

На правах рукописи

Салимов Роман Вячеславович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН СОТОВЫХ ТЕЛЕФОНОВ МЕТОДОМ
ВЕКТОРНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2010

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 физико-математических наук, проф. Свистунов Юрий Александрович;

Доктор технических наук, проф. Малышев Виктор Николаевич.

Ведущая организация:

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН

Защита состоится 22 июня 2010 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 " " мая 2010 г.

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

Е. А. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Современные сотовые телефоны принадлежат к наиболее сложным микроволновым устройствам, так как в их ограниченном объеме размещается большое количество схем, выполняющих самые разнообразные функции в условиях ограниченного энергопотребления. Переход к сетям третьего и четвертого поколений значительно усложняет процесс их проектирования, возрастают трудовые и материальные затраты на проведение экспериментальных исследований. Жесткие требования к уровню поглощаемой в теле пользователя СВЧ мощности требуют проведения сложных и дорогостоящих измерений на специальных моделях тела человека, которые не всегда возможны. В этих условиях существенно возрастает роль математического моделирования высокочастотных электромагнитных полей, создаваемых сотовыми телефонами и расчета удельной поглощаемой мощности.

Имеющиеся коммерческие программы электромагнитного моделирования не обеспечивают разработку оптимальной конструкции устройства ввиду ограниченного набора рассчитываемых характеристик и параметров и чрезмерно высоких вычислительных затрат. Применение этих программ ограничивается также высокой стоимостью лицензий, доходящей до 50 000 долларов в год на одно рабочее место.

В связи с отмеченным актуальна задача создания оригинальной эффективной программы моделирования электромагнитного поля, позволяющей проводить расчет характеристик и параметров реальных телекоммуникационных устройств, в том числе максимальной удельной мощности поглощения в близко расположенных частях тела пользователя. Программа должна обеспечить более глубокое понимание физических процессов, происходящих в высокочастотном тракте сотового телефона, и способствовать нахождению способов уменьшения максимальной поглощаемой мощности в теле пользователя. Программа предназначена для замены коммерческих программных продуктов в подразделениях компании LG Electronics Inc., занимающихся разработкой новых моделей сотовых телефонов четвертого поколения.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является моделирование электромагнитного поля и параметров сотового телефона с помощью специально разработанной программы.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

- Разработка и реализация в компьютерном коде алгоритма моделирования волновых электромагнитных полей методом векторных конечных элементов.
- Реализация метода быстрого частотного сканирования для обеспечения возможности ускоренного расчета широкой полосы частот.

- Встраивание сосредоточенных элементов и источников возбуждения в полевою конечно-элементную модель с целью оптимизации размера ячеек конечно-элементной сетки.
- Расчет параметров рассеяния многоплечих микроволновых устройств.
- Расчет параметров и характеристик антенн.
- Расчет характеристик сотового телефона в присутствии модели головы пользователя (фантома) и расчет поглощаемой в голове мощности.

Методы исследования.

В качестве основного метода исследования в работе используется метод вычислительного эксперимента. Для проверки корректности алгоритмов и программ используются данные экспериментов, предоставленные другими исследователями, а также результаты аналитических расчетов и расчетов по коммерческим программам.

Объект исследования.

В работе изучается высокочастотное электромагнитное поле, создаваемое антеннами пользовательских терминалов сетей мобильной сотовой связи и процессы его взаимодействия с головой пользователя.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Для вычисления элементов матрицы рассеяния многоплечих микроволновых устройств целесообразно использовать предложенные в работе алгоритмы возбуждения электромагнитного поля источниками тока и вычисления эквивалентных напряжений в плечах. Такая методика, в сочетании с методом быстрого частотного сканирования, позволяет на несколько порядков уменьшить время расчета параметров рассеяния в широкой полосе частот (несколько октав) по сравнению с методом последовательного перебора частот.
2. Для обеспечения возможности использования метода быстрого частотного сканирования для анализа устройств, содержащих сосредоточенные элементы, необходимо введение импедансных граничных условий, соответствующих эквивалентным схемам этих элементов. При этом поверхностная проводимость должна иметь вид рациональной функции частоты.
3. Расчет удельной поглощаемой мощности в теле пользователя целесообразно проводить с учетом глубины проникновения электромагнитного поля в модель головы (фантома), а также размеров телефона и его расположения. Это позволяет существенно снизить требования к необходимым для расчета вычислительным ресурсам.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые были предложены многоячеистые сосредоточенные элементы, совместимые с методом быстрого частотного сканирования.

