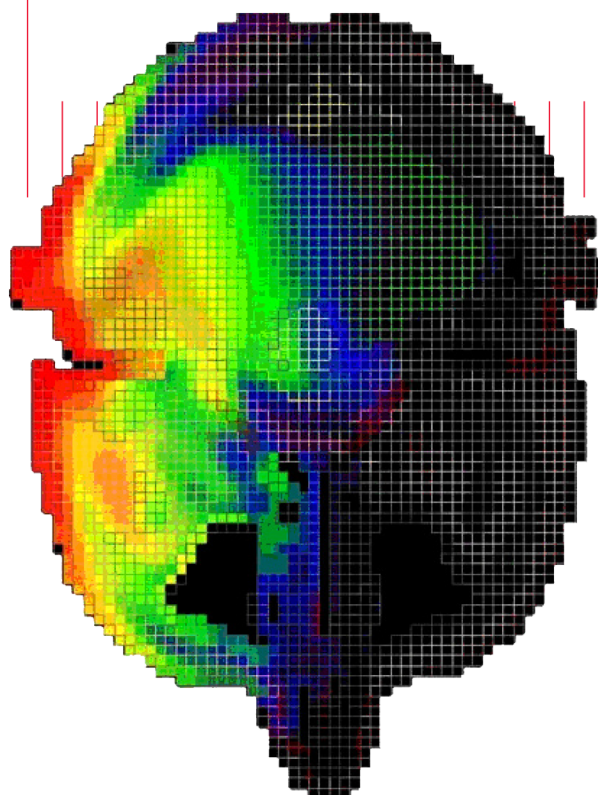


Keysight Technologies

Современные программные средства
ЭМ моделирования в СВЧ диапазоне

Технический обзор



0 dB = 2.496e+000 W/kg Mag SAR Displayed Spatial location (mm): (100 55 132 90 174 00)
-21.0 (dB) 0.0 (dB) MagSAR: 0.120(W/kg)[-1.318e+001(dB)]
Cell location: (64 65 79)(X 19)(Y 19)(Z 5)(?)

Введение

Растущее число и сложность высокочастотных систем порождает увеличение потребности в точном электромагнитном (ЭМ) моделировании всё более крупных фрагментов систем. Для ЭМ моделирования применяется несколько разных подходов, и хотя ни один из этих методов не имеет явных преимуществ перед другими, каждый из них ориентирован на одну или несколько областей применения. В этой публикации мы обсудим три наиболее распространённых метода ЭМ моделирования: метод моментов (MoM), метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD), а также опишем область применения каждого из этих методов.

Авторы: Ян Ван Хесе (Jan Van Hese), Keysight Technologies
Яник Серку (Jeannick Sercu), Keysight Technologies
Дэви Писсуорт (Davy Pisssoort), Keysight Technologies
Хи-Су Ли (Hee-Soo Lee), Keysight Technologies

Метод моментов

Обзор метода моментов

Из всех методов ЭМ моделирования метод моментов (МоМ) реализуется сложнее всего, поскольку включает объёмный расчёт функций Грина и интегрирование ЭМ связей. Уравнения Максвелла преобразуются в интегральные уравнения, которые после дискретизации дают объединённое матричное уравнение структуры.

Преимущество этого преобразования в том, что распределение тока по поверхности проводника представляется в виде главных неизвестных. Это в корне отличается от других методов, в которых в качестве главных неизвестных используются обычно электрические и/или магнитные поля (повсеместно присутствующие в пространстве решений). В сетке нужно учитывать только проводящие поверхности, по которым протекает ток (рис. 1). В результате число неизвестных (или размерность матрицы) получается значительно меньше. Это даёт очень эффективную методику моделирования, которую можно применять к очень сложным структурам.

Но за это преимущество приходится расплачиваться тем, что интегральные уравнения не применимы к общим 3-мерным структурам. Причиной является наличие функций Грина. Расчёт функций Грина возможен только для свободного пространства или для структур, представляющих собой параллельные слои. Эти так называемые 3D планарные структуры могут иметь любую форму в плоскости наложенных слоёв, но особенности вертикальной геометрии (переходные отверстия) могут быть только ортогональными. В эту категорию попадают многие практические ВЧ и СВЧ структуры. Поэтому метод моментов распространён очень широко и часто применяется для моделирования печатных антенн, СВЧ ИС, ВЧ плат, многокристалльных ИС, ВЧ ИС, монолитных ИС и ВЧ модулей.

