

На правах рукописи

Тихонов Роман Игоревич

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)"

Научный руководитель:

д. т. н., проф. Андрей Дмитриевич Григорьев

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Андрей Борисович Козырев,

Кандидат физико-математических наук, доцент Владимир Николаевич Титов

Ведущая организация:

ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова"

Защита состоится 23 декабря 2009 г. в _____ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

Автореферат разослан " " ноября 2009 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
к. т. н., доцент

Е. А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Стремительное развитие микроволновых телекоммуникационных систем, в том числе систем сотовой связи, сопровождается быстрым увеличением степени интеграции и расширением функциональности отдельных устройств. Так, по "сложности на кубический дюйм" мобильные телефоны превосходят почти все современные устройства. Одним из самых ответственных узлов телефона является его антенна, которая должна удовлетворять одновременно целому ряду взаимно противоречивых требований. Антенна должна быть малогабаритной, простой и дешевой в производстве, но в то же время обеспечивать высокую эффективность приема и передачи. Она должна эффективно работать в нескольких диапазонах частот, соответствующих различным стандартам мобильной связи, а кроме этого, обеспечивать совместную работу с антеннами цифрового телевидения, BlueTooth, WiFi и т. п. На работу антенны не должны оказывать существенное влияние близко расположенные детали телефона, а также части тела пользователя.

Этот, далеко не полный перечень требований делает разработку антенны для современного сотового телефона одной из сложнейших проблем, которую приходится решать разработчикам. При этом проведение натурных экспериментов требует использования дорогого измерительного оборудования, отличается большой трудоемкостью и невысокой точностью получаемых результатов. Поэтому трудно переоценить роль математического моделирования в процессе проектирования не только сотовых телефонов, но и других сложных микроволновых устройств.

Появление первых численных методов и программ расчета волновых электромагнитных полей относится к середине 60-х годов прошлого века. С тех пор это направление быстро развивалось и к концу прошлого века превратилось в самостоятельную отрасль науки – вычислительную электродинамику. В настоящее время разработаны и используются целый ряд коммерческих программ анализа и оптимизации микроволновых систем (Ansoft HFSS, CST Microwave Studio, SPEAG SEMCAD и др.) позволяющий рассчитывать электромагнитное поле и параметры сложных электродинамических систем.

К сожалению, применение этих программ для расчета высокочастотного тракта сотовых телефонов не всегда возможно ввиду наличия в конструкции телефона множества малоразмерных деталей сложной формы, выполненных из различных материалов, необходимости проведения расчетов в широкой полосе частот, необходимости расчета таких специфических параметров, как удельная поглощаемая мощность в теле пользователя. Немаловажную роль играет и высокая стоимость лицензии на использование программного средства, достигающая 100 000 долларов в год. Поэтому разработка оригинальных программных средств, ориентированных на электродина-

мическое моделирование сложных микроволновых устройств является **актуальной научной проблемой**.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма и программы электродинамического анализа и оптимизации сложных микроволновых устройств, которая может быть использована в процессе проектирования высокочастотных трактов современных сотовых телефонов и других систем.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

- На основе анализа особенностей подлежащих расчету микроволновых устройств выбрать численный метод решения уравнений электродинамики с учетом свойств материалов и граничных условий.
- Разработать эффективный метод построения сетки, покрывающей расчетную область.
- Разработать алгоритм построения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и вычисления коэффициентов системы.
- Провести анализ обусловленности СЛАУ и выбрать электродинамическую формулировку, обеспечивающую наилучшую обусловленность и отсутствие ложных решений.
- Проанализировать известные методы решения СЛАУ и выбрать наиболее эффективный метод.
- Разработать программу расчета на языке высокого уровня C++.
- Провести верификацию программы, оценить погрешность расчета и требуемые вычислительные ресурсы.
- Провести расчеты волноводов, коаксиальных и микрополосковых линий передачи, объемных резонаторов, антенн, выполнить сравнение результатов расчета с данными эксперимента и результатами расчета по другим программам.

Методы исследования.

В работе, в основном, используется теоретический метод исследования и метод вычислительного эксперимента. Для верификации алгоритмов и программ используются данные экспериментов, предоставленные другими исследователями, а также результаты аналитических расчетов и расчетов по другим программам.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Выбранный метод векторных конечных элементов и алгоритм его реализации, основанные на использовании уравнения второго порядка относительно напряженности электрического поля, позволяют обеспечить наиболее точную аппроксимацию граничных условий математических моделей микроволновых устройств, быстрое вычисление матричных элементов и по-

строить СЛАУ с размерностью более миллиона, имеющую приемлемую обусловленность глобальной матрицы.

