

Применение компьютерных программ электродинамического моделирования для анализа приемозлучающих структур

С. Н. Разиньков¹, e-mail: razinkovsergey@rambler.ru,
Д. Н. Борисов², e-mail: borisov@sc.vsu.ru,
А. В. Богословский¹, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

² Воронежский Государственный Университет

***Аннотация.** Представлены базовые принципы компьютерного моделирования приемозлучающих структур в интересах анализа характеристик и выбора рациональных параметров конструкции для достижения требуемых показателей избирательности излучения и приема электромагнитных волн. Определены основные пути повышения эффективности компьютерных программ в процессе исследований приемозлучающих структур на основе их совместного использования с системами построения цифровых моделей и способами аналитического и численного решения краевых задач электродинамики для нахождения приближенного распределения токов приемозлучающих компонентов и несущих поверхностей.*

***Ключевые слова:** приемозлучающая структура, компьютерные программы электродинамического моделирования, анализ.*

Введение

Повышение требований к пространственной избирательности [1] радиоканалов и усложнение конструкций приемозлучающих структур, используемых в современных информационно-телекоммуникационных устройствах, определяют потребности исследования широкого перечня закономерностей излучения и приема электромагнитных волн [2] для выявления факторов, влияющих на эффективность информационного обмена. Сложные взаимосвязи между характеристиками и параметрами структур, обуславливающие неоднозначные показатели эффективности выполнения целевых функций при различных вариантах исполнения, в ряде практически важных случаев ограничивают возможности решения данной задачи с применением аналитических (численно-аналитических) подходов [3, 4].

Аналитические способы исследования разработаны для отдельных видов приемоизлучающих элементов, расположенных в бесконечно протяженном однородном изотропном пространстве и возбуждаемых плоскими монохроматическими волнами. Они не позволяют определять характеристики и параметры конструкций, размещенных на носителях, с учетом электрофизических свойств несущих компонентов и на единой методической основе оценивать показатели избирательности излучения (приема) сигналов и качества согласования структур с передатчиками и приемниками [2].

Численно-аналитические методы применяются для исследования структур, носителями которых выступают поверхности простой формы (плоские, цилиндрические и клиновидные экраны, полости, фрагменты сферы и т.д.) [3]. Их суть состоит в нахождении приближенных решений краевых задач путем частичного обращения операторов, связывающих распределения волновых процессов, возбуждающих приемоизлучающие структуры, и сигналов, излучаемых (принимаемых) информационно-телекоммуникационными устройствами [4]. Постановка краевых задач электродинамики в основном выполняется при граничных условиях для касательных составляющих полного электрического поля [5] и ввиду его потенциального характера является математически некорректной. При этом формализованное описание процедур взаимных преобразований излучаемых (принимаемых) волновых процессов и сигналов в трактах информационно-телекоммуникационных устройств, базирующееся на выполнении операций интегрирования распределения поверхностных токов приемоизлучающих структур, является достаточно сложным, а технологии частичного обращения операторов краевых задач требуют применения методов регуляризации при поиске устойчивых, физически реализуемых однозначных решений.

В этой связи для анализа и определения параметров конструкций приемоизлучающих структур целесообразно применять компьютерные программы электродинамического моделирования [6–8].

Цель работы – оценка возможностей и обоснование рекомендаций по применению компьютерных программ электродинамического моделирования для анализа приемоизлучающих структур

1. Базовые принципы компьютерного моделирования приемоизлучающих структур

Базовые принципы построения и применения компьютерных программ электродинамического моделирования приемоизлучающих структур будем анализировать применительно к пакетам CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio [6] и Altair FEKO – FEldberechnung bei Korpfern mit beliebiger Oberflache [7, 8].

