

УДК 517.9 + 621.396.6

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2013 М.А. Бузова, С.А. Букашкин, М.А. Минкин¹

Рассмотрены ключевые вопросы построения системы комбинированных методов математического моделирования сложных электродинамических систем. Выполнена постановка задачи, и указаны основные комбинированные методы математического моделирования.

Ключевые слова: интегральные уравнения, физическая оптика, комбинированные методы, математические модели.

1. Постановка задачи

Методы, алгоритмы и программные средства математического моделирования являются существенной неотъемлемой частью современных технологий решения широкого класса научных проблем фундаментального и прикладного характера. В полной мере это относится и к математическому моделированию электродинамических систем, основные закономерности существования и функционирования которых описываются уравнениями классической макроскопической электродинамики. Подобные системы как объект исследования рассматриваются применительно к исследованиям самых различных процессов взаимодействия электромагнитных волн с естественными и искусственными средами и телами.

В качестве примеров прикладных сфер применения математического моделирования электродинамических систем можно отметить широкий класс задач анализа распространения радиоволн различных диапазонов в реальных условиях естественного и искусственного рельефа; оптимизации геометрических и электрофизических характеристик излучающих и переизлучающих систем в составе радиотехнических комплексов различного назначения в целях реализации заданных характеристик назначения, обеспечения электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности; снижения радиолокационной заметности объектов и, напротив, изыскания путей повышения эффективности радиолокации; создания новых искусственных электродинамических систем; разработки новых систем дистанци-

¹Бузова Мария Александровна (mariabuz@mail.ru), Букашкин Сергей Анатольевич (fgur@nii.ru), Минкин Марк Абрамович (markminkin@yandex.ru), ОАО "Концерн "Автоматика", 127106, Российская Федерация, г. Москва, ул. Ботаническая, 25.

онной диагностики и мониторинга; создания новых волновых технологий модификации и обработки материалов и многие другие.

В настоящее время современные технические объекты, применительно к которым приходится решать задачи математического моделирования, достаточно часто характеризуются компактным размещением излучающих, переизлучающих и сторонних тел существенно различных конфигураций и геометрических размеров. В составе таких объектов функциональные излучающие элементы нередко весьма различных типов и частотных диапазонов размещены в непосредственной близости друг от друга и от разнообразных сторонних рассеивателей. В этих условиях характеристики каждого излучающего элемента существенно зависят от других элементов, а также от окружающих рассеивателей, поэтому вся их совокупность должна рассматриваться и моделироваться как единая *сложная электродинамическая система*. Взаимодействие элементов при этом есть не что иное, как совокупность системных связей (отношений). Следствием же игнорирования системных связей является низкая точность моделирования.

Постоянно возрастающие требования к качеству, достоверности и точности результатов численного моделирования технических систем предполагают максимально полный и точный учет геометрических и электрофизических характеристик всех составных частей соответствующей сложной электродинамической системы. Это, в свою очередь, предъявляет повышенные требования к адекватности электродинамических моделей и точности расчетных методов, а также к их ресурсоемкости и эффективности, особенно когда речь идет о решении оптимизационных задач. Современные методы и программные средства математического моделирования электродинамических систем представлены в основном набором объектно ориентированных частных методов, каждый из которых эффективен для определенного ограниченного класса излучающих (рассеивающих) объектов.

Однако, как уже было отмечено, реальная сложная электродинамическая система в большинстве случаев содержит рассеиватели электромагнитного поля с существенно различными электрическими размерами, пространственными формами и электрофизическими характеристиками. При этом для получения высокой точности и одновременно высокой эффективности расчетов к различным элементам анализируемой электродинамической системы должны применяться, вообще говоря, различные математические модели и соответственно разные методы анализа.

Поэтому для решения указанной проблемы в последние годы разработаны и продолжают разрабатываться различные комбинированные методы математического моделирования, основанные на совместном использовании различных частных методов с учетом характеристик отдельных составных частей электродинамической системы.