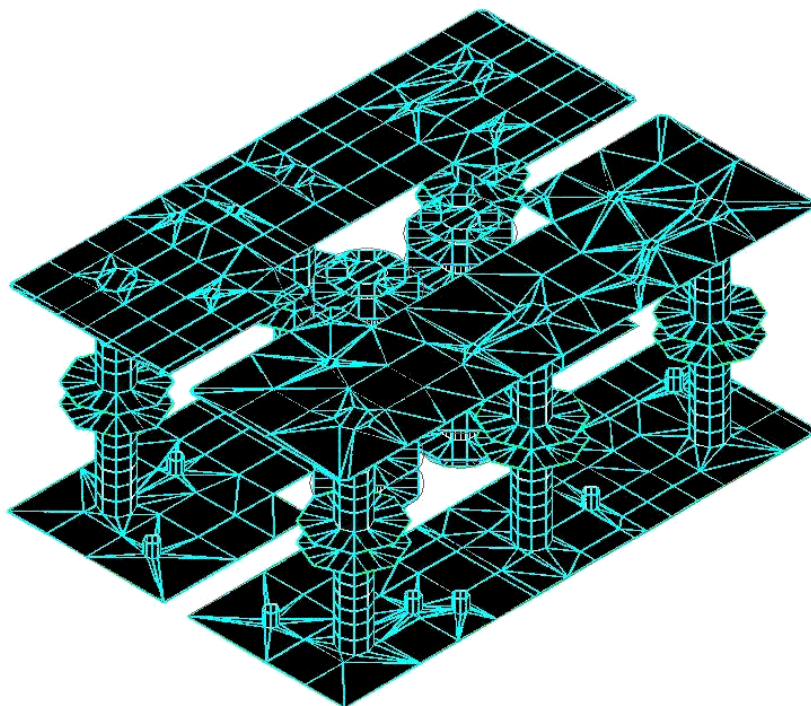


Рис. 1. МоМ-дискретизация 3D планарной структуры (дифференциальные переходные отверстия печатной платы)

Последние усовершенствования метода моментов

С ростом скоростей передачи данных и частот, сложность электронных схем, требующих ЭМ моделирования, поднялась до такого уровня, что существующая технология МоМ начала сталкиваться с проблемами производительности (по объёму вычислений и по скорости). Главным узким местом стал объём памяти и высокая плотность матрицы соединений. Для структуры с N дискретными элементами объём памяти растёт как N^2 , а время решения матрицы растёт как N^3 (при использовании прямого симулятора) или как N^2 (при использовании итерационного симулятора). Такой рост сильно ограничивает производительность и не позволяет моделировать очень большие и сложные структуры. Появившееся недавно революционное решение заключается в применении методов сжатия матриц, которые уменьшают рост требований до $N \log N$. Преимущества технологии $N \log N$ по расходу памяти и времени вычислений воистину огромны и растут со сложностью структуры.

Применение метода моментов для моделирования печатных плат

С улучшением метода сжатия матрицы до $N \log N$, симулятор метода моментов оказался хорошо оптимизированным для работы с очень сложными схемами. Например, рассмотрим моделирование дифференциальных переходных отверстий в 16-слойной печатной плате (рис. 2). Этот пример демонстрирует преимущества интегрального представления МоМ. Обратите внимание, что сетка, используемая для слоёв «земли» (рис. 1), содержит только ячейки в зазорах между полигоном и переходным отверстием. Вся металлизация слоя «земли» учитывается в основной части интегральных уравнений. Результирующая система уравнений содержит всего 5539 неизвестных.

