

Методы электромагнитного моделирования в разработке радиочастотных интегральных схем

Джон Данн (Эль-Сегундо, Калифорния, США),
Владимир Литун (Москва, Россия)

Современные технологии проектирования радиочастотных интегральных схем (RFIC), реализованные в программном комплексе NI AWR Design Environment, предоставляют разработчикам широкий выбор разнообразных инструментов для проведения схемотехнического и электромагнитного анализа структуры, в том числе с учётом технологических особенностей производства, корпусирования, выполнения электрических контактов, а также использования компонентов поверхностного монтажа. Данная статья посвящена обзору доступных в программных продуктах NI AWR вычислительных методов для моделирования различных по функциональному назначению частей RFIC-структур, в том числе в рамках стандартного процесса разработки RFIC в Cadence.

ВВЕДЕНИЕ

Радиочастотные интегральные схемы (Radio Frequency Integrated Circuit, RFIC) содержат множество различных межсоединений и пассивных компонентов, вычисление характеристик каждого из которых при проектировании требует применения специализированных методов электромагнитного (ЭМ) анализа для получения точных результатов за приемлемое время. Так, цепь питания транзистора может рассматриваться как сложная система электрически коротких проводников, которые эффективнее всего анализировать квазистатическим методом для последующего вычисления величин эквивалентных паразитных компонентов схемы (экстракции паразитных компонентов). С другой стороны, электрически более длинные структуры, например, межкаскадные линии передачи, или распределённые компоненты на подложке (спиральные индуктивности и т.д.), требуют проведения полноволнового планарного (2.5D) или пространственного (3D) ЭМ-анализа для получения данных об их функционировании в составе устройства [1]. Более того, компоненты поверхностного монтажа (Flip-Chip, в BGA-корпусах или в бескорпусном исполнении с проволочными соединениями) могут быть корректно проанализированы только с помощью полноволновых 3D-методов ЭМ-анализа [2]. Обзор возможностей и особенностей различных методов

ЭМ-моделирования, доступных в NI AWR Design Environment, является основной целью данной статьи.

RFIC или MMIC

RFIC основаны на кремниевой или кремниево-германиевой (SiGe) технологии производства. Изначально они были разработаны для использования на рабочих частотах вплоть до СВЧ-диапазона. Плотность транзисторов в таких устройствах значительно выше по сравнению с монолитными интегральными схемами СВЧ-диапазона (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), которые основаны на полупроводниковых соединениях $A^{III}-B^V$ (например, арсенид галлия (GaAs) или нитрид галлия (GaN)). В силу предназначения для применения в вычислительных и коммуникационных системах, RFIC состоят из множества транзисторов, соединённых в сложную сеть большим числом очень коротких электрических линий, называемых «сетями».

Эти «сети» обычно моделируются с помощью дискретных сопротивлений и ёмкостей в квазистатическом приближении для выявления паразитных эффектов, которые ухудшают характеристики устройства и должны быть учтены на этапе проектирования. В ЭМ-моделировании под квазистатическим приближением понимают формулировку задачи с использованием уравнений, не содержащих произво-

дных по времени, даже если некоторые величины могут медленно изменяться во времени. В результате получается численная модель, которая применима для описания электрически малых структур, не вызывающих возбуждения электромагнитных волн. Такой метод позволяет разработчикам учитывать влияние паразитных компонентов на характеристики устройства в целом, обеспечивая ЭМ-анализ сложной топологии при использовании достаточно простых моделей на основе эквивалентных электрических цепей.

В MMIC, функционирующих в СВЧ- и более высокочастотных диапазонах, напротив, электрические длины связей чаще всего превышают пренебрежимо малую величину. Поэтому для анализа их характеристик требуется применение полноволновых ЭМ-методов. Поскольку непосредственно элементы топологии и являются ключевой составляющей разработки MMIC, с самого начала в процессе проектирования требуется обеспечение точности вычисления их характеристик. Для анализа пассивных компонентов и межсоединений в MMIC, в первом приближении моделировавшихся в соответствии с теорией длинных линий, удобно применять ЭМ-анализ на основе планарной (2.5D) модификации метода моментов (Method of Moments, MoM), которая позволяет проводить расчёт для достаточно сложных и многокомпонентных структур. Данная технология всё глубже интегрируется в инструменты разработки устройств радиочастотного и СВЧ-диапазонов. Например, недавние обновления встроенного в программный комплекс NI AWR инструмента моделирования AXIEM обеспечивают возможность анализа больших структур со скоростью, позволяющей проводить ЭМ-моделирование топологии MMIC полностью и непосредственно в среде разработки NI AWR Design Environment, а именно, при схемном моделировании в Microwave Office.

