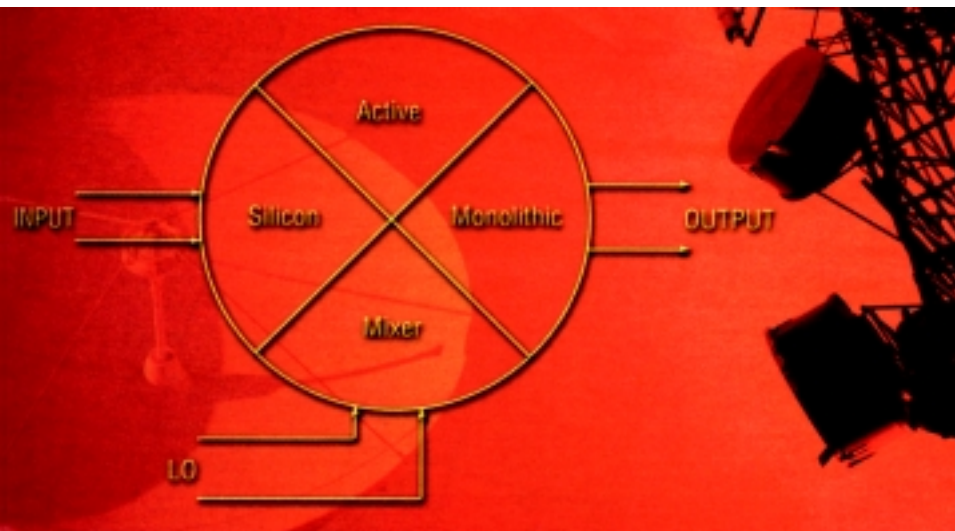


Моделирование СВЧ-смесителя



Ровно год назад популярное европейское издание *Microwave Engineering Europe* представило на своих страницах результаты тестирования программного обеспечения для полного электромагнитного моделирования объёмных СВЧ-устройств. В решении тестовой задачи моделирования симметричной микрополосковой антенны Вивальди приняли участие шесть различных компаний, лидирующих на рынке в этой отрасли. Краткий отчёт об этом помещён на сайте www.electrade.ru.

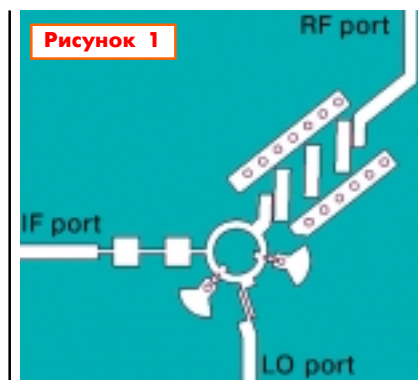
В конце прошлого года журнал выступил с инициативой проведения тестирования программ моделирования СВЧ-схем. В качестве тестовой была выбрана задача моделирования микрополоскового кольцевого балансного (*rat-race*) смесителя, так как, во-первых, проблема моделирования смесителей очень актуальна для современного рынка телекоммуникационных услуг. Во-вторых,

микрополосковый смеситель хорошо совместим с технологией изготовления как монолитных СВЧ интегральных схем, так и многокристальных устройств. В-третьих, задача моделирования смесителей является исключительно нелинейной и как нельзя лучше показывает возможности вычислительного ядра программы, причём особый интерес представляет пограничная зона уровней входных сигналов, когда задачу нельзя линеаризовать, например, при входе устройства в компрессию усиления.

Топология моделируемого смесителя представлена на рис. 1. На гибридном кольце располагаются два диода с балочными выводами Agilent HSCH-9101. Входы сигналов располагаются на кольце таким образом, чтобы обеспечить максимальное подавление паразитных сигналов на выходе ПЧ, а также хорошую развязку между гетеродином и входом смесителя. Для дополнительного улучшения этих параметров на всех портах смесителя включены СВЧ-фильтры, выполненные по различным технологиям. Топология выполнена на стандартной подложке Rogers Duroid 5880 толщиной 0,254 мм и с относительной диэлектрической проницаемостью 2,2.