2. Предложенный метод двухступенчатой генерации конечно-элементной сетки обеспечивает эффективное её построение для реальных моделей микроволновых устройств за приемлемое время даже при наличии ошибок в импортированной геометрической модели. При этом число конечных элементов сетки может превышать миллион.
3. Предложенная реализация многоуровневого решателя на основе метода Шварца и иерархических систем векторных базисных функций позволяет обеспечить практически постоянную скорость сходимости для задач различной размерности. При этом сокращается время анализа сложных микроволновых устройств и уменьшается погрешность получаемых результатов.
4. Совокупность методических и алгоритмических решений, реализованная в разработанной программе, позволяет с высокой точностью рассчитывать электромагнитное поле, параметры рассеяния, диаграмму направленности и другие характеристики сложных микроволновых устройств.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Проведено сравнение алгоритмов решения краевых задач электродинамики методом векторных конечных элементов (МВКЭ), основанных на уравнениях для напряженности электрического поля и потенциалов, а также на методе графов. Показано, что хотя использование уравнений для потенциалов и метода графов обеспечивает более быструю сходимость итерационных методов решения матричных уравнений, при использовании прямых методов решения предпочтительнее использование уравнения относительно напряженности электрического поля.

Предложен и реализован метод двухступенчатой генерации конечно-элементной сетки, использующий на первом этапе разбиение на параллелепипеды, а на втором – на тетраэдры. Метод нечувствителен к ошибкам, геометрической модели, возникающим на стадии конструирования системы, и позволяет в несколько раз сократить время построения сетки.

Разработан алгоритм использования иерархической системы базисных функций и реализован многоуровневый решатель на основе метода Шварца.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

Разработанные методы и алгоритмы позволили создать программу расчета волнового электромагнитного поля в ближней и дальней зоне излучения, распределения поверхностных токов и удельной поглощаемой мощности, собственных частот и собственных видов колебаний (волн), а также параметров рассеяния микроволновых устройств.

Разработан алгоритм двухуровневого построения сетки, нечувствительный к ошибкам импортированной геометрической модели и значительно ускоряющий процесс генерации сетки.

Разработанная программа позволяет рассчитывать современные сложные микроволновые устройства без упрощения их геометрической модели.

Реализация и внедрение результатов исследования:

1. На основе описанных принципов разработана программа моделирования электромагнитного поля и параметров сложных микроволновых устройств «Radio Frequency Simulator» (далее по тексту RFS), не уступающая по точности и скорости решения лучшим известным коммерческим программам.
2. Программа RFS используется в «LG Electronics Inc.» в процессе разработки новых моделей сотовых телефонов.
3. Учебный вариант программы используется в учебном процессе кафедр радиотехнической электроники и физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» для подготовки магистров по инновационной магистерской образовательной программе «Микроволновая и телекоммуникационная электроника», а также в дисциплине "Численные методы прикладной электроники и электродинамики" для аспирантов специальностей 01.04.03 – Радиофизика, 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника на квантовых эффектах, 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника, 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники, 05.09.10 – Электротехнология.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах:

1. Научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета (ЛЭТИ) (2003 – 2009),
2. East-West Workshop "Advanced Techniques in Electromagnetics", Warsaw, Poland (2004),
3. Международная научно-техническая конференция, посвященная 110-летию изобретения радио и 75-летию СГТУ. Саратов, Россия (2005),
4. 8-th international workshop on finite elements for microwave engineering. Stellenbosch, South Africa (2006),
5. 7-я международная научно-технической конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Саратов, Россия (2006),
6. Научно-технический семинар "Современные проблемы техники и электроники СВЧ", Санкт-Петербург (2006),
7. 40-th annual international microwave power symposium IMPI, Boston, USA (2006),
8. 18-я международная конференция "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь, Украина (2008),

9. 9-th international workshop on finite elements for microwave engineering, Bonn, Germany (2008),
10. 8-я международная конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Саратов, Россия (2008),
11. Научно-технический семинар "Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике", Санкт-Петербург (2008).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 13 работах, из них: 2 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК РФ, 11 докладов, получивших одобрение на международных, всероссийских и межвузовских научных конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Она изложена на 110 страницах машинописного текста, включает 47 рисунков, 12 таблиц и содержит список литературы из 98 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко обоснована актуальность проблемы, ее научная новизна, сформулированы цель и задачи работы, приведены основные результаты работы и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит краткое описание конструкции высокочастотного тракта сотового телефона, характеристик и параметров различных типов антенн. Даны определения основных параметров и характеристик антенн, знание которых необходимо для оптимального проектирования телефона. Отмечены трудности, возникающие при разработке антенны, базирующейся на эксперименте и роль математического моделирования.

Рассмотрены основные уравнения и граничные условия, совокупность которых образует краевую или начально-краевую задачу электродинамики. Перечислены основные этапы численного решения этой задачи.

Кратко описаны наиболее распространенные численные методы расчета волновых электромагнитных полей – метод конечных разностей во временной области (КРВО), метод векторных конечных элементов (МВКЭ) и метод моментов (ММ). Приведены краткие характеристики наиболее эффективных коммерческих программ расчета волновых электромагнитных полей, проведен анализ их достоинств и недостатков. Показано, что для анализа устройств, содержащих большое число деталей, выполненных из различных материалов и имеющих сложную форму поверхности, наиболее эффективным является МВКЭ в частотной области.

Во второй главе описан алгоритм расчета электромагнитного поля методом векторных конечных элементов. В качестве основного выбрано уравнение второго порядка относительно комплексной амплитуды напряженности электрического поля E

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) + k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = \eta_0 k_0 \mathbf{J}, \quad (1)$$

где $k_0 = \omega / c$ – волновое число в свободном пространстве, ω – круговая частота, c – скорость света, ε_r, μ_r – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, \mathbf{J} – комплексная амплитуда плотности стороннего электрического тока. Уравнение (1) необходимо решить в некоторой области V , ограниченной поверхностью S . На поверхности должны быть заданы определенные граничные условия (ГУ).

