

Декомпозиция решения с использованием различных методов электродинамического анализа при проектировании составных СВЧ-систем

Владимир ЛИТУН
Роман СЕМЕРНЯ

В статье на практическом примере показаны возможности современных систем автоматизированного проектирования микроволновых узлов и систем по декомпозиции решения составных частей модели средствами наиболее подходящих вычислительных методов. Продемонстрированы качественные преимущества применения разных модулей NI AWR DE, а именно — AXIEM и Analyst, для декомпозиции плоско-слоистых узлов и структур с произвольной геометрией в рамках одной системы, с последующим объединением результатов на схемно-блочном уровне.

Разработка современных радиоэлектронных устройств СВЧ-диапазона волн сопряжена с необходимостью коммутации множества составных частей, выполняющих ряд специализированных функций. В единую систему, как правило, входят узлы, реализованные с использованием различных технологий, причем, многие из них не имеют стандартных и не зависящих от условий ближайшего окружения разъемов для подключения (например, коаксиальных или волноводных выходов). Особенно актуален данный аспект для портативных устройств и систем с максимально плотной компоновкой. Предельным случаем являются системы на кристалле (System-on-a-Chip, SoC), в которых межсоединения полностью интегрированы в общую структуру и не отличаются разнообразием исполнения. При разработке многокомпонентных СВЧ-узлов и систем перед разработчиками встает проблема не только обеспечения требуемых характеристик отдельно взятых составляющих частей, но и корректный учет технологии и особенностей их соединения друг с другом или с топологией основной печатной платы [1, 2].

В отношении функционально завершенных узлов можно отдельно остановиться на методах анализа при проектировании активных и управляемых узлов и систем, включая SoC, содержащих нелинейные элементы. Тракты сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), основанных на соединениях $A^{III}-B^V$, и радиочастотных интегральных схем (Radio

Frequency Integrated Circuit, RFIC), основанных на SiGe-технологии, могут быть проанализированы с использованием различных методов вычислительной электродинамики, как в строгом виде, так и в квазистатическом приближении [3].

Для проектирования пассивных элементов тракта в большей степени подходят технологии на основе многослойных планарных структур, ввиду меньших вносимых потерь по сравнению с интегральными схемами. К ним относятся технологии печатных плат (Printed Circuit Board, PCB) и низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (Low Temperature Co-Fired Ceramics, LTCC). Последняя стала доступна разработчикам относительно недавно, но уже прочно заняла свои позиции благодаря обеспечению высокой точности топологии, повторяемости изделий, возможностям задействовать большое количество слоев и использовать достаточно тонкие диэлектрические подложки [2, 4]. LTCC-чип может как сам устанавливаться на печатную плату, так и быть использован для размещения на нем элементов поверхностного монтажа, MMIC- или RFIC-чипов. Анализ электрических характеристик многослойных PCB- и LTCC-структур достаточно точно может быть проведен с применением и квазистатического, и полноволнового приближения [5]. Конкретный выбор зависит от характерных размеров структуры, ее сложности, а также диапазона частот. Для наиболее корректного моделирования в СВЧ- и мм-диапазонах волн, рекомендуется применять полноволновой анализ. С учетом особенностей плоско-слоистых структур

наиболее производительным для таких задач среди строгих видится метод моментов (Method of Moments, MoM).

Подключение отдельных функциональных СВЧ-узлов на общую плату может производиться как с использованием стандартных выводов на корпусах (SMT, BGA и др.), так и специализированных выводов-ламель или нестандартных корпусных выходов под пайку, а также проволочных разварок [2]. Все эти варианты требуют проведения полноволнового электродинамического анализа для максимально точного учета влияния мест переходов и соединений на итоговые электрические характеристики системы [3], хотя в некоторых случаях возможно применение инженерных соотношений для подобной оценки [1]. Анализ структур с произвольной геометрией в частотной области может быть обеспечен средствами метода конечных элементов (Finite Element Method, FEM), который обладает возможностями для работы с геометрически сложными и резонансными структурами, а также развитым встроенным функционалом адаптации сетки разбиения для проверки сходимости решения.

