

ТЕХНОЛОГИЯ ЭМ-МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНЫХ СВЧ-СИСТЕМ

БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

В статье рассмотрен способ модульного подхода к оптимизации усиления рефлекторной антенной системы, реализуемый с помощью технологии моделирования и сборки составных проектов System Assembly and Modelling пакета программ CST STUDIO SUITE. Представлено сравнение полученных результатов с параметрами полной модели. Точность модульного решения та же, что и в случае электромагнитного 3D-моделирования полной системы, а затраты вычислительных ресурсов и общее время вычисления в несколько раз ниже.

Современные радиоэлектронные системы содержат множество различных типов компонентов и узлов, для эффективного моделирования которых следует использовать подходящие численные методы. Так, например, простая высокочастотная система может включать фильтры, классически анализируемые частотными методами, или антенны, для расчета которых, как правило, используются вычислители во временной области, или корпус изделия, лучшим образом моделируемый с использованием метода матриц линий передач. Кроме того, параметры подобной крупной системы определяются взаимодействием между

компонентами, поэтому оптимизации отдельных элементов будет недостаточно для получения достоверного результата, вследствие чего неизбежным становится этап анализа всей системы в целом. Технология построения и моделирования составных проектов SAM (System Assembly and Modelling) пакета программ CST STUDIO SUITE предоставляет необходимую платформу для решения подобного класса задач.

Технология SAM использует описание системы на уровне принципиальной схемы. В самом простом случае один блок схемы отображает параметризованную 3D-модель. Для него пользователь определяет последовательность действий

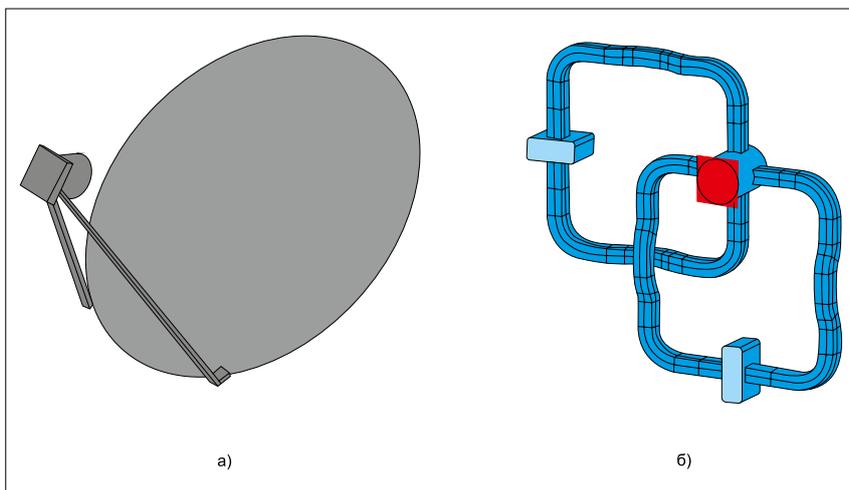
посредством специальных задач, выполняемых или на уровне схемы, или на уровне 3D-проекта. Добавляя дополнительные объекты в принципиальный режим описания, можно создать полную анализируемую систему. Посредством задач указывается конфигурация из выбранных компонентов и затем выбирается численный метод, используемый для ее моделирования. Компоненты могут быть представлены просто в виде S-параметров или в роли эквивалентных источников поля: электромагнитного (ЭМ), теплового или распределения деформации. Комбинации различных уровней анализа модели значительно снижают вычислительные затраты, требуемые для анализа сложной системы.

Пример

Рассмотрим случай оптимизации рефлекторной антенной системы [1] с широким рабочим диапазоном 10–20 ГГц. Структура должна обладать усилением как минимум 30 дБ во всей полосе частот с рабочей волной круговой поляризации.

Основные элементы представлены на рис. 1. Система состоит из офсетного параболического отражателя, рупорного источника и селектора поляризации, размещенного внутри корпуса источника.

Для поиска стартовой конструкции антенн может быть использован продукт Antenna Magus — специализированная база данных антенн и элементов



▲ Рис. 1. Эскиз анализируемой системы (а) и селектор поляризации (б)

СВЧ-тракта, включающая свыше 300 верифицированных моделей. Если установить формализованное техническое задание отдельно на источник и отражатель, продукт выдаст конструкции, наиболее подходящие установленной спецификации. При необходимости проводится финальная подстройка геометрии под проектные требования (например, достижение усиления 30 дБ в исследуемом диапазоне) с использованием встроенных инструментов оптимизации. Затем модель импортируется в CST MICROWAVE STUDIO для дальнейшего анализа на уровне системы.

