ДЖОН ДАНН (John Dunn)
Перевод: **ВЛАДИМИР РЕНТЮК**

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИТЕХНОЛОГИЙ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ С АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

Вниманию читателей предлагается статья, которая исследуют проблемы, связанные с мультитехнологическими модулями для высокочастотных и микроволновых приложений, то есть модулей, выполненных с использованием нескольких совершенно разных в физическом смысле технологий. В частности, подняты вопросы электромагнитного моделирования таких устройств, и даны ответы, поясняющие, как программное обеспечение для проектирования может одновременно и решать проблемы на уровне схемотехники данных устройств, и исследовать поведение сопутствующих выбранной конструкции устройства электромагнитных полей. В статье также рассматриваются проблемы моделирования активной сканирующей антенной решетки, включающего несколько разных методов симуляции, начиная от использования параметризованных трехмерных ячеек (3D cells) и заканчивая применением трехмерной электромагнитной экстракцией (EM extraction).

В преддверии массового перехода на сотовую связь пятого поколения 5G промышленность уже сейчас готова предоставить более современные и совершенные антенные и схемные модули не только для рынка коммерческой электроники, но и для нужд обороны. В качестве примера на рис. 1 показан один их вариантов антенного модуля, который в настоящее время прототипируется такими производителями, как IBM и Ericsson [1]. Этот 5G антенный модуль с рабочей частотой 28 ГГц представляет собой патч-матрицу размером 2,8×2,8 дюйма с 64-двойными поляризованными элементами и, кроме того, содержит еще четыре монолитные микроволновые интегральные схемы (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), выполненные с использованием кремний-германиевой (SiGe) технологии, впервые предложенной специалистами компании IBM.

В ряде других предложений разработчики склоняются к использованию сочетания устоявшихся традиционных технологий, а именно на базе кремния (Si), арсенида-галлия (GaAs) и нитрида-галлия (GaN). К преимуществам этих типов модулей следует отнести более низкую стоимость, меньший размер, выгоды от интеграции нескольких технологий и простоту использования.

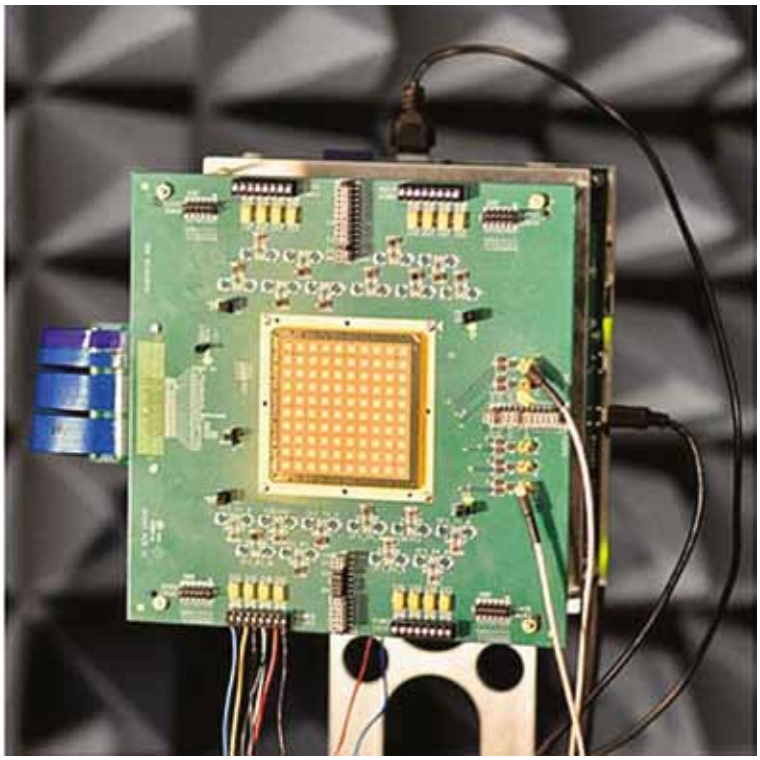


Рис. 1. 5G Антенный модуль с рабочей частотой 28 ГГц размером 2,8×2,8 дюйма и интеграцией нескольких технологий

Рис. 2. Двухдиапазонный WLAN T/R-модуль с подключением к антенной решетке, выполненный с применением сразу нескольких технологий

В начале статьи рассматриваются современные мультитехнологические решения, задачи электромагнитного моделирования и программные инструменты, необходимые для обеспечения успешной разработки продуктов сотовой связи пятого поколения 5G. А в конце будут представлены практические примеры, а также схема модуля активной сканирующей антенной решетки, иллюстрирующие процесс моделирования схемного и конструктивного решения модуля, выполненного с помощью нескольких разных технологий, а также совместное моделирование его поведения в электромагнитной области. Будут описаны передовые технологии симуляции — параметризованные трехмерные ячейки, предварительная оценка до внедрения в производство, а также упрощение формы, инструмент EM Extraction и функция In-Situ Measurement, благодаря чему модули, выполненные на основе физически различных технологий, могут быть измерены и описаны как единое целое.

ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ НЕСКОЛЬКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Разработчики 5G-продуктов остро нуждаются в программных инструментах для моделирования в области высоких и сверхвысоких частот, которые позволили бы им применять модули с интегрированными каскадами, использующими несколько технологий. Например, это имеет место в прототипе двухдиапазонного приемо-передающего (T/R) модуля, показанного на рис. 2.

Как можно видеть, этот модуль беспроводной локальной сети (wireless local area network, WLAN) объединяет несколько различных технологий, таких как усилители мощности, выполненные по технологии GaAs и SiGe (последний применен исходя из соображений, что большая часть управляющей электроники будет выполнена на базе кремния), различные компоненты поверхностного монтажа, резонатор на объемных акустических волнах (bulk-acoustic-wave, BAW) или резонатор на поверхностно-акустическая волнах (surface-acoustic-wave, SAW), которые очень популярны в устройствах мобильной связи. Все это реализовано с использованием в качестве печатной платы подложки из низкотемпературной совместно обжигаемой керамике (Low Temperature Co-Fired Ceramic, LTCC), на которой по технологии монтажа на поверхность размещены необходимые пассивные элементы. Чтобы поддерживать эффективное проектирование конструкции такого типа, среда разработки в виде программного обеспечения должна преодолевать две большие и сложные проблемы.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ, ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ ФИЗИЧЕСКОГО РАЗЛИЧИЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НИХ ТЕХНОЛОГИЙ

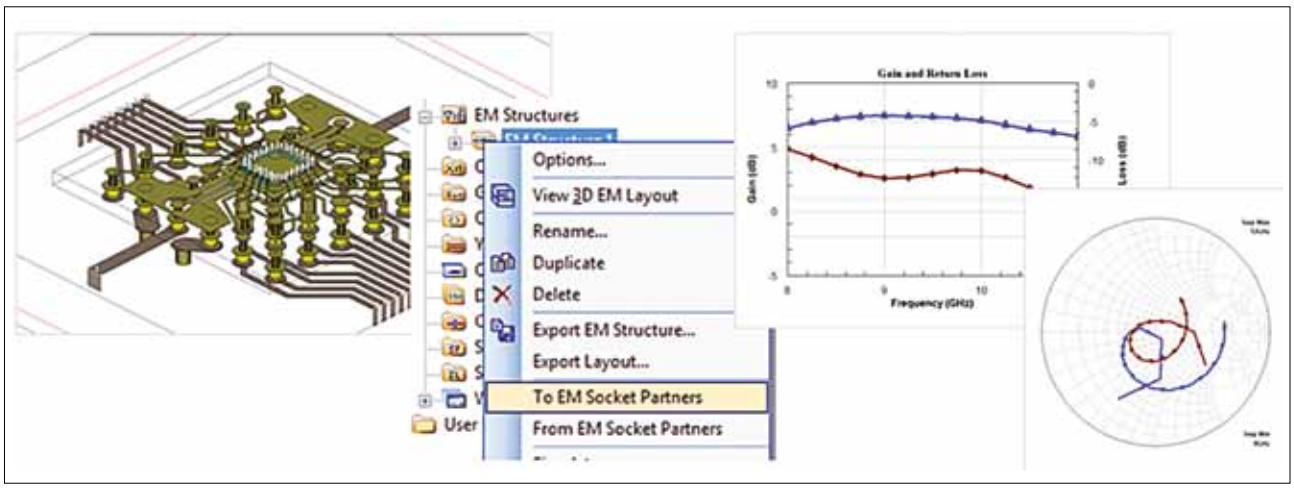
Разработчикам, специализирующимся в области 5G, необходимо использовать несколько физически различных технологий, таких как GaN, GaAs, керамика для подложек и кремний для чипов. Кром того, им также потребуются различные технологии и платы для модулей, например, изготавливаемые из керамики и органических материалов с низкими диэлектрическими потерями. Таким образом, симулятор для оценки поведения электромагнитного поля должен поддерживать эти многочисленные технологии. Следовательно, разработчику нужно иметь возможность обращаться к нескольким стандартным библиотекам компонентов и к библиотеке технологических процессов (process design kits, PDK). Все эти разные на физическом уровне технологии будут существовать в одном и том же электромагнитном моделировании, если созданная ими та или иная геометрия является, например, областью перехода между чипом и модулем. Другими словами, среда моделирования, столкнувшись с такой мультитехнологичностью, должна поддерживать совместное существование разных библиотек в одном проекте.

РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ СИМУЛЯТОРАМИ СИГНАЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В зависимости от конкретной геометрии и желаемой информации, для моделирования электромагнитных полей и схемотехники разработчику понадобятся разные симуляторы. Это связано с тем, что программное обеспечение должно поддерживать временные, частотные и более сложные симуляторы схем модуляции. Здесь для анализа поведения схем во временной области потребуются SPICE-подобные симуляторы, использующие характерные для них модели, а также база для кремниевых микросхем и возможность моделирования взаимного влияния компонентов путем симуляции межкомпонентных сосредоточенных паразитных связей.

Для высокочастотного моделирования усилителей мощности и фильтров понадобится их оценка в частотной области, с учетом всех гармонических составляющих. Для мультитехнологичных конструкций потребуется необходимо и моделирование модуляции для таких сложных схем кодирования, как LTE, в которых несущая частота имеет сложную модуляцию непериодическими сигналами. Использование простого SPICE-симулятора или даже симулятора с оценкой гармонического баланса здесь явно недостаточно. Так что в этой ситуации разработчикам придется двигаться к более сложным гибридным методам компьютерного моделирования, которые должны поддерживаться соответствующим программным обеспечением.

Что касается моделирования электромагнитного поля, то в зависимости от моделируемой геометрии здесь также



▲ **Рис. 3.** Технология электромагнитного компьютерного моделирования EM Socket для оценки поведения электромагнитного поля позволяет использовать сторонние инструменты. В данном случае показано NI AWR с подключением к HFSS

нужны различные подходы. Программа планарного электромагнитного моделирования имеет более высокую пропускную способность и скорость для традиционных планарных макетов на печатных платах и чипах. Например, плоские распределенные фильтры, гребенчатые фильтры усилителей мощности и межсоединения на плате или чипе обычно моделируются с помощью программ планарного электромагнитного моделирования. Но для областей перехода между различными технологиями, в частности между модулем платы и основанием в виде матрицы шариковых выводов (ball-grid array, BGA) или между модулем и чипом с использованием перемычек связи, требуются уже 3D-симуляторы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МУЛЬТИТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ

Оценка поведения электромагнитного поля — одна из самых больших проблем в мультитехнологической конструкции. Главным образом это связано с тем, что, как следует из принятого нами определения, в такой конструкции используется более одной технологии производства. Например, переходы между чипом на плате или модулем и чипом связаны с несколькими технологиями. Для этого требуется несколько библиотек, называемых PDK, причем для различных плат, модулей и чипов предусмотрена своя библиотека. Каждая из них имеет разные стеки, топологическое графическое изображение и проверку правил проектирования (design rule checks, DRC).

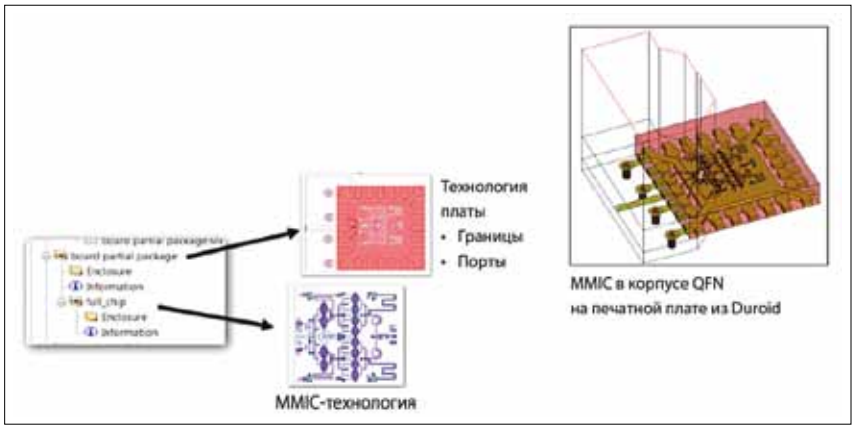
Использование нескольких библиотек для разных симуляторов электромагнитного поля, естественно, имеет определенные трудности. Они связаны с тем, что информация в стеке может быть разной, поскольку свойства материалов, порты и границы можно трактовать по-разному. Кроме того, существуют разнообразные настройки процесса симуляции — такие установки, как точность вычисления и диапазоны частот, могут отличаться для того или иного симулятора. Создание чертежей макетов также является проблемой, поскольку трехмерные и плоские макеты, как правило, имеют различия в их генерации.

Программное обеспечение NI AWR Design Environment (AWR Среда разработки) компании National Instruments (далее — NI) предлагает уникальную технологию электромагнитного компьютерного моделирования EM Socket, обеспечивающую единую среду для управления сразу несколькими электромагнитными симуляторами. Эта среда содержит планарный электромагнитный симулятор AXIEM и программное обеспечение для трехмерных конечных элементов Analyst 3D, а также может интегрировать сторонние инструменты для компьютерного моделирования поведения электромагнитных полей.

На рис. 3 показан NI AWR, подключенный ANSYS HFSS, который объединяет HFSS (High Frequency Structural Simulator, коммерческая программа от компании ANSYS для получения S-параметров) с программным обеспечением NI AWR. Большая часть модели макета создается в планарном симуляторе AXIEM, показанном слева. Затем в качестве симулятора электромагнитного поля выбирают HFSS (в середине). Полученный набор данных HFSS импортируется обратно в программное обеспечение для проектирования Microwave Office от NI и используется для подстройки, оптимизации, анализа и проверки результатов. Так мы получаем готовый к применению инструмент (справа).

Программа NI AWR Design Environment компании National Instruments решает проблему использования как 3D-, так и планарного компьютерного моделирования в одном и том же дизайне, предполагая, что чипы, платы и модули по существу являются плоскими макетами с 3D-«островками». Хотя разработчики и не имеют возможности рисовать 3D произвольные формы в плоской среде, они могут импортировать из библиотеки 3D-фигуры предварительно созданных объемных стандартных ячеек, таких как BGA, соединительные проволочные перемычки, SMA-разъемы и т. д.

При необходимости с проектной средой взаимодействует уже полноценный



▲ **Рис. 4.** Мультитехнологичная схема MMIC в корпусе QFN, выполненная на печатной плате из фольгированного изоляционного материала марки Duroid. Используются три технологии

3D-редактор. Библиотека для нескольких технологий (PDK) в среде проектирования NI AWR доступна как для симулятора схем Microwave Office, где используются модели из разных PDK, так и для симуляторов электромагнитного поля, в которых изображения, материалы и их параметры, вносимые в стек данных, могут быть взяты из различных PDK.

