

УДК 519.688:621.396.67

Система компьютерного моделирования антенн методом моментов

Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А., Клюкин Д. В.,
Комнатнов М. Е., Куксенко С. П.

Постановка задачи: проектирование антенн является одной из основных задач, возникающих при разработке современных радиоэлектронных средств. Для её решения широко применяются различные системы автоматизированного проектирования. Отсутствие полноценных отечественных аналогов зарубежных систем проектирования в условиях импортозамещения требует создания отечественной системы, обладающей широким спектром функциональных возможностей и высокой степенью интеграции с существующими пакетами прикладных программ. **Целью работы** является представление результатов разработки системы компьютерного моделирования радиотехнических характеристик антенн. **Используемые методы:** для моделирования антенн применяется численный метод моментов, предусматривающий замену металлических поверхностей исследуемой модели антенны эквивалентными поверхностными электрическими токами. Для аппроксимации модели антенны используется треугольная полигональная сетка, а для представления тока в ячейках сетки – базисные RWG-функции. **Новизна:** новизной обладает разработанный и программно реализованный алгоритм моделирования антенн, отличающийся совместным применением барицентрического подразделения ячеек сетки на 9 субтреугольников для расчета поверхностных интегралов и параллельной организацией процедур вычислений с использованием директив стандарта OpenMP. **Результат:** на основе предложенного алгоритма разработана система моделирования и выполнено её тестирование на примере трех антенн с различными конструкциями. **Практическая значимость:** разработанная система моделирования может быть использована в задачах синтеза и анализа широкого круга типов антенн.

Ключевые слова: вычислительная электродинамика, численные методы, метод моментов, антенна, диаграмма направленности, входной импеданс, система моделирования.

Актуальность

Развитие методов и средств проектирования антенн обусловлено возрастающими требованиями к их основным показателям качества [1]. Широкое распространение получили численные методы решения электродинамических задач, используемые, помимо прочего, в системах автоматизированного проектирования (САПР). Применение САПР позволяет существенно сократить время разработки антенн, оптимизировать их характеристики, а также снизить финансовые затраты на проектирование [2]. Для моделирования антенн широкое применение получил метод моментов [3]. При его использовании металлические части модели антенны заменяются эквивалентными поверхностными электрическими токами, после чего решается задача возбуждения электромагнитно-

Библиографическая ссылка на статью:

Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А., Клюкин Д. В., Комнатнов М. Е., Куксенко С. П. Система компьютерного моделирования антенн методом моментов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 1. С. 49-66. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-1-49-66

Reference for citation:

Kvasnikov A. A., Demakov A. V., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Komnatnov M. E., Kuksenko S. P. Software for Antenna Simulation by the Method of Moments. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 1, pp. 49-66 (in Russian). DOI: 10.24 412/2410-9916-2022-1-49-66

го поля этими токами. При этом требуется лишь дискретизация поверхности анализируемой конструкции антенны без необходимости задания граничных условий, что позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам используемой рабочей станции, а также сократить время моделирования.

В настоящее время на рынке программного обеспечения доминирующее положение занимают зарубежные САПР, в том числе системы, основанные на методе моментов и его вариациях: Altair Feko [4], Momentum [5], Concept-II [6] и др. При этом отечественные САПР не могут составить конкуренцию зарубежным, поскольку они практически отсутствуют [7]. Однако для эффективного импортозамещения разработка отечественных САПР крайне актуальна. Данная работа посвящена описанию первых шагов, выполненных авторским коллективом, в рамках создания отечественной САПР для моделирования радиотехнических характеристик антенн с использованием метода моментов.

Алгоритм расчета радиотехнических характеристик антенн

Для численного анализа любой физической задачи требуется построение математической модели [8], являющейся приближенным описанием исследуемого объекта с применением алгоритмов [9]. Для построения математической модели при использовании метода моментов используется триангуляция исходной геометрии исследуемого объекта с учетом его конструктивных особенностей. После триангуляции производится замена ячеек расчетной сетки на эквивалентные поверхностные электрические токи и решение задачи возбуждения электромагнитного поля в дальней зоне этими токами.

Процедуру моделирования антенны с использованием метода моментов можно представить в виде последовательности действий [10]:

1. Определение целей расчета и необходимой для этого входной и выходной информации, а также требуемой погрешности результатов.
2. Формулировка интегральных уравнений в частотной области и задание источника воздействия.
3. Построение расчетной сетки, переход от функциональных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с помощью замены непрерывных функций их дискретными аналогами.
4. Решение СЛАУ с заданной точностью.
5. Вычисление из решения СЛАУ требуемых характеристик и их визуализация.

Очевидно, что все указанные этапы взаимосвязаны. Так, изменение плотности ячеек в расчетной сетке оказывает влияние на размер формируемой СЛАУ и время её решения [11].

Одним из наиболее распространенных алгоритмов, применяемых при построении расчетной сетки для моделирования антенн методом моментов, является алгоритм триангуляции Делоне, согласно которому для любого треугольника верно, что внутри описанной около него окружности отсутствуют точки из множества, описывающего исходную геометрию антенны [12]. Учет этого

критерия позволяет приблизить расчетную сетку к равномерной, за счет чего может быть увеличена точность решения [13].

После дискретизации антенны выполняется замена вектора плотности поверхностного электрического тока \mathbf{J} на эквивалентные поверхностные токи в ячейках сетки в соответствии с интегральным уравнением электрического поля. При этом применяются базисные функции Рао-Вильтона-Глиссона (RWG-функции) [14], каждая из которых ассоциируется с общим ребром длиной l_n двух смежных треугольников T_n^+ и T_n^- (рис. 1а). Положение произвольных точек на поверхностях треугольников описывается радиус-векторами \mathbf{r}_n^\pm относительно начала координат (точка O) или радиус-векторами $\boldsymbol{\rho}_n^\pm$ относительно вершины, противоположной общему ребру. Приближенно общее ребро l_n двух соседних треугольников соответствует малому электрическому диполю, характеризующемуся величинами $d_n = |\mathbf{r}_n^{c-} - \mathbf{r}_n^{c+}|$ и I_n (рис. 1б).

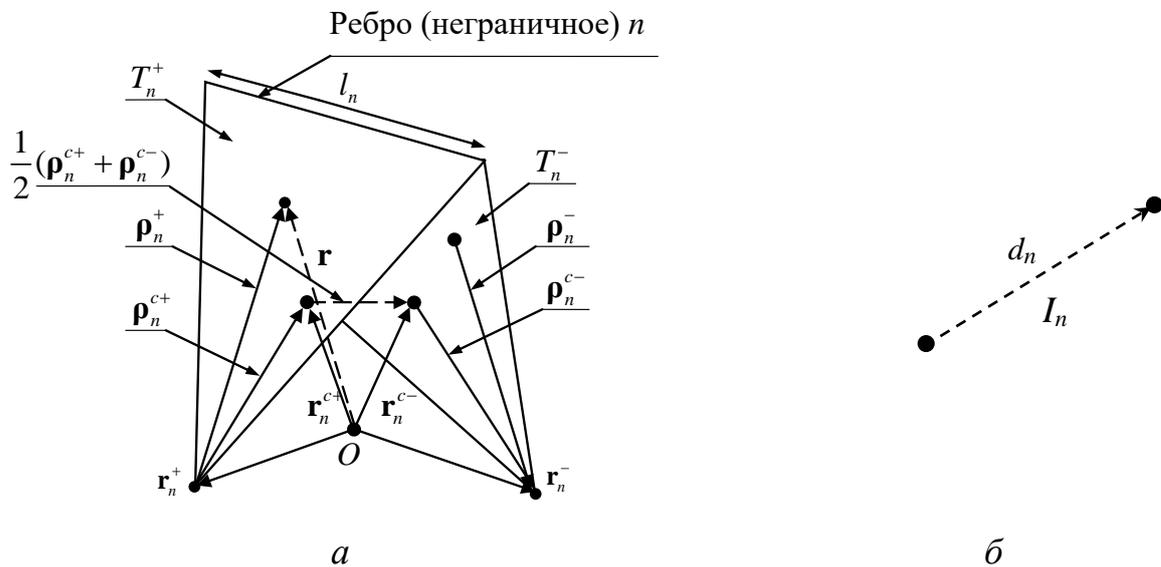


Рис. 1. RWG-функция для пары смежных треугольников (а), и их представление в виде диполя (б)

Базисная функция, связанная с общим ребром l_n , имеет следующий вид [14]:

$$\mathbf{f}_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} l_n / (2S_n^+) \boldsymbol{\rho}_n^+(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in T^+; \\ l_n / (2S_n^-) \boldsymbol{\rho}_n^-(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in T^-; \\ 0, & \mathbf{r} \notin T^\pm, \end{cases}$$

где S_n^+ и S_n^- – площади треугольников T^+ и T^- соответственно.

