

Решение задач дифракции с использованием САПР СВЧ-устройств

В.В. Ахияров, НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: vakhiyarov@gmail.com

Представлено краткое описание метода интегральных уравнений и конечных элементов, лежащих в основе программ электродинамического моделирования FEKO и HFSS. Приведены результаты решения для модельных задач дифракции на сфере и цилиндре. Рассмотрено влияние присоединенных резонансных структур на поле обратного рассеяния. Показаны результаты моделирования диаграммы направленности параболического зеркала с рупорным облучателем.

Задачи, связанные с определением характеристик электромагнитного поля, рассеянного объектами, называются дифракционными. В самой общей постановке дифракционная задача состоит в определении комплексных векторов напряженности электрического и магнитного поля, удовлетворяющих системе уравнений Максвелла, граничным условиям на поверхности объекта и условиям излучения на бесконечности.

Для решения дифракционных задач могут использоваться системы электродинамического моделирования (САПР СВЧ-устройств). Данные программы в основном ориентированы на расчет электромагнитных полей, возникающих при излучении антенн, и анализ различных СВЧ-структур. Однако при их использовании всегда есть возможность задать геометрию объекта произвольной конфигурации, выбрать источник возбуждения в виде плоской волны, и определить рассеянное поле в дальней зоне. Эти программы позволяют вычислять рассеянное поле для тел с конечным поверхностным импедансом, покрытиями, рассматривать рассеяние от полостей и антенн на объектах, то есть учитывать все те факторы, которые при «традиционном» подходе к вычислению полей рассеяния реальных объектов чаще всего не принимаются во внимание.

Среди большого количества программ электродинамического моделирования рассмотрим две наиболее распространенные системы: Ansoft HFSS и FEKO [1, 2].

В HFSS (High Frequency Structure Simulator) реализован метод конечных элементов (МКЭ), с использованием адаптивного генерирования и деления ячеек, поэтому HFSS автоматически выполняет вычисления до заданного пользователем критерия сходимости.

В МКЭ вся область моделирования делится на малые участки (тетраэдры) и поле в каждой области описывается локальной функцией. Для количественного представления векторных полей в каждой вершине запоминаются три касательные компоненты их электрической и магнитной составляющих к соответствующим ребрам тетраэдра [3]. Кроме того, используются компоненты электрической и магнитной составляющих векторного поля в средней точке ребер, а также касательные к граням и перпендикулярные к ребрам компоненты. После этого уравнения Максвелла можно преобразовать в алгебраические уравнения, которые решаются численными методами. Отметим, что создание сетки для МКЭ требует ряда последовательных уточнений, при этом для повышения точности необходимы дополнительные вычислительные затраты.

При вычислении поля в дальней зоне методом конечных элементов (как и любым другим методом решения во временной области) возникает очевидная проблема расширения ограниченной области анализа на бесконечность. Для этого требуются дополнительные граничные условия, которыми в модели заменяется окружающее пространство (в программе HFSS используется условие излучения Зоммерфельда).

Главной особенностью программы FEKO является удачное сочетание численного метода интегральных уравнений (ИУ) с приближенным методом физической оптики (ФО). Такое сочетание позволяет преодолеть главный недостаток подобных программ: большие затраты ресурсов при моделировании объектов с размерами много большими длины волны.

Отметим, метод ИУ является наиболее общим подходом, в котором краевая задача с помощью функции Грина преобразуется к интегральному виду вместе с граничными условиями и условиями на бесконечности. Интегральное уравнение относительно неизвестной функции плотности поверхностного тока решается методом моментов (ММ), который основан на разложении искомой функции плотности поверхностного тока J по набору базисных функций f_n :

$J = \sum_{n=1}^N a_n f_n$. После подстановки данного выражения в исходное уравнение $L(J) = E^i$ получим одно линейное уравнение с N неизвестными:

$$\sum_{n=1}^N a_n L(f_n) = E^i.$$

Для его решения требуется использовать N весовых функций $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$, что приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle \omega_m, L[f_n] \rangle = \langle \omega_m, E^i \rangle, m=1 \dots N.$$