Компьютерные программы электродинамического моделирования предназначены для анализа характеристик и обоснования параметров конструкций приемоизлучающих структур, расположенных вблизи или непосредственно на объектах, поверхности которых могут быть представлены наборами диэлектрических (металлодиэлектрических) и идеально проводящих участков. Для аппроксимации несущих экранов, которые в общем случае следует рассматривать как множество замкнутых и разомкнутых оболочек [6, 7], используются многомерные поверхности, образованные кривыми второго порядка и развернутые на трехмерных сплайн-линиях. В частности, при аппроксимации боковой поверхности цилиндра конечной длины окружность его поперечного сечения может быть представлена правильным многоугольником из 36 сторон; для повышения точности вычислений характеристик структуры вибраторного типа, закрепленной на цилиндре, и учета вторичного излучения волновых процессов приемоизлучающими элементами число сторон многоугольника требуется увеличить в 3...4 раза [9].

Математическая постановка трехмерной задачи возбуждения поверхности произвольного вида осуществляется с использованием интегральных уравнений относительно плотности поверхностных токов. Остальные типы краевых задач представляются в виде одномерных интегральных уравнений [10] с интегрированием по контурам сечений поверхностей [9, 10]. Если поверхность объекта образована вращением контура вокруг оси цилиндрической системы координат [3], система одномерных интегральных уравнений записывается путем разложения токов и полей краевой задачи в ряды Фурье [4, 5].

Представление несущих поверхностей проводится на основе геометрических факторов, устанавливающих степень соответствия их фрагментов телам простой формы, для которых может быть выполнено решение краевой задачи. При этом материал поверхности полагается однородным, различие электрофизических свойств отдельных участков исключается из рассмотрения.

При численном решении интегральных уравнений токи объектов представляются последовательностями линейно-независимых функций, краевые задачи приобретают формы систем линейных алгебраических уравнений относительно весовых коэффициентов последовательностей, значения которых равны комплексным амплитудам искомых токов в точках дискретизации. Решение линейных алгебраических уравнений осуществляется на основе прямых и итерационных методов (например, обобщенного метода минимальных невязок [4]). Исследование сложных структур может быть выполнено при последовательных приближениях,

когда результаты расчета токов (полей) для фрагмента структуры используются в качестве возбуждающих функций для ее других частей.

Краевые задачи для трехмерных объектов и расположенных на них дискретных приемоизлучающих структур [10] целесообразно решать с применением метода конечных элементов FEM – Finite Element Method. Данный метод базируется на разбиении области решения краевой задачи на множество подобластей [8], где искомое распределение токов представляется монотонными функциями [6, 8], а полученные частные решения сшиваются в узлах аппроксимирующей сетки из условия равенства значений аппроксимирующих функций на границах соседних элементов разбиения [6]. Ввиду того, что каждый элемент поверхности объекта граничит с конечным числом соседних элементов, система линейных алгебраических уравнений для весовых коэффициентов аппроксимирующих последовательностей в точках сшивания частных решений является разреженной [7], ее решение сохраняет устойчивость при невязке граничных условий [8].

Краевые задачи для трехмерных объектов целесообразно решать с использованием метода моментов Method of Moments, суть которого заключается в преобразовании системы интегральных уравнений для континуального распределения токов [3–5, 9, 10] к системе линейных алгебраических уравнений относительно дискретного массива их комплексных амплитуд. Данное преобразование осуществляется при аппроксимации поверхностных токов объекта последовательностями линейно-независимых функций [3] и свертки дискретного оператора [4] краевой задачи и аналитического представления возбуждающего поля с последовательностями пробных функций [3, 4].

Моделирование приемоизлучающих структур также проводится методом конечных элементов [8], поскольку метод конечных разностей непригоден при представлении источников, заключенных в замкнутые области (в частности, в цилиндрическую поверхность). Область поиска решений уравнений разбивается на конечное количество подобластей, в каждом из которых выбирается вид аппроксимирующей функции; т.е. исходная область определения функции тока разбивается с помощью сетки, в общем случае неравномерной, на множество конечных элементов. Коэффициенты аппроксимирующих функций находятся из условия равенства значений на границах элементов и выражаются через значения функций в узлах конечных элементов [7]. Эти значения, в свою очередь, определяются по результатам решения системы линейных алгебраических уравнений, сформированной при замене операторов интегральных уравнений матричными элементами, а их аргументов –

множеством дискретных значений токов в области определения краевой задачи.

