

# Моделирование СВЧ-устройств средствами Sonnet

**А. Титаренко**

**С лета 2005 года российским пользователям стало доступно программное обеспечение компании Sonnet Software ([www.sonnetsoftware.com](http://www.sonnetsoftware.com)), предназначенное для моделирования планарных СВЧ-устройств, — компания ЭлекТрейд-М, ведущий поставщик САПР электронных устройств (EDA), начала официальные поставки этого продукта в Россию.**

Пакет Sonnet Suites предназначен для строгого электродинамического анализа пассивных многослойных планарных структур с любым количеством диэлектрических слоев и с произвольной сложной топологией металлизации, нанесенной на них. Количество портов, задаваемых в топологии структуры, также может быть произвольным; порты при этом могут быть и внутренними (находиться внутри анализируемой структуры). Это позволяет осуществлять стыковку результатов расчета пассивной части схемы, выполненных в среде Sonnet, с моделями активных элементов, представленными в какой-либо сторонней программе (например Microwave Office).

Таким образом с помощью связи Sonnet с внешней программой можно проводить строгий расчет широкого класса линейных и нелинейных систем, когда пассивная часть схемы рассчитывается в среде Sonnet, а за расчет активной части и за задачу объединения результатов отвечает сторонняя программа. Кроме того, в самой программе Sonnet имеются ограниченные возможности по стыковке пассивной части схемы с S-параметрами активных устройств, о чем будет сказано ниже.

Программа Sonnet не предназначена для расчета произвольных трехмерных структур — с ее помощью невозможно, например, проводить расчет сложных волноводных соединений с произвольной геометрией. В этом плане Sonnet уступает полностью трехмерным программам электродинамического расчета, например CST Microwave Studio и др.

Все ближайшие конкуренты программы Sonnet, например модуль EMSight,

входящий в состав пакета Microwave Office, являются так называемыми 2,5-мерными электродинамическими симуляторами. Это означает, что каждый диэлектрический слой в данных программах является однородным в поперечном сечении, и не может иметь никаких неоднородностей в виде выборок или вставок из другого диэлектрика. Кроме того, ток, протекающий по металлизированным сквозным отверстиям, пронизывающим данные диэлектрические слои, считается равномерно распределенным по всей длине отверстия. Данное упрощение вполне приемлемо в случае подложек малой толщины (много меньше длины волны).

Данный упрощенный подход к моделированию токов на сквозных отверстиях используется и в Sonnet, однако она, в отличие от упомянутых программ, не является полностью 2,5-мерной программой. Здесь в любом из диэлектрических слоев могут быть размещены диэлектрические или металлические вставки, толщина которых равна толщине соответствующего диэлектрического слоя, а поперечные размеры задаются пользователем. В этом смысле программа Sonnet занимает промежуточное положение между 2,5-мерными и полностью трехмерными программами.

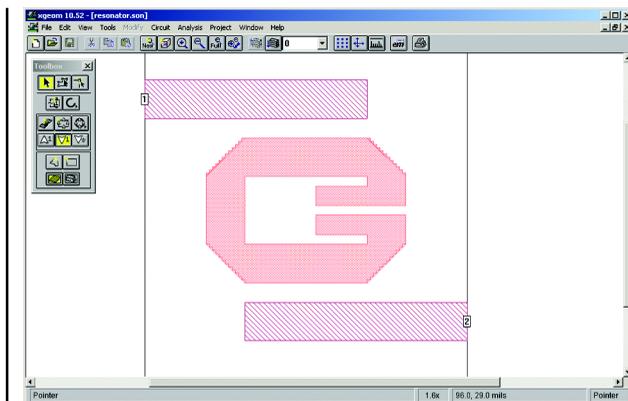
Данные достоинства программы Sonnet обусловили ее широкое приме-

нение в процессе проектирования однослойных и многослойных монолитных схем, а также схем, выполненных по технологии LTCC. Особое значение Sonnet приобретает в процессе проектирования многослойных монолитных схем, в которых используются так называемые ETL-линии (Embedded Transmission Line), расположенные между тонкими (до 10 мкм) слоями полиимида или другого материала.