В ходе моделирования необходимо было получить:

- схему моделируемого устройства;
- S-параметры отдельно для гибридного кольца и фильтров;
- зависимость потерь преобразования от мощности сигнала гетероди-

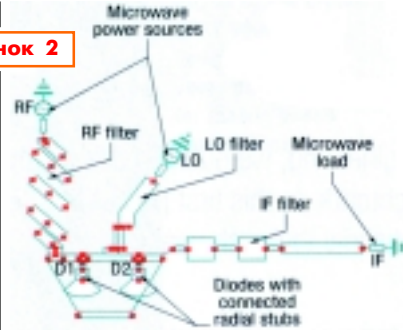


Исходная топология СВЧ-смесителя

на, изменяемой в пределах от +5 до +15 дБм, для режима преобразования вниз с частот 35–40 ГГц при частоте гетеродина 35 ГГц и “встречного” преобразования вверх;

- КСВ всех портов;
- точку компрессии;
- таблицу уровней паразитных составляющих на портах смесителя при сигнале гетеродина на частоте 35 ГГц мощностью +12 дБм и при входном сигнале на частоте 37 ГГц с тремя различными уровнями мощности — -20 дБм, 0 дБм и +5 дБм.

Рисунок 2



Представление схемы смесителя в пакете LINMIC+/N

ровались в малосигнальном режиме, а весь смеситель в сборе — в режиме большого сигнала. При расчёте фильтров использовались уточнённые интерполированные модели, учитывающие все физические параметры реальных устройств. Для моделирования диодов использовалась нелинейная SPICE-модель диодов Шоттки HSCH-9XX, однако более точный результат можно получить экстракцией модели диода из измеренных DC и S-параметров конкретного прибора. Нелинейный анализ выполнялся методом гармонического баланса при воздействии трёх тонов. Это позволило провести расчёт интермодуляционных составляющих второго порядка, но составляющие более высоких порядков не учитывались, так как имели частоту выше 100 ГГц, при которой SPICE-модели диодов теряют свою точность. Некоторые сложности возникли при прорисовке схемы гибридного кольца. В частности, оно было разбито на несколько частей, разделённых пятью портами. Так как в библиотеке отсутствовали стандартные элементы в виде сегментов кольца, оно было прорисовано посредством ком-

На предложение откликнулось четыре компании, специализирующиеся в области моделирования нелинейных СВЧ-схем: AC Microwave, APLAC, Applied Wave Research и Eagleware. Сам факт того, что эти фирмы решили принять участие в данной акции, говорит об уверенности специалистов в возможностях своих программ. Остаётся лишь догадываться, почему предложение было отклонено компаниями Cadence, Mentor Graphics, Barnard Microsystems, Optotek и Sonnet Software.

В общем, так или иначе, тестовая задача была решена всеми продуктами. Однако, различные продукты продемонстрировали некоторые особенности.

Компания AC Microwave выполняла моделирование с помощью своего продукта LINMIC+/N 5.2. Этот пакет даёт возможность моделировать СВЧ-устройства двумя способами: как схему, построенную из библиотечных элементов, и как планарную ЕМ-структуру. Для этой задачи был выбран первый способ, причём отдельные части анализи-