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИЯМ

Для включения и организации использования нескольких PDK в Microwave Office доступен иерархический подход к технологиям, пример которого представлен на рис. 4. Разработчики могут одновременно использовать разные технологии, назначая технологию каждой отдельной ячейке моделируемого прототипа. Затем различные прототипы с учетом свойственной им технологии могут быть встроены друг в друга в качестве ячеек и субъячеек. Порты и границы печатных плат или подложек добавляются уже на самом высоком уровне иерархии. Окончательный прототип приводится к единому макету и отправляется в симулятор электромагнитного поля. Очевидно, что для мультитехнологичных макетов оптимален такой 3D-симулятор, как Analyst.

ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОРПУСИРОВАННОГО RFIC/MMIC НА ПЛАТЕ

В этом примере мы проиллюстрируем использование электромагнитного моделирования для решения, выполненного на основе мультитехнологий. Область наших интересов — переход с платы на корпус, а затем на чип в корпусе. На рис. 5 показан пример монтажа монолитной микроволновой интегральной схемы (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) или радиочастотной интегральной микросхемы (Radio Frequency Integrated Circuit, RFIC) на печатную плату. Для платы предусмотрена библиотека печатной платы (PCB). Корпус устройства — это QFN (Quad Flat No-leads package), представляющий семейство корпусов микросхем, имеющих планарные выводы, расположенные непосредственно под микросхемой по всем четырем ее сторонам. Корпус квадратной формы, размер которого определяется количеством выводов.

Терминалы корпуса подключается к микросхеме с помощью перемычек. В этом примере используются три библиотеки, по одной для платы, корпуса и чипа. Разработчик заинтересован в получении ответа на вопросы о достигнутой производительности, о заземлении, паразитных резонансах корпуса, опти-

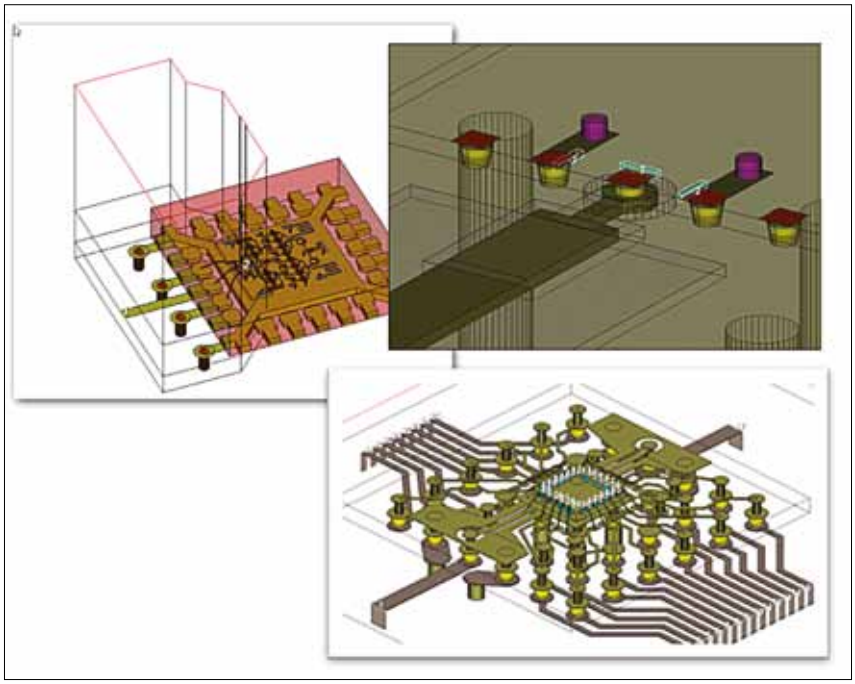


Рис. 5. Установленное на печатной плате RFIC/MMIC-устройство в корпусе QFN, корпусирование по технологии flip-chip (перевернутый кристалл) и выводами, подключенными через внутренние перемычки

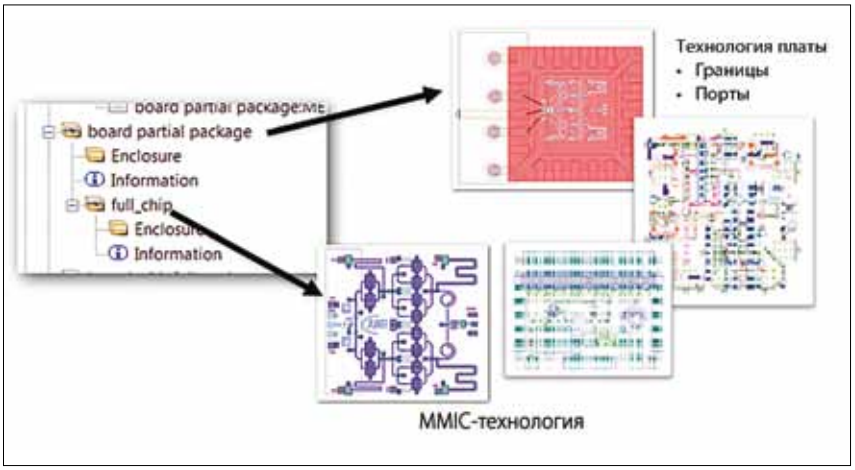


Рис. 6. Пример того, как с помощью установленной иерархии каждый уровень использует лишь одну технологию, потом добавляются порты и границы, а окончательный макет сглаживается

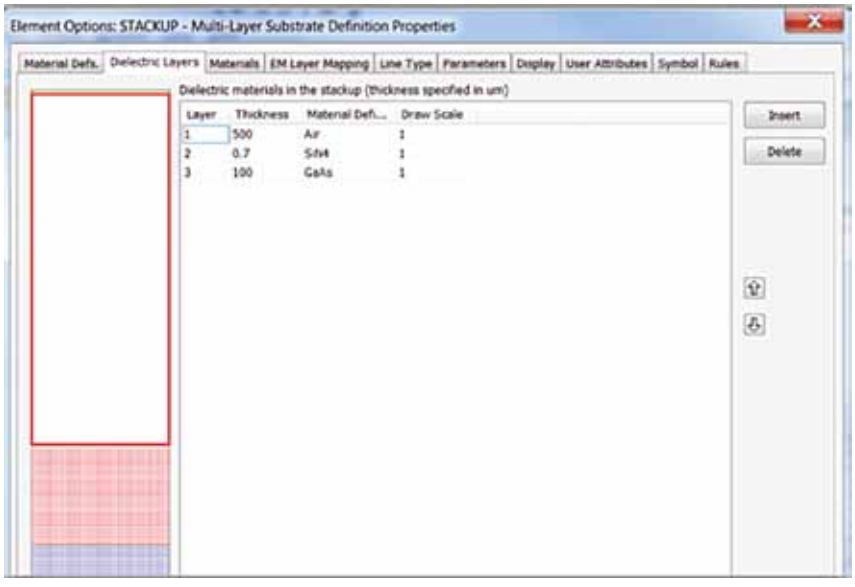


Рис. 7. Каждая технология получает свою информацию из соответствующего блока стека

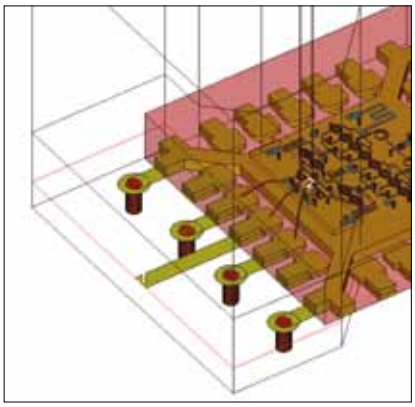


Рис. 8. Порты 1 и 2 являются волновыми портами (Wave Port) в Analyst и CST, но сосредоточенными портами (Lumped Port) в HFSS

мизации компоновки и прогнозирования повторяемости характеристик при серийном выпуске данных устройств.

При проведении анализа, учитывая наличие в этом проекте нескольких технологий, для электромагнитного моделирования применен иерархический подход. Каждый уровень обращается к одной технологии, при этом порты и границы добавляются уже на самом верхнем уровне иерархии. Окончательный прототип затем приводится к единому макету и отправляется в симулятор электромагнитного поля (рис. 6). Слева на рисунке показан список ячеек макета. Обратите внимание на надпись вверху: «board partial package» (плата и частично корпус), что указывает на используемую технологию платы. Там же (немного ниже) есть надпись: «full chip» (полный чип), который является субэлементом, выполненным по технологии арсенида галлия (GaAs).

