

Технология экстракции паразитных параметров для моделирования межсоединений

В статье описана новая вычислительная технология, позволяющая автоматизировать процесс анализа паразитных связей в топологиях высокочастотных кристаллов и плат.

Юрий Потапов

potapoff@eltn.ru

Не секрет, что очень часто разработчики телекоммуникационного оборудования сталкиваются с ситуацией, когда гигагерцовые аналоговые или гигабитные цифровые платы, разработанные ими с применением традиционных средств проектирования, включающих инструменты анализа целостности сигналов (SI), демонстрировали заданные характеристики в процессе моделирования, а после изготовления оказывались абсолютно неработоспособными. Ответ прост: на частотах выше 1 ГГц существенно проявляются эффекты взаимных связей между проводниками, что делает невозможным их игнорирование в процессе проектирования. Из-за высокой степени интеграции, а также высоких рабочих частот, простые RLC схемы замещения уже не могут удовлетворять требованиям моделирования сложных межсоединений, и требуется электродинамическое моделирование структуры. Если не принимать это во внимание, то разработчики будут продолжать тратить время и деньги на многочисленные итерации проектирования и отладку макетных образцов, что приведет к увеличению конечной цены продукта и, как следствие, потере позиций на рынке.

Новая версия пакета Microwave Office 2007 Design Suite компании Applied Wave Research (www.appwave.com) включает в себя новую технологию экстракции схем замещения, призванную существенно повысить эффективность работы проектировщиков при разработке сложного телекоммуникационного оборудования нового поколения. Новый подход, реализованный в модуле ACE (Automated Circuit Extraction), позволяет сократить время моделирования сложных конфигураций проводников с часов до считанных секунд. Кроме того, он дает возможность разработчикам выполнять моделирование межсоединений на ранних этапах проектирования, когда проблема может быть идентифицирована и устранена без привлечения дополнительных средств. В результате, цикл проектирования сокращается, а разработчики могут с высокой степенью уверенности сказать, что оборудование будет не только правильно функционировать, но при этом будет дешевле и легко воспроизводиться при массовом производстве.

В противоположность традиционным схемотехническим подходам, реализованная в AWR Microwave

Office технология экстракции схемы замещения использует топологические модели. Специальный механизм выполняет автоматическое разбиение структуры на отдельные части, которые могут быть представлены с помощью заранее определенных моделей, рассчитываемых с учетом всех особенностей топологии. Впервые такая технология была представлена при моделировании проводников Intelligent Net (iNet), в результате чего при моделировании схемы появилась возможность учитывать топологическую конфигурацию проводника. Такой метод идеально подходит для СВЧ проектов, где простые схемотехнические модели не могут обеспечить качественное моделирование проводников, а также для высокоплотных печатных плат, где проявляются эффекты, связанные с близким расположением проводников. Технология ACE использует аналогичный механизм экстракции для цифровых и аналоговых проектов и обеспечивает на порядок большее быстродействие по сравнению с традиционными EM методами благодаря более эффективному разбиению и расширенному набору моделей распределенных и многосвязных линий. То есть, вместо того, чтобы использовать метод конечных элементов (FEM) или метод моментов (MOM) для анализа произвольной геометрии, здесь используются схемотехнические элементы, моделируемые с применением оптимизированного EM вычислителя, что дает существенный прирост в быстродействии.

В данной статье мы обсудим основные возможности и преимущества технологии AWR ACE, а также рассмотрим ряд примеров, демонстрирующих ее практическое использование для разработки телекоммуникационного оборудования. Опыт показывает, что применение данной технологии смещает решение проблем анализа межсоединений в начало цикла проектирования и при сравнимой точности обеспечивает значительно большую скорость моделирования по сравнению с EM методами оценки готовой топологии.

Что же такое технология ACE? Программное обеспечение ACE подавляющим большинством сообщества, занимающегося обработкой цифровых и смешанных аналого-цифровых сигналов, может быть описано как система экстракции эквивалентной схе-

мы замещения. Данная технология не очень хорошо известна разработчикам ВЧ/СВЧ, так как традиционно RC модели использовались только для низкочастотных межсоединений. Главным достижением технологии ACE является комбинация традиционного схемотехнического подхода и распределенных моделей геометрических элементов, хорошо зарекомендовавших себя в СВЧ проектах.