В соответствии с методом, вся расчетная область делится на большое число подобластей (конечных элементов, КЭ), плотно заполняющих область. В каждом КЭ вводится система финитных векторных базисных функций $\{\mathbf{w}_n\}$, отличных от нуля только внутри данного элемента, и неизвестное поле внутри КЭ аппроксимируется линейной комбинацией базисных функций:

$$\mathbf{E}^{(k)} = \sum_{i=1}^{N_k} x_i \mathbf{w}_i^k. \quad (2)$$

Используя (2) и применив метод Бубнова-Галеркина, вместо дифференциального уравнения (1) получаем систему линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{QX} = (\mathbf{R} + \mathbf{T} + \mathbf{S})\mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (3)$$

где \mathbf{R} , и \mathbf{T} – квадратные матрицы размерности N , (N – общее число базисных функций), с элементами

$$r_{mn} = \int_{V_k} [(\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{w}_m)(\nabla \times \mathbf{w}_n)] dV; \quad (4)$$

$$t_{mn} = k_0^2 \int_V \varepsilon_r \mathbf{w}_m \mathbf{w}_n dV, \quad (5)$$

\mathbf{S} – квадратная матрица порядка N , вид элементов которой определяется граничными условиями задачи, \mathbf{B} – вектор-столбец возбуждения размерности N с элементами

$$b_m = -i k_0 \eta_0 \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{w}_m dV, \quad (6)$$

где $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ – характеристическое сопротивление свободного пространства, m, n – глобальные номера базисных функций. Индекс номера КЭ в формулах (4) – (6) опущен, а интегрирование ведется по объему конечного элемента, которому принадлежат базисные функции \mathbf{w}_m и \mathbf{w}_n .

В данной работе были выбраны конечные элементы в виде тетраэдров, так как такие элементы хорошо аппроксимируют криволинейные поверхности. В качестве базисных функций низшего порядка для этих элементов выбраны функции Уитни [1], ассоциированные с ребрами тетраэдра ($N_k = 6$). Эти функции имеют нулевую дивергенцию, что обеспечивает отсутствие ложных "градиентных" решений. В работе используются также базисные функции более высокого порядка ($N_k = 20$), связанные с ребрами (по 2 функции на ребро) и гранями (по 2 функции на грань) тетраэдров. Совокупность этих функций образует иерархический базис, т. е. функции более высокого порядка включают как подмножество функции более низкого порядка. Такой вы-

бор базисных функций позволил построить многоуровневый решатель. В работе получены аналитические формулы, позволяющие вычислять матричные элементы (4) и (5) для тетраэдров произвольной формы и базисных функций разного порядка.

Большое значение для реализации метода имеет аппроксимация граничных условий, т. е. вычисление элементов матрицы \mathbf{S} . Для ГУ типа электрической стенки коэффициенты $x_k = 0$ и соответствующие строки и столбцы глобальной матрицы вычеркиваются. Для магнитной стенки элементы $s_{mn} = 0$. Для границы с поверхностным сопротивлением Z_s (импедансной) получена формула

$$s_{mn} = \frac{ik_0\eta_0}{Z_s} \int_S (\mathbf{n} \times \mathbf{w}_m) \cdot (\mathbf{n} \times \mathbf{w}_n) dS, \quad (7)$$

где интегрирование ведется по грани тетраэдра, лежащей на импедансной поверхности, \mathbf{n} – орт внешней нормали к ней. Получены также выражения для матричных элементов, соответствующих возбуждающей поверхности (задана касательная составляющая электрического поля), и поверхности с граничными условиями излучения первого и второго порядка (абсорбционными граничными условиями, АГУ). Эти выражения применяются при расчете поля излучения, так как расчетную область приходится искусственно ограничивать замкнутой поверхностью, сквозь которую электромагнитная волна должна проходить без отражений.

После того, как вычислены все матричные элементы данного тетраэдра, можно построить его локальную матрицу, содержащую 36 элементов для базисных функций низшего порядка и 400 элементов для базисных функций высокого порядка. Затем все локальные матрицы объединяются в глобальную матрицу, с учетом того, что одно ребро и (или) одна грань может принадлежать нескольким конечным элементам. Алгоритм объединения (ассемблирования) с учетом граничных условий достаточно сложен и от эффективности его реализации зависит время построения матрицы и правой части уравнения (3). Так как глобальная матрица имеет большую размерность и разрежена, она хранится в памяти компьютера в сжатом виде.

Полученная в результате ассемблирования система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) затем решается одним из численных методов, в результате чего получается вектор коэффициентов разложения поля \mathbf{X} . По этому вектору с помощью (2) рассчитывается распределение напряженности электрического поля в любом тетраэдре. Напряженность магнитного поля определяется по электрическому полю с помощью дифференцирования: $\mathbf{H} = -(i\omega\mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{E}$. Поэтому поле \mathbf{H} определяется с меньшей точностью, чем поле \mathbf{E} . Так как обычно электрическое поле представляет больший интерес, это объясняет выбор уравнения (1) в качестве основного.