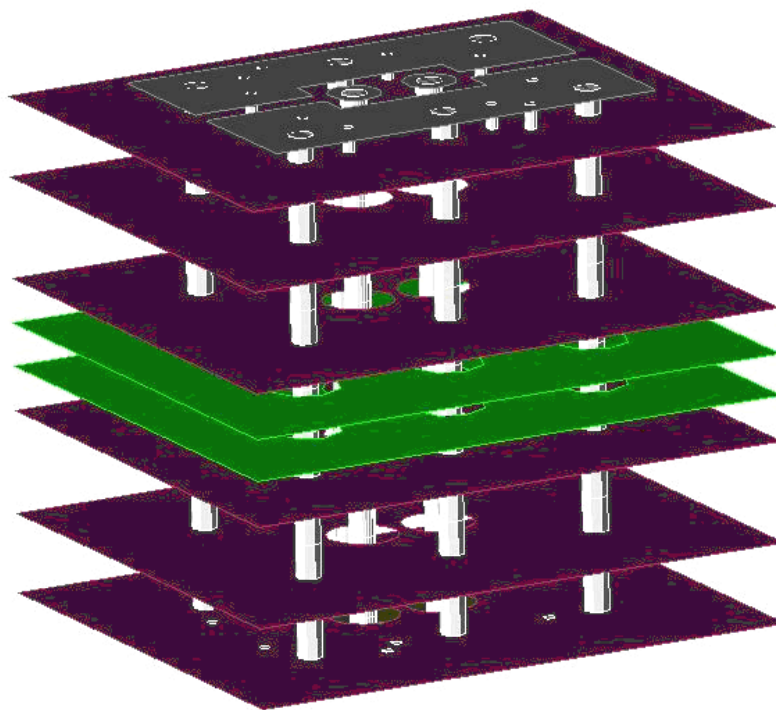


Рис. 2. Дифференциальные переходные отверстия в 16-слойной печатной плате (изображение растянуто по вертикали).

Широкополосные результаты моделирования групповой задержки и вносимых потерь получаются менее чем за 10 минут с помощью симулятора Momentum на стандартном компьютере с 4-ядерным процессором и операционной системой Linux. Корреляция с измеренными данными показана на рис. 3.

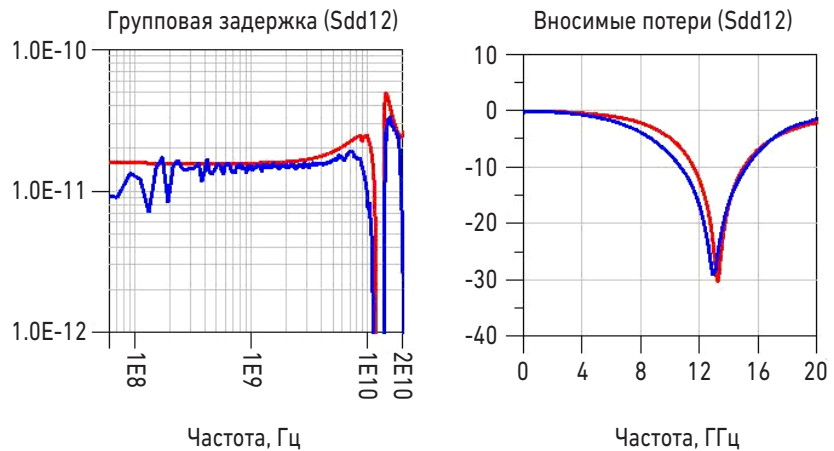


Рис. 3. Смоделированная (красная кривая) и измеренная (синяя кривая) групповая задержка и вносимые потери

Авторы выражают благодарность Гутаво Бландо (SUN Microwave Systems) за помощь в подготовке примера печатной платы.

Метод конечных элементов (FEM)

Обзор метода FEM

Симулятор поля FEM имеет несколько преимуществ по сравнению с МоМ. Например, симулятор FEM может обрабатывать структуры произвольной формы, такие как соединительные перемычки, конические переходные отверстия, шариковые и столбиковые выводы, геометрия которых неоднородна по оси Z. Кроме того, симуляторы FEM могут моделировать диэлектрические бруски или подложки конечного размера. Эта возможность может пригодиться во многих случаях, например, в ходе разработки объёмных резонаторов. Однако в общем случае этот метод работает медленней, чем МоМ, особенно для планарных устройств. На рис. 4 показан пример, в котором FEM имеет преимущества перед обычным МоМ, в частности из-за 3-мерного характера структуры.