Ключевым элементом технологии является необходимость правильной оценки пути токов возврата. Низкочастотные технологии экстракции схем игнорируют понятие «земля» и переключают проблему определения путей токов возврата на плечи пользователя или вычислителя. Результатом такого гипотетического подхода являются либо неточные, либо нереалистичные данные. Программное обеспечение ACE оценивает пути токов возврата и автоматически включает их динамическое изменение для различных конфигураций подложки одной и той же интегральной схемы, модуля или печатной платы.

В отличие от традиционных EM вычислителей, технология ACE создает частотно-зависимые схемотехнические модели непосредственно из геометрического представления анализируемой структуры, без необходимости прямого решения уравнений Максвелла. Например, показанные на рис. 1 связанные линии, расположенные на разных слоях, могут быть проанализированы для разных значений длин и ширины линий, толщины слоев, а также разного положения отдельных сегментов линий друг относительно друга.

Базируясь на заданных пользователем критериях, система генерирует список соединений эквивалентной схемы (рис. 2), которая учитывает все взаимодействия между проводниками: связи между линиями, неоднородности, перекрестия, переходные отверстия и независимые сегменты проводников. Прирост быстродействия по сравнению с 2D или 3D методами прямого решения уравнений Максвелла колоссален (более чем в 1000 раз), так как решение делается в первом приближении посредством геометрического снижения сложности структуры, выявления связанных или многосвязных линий, а также иных группированных объектов. Каждая из таких упрощенных структур может быть промоделирована с помощью оптимизированного EM вычислителя. Точность решения определяется тем, какие модели сопоставлены структурам и насколько правильно выбраны пользовательские критерии отбора, например, максимальное расстояние, на котором ищутся взаимные связи, и минимальная длина линии. Далее эти модели могут быть использованы при линейном и нелинейном моделировании в частотной области, а также во временной области с помощью таких программ, как HSPICE.

Какие преимущества дает пользователю технология ACE? Прежде всего, получаемая на выходе эквивалентная схема оформлена в стиле СВЧ проекта. Обычно схема СВЧ проекта подробно описывает все межсоединения, как показано на рис. 3. Такой подход требует от пользователя значительных усилий, так как

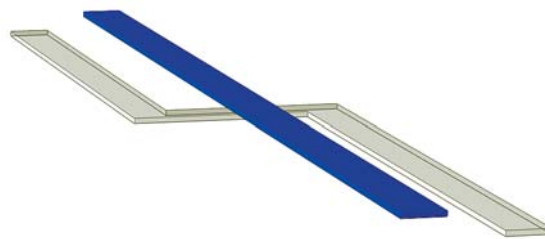


Рис. 1. Расположенные на разных слоях проводники в точке пересечения образуют паразитную связь

```

CKT
CAP 11 12 ID="1" C=4.5333e-002
MSUB Er=4.38H=250. T=27. Rho=0.86281 Tand=2.5e-002 ErNcm=4.38 Name="SUB21"

MLIN 14 12 ID="3" W=160. L=80. MSUB="SUB21"
GHSUB N=2 Er={3.5,4.6} Tand={2.5e-002,1.7e-002} H={50.,200.} ErC=1.
TandC=0. HC=700. HB=0.25T={27.,27.} Rho=0.86281 Cover=1Cnd=0 SW=0.
Name="SUB24" SWRright=0. SigmaC=0. Sigma={2.5e-002,1.7e-002}
RhoV={0.86281,0.86281}

GMCLIN 3 1 14 8 ID="6" N=2 L=2270. Acc=1. GHSUB="SUB24"
SaveToFile=0 FileName="" W1=160. W2=160. Offs1=0. Offs2=320. CL1=1
CL2=2

MSUB Er=4.6 H=200. T=27. Rho=0.86281 Tand=1.7e-002 ErNcm=4.6 Name="SUB25"

MLIN 11 7 ID="8" W=160. L=240. MSUB="SUB25"
GMCLIN 15 10 4 2 ID="10" N=2 L=2560. Acc=1. GHSUB="SUB24"
SaveToFile=0 FileName="" W1=160. W2=160. Offs1=0. Offs2=360. CL1=1
CL2=2

MLIN 12 15 ID="11" W=160. L=80. MSUB="SUB21"
MBENDR 7 8 ID="12" W=160. MSUB="SUB25"
MLIN 9 11 ID="13" W=160. L=280. MSUB="SUB25"
MBENDR 9 10 ID="14" W=160. MSUB="SUB25"
DEF4P 1 2 3 4 ExtractedNetlist

```

Рис. 2. Список соединений эквивалентной схемы, полученный с помощью программного обеспечения ACE