ОДНА ПЛАТФОРМА, БЕЗ ПРЕГРАД.

Простота гениальна

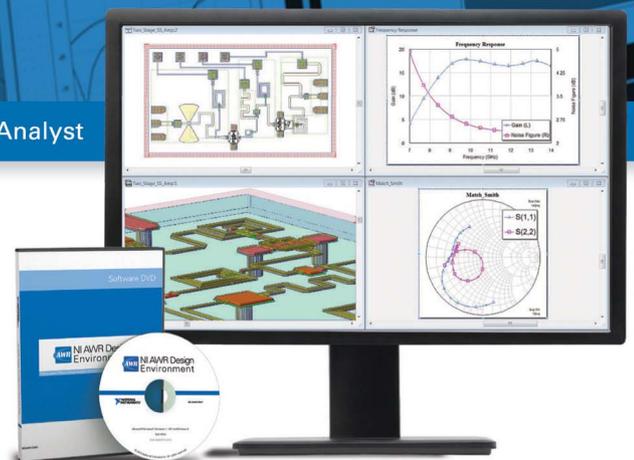
NI AWR DESIGN ENVIRONMENT

NI AWR Design Environment™ – это единая платформа, объединяющая системный, схемотехнический и электромагнитный анализ, для разработки продвинутых современных беспроводных систем: от базовых станций и мобильных телефонов до систем спутниковой связи. Интуитивно понятный пользовательский интерфейс, проверенные технологии симуляции и доступная архитектура с поддержкой сторонних решений – всё это устраняет преграды на пути к вашей успешной разработке! Проектирование стало гениально проще.

Более подробно см. на awr.com/ru

Microwave Office | Visual System Simulator | Analog Office | AXIEM | Analyst

Реклама



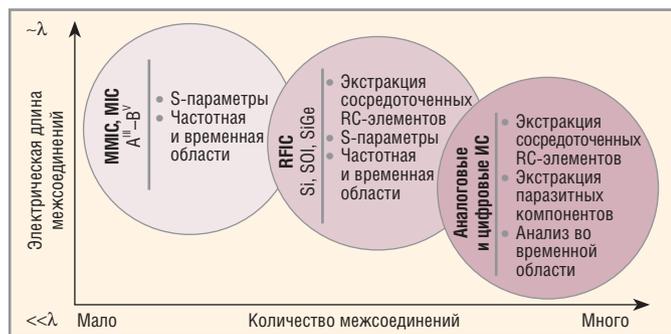


Рис. 1. Классификация требований к моделированию по типам устройств и их основным особенностям