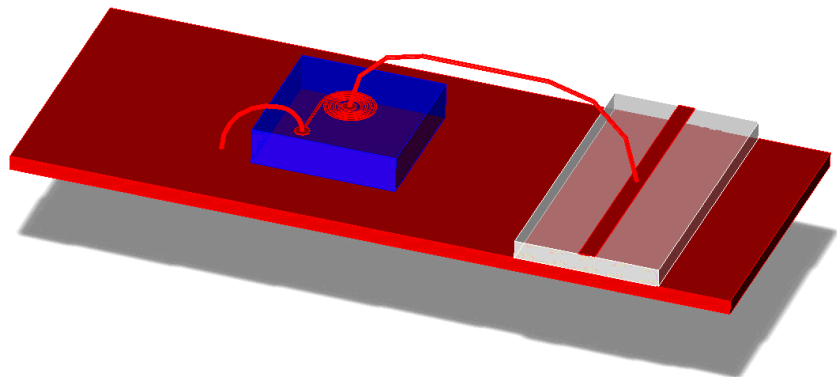


Рис. 4. Пример 3D моделирования FEM спиральных индуктивностей с соединительными перемычками (цепь смещения).

В основе метода FEM лежит объёмная сетка, в которой всё исследуемое пространство разбивается на тысячи мелких областей, и поле в каждой подобласти (элементе) представляется локальной функцией. Геометрическая модель автоматически делится на большое число тетраэдров, причём отдельные тетраэдры состоят из четырёх равносторонних треугольников. Такой набор тетраэдров называется сеткой конечных элементов.

Значения векторного поля (магнитного или электрического) в точках внутри каждого тетраэдра интерполируются из вершины тетраэдра. В каждой вершине сохраняются компоненты поля, касательные к трём рёбрам тетраэдра. Кроме того, можно сохранить компонент векторного поля в средней точке выбранных рёбер, касательный к грани и перпендикулярный ребру. Поле внутри каждого тетраэдра интерполируется по этим узловым значениям.

Компоненты поля, касательные к рёбрам элемента, явно сохраняются в вершинах. Компоненты поля, касательные к грани элемента и перпендикулярные ребру, явно сохраняются в средней точке выбранных рёбер. Значения векторного поля во внутренних точках интерполируются из узловых значений. Представив значения поля таким способом, можно преобразовать уравнения Максвелла в систему уравнений, которая решается традиционными численными методами.

Интеграция 3D ЭМ моделирования в среду САПР ADS

Симуляторы поля FEM используются в разных приложениях, чаще всего разработчики используют их для схемотехнического проектирования, например, для создания и анализа внутренних соединений ИС и т.д. Обычно в ходе проектирования разработчик чертит структуру и запускает ЭМ моделирование в автономном симуляторе поля FEM, после чего возвращает полученные S-параметры в среду проектирования для окончательной проверки конструкции. Однако здесь существует масса избыточных действий, которые сложны, отнимают много времени и порождают ошибки.

Интегрировав симулятор FEM в среду САПР, можно сократить общее время проектирования (время от ввода геометрии конструкции до получения конечных результатов ЭМ моделирования). Впрочем, интегрированная среда 3D ЭМ проектирования не обязательно исключает преобразование данных топологии, избыточные процессы импорта/экспорта и разработку специальных инструментов, таких как утилита для генерации портов. FEM для САПР ADS представляет собой электромагнитный симулятор, полностью интегрированный в топологический редактор ADS, который как раз и служит этой цели.

Пример применения симулятора поля FEM для моделирования корпусов QFN

QFN (плоский четырёхсторонний безвыводный корпус) является очень популярным недорогим решением для ВЧ ИС, СВЧ ИС и многокристальных ВЧ ИС. С ростом рабочих частот для разработчиков ИС стало очень важно знать электрические характеристики корпусов уже на начальных этапах разработки. Какова верхняя частота, на которой может работать корпус, и каково сопротивление изоляции корпуса? Можно ли использовать более дешёвый корпус, чтобы снизить стоимость конечного продукта?

16-выводный корпус QFN размером 3x3 мм хорошо работает до частоты 15 ГГц, демонстрируя обратные потери на печатной плате менее –18 дБ. Корпус QFN с внутренними соединительными проводами можно легко начертить на печатной плате в приложении для создания топологии, как показано на рис. 5, и быстро смоделировать с помощью встроенного симулятора FEM. Разработчикам гораздо проще работать с планарной топологией, чем с 3-мерными средствами проектирования.