Таким образом, для разработчика СВЧ-систем, включающих узлы различного типа, элементы поверхностного монтажа и плату (или же LTCC-структуру) для их коммутации, крайне желательно иметь возможность выбора наиболее подходящего метода анализа для всех составляющих, чтобы обеспечивать лучшую точность и производительность вычислений. Единый интерфейс разработки National Instruments AWR Design Environment (NI AWR DE) обеспечивает данный функцио-

нал и позволяет комбинировать в едином проекте модели различного типа, включая как электродинамические, так и блочно-схемные.

В настоящей статье представлены результаты практической реализации декомпозиционного подхода при проектировании составного СВЧ-узла в среде NI AWR DE на примере LTCC-фильтра нижних частот (LTCC-ФНЧ) с переходом на основную печатную плату.

Декомпозиция областей решения

Основной сложностью при проектировании функциональных СВЧ-узлов для последующего монтажа на общую печатную плату или иную коммутационную структуру является корректный учет типа и особенностей мест соединения, поскольку, в отличие от радиочастотного диапазона, на более высоких частотах они могут оказать значительное влияние на качество итоговых характеристик системы.

В первом приближении, при оценочной проработке на уровне блочно-схемной модели, характеристики межслойных переходов, проводочных и ленточных разварок, а также ряда планарных элементов и неоднородностей, могут быть определены посредством инженерных соотношений [1]. К сожалению, данный подход обладает большой погрешностью результатов при плотной упаковке неоднородностей (малого расстояния между ними), достаточно толстых подложек и высоких частот анализа. В случае же межсоединений со сложной собственной геометрией (например BGA или нестандартные выводы) корректных инженерных соотношений может попросту не быть. Тогда требуется учитывать места перехода с тракта общей платы на тракт узла посредством строгого полноволнового численного анализа.

При разработке узла, собственная структура которого позволяет эффективно проводить моделирование вместе с основной платой и областью перехода, создание отдельных разрозненных моделей (декомпозиция решения) является избыточным. Пример — фильтр с керамическими коаксиальными резонаторами, который совместно с геометрически сложным выводом для монтажа на печатную плату эффективно может быть проанализирован с использованием FEM.

Иная ситуация, как уже было отмечено выше, соответствует соединению различных полосковых СВЧ-устройств. Для плоско-слоистых структур МоМ является более производительным методом электродинамического анализа в сравнении с FEM. Таким образом, для RFIC, MMIC, LTCC-структур или отдельных монтируемых РСВ-узлов со сложной внутренней многослойной структурой, выгодно проводить декомпозицию модели с разделением расчетных областей МоМ и FEM в районе места перехода между трактами чипа и основной платы. Поэтому далее в качестве практического примера будет рассмотрен процесс анализа многослойного LTCC-ФНЧ с переходами на печатную плату.

Пример анализа устройства с декомпозицией областей решения

Рассмотрим задачу разработки LTCC-ФНЧ с потерями не более 1 дБ вплоть до частоты 3 ГГц, амплитудой коэффициента отражений в полосе пропускания не выше -17 дБ и полосой задержания 4,5–6 ГГц с подавлением не менее 40 дБ. Данные требования могут быть удовлетворены с использованием эллиптического ФНЧ, обеспечивающего минимальное количество звеньев. Схема фильтра показана на рис. 1, а соответствующая многослойная топология — на рис. 2. При реализации использована LTCC-структура с восемью диэлектрическими слоями. Конструкции такого типа достаточно популярны для решения подобных задач [6–8].

Представленная LTCC-структура построена на основе подложек Ferro L8 [9] ($\epsilon_r = 7,3$, $\text{tg}\delta = 0,003$) с толщиной 254 мкм, которые во время обработки дают усадку до 208 мкм.

С помощью NI AWR DE возможно проводить анализ электрических характеристик данного фильтра посредством МоМ в модуле AXIEM или же FEM в Analyst. Сетки разбиения для обоих случаев представлены на рис. 3 (AXIEM) и рис. 4 (Analyst).

