

Лекция 16

9.5 Модули электромагнитного моделирования в продуктах Microwave Office и HFSS

Американская компания Applied Wave Research (AWR) в 1994 г. начала разработку новой системы проектирования высокочастотных и сверхвысокочастотных радиоэлектронных устройств. Исходной предпосылкой ее создания было то, что большинство известных программ были разработаны в 70-х и 80-х гг. XX века, и они претерпели лишь незначительные изменения. Кроме того, эти программы на персональных компьютерах, работали достаточно медленно и были трудны в использовании из-за слабо развитого интерфейса. С появлением новых версий программ их ядро оставалось прежним, модификация же, как правило, сводилась к добавлению вспомогательных процедур для решения узких задач проектирования, а также к разработке пользовательского интерфейса, пытающегося догнать возможности очередной версии Windows.

Компания AWR проводила разработку своих продуктов с создания принципиально новой среды проектирования, которая опиралась на аппаратную платформу персонального компьютера, операционные системы Windows, а также использовала методы объектно-ориентированного программирования. Первый продукт компании выпущен в начале 1998 г. — это система трехмерного электромагнитного моделирования многослойных структур EMSight, затем были разработаны другие программы и следующий продукт, носящий название Microwave Office [8], органично объединил в себе все пакеты анализа СВЧ устройств.

Microwave Office (MWO) представляет собой полностью интегрированный пакет программ, предназначенный для разработки устройств СВЧ. Набор программ включает модуль EMSight для трехмерного электромагнитного моделирования многослойных структур. Microwave Office обеспечивает высокую производительность и имеет интуитивно понятный интерфейс. Этот пакет дает возможность инженерам моделировать линейные и нелинейные схемы различной сложности одновременно с использованием результатов многомодового анализа электромагнитного поведения отдельных частей проекта (ЕМ-анализа), а также с учетом наличия цифро-аналогового функционального устройства обработки сигналов. Многие из возможностей пакета Microwave Office недоступны в существующих системах моделирования.

Для проектирования схем имеется обширная библиотека моделей сосредоточенных и распределенных, линейных и нелинейных, идеальных и неидеальных элементов. Имеется функция поиска нужных элементов и их моделей в Интернете. В случаях, когда правильная модель используемого устройства отсутствует или эффект близкого расположения элементов уменьшает точность модели, пользователи могут обратиться к модулю

полного электромагнитного анализа. Он включает в себя собственный графический редактор и механизм моделирования топологических структур методом моментов Галеркина. Он позволяет производить расчет характеристик антенн в дальней зоне, а также получать их эквивалентную схему замещения в формате SPICE.

Решение электродинамической задачи в EMSight основано на решении в спектральной области уравнений Максвелла, сформулированных для трехмерного устройства, находящегося в прямоугольном корпусе, заполненном планарными кусочно-ломанными слоистыми средами. Четыре боковые стенки прямоугольного корпуса всегда являются идеально проводящими. Верхняя и нижняя границы корпуса могут моделироваться как идеально проводящие поверхности, поверхности с потерями или как бесконечные волноводы (в Z -направлении).

Полная задача электромагнитного моделирования всегда разделяется на набор задач в отдельных блоках, в которых можно численно решить уравнения Максвелла. Электромагнитные моделирующие программы традиционно относятся к трем категориям: «2-D», «3-D» и «2.5-D».

2-D моделирующие программы могут анализировать только непрерывные структуры, бесконечные в одном направлении. Практически, к этому классу относятся лишь идеальные линии передачи и некоторые волноводные задачи. 2-D моделирующее устройство анализирует планарные структуры и определяет постоянную распространения однородного отрезка линии, волновое сопротивление и коэффициент связи.

3-D моделирующие программы могут анализировать практически любую структуру и предназначены для трехмерных задач. 3-D моделирующие устройства могут анализировать почти любую задачу, но они требуют большего времени и больших вычислительных затрат.