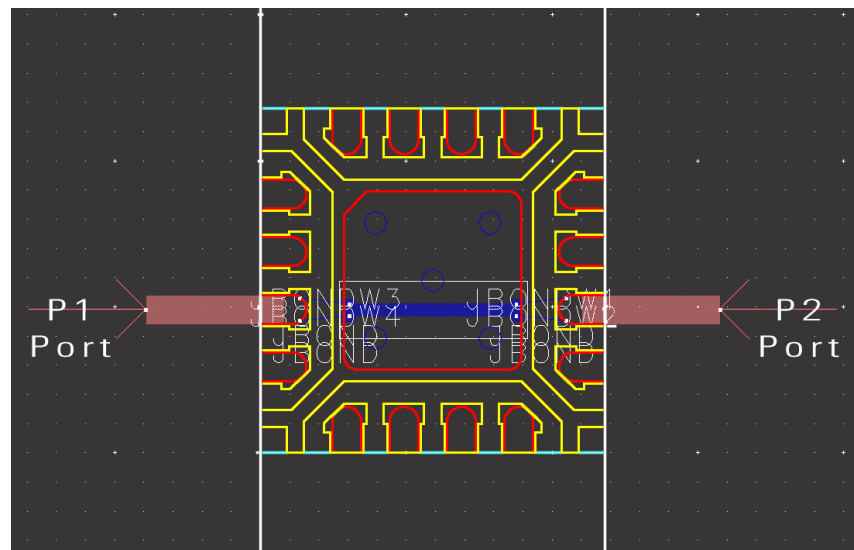


Рис. 5. Корпус QFN на печатной плате в САПР ADS

Параметры корпуса можно улучшить, оптимизировав соединение кристалла с контактами корпуса, чтобы обеспечить стабильный профиль импеданса по всему сигнальному тракту, например, используя два контакта корпуса вместо одного, и более широкий печатный проводник, как показано на рис. 6.