Плотность тока на всей поверхности исследуемой структуры, состоящей из M внутренних ребер поверхностной сетки, может быть представлена в виде суперпозиции базисных функций [14]:

$$\mathbf{J} = \sum_{m=1}^M I_m \mathbf{f}_m(\mathbf{r}),$$

где I_m представляют собой нормальные компоненты плотностей токов и определяют искомый вектор \mathbf{I} , который дает единственное решение СЛАУ для заданного вектора воздействия \mathbf{V}

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V}, \tag{1}$$

где \mathbf{Z} – квадратная матрица, элементы которой без учета потерь в металле могут быть вычислены как

$$z_{mn} = l_m \left(j\omega \left(\mathbf{A}_{mn}^+ \cdot \boldsymbol{\rho}_m^{c+} / 2 + \mathbf{A}_{mn}^- \cdot \boldsymbol{\rho}_m^{c-} / 2 \right) + \Phi_{mn}^- - \Phi_{mn}^+ \right), \tag{2}$$

где « \cdot » – скалярное произведение, а величины \mathbf{A}_{mn}^\pm и Φ_{mn}^\pm определяются как

$$\mathbf{A}_{mn}^\pm = \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{l_n}{2S_n^+} \int_{T_n^+} \boldsymbol{\rho}_n^+(\mathbf{r}') g_m^\pm(\mathbf{r}') dS' + \frac{l_n}{2S_n^-} \int_{T_n^-} \boldsymbol{\rho}_n^-(\mathbf{r}') g_m^\pm(\mathbf{r}') dS' \right],$$

$$\Phi_{mn}^\pm = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \left[\frac{l_n}{S_n^+} \int_{T_n^+} g_m^\pm(\mathbf{r}') dS' - \frac{l_n}{S_n^-} \int_{T_n^-} g_m^\pm(\mathbf{r}') dS' \right],$$

\mathbf{r}' – вектор, направленный из центра координат в точку наблюдения, а $g_m^\pm(\mathbf{r}')$ – функция Грина вида

$$g_m^\pm(\mathbf{r}') = \frac{\exp(-jk|\mathbf{r}_m^{c\pm} - \mathbf{r}'|)}{|\mathbf{r}_m^{c\pm} - \mathbf{r}'|},$$

а k – постоянная распространения в свободном пространстве.

При вычислении диагональных элементов матрицы \mathbf{Z} возникает сингулярность, для устранения которой используется деление первичного треугольника на 9 субтреугольников [15, 16]. Полагая, что подынтегральное выражение является неизменным в каждом из субтреугольников, исходный интеграл может быть записан как

$$\int_{T_n} \frac{\exp(-jk|\mathbf{r}_m^c - \mathbf{r}'|)}{|\mathbf{r}_m^c - \mathbf{r}'|} dS' = \frac{S_n}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{e^{-jkR_i}}{R_i}, \quad R_i = |\mathbf{r}_m^c - \mathbf{r}_{n-i}^c|,$$

где \mathbf{r}_{n-k}^c – радиус-вектор центра субтреугольника i первичного треугольника n с площадью S_n .

Для введения источника воздействия в расчетную сетку используется задание напряжения V_{in} в бесконечно малом зазоре Δ между двумя смежными треугольниками сетки с общим ребром l_n (рис. 2).

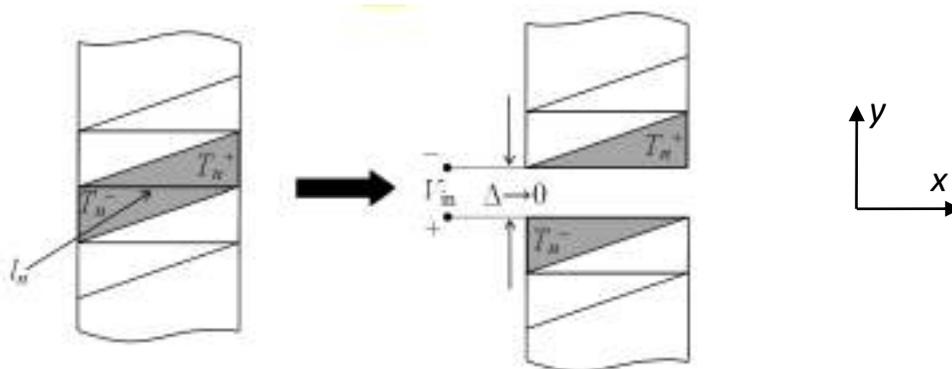


Рис. 2. Модель источника возбуждения в общем ребре расчетной сетки

Напряженность электрического поля в зазоре определяется как

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi = \frac{V_{\text{in}}}{\Delta} \mathbf{n}_y,$$

где φ – электрический потенциал, \mathbf{n}_y – орт нормали к общему ребру треугольников.

При $\Delta = 0$ напряженность поля в зазоре может быть аппроксимирована с помощью дельта-функции как

$$\mathbf{E} = V_{\text{in}} \delta(y) \mathbf{n}_y.$$

В результате, элементы вектора воздействия \mathbf{V} определяются как

$$v_{m=n} = \int_{T_n^+ - T_n^-} \mathbf{E} \mathbf{f}_n dS = V_{\text{in}} \int_{T_n^+ - T_n^-} \delta(y) \mathbf{n}_y \mathbf{f}_n dS = l_n V_{\text{in}}, \quad (3)$$

$$v_{m \neq n} = 0. \quad (4)$$

Следующим этапом вычисляется вектор \mathbf{I} из уравнения (1), что является наиболее ресурсоемкой процедурой алгоритма. Для решения СЛАУ используются процедуры библиотеки линейной алгебры Eigen [17] и директивы интерфейса OpenMP [18] для распараллеливания вычислений и эффективного использования ресурсов многопроцессорных вычислительных систем. Из полученного решения СЛАУ выполняются расчеты требуемых радиотехнических характеристик антенны. Так, входной импеданс антенны определяется как отношение заданного напряжения к полному току, перпендикулярному выбранному ребру сетки с индексом n . Поскольку компонента базисной функции \mathbf{f}_n , нормальная к рассматриваемому ребру, всегда равна единице, то выражение для вычисления входного импеданса антенны может быть записано как [13]

$$Z_A = \frac{V_{\text{in}}}{l_n I_n}. \quad (5)$$

Характеристики излучения антенны определяются по вычисленному вектору \mathbf{I} . При дипольном представлении внутренних ребер расчетной сетки дипольный момент \mathbf{m} ребра m вычисляется интегрированием поверхностного тока по площади смежных треугольников, что соответствует произведению эффективного тока диполя и его длины:

$$\mathbf{m} = \int_{T_m^+ + T_m^-} I_m \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) ds = I_m \int_{T_m^+ + T_m^-} \mathbf{f}_m(\mathbf{r}) ds = l_m I_m (\mathbf{r}_m^{c-} - \mathbf{r}_m^{c+}).$$

