

# Эффективное проектирование пассивных цепей

Киф БОХЭННЭН  
Джефф ДЕКОСКИ

Авторы рассматривают несколько интегрированных пассивных структур, размещенных на подложке LCP (Liquid Crystal Polymer), и сравнивают результаты моделирования с измеренными параметрами произведенного по модели устройства. Моделирование осуществлялось в пакете Advanced Design System (ADS) с использованием Momentum 2005A в качестве ЭМ-симулятора.

## Введение

Технология органической запакровки на базе подложки из жидкокристаллического полимера (LCP-Liquid Crystal Polymer) теоретически позволяет интегрировать на одной подложке множество пассивных компонентов, таких как индукторы, конденсаторы и резисторы, а также диплексеры, фильтры, балуны и пр. в модули для любых ВЧ/СВЧ-приложений с частотой свыше 800 МГц. И еще лучше, если с помощью моделей таких устройств можно предсказывать поведение реальной цепи.

Низкотемпературный обжиг керамики (LTCC), многоуровневая керамика (MLC) и технология керамических моноблоков лучше всего подходят для применения в компонентах поверхностного монтажа, таких как пассивные полосовые фильтры входного каскада с ВЧ, диплексеры и балуны. LTCC стала самой популярной технологией на базе керамики, так как в ней используются миниатюрные компоненты, например, индукторы и конденсаторы, которые можно оптимизировать для работы в широкой полосе частот, в то время как в компонентах, изготовленных по технологии моноблока и MLC, используются различные материалы для разных частот, и это ограничивает интеграцию устройств для мультиполосных приложений. Обычно модули входного каскада с интегрированными компонентами состоят из более чем 10–15 слоев металла с микропереходными отверстиями, соединяющими слои. Во многих случаях они содержат еще и фильтры типа SAW (на поверхностных акустических волнах) и моноблочные фильтры, смонтированные на множественных керамических слоях для удовлетворения более строгим требованиям, предъявляемым к полосовым фильтрам. Разумеется, как и при использовании любой другой, у этой технологии существуют и недостатки, включая ограничения размера панели, относительно высокие допуски на обработку и более высокий уро-

вень потерь в диэлектрике, чем у органических материалов [1].

Интеграция высокопроизводительных пассивных компонентов, таких как фильтры или балуны, на органических подложках или на печатной плате может устранить полную зависимость от LTCC и уменьшить площадь, занимаемую модулем, снизить себестоимость и повысить надежность. Однако применение органики влечет за собой чрезмерное увеличение уровня вносимых потерь, недостаточную аттенюацию, слишком большой размер, увеличение уровня электромагнитных помех и изменение параметров компонентов в зависимости от влажности и температуры. Подход, изложенный в данной статье, описывает разработку новых миниатюрных, полностью запакрованных диплексеров, полосовых фильтров, балунов и резонатора с использованием подложек на основе жидкокристаллического полимера (LCP).

Такие компоненты обладают следующими свойствами:

- в них используются гибридные копланарные волноводы (CPW) и полосковые линии передачи;
- сочетание в себе сосредоточенные и распределенные элементы и связи между компонентами на многослойных подложках;
- небольшие вносимые потери по сравнению с керамическими моноблочными фильтрами при сопоставимых параметрах размера, полосы пропускания и аттенюации;
- минимальная зависимость производительности от температуры;
- одна и та же подложка может использоваться на разных частотах (1–10 Гц), чтобы осуществлять различные функции — фильтров, диплексеров и балунов;
- большая поверхность обработки (18×24 дюйма);
- более быстрый срок разработки изделий на их основе в связи с использованием стандартных методов обработки печатных плат [1].

Для моделирования авторами используется трехмерный ЭМ-симулятор Momentum от Agilent Technologies.

## Технология Momentum

Momentum — это трехмерный ЭМ-симулятор, бесшовно интегрированный в систему проектирования ADS. Термин «трехмерный» означает, что Momentum учитывает как горизонтальные, так и вертикальные токи в проводниках с ограниченной толщиной. Это эволюция 2,5-мерного решения, которое учитывало только горизонтальные токи во всех проводниках слоя и вертикальные токи только в микропереходных объектах. Имеется возможность создания многослойных моделей и их импорта в топологию, проектируемую в ADS. Топология также может быть синхронизирована со схемами в ADS, настроена, а затем смоделирована с помощью Momentum.

