

# ВВЕДЕНИЕ

Проектирование СВЧ устройств, антенн и т. п. начинается с выбора *физической модели*, основанной на определённом уровне знания физических процессов, происходящих в устройстве. При этом нужно выделить наиболее существенные черты явления и отбросить второстепенные. *Математические модели* в электродинамике базируются на уравнениях Максвелла (или вытекающих из них) при учёте тех или иных условий, что даёт исчерпывающие сведения о конкретном физическом процессе.

Точное решение электродинамической задачи для выбранной математической модели, как правило, возможно лишь в случае, когда исходная физическая проблема (а следовательно, и математическая модель) упрощена за счёт целого ряда идеализаций.

В силу *теоремы единственности* электродинамический анализ структуры сводится к нахождению решения уравнений Максвелла с краевыми условиями на границе и условием на рёбрах. Если рассматривается внешняя задача, то для однозначности решения краевой задачи формулируется дополнительное условие на бесконечности (условие Зоммерфельда). Электродинамический анализ может приводиться с использованием уравнений Максвелла в интегральной или дифференциальной форме. При этом область, в которой ищется решение, может подвергаться разбиению (созданию сетки), что приводит к *дискретизационным методам*: *методу конечных разностей* и *методу конечных элементов*.

При выборе метода решения приходится полагаться на опыт предшествующего решения задач, на возможности метода (сложность области решения, неоднородность среды, вычислительные ресурсы и т. д.), интуицию и сравнение с экспериментом, а также отвечать за точность результатов. Выделим численные методы решения электродинамических задач, рассмотренные в книге, а именно проекционные методы: метод моментов (ММ) и метод Ритца; метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод интегральных уравнений (МИУ).

Сильной стороной ММ является удобство моделирования рассеяния на металлических телах, поскольку анализ сводится к решению поверхностных интегральных уравнений, и не требуется дискретизации области решения вне тел. Однако для ММ проблема сложных

сред, имеющих сложную форму, всегда связана с поиском подходящего представления функции Грина, выражающей поля в структуре через токи на некоторых поверхностях. Эта работа связана с аналитическими преобразованиями, которые выполняются не компьютером, а разработчиком программы. В то же время использование функции Грина существенно уменьшает размерность решаемой задачи. В ряде интересных случаев, например плоскостной среды, функции Грина известны и для них разработаны эффективные численные алгоритмы.

Особый случай — это антенные задачи, т. е. задачи, связанные с расчётом излучения в свободное пространство. Поскольку функция Грина свободного пространства хорошо известна, то, следовательно, и реализация ММ здесь не должна вызывать затруднений. В то же время при расчёте поля в дальней зоне на основе МКЭ необходимо дискретизировать достаточно большую область пространства. Поэтому в этих задачах можно ожидать преимущества ММ по сравнению с МКЭ.

Метод конечных элементов обладает существенными достоинствами для анализа в частотной области сложных СВЧ и антенных конструкций: алгоритмическая простота, универсальность, естественный учёт неоднородных, анизотропных и дисперсионных сред. МКЭ обладает некоторыми свойствами, сближающими его с ММ. Действительно, в методе моментов все поля в структуре выражаются через некоторую величину, заданную на поверхности (электрический или магнитный ток). Отличие от ММ состоит в том, что ММ не требует дискретизации пространства и оперирует непрерывными полями и токами, тогда как МКЭ принципиально основан на дискретизации пространства. В тех случаях, где ММ может быть реализован, он приводит к увеличению скорости решения и экономии компьютерных ресурсов.

На основе МКР, МКЭ и МИУ разработаны уникальные коммерческие программные продукты, обладающие необходимой общностью моделирования и оптимизации электромагнитных полей в сложных СВЧ устройствах и антеннах. Программное обеспечение включает программу черчения трёхмерных объектов, программу расчёта, включающую несколько методов решения граничных задач, и постпроцессор для обработки и детального анализа полученных результатов. Перед решением электродинамической задачи необходимо начертить анализируемое устройство, задать материалы для каждого объекта, указать порты и граничные условия на поверхностях. Затем рассчитывается электромагнитное поле в каждой точке исследуемой структуры и определение по этим данным S-параметров

и других характеристик. После завершения расчётов наступает этап анализа и внедрения результатов. Большое значение при этом имеет наглядность и доступность представления полученных результатов.

Книга состоит из десяти глав. Глава 1 посвящена общим вопросам, составляющим электродинамические основы теории антенных систем. Приведены постановка задачи возбуждения в однородной и слоистой среде, построение функций Грина для представления решения и обзор численных методов электродинамики.

Глава 2 содержит изложение общих схем решения краевых задач электродинамики на основе классических проекционных методов: метода моментов и вариационного метода Ритца. Важным моментом при этом являются обсуждение ортогональных систем функций и ортогональных рядов, выбор базисных и проекционных функций. В главе 3 изложен метод конечных разностей (МКР), базирующийся на решении дифференциальных уравнений в частных производных, представленных в конечно-разностной форме.

В главе 4 рассмотрены основные этапы метода конечных элементов МКЭ: дискретизация пространства на элементы, выбор функции формы элемента, процедура объединения элементов и ограничение области моделирования для определения характеристик антенн и полей рассеяния. Приводится описание пакета программ для численного анализа электромагнитных полей с помощью МКЭ.

Глава 5 посвящается интегральным представлениям и интегральным уравнениям, главная ценность которых состоит в том, что с их помощью многие задачи рассеяния и возбуждения электромагнитных волн, сначала формулируемые в терминах дифференциальных уравнений, удаётся свести к интегральным уравнениям, у которых условия для открытых областей (условия излучения) уже учтены при выборе функции Грина. Излагаются общие сведения об интегральных уравнениях (Фредгольма второго и первого рода и сингулярных уравнений). Приводятся векторные представления электромагнитного поля в трёхмерном случае и векторные интегральные уравнения для внешних задач дифракции, получаемые с помощью функции Грина. Завершается глава описанием пакета программ для численного анализа антенн методом интегральных уравнений (МИУ).

В главах 6, 7, 8 приводится описание теоретических основ работы с пакетами прикладных программ Microwave Office (MWO), High Frequency Structure Simulator (HFSS) и Электродинамика Элементов из Металла (ЭДЭМ) соответственно.

В главах 9, 10 приведена теория проволочных вибраторных антенн и микрополосковых (печатных) антенн соответственно, кото-

рые интересны в практическом отношении и находят применение в различных радиотехнических системах.

Автор надеется, что содержание книги позволит читателю овладеть необходимыми основами теории электромагнитного поля, приобрести навыки в постановке электродинамических задач и построении математических моделей отдельных видов антенн, в частности из проволочных и полосковых структур, а также ознакомиться с методами анализа последних с помощью прикладных программ численного исследования.