Напряженности магнитного и электрического полей в точке наблюдения \mathbf{r} , возбуждаемые одиночным бесконечно малым диполем m , расположенным в начале координат, могут быть записаны как [19]

$$\mathbf{H}_m(\mathbf{r}) = \frac{jk}{4\pi} (\mathbf{m} \times \mathbf{r}) \frac{1}{r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr},$$

$$\mathbf{E}_m(\mathbf{r}) = \frac{\eta}{4\pi} \left((\mathbf{M} - \mathbf{m}) \left[\frac{jk}{r} + C \right] + 2\mathbf{M}C \right) e^{-jkr}, \quad \mathbf{M} = \frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{m}) \mathbf{r}}{r^2},$$

где $r = |\mathbf{r}|$, $\eta = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Для структуры, состоящей из M диполей, результирующие электрическое \mathbf{E} и магнитное \mathbf{H} поля в \mathbf{r} определяются в виде суперпозиции \mathbf{E}_m и \mathbf{H}_m , вычисленных для каждого из M диполей отдельно:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^M \mathbf{E}_m \left(\mathbf{r} - \frac{1}{2} (\mathbf{r}_m^{c+} + \mathbf{r}_m^{c-}) \right), \quad (6)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^M \mathbf{H}_m \left(\mathbf{r} - \frac{1}{2} (\mathbf{r}_m^{c+} + \mathbf{r}_m^{c-}) \right). \quad (7)$$

При вычислениях поля в дальней зоне делается предположение о распространении плоской электромагнитной волны (по отношению к точке наблюдения \mathbf{r}), что приводит к следующим соотношениям:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \eta \mathbf{H}(\mathbf{r}) \times \frac{\mathbf{r}}{r},$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\eta} \frac{\mathbf{r}}{r} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}).$$

Расстояние до дальней зоны (зоны Фраунгофера) приближенно рассчитывается как [19]

$$R_f \approx \frac{2D_{\max}^2}{\lambda}, \quad (8)$$

где D_{\max} – максимальный линейный размер антенны, λ – длина волны.

Далее вокруг антенны производится построение сферы радиусом R_f , которая также задается набором треугольников, в центре каждого из которых вычисляется векторное произведение \mathbf{E} и \mathbf{H} для определения усредненной по периоду комплексной плотности потока энергии (вектора Умова-Пойнтинга):

$$\mathbf{W}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}^H(\mathbf{r})),$$

где верхний индекс у $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ обозначает эрмитово сопряжение. Это выражение характеризует плотность потока энергии электромагнитной волны, которая в дальней зоне имеет единственную радиальную составляющую W

$$\mathbf{W}(\mathbf{r}) = W \frac{\mathbf{r}}{r}.$$

Полная излучаемая мощность P_{rad} вычисляется как сумма произведений плотности потока энергии W в центрах треугольников сферы на их площадь. Далее для заданных точек в сферической системе координат $p_i(R_f, \theta_i, \varphi_i)$ производится вычисление плотности мощности излучаемого поля как $U = r^2 W$. Коэффициент направленного действия антенны вычисляется через нормированную плотность мощности:

$$D = 10 \lg(U/U_0), \quad (9)$$

где $U_0 = P_{\text{rad}} / (4\pi)$, а коэффициент усиления G определяется как

$$G = 10 \lg \frac{\max(U)}{U_0}. \quad (10)$$

Структура системы моделирования

На основе описанного алгоритма разработана система компьютерного моделирования радиотехнических характеристик антенн. На рис. 3 приведена структурная схема разработанной системы.

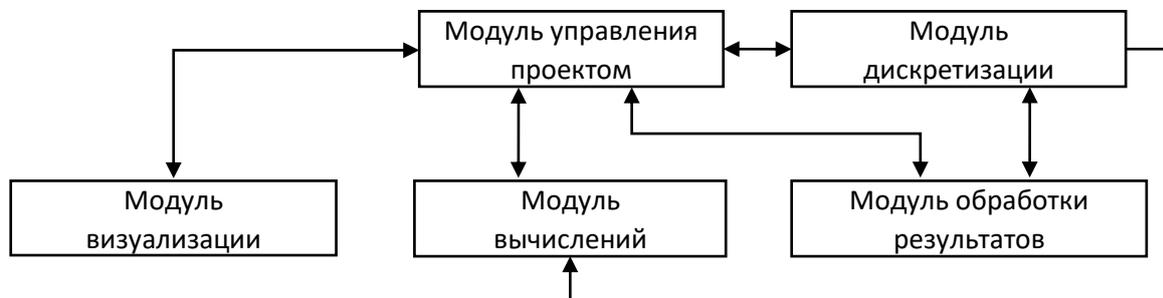


Рис. 3. Структурная схема системы моделирования

Система моделирования выполнена в виде набора независимых и функционально законченных модулей. Основным модулем системы, отвечающим за организацию и хранение необходимых для вычисления файлов, является модуль управления проектом. На начальном этапе работы с системой пользователь создает новый проект, который сохраняется в отдельной директории на рабочей станции. При создании проекта пользователь выбирает файл с исходной геометрией антенны в формате STEP. Далее файл дублируется в рабочую директорию и конвертируется в формат OFF, содержащий массивы координат и номеров вершин исходной полигональной сетки, которые используются в качестве исходных данных при дискретизации модели. Далее вводятся частотный диапазон моделирования и максимальный шаг расчетной сетки, которые сохраняются в текстовом файле в директории проекта. Для задания источника воздействия в зазоре между гранями модели антенны строится порт [19]. Посредством интерактивного взаимодействия с моделью антенны пользователь задает координаты точек a_1 и a_2 , определяющих высоту порта, а ширина порта вычисляется автоматически во время работы модуля дискретизации по заданному числу ячеек сетки на длину волны, которое преобразуется в максимальный шаг дискретизации Δ (рис. 4а). После этого выполняется процедура объединения расчетных сеток антенны и порта с последующим выбором ребра для задания напряжения V_{in} (пунктирная линия на рис. 4б). По результатам вычислений на одной из выбранных пользователем частот модуль производит сохранение вектора \mathbf{I} , а также параметров RWG-функций и их нумерацию в расчетной сетке. Описанный подход к организации хранения данных проекта позволяет получить повторный доступ к результатам моделирования без их повторного расчета после перезапуска системы.

Модуль дискретизации (см. рис. 3) формирует треугольную поверхностную сетку на основе заданного числа ячеек, укладываемых на длину волны. В программной реализации модуля используется алгоритм триангуляции Делоне из библиотеки CGAL [20], в качестве входных параметров которого при-

меняются геометрия антенны в формате OFF, максимальное значение шага дискретизации и число итераций адаптивного уточнения сетки.

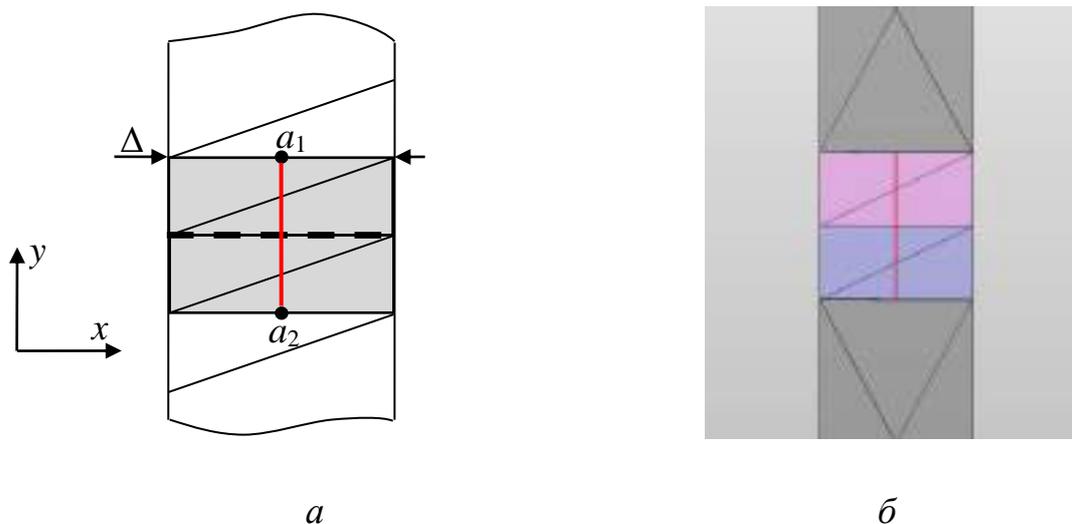


Рис. 4. Схематичное представление (а) и результат выполнения (б) процедуры задания источника возбуждения