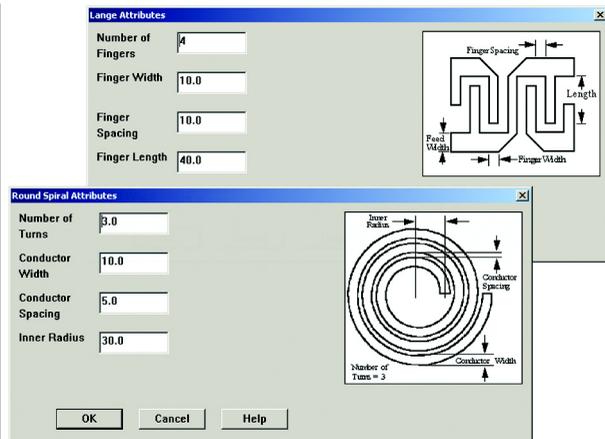
Интерфейс Sonnet основан на стандарте Windows и является достаточно удобным для создания топологии анализируемых структур, задания их параметров и представления полученных расчетных результатов.

Основное рабочее окно программы Sonnet представлено на рис. 1.

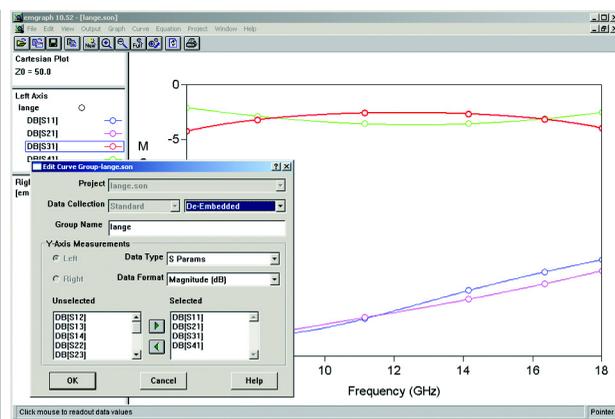
Ввод топологии каждого слоя анализируемой схемы может осуществляться как с помощью встроенных средств Sonnet, так и путем импорта топологий (DXF, GDSII, GEO). Кроме того, в последних версиях Microwave Office пред-



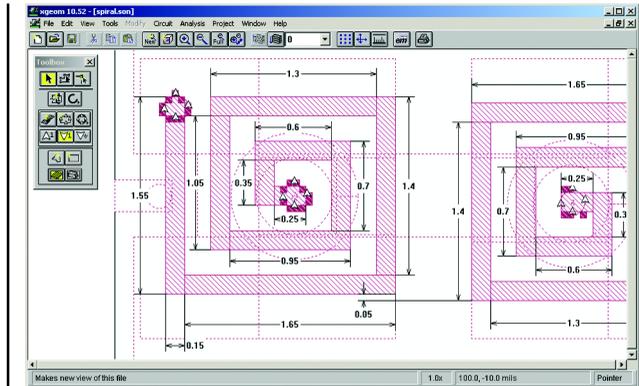
**Рисунок 1** Основное рабочее окно программы Sonnet



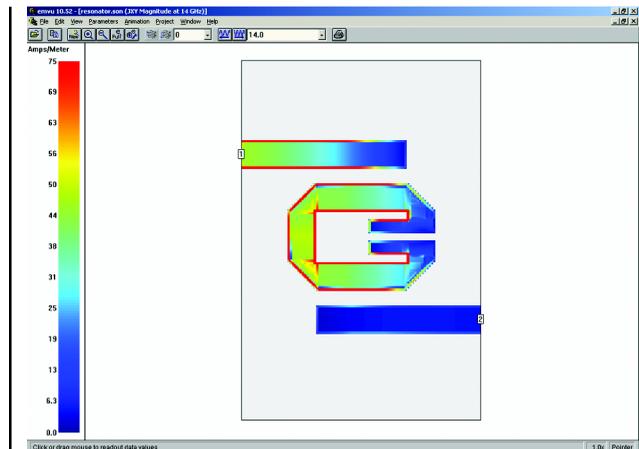
**Рисунок 2** Параметризуемые топологические примитивы Sonnet



**Рисунок 4** Представление S-параметров в среде Sonnet



**Рисунок 3** Указание размеров в среде Sonnet



**Рисунок 5** Распределение токов

усмотрена возможность непосредственной связи топологии, созданной в EMSight, с Sonnet с помощью интерфейса EMSocket: топология рисуется в среде Microwave Office, а расчет ее производится посредством программы Sonnet.