Технология «Метод моментов» описана во многих источниках и успешно применяется в различных приложениях. Основы этой технологии заложила работа Р. Ф. Харрингтона [2]. Momentum — это открытая среда, которая предполагает, что не требуется никаких «закрытых» проводящих конструкций. Теоретические основы функционирования Momentum опубликованы [3] и доступны, однако приведем ее краткое описание.

Процесс решения начинается с применения электрических и магнитных функций Грина в многослойной подложке с помощью составления смешанного потенциального интегрального уравнения. Когда активизирован режим ВЧ, для повышения скорости используются квазистатические функции Грина. Вся геометрия металлизации, включая микропереходные структуры и проводники с ограниченной толщиной, разбивается на элементы, представляющие собой своего рода сеть, — для описания всех неизвестных поверхностных токов с помощью расширения базисных функций типа «звезда» и «петля»

в каждой замкнутой ячейке (эту сеть еще иногда называют Mesh — меш). Эти базисные функции обеспечивают стабильность и точность численных значений постоянного тока. Кроме того, общая сетка может быть составлена из треугольных и прямоугольных примитивов, а конкретные ячейки могут быть уменьшены до любого многоугольника с использованием функции усечения сетки. Для эффективного достижения необходимой точности можно включить функцию разбиения краев на ячейки — она создает более плотную сетку из мелких ячеек вдоль краев проводников и разъемов, благодаря чему достигается более высокий уровень точности, особенно на высоких частотах, так как большая часть тока сосредоточена именно на этих внешних краях. Расчет электромагнитного взаимодействия между всеми существующими ячейками сетки, которые на этом этапе раскладываются на подсекционные базисные функции, заключается в физической интерпретации матрицы взаимодействий. Эта матрица по природе является плотной и имеет эквивалентную модель электрической системы. Вектор возбуждения является производным от возбуждения портов, заданного пользователем, которое включает множественные откалиброванные и неоткалиброванные реализации. Конечное решение матрицы взаимодействий дает значения токов на поверхности, которые, в свою очередь, дают возможность вычислить значения полей.

Наконец, при моделировании в частотном диапазоне, в дополнение к другим методам свипирования частоты, у Momentum есть функция автоматического свипирования с дискретизацией при адаптирующей частоте — Adaptive Frequency Sampling. Это адаптивное свипирование интеллектуально дискретизирует частотный диапазон и динамически создает модель, состоящую из набора многочленов, каждый из которых описывает характеристическую кривую параметров рассеивания. Этот подход значительно снижает затраты времени на моделирование, делая ненужным моделирование большого количества точек частоты. Когда закончено частотное свипирование, результаты отражаются в виде S-параметров, доступных для дальнейшего анализа.

## Примеры измерений

Три приведенных ниже примера измерений показывают хорошее совпадение измерений с помощью аппаратных средств и результатов моделирования с помощью Momentum. Первый включает в себя три типа фильтров: двухполюсный и трехполюсный фильтры (оба предназначены для приложений WLAN 802.11b/g), а также трехполюсный фильтр с интегрированным балуном для приложений WLAN 802.11a. Второй пример — диплексер, а третий — резонатор с высоким значением добротности  $Q$  ( $Q > 100$ ).

Двухполюсный фильтр использует зависимость Чебышева и применяется для модуля усилителя мощности WLAN 802.11b/g. Фильтр был интегрирован в органическую ламинированную подложку, где контакт усилителя, антенный переключатель и различные уравнивающие и фильтрующие компоненты установлены в верхней части подложки. Благодаря интеграции фильтра был достигнут размер модуля усилителя  $5 \times 6 \times 1,2$  мм. Основная топология фильтра была спроектирована с использованием ADS и Momentum и имеет толщину менее 0,75 мм. Устройство было произведено и протестировано, после чего результаты измерения параметров реального устройства сравнили с результатами ЭМ-моделирования.