Электромагнитное поле в дальней зоне вычисляется с помощью метода вторичных источников излучения. По значениям \mathbf{E} и \mathbf{H} на поверхности с АГУ, ограничивающей расчетную область, определяются фиктивные плотности поверхностного

магнитного и электрического тока \mathbf{J}_s^m , \mathbf{J}_s^e и фиктивные плотности поверхностных зарядов ρ_s^e , ρ_s^m . Напряженности электрического и магнитного поля в данной точке вычисляются затем с помощью функций Грина $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -i\omega\mu\oint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}')dS' + \varepsilon^{-1}\oint_S \nabla' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\rho_s^e(\mathbf{r}')dS' + \oint_S [\nabla' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}')]dS'; \quad (8)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -i\omega\varepsilon\oint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}')dS' + \mu^{-1}\oint_S \nabla' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\rho_s^m(\mathbf{r}')dS' - \oint_S [\nabla' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}')]dS'. \quad (9)$$

Полученные данные позволяют рассчитать диаграмму направленности, сопротивление излучения и другие параметры излучателя.

Элементы z_{ij} матрицы сопротивлений многоплечевого устройства рассчитываются по мощности P_j , поступающей в j -е плечо и заданному напряжению на i -м плече. При этом мощность рассчитывается с помощью функционала, стационарного на решении задачи, что повышает точность результатов.

В третьей главе описываются алгоритмы построения конечно-элементной сетки. Сотовые телефоны состоят из множества диэлектрических и металлических деталей различной формы и размера, расположенных в непосредственной близости от антенны. Процесс их разработки состоит из нескольких этапов. На первом этапе средствами САПР создается геометрическая модель телефона. Эта модель неизбежно содержит ошибки в виде незначительных зазоров между объектами или их пересечений, вызванные как конечной точностью представления объектов в САПР, так и невнимательностью дизайнера. При импорте геометрической модели в программу электродинамического моделирования эти ошибки сохраняются. Отмеченные особенности предъявляют к генераторам сетки очень жесткие требования.

В работе был построен и реализован алгоритм двухуровневого построения сетки, малочувствительный к ошибкам геометрической модели. Он состоит из следующих этапов: 1. Каждому из исходных геометрических объектов назначаются материалы (металл, диэлектрик). Также помечаются электрически важные объекты (порт, печатная плата, подводящая линия, антенна). Далее расчетный объем рассекается семействами перпендикулярных плоскостей. Положение плоскостей определяется исходя из предварительного установленного максимального шага и особенностей исходной геометрии, для корректного описания границ. Необходимо отметить, что данный процесс не чувствителен к ошибкам геометрии и иным встречающимся проблемам.

Построенные параллелепипеды проверяются на принадлежность соответствующим объектам. В результате исходные объекты заменяются параллелепипедным представлением. При этом неправильно построенные поверхности и ошибки аппроксимации поверхностей автоматически исправляются. При пересечении объектов приоритет отдается металлическому объекту, а в случае двух диэлектриков – объекту с большим ε . По новому представлению объектов строятся поверхностные треугольные сетки. Для объектов, помеченных как электрически важные, строятся точные по-

верхностные треугольные сетки. Если для объекта невозможно построить поверхностную сетку – используется представление, полученное на предыдущем этапе.

Поверхностные треугольные сетки, полученные на предыдущих двух этапах, объединяются в единую сеть. В случае пересечения треугольников один из них выбрасывается. При этом используются те же приоритеты, что и на предыдущем этапе. Полученная объединенная сеть заполняется тетраэдрами. После построения конечно-элементной сетки тетраэдрам присваиваются предварительно заданные материалы.

Данный метод был проверен на наборе телефонов фирмы LG Electronics Inc., для которых было невозможно построить полностью автоматически конечно-элементные сетки с помощью известных коммерческих программ. Использовался персональный компьютер с процессором Core 2 Duo E6600, 2.4 ГГц и объемом памяти 4 Гб.

Таблица 1. Конечно-элементные сетки для сотовых телефонов

Модель телефона	Кол-во деталей телефона	Время построения сетки, минут	Кол-во тетраэдров
RD3500	36	16	1,454,912
CT810	51	18	1,313,106
CG180	52	26	1,400,650
L602i	129	27	1,469,041
KF240	157	54	1,700,219

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет в автоматическом режиме построить сетку для реальных моделей телефонов за приемлемое время (менее 1 часа) без предварительного исправления ошибок модели. Отметим, что время построения сетки с ручным исправлением ошибок геометрической модели требует высокой квалификации инженера и занимает несколько дней.

В четвертой главе рассмотрены методы и алгоритмы решения СЛАУ (3) и методы улучшения сходимости. При выборе метода учитывались большая размерность матрицы (более 1 миллиона неизвестных) и ее сравнительно плохая обусловленность. Методы решения СЛАУ можно разбить на две основные группы – прямые и итерационные. Наиболее распространенный прямой метод основан на LU разложении. Обобщенный алгоритм выглядит следующим образом. 1 – Построение матрицы перестановок P для минимизации численной ошибки и оптимизации размера LU матриц. 2 – построение LU матриц с учетом матрицы перестановок P . 3 – последовательное решение систем $L\tilde{f} = f$ и $UX = \tilde{f}$. В рамках данной работы использовался пакет PARDISO входящий в состав библиотеки MKL фирмы Intel.