ТЕХНОЛОГИЯ SAM

После выбора конструкции отдельных узлов необходимо удостовериться в том, что работа всех элементов системы будет удовлетворять проектным требованиям. Самым простым решением такой задачи будет объединение всех компонентов в одной модели и выполнение для нее полного, единого цикла численного моделирования. Однако в случае крупных и сложных систем такой подход не станет самым эффективным.

В рассматриваемом примере диаметр рефлектора составляет более 40 длин волн на частоте 20 ГГц. Размер наименьшей детали цепи питания порядка 1 мм, что, с учетом максимальной рабочей частоты и электрического размера всей модели, приводит к общему числу элементов гексагонального сеточного разбиения 400 млн. Такую модель практически невозможно проанализировать в форме единой системы даже при наличии крупных объемов оперативной памяти,



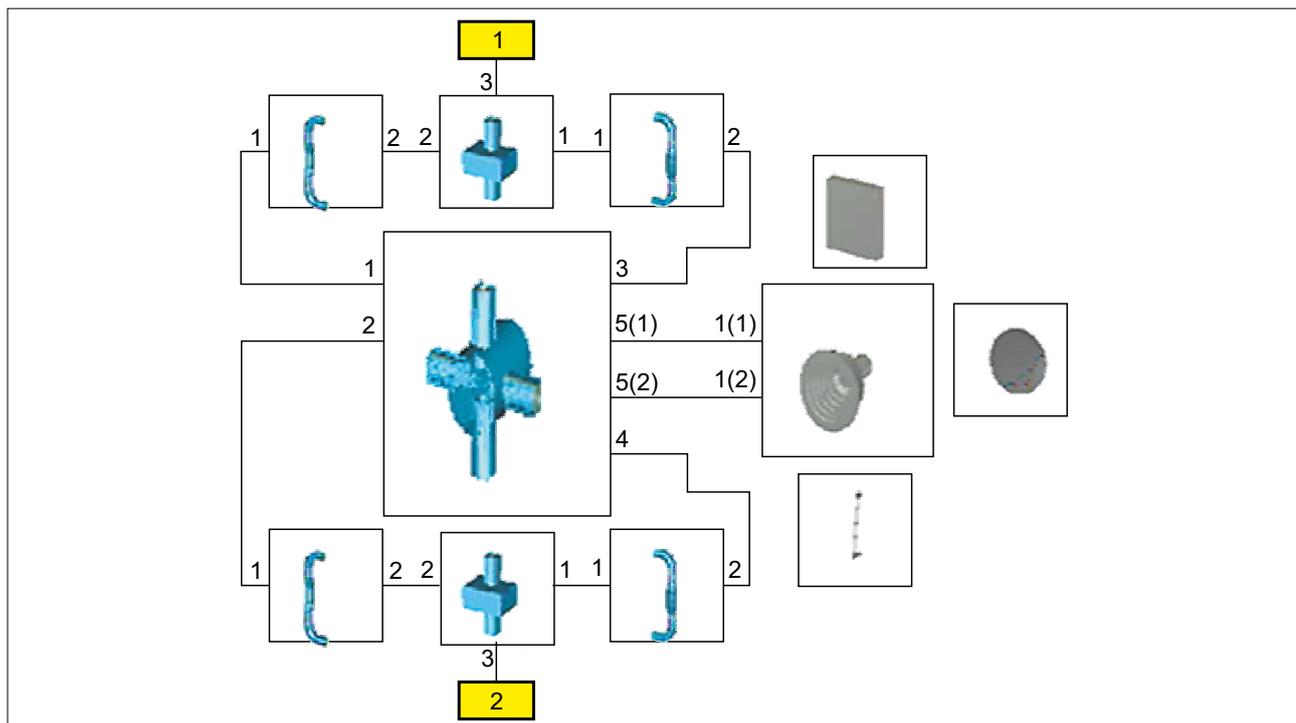
▲ Рис. 2. Сравнение полученных результатов моделирования: красный цвет — полная модель, зеленый — составной проект

поскольку необходимый промежуток моделируемого времени будет слишком велик. Оптимизация такой структуры также будет крайне медленной. В общем случае для анализа полной системы за разумное время проектировщику доступна возможность использования кластерных систем. Так, при использовании кластера из четырех узлов с аппаратным графическим ускорением каждого, затраты времени на расчет общей модели без цепи питания составят 3 ч 50 мин.

Взамен моделирования полной системы можно разделить исследуемую задачу на меньшие части. Это позволяет оптимизировать каждую часть отдель-

но, используя для этого самую лучшую технологию численного моделирования. По этой причине общее время, затрачиваемое на расчет всех элементов системы, будет значительно меньше тех ресурсов, которые потребуются на анализ одной, но крайне крупной модели. Такой подход делает оптимизацию всей системы гораздо эффективнее.

