

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ - МЕТОД МОМЕНТОВ И МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Авторы: Сувак В.А., Токмакова О.А., студентки 3 курса, Громов В.А., науч. рук., ассистент каф. РТС

В данной статье приводится краткое описание каждого из рассматриваемых методов, проводится их сравнения для облегчения выбора при расчёте.

В настоящее время в трёхмерном электромагнитном моделировании существует множество способов расчёта и проектировки объектов любой сложности. Обычно у людей, специализирующихся на трёхмерном электромагнитном моделировании при создании какой-либо модели могут возникнуть затруднения с выбором метода расчёта.

Целью данной статьи является выполнить сравнительный анализ методов электромагнитного моделирования.

Мы рассмотрим два метода электромагнитного моделирования:

1. Метод моментов;
2. Метод конечных элементов.

Метод моментов (ММ)

Рассмотрим метод моментов (Method of Moments, MoM). Он используется для расчёта токов в металлических и диэлектрических структурах при излучении в свободном пространстве. Обычно применяется для изготовленных из металлов электрически малых структур, но расширения допускают включения диэлектриков, либо для слоистых диэлектриков конечной формы.

Метод моментов - это решение уравнений Максвелла в интегральной форме в частотной области. Достоинство метода моментов заключается в том, что он является «методом источника», т.е. дискретизируется только интересующая структура, а не свободное пространство, как при решении уравнений для нахождения \mathbf{E} поля в объеме. При этом граничные условия не требуются, а используемая память пропорциональна геометрии задачи и частоте.

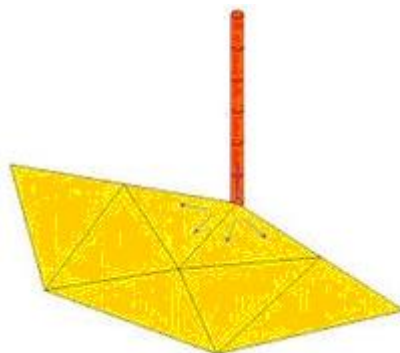


Рисунок 1- Разбиение источника и поверхности на сегменты и треугольники

Для моделирования магнитных и диэлектрических сред в метод моментов были включены:

ПЛАНАРНЫЕ ФУНКЦИИ ГРИНА ДЛЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЫ

Многослойная диэлектрическая среда, например, подложка для микрополосковой схемы, может моделироваться с применением функций Грина. Специальная форма функций Грина позволяет работать с бесконечными двумерными слоями конечной толщины, что позволяет при расчете учитывать все слои диэлектрика. При этом в процессе решения дискретизируются только проводящие поверхности и проводники внутри диэлектрических слоев, но не сами слои. Проводящие поверхности и проводники могут быть ориентированы произвольным образом и пересекать разные слои. В многослойную диэлектрическую структуру можно поместить диэлектрические включения произвольной формы благодаря

возможности их представления объектами, полученными на основе принципа эквивалентных токов. Связанные щелевые структуры можно моделировать, используя магнитные токи.

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Принцип эквивалентных поверхностей использует понятие эквивалентных электрических и магнитных токов, текущих по поверхности диэлектрического тела конечного размера. Такие тела могут иметь произвольную форму, а их поверхности представляются сеткой с треугольными ячейками. Данный метод также можно применять для поверхностей многослойных сред, разбивая их на конечные элементы. При этом граница объекта покрывается сеткой треугольных конечных элементов в соответствии с принципом SEP, в то время как внутренние слои моделируются на основе метода многослойных диэлектриков, что позволяет избежать сеточного представления границ диэлектриков в многослойных диэлектрических структурах.

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ОБЪЕМОВ

Принцип эквивалентных объемов позволяет создавать диэлектрические тела произвольной формы с использованием тетраэдральных объемных элементов. Для их описания обычно требуется больше базисных функций, чем для элементов в методе SEP; соседние тетраэдры могут иметь разные электрические и магнитные свойства.

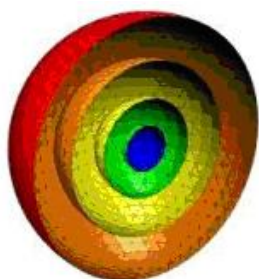


Рисунок 2 - Специальные функции Грина для плоской многослойной среды

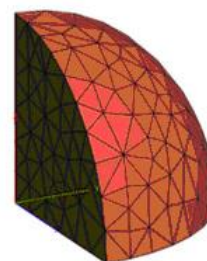


Рисунок 3 - Принцип эквивалентных объемов (тетраэдральная сетка разбиения)

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ)

Метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM) является в настоящее время одним из основных методов решения вариационных методов задач, в том числе – задач расчета напряженно – деформированного состояния конструкций.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Метод конечных элементов применяется при моделировании больших или неоднородных диэлектрических объектов, которые невозможно эффективно моделировать другим методом. В данном методе какое – то определенное пространство разбивается на тетраэдры (элементы), диэлектрические свойства которых изменяются от элемента к элементу.