помимо простого ввода схемы и прорисовки топологии от него требуется, чтобы в каждой из моделей все необходимые параметры (например, длины проводников, углы изгибов и т. д.) были заданы в строгом соответствии с рисунком топологии. Несмотря на то, что такой подход использует модели распределенных элементов (микрополосковые и полосковые линии, изгибы, неоднородности и т. д.), для анализа межсоединений в первом приближении здесь игнорируются паразитные связи и параметры. Если первичная оценка эффектов, связанных с наличием распределенных параметров, в данном случае достигается довольно легко, то поиск и описание всех пара-

зитных связей становится настоящим кошмаром, особенно с учетом того, что некоторые сегменты проводников могут быть добавлены на конечных этапах проектирования и коренным образом повлияют на полученные ранее результаты.

Другой подход заключается в том, что разработчики игнорируют этап описания схемы в виде распределенных элементов и все свое внимание обращают на топологию, справедливо полагая, что большое число ресурсоемких итераций EM моделирования позволит им получить качественный проект. При этом изначально делается допущение, что все металлизированные элементы топологии являют-

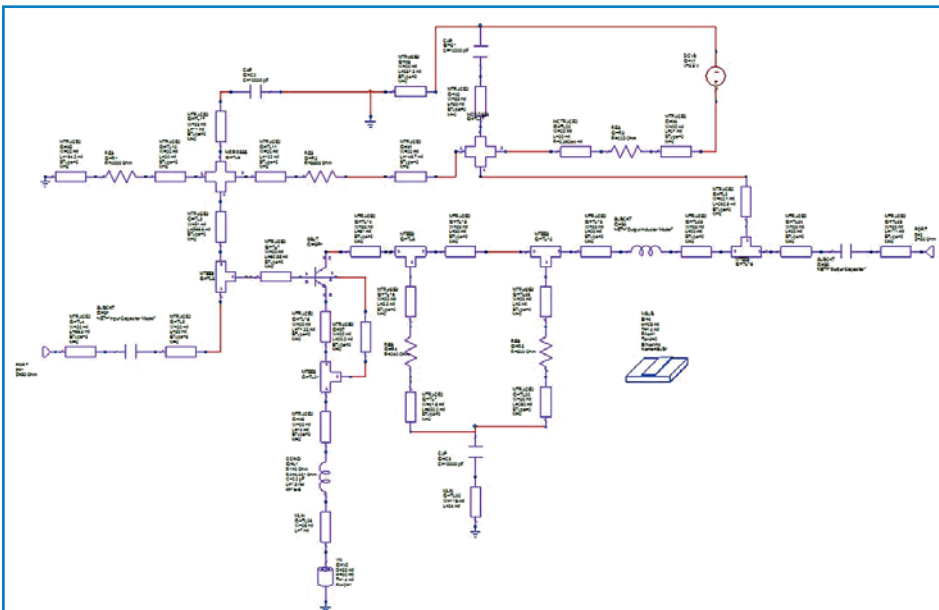


Рис. 3. СВЧ схема обычно включает в себя подробное описание проводников как элементов микрополосковых линий