Механизм ручного создания топологии в среде Sonnet развит достаточно хорошо. В частности, в Sonnet имеется возможность автоматического создания ряда примитивов, широко используемых в технике СВЧ. В качестве примера на рис. 2 представлены диалоговые окна автоматического создания топологий моста Ланге и спиральной катушки индуктивности, при этом пользователем задаются лишь основные геометрические характеристики, а генерация топологии производится программой Sonnet в автоматическом режиме. Данный подход выгодно отличает Sonnet от прочих программ, в частности, от пакета EMSight из состава Microwave Office, где прорисовка топологии производится вручную.

Дополнительным интерфейсным преимуществом программы Sonnet является возможность разметки размеров эле-

ментов созданной топологии непосредственно в среде программы (рис. 3). Данная возможность, во-первых, повышает наглядность процесса разработки схемы, позволяя непосредственно отслеживать все изменения в результате настройки, а во-вторых, позволяет распечатывать готовые чертежи непосредственно из среды Sonnet.

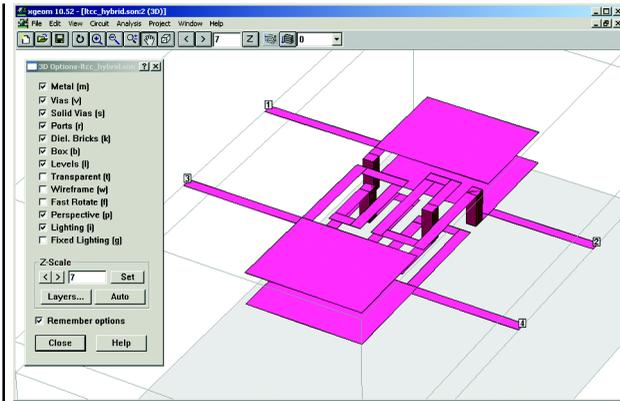
Возможности вывода рассчитанных результатов в среде Sonnet выглядят несколько ограниченными по сравнению с пакетом Microwave Office, но они вполне достаточны для продуктивной работы. В качестве выходных характеристик используются только S, Y, Z-параметры анализируемой системы (рис. 4). К сожалению, невозможно одновременно вывести на график рассчитанные амплитудную и фазовую характеристики, установка маркеров на заданную частоту, не предусмотрена возможность вывода на экран характеристик, определяемых пользователем.

Sonnet способен проводить расчет распределения тока по поверхности анализируемой структуры. Результаты

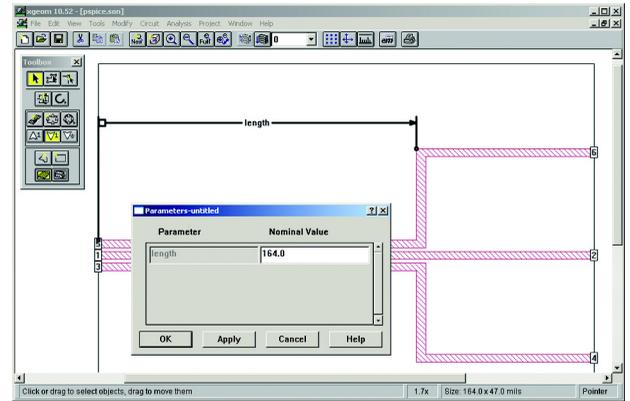
данного расчета могут представляться в виде цветового изображения, где каждому оттенку цвета ставится в соответствие определенная амплитуда тока (рис. 5).