2. Разработан и реализован оригинальный метод моделирования источников возбуждения электромагнитного поля в виде источников тока, также разработан оригинальный метод расчета параметров рассеяния многоплечих микроволновых устройств.
3. Впервые была предложена и реализована методика численной оценки сертификационного значения удельной поглощаемой мощности для головы пользователя с применением метода конечных элементов.
4. Показано, что нанесение металлического покрытия на определенную часть корпуса позволяет существенно снизить удельную поглощаемую мощность в голове пользователя.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что предложенные решения реализованы при разработке программы моделирования электромагнитного поля и параметров электродинамических систем «Radio frequency Simulator» (далее по тексту RFS), не уступающему по точности лучшим известным коммерческим программам, а по допустимой сложности моделей и затратам вычислительных ресурсов – превосходящей эти программы.

Реализация и внедрение результатов исследования:

1. Программа RFS используется в «LG Electronics Inc.» в процессе разработки новых моделей сотовых телефонов.
2. Учебный вариант программы используется в учебном процессе кафедры РТЭ СПбГЭТУ «ЛЭТИ» для подготовки магистров по образовательной программе «Микроволновая и телекоммуникационная электроника».

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на ряде конференций и семинаров различного уровня:

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).
12. 26-я международная конференция "Progress in applied computational electromagnetics", Tampere, Finland (2010).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из них: 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК РФ, 9 докладов, получивших одобрение на международных, всероссийских и межвузовских научных конференциях, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она изложена на 98 страницах машинописного текста, включает 47 рисунков, 4 таблицы и содержит список литературы из 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

Первая глава посвящена постановке задачи электродинамического моделирования антенн сотовых телефонов и обзору существующих методов ее решения. Приводится описание конструкции антенн и определены их основные параметры, такие как направленность, усиление, КПД, коэффициент стоячей волны по напряжению и другие.

Кратко описаны основные методы электродинамического моделирования и существующие коммерческие программы, основанные на этих методах. Среди этих программ можно выделить программный продукт ANSYS HFSS, использующий метод конечных элементов, и SPEAG SEMCAD, использующий метод конечных разностей во временной области. При проверке алгоритмов сравнение результатов, помимо экспериментальных данных, производится с результатами вычислений в этих программах.

На основании анализа возможностей различных численных методов и особенностей объекта исследования для компьютерного моделирования антенн сотовых телефонов был выбран метод векторных конечных элементов в частотной области, основанный на численном решении уравнения второго порядка относительно комплексной амплитуды напряженности электрического поля \mathbf{E}

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

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 трехмерной области V , ограниченной поверхностью S , на которой должны быть заданы определенные граничные условия (ГУ). В частности, для решения задачи излучения область V искусственно ограничивается поверхностью с радиационными (абсорбционными) ГУ. Кроме того, решение уравнения (1) должно удовлетворять определенным условиям на границах раздела сред: на поверхности идеального проводника касательная составляющая электрического поля $\mathbf{E}_\tau = 0$; на поверхности раздела двух диэлектриков касательная составляющая поля непрерывна $\mathbf{E}_{\tau,1} = \mathbf{E}_{\tau,2}$; на границе с поверхностным сопротивлением $\mathbf{E}_\tau = -Z_s \mathbf{n} \times \mathbf{H}_\tau$.

Моделирование сред проводится в следующих приближениях:

- Все диэлектрики линейны и изотропны.
- Свойства диэлектриков задаются комплексными относительными диэлектрической ε_r и магнитной μ_r проницаемостями, а также объемной проводимостью σ . Зависимость этих параметров от частоты не учитывается.
- На поверхности металлов с конечной проводимостью задаются граничные условия Леонтовича.

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, искомое поле внутри КЭ аппроксимируется линейной комбинацией базисных функций:

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

В результате дискретизации дифференциального уравнения (1) методом Галеркина, с учетом представления поля (2), получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{R} - ik_0 \mathbf{S} + k_0^2 \mathbf{T} \mathbf{X} = -ik_0 \mathbf{B}, \quad (3)$$

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

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

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

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

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

где $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ – характеристическое сопротивление свободного пространства, m, n – глобальные номера базисных функций. Индекс номера КЭ в формулах (4) – (5) 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 ($N_k = 6$) и базисные функции более высокого порядка ($N_k = 20$), связанные с ребрами (по 2 функции на ребро) и гранями (по 2 функции на грань) тетраэдров. В работе получены аналитические формулы, позволяющие вычислять выражения (4) и (5) для тетраэдров произвольной формы и базисных функций разного порядка.