К итерационным относятся часто применяемые методы, основанные на использовании процедур нелинейного программирования – нахождения минимума функций

многих переменных [2]. В качестве таких переменных используются неизвестные коэффициенты разложения, а в качестве функции – невязка решения. К таким методам относится метод сопряженных градиентов. Итерационные методы требуют меньше памяти, чем прямые и поэтому с их помощью можно решать задачи с большим числом неизвестных. Выбор между итерационными и прямыми методами решения необходимо делать, учитывая свойства получаемой в результате дискретизации матрицы.

Пусть N_n — количество узлов, N_e — количество ребер конечно-элементной сетки. Тогда N_n собственных значений матрицы \mathbf{Q} — нулевые при $k_0 = 0$. С увеличением волнового числа все они принимают отрицательные значения. Остальные $N_e - N_n$ собственных значений соответствуют резонансам рассматриваемой физической структуры и являются положительными. Таким образом, матрица \mathbf{Q} при $k_0 > 0$ становится знаконеопределенной и плохо обусловленной.

Для улучшения сходимости можно уравнение (1) переформулировать в терминах векторного потенциала \mathbf{A} и скалярного потенциала φ

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - k_0^2 \varepsilon_r (\mathbf{A} + \nabla \varphi) = -i \omega \mu_0 \mathbf{J}_0,$$

Дискретизация этого уравнения с помощью МКЭ приводит к матричному уравнению

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} - k_0^2 \mathbf{R} & \mathbf{M}_{A\varphi} \\ \mathbf{M}_{A\varphi}^T & \mathbf{M}_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_A \\ \mathbf{X}_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_A \\ \mathbf{B}_\varphi \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} [m_{A\varphi}]_{mn} &= -k_0^2 \int_V \mathbf{w}_m \varepsilon_r \nabla \xi_n dV, \\ [m_{\varphi\varphi}]_{mn} &= -k_0^2 \int_V \nabla \xi_m \varepsilon_r \nabla \xi_n dV, \end{aligned}$$

В отличие от матрицы \mathbf{Q} , матрица этой системы не имеет отрицательных собственных значений, т. е. она положительно определена. Результаты расчета двумя методами приведены в таблице 2

Таблица 2. Сравнение двух формулировок

Число элементов	Формулировка	Число итераций	Время решения, с
3622	Е	104	0.6
	А - φ	37	0.3
19631	Е	222	6.9
	А - φ	63	3.3
93805	Е	340	56
	А - φ	99	28.3

Как видно, формулировка задачи в терминах потенциалов позволила уменьшить количество итераций, необходимых для решения задачи с заданной точностью на одинаковых сетках примерно в 3 раза. Однако время решения уменьшилось всего в 2

раза. Это объясняется тем, что к исходной системе добавляются узловые элементы. В результате размерность системы увеличивается на величину, равную числу узлов сетки, что увеличивает стоимость одной итерации.

Для улучшения обусловленности получающихся СЛАУ можно воспользоваться разделением базисных функций с помощью метода графов. Для этого по полученной конечно-элементной сетке строится покрывающее дерево. Ветви дерева лежат на ребрах КЭ сетки. Через каждое ребро сетки может проходить только одна ветка дерева. Ветви дерева не должны пересекаться. Все узлы КЭ сетки должны присутствовать в покрывающем дереве. Все реберные элементы, лежащие на ветвях дерева, можно заменить на градиентные функции, построенные на узлах этих ребер. Результирующая СЛАУ обладает теми же свойствами, что и для формулировки через векторный и скалярный потенциал. Разница заключается в прореживании блока, записываемого через реберные функции. В результате получившаяся СЛАУ имеет такую же размерность, как и исходная система уравнений. Численные эксперименты показали незначительное уменьшение времени решения по сравнению с методом потенциалов.

Наиболее эффективными с точки зрения скорости сходимости являются многосеточные методы. В основе этого метода лежат вычисления на последовательности вложенных сеток. Однако, можно построить многоуровневый метод и в терминах порядка базисных функций. Поскольку наши области не пересекаются – предобуславливатель представляет собой дополнение Шура:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A_{21}A_{11}^{-1} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & A_{11}^{-1}A_{12} \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

В таблице 3 приведены результаты расчета по 3 методам – итерационным, многоуровневым и прямым.

Как видно, многоуровневый решатель обеспечивает максимальную эффективность, по сравнению с другими методами, в терминах времени решения. Также его особенностью является практически постоянное количество итераций в зависимости от числа неизвестных. Тем не менее, для решения практических задач он требует высоко качества аппроксимации поля функциями низшего порядка для обеспечения сходимости, что делает его не применимым для моделирования сложных микроволновых устройств. Также видно, что прямой решатель обеспечивает приемлемое время решения задач достаточно большой размерности.