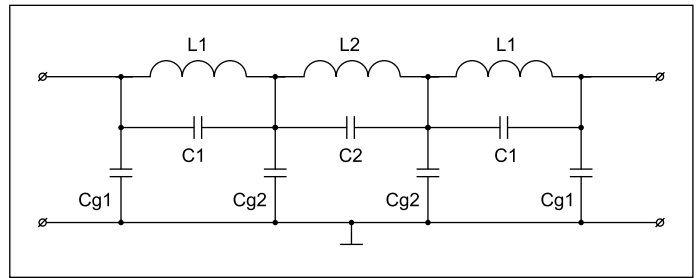


Рис. 1. Схема эллиптического ФНЧ 7-го порядка

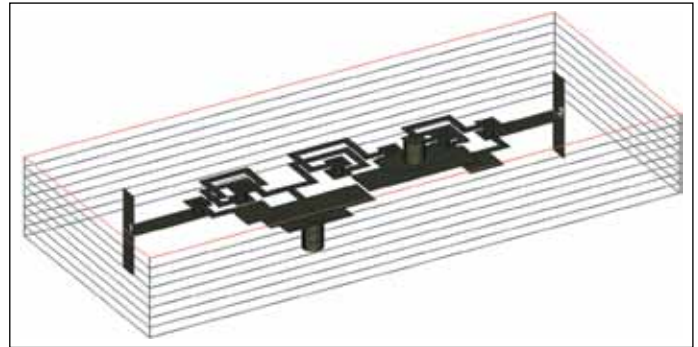


Рис. 2. Многослойная топология эллиптического ФНЧ на основе LTCC-структуры

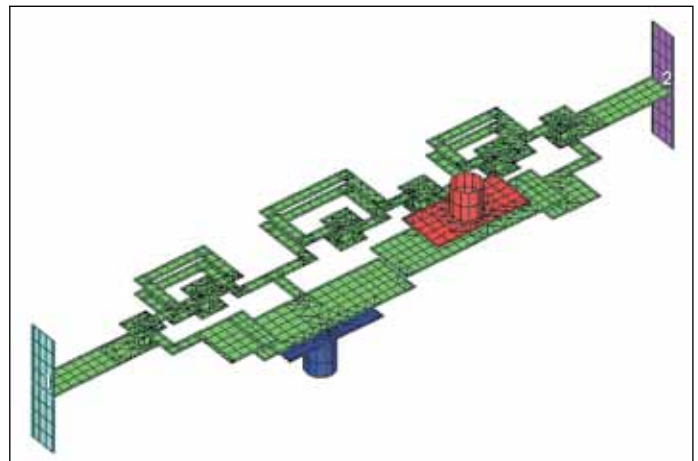


Рис. 3. Сетка разбиения модели фильтра в AXIEM

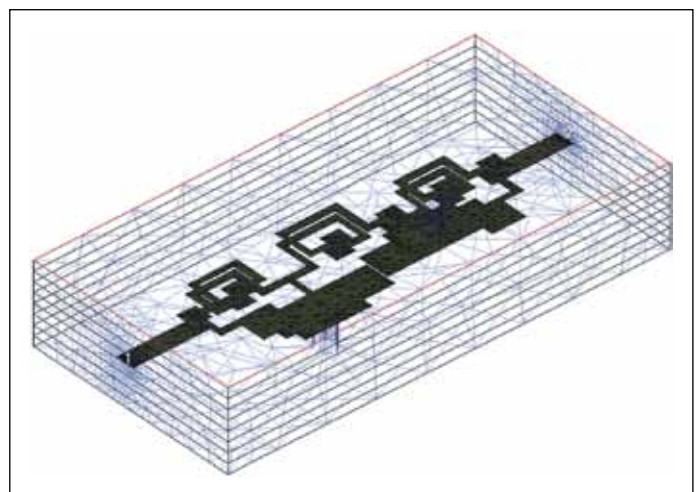


Рис. 4. Сетка разбиения модели фильтра в Analyst (межслойные переходы скрыты)