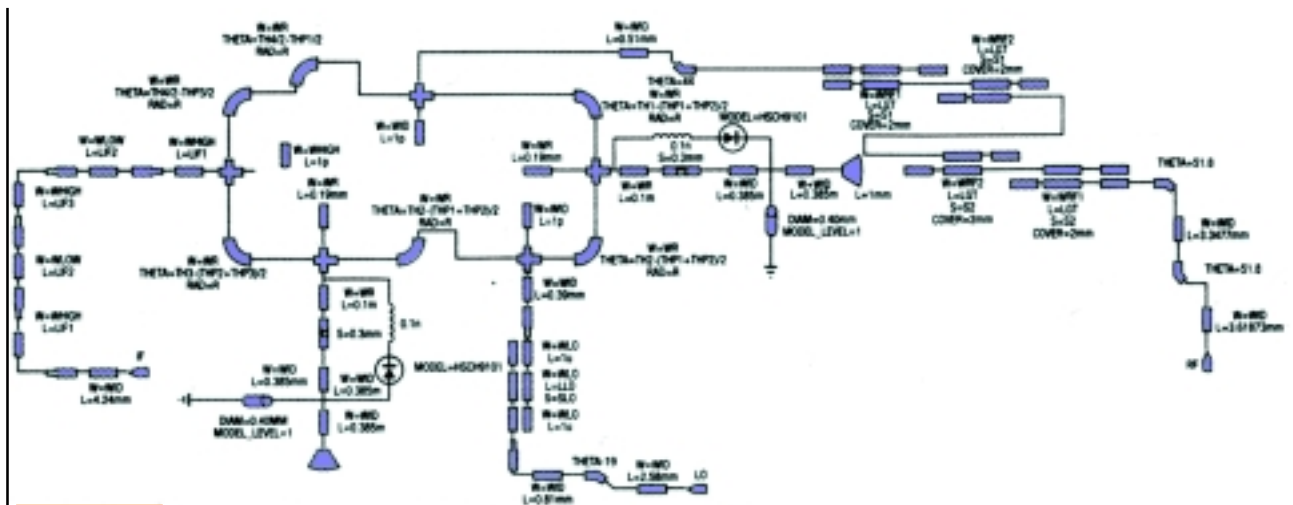


Рисунок 3 Представление схемы смесителя в пакете APLAC

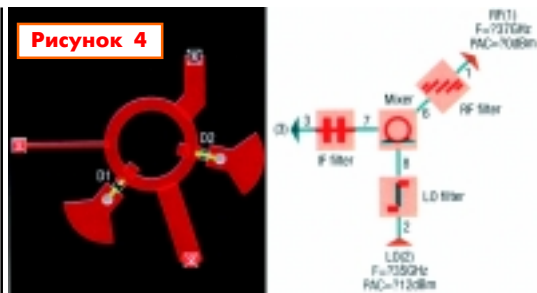


Рисунок 4
Топология гибридного кольца (слева)
и иерархическая схема смесителя (справа)
при моделировании в пакете GENESYS

бинации прямых участков микрополосковых линий, а также С- и Т-образных соединений (рис. 2).

Аналогичным образом выполнялось моделирование с помощью пакета APLAC. Здесь также была прорисована вся схема целиком с использованием специальных библиотечных моделей, позволяющих синтезировать топологию конечного устройства (рис. 3). Диод описывался стандартной моделью, однако для учёта паразитных эффектов реального устройства в схему была введена дополнительная индуктивность, имитирующая индуктивность выводов. Гибридное

кольцо разбивалось на угловые сегменты, в которых угол задавался через глобальные переменные, что позволило проводить оптимизацию устройства. В процессе моделирования была получена полоса пропускания 1 ГГц, но центральная частота оказалась сдвинута вниз и составила 36,5 ГГц. Данная погрешность объясняется неточностью моделей связанных микрополосковых линий, использованных при прорисовке RF-фильтра. Более точное решение может быть получено посредством EM-моделирования наиболее критичных частей проекта. Для расчёта S-параметров фильтров были использованы отдельные проекты схем с идентичными параметрами.

Похожий подход был использован при моделировании смесителя средствами пакета GENESYS компании Eagleware. Процесс был разбит на несколько этапов. Сначала была введена вся схема целиком, что позволило грубо оценить параметры схемы. Затем она была