2.5-D моделирующие программы разработаны в основном для планарных схем (содержащих микрополосковые, полосковые линии и т. п.). В то же время они менее гибкие, чем 3-D программы, но работают намного быстрее и идеально подходят для микрополосковых линий, полосковых и других подобных конфигураций.

EMSight выполнен как моделирующее устройство 2.5-D. Он может решать планарные задачи, а также задачи с переключками через отверстия и другими Z -направленными токами. Фактически, EMSight можно рассматривать как 3-D моделирующее устройство, потому что он может учитывать токи, текущие в Z -направлении.

Разбиение проводников выполняется на однородной прямоугольной сетке. Токи проводников пространственно дискретизируются посредством базисных функций (рис. 9.2) для токов в X и Y направлениях и переключек, по которым токи текут в Z -направлении.

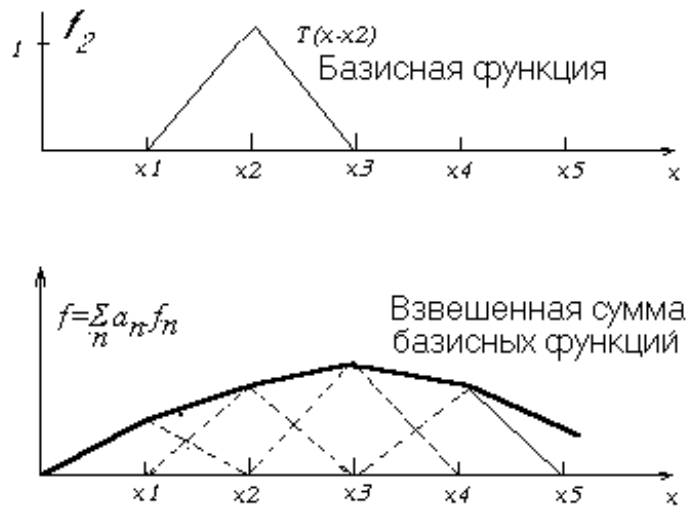


Рис. 9.2. Треугольная базисная функция и суммирование решения в методе моментов по одной координате

Решение задачи ищется внутри трехмерного прямоугольного объема, ограниченного электрическими или магнитными стенками. В общем случае объем заполнен слоистой средой, которая может состоять из произвольного числа изотропных однородных диэлектриков или магнитных слоев. Электрический (E) и магнитный (H) векторы поля связаны системой уравнений Максвелла (в частотной области). Токи, направленные вдоль оси Z , считаются постоянными внутри слоя, но они могут изменяться от слоя к слою, что дает возможность дискретизации по оси Z . Таким образом, имеется шесть составляющих электрического E и магнитного H поля внутри слоя с постоянным током поперек него. Компоненты тока вдоль X и Y могут существовать только в металлическом слое $z = d_j$, параллельном поверхностям раздела.

Металлический слой может иметь произвольную форму, частично с областями идеальной проводимости, частично заполнен металлом с потерями, резистивными пленками и областями, предназначенными для элементов с сосредоточенными параметрами. На рис. 9.3 показан пример диалогового окна программы.