Технология SAM оптимально подходит для решения подобного класса задач, поскольку она поддерживает механизм обратной связи между анализируемыми проектами. Так, каждая индивидуальная задача настраивается и вычисляется, а затем необходимые



▲ Рис. 3. Принципиальная схема из индивидуальных элементов составного проекта

результаты автоматически передаются в следующий этап моделирования. Например, сначала рассчитывается и оптимизируется модель селектора поляризации средствами частотного вычислителя, затем S-параметры передаются в проект рупорной антенны и ее каркаса. Для расчета источника наиболее оптимальным будет временной вычислитель, возбуждающий сигнал которого корректируется средствами CST DESIGN STUDIO, учитывая тем самым параметры селектора. Полученное поле (в ближней или дальней зоне) в дальнейшем используется в качестве источника излучения для рефлектора, анализируемого многоуровневым быстрым мультипольным методом интегрального вычислителя (основанного на методе моментов) или асимптотическим вычислительным модулем.

Общее время на расчет рупора с полученными ранее S-параметрами селектора и отражательной системы вместе занимает приблизительно 25 мин вместо 3 ч и 50 мин, требуемых на анализ полной модели. Как видно из рассмотрения рис. 2, результаты моделирования диаграммы направленности антенной системы на рабочей частоте 20 ГГц в случае составного проекта совпадают с параметрами полной модели.

НАСТРОЙКА ПРОЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SAM

Первым шагом в построении составного проекта станет импорт всех отдельных элементов в новый проект CST DESIGN STUDIO, который, по сути, представляет собой редактор принципиальных схем. Используемые компоненты описываются отдельно в виде параметризованных моделей. Любые изменения в исходнике обновляются в системной модели. Таким образом, объекты системы могут быть всегда откорректированы после импорта, поскольку обраще-

ние всякий раз выполняется к исходным файлам. Пример модульной сборки для рассматриваемого случая рефлекторной системы представлен на рис. 3.

Следующим шагом станет построение принципиальной схемы из импортированных моделей путем описания электрических соединений между портами компонентов. Такая схема может использоваться как для численного анализа на уровне принципиального описания, так и для автоматической привязки компонентов при построении 3D-модели. Для просмотра трехмерного расположения объектов и их относительного размещения используется топологический режим просмотра Layout View. В нем пользователем выполняется сборка структуры в полуавтоматическом режиме с использованием инструмента привязки Snapping Tool и информации о соединении объектов на уровне принципиальной схемы.

Исходя из построенной принципиальной схемы и трехмерного расположения объектов создаются проекты моделирования Simulation Project со всевозможными комбинациями из импортированных объектов. Проект моделирования — модель CST STUDIO SUITE, сохраненная локально, на основе моделей из мастер-файла. Из этого следует, что для пользователя нет необходимости в хранении различных версий файлов или комбинаций компонентов, поскольку все данные и результаты моделирования сохраняются в едином файле. Все изменения параметров в мастер-модели будут автоматически обновляться среди всех созданных проектов моделирования.

В случае рефлекторной антенной системы из элементов схемы создается отдельный 3D-проект для моделирования селектора, и с помощью частотного вычислительного модуля рассчитываются и оптимизируются его параметры. Полученные результаты затем передают-

ся в виде S-параметров и учитываются при моделировании источника вместе с корпусом, для которого уже будет задействован временной вычислительный модуль. В завершение поле от источника автоматически импортируется в проект моделирования отражателя, и система анализируется средствами интегрального или асимптотического вычислителя.