Однако на сегодняшний день этого оказывается недостаточно. В работах авторов была предпринята попытка дальнейшего развития в области конвергенции частных методов математического моделирования и анализа и глубокого научного обобщения основных закономерностей в указанной области исследований на основе системного подхода. В результате этого была создана *система комбинированных методов математического моделирования*, позволяющая обеспечить максимально высокую эффективность и точность расчетов для сложных электродинамических систем, содержащих большое число разнообразных излучающих и переизлучающих элементов. Основные идеи и принципы построения системы комбинированных методов будут рассмотрены ниже.

2. Классификация рассеивателей и методы их моделирования

Прежде всего, была выполнена классификация рассеивателей, наиболее часто входящих в состав сложных электродинамических систем. При этом в качестве критерия для классификации использовалась геометрическая форма рассеивателей, так как именно от этого фактора зависит тип используемых методов математического моделирования.

Всего было выделено пять типов [1]:

- существенно тонкие линейные проводники, радиус которых согласно общепринятому подходу не превышает $0,01\lambda$ (здесь и далее λ — длина волны);
- линейные проводники, поперечные размеры которых достаточно велики (более $0,01\lambda$);
- поверхностные рассеиватели произвольной незамкнутой формы небольших электрических размеров;
- поверхностные рассеиватели произвольной замкнутой формы небольших электрических размеров;
- слабо искривленные весьма протяженные поверхностные рассеиватели.

Для выбора наиболее адекватного метода математического моделирования каждого из указанных типов рассеивателей были разработаны соответствующие математические модели. Далее на основе разработанных моделей были разработаны комбинированные методы математического моделирования, которые совместно с ранее известными составили единую систему методов (рис. 1).

Для математического моделирования линейных проводников разработаны математическая модель и соответствующий комбинированный метод на основе уравнений Фредгольма первого и второго рода в тонкопроволочном приближении [1–3]. При этом уравнения первого рода используются для моделирования существенно тонких проводников, а уравнения второго рода — достаточно толстых линейных проводников. Предлагаемый метод обеспечивает адекватное описание толстых проводников и в то же время выигрыш в вычислительных ресурсах по сравнению с использованием классических уравнений второго рода.

Отдельной сложной задачей является моделирование слабо искривленных, весьма протяженных поверхностных рассеивателей конечной толщины. Из-за больших размеров рассеивателей и соответственно больших необходимых вычислительных ресурсов применение к данным рассеивателям традиционных математических моделей на основе интегральных уравнений первого рода является весьма проблематичным. Поэтому для моделирования таких элементов разработаны и продолжают разрабатываться в настоящее время различные комбинированные методы, объединяющие строгие методы интегральных уравнений и приближенные методы. Большинство из этих методов основаны на объединении интегральных уравнений первого рода и асимптотического метода физической оптики [4–6].

Однако указанные методы имеют ряд существенных недостатков. В большинстве из них строго не учитывается взаимодействие между областями интегральных уравнений и физической оптики. Кроме того, в таких подходах не учитывается реальная толщина рассеивателей: они рассматриваются как бесконечно тонкие.

Для нивелирования данных недостатков авторами предложен подход, основанный на комбинировании интегральных уравнений второго рода и физической оптики с пересечением областей интегральных уравнений и физической оптики. Достоинствами такого подхода являются строгий учет взаимодействия между об-