Результаты этого сравнения показаны на рис. 1. Они показывают очень хорошую согласованность реально измеренных и смоделированных результатов. Для того чтобы результаты моделирования были настолько точными, в процессе моделирования использовались функции thick-conductor expansion и horizontal sidewall current внутренних металлических слоев. Для повышения скорости моделирования функция разбиения краев на сетку в этом примере была отключена, так как при проведении предварительного моделирования использовались одновременно функции edge mesh и horizontal sidewall current, и выяснилось, что результаты, практически совпали с теми, что показаны на рис. 1.

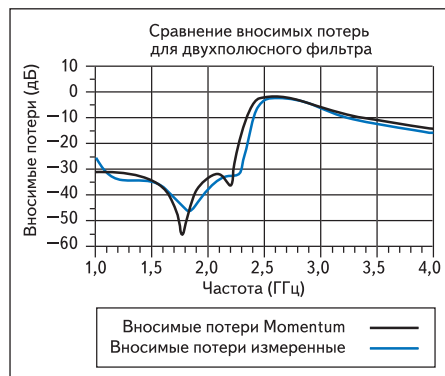


Рис. 1. Сравнение измеренного параметра и смоделированного для двухполюсного фильтра

Трехполюсный фильтр использует интегрированное пассивное устройство (IPD). Его высота — менее 1,1 мм. Он также использует зависимость Чебышева и предназначен для модуля усилителя стандарта WLAN 802.11b/g. Первый и второй полюсы фильтра интегрированы на органическую ламинированную подложку, а третий в виде интегрированного пассивного устройства (IPD) смонтирован в верхней части подложки. Там же были смонтированы и контакт усилителя, антенный переключатель и фильтрующая цепь. Благодаря интеграции фильтра размер модуля усилителя мощности составил  $4 \times 3 \times 1,2$  мм.

Выходной сигнал фильтра для этого проекта показан на рис. 2, где сравниваются данные измерений и моделирования с помощью Momentum. Достигнутое совпадение достаточно велико — точность моделирования вытекает из использования моделей с толстыми проводниками для внутренних дорожек и включенными функциями системы моделирования horizontal sidewall current и edge meshing. Отметим, что показанная на рисунках измеренная производительность типична для всех протестированных устройств.

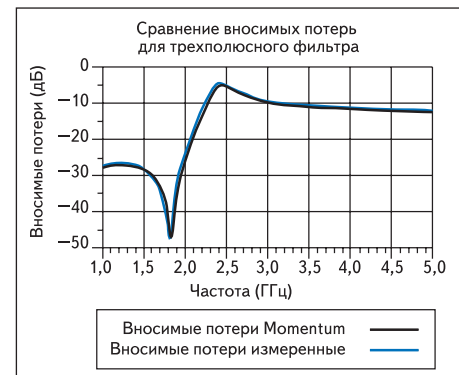


Рис. 2. Сравнение измеренного параметра и смоделированного для трехполюсного фильтра

Трехполюсный фильтр с интегрированным балуном имеет низкий профиль — менее чем 0,4 мм — и спроектирован специально для приложений WLAN 802.11a. Сопоставление измеренных параметров и смоделированных показано на рис. 3. Этот проект был также смоделирован в Momentum с использованием функций thick conductor expansion и horizontal sidewall current.

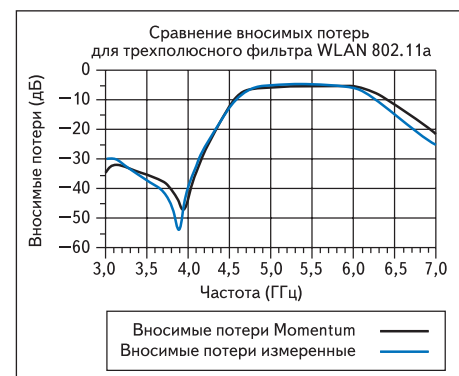


Рис. 3. Сравнение измеренного параметра и смоделированного для трехполюсного фильтра WLAN 802.11a

Второй пример измерения включает интегрированное пассивное устройство — диплексер, разработанное для рынка спутникового телевидения стандарта DBS (Direct Broadcast Satellite). Диплексер работает на частотах от 0,9 до 1,45 ГГц в одной полосе и от 1,65 до 2,15 ГГц во второй полосе и обладает толщиной менее 2 мм. Сравнение измерен-