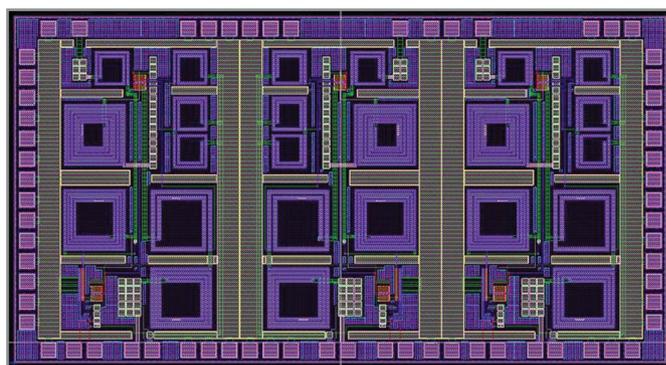


Рис. 2. Топология трёхканального RFIC-приёмника

Современные конструкции RFIC совмещают структуры MMIC и аналоговых интегральных схем для достижения высокой плотности упаковки и функциональности в СВЧ- и мм-диапазонах волн для применения в аэрокосмическом и телекоммуникационном приборостроении. Типичная RFIC содержит ряд структур, требующих анализа электрических характеристик: от относительно больших спиральных индуктивностей до крайне малых, плотно упакованных межсоединений. В зависимости от электрической длины, не все критичные части топологии могут быть корректно смоделированы путём экстракции паразитных компонентов, что требует от разработчика применения методов полноволнового ЭМ-анализа. В таблице приведены различные распространённые методы ЭМ-анализа, позволяющие создавать основанную на топологии модель, а также некоторые обобщённые характеристики этих методов.

ВЫБОР МЕТОДА АНАЛИЗА ПО ТРЕБОВАНИЯМ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

Требования к моделированию интегральных схем определяются электрическим размером структур в их составе (отношением физических длин

токовых путей к длине волны сигнала на рабочей частоте), как показано на рисунке 1.

В отличие от квазистатического приближения, распределённые модели, получаемые на основе полноволнового ЭМ-анализа, используются для СВЧ-схем (область MMIC на рисунке 1), в которых межсоединения обладают значимыми электрическими длинами, что требует учитывать фазовые задержки и явления, связанные с протяжённостью линии связи. Моделирование MMIC целиком – это посильная задача для такого инструмента численного анализа, как AXIEM. Он способен отыскивать решение для систем со 100 000 неизвестных и более за время в несколько десятков минут для каждой частотной точки, используя технику быстрых вычислений. Наиболее часто применяемые для моделирования радиочастотных и СВЧ-цепей программы полноволнового ЭМ-анализа используют матрицы рассеяния (S-параметры) для представления распределённых межсоединений и пассивных компонентов в частотной области.

Требования к ЭМ-анализу и моделированию при разработке RFIC являются промежуточными между MMIC ($A^{III}-B^V$) и аналоговыми интегральными схемами на основе кремния

(см. рис. 1). Одной из трудностей процесса их проектирования является применение подходящих алгоритмов ЭМ-моделирования для интегральных схем на основе различных техпроцессов, с использованием экстракции паразитных компонентов для межсоединений активных компонентов и инструментов полноволнового анализа для индуктивностей и прочих развитых структур.

Ещё одну сложность представляет разделение общей модели RFIC на области с использованием различных вычислительных методов для их анализа. К примеру, на рисунке 2 приведена топология трёхканального RFIC-приёмника со спиральными индуктивностями, требующими проведения полноволнового моделирования с помощью 2.5D-анализа планарной модификацией метода моментов в AXIEM или 3D-анализа методом конечных элементов в Analyst.

В подобном случае разработчик может пойти по одному из трёх путей:

- моделировать каждую из согласующих индуктивностей обособленно;
- моделировать их вместе в одном канале;
- моделировать все каналы в общей структуре.

Выбранный способ значительно повлияет на скорость ЭМ-анализа и, возможно, но не обязательно, на общую точность расчёта, в зависимости от степени взаимовлияния отдельных компонентов.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭМ-АНАЛИЗА
Экстракция паразитных компонентов

При использовании классической экстракции паразитных компонентов, на основе реализуемой топологии электрической цепи при помощи квазистатических методов ЭМ-анализа

Методы ЭМ-анализа в разработке интегральных схем

Метод моделирования	Скорость моделирования	Требования по объёму памяти	Характеристики
Экстракция паразитных компонентов	Самая высокая	Низкие/средние	Анализ R, C и L и переходных процессов
Квазистатическая модель	Очень высокая	Низкие	Анализ линии передачи по поперечному сечению
Квазистатическое приближение метода моментов	Высокая	Низкие/средние	Анализ электрически малых структур
Метод моментов (полноволновой)	Средняя	Средние	Планарный метод (2.5D), расчёт токов боковых стенок, сетка разбиения только для проводников
Метод конечных элементов (полноволновой)	Низкая	Средние	Анализ произвольных структур (3D), разбиение объёма задачи