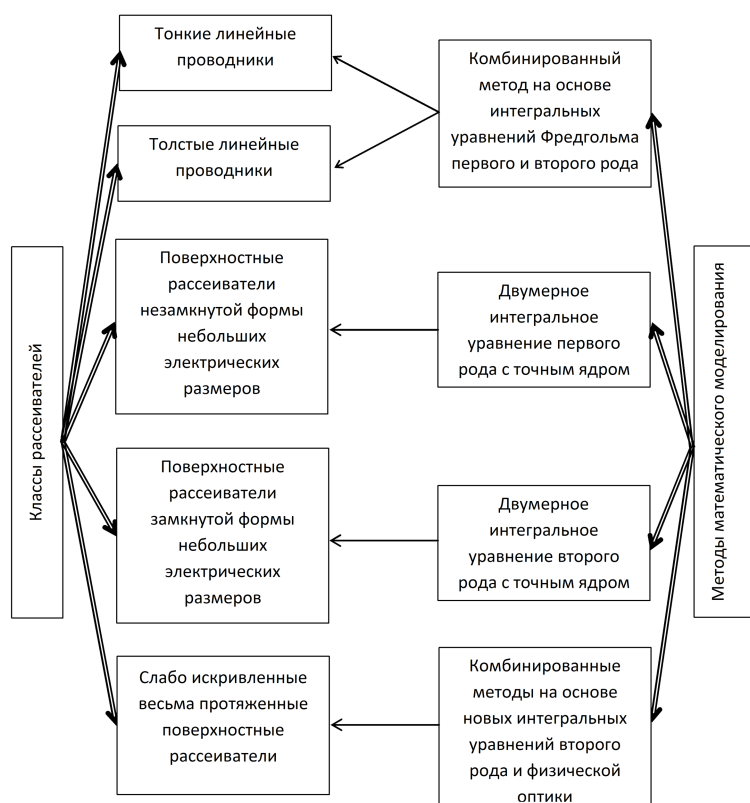


Рис. 1. Классификация рассеивателей и методов их моделирования

ластями интегральных уравнений и физической оптики, а также учет реальной толщины рассеивателя. Наряду с указанными достоинствами предлагаемый подход имеет и существенный недостаток с точки зрения затраты вычислительных ресурсов, заключающийся в двукратном увеличении области определения искомой токовой функции по сравнению с интегральными уравнениями первого рода (без учета толщины рассеивателя). Для устранения этого недостатка были получены новые интегральные уравнения второго рода относительно эквивалентных источников, для которых область определения искомой токовой функции остается такой же, как и в интегральных уравнениях первого рода. С использованием полученных уравнений были разработаны две математические модели анализа такого типа рассеивателей [1–3; 7; 8].

В рамках первой математической модели эквивалентный источник протекает на воображаемой поверхности, проходящей посередине между реальными поверхностями рассеивателя, и полагается равным сумме токов, текущих по обеим сторонам рассеивателя. Модель представляет собой полную систему интегральных уравнений, одно из которых соответствует методу физической оптики, а другое — методу интегральных уравнений второго рода. На этой основе был разработан комбинированный метод моделирования таких рассеивателей, основанный на решении полученной системы уравнений.

Вторая математическая модель строится аналогично первой. Отличие ее состоит в том, что в качестве эквивалентного источника рассматривается поверхност-

ный ток, текущий по освещенной стороне рассеивателя. При этом ток на теневой стороне вычисляется по току на освещенной с использованием физико-оптического решения. На этой основе разработан комбинированный метод моделирования.

Что касается поверхностных рассеивателей небольших электрических размеров произвольной, незамкнутой или замкнутой формы, их моделирование осуществляется известными методами на основе интегральных уравнений с поверхностными интегралами первого или второго рода.

Как уже было отмечено выше, для математического моделирования сложных электродинамических систем все разработанные, а также уже известные комбинированные методы объединяются в общую систему. Полученная в результате такого подхода система в общем виде состоит из десяти скалярных интегральных уравнений, каждое из которых формализует соответствующую математическую модель [1–3]:

$$\Phi_n^0(\vec{r}) = j_n(\vec{r}) + \sum_{k=1}^{10} [A_{nk}(j_k(\vec{r}'))](\vec{r}), n = 1...10, \quad (1)$$

где $\Phi_n^0(\vec{r})$ – функция стороннего электрического или магнитного поля; $j_n(\vec{r})$ – искомая плотность тока; A_{nk} – операторы соответствующих интегральных уравнений.