В заключение первой главы после рассмотрения поставленной задачи формулируются задачи диссертационной работы.

Во второй главе описываются методики реализации эффективного метода конечных элементов, являющиеся результатом исследований автора в области моделирования антенн.

Решение матричного уравнения (3) позволяет вычислить электромагнитное поле и параметры системы на заданной частоте $\omega = 2\pi f$. Для расчета частотных характеристик системы в диапазоне частот необходимо выбрать в этом диапазоне M частот и решать уравнение (3) на каждой из этих частот, число которых может составлять несколько сотен и даже тысяч. Учитывая, что решение на одной частоте требует значительных вычислительных ресурсов, такой путь расчета частотных характеристик часто оказывается неприемлемым.

В тех случаях, когда глобальная матрица системы и вектор правой части могут быть представлены в виде степенных рядов по частоте, для быстрого получения частотных характеристик может быть использован метод быстрого частотного сканирования (БЧС). Следует отметить, что условие представимости матричного уравнения (3) в виде степенного ряда выполняется в большинстве случаев, так как матрицы \mathbf{T} и \mathbf{R} не зависят от частоты, а матрица \mathbf{S} либо не зависит от частоты либо также записывается в виде ряда.

Предположим, что неизвестный вектор \mathbf{X} также можно представить в виде степенного ряда:

$$\mathbf{X} = \sum_{q=0}^Q (ik)^q \mathbf{X}_q. \quad (7)$$

Тогда уравнение (3) можно записать следующим образом:

$$\sum_{m=0}^M s^m \mathbf{A}_m \sum_{q=0}^Q s^q \mathbf{X}_q = \sum_{r=0}^R s^r \mathbf{B}_r, \quad (8)$$

где $s = i(k - k_0)$, k_0 – волновое число, соответствующее некоторой частоте f_0 , лежащей внутри заданного диапазона частот. Для нахождения моментов \mathbf{X}_q необходимо перемножить степенные ряды в левой части выражения (8) и приравнять слагаемые из левой и правой частей (8) при одинаковых степенях частоты.

Вычислив значения \mathbf{X}_q (моментов), можно определить поле и параметры системы на любой заданной частоте. Следует отметить, что для вычисления моментов необходимо только один раз обратить матрицу \mathbf{A}_0 (фактически решив систему уравнений $\mathbf{A}_0 \mathbf{X}_0 = \mathbf{B}_0$). Для нахождения остальных моментов достаточно подставлять в эту систему соответствующую правую часть.

В работе описана реализация одного из наиболее перспективных методов БЧС с ортогонализацией моментов на каждой итерации алгоритма [2]. Недостатком данного метода является отсутствие критерия остановки итерационного процесса. Решение зависит только от частоты f_0 и никак не связано с частотным диапазоном.

На основании результатов многочисленных экспериментов предложена следующая реализация БЧС: для заданного диапазона $\{f_{\min}, f_{\max}\}$ частота f_0 , на которой обращается матрица \mathbf{A}_0 , выбирается следующим образом: $f_0 = 0.5 \cdot (f_{\max} + f_{\min})$, а число итераций алгоритма (число моментов) $Q = 10 \cdot f_{\max} / f_{\min}$. В этом случае приближенное решение уравнения (3) совпадает с решением, полученным методом последовательного решения на каждой частоте, в диапазоне шириной 2 и более октавы.