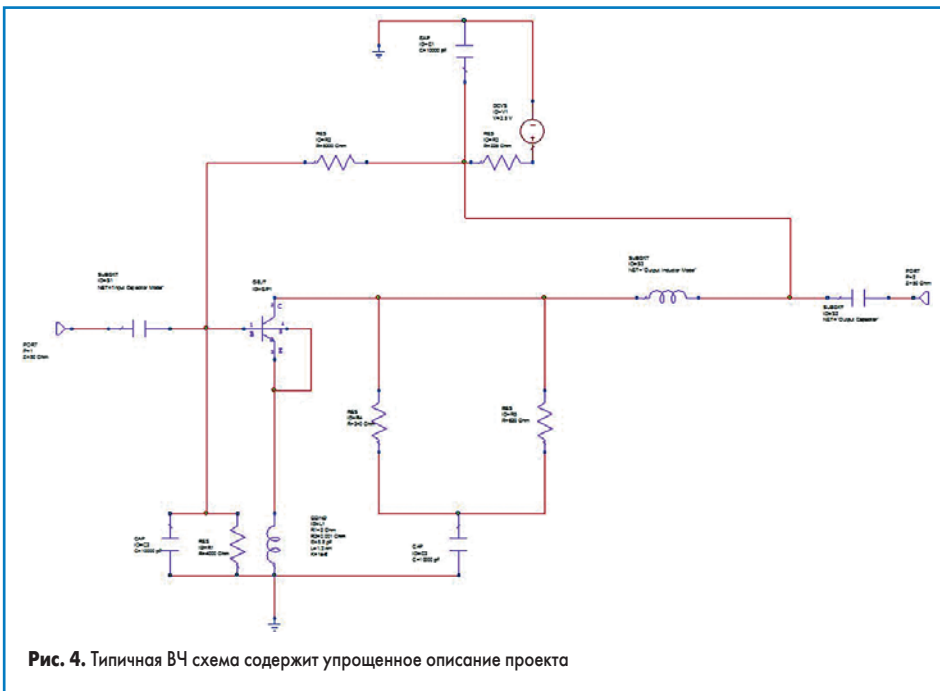


Рис. 4. Типичная ВЧ схема содержит упрощенное описание проекта

ся пассивными, а их паразитные параметры не изменяют функционирования схемы. Схематическая часть такого проекта в описании проводников не содержит моделей с распределенными параметрами (рис. 4). При таком подходе учитывается большее количество паразитных связей, а предварительный анализ занимает меньше времени, однако, полное исследование схемы требует обчета всей топологии с помощью универсального ЭМ вычислителя в конце цикла проектирования, что приводит к дополнительным затратам времени и ресурсов при внесении изменений в проект.

Как уже говорилось выше, представление схемы в виде СВЧ проекта предполагает подробное описание его в виде полосковых и микрополосковых элементов. Программное обеспечение AWR ACE существенно упрощает эту задачу, автоматизируя процесс описания проводников с учетом всех изгибов, дифференциальных связей и прочих неоднородностей.

Но даже в этом случае схематическое представление все еще остается загроможденным элементами, единственная задача которых — точное представление геометрии проводников. Нетрудно представить, что если в топологии будут присутствовать связанные элементы, то ее описание с использованием моделей связанных линий станет настолько сложным и запутанным, что разработчику будет трудно понять, где возникает та или иная связь.

Разработанная компанией AWR технология iNet призвана упростить и автоматизировать топологическую реализацию проводника, который на схеме отображается в виде простой линии связи. Пользователь выбирает «резиную» связь на топологии и начинает ее трассировать (рис. 5). При этом он просто щелкает на связи между двумя компонентами и начинает указывать характерные точки соединения вертикальных и горизонтальных сегментов проводника, а система автоматически отсле-

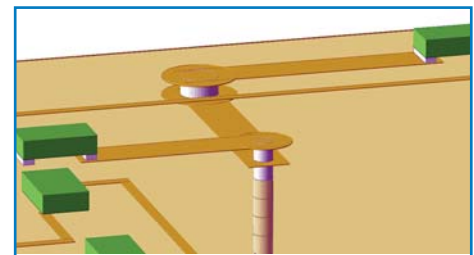


Рис. 6. Вид связи после трассировки топологии

живает его ширину. При переходе на другой слой к проводнику добавляются переходные отверстия (рис. 6).

Переходные отверстия генерируются с помощью параметрических ячеек, использующих специфические DRC настройки, ориентированные на конкретную технологию изготовления, будь то RFIC, MMIC, LTCC или обычные печатные платы. Обычно использование элементов iNet дает десятикратный выигрыш по времени по сравнению с подробным описанием топологии с помощью отдельных моделей линий, изгибов, пересечений и соединений, а также двукратный выигрыш по сравнению с ручной трассировкой проводников с добавлением переходных отверстий. ACE метод может быть применен как для отдельных линий (рис. 3), так и для всего проекта (рис. 7), а также для любого промежуточного варианта.

Другими словами, ACE технология может быть применена на любом этапе формирования схемы. Пользователю не надо дожидаться, когда схематическое и топологическое представление проекта будет полностью завершено. Небольшие отдельные части проекта, такие как сепараторы питания или линии управления, могут быть проанализированы отдельно и интегрированы с оставшимися большими частями проекта как законченные элементы. Все ACE структуры могут быть быстро промоделированы в процессе окончательной верификации проекта с помощью любого популярного ЭМ вычислителя общего на-