На основе полученной системы (1) был разработан общий алгоритм математического моделирования сложных электродинамических систем [3]. Особенностью разработанного алгоритма является наличие элементов экспертной системы, которая строится на основе базы знаний о классификации рассеивателей. Такая база знаний позволяет уже на раннем этапе ограничить пространство выбора того или иного метода математического моделирования. Для выполнения классификации в случае поверхностных рассеивателей использовалось дерево принятия решений об оптимальном (с точки зрения использования вычислительных ресурсов) методе математического моделирования.

Разработанный общий алгоритм математического моделирования был использован при построении нескольких проблемно ориентированных программных комплексов для решения ряда прикладных задач. Так, было выполнено математическое моделирование антенных систем, компактно размещаемых на подвижных объектах; антенных систем, компактно размещаемых на стационарных объектах; крышевых антенных систем. Результаты проведенного математического моделирования убедительно подтвердили работоспособность и эффективность разработанного алгоритма.

3. Результаты расчетов

В качестве примера применения разработанного алгоритма математического моделирования рассмотрим классическую электродинамическую систему, состоящую из полуволнового вибратора и экрана конечных размеров (рефлектора). Расстояние от вибратора до экрана выберем оптимальным для рефлекторных антенн, а именно равным $0,25\lambda$. Радиус вибратора выберем равным $0,01\lambda$ для его моделирования с помощью уравнения Фредгольма первого рода.

Сначала рассмотрим рефлектор электрически небольших размеров: ширина – $0,5\lambda$, высота – $0,7\lambda$, толщина – $0,05\lambda$. Размеры экрана выбраны таким образом, чтобы было возможно применение интегрального уравнения второго рода.

На рис. 2 показаны некоторые результаты моделирования данной электродинамической системы, а именно распределения тока и диаграммы направленности системы в вертикальной (*а*) и горизонтальной (*б*) плоскостях. Из рисунка видно, что полученные результаты соответствуют общефизическим закономерностям, а также теории антенн.

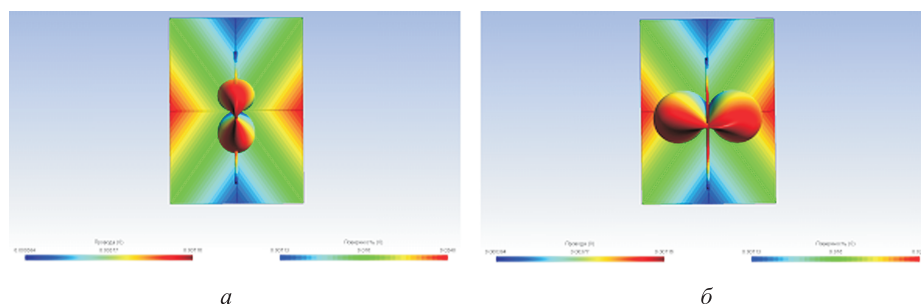


Рис. 2. Распределение тока и диаграммы направленности системы "вибратор-экран" (размеры экрана $0,5\lambda \times 0,7\lambda$)

Далее рассмотрим рефлектор с большими электрическими размерами – квадратный экран со стороной 4λ . Для моделирования данного рефлектора используем комбинированный метод на основе интегрального уравнения второго рода относительно эквивалентного источника. При проведении моделирования задавались следующие дополнительные геометрические параметры системы: линейный размер сегмента разбиения – $0,14\lambda$; ширина полосы у кромки экрана, отведенной для области интегрального уравнения, – 1λ ; ширина площадки в центре экрана, отведенной для области интегрального уравнения, – $0,3\lambda$. На рис. 3 показаны аналогичные результаты моделирования – распределения тока и диаграммы направленности системы в вертикальной (*а*) и горизонтальной (*б*) плоскостях. Из данного рисунка видно, что полученные результаты также соответствуют общефизическим закономерностям и теории антенн.