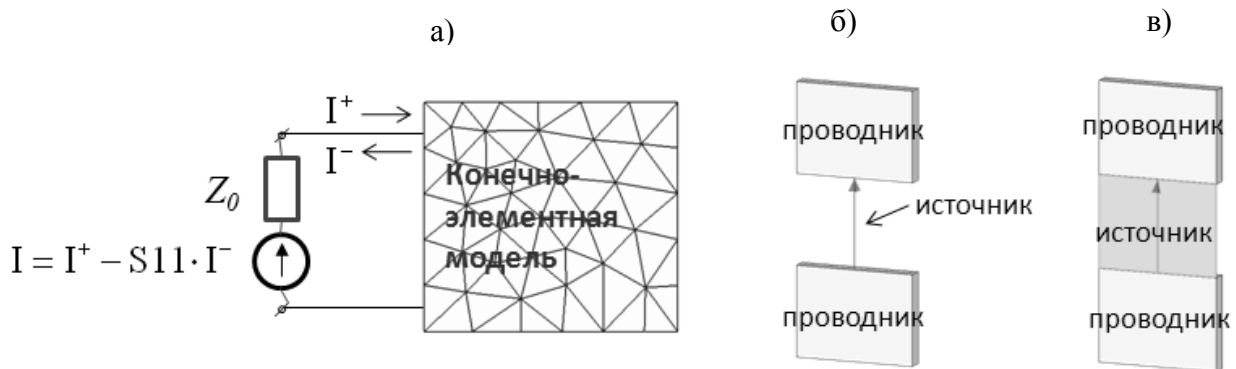


Рисунок 1

Описаны модели источников возбуждения электромагнитного поля. В качестве таких источников предложены источники тока (рис. 1, а). В качестве характеристик источника задаются его ток I и сопротивление Z_0 . На уровне конечно-элементной модели реализованы два типа источников тока: линейный (рис. 1, б) – задается в виде линии, соединяющей две точки на терминалах генератора и поверхностный источник

(рис. 1, в) – задается в виде прямоугольника с равномерно распределенной плотностью тока $J_s = I / w$, где w - ширина прямоугольника.

В процессе построения сетки линейный источник аппроксимируется ребрами, а прямоугольный – гранями тетраэдральной сетки.

Правая часть уравнения (3) в случае линейного источника для k -ого ребра:

$$-ik_0 B_k = -ik_0 I \int_{l_k} \mathbf{e}_l \mathbf{w}_k dl,$$

где \mathbf{e}_l - направление тока, \mathbf{w}_k - связанная с k -ым ребром базисная функция.

В случае поверхностного (прямоугольного) источника для k -ого треугольника:

$$-ik_0 B_k = -ik_0 I \int_{S_k} \mathbf{e}_l \mathbf{w}_k dS.$$

Предложен следующий алгоритм вычисления матрицы рассеяния: К полюсам p -го плеча (микроволновый генератор, питающий антенну) подключается источник тока, описанный выше, в то время как на терминалах других источников задается ГУ холостого хода. Далее для каждого плеча вычисляется напряжение U . Затем источник тока подключается к терминалам следующего микроволнового генератора и так далее. Таким образом вычисляется матрица полных сопротивлений \mathbf{Z} и, затем, матрица рассеяния $\mathbf{S} = (\mathbf{Z} + \mathbf{I})(\mathbf{Z} - \mathbf{I})^{-1}$. Число решений задачи равно числу источников. Преимущество предложенного алгоритма в том, что при решении конечно-элементной задачи (3) матрица левой части остается неизменной. То есть, для расчета параметров рассеяния достаточно обратить матрицу левой части уравнения (3) один раз. При расчете частотного диапазона методом БЧС предложенная методика позволяет значительно ускорить расчет параметров рассеяния, так как для расчета элементов \mathbf{Z} -матрицы на каждой частотной точке вычисляются только элементы вектора неизвестных \mathbf{X} , которые необходимы для расчета напряжения U на терминалах каждого источника. На Рис. 2 представлен результат расчета коэффициента отражения антенны телефона L602i. В качестве источника возбуждения электромагнитного поля применялся источник тока. Частотный диапазон 0.7 – 2.5 ГГц был рассчитан методом БЧС. Наблюдается хорошее совпадение результата моделирования с результатами, полученными в коммерческой программе SEMCAD и путем измерений. Время расчета параметра S_{11} на одной частоте составляет 11 минут, в то время как время расчета этого параметра во всем диапазоне с шагом 50 МГц методом БЧС – всего 22 минуты.

Помимо модели источников возбуждения во второй главе также описан алгоритм встраивания сосредоточенных элементов (СЭ) в полевую конечно-элементную модель. Сосредоточенный или дискретный элемент (СЭ) – пассивный элемент микроволновых схем (резистор, емкость и индуктивность), размер которого значительно меньше длины волны. СЭ включаются в конструкцию антенн сотовых телефонов, как правило, для улучшения согласования.