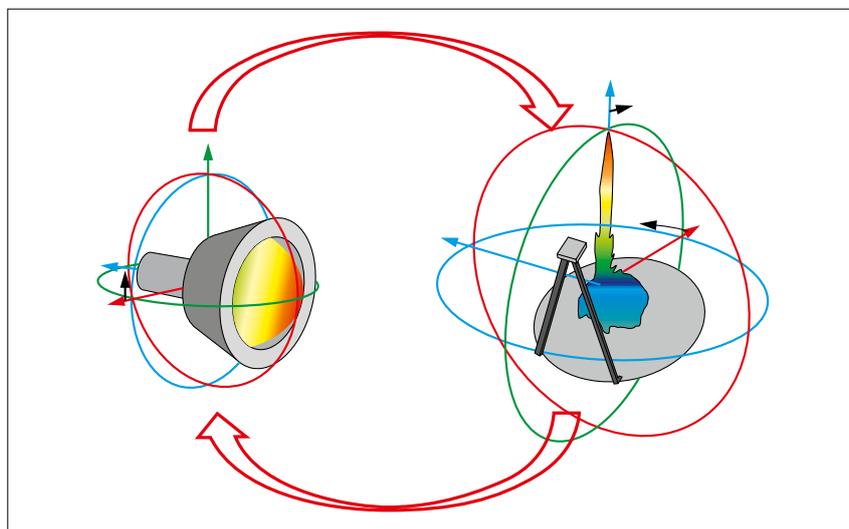
Поскольку каждый этап моделирования может быть собран из элементов одного мастер-проекта, в котором также напрямую доступны получаемые результаты, автоматизация настройки всей системы в целом может выполняться с помощью набора индивидуальных проектов моделирования. Возможная конфигурация этапов оптимизации рассматриваемого случая представлена на рис. 4 и может выглядеть следующим образом:

- Поскольку цепь питания независима от моделирования рупора и отражателя, то она может быть оптимизирована в виде отдельного проекта. Рассчитанные значения S-параметров будут непосредственно использоваться на схемном уровне в цепи питания рупорной антенны.
- Далее создается цикл оптимизации характеристик рупорного источника и рефлектора. Любое изменение параметров автоматически обновляет соответствующий файл моделирования рупора и цепи питания.
- Дальнее поле рупорной антенны автоматически экспортируется с помощью шаблона постобработки и импортируется в форму источника в модель отражателя. Полученное значение поля в дальней зоне всей системы автоматически обрабатывается средствами шаблонов постобработки и используется для описания цели оптимизации.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛНОЙ МОДЕЛИ

Изначальной задачей стояло получение усиления антенной системы на уровне 30 дБ с рабочей волновой полярizations. Для настройки усиления можно регулировать как длину раскрытия, так и его диаметр. Следует добавить, что при оптимизации, например, коэффициента эллиптичности может регулироваться как параметр разности фаз между волнами на входе поляризатора, так и эллиптичность самого рупора.

Поскольку стартовые значения коэффициента эллиптичности соответствовали поставленным требованиям, основной целью была оптимизация усиления путем изменения длины и диаметра раскрытия рупорной антенны. Сходимость поставленной цели получена после четырех шагов оптимизатора, и усиление всей системы возросло на 2 дБ во всем



▲ Рис. 4. Обратная связь между проектом источника и отражателя

рабочем диапазоне. Параметры системы до и после оптимизации изображены на рис. 5. Для дальнейшего повышения усиления может быть увеличен как диаметр раскрыва источника, так и размер отражателя.

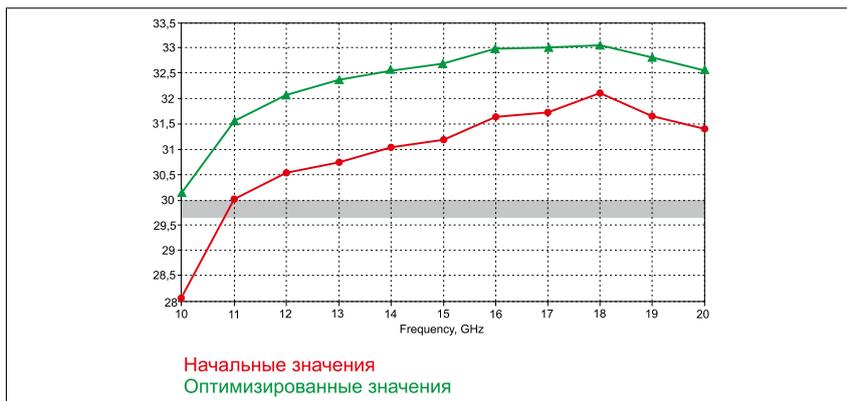
Общие затраты времени на оптимизацию всей системы составили 1 ч 49 мин. на одной рабочей станции с аппаратным ускорением. Как было отмечено ранее, тот же процесс настройки системы, представленной в форме одной модели, составил 3 ч 50 мин на вычислительном кластере из четырех узлов.

Рассмотренный пример дает наглядную картину преимуществ использования технологии SAM для оптимизации крупных систем. Возможность комбинирования численных методов и многоуровневого анализа системы делает процесс оптимизации гораздо эффективнее, а затраты вычислительных ресурсов значительно ниже.

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ SAM

Как было отмечено ранее, способ анализа составного проекта главным образом определяется посредством проектов моделирования Simulation Project и задач Simulation Tasks, выполняемых либо на схемном уровне, либо на уровне расчета 3D-объектов. Пакетом программ CST STUDIO SUITE поддерживается целый набор задач для различной степени анализа модели, и о некоторых из них далее пойдет речь.