Аналогичная возможность представления распределения тока присутствует, в частности, в пакетах Microwave Office и Microwave Studio, где помимо цветового используется векторное представление, когда ток в каждой элементарной ячейке представляется не только цветом, но и стрелкой, демонстрирующей направление тока.

Весьма удобной возможностью Sonnet является трехмерное представление анализируемой структуры (рис. 6). Удобство данной системы заключается в том, что она позволяет масштабировать представление структуры по оси z, "растаскивая" отдельные слои и позволяя увидеть структуру в целом. Такое представление особенно ценно при рассмотрении многослойных LTCC-структур, у которых толщина каждого слоя во много раз меньше поперечных размеров платы.



**Рисунок 6** Трехмерное представление анализируемой структуры в Sonnet



**Рисунок 7** Параметризация топологии в Sonnet

В целом, интерфейс Sonnet является достаточно удобным для анализа и проектирования многослойных планарных схем. Основной особенностью организации интерфейса Sonnet является его ориентированность на отдельные модули — каждый график, каждое трехмерное представление являются отдельными программами. Такая организация является типичной для программ, пришедших из Unix'a.

Вычислительное ядро программы Sonnet основано на методе конечных элементов, суть которого заключается в разбиении анализируемой топологии на элементарные ячейки, поле в пределах которых считается постоянным. Данный метод является общепринятым в программах такого рода, отличия заключаются, как правило, либо в способе разбиения (прямоугольная или треугольная сетка), либо в методе решения получаемых интегральных уравнений.

В Sonnet имеются две возможности разбиения структуры на ячейки, при которых используется либо прямоугольная, либо так называемая диагональная сетка, представляющая собой частный вид треугольной. По умолчанию используется прямоугольная сетка разбиения, однако пользователь может по желанию установить диагональную сетку на тех элементах топологии, которые оптимальным образом "вписываются" в этот способ разбиения.

Быстродействие программы Sonnet, обуславливающее ее широкое применение, связано с ее способностью к рациональному распределению элементарных ячеек, позволяющему проводить расчет в хорошем приближении при минимальном количестве сеточных элементов. Суть используемого метода заключается в том, что Sonnet производит предварительную качественную оценку анализируемой структуры, располагая более крупные ячейки там, где поле за-

ведомо меняется мало, и более мелкие там, где характеристика поля будет иметь существенные изменения.

В частности, использование опции Edge Mesh позволяет включить или отключить разбиение на мелкие ячейки в области краев металлических проводников, где всегда имеет место сингулярность поля. Включение данной опции позволяет более точно рассчитать поведение поля в краевых областях; с другой стороны, отключение Edge Mesh приводит к существенной экономии вычислительных и временных затрат в тех структурах, где краевые эффекты не оказывают существенного влияния. В качестве компромисса разработчики Sonnet предлагают следующую методику: начальный расчет структуры проводится при выключенной опции Edge Mesh, затем она включается и проводится уточнение полученных данных.

Опыт показывает, что в большинстве случаев отключение опции Edge Mesh не приводит к сколько-нибудь заметной потере точности. Например, при проектировании многослойного фильтра отключение Edge Mesh привело к изменению данных менее чем на 3%. Тем не менее, этот факт не означает, что отключение Edge Mesh всегда позволит получить корректные данные — разработчики Sonnet указывают на необходимость включения данной опции при анализе узких полосковых линий, ширина которых в 10 и более раз меньше расстояния до заземляющей плоскости.

Еще одним достоинством пакета Sonnet является его способность использовать симметрию анализируемого устройства. Если рассчитываемая схема может быть разбита на отдельные блоки по оси симметрии, вдоль которой располагается магнитная или электрическая стенка, то время расчета такой структуры сокращается вдвое.

Для расчета планарной структуры в среде Sonnet она, как и в прочих аналогичных программах, должна быть помещена в замкнутый объем, боковая поверхность которого является идеально проводящей, а граничные условия верхней и нижней стенок могут определяться пользователем. Рекомендации по выбору граничных условий и размеров замкнутой поверхности являются общими для всех программ подобного рода. Высота верхней крышки должна как минимум в 4–5 раз превосходить толщину анализируемой платы, если считается, что плата должна быть открытой. Поперечные размеры замкнутой поверхности должны быть достаточно большими, чтобы на характеристиках анализируемой схемы не сказывалось влияние идеально проводящих боковых поверхностей.