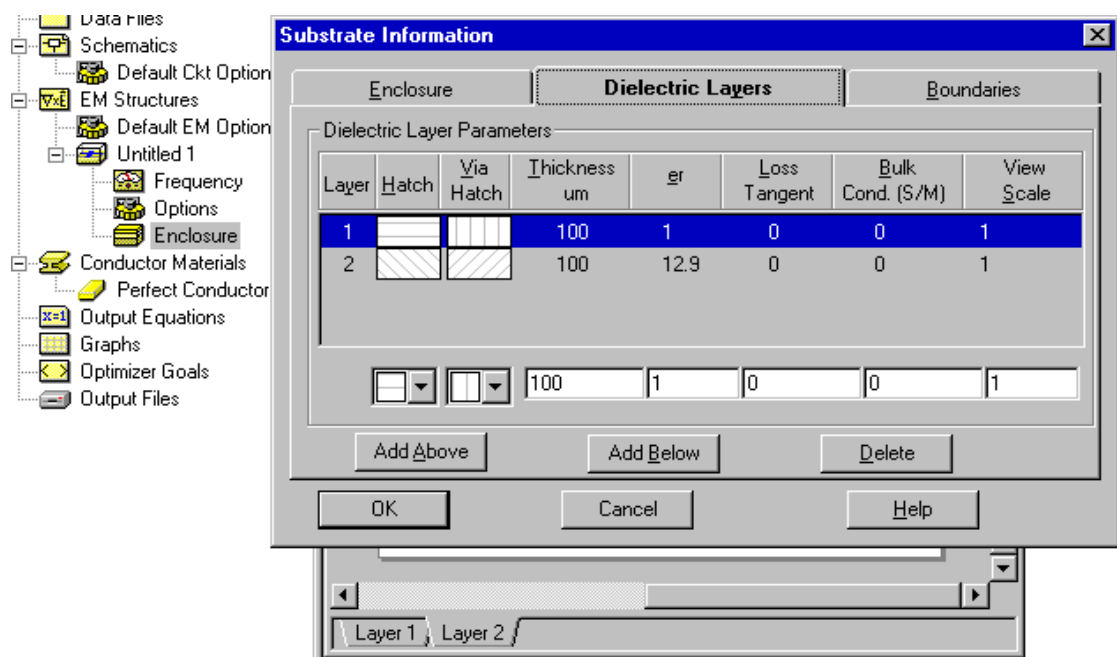


Рис. 9.3. Диалоги описания слоев, корпуса и границ в EMSight

Поскольку EMSight — это программа, соответствующая 2.5-D, все структуры, которые она анализирует, сводятся к многослойным, каждый из слоев которых — это пассивная схема с дискретными элементами. Диапазон возможных устройств, которые может анализировать программа, достаточно широк, но часто интегральная схема СВЧ требует разбиение на несколько ЕМ-структур и схем, состоящих из дискретных элементов: отрезков линий, L, C, FET и т. п. Первый шаг в решении задачи с помощью EMSight состоит в разбиении структуры и распределении ее по слоям. Формально в EMSight не имеется ограничения на максимальное число слоев, но реально это 5–10 слоев. Часто встречающийся случай с двумя диэлектрическими слоями используется, чтобы моделировать микрополосковые структуры, когда верхний диэлектрик — воздух, а нижний — подложка микрополосковой линии. Диэлектрические слои могут быть без потерь или с потерями. Если все диэлектрические слои структуры не имеют потерь, то элементы матрицы моментов — действительные числа.

Кроме диэлектрических слоев должны быть определены проводники. Проводники, как и диэлектрики, могут быть смоделированы как идеально проводящие, так и с потерями. Если все проводники и все диэлектрические слои в структуре не имеют потерь, то решение матрицы моментов может быть найдено, используя вычисления только действительных чисел, что обеспечивает значительную экономию времени для большинства задач. Использование математики действительных чисел может уменьшить время расчета матрицы моментов в 3–7 раз (в зависимости от параметров анализируемого устройства).

В EMSight производится разбиение металлических слоев на ячейки, чтобы представить планарную конструкцию в виде набора перекрывающихся треугольных (roof) функций в X и Y направлениях. Каждая такая функция строится на площадке, имеющей ширину, равную по крайней мере одной

ячейке и длину – двум ячейкам. Базисная функция имеет конфигурацию (одна ячейка на одну ячейку) самого наименьшего планарного базиса, и это – примитивный конструктивный блок для больших базисных функций. Примитивная базисная функция состоит из двух примитивных ячеек. Базисные функции размером больше, чем 1×1 ячейку, конструируются из взвешенной суммы примитивных базисных функций. Например, на рис. 9.4 показаны базисные функции по координате X , которые соответствуют прямоугольной ячейке, показанной в основании графика. Пунктирные линии на рис. 9.5 представляют собой однородную сетку координат, в то время как сплошные линии представляют ячейки с переменными размерами. Такие ячейки будут всегда соответствовать однородной сетке.