При выполнении вычислений в диапазоне частот используется одна расчетная сетка, строящаяся относительно верхней границы частотного диапазона. На основе дискретизированной модели антенны модуль вычислений формирует СЛАУ в соответствии с (2)–(4) и выполняет её решение на каждой заданной частоте с использованием процедур из библиотеки Eigen [17] и директив OpenMP [18]. Затем полученные векторы \mathbf{I} используются в модуле обработки результатов для вычисления характеристик антенны по (6), (7), (9) и (10). Этот модуль также осуществляет формирование массивов данных для двумерного отображения характеристик излучения антенны в требуемых сечениях. Модуль визуализации служит для отображения трехмерной сцены, модели антенны и вычисленной диаграммы направленности (ДН). В нем также реализуются элементы графического интерфейса, служащие для вывода характеристик излучения на указанных плоскостях в полярной системе координат. Для реализации модуля используются библиотеки и средства разработки Qt [21], OpenCascade [22] и VTK [23]. Алгоритм работы системы, поясняющий процедуру вычисления радиотехнических характеристик антенны, приведен на рис. 5.

Валидация системы моделирования

Тестирование разработанной системы моделирования выполнено в соответствии с рекомендациями стандарта [24]. Для этого использованы три антенны, аналитические выражения и САПР EMPro (метод конечных разностей во временной области) [25]. Сначала рассмотрена модель симметричного полуволнового вибратора (диполя), выполненного из двух одинаковых бесконечно тонких идеально проводящих пластин размером $L \times w = 1000 \times 50 \text{ мм}^2$ (рис. 6)

[26]. На частоте 75 МГц с шагом дискретизации $\lambda/60$ вычислены нормированные амплитудные ДН в плоскостях $\theta = 90^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ (рис. 7).

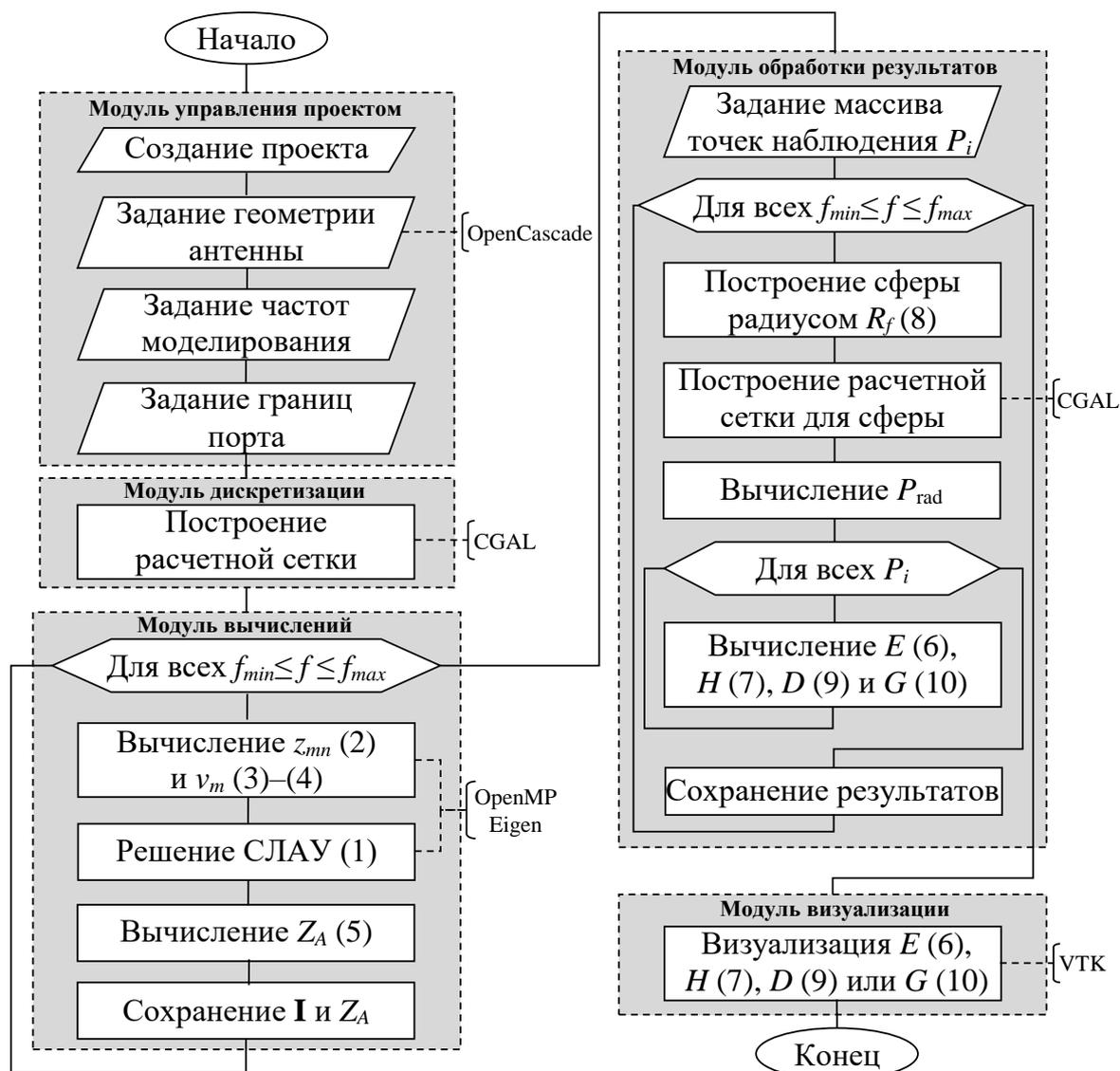


Рис. 5. Алгоритм работы системы

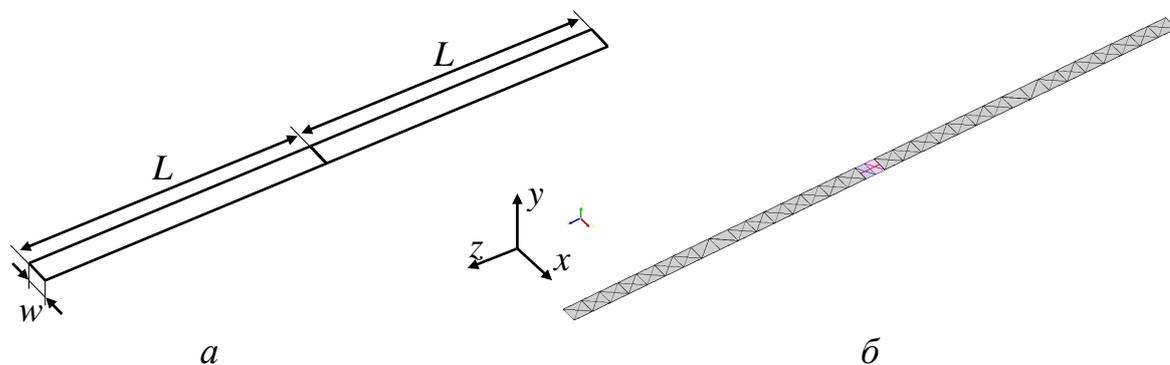


Рис. 6. Геометрическая модель (а) и расчетная сетка (б) диполя [26]