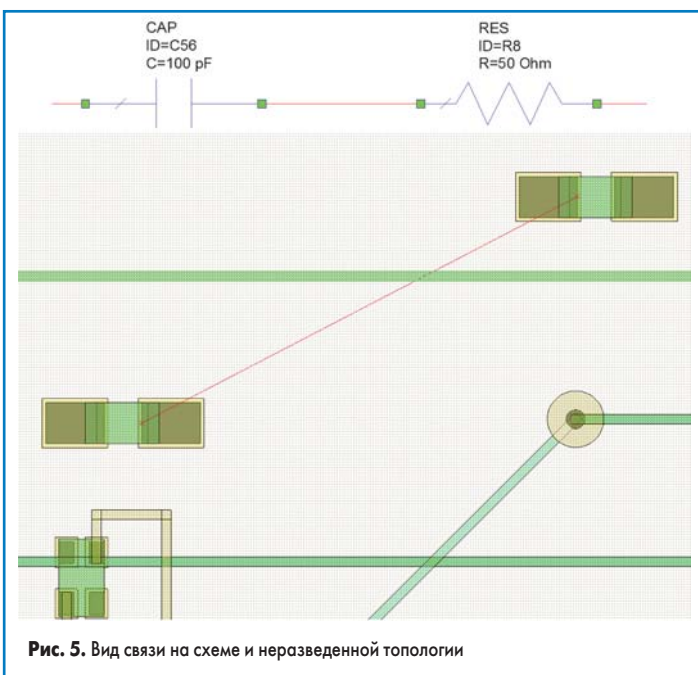


Рис. 5. Вид связи на схеме и неразведенной топологии

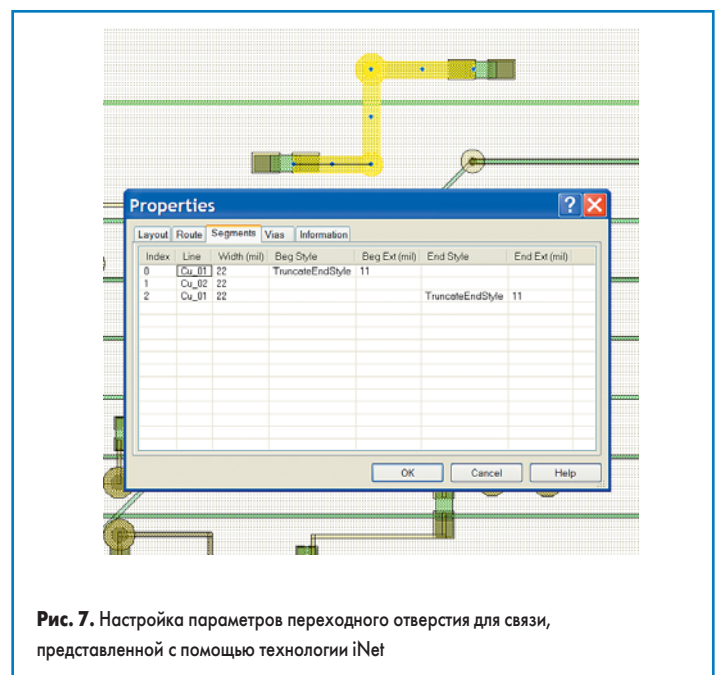


Рис. 7. Настройка параметров переходного отверстия для связи, представленной с помощью технологии iNet

значения, который может быть подключен к среде проектирования через интерфейс AWR EM Socket. Использование средств автоматизации iNet и открытого промышленного стандарта EM Socket значительно сокращают время работы над проектом, так как практически любой EM вычислитель может быть применен для проверки полученных с помощью ACE данных посредством нескольких щелчков кнопкой мыши.

Другим важным преимуществом технологии ACE является гибкость используемых моделей. Преобразование геометрической структуры в схему с соответствующими моделями в программном обеспечении ACE может быть выполнено по-разному с целью обеспечения должной точности и скорости вычислений. Технология работает максимально быстро, когда в проекте не используется ни одной модели, требующей применения встроенного EM вычислителя. В таком режиме используются традиционные аналитические модели микрополосковых и полосковых связанных линий.

Переход от аналитических к квазистатическим EM моделям позволяет повысить точность вычислений, но снижает скорость, так как в этом случае программа ACE обращается к специальному набору моделей, с помощью которого возможно моделирование практически любой конфигурации связанных микрополосковых линий. При этом используется встроенный квазистатический EM вычислитель, который решает 2D задачу в поперечном сечении на одной частоте, а затем масштабирует решение на весь диапазон частот. Технология ACE позволяет получить и еще более точное решение, но в этом случае будет использоваться разработанный AWR набор моделей, выполняющих решение методом конечных элементов (FEM) на каждой частоте диапазона.

Ряд геометрических структур может быть обработан более простыми методами. Например, места соединений проводников или неоднородностей могут быть легко описаны с помощью аналитических моделей. Если полученная точность недостаточна, то можно использовать разработанные AWR X-модели, которые добавляют в анализ схемы точность, доступную только EM методам. Такие модели получают посредством интерполяции таблиц данных, заранее полученных с помощью EM анализа указанной структуры для определенных значений ключевых параметров и типов диэлектриков.