В программе электродинамического моделирования CST MWS для решения краевой задачи методом конечных элементов при планарном моделировании идеально проводящих приемоизлучающих структур и их носителей, а также расчете токов в областях частичной металлизации диэлектрических объектов для автоматической генерации координат узлов и дискретизации поверхностей активируется вычислитель FDS – Frequency Domain Solver. Для вычисления развязки между источниками, заданными на поверхностях, где определяются дискретные значения комплексных амплитуд токов, выполняется обращение к вычислителю Integral Equation Solver. При моделировании объемных диэлектрических (металлодиэлектрических) и идеально проводящих тел произвольной формы, декомпозируемых на множество непланарных элементов, для аппроксимации токов активируется процедура задания граничных условий PBA – Perfect Boundary Approximation [6].

В программе Altair FEKO задачи возбуждения токов поверхностей для размещения приемоизлучающих структур определяются системами интегральных уравнений Фредгольма второго рода в границах областей дискретизации с тензорными функциями Грина [3] и решаются методом моментов [3, 4]. Поляризационные компоненты электрического поля вычисляются в виде суперпозиции полей, излучаемых (принимаемых) элементами дискретизации объекта, методами геометрической оптики, физической теории дифракции [5] и мультипольного метода [7, 8]. При нахождении весовых коэффициентов распределения токов поверхности с криволинейными профилями представляются наборами элементарных площадок треугольной формы [7], в пределах которых осуществляется интегрирование произведений комплексных амплитуд поверхностных токов и функций элементарных источников по областям дискретизации.

2. Пути повышения эффективности электродинамического моделирования приемоизлучающих структур с применением компьютерных программ

При использовании компьютерных программ моделирования приемоизлучающих структур требуется оценивать и контролировать погрешности выполняемых вычислений. Вместе с тем, ввиду закрытого содержания программ указанная операция по результатам исследования реализуемых вычислительных алгоритмов выполнена быть не может.

Выполнение тестовых расчетов для объектов с известными (легко прогнозируемыми) характеристиками затруднено, поскольку в пакетах электродинамического моделирования реализуются общие процедуры

расчетов, без оптимизации операций к форме, электрическим размерам и электрофизическим свойствам структур и несущих поверхностей.

Как показано в [9, 11], время расчета диаграммы направленности линейной решетки из 3...5 элементарных электрических вибраторов с применением персонального компьютера на базе процессора Intel Core i7-8700 с объемом оперативной памяти 16 Гб достигает 5...6 часов. Выбор рациональных вариантов построения структур, размещенных на боковых поверхностях круглых цилиндров, из множества альтернатив, сформированных по результатам многократных расчетов характеристик для различных параметров конструкций, становится возможным при использовании вычислительного средства на базе процессора Intel Core i7-10700K с объемом оперативной памяти 32 Гб [11, 12].

В этой связи для повышения эффективности применения программ моделирования для анализа излучения (приема) электромагнитного поля требуется обоснование рациональных алгоритмов их применения.

Наиболее высокая эффективность применения метода моментов достигается при представлении функции Грина краевой задачи в аналитическом виде. При этом, во-первых, становится возможным исключение из области решения точек, где проявляются особенности ядер интегральных уравнений, во-вторых, поиск решения краевой задачи выполняется в точках дискретизации излучающей (приемной) поверхности, а не объема пространства, занимаемого объектом, что способствует существенному сокращению вычислительных затрат на частичное обращение оператора краевой задачи. Для дискретизации распределения токов, индуцируемых сторонним полем, применяется способ сеточного разбиения [6–8] поверхности.