Таблица 3. Сравнение различных методов решения СЛАУ

Кол-во неизвестных	Итерационный решатель		Многоуровневый решатель		PARDISO
	Итераций	Время, сек.	Итераций	Время, сек.	Время, сек.
94384	981	112	22	11,30	6,94
170644	1143	242	20	12,8	16,1
309969	1456	574	14	19,66	53
614748	2284	1870	8	37,8	-

Пятая глава посвящена описанию программы и результатов ее использования. Программа RFS состоит из модуля графического пользовательского интерфейса, позволяющего создавать, импортировать и редактировать геометрические модели устройств. Модуль содержит геометрические примитивы (линии, поверхности и тела правильной формы), булевы операции над примитивами, операции перемещения, дубликации и отражения. Особенностью интерфейса является возможность легкого создания коаксиальных и полосковых линий передачи из полилиний.

Второй модуль содержит генераторы сетки, причем пользователь имеет возможность выбирать между различными генераторами.

Затем начинает работу модуль вычисления матричных элементов и формирования глобальной матрицы, после чего начинается наиболее затратный во времени процесс решения СЛАУ. При этом пользователь может выбирать место расположения процессора – локальное, т. е. на том же компьютере, на котором создавалась модель, или удаленное – на рабочей станции, к которой имеется доступ. Результаты решения СЛАУ передаются обратно в локальный компьютер. На заключительном этапе активируется графический пользовательский интерфейс, который позволяет вычислить необходимые характеристики и параметры устройства и представить их в виде таблиц, графиков и диаграмм.

Верификация программы проводилась путем сравнения результатов моделирования с результатами аналитических расчетов, данными, полученными с помощью других программ моделирования и с результатами экспериментов.

Таблица 4. Значения собственных частот цилиндрического резонатора¹

Вид колебаний	Анал. значение СЧ., ГГц	Число тетраэдров сетки					
		6768		15026		26580	
		СЧ, ГГц	δf , %	СЧ, ГГц	δf , %	СЧ, ГГц	δf , %
E ₀₁₀	11.474	11.502	0.235	11.4905	0.135	1.4848	0.085
H ₁₁₁	13.302	13.317	0.11	13.3132	0.084	13.3104	0.063
		13.302	0.135	13.3139	0.089	13.311	0.067
E ₀₁₁	15.216	15.232	0.098	15.2287	0.0769	15.2241	-0.052
H ₂₁₁	17.670	17.696	0.147	17.6853	0.086	17.6802	0.058
		17.705	0.198	17.6877	0.102	17.6811	0.063
E ₁₁₀	18.284	18.3246	0.222	18.3081	0.131	18.299	0.082
		18.3287	0.244	18.3102	0.143	18.2913	0.083

В табл. 4 приведены значения собственных частот (СЧ) цилиндрического резонатора, вычисленные на нескольких сетках. Там же приводятся аналитические значения частот и относительная погрешность расчета. Цилиндрический резонатор был

¹ Азимутально-неоднородные колебания (первый индекс отличен от нуля) вырождены. В таблице для этих видов приведены два расчетных значения, так как за счет погрешности вычислений вырождение снимается.

выбран в качестве тестовой модели, так как он имеет криволинейную боковую поверхность, и погрешность расчета может служить оценкой качества ее аппроксимации. Радиус резонатора $a = 10$ мм, длина $l = 15$ мм. Рассчитывалось 8 наименьших собственных частот на базисе высокого порядка. Как видно, погрешность расчета для всех видов колебаний уменьшается с ростом числа тетраэдров и на последней сетке не превышает 0.1 %.

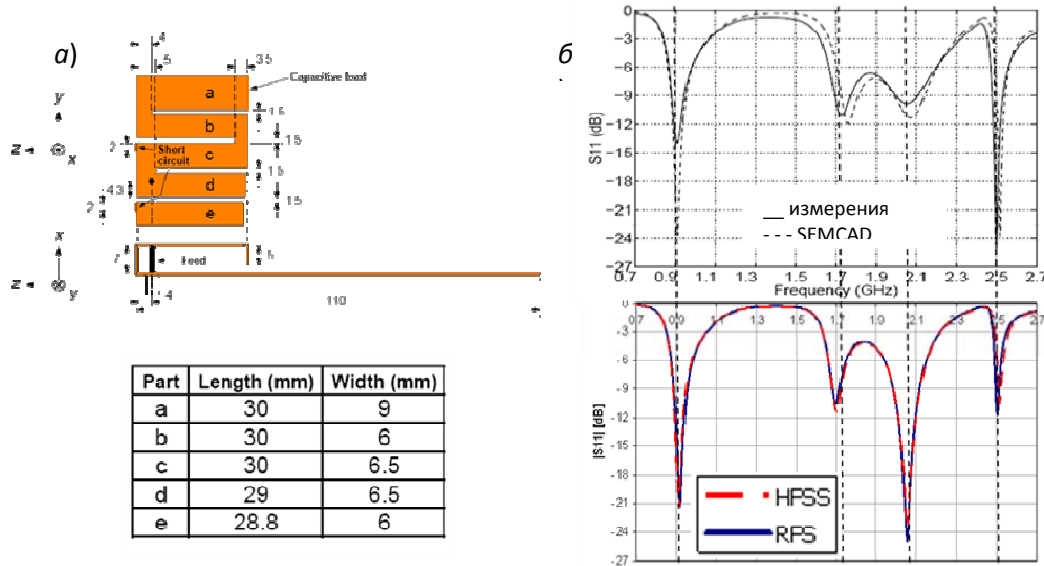


Рис. 1. Двухдиапазонная антенна (а) и результаты расчета коэффициента отражения от ее входа (б)

На рис. 1 показана экспериментальная зависимость коэффициента отражения от входа (амплитудно-частотная характеристика, АЧХ) двухдиапазонной антенны [3] и результаты расчета по программе RFS, а также по коммерческим программам SEMCAD и HFSS. Особенностью расчета является широкий диапазон частот, составляющий почти 2 октавы и наличие острых резонансов. Видно, что все расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными, причем резонансные частоты совпадают с погрешностью не более 1%. Эти и другие приведенные в диссертации результаты верификации позволяют утверждать, что точность расчетов по программе RFS находится на уровне лучших мировых программ.