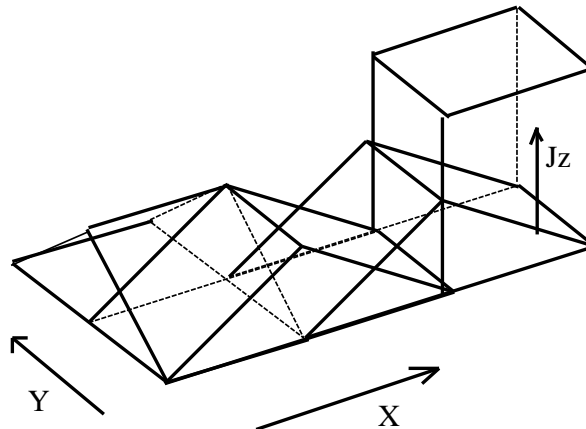


Рис. 9.4. Базисные функции распределений плотности тока (крышные функции) формируются отдельно по осям X и Y

Метод решения, используемый EMSight, требует, чтобы геометрия была согласована с узлами однородной прямоугольной сетки. Однородная сетка требуется потому, что точки излома базисных функций должны совпасть с узлами однородной сетки. EMSight во время разбиения топологии автоматически передвинет любые формы к сетке, хотя часто это может привести к непредвиденным результатам. Например, очень узкие линии, которые имеют ширину меньше, чем ширина одной ячейки, могут быть превращены в формы нулевой ширины. Для форм, которые имеют грани, не совпадающие с однородной сеткой, желательно просмотреть ячейки перед решением, чтобы удостовериться, что разбиение форм проведено правильно.

Приведенные на рис. 9.5 графики показывают базисные функции, используемые для моделирования тока только в направлении X . Токи в направлении Y будут представлены другим набором базисных функций по оси Y . Когда в расчете применяются треугольные функции как базисные, то их максимальные значения совпадают в одной точке и они равны нулю в остальных узловых точках.

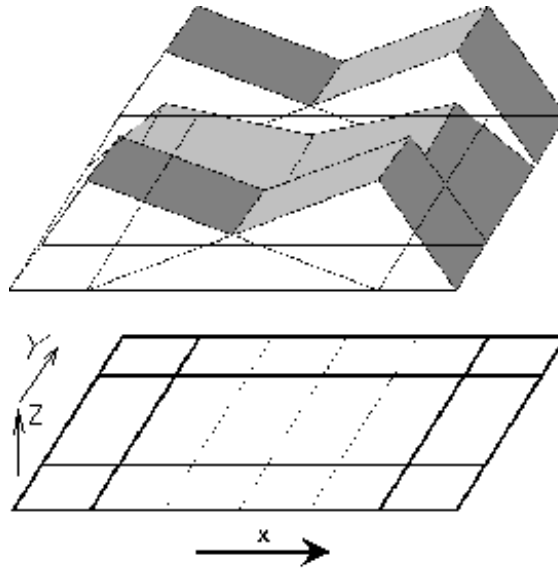


Рис. 9.5. Базисные функции разложения поверхностного тока.
Моделирование токов только в направлении X

Рассмотрим геометрию, где несколько проводящих объектов находятся в слоистой среде. Эта среда составлена из N параллельных слоев между верхним полупространством $z > 0$ (обычно воздух) и земляной плоскостью $z = -d_N$. Предположим, что плоскость соприкосновения двух слоев может быть смоделирована как импедансная граница, на которой существует простая связь между касательным электрическим и магнитным полем, а именно

$$\vec{E}_t = \vec{n}_0 \times Z_s \vec{H}_t, \quad (9.14)$$

где Z_s – поверхностный импеданс. Электрические и магнитные стенки включены в уравнение (3.4) как частные случаи при $Z_s = 0$ или $Z_s = \infty$ соответственно.

Каждый слой считается изотропным, однородным и с возможными потерями, т. е. материал имеет комплексную диэлектрическую постоянную ϵ и комплексную проницаемость μ .

