное влияние на сечение рассеяния в выделенном направлении.

В заключении приведены основные выводы по результатам диссертационного исследования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Дмитренко А.Г., Келлер Ю.А. Компьютерное моделирование электромагнитного рассеяния на структурах из нескольких тонких проводников // Вестник Томского гос. ун-та. – 2006. – № 290. – С. 150–157.**
2. **Келлер Ю.А. Исследование электромагнитного рассеяния структурами, составленными из нескольких непересекающихся проводников // Известия Томского политехнического ун-та. – 2006. – Т. 309, № 4. – С. 15–20.**
3. **Дмитренко А.Г., Келлер Ю.А. Численный метод решения задач электромагнитного рассеяния на трехмерном магнитодиэлектрическом теле при наличии вблизи него тонких проводников // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, № 2. – С. 20–34.**

4. Дмитренко А.Г., Келлер Ю.А. Моделирование электромагнитного рассеяния на трехмерном магнитодиэлектрическом теле при наличии вблизи него тонких проводников // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, №2–3. – С. 74–81.

5. Дмитренко А.Г., Келлер Ю.А. Компьютерное моделирование электромагнитного рассеяния на структуре, состоящей из перпендикулярных проводников // Изв. вузов. Физика. – 2006. – №3. Приложение. – С. 298–299.
6. Келлер Ю.А. Компьютерное моделирование электромагнитного рассеяния структурами, составленными из нескольких тонких непересекающихся проводников // Вестник ТГПУ. – 2007. – Вып 6(69). – С. 16–21.
7. Дмитренко А.Г., Келлер Ю.А. Исследование взаимного влияния тонкопроволочных антенн // Электронные средства и системы управления: Труды III Международной научно-практической конференции 12–14 октября 2005. – Томск, 2005. Ч. 1. С. 152–155.
8. Келлер Ю.А. Численный метод решения задачи рассеяния электромагнитной волны структурой, состоящей из тонких проводников // Наука. Технологии. Инновации: Труды Всероссийской научной конференции молодых ученых 8–11 декабря 2005. – Новосибирск, 2006. Ч. 1. С. 130–131.
9. Келлер Ю.А. Рассеяние электромагнитных волн на тонком проводнике // Наука и образование: Труды IX Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 25–29 апреля 2005. – Томск, 2005. – Т. 1. Ч. 1. С. 55–62.
10. Келлер Ю.А. Метод решения задачи рассеяния электромагнитной волны на структуре из двух параллельных проводников // Математические методы в технике и технологиях: Труды XIX Международной научной конференции 30 мая–2 июня 2006. – Воронеж, 2006. Т. 8. С. 182–185.
11. Келлер Ю.А. Об одном методе решения задачи рассеяния электромагнитной волны на тонких проводниках // Перспективы развития фундаментальных наук: Труды III Международной конференции студентов и молодых ученых 16–19 мая 2006. – Томск, 2006. С. 164–165.
12. Келлер Ю.А. Метод решения задачи рассеяния электромагнитной волны на структуре из двух проводников // Наука и образование: Труды X Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 15–19 мая 2006. – Томск, 2006. Т. 1. Ч. 2. С. 158–164.
13. Дмитренко А.Г., Келлер Ю.А. Исследование влияния диэлектрических тел на распределения тока вдоль проводников // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: Труды IV Международной научно-практической конференции 31октября–3 ноября 2007. – Томск, 2007. Ч. 1. С. 180–182.
14. Келлер Ю.А. Об одном численном методе решения задачи рассеяния электромагнитной волны на диэлектрическом теле в присутствии тонких проводников // Наука. Технологии. Инновации: Труды Всероссийской научной конференции молодых ученых 6–9 декабря 2007. – Новосибирск, 2007. Ч. 1. С. 126–127.

15. Келлер Ю.А. Моделирование рассеяния электромагнитной волны двумя параллельными проводниками // VI Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых) 29–31 октября 2005: Тез. докл. – Новосибирск, 2005. – С. 39.
16. Келлер Ю.А. Новый подход к решению задач рассеяния электромагнитных волн на тонких проводниках // Фундаментальные науки – специалисту нового века: Тез. докл. VI Региональной студенческой конференции 25–27 апреля 2006. – Иваново, 2006. С. 298.
17. Келлер Ю.А. Моделирование рассеяния электромагнитной волны на диэлектрическом теле в присутствии проводника // VII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых) 1–3 ноября 2006: Тез. докл. – Красноярск, 2006. С. 53.