Точность ММ тем выше, чем меньше размер элементарной площадки. Считается, что для получения приемлемой точности линейный размер площадки не должен превышать $\lambda/10$, где λ - длина волны в свободном пространстве. Количество уравнений в СЛАУ равно числу элементарных площадок N , которое неизбежно растет при увеличении размеров анализируемого объекта. Поэтому непосредственное решение задачи рассеяния радиоволн на объектах типа автомобиля, корабля или самолета с помощью ММ требует решения СЛАУ огромной размерности.

Сравнивая МКЭ и ММ можно отметить, что МКЭ обладает большей универсальностью, поскольку позволяет анализировать достаточно сложные структуры (например, обладающие анизотропией). В ММ проблема сложных сред связана с поиском подходящего представления для функции Грина, который выполняется не компьютером, а человеком. Однако, в тех случаях, когда выражение для функции Грина известно, размерность задачи с использованием ММ существенно меньше, поскольку в МКЭ дискретизируется пространство, а в ММ – поверхность [4].

Таким образом, выбор конкретного программного продукта должен определяться характером решаемой задачи. В таблице 1 представлен сравнительный анализ ММ и МКЭ, показывающий особенности использования численных методов, реализованных в программах FEKO и HFSS.

Таблица 1 – Сравнительный анализ ММ и МКЭ

	Метод моментов	Метод конечных элементов
дискретизация	Элемент поверхности	тетраэдр
Область решения	частотная	временная
Дополнительные условия	Не требуются	Дополнительные граничные условия для расчета поля в дальней зоне
хорошо подходят для задач	Металлические поверхности произвольной формы	Поверхности произвольной формы с произвольными электрическими параметрами, анизотропные среды

В качестве примера рассмотрим использование программы FEKO для решения задачи дифракции на идеально проводящей сфере.

На рис.1 показаны результаты расчетов эффективной площади рассеяния (ЭПР) для сферы радиусом $a = 0,143$ м при $\lambda = 0,3$ м (в этом случае $ka = 3$, k – волновое число). Поскольку сфера является изотропным переизлучателем, наблюдаемые отклонения обусловлены погрешностью численного решения. Однако из рис.1 следует, что увеличение числа ячеек почти в 17

раз (с $N = 126$ до $N = 2116$) приводит к увеличению точности не более чем на 0,5 дБ (суммирование ряда Ми дает значение $-14,836$ дБ). Данный пример показывает, что между числом ячеек и требуемой точностью вычислений всегда следует искать разумный компромисс.

Следующий пример (см. рис.2) иллюстрирует влияние присоединенного полуволнового вибратора на диаграмму обратного рассеяния сферы. Видно, что при TM – поляризации в диаграмме обратного рассеяния наблюдаются осцилляции, которые являются наиболее существенными при $55^\circ < \theta < 135^\circ$.

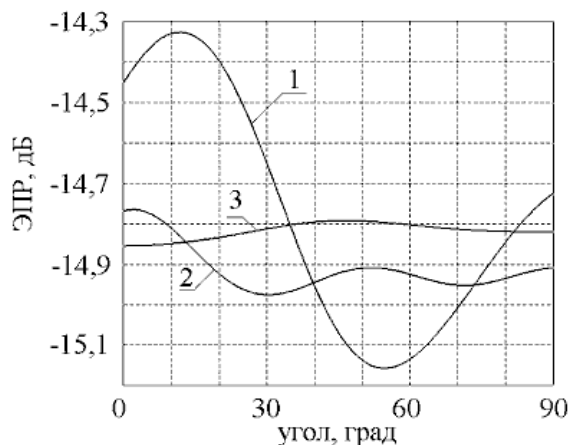


Рис.1. ЭПР сферы для различного числа ячеек: 1 - $N = 126$; 2 - $N = 300$; 3 - $N = 2116$