Межслойные соединения тоже могут моделироваться разными способами. Можно использовать файлы S-параметров, полученные с помощью измерений или моделирования для каждого типа отверстий. Функция iNet поддерживает различные типы переходных отверстий для любой комбинации слоев, а программное обеспечение ACE четко распознает структуру и сопоставляет ей соответствующий набор S-параметров. С другой стороны, ACE технология позволяет использовать аналитические модели межслойных переходов, базирующихся на геометрических данных о форме контактных площадок, диа-

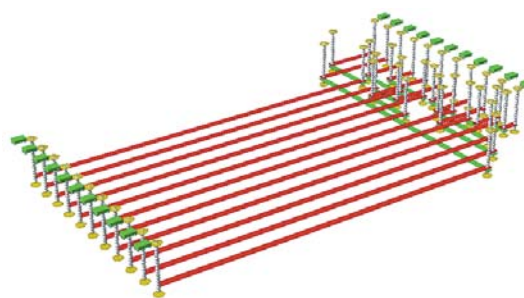


Рис. 8. Анализ данной структуры из 16 слоев FR-4 с помощью ACE технологии выполняется менее чем за 10 секунд

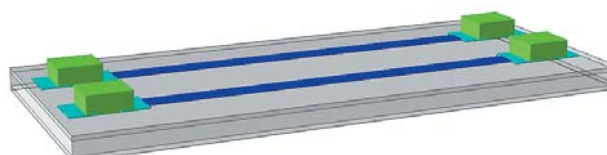


Рис. 9. Тестовая структура из двух связанных линий на четырехслойной плате

метре отверстия и конфигурации стека слоев. Если пользователь не задаст нужный набор S-параметров или аналитическую модель, то по умолчанию система будет использовать простую RLC модель.

При использовании наиболее точных EM моделей скорость работы программного обеспечения ACE растет по мере декомпозиции анализируемой EM структуры на отдельные элементы малого размера, для моделирования которых могут быть применены специализированные EM вычислители. В таком режиме технология ACE дает тысячекратный прирост скорости расчета по сравнению с традиционными EM программами моделирования общего назначения. Например, анализ относительно простой конфигурации параллельных проводников на шестнадцатислойной печатной плате из материала FR4, показанной на рис. 8, в 200 частотных точках с помощью 3D системы EM моделирования на основе метода моментов (МОМ) занимает 4 часа, а с помощью программного обеспечения ACE выполняется менее чем за 10 секунд.

Актуальность быстрой экстракции паразитных параметров, которая так полезна на ранних этапах проектирования, снижается по мере приближения проекта к завершению, где требуется повышенная точность моделирования. Так как программное обеспечение ACE использует модели распределенных элементов, обеспечивающих точность EM моделирования (интерполированные X-модели и EM модели со встроенными оптимизированными EM вычислителями), то оно может обеспечить точность, достаточную для использования на более высоких частотах, причем, на более поздних этапах проектирования. Так, погрешность моделирования структуры из связанных микрополосковых линий, показанной на рис. 9, не превышает 0,1% в диапазоне частот от 0 до 20 ГГц (рис. 10). Время анализа при этом не превышает нескольких секунд.

Какие типичные задачи могут быть решены с помощью технологии ACE? Прежде всего, использование технологии ACE может быть

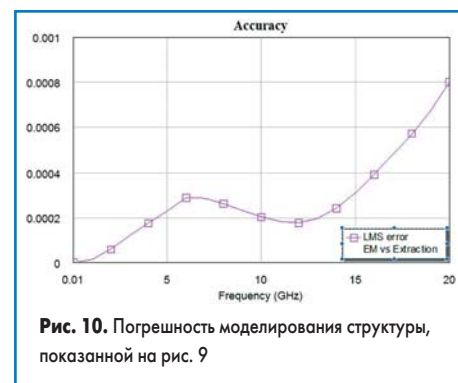


Рис. 10. Погрешность моделирования структуры, показанной на рис. 9

очень полезно при разработке топологий микросхем на основе кремния, арсенида галлия и др. Проекты, где топология не имеет (и не может иметь) изначального исчерпывающего описания всех паразитных связей, как на рис. 3, являются главными кандидатами на использование ACE технологии. Обычно схемотехники предпочитают такие методы описания проектов, где параметры элементов доминируют над параметрами связей между ними. Но на частотах выше 1 ГГц параметры межсоединений деградируют и начинают влиять как на характеристики отдельных элементов, так и на функционирование схемы в целом, а значит, они должны быть учтены задолго до окончательной верификации проекта.