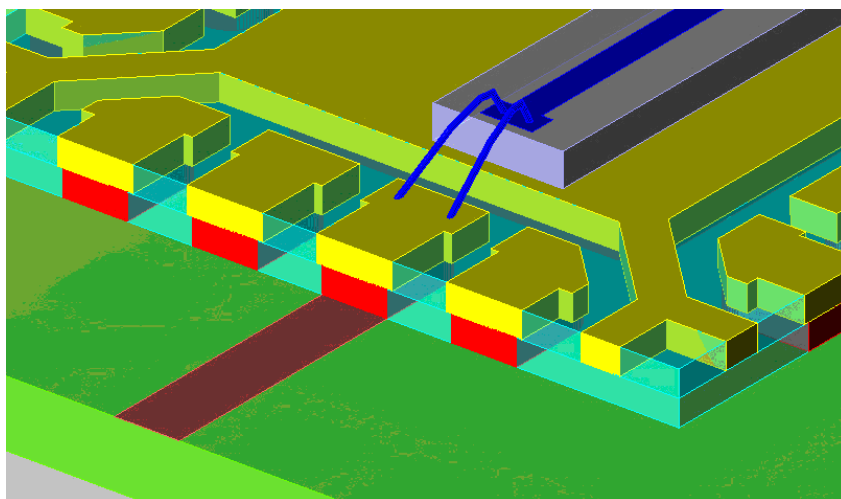


Рис. 6а. Исходная конструкция

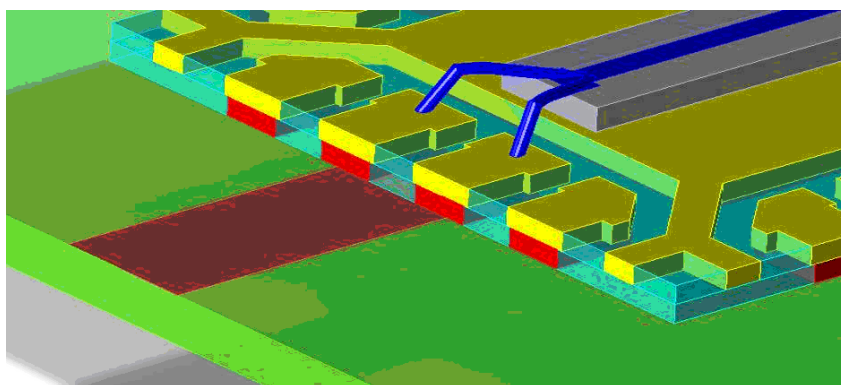


Рис. 6б. Улучшенная конструкция

Эти изменения можно легко выполнить в среде разработки топологии без процессов импорта/экспорта. На рис. 7 показаны улучшенные характеристики корпуса QFN размером 3x3 мм, полученные с помощью встроенного симулятора поля FEM.

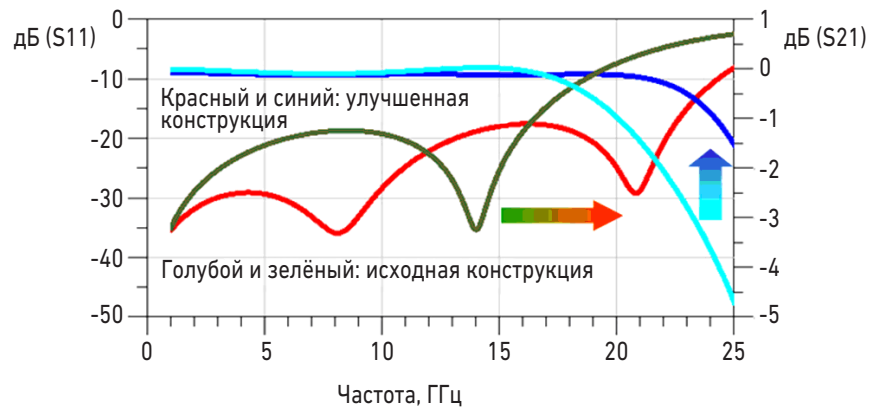


Рис. 7. Улучшенные характеристики корпуса QFN

Метод конечных разностей во временной области (FDTD)

Обзор метода FDTD

В отличие от описанных выше алгоритмов МоМ и FEM, которые лишь неявно решают уравнения Максвелла путём решения плотных или разреженных матриц, алгоритмы конечных разностей во временной области (FDTD) [1]–[2] решают уравнения Максвелла непосредственно в явном виде. Как и в методе FEM, неизвестные в FDTD получаются из 3-мерной выборки электрических и магнитных полей во всём пространстве (ограниченном на практике условиями пограничного поглощения). В то время как сетки FEM состоят обычно из ячеек в форме тетраэдров, сетки FDTD строятся обычно из прямоугольных ячеек, которые называют также ячейками Йе. По ходу решения систем линейных уравнений, метод FDTD обновляет значения полей интервал за интервалом (тем самым явно следуя за электромагнитными волнами, по мере их распространения через структуру). В результате одно моделирование FDTD может дать данные в сверхшироком диапазоне частот.

Благодаря надёжному алгоритму и способности работать с широким диапазоном материалов и устройств, обладающих нелинейными характеристиками, FDTD используется в разнообразных приложениях: проектирование антенн, СВЧ схем, исследование био/ЭМ эффектов, проблемы ЭМС/ЭМП, оптоэлектроника.

Популярность симуляторов на базе FDTD, даже в большей степени, чем симуляторов МоМ и FEM, растёт благодаря последним достижениям в области расширения аппаратных и вычислительных ресурсов компьютерного оборудования. FDTD является изначально параллельным методом и поэтому очень хорошо адаптируется к вычислительным возможностям большинства новейших CPU (универсальных процессоров) и GPU (графических процессоров).

Применение FDTD для исследования излучения мобильных телефонов

С каждым новым поколением мобильных телефонов их антенные системы становятся всё сложнее. Разработчики антенн сталкиваются не только со сложными техническими требованиями (многодиапазонность, эффективность и т.п.), но и с требованиями законодательства (удельный коэффициент поглощения или SAR, совместимость со слуховыми аппаратами или НАС и т.п.) и проблемами стоимости. Кроме того, многие близкорасположенные к антеннам объекты (аккумуляторы, камеры и т.п.) сильно влияют на параметры антенной системы, делая абсолютно необходимым исследование характеристик антенны внутри готового телефона. Взаимодействие с реальными объектами, например, нарушение настройки антенны при поднесении телефона к человеческому телу, нужно учитывать на самых ранних этапах проектирования.