В программном обеспечении NI AWR Design Environment (AWR Среда разработки) компании National Instruments используются одни и те же файлы стека данных и меню материалов из каждой библиотеки технологических процессов (process design kits, PDK), что упрощает создание моделей и поддержку различных технологий. Кроме того, разные электромагнитные симуляторы применяют одни и те же меню, позволяя разработчику легко переключаться между симуляторами электромагнитного поля, не беспокоясь о настройках компоновки или установки материалов. Например, можно переключаться между двумя различными поддерживаемыми 3D-симуляторами без каких-либо изменений, кроме настроек непосредственно самого симулятора. Как известно, разные симуляторы могут выполнять настройки по-своему, например, в части обработки граничных условий.

На рис. 7 показан стек данных для типичной платы. Этот же стек можно использовать в таких инструментах, как планарный электромагнитный симулятор AXIEM, программное обеспечение для трехмерных конечных элементов Analyst 3D или же других симуляторах, причем без каких-либо изменений. В стеке также предусмотрены правила упрощения формы, которые облегчают геометрию для создания сетки меньшего размера и сокращают проблемные размеры. Кроме того, для всех симуляторов предлагаются одни и те же правила упрощения.

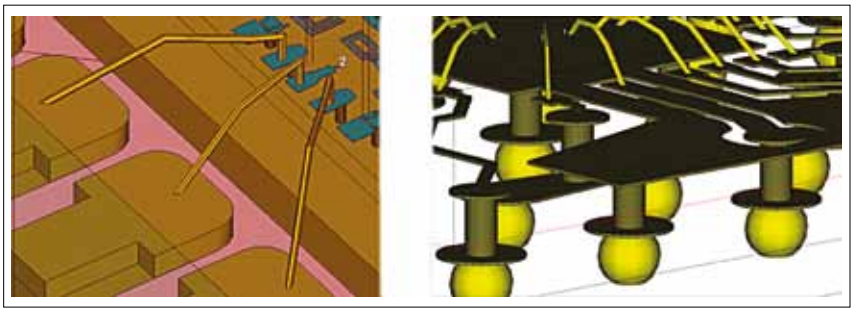


Рис. 9. Ячейки 3D PCells могут представлять собой общие типы 3D-объектов, таких как перемычки связи, выводы BGA и QFN-корпусов, а также SMA-разъемы

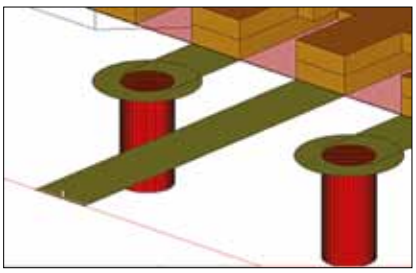


Рис. 10. Заземляющие переходы, взятые из библиотеки PDK печатной платы

Порты и границы, как уже было сказано, устанавливаются на верхнем уровне иерархии макета. Обратите внимание, что граница для Analyst не должна охватывать весь макет — здесь моделируются только электромагнитные эффекты внутри границы. Поэтому чтобы важные эффекты, такие как связь между элементами, не учитывались при использовании данной функции, разработчики должны проявлять известную осторожность. Тип порта зависит от симулятора. На рис. 8 порты 1 и 2 представляют собой волновые порты в Analyst, сосредоточенные в HFSS [4], и волновые порты в симуляторе CST [5] компании Dassault Systèmes.

ПАРАМЕТРИЗОВАННЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ ЯЧЕЙКИ 3D PCeLLs

Библиотеки могут содержать трехмерные ячейки в виде предварительно нарисованных фигур, которые разработчик размещает в своем макете. Ячейки могут быть параметризованы, что позволяет изменять фигуры, просто меняя различные значения параметров, например, чтобы изменить диаметр или высоту шарикового вывода BGA. Эти ячейки иногда называют 3D-параметризованными ячейками, или 3D PCells (от 3D parameterized cells). Схема, представленная на рис. 9, показывает несколько используемых ячеек 3D PCells, которые

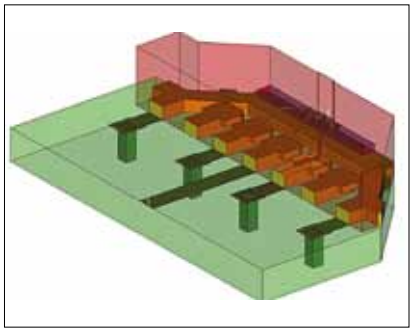


Рис. 11. После применения правил упрощения цилиндрические переходы платы становятся параллелепипедами

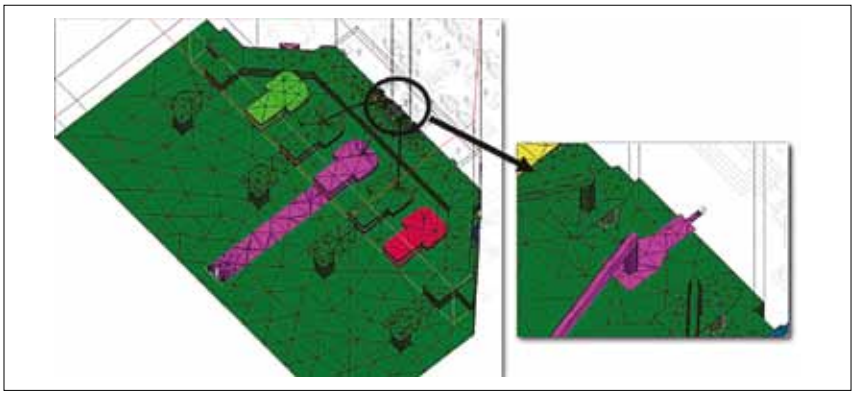
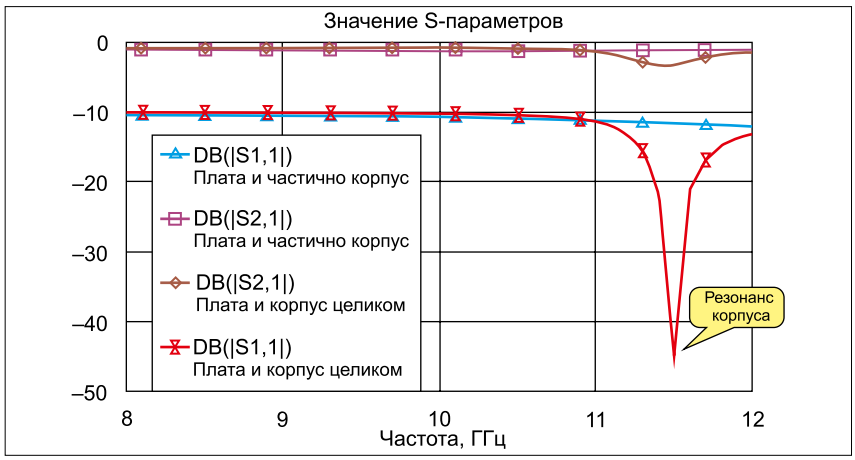


Рис. 12. Пример наложения сетки, показывающий подключения

в этом примере являются перемычками связи и выводами BGA.

Переходные контакты для заземления на рис. 10 — еще один пример использования трехмерных ячеек из библиотеки. Эти переходы выбраны из стандартного списка деталей, который поставляется с библиотекой. Макет можно применить для переходов, многослойных плат и спиралей. На рис. 10 изображены отверстия для организации заземления из библиотеки технологических процессов PDK.

Разработчики могут создавать собственные ячейки, рисуя их в редакторе 3D-макетов, интегрированном в программный продукт Microwave Office компании NI. Параметры можно задать на чертеже, а затем они отобразятся в программном обеспечении, так что макет легко откорректировать. Предусмотрено добавление пользовательских ячеек в библиотеку 3D-частей, чтобы потом использовать в других проектах. Таким образом, компании имеют возможность формировать свои библиотеки заготовленных собственных частей и компонентов, доступных для всех ее инженеров.