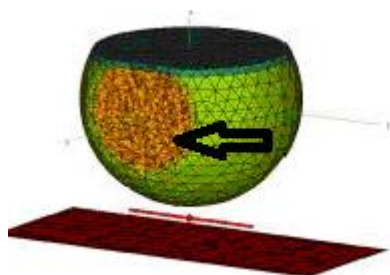


Рисунок 4 – Область, которая рассчитывается методом конечных элементов

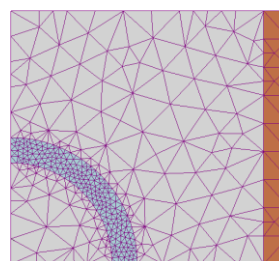


Рисунок 5 – Разбиение на конечные элементы

Размер элементов можно менять, уменьшая его вблизи интересующей области, и увеличивая – для снижения затрат процессорного времени.

В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функции на границах элементов являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно ищутся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами. Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями ЭВМ. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает ее решения.

С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в том, что минимизация функционала вариационной задачи осуществляется на совокупности функций, каждая из которых определена на своей подобласти, для численного анализа системы позволяет рассматривать его как одну из конкретных ветвей диакоптики – общего метода исследования систем путем их расчленения.

ТИПОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Типовые применения метода конечных элементов совместно с методом моментов и Multilevel Fast Multipole Method (MLFMM) включают в себя моделирование антенн, исследования электромагнитной безопасности для человека, находящегося вблизи радиочастотной аппаратуры, моделирование волноводных фильтров с диэлектрическими элементами и микрополосковых структур на подложках конечных размеров.

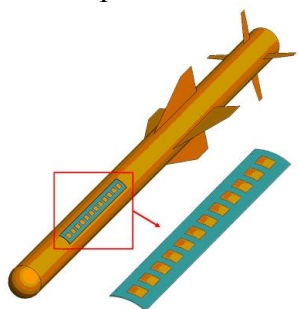


Рисунок 6 – Моделирование линейной конформной микрополосковой антенны и на корпусе ракеты

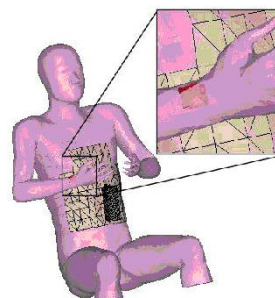


Рисунок 7 – Рассчитанное пиковое значение удельного коэффициента поглощения (для куба 10 г) для фантома человека в металлическом бронежилете и радиостанцией TETRA

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ МЕТОДА

Основным достоинством его является возможность решения задач для области любой формы, в то время как аналитические решения могут быть получены только для задач с достаточно простой геометрией. Этот факт, а также появления целого ряда коммерческих программ, реализующих этот метод, сделали его основным инструментом инженера, выполняющего расчеты на прочность. Для правильного и эффективного применения таких программ необходимо как знакомство с их интерфейсов, так и хорошее знание математических основ метода и связанных с ними ограничений и источников ошибок (погрешностей) решения.

Долгое время широкому распространению МКЭ мешало отсутствие алгоритмов автоматического разбиения области на “почти равносторонние” треугольники (погрешность, в зависимости от вариации метода, обратно пропорциональна синусу или самого острого, или самого тупого угла в разбиении). Впрочем, эту задачу удалось успешно решить

(алгоритмы основаны на триангуляции Деполе), что дало возможность создавать полностью автоматические конечноэлементные системы автоматизированного проектирования.

ВЫВОДЫ

Сравнение методов МоМ и FEM можно также провести с помощью таблицы.

Таблица 1 – Сравнение методов на предмет использования в вычислении различных типов антенн

	Объекты со сложной геометрией		Электрические большие антенны
	МоМ	МоМ, FEM-МоМ	FEM- MLFMM
Проволочные антенны	✓		
Микрополосковые антенны	✓	✓	⚠
Апертурные антенны	✓	⚠	⚠
Рефлекторные антенны	⚠	⚠	⚠
Антенны с ветрозащитой	✓		
Конформные антенны	✓	✓	✓
Широкополосные антенны	✓	✓	✓
Антенные решетки	✓	✓	✓
Линзовые антенны	⚠	⚠	✓

Примечание:

- ✓ - метод идеально подходит для данной задачи
- ⚠ - метод может быть использован, но существует лучшая альтернатива

В данной статье был проведен сравнительный анализ метода конечных элементов и метода момента электромагнитного моделирования. Кратко рассмотрены оба метода. Из таблицы 1 следует, что МоМ чаще используется для расчета различных антенн, чем FEM.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. -541с.
2. “Родник. Системный интегратор”. Метод конечных элементов.
http://www.rodnik.ru/product/sapr/sapr_svch/EM_Software_Systems/feko/fem/
3. “Родник. Системный интегратор”. Метод моментов.
http://www.rodnik.ru/product/sapr/sapr_svch/EM_Software_Systems/feko/mom/