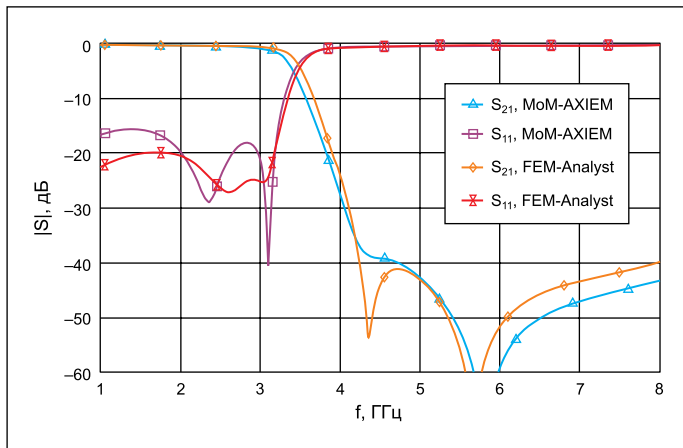


Рис. 5. Амплитуды коэффициентов матрицы рассеяния LTCC-ФНЧ в AXIEM и Analyst

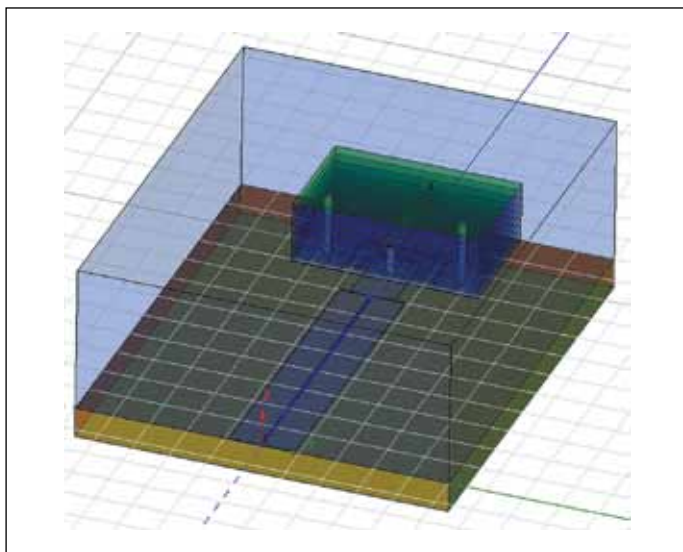


Рис. 6. Модель перехода между LTCC-чипом и печатной платой в 3D-редакторе NI AWR DE