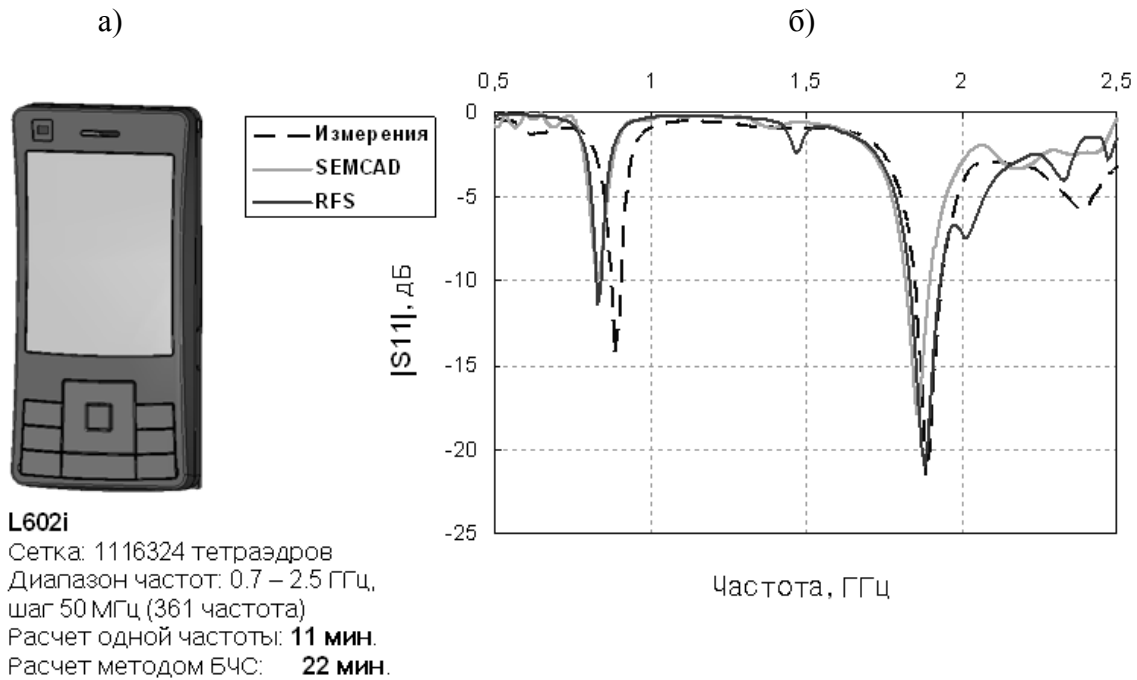


Рисунок 2

Предложена модель СЭ в виде граничного условия на поверхности прямоугольной формы. Основным принцип встраивания СЭ в МКЭ – переход от интегральных величин (тока, напряжения и сопротивления СЭ) к полевым величинам, определенным на поверхности СЭ:

$$U = Z_L I \longrightarrow \mathbf{E}_\tau = Z_S \mathbf{J}_S, \quad (9)$$

где Z_L - сопротивление СЭ, \mathbf{E}_τ - касательная составляющая поля на поверхности конечно-элементной модели СЭ, \mathbf{J}_S - плотность поверхностного тока, $Z_S = Z_L \frac{w}{h}$ - поверхностное сопротивление СЭ, пересчитанное из полного сопротивления с учетом заданных размеров прямоугольного СЭ и направления тока (рис 3, б).

В работе описана реализация СЭ на схемотехническом уровне, определенного в общем случае как параллельное соединение емкости, индуктивности и сопротивления (рис. 3, в). На уровне конечно-элементной модели СЭ – прямоугольник (рис.3, а), в процессе генерации сетки этот прямоугольник может быть аппроксимирован любым количеством граней тетраэдров. На поверхности СЭ с учетом (9) формулируется следующее граничное условие:

$$\nabla \times \mathbf{E} = ik \frac{\eta_0}{Z_S} \mathbf{E}_\tau.$$

В результате матричное уравнение (3) преобразуется к виду:

$$[(\mathbf{T} + \frac{1}{L}\mathbf{M}) + ik(\mathbf{S} + \frac{1}{R}\mathbf{M}) - k^2(\mathbf{R} + \bar{\mathbf{C}}\mathbf{M})]\mathbf{X} = -ik\mathbf{B},$$

где

$$m_{mn} = \int_{S_{\bar{N}\bar{Y}}} (\mathbf{w}_m)_\tau (\mathbf{w}_n)_\tau dS, \quad \{m, n\} \in S_{\bar{N}\bar{Y}}; \quad \bar{C} = C / \epsilon_0, \bar{L} = L / \mu_0, \bar{R} = R / \eta_0.$$