Технология ACE позволяет принять во внимание все паразитные эффекты и быстро и точно промоделировать работу схемы с учетом топологической конфигурации всех соединений между элементами по мере их добавления. И такой метод является более перспективным, чем финальная верификация проекта с использованием огромных файлов S-параметров непосредственно перед генерацией масок. На рис. 11 показан пример межслойного перехода, в котором программное обеспечение ACE выявило две паразитные связи (рис. 12).

Жесткие требования к габаритам таких устройств, как усилители мощности или приемные тракты для мобильной аппаратуры связи, накладывают ограничения на configura-

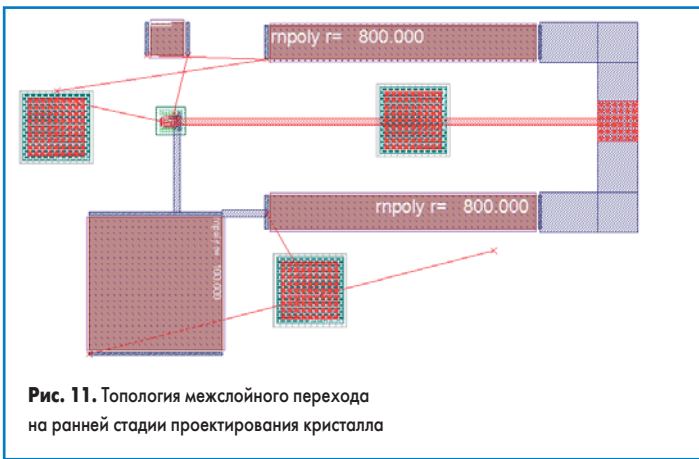


Рис. 11. Топология межслойного перехода на ранней стадии проектирования кристалла

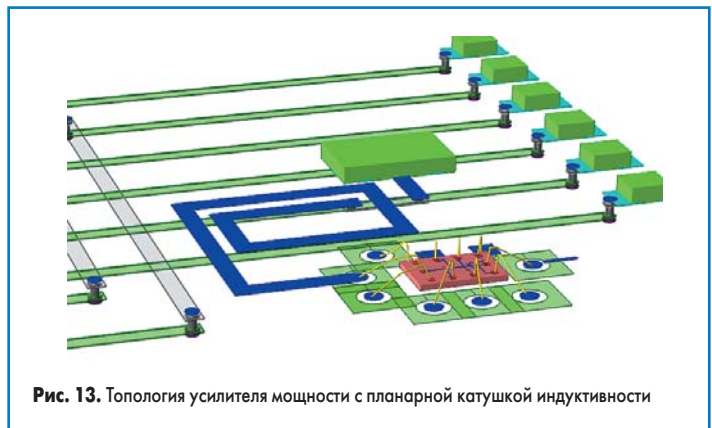


Рис. 13. Топология усилителя мощности с планарной катушкой индуктивности

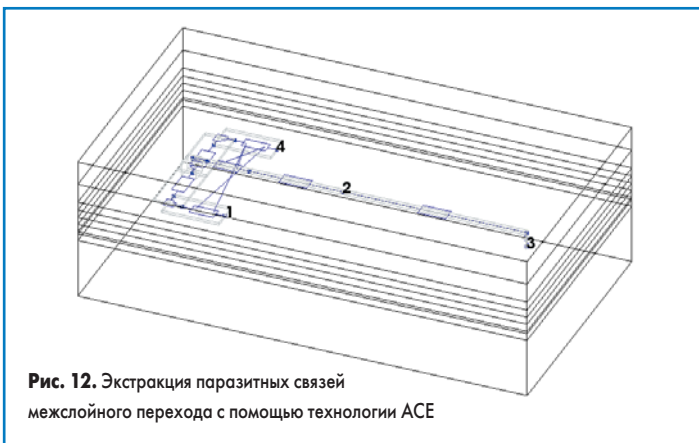


Рис. 12. Экстракция паразитных связей межслойного перехода с помощью технологии ACE