▲ **Рис. 13.** Результаты моделирования корпуса входного устройства в исполнении, приведенном на рис. 9

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ФОРМЫ И УПРОЩЕНИЕ

Многие из функций в компоновке для электромагнитного моделирования необходимы лишь для того, чтобы сделать чертеж, но непосредственно для моделирования они не требуются. Однако при этом создается много ячеек сетки, и во время решения задачи понадобятся большие объемы памяти, и процесс решения занимает больше времени для симуляции. Кроме того, могут быть созданы очень мелкие сетки, что приводит к плохой обусловленности задачи и, как следствие, к возможным ошибкам при ее решении.

Для устранения этой проблемы в программном обеспечении NI AWR Design Environment от компании National Instruments предусмотрена технология упрощения формы. У библиотек PDK есть правила упрощения формы, которые удаляют небольшие сторо-ны, объединяют переходы, уменьшают количество сторон окружностей/переходов и убирают небольшие углубления в нескольких металлических слоях. На рис. 11 показано, как цилиндрические переходы на плате после применения правил упрощения становятся квадратами в сечении.

Упрощение геометрии, однако, несет и определенные, связанные с этим процессом опасности. Так, некоторые формы, хотя движок программы пытается предотвратить такие ситуации, могут отключиться или некоторые цепи могут замыкаться. Аннотация в макете позволяет проектировщику видеть все соединения, имеющие место после упрощения геометрии и создания сетки. На рис. 12 представлен пример, в котором различными цветами показаны разные подключенные цепи напряжения постоянного тока.

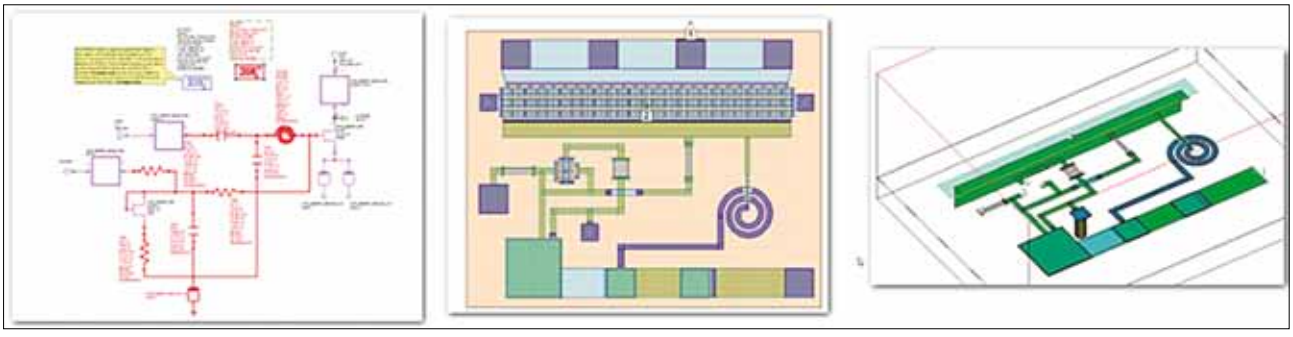
РЕЗУЛЬТАТЫ СИМУЛЯЦИИ

На рис. 13 показаны результаты моделирования корпуса устройства, приведенного ранее на рис. 5. Сначала был смоделирован только внешний интерфейс, с использованием границ, показанных на рис. 8. Затем границу расширили, включив в нее весь корпус, а затем уже сравнивали полученные результаты. Разницу можно увидеть в виде значительного падении уровня S1, что является следствием собственного паразитного резонанса корпуса, наличие которого указывает на то, что устройство нуждается в более эффективном заземлении.

ВОЗМОЖНОСТИ 3D-СИМУЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПЦИИ EM EXTRACTION

Инструмент EM Extraction (буквально — извлечение электромагнитного поля) автоматически отправляет схему устройства в симулятор поведения электромагнитного поля. Этот процесс обычно включает 2D-макет, доставляемый в планарный симулятор. На рис. 14 показан пример извлечения спирального резонатора MMIC, который направляется для симуляции в планарный электромагнитный симулятор AXIEM. Изображение слева на рис. 14 представляет собой схему MMIC с выделенными элементами для симуляции (отображены красным цветом), а рисиноке в центре — схематическое изображение компоновки. Результаты электромагнитной симуляции, извлеченные из макета в планарный симулятор AXIEM, представлены на рис. 14 справа.

На рис. 15 дан пример модуля на печатной плате, извлекаемого через EM Extraction для дальнейшего анализа с точки зрения поведения электромагнитного поля в планарный симулятор AXIEM. Опять же, изображение слева на рис. 15 представляет собой схему модуля с выбранными для извлечения элементами, изображение посередине —



▲ **Рис. 14.** Извлечение через EM Extraction для моделирования в планарный электромагнитный симулятор AXIEM спирального резонатора MMIC

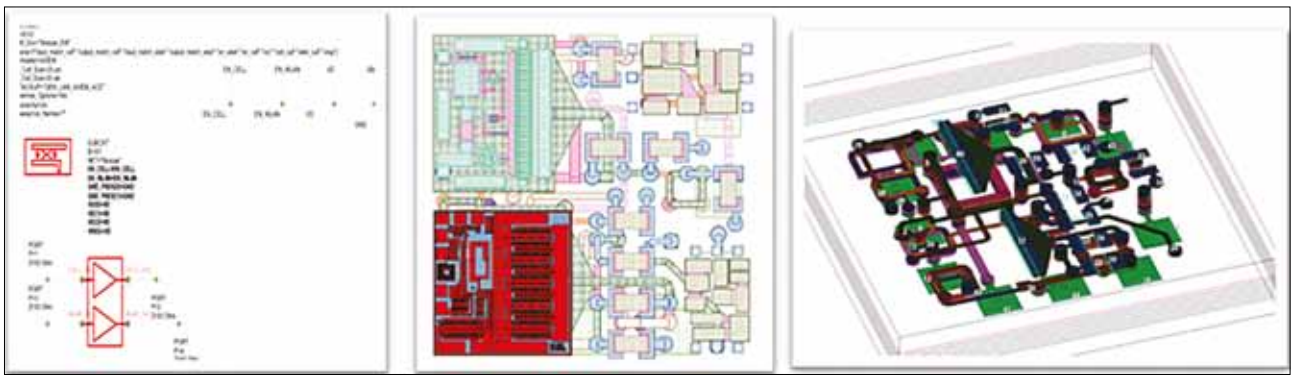


Рис. 15. Печатная плата модуля, извлекаемая через EM Extraction в планарный электромагнитный симулятор AXIEM для дальнейшего моделирования

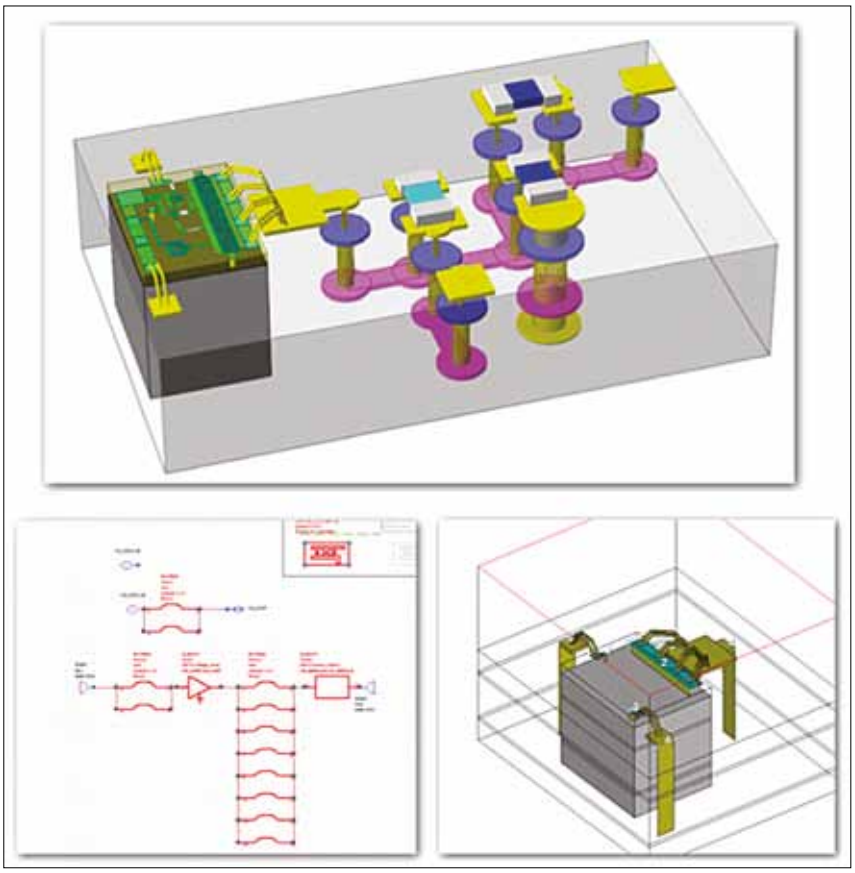


Рис. 16. Мультитехнологический модуль MMIC в 3D (сверху), а также перемычки связи, выбранные в схеме (внизу слева) и извлеченный через EM Extraction переход в 3D-симулятор Analyst (внизу справа)

схема его компоновки, а справа — результата моделирования электромагнитного поля извлеченной части.