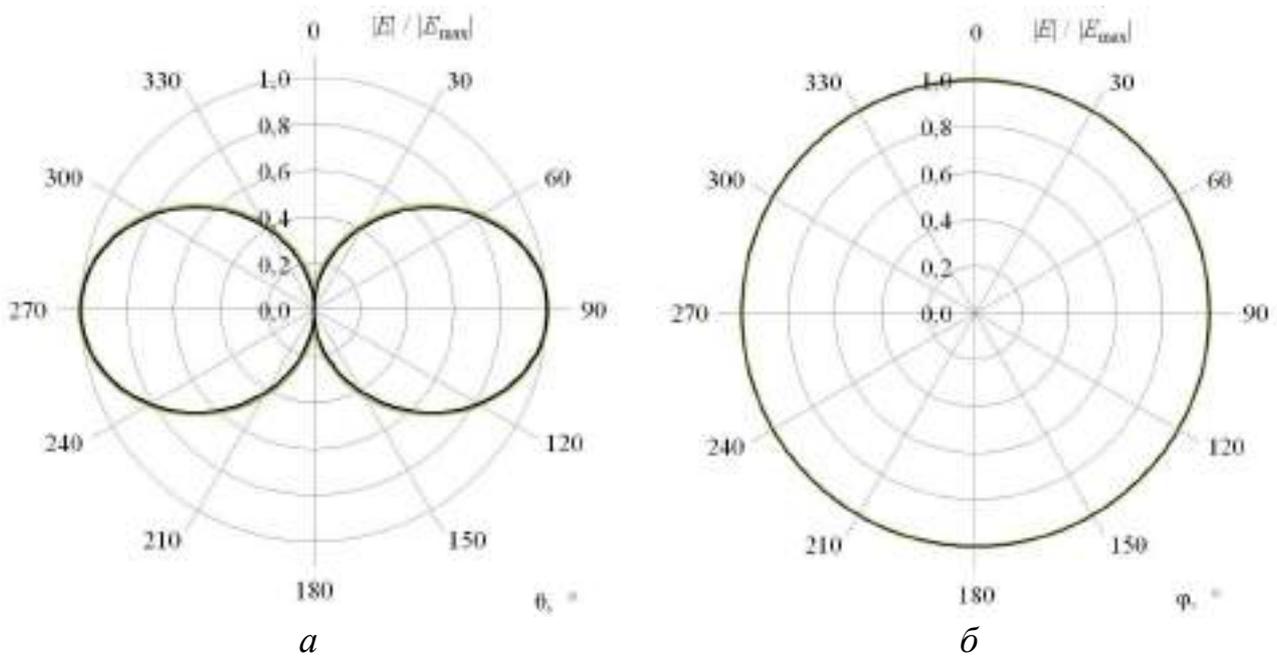


Рис. 7. Нормированные ДН диполя в плоскостях $\varphi = 90^\circ$ (а) и $\theta = 90^\circ$ (б) для 75 МГц: наши (—) и EMPro (—)

Во втором случае рассмотрена симметричная биконическая антенна (рис. 8а) с параметрами $a = 508$ мм, $g = 20$ мм и $\Theta_1 = \Theta_2 = 53,1^\circ$ из [27]. При моделировании шаг дискретизации принят $\lambda / 15$ (рис. 8б). Для сравнения результатов использованы EMPro и аналитические выражения из [28, 29]. Полученные ДН в плоскости $\theta = 90^\circ$ на частотах 100 МГц и 1 ГГц приведены на рис. 9.

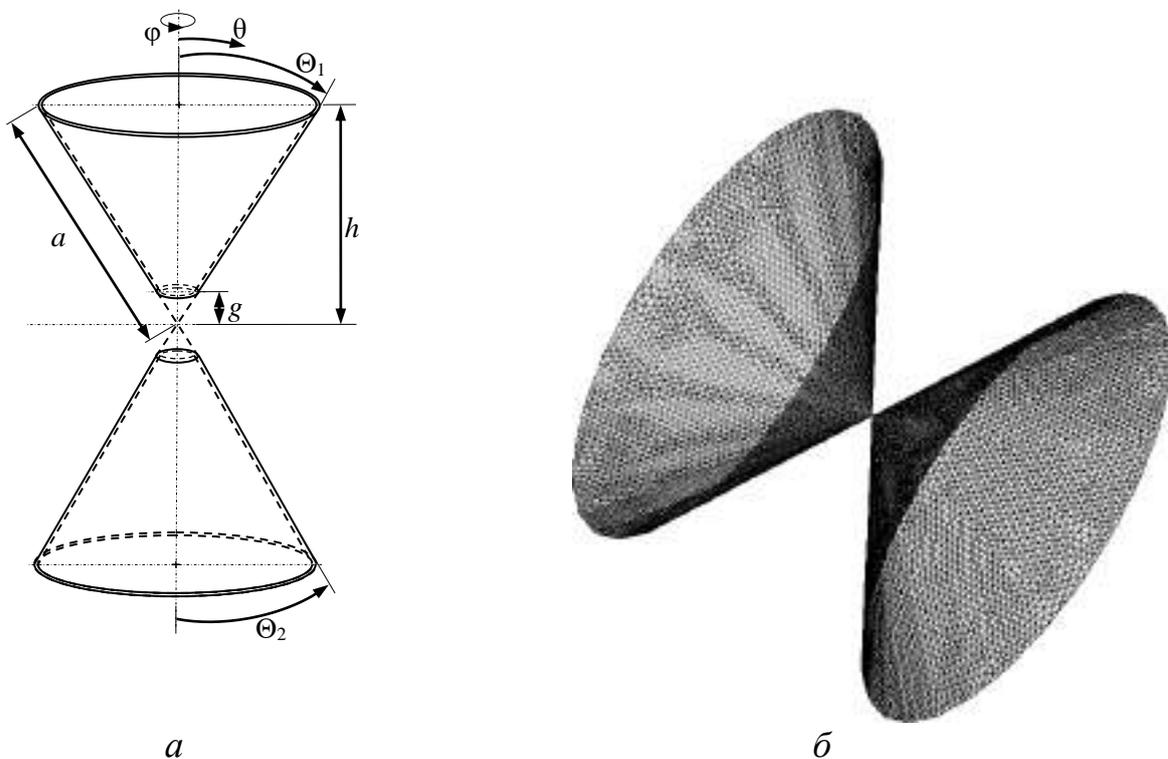


Рис. 8. Геометрическая модель (а) и расчетная сетка (б) симметричной биконической антенны