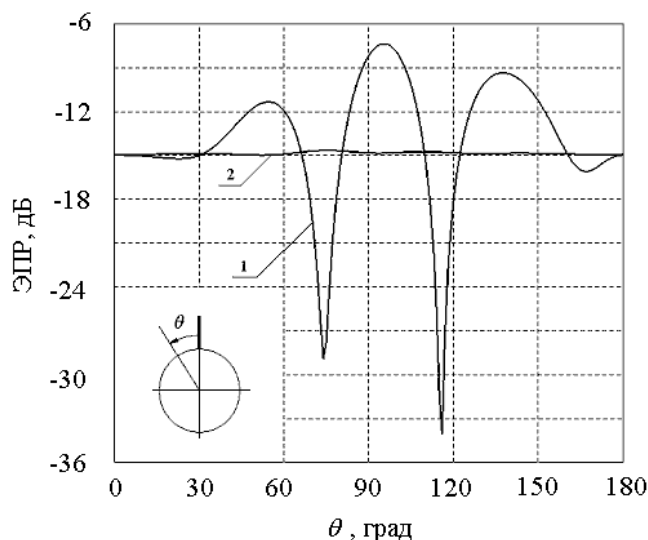


Рис.2. ЭПР сферы с полуволновым вибратором при обратном рассеянии. 1 - TM - поляризация (вектор \mathbf{H} перпендикулярен плоскости падения); 2- TE - поляризация (вектор \mathbf{E} перпендикулярен плоскости падения)

Далее с использованием программы FEKO были выполнены расчеты угловой диаграммы ЭПР цилиндра с размерами $ka = \pi$, $kl = 10\pi$ (a – радиус, l – длина образующей) для TM – поляризации (см. рис.3). Полученный результат полностью соответствует диаграмме, представленной в [5]. Отметим, что при вычислении рассеянного поля на телах вращения можно перейти от интегрирования по поверхности к интегрированию по образующей, что существенно снижает размерность задачи [6].

Отметим, что наиболее полно преимущества программы FEKO раскрываются при решении задач дифракции на идеально проводящих телах. В качестве примера на рис.4 представлена диаграмма направленности зеркальной антенны с рупорным облучателем.

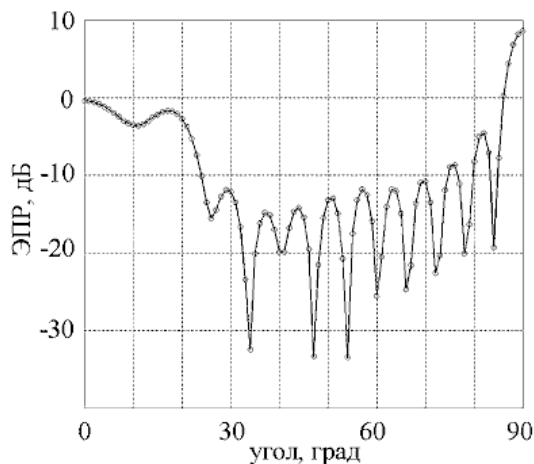


Рис.3. ЭПР цилиндра, программа FEKO, *TM* - поляризация

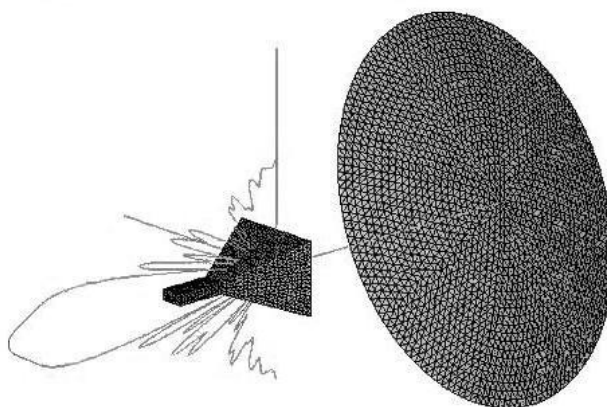


Рис.4. Диаграмма направленности зеркальной антенны с рупорным облучателем. Длина волны - 18 см, радиус зеркала - 1м, фокусное расстояние - 1,4 м