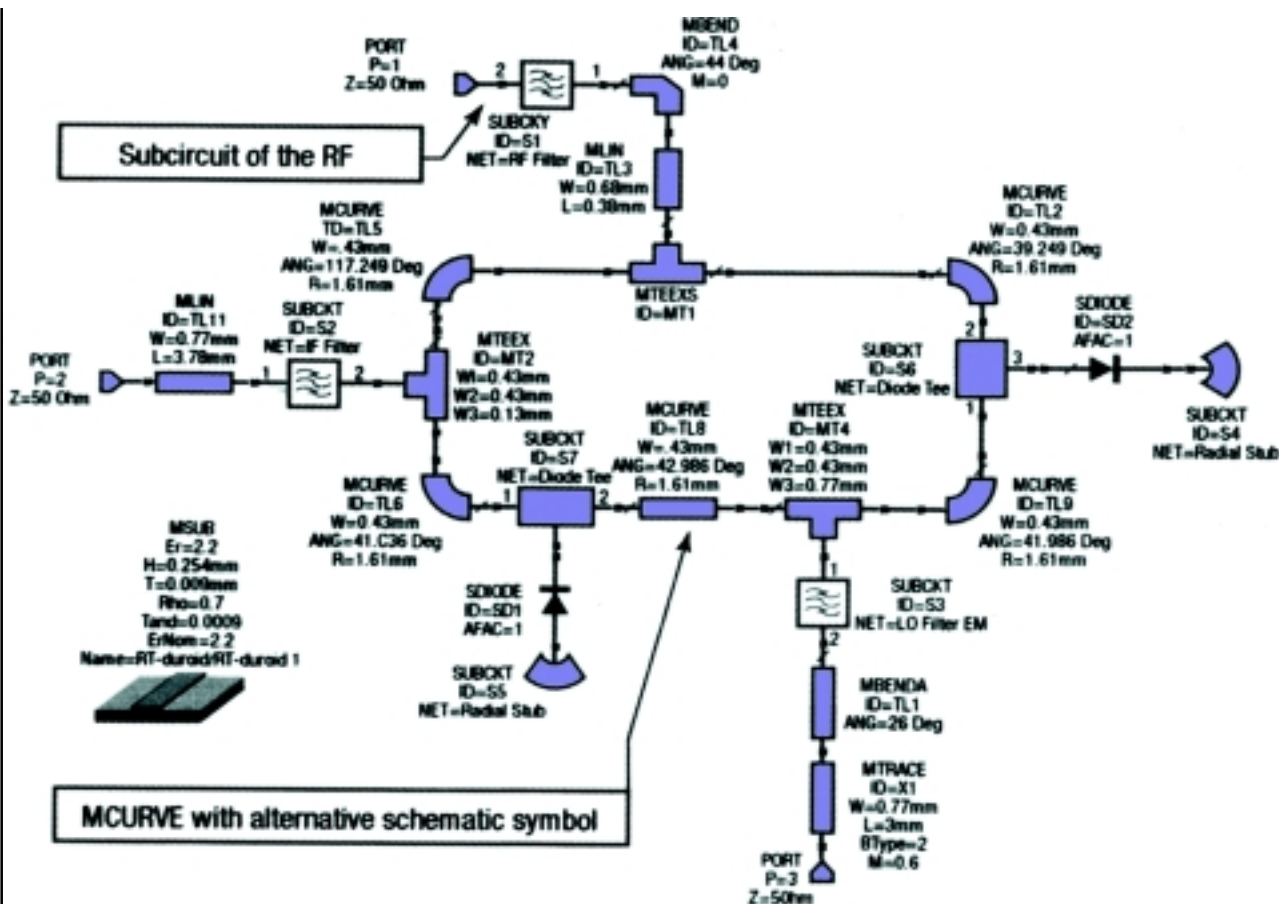


Рисунок 5 Сложная иерархическая схема смесителя, анализируемого в пакете Microwave Office

разбита на четыре отдельные части (три фильтра и гибридное кольцо), моделируемые отдельно. Все части были построены на стандартных библиотечных элементах, что позволило параллельно сформировать топологии и проверить правильность задания параметров схемы. В качестве диода была использована специальная нелинейная модель фирмы AGILENT. На последнем этапе проводилось моделирование смесителя как иерархической схемы (рис. 4), построенной из четырёх подсхем, причём для ускорения расчётов использовались готовые таблицы их S-параметров. Проверка результатов, полученных с помощью библиотечных моделей, проверялась с помощью собственного модуля EM-моделирования.

Моделирование с помощью пакета Microwave Office 2001 продемонстрировало ряд его преимуществ перед другими пакетами. Во-первых, в нём в рамках одной среды проектирования интегрированы средства анализа линейных и нелинейных схем, а также EM-моделирования. Во-вторых, только этот пакет содержит интерактивные средства настройки и оптимизации схем, что в комбинации с параметрическими моделями микрополосковых элементов даёт пользователю возможность быстро получить желаемый результат. Система построения проектов пакета позволяет сразу строить системы со сложной иерархией, поэтому смеситель был разбит на несколько подсхем, аналогично тому, как это было сделано в других пакетах. Однако высокая степень интеграции позволила уточнить с помощью EM-моделирования, например, частотные характеристики выводов диодов без резкого увеличения времени анализа (рис. 5). Все использованные библиотечные элементы имели топологические эквиваленты, что позволило контролировать конечную

топологию смесителя по мере настройки. В-третьих, помимо классического нелинейного анализа методом гармонического баланса, пакет Microwave Office позволяет проводить анализ методом рядов Вольтерра. Использование этого метода позволяет, с одной стороны, с высокой точностью рассчитать уровни интермодуляционных составляющих третьего порядка (все остальные пакеты считали второй порядок), а с другой — определить точку компрессии смесителя. Обе эти задачи трудно решить обычным методом гармонического баланса, так как он имеет хорошую сходимость только в схемах, где присутствует сильно выраженная нелинейность. Для готовой топологии был проведён статический анализ и оценен процент выхода годных изделий с учётом технологических допусков. Кроме того, была выполнена статистическая оптимизация топологии.

Подводя итог всему вышесказанному, можно с уверенностью сказать, что современное программное обеспечение позволяет выполнять моделирование таких сложных нелинейных СВЧ-устройств, как смесители. Скорость и точность анализа, а также качество автоматической генерации топологий и ряд других пользовательских функций зависят от используемых фирмами-разработчиками оригинальных программных решений. Во всех программах для анализа нелинейных схем используется метод гармонического баланса, а для уточнения частотных характеристик объёмных структур сложной формы — методы электромагнитного моделирования. Более подробный отчёт о проведённом тестировании можно найти по адресу www.mwee.com. По вопросам приобретения всех перечисленных программ просим обращаться в офис компании ЭлектронТрейд по телефону (095) 243-7250 или по адресу info@electrade.ru.