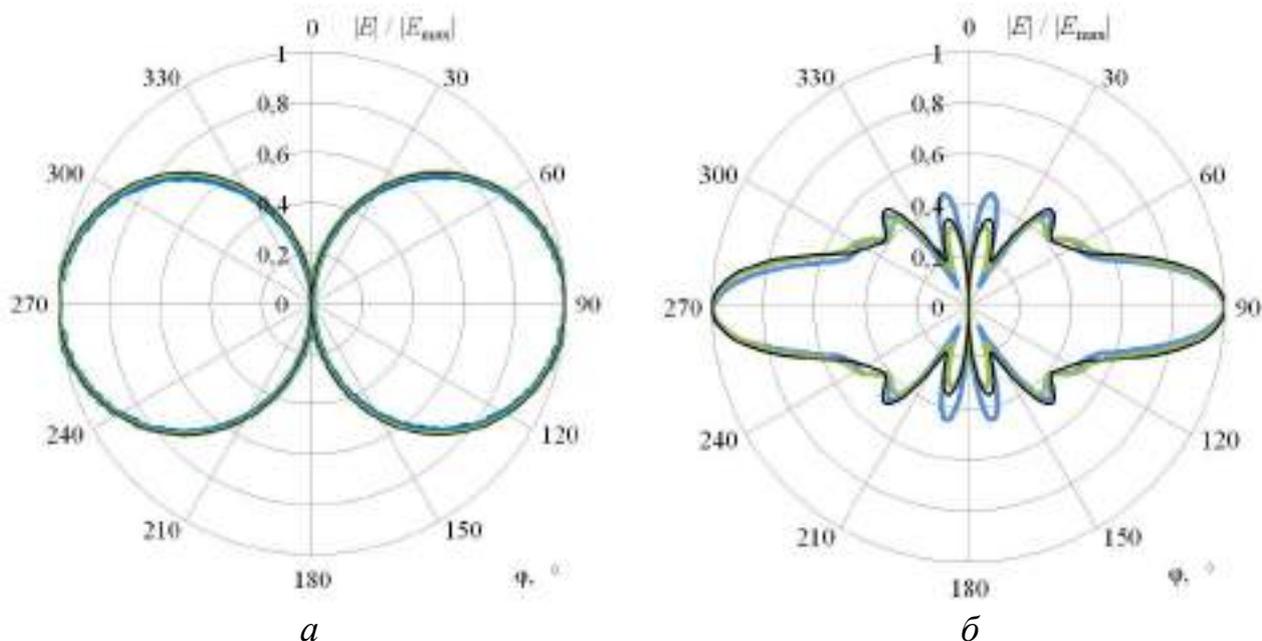


Рис. 9. Нормированные ДН для биконической антенны в плоскости $\theta = 90^\circ$ для 100 МГц (а) и 1 ГГц (б): наши (—), выражения из [28, 29] (---) и EMPro (—)

В третьем случае рассмотрена пирамидальная рупорная антенны с размерами (мм): $a_p = 80$; $b_p = 60$; $a = 23$; $b = 10$; $l = 150$; $l_r = 10$ (рис. 10а). Шаг дискретизации принят равным $\lambda/15$, а источник воздействия размещался в середине прямоугольного проводника, соединяющего центры широких стенок конца регулярной части рупора (рис. 10б). ДН, вычисленные на частоте 8 ГГц в основных плоскостях ($\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$), приведены на рис. 11. Из полученных результатов видно, что результаты, полученные в разработанной системе, EMPro и по аналитическим выражениям, хорошо согласуются, что подтверждает корректность разработанных алгоритма расчета и системы моделирования. Для наглядности трехмерные диаграммы коэффициентов усиления этих антенн приведены на рис. 12.

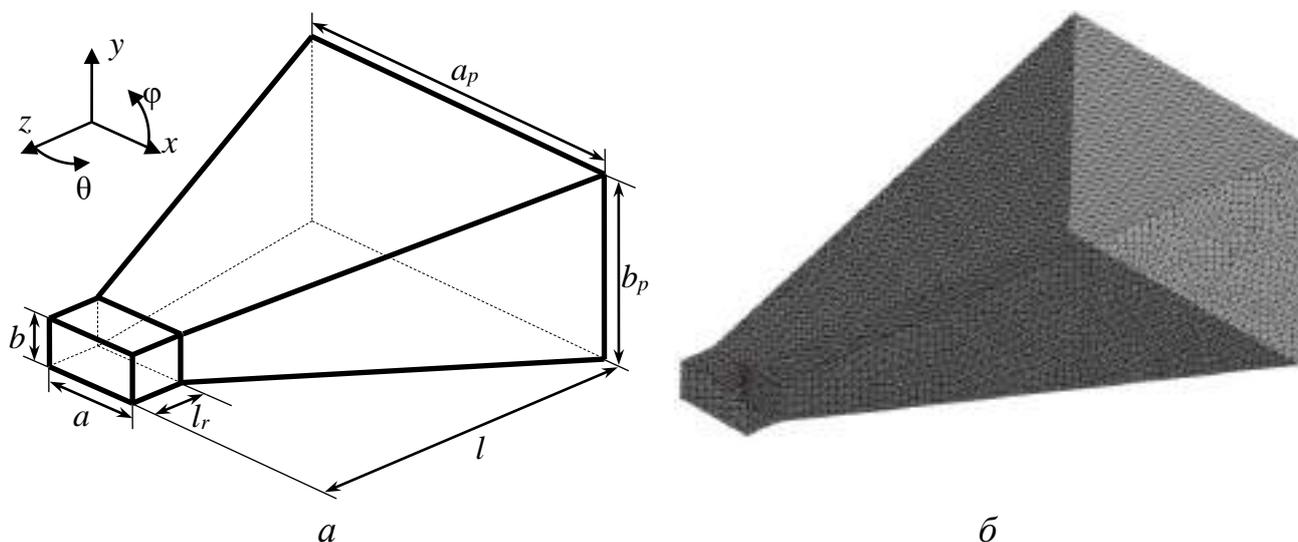


Рис. 10. Модель (а) и расчетная сетка (б) рупорной антенны

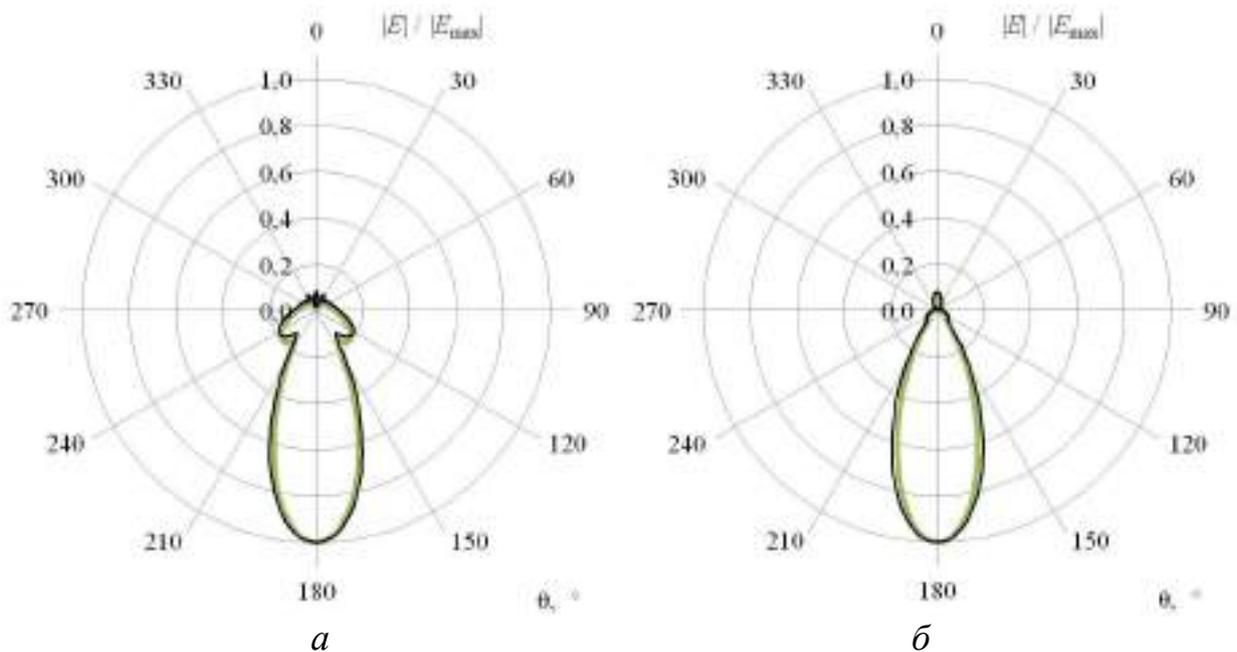


Рис. 11. Нормированные ДН рупорной антенны для 8 ГГц при $\varphi=0^\circ$ (а) и $\varphi=90^\circ$ (б): наши (—) и EMPro (---)