В диссертации приведен целый ряд результатов расчета характеристик реальных микроволновых устройств – волноводных многополосников, клистронных резонаторов, микрополосковых устройств, различных антенн, в том числе, антенн сотовых телефонов, нагревательных камер микроволновых печей. Рассчитаны диаграммы направленности антенн, их входное сопротивление, удельная мощность поглощения в голове пользователя телефоном.

На рис. 2 показан пример расчета коэффициента отражения от входа антенны телефона 3-го поколения CG180 с учетом всех основных деталей – аккумулятора, дисплея, печатной платы, камеры, клавиатуры и т. п. По резонансным частотам получено достаточно хорошее совпадение, однако на верхней резонансной частоте расчет

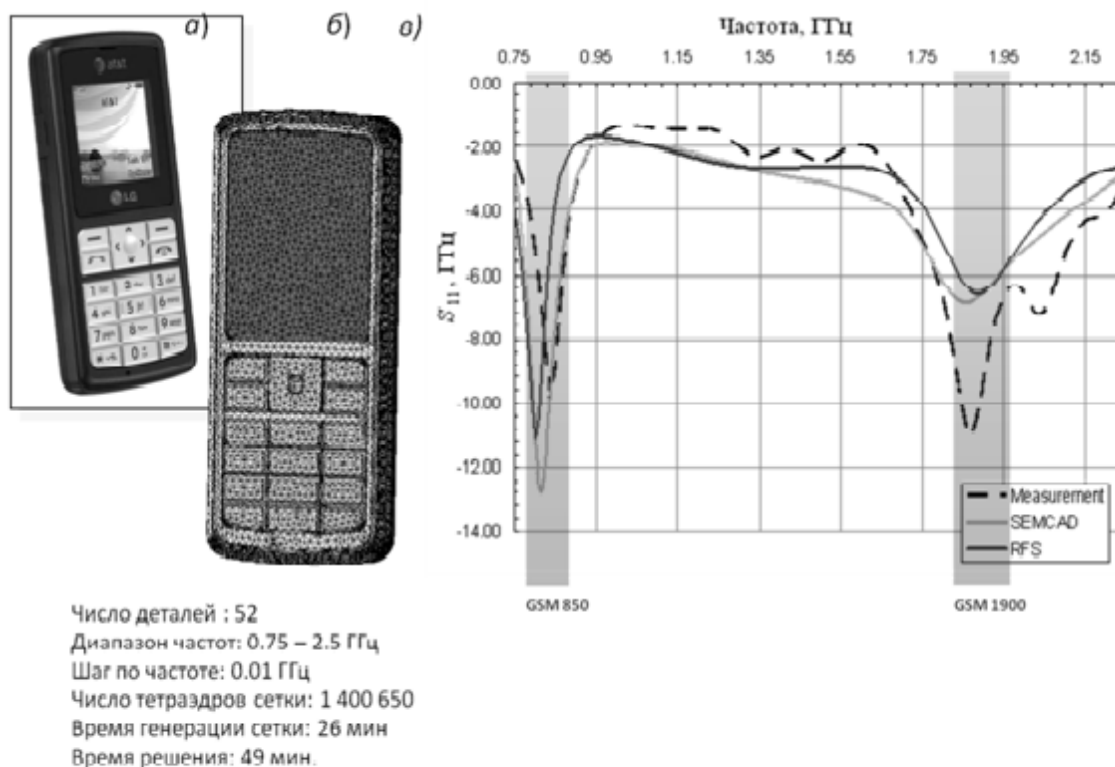


Рис. 2. Телефон CCG180 (а), конечно-элементная сетка (б) и АЧХ антенны (с)

дает худшее согласование по сравнению с экспериментом. Это может объясняться тем, что на высоких частотах затухание в материалах деталей телефона больше расчетного (при расчете тангенс угла диэлектрических потерь считался не зависящим от частоты). Общее время моделирования составило 75 мин., что почти в два раза меньше, чем время решения программы SEMCAD. В настоящее время разработанная программа используется при проектировании сотовых телефонов в компании LG Electronics Inc., а также в учебном процессе кафедры РТЭ СПбГЭТУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача – разработка эффективного алгоритма моделирования и вычислительной программы высокочастотных электромагнитных полей в сложных микроволновых устройствах. По точности и времени решения разработанная программа не уступает лучшим зарубежным коммерческим продуктам и превосходит их в возможности анализа реальных геометрических моделей устройств. В работе изложены научно обоснованные методические и алгоритмические решения, позволившие преодолеть присущие методу конечных элементов ограничения по сложности и качеству анализируемых моделей, по размерности и обусловленности глобальной матрицы.