Также через EM Extraction можно извлечь модель или ее часть и отправить для анализа в 3D электромагнитный симулятор. Экстрагированные формы включают толстые, конечные диэлектрические блоки, перемычки связи, границы и порты. На рис. 16 дан трехмерный вид модуля MMIC, в котором микросхема MMIC находится поверх керамической подложки с соответствующими межсоединениями. В верхней части изображения, представленного на рис. 16, в мультитехнологическом примере используются две разные библиотеки PDK, а чип прикрепляется к подложке с помощью разваренных проволочных перемычек. На рис. 16 внизу слева показаны перемычки связи, выбранные в схеме, а внизу справа — извлеченный переход в трехмерный симулятор Analyst.

Здесь необходимо сделать одно важное уточнение. Ленточные структуры, переходящие из портов в нижнюю плоскость заземления, используются для получения правильных определений заземления портов. Они не выполнены из металла, в общем и целом являются математическими поверхностями, пред-

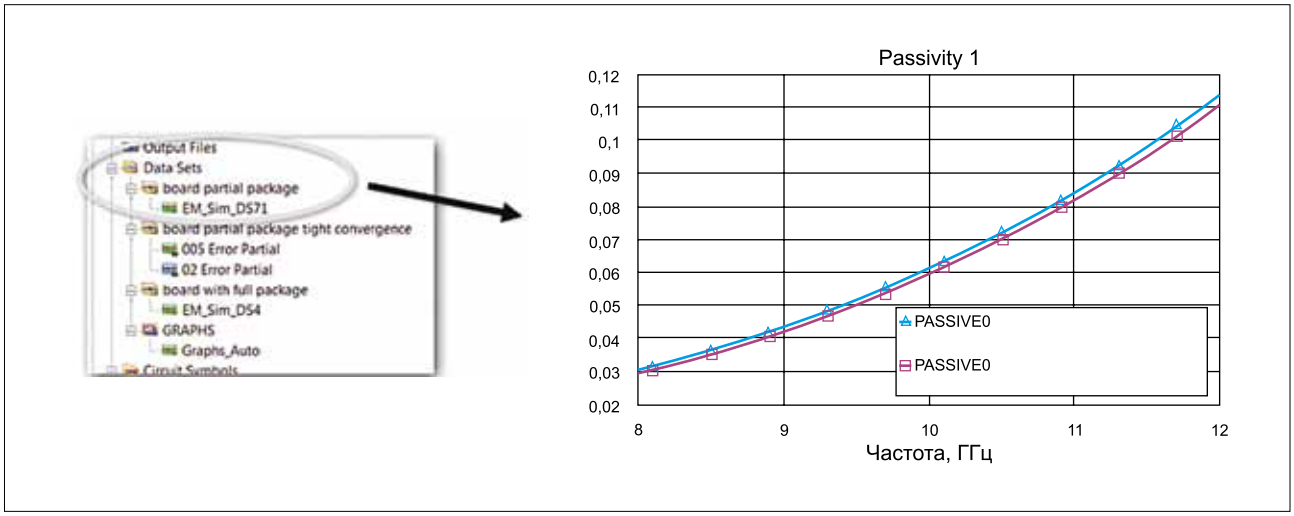


Рис. 17. Наборы данных в проекте (слева) могут быть легко созданы по графикам (справа)

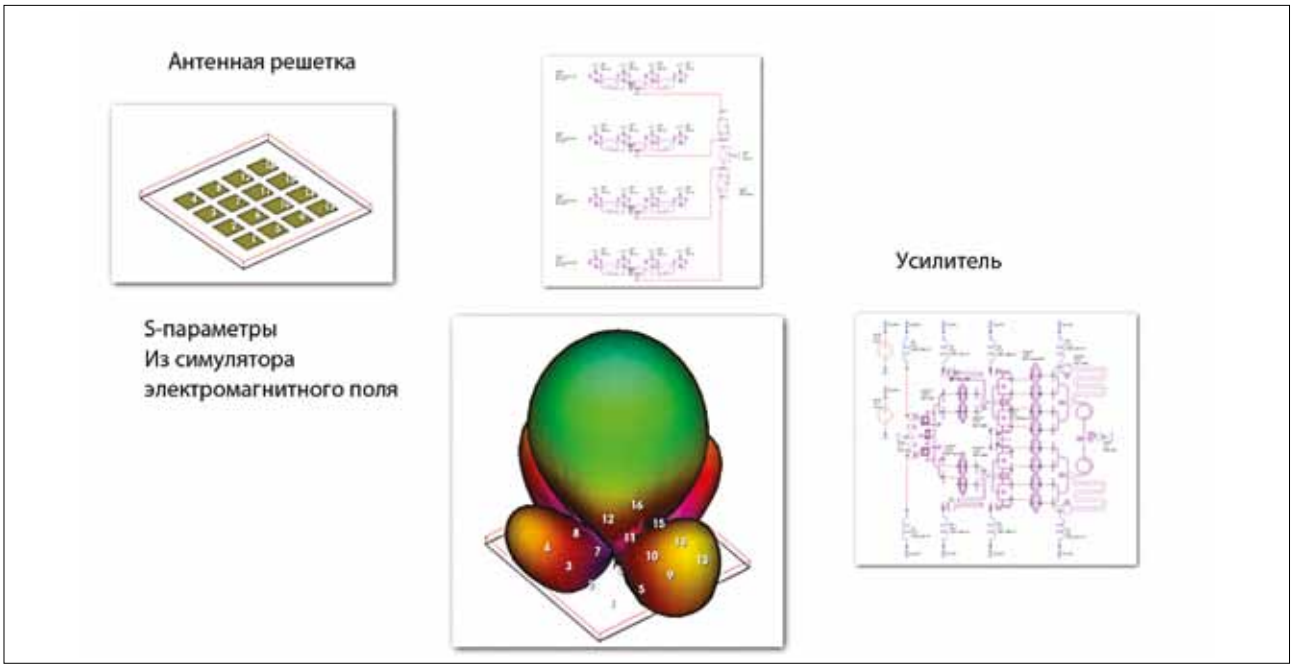


Рис. 18. Пример моделирования массива 16-элементной микрополосковой системы с 16 усилителями

назначенными для возбуждения привязанных к ним сеток.

НАБОРЫ ДАННЫХ

Для того чтобы помочь разработчику пользоваться данными из различных электромагнитных и схемных симуляций, в среде Microwave Office предлагаются так называемые наборы данных (data sets). Они хранят данные моделирования, позволяя разработчикам быстро переключаться между ними для сравнения результатов на графиках, а также изменения данных, используемые конкретной схемой (рис. 17). Конструкторы могут обратиться к наборам данных, чтобы сохранить предыдущие результаты моделирования и затем без проблем сравнивать их с последующими результатами. Наборы данных включают компоновку электромагнитного моделирования и логи (файла журнала).

СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ И ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ МОДУЛЯ АКТИВНОЙ СКАНИРУЕМОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Антенная решетка и подключенные схемы управления, естественно, тем или иным образом влияют друг на друга. Чтобы помочь разработчикам преодолеть эту проблему, среда компьютерного моделирования Microwave Office позволяет совместно проводить компьютерное моделирование антенны с подключенными к ней схемами. Во-первых, антенны должны быть смоделированы в симуляторе электромагнитного поля, который создает файл S-параметров, описывающий поведение матрицы антенной решетки. Модели антенн также рассчитываются на основе известных протекающих в ней токов. Во-вторых, проблема заключается и в том, что усилители мощности, управляющие матрицей антенны, по своей природе весьма нелинейны, а их характеристики зависят от нагрузок, которыми они управляют — в данном случае это входы элементарных элементов антенной решетки.

Когда луч антенны сканирует, импедансы портов меняются, что в свою очередь воздействует на усилители. Таким образом, характеристики антенны и схемы возбуждения тесно связаны между собой. На рис. 18 в качестве примера показан массив 16-элементной микрополосковой системы с 16 усилителями. Когда массив сканируется (луч диаграммы направленности антенны перемещается в пространстве), нагрузка на каждый элемент изменяется, что может привести к снижению производительности или изменению мощности в некоторых элементах. Это не вызвано напрямую антеннами, а в общем связано с тем, что нагрузка на усилитель мощности изменилась и, соответственно, такой факт должен учитываться при моделировании.

ФУНКЦИЯ IN-SITU MEASUREMENT

При традиционном подходе к решению данной проблемы разработчик должен сначала вычислить входной импеданс антенной матрицы и вернуть результаты в симуляцию схемы, а затем настроить характеристики усилителя мощности. Далее для того чтобы увидеть, как изменилась диаграмма направленности луча антенны, полу-

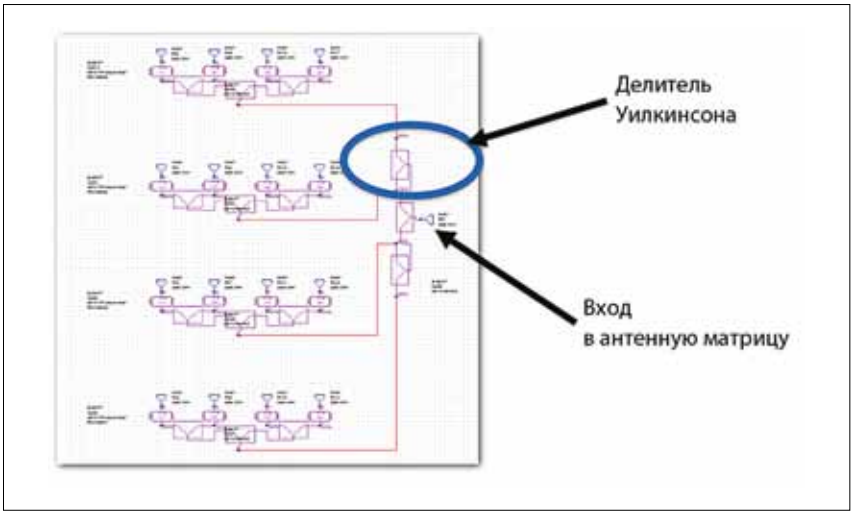


Рис. 19. Пример, иллюстрирующий подключение в симуляторе схемы запитки к антенной матрице

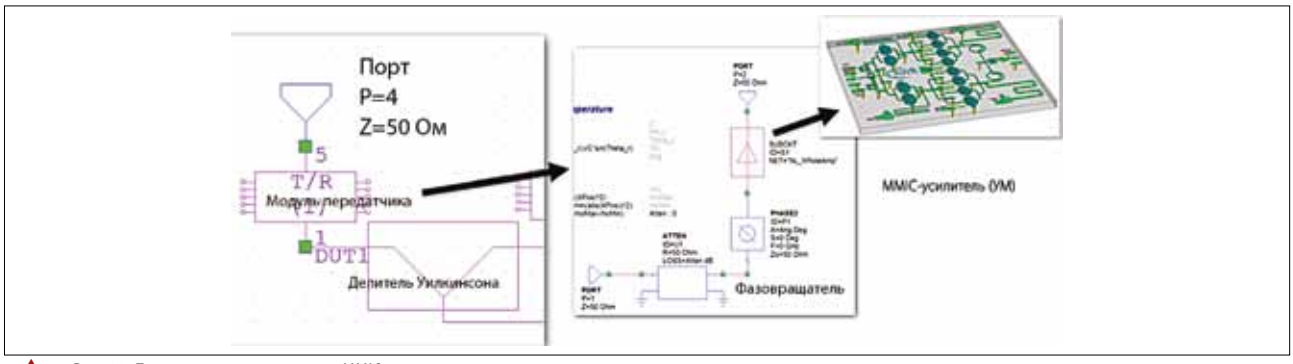


Рис. 20. Пример решения, в котором MMIC-усилитель мощности находится внутри передающего модуля

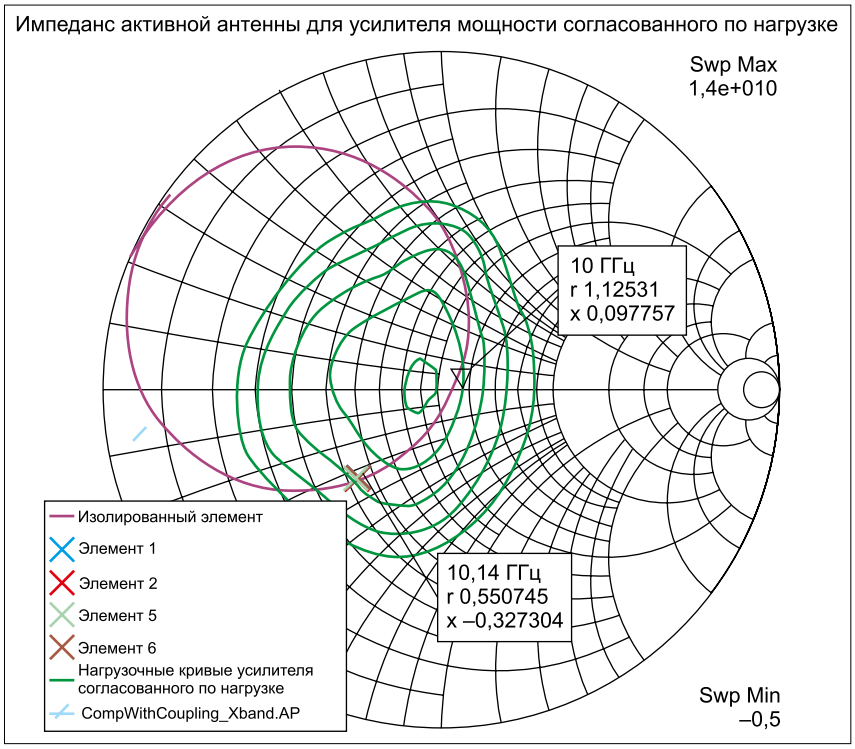


Рис. 21. Изменение входного импеданса изолированного элемента антенного массива в полосе частот 6—14 ГГц (фиолетовый круг), а также кривые нагрузки (зеленый) для усилителя и выходная мощность для различных нагрузок

ченные в результате моделирования усилителя мощности данные подаются обратно в матрицу. Цикл итераций повторяется до тех пор, пока результаты не сходятся. Как видим, это весьма трудоемкий и кропотливый процесс.

Функция In-Situ Measurement (измерения внутри схемы) в пакете Microwave Office обеспечивает связь между схемой и антенной, таким образом автоматически учитывая связь между усилителями и антенной решеткой в простом программном каркасе. Разработчик определяет необходимое для проекта измерение (например, мощность, излучаемую по углу сканирования луча) с помощьюсхемы, которая управляет различными портами антенного массива, указывая на блок S-параметров схемы.