За счет представления поверхности объекта, в составе которого присутствуют плоские и (или) слабо искривленные участки, в виде сеточной структуры с прямоугольными ячейками, достигается высокая точность аппроксимации токов [6–8] при отсутствии избыточного числа точек дискретизации области их определения. Покрытие поверхности с большим радиусом кривизны сеткой с тетраэдральной формой ячеек обеспечивает сокращение множества дискретных фрагментов по сравнению с вариантом разбиения на прямоугольные участки [10]. Для дальнейшего снижения вычислительных затрат эффективно применяется метод подсеток MSS – Multilevel Subgridding Scheme, формирующий при задании линий разбиения анализируемого объекта произвольной формы конформные слои с измельченной сеткой [6, 8].

В соответствии с объектно-ориентированным подходом [7, 8] для модельного представления композиционных объектов исходные данные формируются при использовании системы построения 3D-моделей

SolidWorks [9] с активированными инструментами для кинематического и структурного анализа и проектирования изделий в виде объёмных полноразмерных цифровых моделей [6, 8] приемоизлучающих структур и несущих поверхностей. В процессе проведения расчетов исходные данные транслируются в графические ядра компьютерных программ CST MWS и Altair FEKO.

Заключение

Представлены базовые принципы компьютерного моделирования приемоизлучающих структур при анализе их характеристик и выборе параметров конструкций, обеспечивающих требуемые показатели избирательности излучения и приема электромагнитных волн. Определены основные пути повышения эффективности компьютерных программ CST MWS и Altair FEKO при проведении исследований приемоизлучающих структур на основе совместного использования с системами построения цифровых моделей и способами аналитического и численного решения краевых задач электродинамики для нахождения приближенного распределения токов приемоизлучающих компонентов и несущих поверхностей.

Результаты, полученные на основе компьютерного моделирования приемоизлучающих структур на поверхностях ограниченных размеров, позволяют оценить показатели эффективности излучения (приема) сигналов мобильными информационными средствами информационно-телекоммуникационных систем.

Список литературы

1. Братчиков, А.Н. Активные фазированные антенные решетки / А.Н. Братчиков, В.И. Васин, О.О. Василенко и др. // Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2004.– 488 с.
2. Тимошенко, А.В. Современное состояние и задачи совершенствования методических основ построения антенных решеток беспилотных радиотехнических комплексов / А.В. Тимошенко, С.Н. Разиньков, О.Э. Разинькова и др. // Военно-воздушные силы: теория и практика, 2020. – № 14. – С. 63-83.
3. Малушков, Г.Д. Рассеяние неоднородным диэлектрическим телом вращения / Г.Д. Малушков // Известия вузов. Радиофизика, 1975. – Т. 18. – № 2. – С. 269-280.
4. Неганов, В.А. Излучение и дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов, Э.А. Павловская, Г.П. Яровой // Под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2004.– 264 с.

5. Неганов, В.А. Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский и др. // Под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – М.: Радио и связь, 2005.– 648 с.
6. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластикова. – М.: МЭИ, 2011.– 155 с.
7. Банков, С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008.– 246 с.
8. Банков, С.Е. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO / С.Е. Банков, А.Н. Грибанов, А.А. Курушин. – М.: One-Book, 2013.– 423 с.
9. Разиньков, С.Н. Анализ вибраторных антенных решеток малозаметных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа / С.Н. Разиньков, А.В. Богословский, Д.Н. Борисов и др. // Военно-воздушные силы: теория и практика, 2021. – № 18. – С. 227-236.
10. Разиньков, С.Н. Анализ эффективной площади рассеяния беспилотного радиоэлектронного комплекса с применением системы электродинамического моделирования / С.Н. Разиньков, А.В. Богословский, А.Б. Буслаев // Военно-воздушные силы: теория и практика, 2022. – № 21. – С. 124-136.
11. Разиньков, С.Н. Совместное применение аналитических и численных методик электродинамического моделирования для синтеза решеток электрических вибраторов на цилиндрах конечной длины / С.Н. Разиньков, А.В. Богословский, Д.Н. Борисов // Военно-воздушные силы: теория и практика, 2021. – № 20. – С. 287-300.