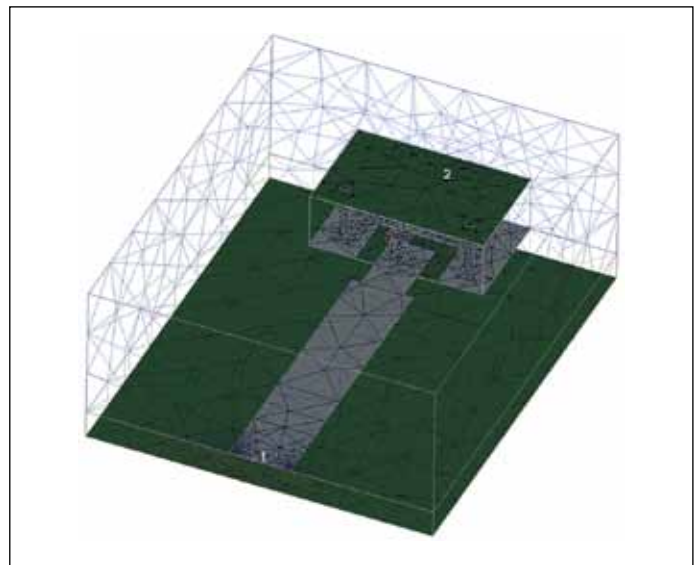


Рис. 7. Сетка разбиения перехода между LTCC-чипом и печатной платой в Analyst

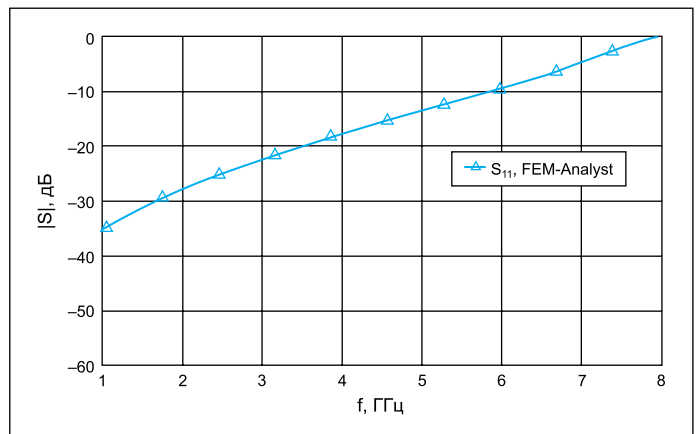


Рис. 8. Амплитуда коэффициента отражений перехода между LTCC-чипом и печатной платой

В обоих случаях применена методика дополнения анализируемой структуры регулярными отрезками линий для снижения ее влияния на порты возбуждения с их последующим учетом при постобработке (de-embedding). Для модели МоМ использованы сосредоточенные порты, закороченные на верхний и нижний экранные слои одновременно, а для FEM — волноводные, поскольку в данном случае только они позволяют проводить de-embedding. В Analyst итерационная проверка сходимости решения и уплотнение сетки проводилось по результатам анализа на частоте 3 ГГц, поскольку она близка к верхней границе полосы пропускания. Критерий сходимости выбран по условию повторяемости амплитуд элементов матрицы рассеяния с разницей не более 0,01 на двух последовательных итерациях. В AXIEM сетка дополнительно уплотнена на кромках полосковых линий для более точной аппроксимации распределения тока. Вычисление характеристик моделей выполнено в полосе частот от 1 до 8 ГГц на 141 точке с использова-

нием алгоритма интерполяции результатов (Advanced Frequency Sweep, AFS), позволяющего минимизировать объем расчетов. Некоторые параметры и численные результаты моделирования, такие как количество ячеек разбиения, длительность вычислений и др., приведены в таблице. Результаты полученных частотных зависимостей амплитуд коэффициентов отражения (S_{11}) и прохождения (S_{21}) представлены на рис. 5.

Представленные результаты подтверждают большую вычислительную емкость FEM-моделей для многослойных полосковых структур со сложной внутренней структурой по сравнению с МоМ. Итоговые зависимости имеют некоторые отличия, которые, скорее всего, обусловлены разницей способов задания портов возбуждения и, соответственно, вычислением их характеристических сопротивлений. Поскольку целью данной статьи не является подробное исследование моделирования портов в различных модулях NI AWR DE, подробный анализ данного эффекта проводиться не будет, тем более ввиду

того, что в основном характер и особенности результирующих зависимостей близки.

Для анализа перехода на печатную плату, основанную на подложке Rogers Ro4003c [10] толщиной 813 мкм, использован модуль Analyst. Среда NI AWR DE позволяет строить структуры с произвольной геометрией элементов в специальном 3D-редакторе (рис. 6). Сетка разбиения модели после уплотнения до достижения сходимости результатов показана на рис. 7.

Результирующий коэффициент отражения от перехода показан на рис. 8. Как видно,

Таблица. Параметры и результаты моделирования

Параметр модели	AXIEM	Analyst
Тип элементов разбиения	Планарные треугольные и четырехугольные	Тетраэдральные
Количество элементов разбиения	3366	37 552
Количество неизвестных при поиске решения	5279	—
Количество проанализированных частотных точек с AFS	10	10
Длительность анализа	01 мин. 55,34 с	14 мин. 12 с

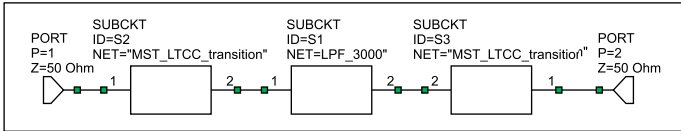


Рис. 9. Схемно-блочная объединительная модель LTCC-ФНЧ с переходами на печатную плату