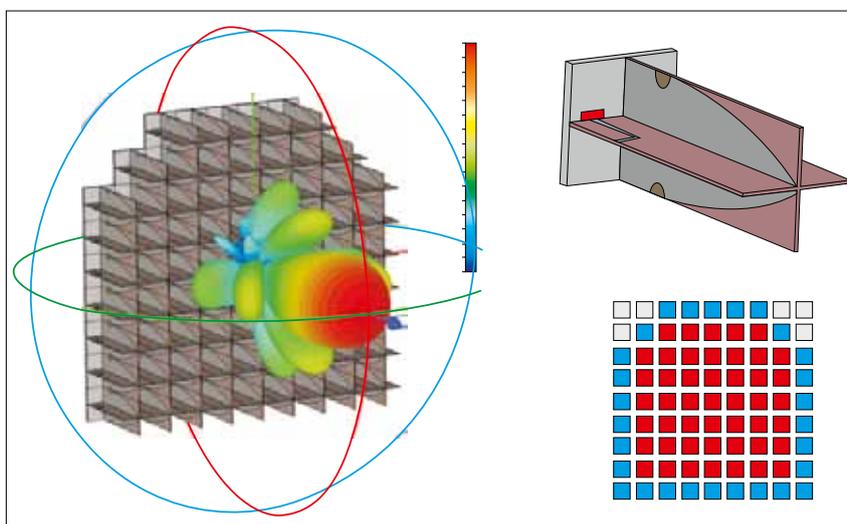
Прежде всего, следует выделить задачу совместного ЭМ/схемного анализа переходных процессов Transient EM/Circuit Co-Simulation [2]. Стандартное совместное моделирование использует описание на уровне S-параметров блоков 3D-моделей, анализируемых CST MICROWAVE STUDIO. Вычисление полной матрицы блока требует либо проведения свипирования частоты, либо выполнения возбуждения каждого порта модели в случае решения во временной области. Полученные значения S-параметров дают полное описание блока для проведения любых дальнейших комбинаций возбуждений портов. В случае совместного ЭМ/схемного анализа используется иной подход: выполняется только один цикл совместной задачи с возбуждением, определенным на схемном уровне. При этом в рамках каждого временного шага выполняется ЭМ-анализ модели с учетом всех элементов блок-схемы, соединенных с 3D. Такой способ моделирования обладает двумя весомыми преимуществами. Во-первых, это возможность учета нелинейных элементов (диодов, транзисторов и т. п., представленных на схемном уровне, например в формате SPICE-моделей) на уровне 3D. Во-вторых,



▲ Рис. 5. Полученные результаты оптимизации усиления системы

такое решение будет быстрее стандартного совместного моделирования, поскольку не требует вычисления полной S-матрицы, что значительно ускоряет анализ в случае многопортовых систем.

В 2015 г. в CST был реализован мастер для анализа антенных решеток Antenna Array Wizard. Это специальный проект моделирования, для начала работы которого необходима геометрия лишь одного элемента решетки. Работа мастера состоит из двух этапов, представленных на рис. 6. На первом выполняется анализ решетки в бесконечном приближении, вычисляются зоны слепоты, входной импеданс и направленность активного излучателя, вычисляются рабочие характеристики с использованием множителя решетки. На втором этапе создается модель конечной системы, топология которой и амплитудно-фазовое распределение определяются пользователем. Здесь вычисляются характеристики конечной системы с учетом корпуса, ЭМ-окружения, цепи питания и т. д. Работа мастера значительно упрощает построение и оптимизацию крупной решетки и в то же время расширяет круг рассчитываемых параметров отдельного элемента.



▲ Рис. 6. Мастер антенных решеток Array Wizard

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология сборки и моделирования составных проектов SAM значительно ускоряет моделирование и оптимизацию сложных современных СВЧ-систем. Все используемые компоненты импортируются в единый мастер-проект, в котором отслеживаются все дальнейшие изменения. Любая комбинация из компонентов и способов моделирования может использоваться для создания новых проектов моделирования. Автоматическая связь между проектами позволяет беспрепятственно оптимизировать сложные системы, изменяя параметр в одном проекте и используя результаты моделирования других проектов в роли цели оптимизации. □

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Engargiola, A. Navarrini. K-Band Orthomode Transducer With Waveguide Port and Balanced Coaxial Probes//IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53.
2. A. Scott, V. Sokol. True Transient 3D EM/Circuit Co-Simulation Using CST STUDIO SUITE//Microwave Product Digest. October, 2008.