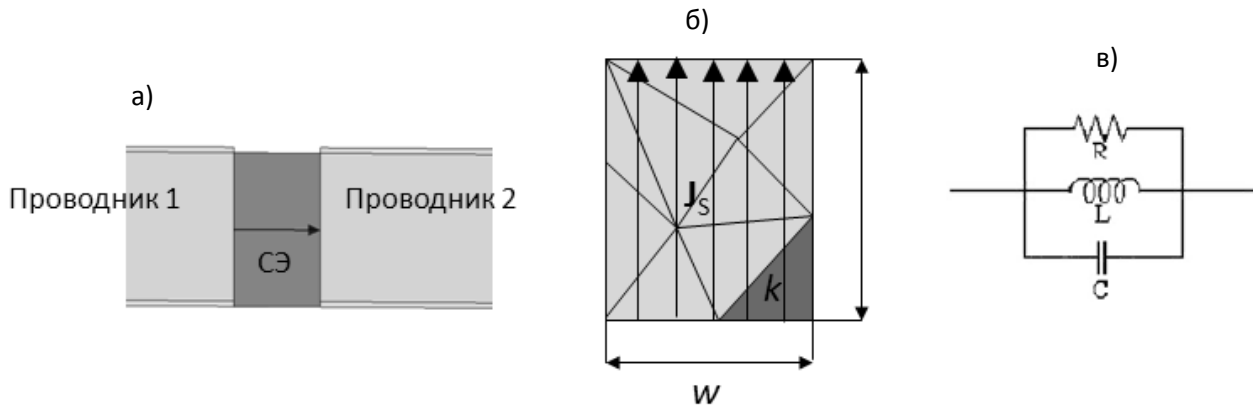


Рисунок 3

По предложенной методике можно реализовать любую комбинацию из включенных параллельно емкости, индуктивности и сопротивления для одного СЭ и любой способ соединения произвольного числа различных СЭ.

Описанный в работе метод моделирования СЭ был реализован в программе электродинамического моделирования RFS. Для проверки метода было проведено моделирование антенны, разработанной научной группой под руководством Вендика О.Г. [3] Конструкция антенны содержит 10 СЭ. Авторами разработки был изготовлен прототип и проведены измерения. Расхождение между резонансной частотой, полученной с помощью RFS, и результатом измерений составляет 0.4 % от измеренной частоты (рис. 4. б).

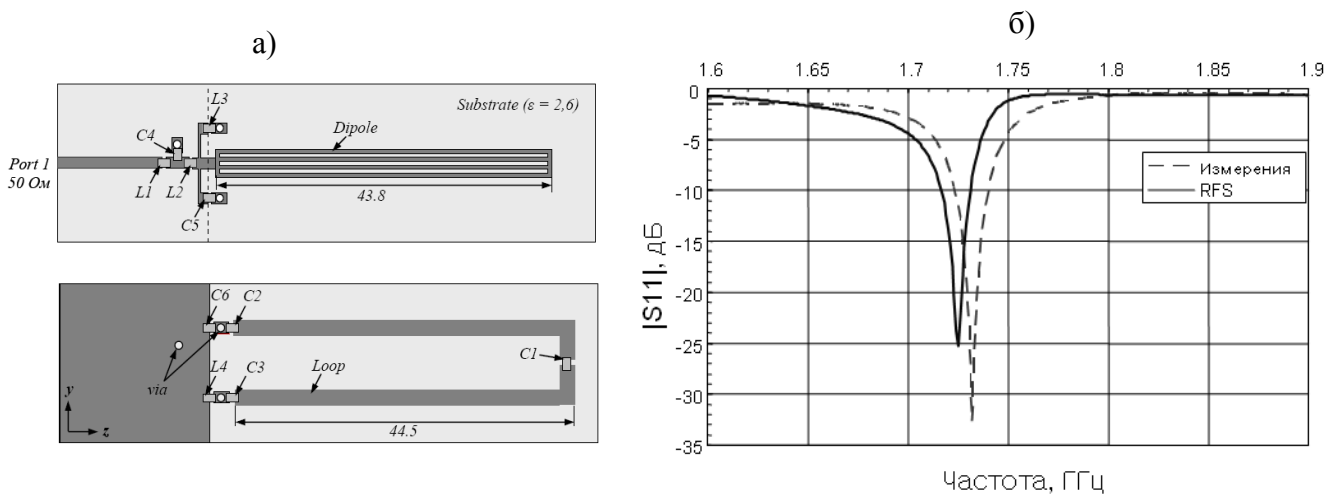


Рисунок 4

В заключение второй главы приводится краткое описание разработанной программы. Программа RFS состоит из трех основных модулей: модуль графического

интерфейса для создания или импорта геометрической модели, генератор сетки, модуль, ответственный за формирование и решение матричного уравнения, и модуль графического интерфейса для обработки результатов.

Третья глава посвящена решению задачи излучения электромагнитного поля методом конечных элементов и расчету параметров антенн.