На рис. 19 отображена общая схема питания (фидера), подключенная к 16-элементной антенной решетке. Вход в массив антенны представлен в правой части схемы. Для равномерного распределения мощности среди всех 16 элементов антенной решетки используются делители, для которых применены делители рав-

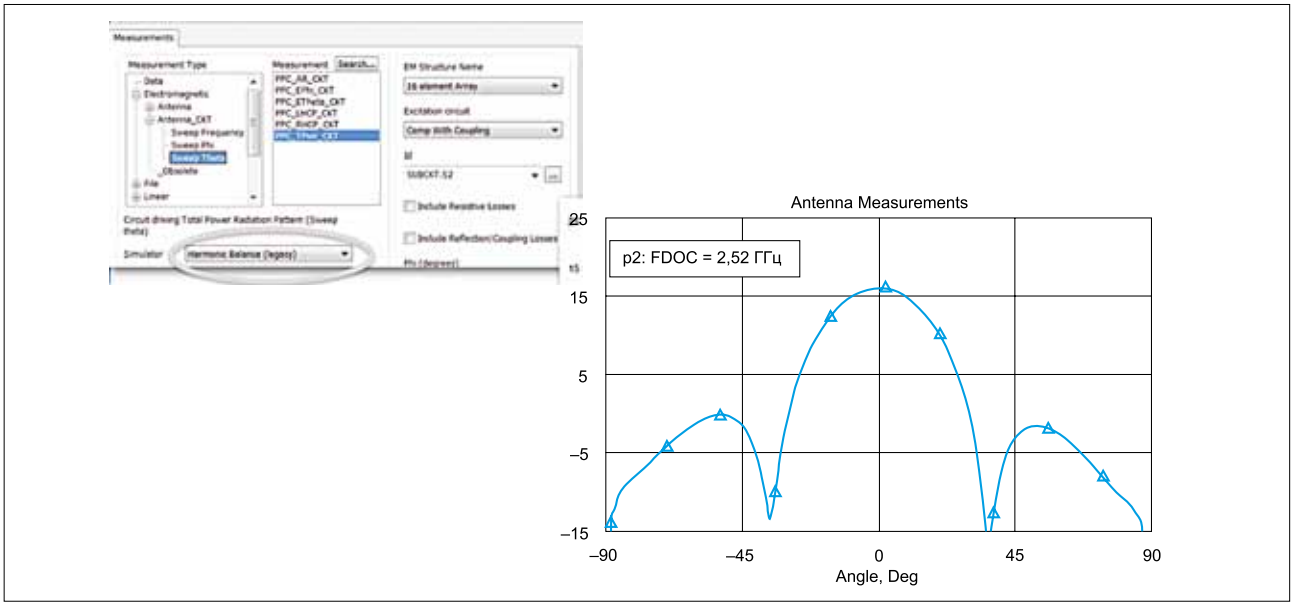


Рис. 22. Использование для моделирования схемы опции Harmonic Balance из пакета Microwave Office

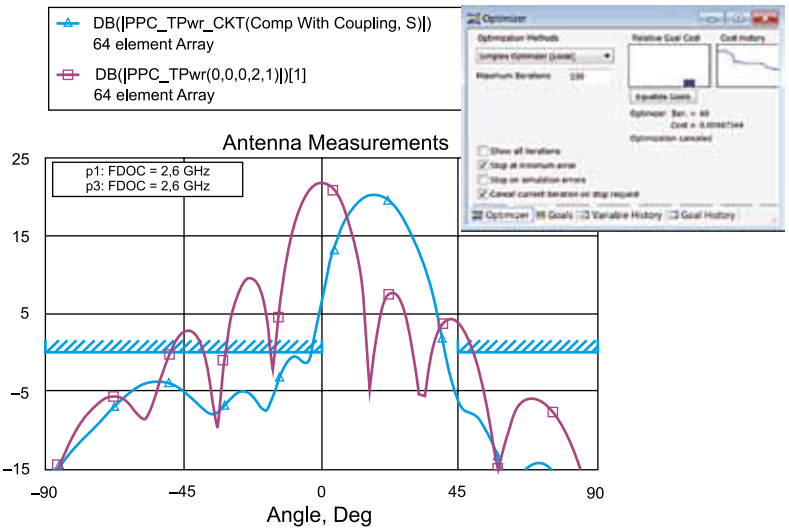


Рис. 23. Оптимизация диаграммы направленности путем изменения фазировки и затухания

ной мощности Уилкинсона (иногда называемые Вилкинсона, Wilkinson power divider). На рис. 19 один из делителей Уилкинсона выделен и показан синим эллипсом.

До того как сигнал достигнет каждого из 16 элементов антенны, он проходит через модуль передачи. Каждый передающий модуль содержит фазовращатель, аттенюатор и усилитель мощности. На рис. 20 показан один из передающих модулей с выполненным внутри фазовращателем, аттенюатором и усилителем. Усилитель управляет элементарным элементом антенны, а диаграмма луча антенной решетки формируется путем изменения затухания и сдвига фаз каждого из сигналов, поступающего на элементы антенны.

Поскольку усилитель мощности по своей природе является нелинейным четрехполюсником, то при изменении затухания для получения его достоверных характеристик требуется учесть изменение нагрузки усилителя. На рис. 21 показано изменение входного импеданса изолированного элемента антенной матрицы в диапазоне частот 6–14 ГГц (фиолетовый круг), а также кривые нагрузки (выделены зеленым) для усилителя и его выходная мощность для различных нагрузок. По мере сканирования луча антенны положение рабочей точки усилителя мощности на нагрузочных кривых будет меняться, так что разработчик может должным образом учитывать эти изменения. В приведенном на рис. 21 примере импедансы элементов массива примерно одинаковы, а сама изолированная матрица соответствует ожиданиям.

Снятие диаграммы излучения антенны для всех ее элементов выполняется однотипно. Это связано с тем, что мощность, подводимая к элементам, известна, а для моделирования схемы в Microwave Office предусмотрена опция Harmonic Balance (метод гармонического баланса, использующий в данном случае вычисленные ранее результаты). На рис. 22 показано измерение полной излучаемой мощности в направлении геометрической оси антенны (Theta direction).

Затем, при необходимости, диаграмму направленности антенны можно оптимизировать. В этом случае диаграмма оптимизируется путем изменения фазировки и ослабления элементов антенной матрицы (рис. 23). Фиолетовым цветом на рис. 23 указано возбуждение до оптимизации, а синий график представляет собой оптимизированную диаграмму направленности: как можно видеть, теперь боковые лепестки лежат ниже критического уровня, отмеченного синей полосой. Одновременно с оптимизацией диаграммы направленности могут быть скорректированы и параметры усилителя мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для комплексной 5G- и радиолокационной инфраструктуры требуется интеграция антенн и приемо-передающих модулей. Задача для программного обеспечения для автоматизации проектирования электроники заключается в поддержке нескольких технологий, требующих использования различных схемных и электромагнитных симуляторов. Иерархия, как для моделирования схем, так и для уровня оценки поведения электромагнитного поля конструкции в целом может использоваться для работы над проектами, совмещающими несколько физически различных технологий. А совместное моделирование и оценка поведения антенн и соответствующих им схем возбуждения с использованием предлагаемого подхода позволяет проанализировать их и оценить и в конечном итоге с помощью функции совместного моделирования и функции In-Situ Measurement спроектировать как единое целое.

Видео, представленное на Международной конференции по электронике EDI CON 2017, демонстрирующее совместное моделирование в среде проектирования NI AWR от компании National Instruments схем и одновременно поведение электромагнитного поля, доступно для просмотра по ссылке [2]. Кроме того, дополнительная информация, касающаяся анонсированного компаниями IBM и Ericsson модуля с фазированной антенной решеткой, опубликована в [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *IBM and Ericsson Announce 5G mmWave Phased Array Antenna Module.* www.microwavejournal.com/articles/27830-ibm-and-ericsson-announce-5g-mmwave-phase-array-antenna-module
2. *EM/Circuit Co-Simulation of T/R Front-End Modules and Actively Scanned Antenna Arrays.* www.youtu.be/F_48_RXQrvM
3. *IBM and Ericsson Announce 5G mm Wave Phased Array Antenna Module. Microwave Journal*/www.microwavejournal.com/articles/27830-ibm-and-ericsson-announce-5g-mmwave-phase-array-antenna-module
4. www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss
5. www.cst.com/