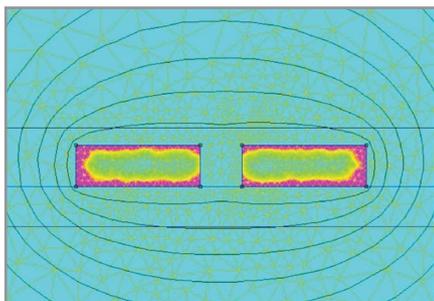


Рис. 4. Применение квазистатического алгоритма 2D-анализа поперечного сечения проводников

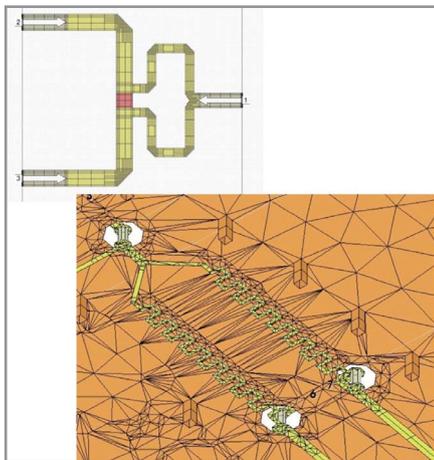


Рис. 5. Разбиение проводников для анализа методом моментов

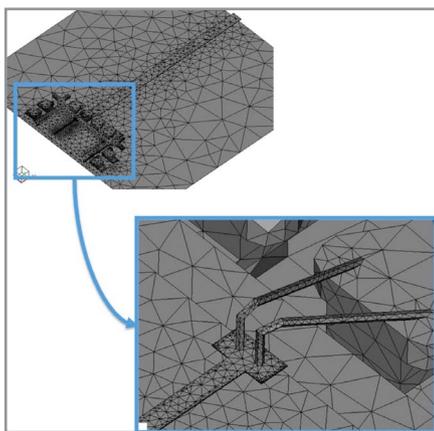


Рис. 6. Объёмное разбиение структур с произвольной геометрией для ЭМ-анализа методом конечных элементов

Упрощённая форма этого алгоритма используется в ранее рассмотренном методе экстракции паразитных компонентов при формировании матрицы статических ёмкостей. Более сложная версия (см. рис. 4) включает в себя также частотно-зависимые параметры (например, учитываются потери в кремниевой подложке) и используется в некоторых встроенных в NI AWR Design Environment моделях линий передачи на кремниевой подложке. Дан-

ный метод работает быстро и незаметно для пользователя. Разумеется, разработчик по-прежнему может вручную провести анализ межсоединения как отрезка линии передачи или использовать ACE для экстракции модели. Алгоритм анализа линии передачи в поперечном сечении гарантирует точность её модели, но лишь при условии правильности исходных данных.

Метод моментов (планарная модификация, 2.5D)

Метод моментов обеспечивает отыскание решения в частотной области при наложении сетки разбиения только на проводящие элементы конструкции и при использовании функций Грина для учёта взаимного влияния токов на них (см. рис. 5). В процессе проектирования RFIC метод моментов обычно используется для анализа распределённых линий и их межслойных переходов, где особенно важно определение фазовой задержки. К числу подобных структур относятся, например, индуктивности, разветвления, неоднородности и участки длинных линий между активными компонентами.

При использовании метода моментов для расчёта топологии на кремниевой подложке необходимо учитывать использование в RFIC алюминия в качестве материала металлизации для верхнего слоя. Обычно вычислительные алгоритмы на основе метода моментов учитывают потери, используя импедансные граничные условия на поверхности металлического проводника с конечной проводимостью. При этом не проводится расчёт распределения токов внутри проводника, что может приводить к неточностям при анализе сопротивления. Этот недостаток существенен при точном вычислении добротности спиральных индуктивностей [4]. Вследствие этого, анализ добротности необходимо проводить при помощи полноволнового 3D ЭМ-моделирования, например, в Analyst, который за счёт разбиения внутреннего объёма проводника обеспечит более точный результат.

Метод конечных элементов (3D)

В Analyst используется полноволновой вычислительный алгоритм на основе метода конечных элементов (Finite Element Method, FEM), отыскивающий решения уравнений Максвелла для моделей с объёмным (3D) разбиением (см. рис. 6).