Метод конечных элементов позволяет решать только внутреннюю задачу электродинамики. Для расчета поля излучения необходимо на поверхности расчетной области задать радиационные граничные условия (РГУ). В работе рассмотрены два типа РГУ.

Радиационные ГУ 1-ого порядка:

$$-ik_0\eta_0(\mathbf{n} \times \mathbf{H}) = ik_0\mathbf{E}_\tau, \quad (9)$$

где \mathbf{n} - нормаль к поверхности излучения, \mathbf{E}_τ - касательная составляющая напряженности электрического поля.

Радиационные ГУ 2-ого порядка:

$$-ik_0\eta_0(\mathbf{n} \times \mathbf{H}) = ik_0\mathbf{E}_\tau + \frac{1}{2ik_0} \{ \nabla \times [\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{E})] + \nabla_\tau (\nabla \cdot \mathbf{E}_\tau) \}, \quad (10)$$

где ∇_τ - оператор градиента по поверхностным координатам. Сравнение показало, что, хотя РГУ 2-ого порядка и обеспечивают большую точность решения задач излучения, при использовании БЧС требуется больше вычислительных ресурсов вследствие увеличения максимальной степени числа M в формуле (8).

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 $\mathbf{J}_s^e, \mathbf{J}_s^m$:

$$\mathbf{J}_s^e = \mathbf{n} \times \mathbf{H};$$

$$\mathbf{J}_s^m = \mathbf{E} \times \mathbf{n}.$$

Напряженности электрического и магнитного поля в данной точке вычисляются затем с помощью функций Грина $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -i\omega\mu \oint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}') dS' + \oint_S [\nabla' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}')] dS'; \quad (11)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -i\omega\varepsilon \oint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}_s^m(\mathbf{r}') dS' - \oint_S [\nabla' G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \times \mathbf{J}_s^e(\mathbf{r}')] dS'; \quad (12)$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ik_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}. \quad (13)$$

Полученные данные позволяют рассчитать диаграмму направленности, усиление антенны, излучаемую мощность и другие параметры.

Четвертая глава посвящена методам расчета удельной поглощаемой мощности.

Удельная поглощаемая мощность (УПМ) – один из параметров, служащих для оценки и нормирования воздействия электромагнитного излучения телефона на пользователя. УПМ вычисляется по формуле

$$\text{УПМ} = P / \rho,$$

где P - плотность мощности электромагнитного поля, рассеянного в тканях человеческого тела, ρ - плотность этих тканей. Единица измерения УПМ Вт/кг. УПМ, усредненная по массе 1 г или 10 г, вычисляемая для физического эквивалента головы пользователя – фантома, является одним из важнейших сертификационных параметров телефона в странах Европы и США. Для стран Европейского Союза допустимое значение УПМ в голове пользователя 2 Вт/кг для элемента тканей массой 10 г. В США – 1.6 Вт/кг для 1 г тканей головы. В разработанное программе РФС вычисление сертификационного значения УПМ реализовано в соответствии со стандартом IEEE-1528 [4]:

1. Модель головы состоит из оболочки без потерь и однородного заполнения с заданными относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r и объемной проводимостью σ , значения которых зависят от частоты.
2. Позиционирование телефона относительно головы производится строго определенным образом (рис. 5).
3. Для набора точек внутри фантома рассчитывается значение $\text{УПМ} = \frac{1}{2} \frac{\sigma |\mathbf{E}|^2}{\rho}$.
4. Для каждой точки по специальному алгоритму строится куб, захватывающий необходимую массу тканей, УПМ усредняется по этому кубу и запоминается.
5. Среди всех усредненных по заданной массе УПМ выбирается максимальное. Оно и является сертификационным параметром.

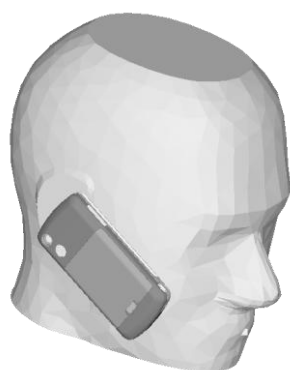


Рисунок 5

Для ускорения конечно-элементного моделирования телефона в присутствии головы пользователя был разработан алгоритм генерации сетки, согласно которому плотная сетка, обеспечивающая высокую точность вычисления УПМ, создается только в области головы вблизи телефона. Область построения такой «локально-плотной» сетки определяется исходя из размеров телефона, частоты электромагнитного излучения и глубины проникновения поля в голову. Данная методика позволяет проводить расчет УПМ до 6 раз быстрее, чем при использовании стандартного для МКЭ подхода к генерации сетки, с допустимым отклонением в точности расчета параметров телефона.