Благодаря эффективному формированию сетки, FDTD является в настоящее время основным алгоритмом проектирования сложных антенных систем для мобильных телефонов. На рис. 8 показано изменение обратных потерь мобильного телефона при поднесении его близко к голове. Схема была смоделирована в САПР Electromagnetic Professional (EMPro) компании Keysight. Мобильный телефон, голова и рука импортировались из разных типов CAD-файлов.

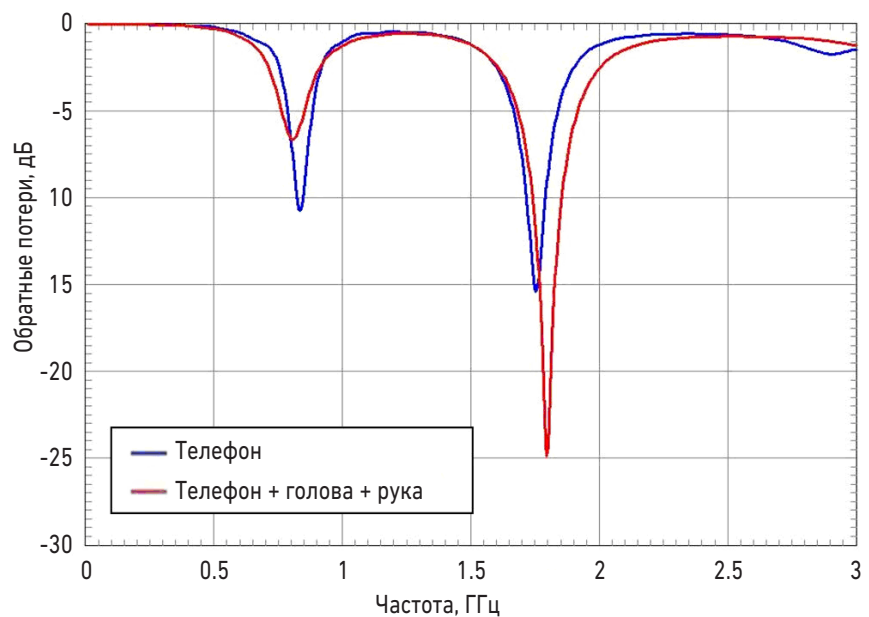


Рис. 8. Изменение обратных потерь мобильного телефона вблизи головы и руки

Расширенная последующая обработка позволяет разработчикам уже на очень ранних этапах проектирования определить, соответствует ли мобильный телефон требованиям стандартов ЭМС. На рис. 9 показано распределение удельного коэффициента поглощения (SAR) внутри стандартной антропоморфной модели (SAM) головы, вызванное мобильным телефоном, и значения ближнего поля на расстоянии 10 мм от выхода громкоговорителя мобильного телефона. Последние данные позволяют разработчикам оценивать совместимость мобильного телефона со слуховыми аппаратами.