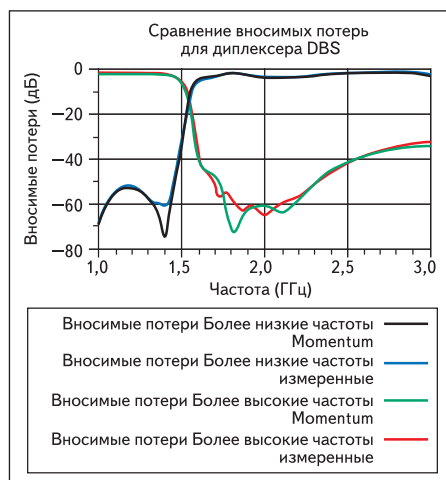


Рис. 4. Сравнение измеренного параметра со смоделированным для диплексера DBS

ных и смоделированных данных отражено на рис. 4 и демонстрирует очень хорошее совпадение благодаря функциям thick conductor expansion и horizontal sidewall currents, задействованным в процессе моделирования.

Последний тест иллюстрирует сопоставление измеренных и смоделированных данных для резонатора с высокой добротностью  $Q (>100)$ . Этот компонент (толщиной менее 1 мм) был также смоделирован в Momentum с использованием thick conductor expansion и edge mesh и horizontal side current для достижения высокой точности как для параметра добротности  $Q$ , так и для индуктивности. Сопоставление параметров показано на рис. 5.

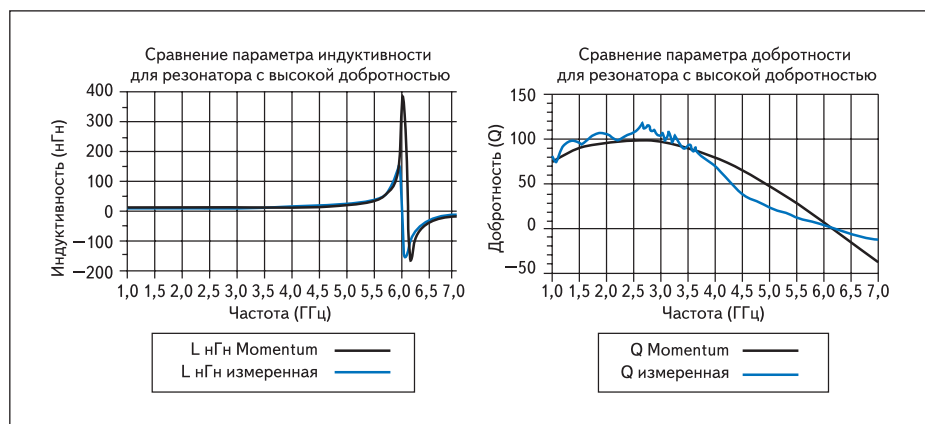


Рис. 5. Сопоставление измеренного параметра с смоделированным для резонатора с высокой добротностью

## Заключение

Данная статья отразила высокое совпадение моделей с фактическими результатами, измеренными на реальном устройстве, в применении к новым разработкам на базе подложки из жидкокристаллического полимера — полосковым фильтрам, балунам и резонатору. В качестве средства ЭМ-моделирования использовалось решение Momentum 2005A. Описанные примеры (и частично — трехполюсный фильтр, имеющий в своем составе интегрированное пассивное устройство IPD) иллюстрируют сложности при моделировании плоских или трехмерных сосредоточенных или распределенных компонентов (таких как спиральные катушки индуктивности, тон-

копленочные конденсаторы, полосковые схемы и т. д.) Таким образом, продемонстрирована возможность достижения точного результата моделирования, что сокращает производственный цикл и ускоряет выпуск продукта на рынок. ■

## Литература

1. Sidharth Dalmia et al. Liquid Crystalline Polymer Based RF/Wireless Components for Multi-Band Applications. Electronic Components and Technology Conference. May 2004.
2. R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods. Maxillan, New York (1968).
3. Руководство по Momentum.  
<http://eesof.tm.agilent.com/docs/adtdoc2005A/mom/index.html>