Analyst может работать со структурой произвольной геометрии (например, проволочными соединениями), однако его вычислительный аппарат является наиболее ресурсоёмким и требует большего времени по сравнению с другими методами ЭМ-анализа, приведёнными в данной статье.

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ ЭМ-АНАЛИЗА В СРЕДСТВА РАЗРАБОТКИ

С учётом сложности проектирования RFIC, ЭМ-анализ наиболее эффективен при условии его плотной интегрированности в процесс разработки, который включает схемотехническое моделирование, оптимизацию, анализ выхода годных и поддержку технологических библиотек (PDK). Разработчикам, применяющим различные методы ЭМ-анализа для создания модели, необходима возможность легко переключаться между ними и сравнивать получаемые результаты для определения наиболее подходящего алгоритма для работы с конкретной структурой. Для перебора различных вариантов моделей на основе методов, рассмотренных ранее, в Microwave Office предусмотрена функция Switch Lists, заменяющая в общей схеме один тип модели другим.

Поддержка различных методов ЭМ-анализа в одном проекте необходима для полномасштабного моделирования гетерогенных RFIC-структур без необходимости импорта ЭМ-моделей из сторонних программ. Например, NI AWR Design Environment поддерживает совместный анализ схемы в Microwave Office (или Analog Office) с обрабатываемыми в Analyst BGA-выводами, промоделированными в AXIEM спиральными индуктивностями и сложной цепью питания транзистора, рассчитанной при помощи ACE.

СОВМЕСТНОЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭМ-МОДЕЛИРОВАНИЕ

Встраивание ЭМ-анализа топологии в иерархическую схему, объединяющую модели всех значимых структур RFIC с остальными активными и пассивными компонентами, обеспечит существенное повышение точности расчёта для проверки правильности проектных решений [5]. На рисунке 7 показана общая конструкция RFIC, активные компоненты которой объединены с ЭМ-моделью тополо-

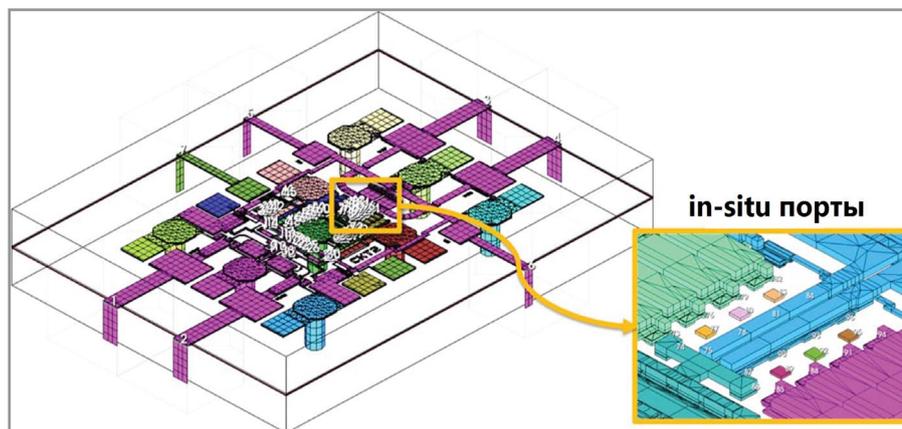


Рис. 7. Моделирования топологии интегральной схемы с внутренними портами

гии при помощи In-Situ-портов. Такая организация схемы и её анализ возможны благодаря специальным внутренним портам и функционалу AXIEM по исключению их паразитного влияния. Специальные калибровочные линии служат для устранения неестественного взаимовлияния моделируемого порта и ближайших элементов топологии (De-Embedding) [6].

Для точного совместного схемотехнического и ЭМ-анализа необходимы определённые возможности соответствующих алгоритмов. Моделирование схем в случае RFIC часто проводится во временной и частотной областях. В Microwave Office анализ переходных процессов в цепях проводится во временной области, в то время как анализ в частотной области применяется для исследований в режиме большого сигнала с использованием метода гармонического баланса. Получение точных результатов в этом случае требует наличия данных об импедансе цепи на всех выводах транзистора в широкой полосе частот, в том числе на постоянном токе, частоте сигнала и частотах гармоник. Некорректно определённый импеданс на постоянном токе приводит к несоответствующему выбору смещения транзистора, а неправильно заданные нагрузки для гармонических составляющих оказывают влияние на характеристики транзистора в полосе частот. Некорректные значения импеданса на постоянном токе чаще всего получаются в случае ошибочной экстраполяции S-параметров в точку $f=0$ (см. рис. 8).