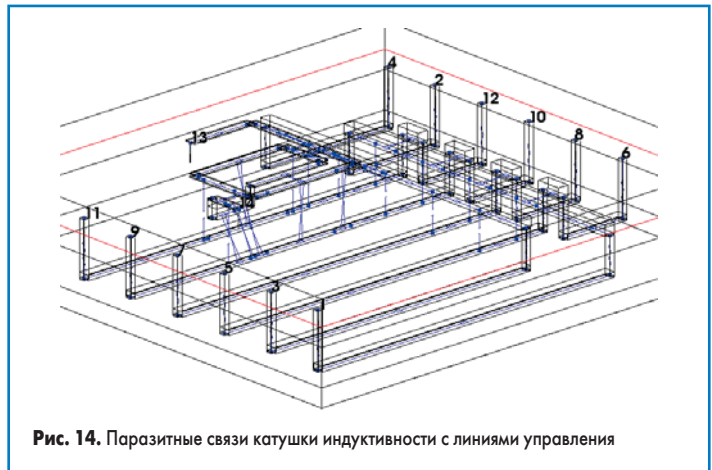


Рис. 14. Паразитные связи катушки индуктивности с линиями управления

цию проводников в топологии гибридных модулей. Здесь технология ACE почти идеально подходит для анализа комбинации связей между сигнальными трактами, линиями питания и управления. На рис. 13 показан пример усилителя мощности, соединение которого с ответвителем для наилучшего согласования должно иметь индуктивность порядка нескольких наногенри. Пользователь может разработать для этого соединения специальную ACE модель, оценить ее паразитные связи с расположенными по близости управляющи-

ми линиями (рис. 14) и позднее учесть их влияние на значение суммарной индуктивности (рис. 15).

Но самые большие преимущества от применения технологии ACE пользователи получают при разработке печатных плат. EM анализ многослойной печатной платы может быть крайне ресурсоемкой задачей, особенно когда в стеке слоев используются слои разной толщины из разных материалов с неодинаковым значением диэлектрической проницаемости. Технология ACE прекрасно справляется с данной за-

дачей и выдает быстрый, качественный и повторяемый результат. В показанном на рис. 16 примере шестнадцатислойной платы сигнальные проводники расположены на двух верхних слоях, а сразу под ними находится сплошной заземляющий слой металлизации, экранирующий их от линий управления, проложенных на слоях 14 и 15. Межслойные переходы реализованы с помощью сквозных, глухих и скрытых переходных отверстий. На рис. 17 показана частотная зависимость возвратных потерь входной цепи согласования при наличии заземляющего слоя и без него.

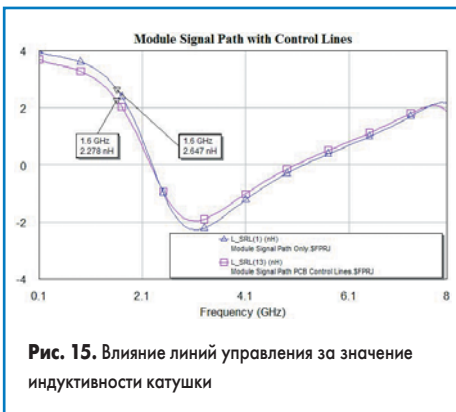


Рис. 15. Влияние линий управления на значение индуктивности катушки

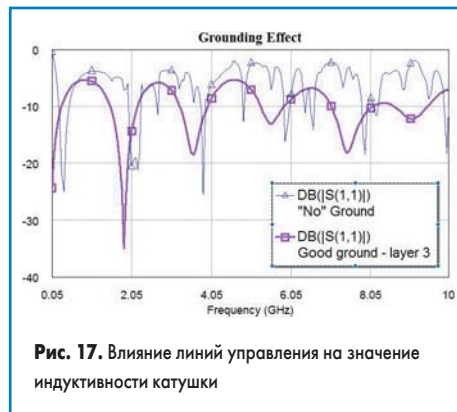


Рис. 17. Влияние линий управления на значение индуктивности катушки



Рис. 16. Пример экранировки сигнальных проводников с помощью внутреннего слоя металлизации

Заключение

В статье показаны основные возможности нового программного обеспечения AWR ACE, выполняющего автоматическую экстракцию паразитных параметров. Приведен ряд примеров того, как разработчики могут применять данную технологию для упрощения и оптимизации существующего цикла проектирования. Использование технологии ACE дает тысячекратный выигрыш в скорости анализа по сравнению с традиционными EM вычислителями общего назначения. Компания AWR в очередной раз подтвердила свои возможности по внедрению передовых вычислительных технологий в доступный EDA инструментарий, что позволило значительно повысить эффективность работы проектировщиков и сократить стоимость конечного продукта. Многолетний опыт работы компании в области моделирования СВЧ устройств оказался очень полезным при разработке высокоскоростных цифровых печатных плат.