Аналогично предполагаем, что металлические проводники в слоистой среде характеризуются граничными условиями на своих поверхностях:

$$\vec{n}_0 \times \vec{E} = Z_s \vec{n} \times \vec{J}_s, \quad (9.15)$$

где Z_s – поверхностный импеданс, равный нулю для идеальных электрических проводников, \vec{n}_0 – внешний вектор, нормальный к поверхности S , \vec{J}_s – поверхностный ток, существующий в проводнике.

Дифракционное поле E^d в каждой точке может быть выражено с помощью двумерной функции Грина $\bar{\bar{G}}_E(r)$:

$$dE^d(r) = \bar{\bar{G}}_E(r, r') \cdot I(r') dl', \quad (9.16)$$

где r – расстояние в полярных координатах. Суммарное дифракционное поле получается интегрированием уравнения (9.16) над поверхностью проводников S .

Окончательно, интегральное уравнение на основе граничного условия (3.5) приводится к виду который является обобщенной формой интегрального уравнения электрического поля (EFIE-Electric Field Integral Equation) для неизвестного тока J_s .

$$n \times E^e(r) = -n \times \int_S \overline{\overline{G}}_E(r, r') \cdot J_s(r') ds' + Z_s n \times J_s, \quad (9.17)$$

Численные методы решения интегрального уравнения (9.17) сводятся к так называемым проекционным, к которым относится и метод моментов, являющийся развитием метода Галеркина. В методе моментов используется базисная треугольная (крышная) функция, и дельта-функции как весовые функции. Метод моментов (МоМ) преобразует интегральное уравнение (9.17) в систему алгебраических уравнений (СЛАУ), которая решается численно. Напомним, что сначала металлическая область разбивается на малые элементарные ячейки, и задаются простые аппроксимации для поверхностного тока на каждой ячейке. Размер ячеек зависит от характера и геометрии задачи. В любом случае линейный размер ячейки не должен превышать одну десятую от длины волны.

Неизвестные токи нужно разложить в системе базисных функций. Некоторые возможные наборы базисных и весовых функций, определенных в прямоугольных областях, приведены на рис. 9.6.



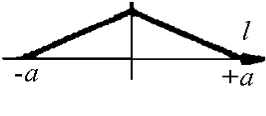


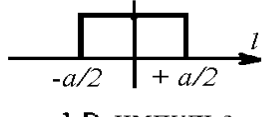
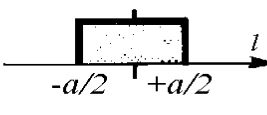
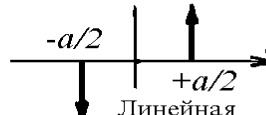
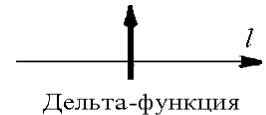
	Базисные функции		Весовые функции
	Ток	Заряд	
A	 2-D - крыша	 2-D меандр (импульсный дуплет)	 2-D крыша
B	 2-D - крыша	 2-D меандр (импульсный дуплет)	 1-D импульс
C	 2-D -импульс	 Линейная функция Дирака	 Дельта-функция Дирака

Рис. 9.6 Виды базисных и весовых функций.

Стандартное применение метода моментов дает матричное уравнение $M\alpha = b$.

Матрица моментов M имеет вид

$$M = [m_{mn}] = \begin{bmatrix} \langle \omega_1, Mf_1 \rangle & \langle \omega_1, Mf_2 \rangle & \dots & \dots \\ \langle \omega_2, Mf_1 \rangle & \langle \omega_2, Mf_2 \rangle & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (9.18)$$

вектор-столбец $[\alpha_n]$ – вектор искомых величин.

Так как матрицы моментов могут быть очень большими, то в каждый момент времени только одна матрица моментов может уместиться в оперативной памяти. Размер задачи, которая может быть решена EMSight, определяется только общим объемом физической памяти, доступной для хранения матрицы моментов. Программа EMSight будет решать очень медленно, если матрица моментов не умещается в ОЗУ и требует использования находящейся на диске виртуальной памяти.