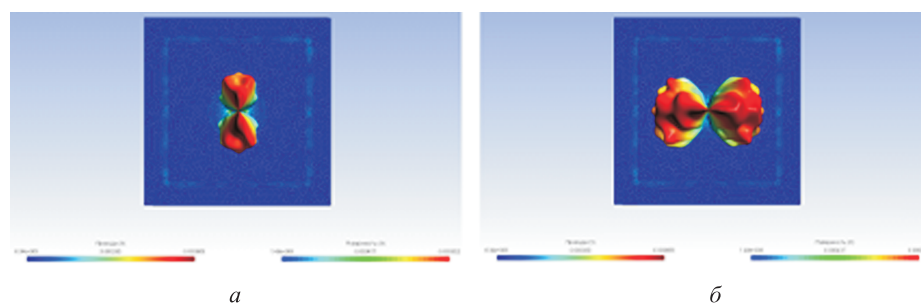


Рис. 3. Распределение тока и диаграммы направленности системы "вибратор-рефлектор" (размеры экрана $4\lambda \times 4\lambda$)

Заключение

Таким образом, рассмотренная в данной работе система комбинированных методов математического моделирования позволяет моделировать сложные электродинамические системы, содержащие большое количество разнообразных рассеивателей. Работоспособность и эффективность разработанной системы методов подтверждены проведенными численными экспериментами и практической реализацией алгоритма.

Литература

- [1] Бузова М.А. Методы электродинамического моделирования эклектичных антенных систем // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr12/4/text.pdf>.
- [2] Бузова М.А. Электродинамический анализ эклектичных антенных систем // Радиотехника. 2011. № 11. С. 55–59.
- [3] Бузова М.А., Филиппов Д.В., Юдин В.В. Моделирование процессов взаимодействия радиоволн с элементами сложных излучающих и переизлучающих систем // Известия вузов. Сер.: Физика. 2012. № 9/2. С. 70–71.
- [4] Jakobus U., Landstorfer F.M. Improvement of the PO-MoM hybrid method by accounting for effects of perfectly conducting wedges // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1995. V. 43. № 10. P. 1123–1129.
- [5] Hodges R.E., Rahmat-Samii Y. An iterative current-based hybrid method for complex structures // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 1997. V. 45. № 2. P. 265–276.
- [6] Djordjevic M., Notaros B.M. Higher order hybrid method of moments–physical optics modeling technique for radiation and scattering from large perfectly conducting surfaces // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2005. V. 53. № 2. P. 800–813.
- [7] Buzova M.A. Efficiency of the Novel Hybrid Methods Based on Magnetic Field Integral Equations // Proceedings of the 2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications. Cape Town, South Africa. 2012. September 2–7. P. 206–207.
- [8] Бузова М.А., Юдин В.В. Исследование вопросов сокращения вычислительных ресурсов при использовании интегральных уравнений второго рода для анализа эклектичных антенных систем // Радиотехника. 2012. № 6. С. 82–86.

Поступила в редакцию 22/I/2013;
в окончательном варианте — 22/I/2013.

SYSTEM CREATING OF HYBRID METHODS OF MATHEMATICAL MODELING OF DIFFICULT ELECTRODYNAMICS SYSTEMS

© 2013 M.A. Buzova, S.A. Bukashkin, M.A. Minkin²

In this paper, we demonstrate key problems of constructing a system of hybrid methods for mathematical modeling of complicated electrodynamics systems. The problem is posed and the main hybrid methods of mathematical modeling are given.

Key words: integral equations, physical optics, hybrid methods, mathematical models.

Paper received 22/I/2013.

Paper accepted 22/I/2013.

²Buzova Maria Alexandrovna (mariabuz@mail.ru), Bukashkin Sergey Anatolievich (fgup@niia.ru), Minkin Mark Abramovich (markminkin@yandex.ru), JSC "Concern "Automatics", Moscow, 127106, Russian Federation.