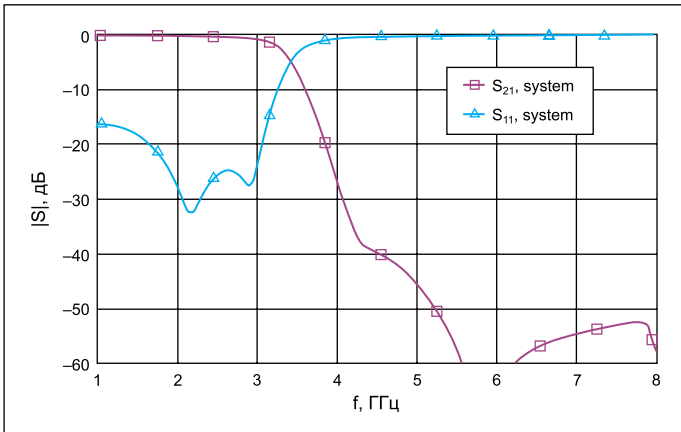


Рис. 10. Амплитуды коэффициентов передачи и отражений LTCC-ФНЧ с учетом переходов на печатную плату

переход обладает низким уровнем амплитуды коэффициента отражений в полосе пропускания.

Объединение полученных моделей проводится в схемно-блочной структуре (рис. 9) и представляет собой каскадное соединение четырехполюсников. Итоговые частотные зависимости амплитуд S_{11} и S_{21} приведены на рис. 10.

Продемонстрированный практический пример, выполненный в среде проектирования NI AWR DE, раскрывает основные возможности построения моделей с использованием принципов декомпозиции областей решения. Данный подход объединяет сильные стороны различных численных методов электродинамического анализа и позволяет оптимизировать время разработки и снизить требования к вычислительным ресурсам. Представленные возможности широко востребованы среди инженеров, занимающихся разработкой многокомпонентных СВЧ-систем.

Литература

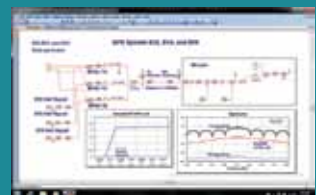
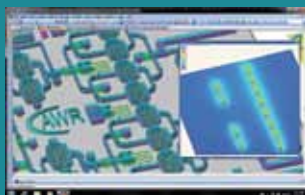
1. Bahl I. J. Lumped elements for RF and microwave circuits. Artech House, 2003.
2. Kuang K., Kim F., Cahill S. S. RF and Microwave Microelectronics Packaging. Springer, 2010.
3. Данн Д., Литун В. Методы электромагнитного моделирования в разработке радиочастотных интегральных схем // Современная электроника. 2017. № 3.
4. Imanaka Y. Multilayered low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology. Springer, 2005.
5. Miracco T. A., Nakamura L., Edwards M. Simulation and Modeling Techniques for Compact LTCC Packages. http://awrcorp.com/download/kb.aspx?file=appnotes/Simulation_and_Modeling_Techniques_for_Compact_LTCC_Packages.pdf
6. Dai Y.-S. et al. A Miniaturized LTCC Low-pass Filter Based on the Lumped Circuit Model // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu, 2010.
7. Yuan B., Mou J., Tong L., Lv X. A Miniaturized LTCC Lowpass Filter with Two Transmission Zeros // 4-th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing, 2011.
8. Crnojević-Benjin V. Advances in Multi-Band Microstrip Filters. Cambridge Univ. Press, 2015.
9. L8 LTCC System for Components and Modules. <http://www.ferro.com/non-cms/ems/EPM/content/docs/L8%20LTCC%20System.pdf>
10. RO4000 Series High Frequency Circuit Materials <https://www.rogerscorp.com/documents/726/acm/RO4000-Laminates---Data-sheet.pdf>



Тратите много времени на разработку СВЧ-устройств? Проигрываете конкурентам?

Правильный ход - использовать NI AWR Microwave Office

- Сокращение цикла разработки до 70%
- Многозадачность в единой среде проектирования
- Сокращение объема физического макетирования
- Широкий набор библиотек мировых производителей



НПП «Родник» - официальный дистрибьютор NI AWR в России
Тел.: +7 (499) 613-7001, www.rodnik.ru