Метод моментов реализуется также в новом программном продукте для расчета СВЧ устройств и антенн, в программе FEKO [10], но наиболее часто в инженерной практике применяется программа моделирования СВЧ устройств – HFSS.

HFSS (High Frequency Structure Simulator)— это мощный пакет программ, который вычисляет параметры СВЧ устройств и электромагнитные поля в трехмерных пассивных структурах произвольной формы. В последние 10 лет программа HFSS [9], в разработке которой приняли участие фирмы Hewlett Packard, Agilent, Ansoft, заняла лидирующее положение в мире проектирования СВЧ-устройств. Она первой из коммерческих программ показала всю мощь электродинамических методов расчета. Она поставила на новую основу и принципы обучения такому сложному предмету, как электродинамика. Переход от программ, рассчитывающих СВЧ-структуры методами теории цепей, к программам, выполняющим полноценный расчет трехмерного электромагнитного поля, объясняется в первую очередь тем, что многие части реального устройства не поддаются декомпозиции на элементы, которые есть в библиотеке моделей.

HFSS использует для решения уравнений электродинамики метод конечных элементов, включающий адаптивное генерирование и деление ячеек. Решение для электромагнитного поля, найденные из уравнений Максвелла, позволяют точно определить все характеристики СВЧ-устройства с учетом возникновения и преобразования одних типов волн в другие, потерь в материалах и на излучение и т. д.

HFSS предоставляет возможности моделирования антенн, делителей мощности, схем коммутации, волноводных элементов, фильтров СВЧ и трехмерных неоднородностей, описание которых сводится к созданию чертежа структуры, точному заданию материала, идентификации портов сторонних источников и требуемых характеристик. В результате расчета находятся поля внутри и вне структур, а также многомодовые параметры СВЧ устройств. Мощным средством повышения эффективности решения является адаптивный метод уплотнения сетки, который состоит в следующем:

начальные тетраэдральные ячейки создаются на основании структуры, созданной из базовых элементов, имеющихся в библиотеке HFSS. Это начальное разбиение на ячейки предоставляет грубую информацию о поле, выделяя области с высокой напряженностью или с большими градиентами. Разбиение на ячейки затем уплотняется только там, где поле претерпевает резкое изменение, уменьшая вычислительные затраты при улучшении точности.

HFSS вычисляет основные характеристики антенн, в том числе коэффициент усиления, сечения диаграммы направленности (ДН) в дальней зоне, трехмерные ДН в дальней зоне, ширину луча по уровню и т. д. Рассчитываются поляризационные характеристики, включая компоненты поля в сферических координатах и параметры поляризации поля, решаются задачи дифракции.

Основу решения трехмерных и двумерных задач электродинамики в HFSS составляет метод конечных элементов (МКЭ). Смысл метода состоит в том, что пространство разбивается на простейшие элементы, имеющие форму тетраэдров. Разбиение осуществляется специальной встроенной программой. Размер тетраэдра должен быть достаточно мал для того, чтобы поле в его пределах можно было описать простой базисной функцией или набором базисных функций с неизвестными коэффициентами. Эти коэффициенты ищутся из уравнений Максвелла и граничных условий, которые выполняются в вершинах тетраэдров. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно этих коэффициентов. Решение СЛАУ выполняется итерационной процедурой. Решения, полученные на каждом шаге итерации анализируются, это позволяет использовать более мелкую сетку разбиения на последующих итерациях в тех участках области решения, где поле быстро изменяется.

Современные программные средства дают в руки инженера инструмент для точного и быстрого решения задач технической прикладной электродинамики, позволяют получать решения задач, для которых аналитические подходы не разработаны. Применение таких средств на этапах проектирования телекоммуникационных СВЧ устройств и антенн позволяет значительно ускорить ход проектных работ и повысить их качество за счет повышения точности проектирования.