Весьма полезной функцией программы Sonnet является возможность параметризации создаваемой топологии — описания геометрии создаваемых полигонов с помощью численных параметров. Пример данного подхода приведен на рис. 7, где длина подводящего полоска задается параметром length и изменение данного параметра автоматически изменит длину соответствующего полоска. Данная способность Sonnet позволяет проводить параметрическую оптимизацию электродинамических структур, что полностью отсутствует в аналогичных программах, в частности, в Microwave Office.

Еще одним достоинством программы Sonnet является способность проводить электродинамический анализ и оптимизацию структур, включающих в себя активные или неактивные элементы, описываемые матрицами S-параметров. С этой целью в тех местах анализируемой структуры, к которым крепятся активные элементы, размещаются внут-

ренные порты, после чего проводится анализ пассивной части системы, результаты которого затем объединяются с  $S$ -параметрами активных устройств.

В среде Sonnet есть собственные средства выполнения такой процедуры. В качестве примера на рис. 8 представлена пассивная часть усилителя, в котором транзистор крепится к двум внутренним портам 3 и 4. Здесь же представлено текстовое описание схемы, связывающей воедино рассчитанную пассивную часть усилителя с  $S$ -параметрами активного элемента (транзистора), представляемого в виде файла `amp_dev.s2p`. Результатом расчета схемы, представленной на рис. 8, будут сквозные характеристики разработанного усилителя.

Таким образом в среде Sonnet имеется возможность проводить непосредственный расчет и оптимизацию схем, включающих в себя активные элементы, представляемые  $S$ -параметрами. Данный подход существенно расширяет возможности Sonnet, поскольку обычный способ сопряжения пассивных и активных структур, заключающийся в передаче  $S$ -параметров в стороннюю программу (напри-

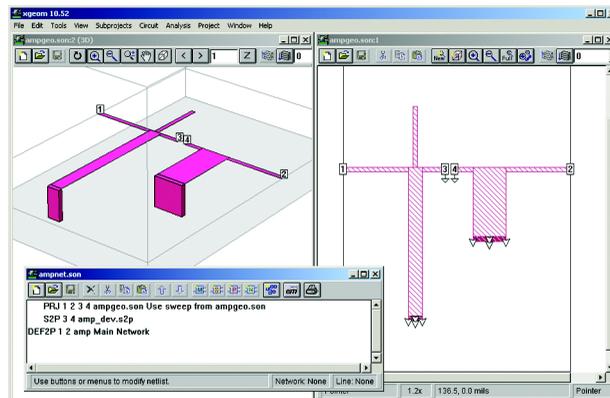
мер Microwave Office), является значительно более громоздким и не позволяет проводить оптимизацию созданной структуры.

Недостатком подхода к объединению различных частей сложной системы, продемонстрированного на рис. 8, является невозможность расчета нелинейных узлов, а также его низкая наглядность. Более эффективное сопряжение программы Sonnet с линейными или нелинейными устройствами реализовано в пакете CST Design Studio.

В заключение отметим, что программа Sonnet имеет несколько конфигураций, призванных оптимальным образом предоставить пользователю необходимые функции за минимальные деньги. Для целей тестирования всем желающим предоставляется версия программы Sonnet Lite, имеющая ограничение по используемой

памяти 16 Мб, допускающая наличие в анализируемой структуре не более 4 портов и 2 слоев металлизации и выполняющая свипирование одного параметра. Полная версия Sonnet Professional не имеет никаких ограничений.

За любой дополнительной информацией относительно программного обеспечения фирмы Sonnet Software просим обращаться в офис компании Электрейд-М по адресу [info@eltem.ru](mailto:info@eltem.ru) или телефону (095) 974-1480.



**Рисунок 8** Пассивная часть усилителя