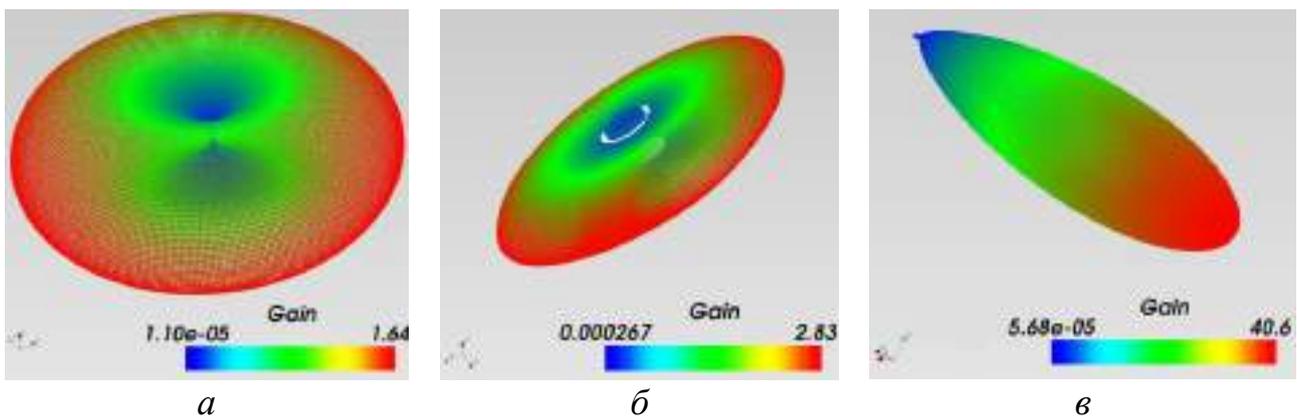


Рис. 12. Диаграммы коэффициентов усиления диполя (а), биконической (б) и рупорной (в) антенн для частот 75 МГц, 1 и 8 ГГц

Заключение

В данной работе приведены результаты разработки системы моделирования антенн, основанной на решении интегрального уравнения электрического поля методом моментов с использованием RWG-функций и барицентрического подразделения ячеек сетки на 9 субтреугольников. Разработана структура и алгоритм работы системы моделирования. Приведены особенности её программной реализации с использованием директив стандарта OpenMP, а также сторонних библиотек построения расчетной сетки, решения СЛАУ и визуализации результатов вычислений. Выполнено тестирование программно реализованной системы с помощью анализа трех различных антенн и сравнения полученных

результатов с данными из сторонней САПР и результатами аналитического расчета.

В рамках дальнейшего совершенствования системы целесообразна реализация различных подходов к уменьшению вычислительных затрат. Для этого могут быть использованы методы быстрых мультиполей и адаптивной перекрестной (мозаично-скелетной) аппроксимации, которые позволяют решать задачи анализа электрически больших объектов, не прибегая к распределенным вычислениям.

Благодарности

Авторы благодарят рецензента за ценные замечания, благодаря которым статья была значительно улучшена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по проекту FEWM-2020-0039.

Литература

1. Полянский И. С., Пехов Ю. С. Барицентрический метод в решении сингулярных интегральных уравнений электродинамической теории зеркальных антенн // Труды СПИИРАН. 2017. № 54. С. 244–262.

2. Банков С. Е., Курушин А. А. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ. – М.: Солон-Пресс, 2017. – 316 с.

3. Makarov S. N. Antenna and EM modeling with MATLAB. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 288 p.

4. Simulation for Connectivity, Compatibility, and Radar // Altair Feko [Электронный ресурс]. – <https://www.altair.com/feko> (дата обращения 10.12.2021).

5. W3031E PathWave Momentum | Keysight [Электронный ресурс]. – <https://www.keysight.com> (дата обращения 10.12.2021).

6. CONCEPT-II – Institut für Theoretische Elektrotechnik [Электронный ресурс]. – <https://www.tet.tuhh.de/concept-2> (дата обращения 10.12.2021).

7. Газизов Т. Р., Заболоцкий А. М., Куксенко С. П., Газизов Т. Т., Квасников А. А., Комнатнов М. Е., Суровцев Р. С. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S5-2 (102). С. 425–432.

8. Воскресенский Д. И., Кременецкий С. Д., Гринев А. Ю., Котов Ю. В. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ: учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов. – М.: Радио и связь, 1988. – 239 с.

9. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2005. – 320 с.

10. Григорьев А. Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2013. – 430 с.

11. Maiti S. K. Computer aided design of micro- and nanoelectronic devices. – Singapore: World Scientific Publishing Company, 2016. – 455 p.

12. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. – Томск: Изд-во Томского университета, 2002. – 128 с.
13. Gibson W. C. The method of moments in electromagnetics. – Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2008. – 272 p.
14. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation. 1982. Vol. 30. № 3. P. 409–418.
15. Kamen Y., Shirman L. Triangle rendering using adaptive subdivision // IEEE Computer graphics and applications. 1998. Vol. 18. № 2. P. 95–103.
16. Makarov S. MoM antenna simulations with Matlab: RWG basis functions // IEEE Antennas and propagation magazine. 2001. Vol. 43. № 5. P. 100–107.
17. Eigen [Электронный ресурс]. – URL: <https://eigen.tuxfamily.org> (дата обращения 10.12.2021).
18. Home – OpenMP [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.openmp.org> (дата обращения 10.12.2021).
19. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. 3rd ed. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – 1097 p.
20. The computational geometry algorithms library [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cgal.org> (дата обращения: 10.12.2021).
21. Qt // Cross-platform software development for embedded & desktop [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.qt.io> (дата обращения: 10.12.2021).
22. Open CASCADE Technology // Collaborative development portal [Электронный ресурс]. – URL: <https://dev.opencascade.org> (дата обращения: 10.12.2021).
23. VTK – The visualization toolkit [Электронный ресурс]. – URL: <https://vtk.org> (дата обращения 10.12.2021).
24. IEEE Standard 1597.1–2008 Standard for validation of computational electromagnetics computer modeling and simulation. Part 1, 2. – IEEE Standard, 2008. – 41 p.
25. PathWave EM Design (EMPro) // Keysight [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.keysight.com> (дата обращения: 10.12.2021).
26. Ding W., Wang G., Liang F., Yuan B. An enhanced gap source model // IEEE Transactions on antennas and propagation. 2013. Vol. 61. № 3. P. 1266–1272.
27. Papas C. H., King R. W. P. Radiation from wide-angle conical antennas fed by a coaxial line // Proceedings of the IRE. 1951. Vol. 39. № 1. P. 49–51.
28. Papas C.H., King R. W. P. Input impedance of wide-angle conical antennas fed by a coaxial line // Proceedings of the IRE. 1949. Vol. 37. № 11. P. 1269–1271.
29. Schelkunoff S. A. Electromagnetic Waves // New York: Van Nostrand, 1943, P. 354–358.

References

1. Polyanskii I. S., Pekhov Y. S. Baricentricheskij metod v reshenii singulyarnyh integral'nyh uravnenij elektrodinamicheskoy teorii zerkal'nyh antenn [The Barycentric Method in Solving Singular Integral Equations of Electrodynamics]

Theory of Mirror Antennas], *Papers of the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 54, pp. 244–262.

2. Bankov S. E., Kurushin A. A. *Elektrodinamika dlya pol'zovatelej SAPR SVCH* [Electrodynamics for microwave CAD users]. Moscow, Solon-Press, 2017. 316 p. (in Russian).

3. Makarov S. N. *Antenna and EM modeling with MATLAB*. New York, John Wiley & Sons, 2002. 288 p.

4. Simulation for Connectivity, Compatibility, and Radar. *Altair Feko*, 10 December 2021. Available at: <https://www.altair.com/feko> (accessed 10 December 2021).

5. W3031E PathWave Momentum. *Keysight*, 10 December 2021. Available at: <https://www.keysight.com> (accessed 10 December 2021).

6. CONCEPT-II - Institut für Theoretische Elektrotechnik. *Hamburg University of Technology*, 10 December 2021. Available at: <https://www.tet.tuhh.de/concept-2> (accessed 10 December 2021).