Некоторые методы ЭМ-анализа, такие как метод конечных элементов, не лучшим образом подходят для вычисления импеданса на постоянном токе и в области низких частот. По этой причине в Analyst нижним пределом для моделирования является частота

10 МГц, в то время как в AXIEM встроен специальный алгоритм расчёта на низких частотах, что позволяет применять его в задачах моделирования даже на постоянном токе. Для экстракции паразитных компонентов на постоянном токе разработчик может использовать AXIEM, ACE или стороннюю программу ЭМ-анализа, которую можно подключить при помощи интерфейса EM Socket. Доступность и гибкость при использовании различных методов моделирования позволяют разработчикам RFIC работать с большим количеством разнообразных структур, используя модели, которые обеспечивают точные результаты вычислений.

Применение ЭМ-анализа обладает некоторым преимуществом над экспериментальными исследованиями, а заключается оно в большей гибкости при выборе отсчётной плоскости (задании измерительного порта), что во время практических измерений возможно с ограничениями при использовании векторного анализатора цепей. Однако обеспечение достоверности интерпретации результатов и калибровочное исключение RFIC-структур могут быть затруднены при увеличении в модели количества портов из-за необходимости учёта их близкого расположения друг к другу. Это приводит к ухудшению развязки между ними и увеличению ошибок моделирования. Корректное определение опорной «земли» также является важным фактором, позволяющим избежать различий между результатами моделирования и экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день для моделирования широкого ряда различных структур и вариантов их корпусирования при проектировании RFIC доступно

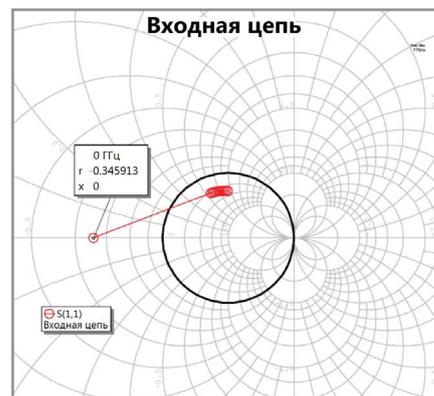


Рис. 8. Данные о входном импедансе цепи для моделирования в режиме большого сигнала

множество методов ЭМ-анализа. Разработчикам следует знать, какие из них наилучшим образом подходят для моделирования конкретных топологий, учитывая соотношение скорости и точности расчёта. NI AWR Design Environment, благодаря собственным широким вычислительным возможностям и встроенному интерфейсу EM Socket, является перспективной платформой для интеграции различных методов ЭМ-анализа и совместного моделирования в Microwave Office. Таким образом, NI AWR Design Environment позволяет разработчикам использовать возможности моделирования AXIEM, Analyst и ACE или алгоритмов сторонних разработчиков для эффективного управления процессом проектирования RFIC, построенного на основе ЭМ-анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dunn J.* Interconnect Modeling and Simulation for RFIC Design. RF Globalnet. February. 2007.
2. *Carroll J. M., Dunn J.* Electromagnetic Simulation Challenges in RFIC Design. IEEE 16th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF). Austin, TX. 2016.
3. *Heimlich M.* Circuit Extraction Techniques Provide Faster Interconnect Modeling and Analysis. High Frequency Electronics. Vol. 6. No. 6. June 2007.
4. *Dunn J., Veremey V.* Accurate Q Prediction for RFIC Spiral Inductors Using Planar EM Solvers. 41st European Microwave Conference. Manchester. 2011.
5. *Hartung J.* Interoperability Enables a Complete RFIC/Package/Board Co-Design Flow. Microwave Journal. July. 2014.
6. *Rautio J. C.* Perfectly Calibrated Internal Ports in EM Analysis of Planar Circuits. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Atlanta, GA. 2008.