Выбран векторный метод конечных элементов как наиболее гибкий и универсальный метод моделирования микроволновых устройств сложной формы и разработан алгоритм и программа реализации этого метода в вычислительной программе.

Проанализированы и протестированы различные методы улучшения обусловленности получаемой СЛАУ и показано, что для реальных задач они не дают существенного выигрыша по времени решения, будучи в то же время чувствительными к качеству исходной модели. Поэтому в программе был использован прямой метод решения, не требующий хорошо обусловленной матрицы.

Предложен и реализован двухуровневый метод построения конечно-элементной сетки, малочувствительный к ошибкам геометрической модели.

Разработана программа на языке C++, имеющая развитый пользовательский графический интерфейс, возможность решения СЛАУ на удаленной рабочей станции и удобную систему визуализации полученных результатов. Результаты верификации программы и опыт ее использования при проектировании сложных микроволновых устройств подтверждает ее высокую точность и эффективность.

Список литературы

1. Nedelec J. C. Mixed finite elements in R^3 . Numer. Math., Vol. 35, pp. 315-341, 1980.
2. Полак Э. Численные методы оптимизации /Пер. с англ. Под ред. И. А. Ваттеля. М.: Мир, 1975.
3. Ollikainen J., Kivekas O., Toropainen A., Vainikainen P. Internal Dual-Band Patch Antenna for Mobile Phones. Millenium Conference on Antennas & Propagation, Davos, April 2000, CD-ROM SP-444.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Grigoryev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Multiple-cell lumped elements and port models for the vector finite element method. Electromagnetics (Многоячеистые модели сосредоточенных элементов и портов для векторного метода конечных элементов), 2008, V. 28, No. 1, p. 18-26.
2. Тихонов Р. И. Улучшение сходимости метода векторных конечных элементов для решения краевых задач электродинамики // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 2, с. 30-33.

Другие публикации:

3. Grigoriev A. D., Kim E. S., Tikhonov R. I. MOS – A Microwave Oven Simulation Toolkit (Пакет моделирования микроволновых печей) // Proceedings of the East-West Workshop "Advanced Techniques in Electromagnetics" . – Warsaw: Univ. Technology Press, 2004. p. 213-215.
4. Grigoriev A. D., Kim E. S., Tikhonov R. I. Numerical simulation of electromagnetic fields in microwave ovens (Численное моделирование электромагнитных полей в микроволновых печах)// Proc. Int. Symposium on heating by electromagnetic Sources. – Padua: Univ. of Padua, 2004. p. 225 – 228.
5. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Сравнительный анализ векторных конечных элементов типов СТ/LN и LT/QN для решения краевых задач электро-

динамики// Радиотехника и связь: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 110-летию изобретения радио и 75-летию СГТУ. Саратов. СГТУ. 18-20 мая 2005, с. 174-180.

6. Grigoriev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Modern methods of enhancing efficiency of RF electromagnetic fields simulators in microwave structures (Современные методы улучшения эффективности радиочастотных электромагнитных полей в микроволновых структурах) // Материалы научн.-техн семинара "Современные проблемы техники и электроники СВЧ". СПб: Изд-во СПбГЭТУ, 2006, с.10.

7. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Метод конечных элементов в электродинамике. Проблемы и решения. // Материалы международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Саратов: Изд-во СГТУ, 2006, с. 281-287.

8. Grigoriev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Implementation of lumped elements and fast frequency sweep into the vector finite element code for RF electromagnetic field simulation (Встраивание сосредоточенных элементов и быстрого частотного сканирования в программу моделирования радиочастотных электромагнитных полей методом векторных конечных элементов). Book of materials of the 8-th international Workshop on finite elements for microwave engineering. Stellenbosch, South Africa, 2006, p. 59-60.

9. Grigoriev A. D., Ilin V. P., Salimov R. V., Tikhonov R. I. An efficient vector finite element method for full-wave electromagnetic field simulation (Эффективный метод векторных конечных элементов для моделирования волновых электромагнитных полей). Proc. of 40-th annual int. microwave power symp. IMPI, 2006, p. 179-183.

10. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Сравнительный анализ результатов моделирования антенны сотового телефона различными программными средствами. // Труды конференции, посвященной Дню радио, Изд-во СПбГЭТУ, 2008, с. 28.

11. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Моделирование микроволновых телекоммуникационных устройств и антенн методом векторных конечных элементов. // Материалы 18-й международной конференции "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", Севастополь: Вебер, 2008, т. 1, с. 433 – 435.

12. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Расчет поля и параметров антенн сотовых телефонов. // Материалы 8-й международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения", Саратов: Изд-во СГТУ, 2008, с. 243 – 249.

13. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Сравнительный анализ результатов моделирования антенн сотовых телефонов. Материалы научн.-техн. семинара "Инновационные разработки в СВЧ технике и электронике". СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, с. 16-17, 2008.

Подписано в печать .11.2009 г. Формат 60x84/16
Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЗАО "КопиСервис"
Печать ризографическая. Заказ № 1/1006
П. л. 1.0. тираж 100 экз.
ЗАО "КопиСервис"
Адрес: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 3
Тел. (812) 327-5098