7. Gazizov T. R., Zabolockii A. M., Kuksenko S. P., Gazizov T. T., Kvasnikov A. A., Komnatnov M. E., Surovcev R. S. Modelirovanie elementov kritichnoj radioelektronnoj apparatury: novye podhody, modeli i algoritmy, ih realizaciya i primeneniye [Simulation of Critical Electronics Elements: New Approaches, Models and Algorithms, Their Implementation and Applications], *Nanoindustry*, 2020, vol. 13, no. S5-2 (102), pp. 425–432.

8. Voskresensky D. I., Kremenetsky S. D., Grinev A. Y., Kotov Y. V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie antenn i ustrojstv SVCH* [Automated Design of Antennas and Microwave Devices]. Moscow, Radio i svyaz', 1988. 220 p. (in Russian).

9. Samarskij A. A., Mihajlov A. P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery* [Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 320 p. (in Russian).

10. Grigor'ev A. D. *Metody vychislitel'noj elektrodinamiki* [Methods of Computational Electrodynamics]. Moscow, Fizmatlit, 2013. 430 p. (in Russian).

11. Maiti C. K. *Computer aided design of micro- and nanoelectronic devices*. Singapore, World Scientific Publishing Company, 2016. 455 p.

12. Skvorcov A. V. *Triangulyaciya Delone i ee primeneniye* [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk, Tomsk University Press, 2002. 128 p.

13. Gibson W. C. *The method of moments in electromagnetics*. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC, 2008. 272 p.

14. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 1982, vol. 30, no. 3, pp. 409–418.

15. Kamen Y., Shirman L. Triangle rendering using adaptive subdivision. *IEEE Computer graphics and applications*, 1998, vol. 18, no. 2, pp. 95–103.

16. Makarov S. MoM antenna simulations with Matlab: RWG basis functions. *IEEE Antennas and propagation magazine*, 2001, vol. 43, no. 5, pp. 100–107.

17. Eigen. *Eigen*, 10 December 2021. Available at: <https://eigen.tuxfamily.org> (accessed 10 December 2021).

18. Home – OpenMP. *OpenMP*, 10 December 2021. Available at: <https://www.openmp.org> (accessed 10 December 2021).
19. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design. 3rd ed.* New York, John Wiley & Sons, 2005. 1097 p.
20. The computational geometry algorithms library. *CGAL*, 10 December 2021. Available at: <https://www.cgal.org> (accessed 10 December 2021).
21. Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop. *Qt*, 10 December 2021. Available at: <https://www.qt.io> (accessed 10 December 2021).
22. Open CASCADE Technology. Collaborative development portal. *Open CASCADE*, 10 December 2021. Available at: <https://dev.opencascade.org> (accessed 10 December 2021).
23. VTK – The visualization toolkit. *VTK*, 10 December 2021. Available at: <https://vtk.org> (accessed 10 December 2021).
24. IEEE Std 1597.1–2008. Standard for validation of computational electromagnetics computer modeling and simulation. Part 1, 2. – IEEE Standard, 2008. – 41 p.
25. PathWave EM Design (EMPro). *Keysight*, 10 December 2021. Available at: <https://www.keysight.com> (accessed 10 December 2021).
26. Ding W., Wang G., Liang F., Yuan B. An enhanced gap source model. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2013, vol. 61, no. 3, pp. 1266–1272.
27. Papas C.H., King R. W. P. Radiation from wide-angle conical antennas fed by a coaxial line. *Proceedings of the IRE*, 1951, vol. 39, no. 1, pp. 49–51.
28. Papas C.H., King R. W. P. Input impedance of wide-angle conical antennas fed by a coaxial line. *Proceedings of the IRE*, 1949, vol. 37, no. 11, pp. 1269–1271.
29. Schelkunoff S. A. *Electromagnetic Waves*. New York: Van Nostrand, 1943, pp. 354–358.

Статья поступила 14 декабря 2021 г.

Информация об авторах

Квасников Алексей Андреевич – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; численные методы; системы автоматизированного проектирования. E-mail: aleksejkvasnikov@tu.tusur.ru

Демаков Александр Витальевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Доцент кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: устройства для испытаний на электромагнитную совместимость; численные методы; системы автоматизированного проектирования. E-mail: demakov_av@tu.tusur.ru

Иванов Антон Андреевич – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Аспирант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитное экранирование; измерения в области электромагнитной совместимости; численные методы. E-mail: anton.ivn@tu.tusur.ru

Клюкин Дмитрий Владимирович – инженер научно-исследовательской лаборатории «Фундаментальные исследования по электромагнитной совместимости». Магистрант кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: численные методы; системы автоматизированного проектирования. E-mail: dv_klyukin@tu.tusur.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Доцент кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; электромагнитное экранирование; устройства для испытаний на ЭМС. E-mail: maxmek@mail.ru

Куксенко Сергей Петрович – доктор технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Профессор кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; численные методы; системы автоматизированного проектирования. E-mail: ksergp@tu.tusur.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, Ленина пр., д. 40.

Software for Antenna Simulation by the Method of Moments

A. A. Kvasnikov, A. V. Demakov, A. A. Ivanov, D. V. Klyukin,
M. E. Komnatnov, S. P. Kuksenko

Formulation of the problem. Antenna design is one of the main problems in the development of modern radioelectronic equipment. Various computer-aided design systems are widely used to solve it. There are no full-fledged domestic analogues of foreign design systems, therefore, in the context of import substitution, it is necessary to study the issue of creating a domestic system with a wide range of functional capabilities and a high degree of integration with existing software packages. **Purpose.** The aim of the work is to present the results of the development of a simulation software for the radioengineering characteristics of antennas by the method of moments. **Methods.** To solve the problem of antenna simulation, the numerical method of moments is used, in which the metal surfaces of the antenna are replaced by equivalent surface currents. A triangular polygonal mesh representation is used to approximate the curvilinear boundaries of the surfaces of antenna models, and RWG basic functions are used to represent the current in the mesh cells. **The novelty** is the developed and software-implemented antenna simulation algorithm, which is distinguished by the co-use of barycentric subdivision of mesh cells on 9 subtriangles for the surface integrating

and parallel computations using the OpenMP standard. **Results.** Based on the proposed algorithm, a simulation software was developed and tested on the example of three antennas with different designs. **Practical relevance.** The developed simulation software can be used in the synthesis and analysis of a wide range of antenna types.

Key words: computational electromagnetics, numerical methods, method of moments, antenna, radiation pattern, input impedance, simulation software.

Information about Authors

Aleksey Andreevich Kvasnikov – Junior Researcher of the research laboratory of «Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities». Postgraduate student at the department of television and control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods; computer-aided design software. E-mail: aleksejkvasnikov@tu.tusur.ru.

Aleksandr Vitalievich Demakov – Ph.D. of engineering sciences. Senior researcher of the research laboratory of «Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities». Associate professor at the department of television and control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility test facilities; numerical methods; computer-aided design software. E-mail: demakov_av@tu.tusur.ru.

Anton Andreyevich Ivanov – Junior Researcher of the research laboratory of «Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities». Postgraduate student at the department of television and control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic shielding; electromagnetic compatibility measurements; numerical methods; computer-aided design software. E-mail: anton.ivn@tu.tusur.ru.

Dmitrii Vladimirovich Klukin – Engineer of the research laboratory of «Fundamental study of electromagnetic compatibility». Master's degree student at the department of television and control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: numerical methods; computer-aided design software. E-mail: dv_klyukin@tu.tusur.ru.

Maksim Evgen'evich Komnatnov – Ph.D. of engineering sciences. Senior researcher of the research laboratory of «Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities». Associate professor at the department of television and control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; electromagnetic shielding; facilities for electromagnetic compatibility testing. E-mail: maxmek@mail.ru.

Kuksenko Sergey Petrovich – Dr. habil. of engineering science, docent. Chief of the research laboratory of «Safety and electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities». Professor at the department of television and control. Tomsk state university of control systems and radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods; computer-aided design software. E-mail: ksergp@tu.tusur.ru.

Address: Russia, 634050, Tomsk, Lenina prospekt, 40.