Результаты проверки предложенного метода при проведении эталонного теста, предписанного стандартом IEEE-1528, показали допустимое отклонение от данных для сравнения (в пределах 10% для 1г и 10г УПМ).

Помимо проверок алгоритма было проведено исследование влияния конструктивных особенностей телефона на величину УПЧ с целью оптимизации конструкции для снижения УПЧ в голове пользователя. На примере телефона CG180 было показано, что экранирующее проводящее покрытие, нанесенное на детали корпуса телефона, снижает значение УПЧ вплоть до 40% при допустимого ухудшения других параметров телефона. В таблице 1 приведены результаты исследования.

Таблица 1. Сравнение УПМ для телефона CG180 с экранирующим покрытием и без него

Частота, МГц	Удельная поглощаемая мощность, Вт/кг			
	Максимальное значение		Усредненная по 1г	
	Без экрана	С экраном	Без экрана	С экраном
800	2.24	1.57	1.61	1.11
1900	1	0.8	0.65	0.52

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Реализован метод быстрого частотного сканирования, основанный на ортогонализации частотных моментов с автоматическим выбором требуемого их количества в зависимости от ширины расчетного диапазона частот. Метод позволяет производить расчет частотных характеристик устройства в полосе частот более двух октав при решении полной электродинамической задачи только в одной частотной точке.
2. Разработаны многоячеистые модели сосредоточенных элементов и источников возбуждения электромагнитного поля, позволяющие встроить их в конечно-элементную полевую модель и совместимые с методом быстрого частотного сканирования.
3. Разработан и реализован оригинальный метод расчета параметров рассеяния многополюсных устройств, позволяющий в несколько раз уменьшить время их вычисления.
4. Разработан алгоритм вычисления поля в дальней зоне излучения и вычисления характеристик и параметров антенн.
5. Разработан и реализован эффективный метод расчета максимальной средней удельной поглощаемой мощности в голове пользователя, учитывающий реальную глубину проникновения поля в ткани и

использующий упрощенную модель головы. Метод удовлетворяет требованиям стандарта IEEE-1528.

6. Показано, что использование экранирующего покрытия корпуса телефона позволяет существенно (до 40%) уменьшить удельную поглощаемую мощность в голове пользователя.
7. Проведены расчеты различных антенных систем и различных моделей сотовых телефонов, а также расчетов поглощаемой мощности. Сравнение результатов этих расчетов с теорией и экспериментом показало, что погрешность расчета резонансных частот реальных антенных систем не превышает 3%, а удельной поглощаемой мощности – 10%.

Список литературы

1. Nedelec J. C. Mixed finite elements in R^3 . Numer. Math., Vol. 35, pp. 315-341, 1980.
2. Slone R. D., Lee R., Lee J.-F. Well-conditioned asymptotic waveform evaluation for finite elements. IEEE Trans. Antennas Propagat., V. 51, No. 9, pp. 2442-2447, 2003.
3. Vendik O. G., Pakhomov I. A. Electric- and Magnetic-Field Strengths in the Frensel Zone of a Microradiator Formed by an Electric and magnetic Dipole. Technical Physics, Vol. 50, No. 11, 2005, pp. 1479-1485.
4. IEEE 1528-2003. IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head From Wireless Communications Devices: Measurement Techniques.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Григорьев А.Д., Салимов Р.В. Моделирование волновых электромагнитных полей методом векторных конечных элементов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2005. – Вып. 1.- С. 82-85.
2. Салимов Р. В. Встраивание сосредоточенных элементов и портов в векторный метод конечных элементов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 2. С. 66-69.
3. Grigoryev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Multiple-cell lumped elements and port models for the vector finite element method. (Многоячеистые модели сосредоточенных элементов и портов для векторного метода конечных элементов)// Electromagnetics. 2008, V. 28, No. 1, p. 18-26.

Публикации в трудах отечественных и международных научных конференций и семинаров:

4. Григорьев А. Д., Салимов Р. В., Тихонов Р. И. Сравнительный анализ векторных конечных элементов типов СТ/LN и LT/QN для решения краевых задач электродинамики// 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Grigoriev A. D., Salimov R. V., Tikhonov R. I. Efficient analysis of full mobile CAD models with automatic correction of geometric errors (Эффективный анализ детальной компьютерной модели сотового телефона с автоматической коррекцией ошибок геометрии). // Proc. of 26-th annual review in applied computational electromagnetic, Tampere, Finland (2010), pp 416-420.