Решение задачи дифракции на объектах с произвольными электрическими свойствами (в том числе и при отрицательных значениях относительной диэлектрической $\tilde{\epsilon}$ и магнитной $\tilde{\mu}$ проницаемости) ищется методом конечных элементов. Рассмотрим решение задачи дифракции на сфере при $ka = 3$, $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu} = -1$ и $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu} = 3$ с использованием программы HFSS. Результаты расчетов показывают, что при $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu} = -1$ теневой лепесток вытянут сильнее, по сравнению с $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu} = 3$ (см. рис.5.а) и в обоих случаях обратное рассеяние практически полностью подавлено (см. рис.5.б).

Полученный результат соответствует расчетам по теории Ми для задачи дифракции на сфере при произвольных значениях $\tilde{\epsilon}$ и $\tilde{\mu}$, а также работе [7], в которой было показано, что при облучении тел вращения вдоль оси симметрии поле обратного рассеяния при $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu}$ равно нулю.

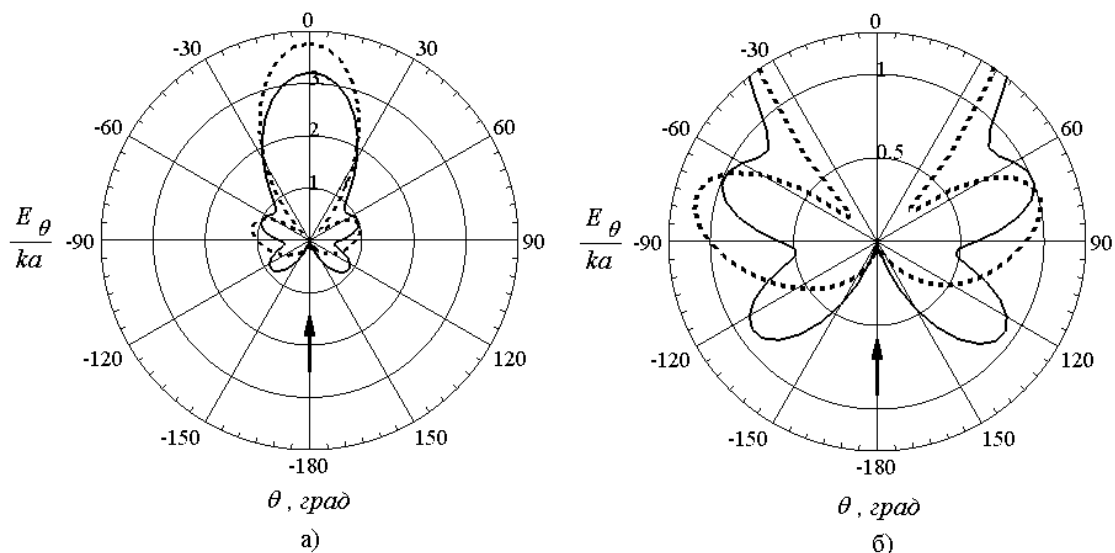


Рис.5. Диаграмма рассеянного поля на сфере при $ka = 3$, программа HFSS
Сплошная линия - $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu} = 3$, пунктир - $\tilde{\epsilon} = \tilde{\mu} = -1$

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ansoft.com>.
2. <http://www.feko.info>.
3. С.Е.Банков, А.А.Курушин. Проектирование СВЧ устройств и антенн с Ansoft HFSS // <http://jre.cplire.ru/iso/library/index.html>.
4. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР // <http://jre.cplire.ru/iso/library/index.html>.
5. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Сов. Радио, 1962. — 244 с.
6. Ахияров В.В. Использование метода интегральных уравнений для расчета характеристик рассеяния идеально проводящих тел вращения // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2005. — № 1-2.
7. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике: пер. с англ. – М.: БИНОМ, 2007. – 366с.