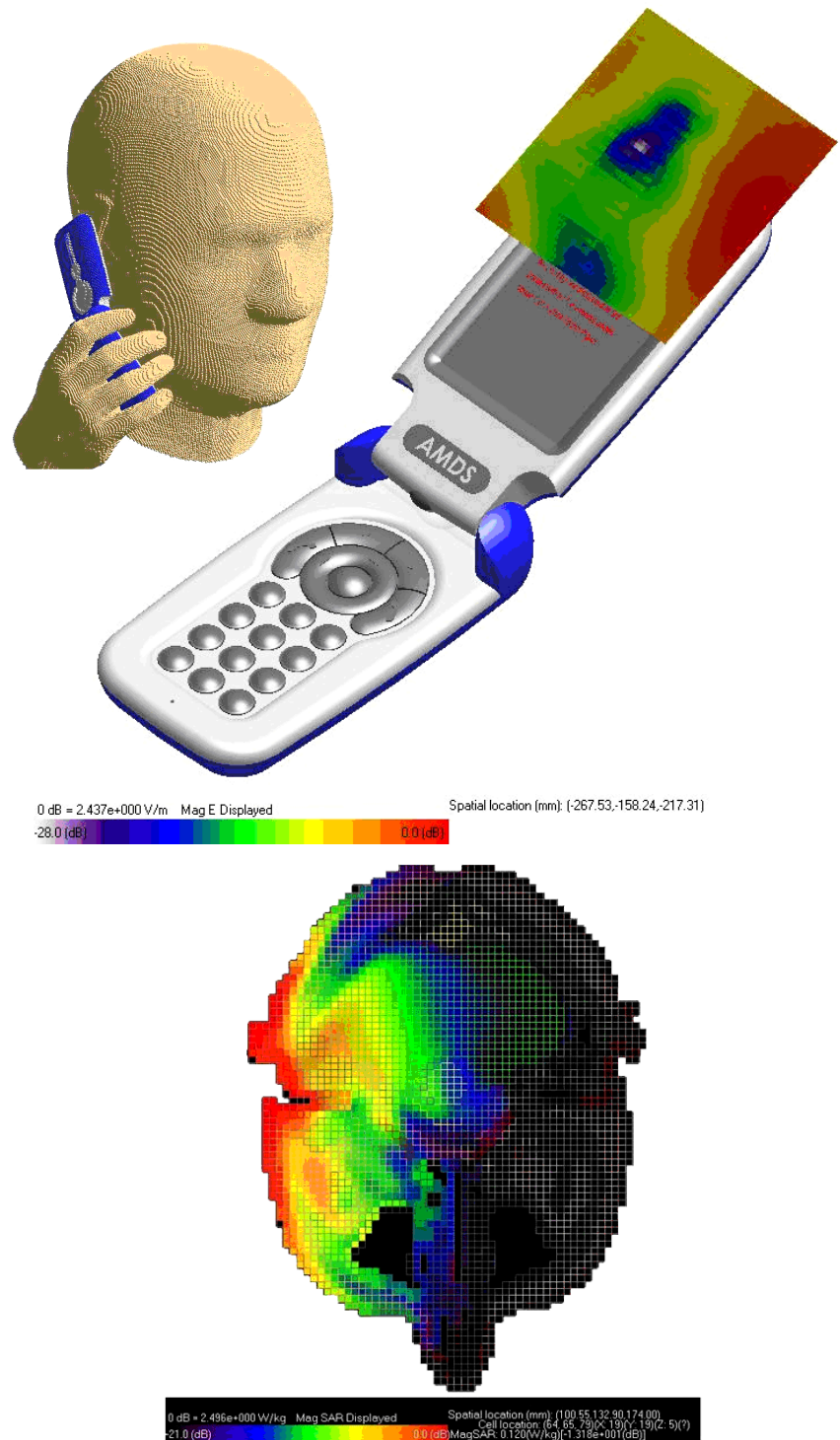


Рис. 9. Сетка FDTD мобильного телефона вблизи головы и руки (вверху).
Распределение SAR внутри SAM-головы и искажение ближнего электрического поля
в области сканирования HAC (внизу)

Заключение

В этой публикации описано применение трёх основных методов ЭМ моделирования и показано, что МоМ имеет определённые преимущества при моделировании сложных 3D планарных структур, тогда как FEM позволяет рассчитывать дополнительные 3D элементы, а FDTD даёт преимущества при решении геометрически сложных 3D структур.

Литература

[1] К. Йе, «Численное решение задач с начальными граничными значениями с помощью уравнений Максвелла в изотропных средах», IEEE Trans. Antennas Prop., AP-14, 1966 г., сс. 302-307

[2] А. Тафлов, С. Хагнесс, Вычислительная электродинамика, 3-е издание, Artech House, 2005 г.

Обучение, поддержка и обслуживание – где нужно и когда нужно

Продукция Keysight поддерживается командой опытных прикладных инженеров и специалистов технической поддержки мирового класса, которые предложат вам подходящее ПО и проконсультируют по решениям, повышающим продуктивность проектирования и позволяющим добиться долговременного успеха. Мы предлагаем всемирную техническую поддержку на родном языке через интернет, по электронной почте, телефону и факсу.

Кроме того, наш интернет-центр знаний Keysight EEsof работает круглосуточно и содержит всеобъемлющую информацию и загружаемые примеры для всех наших продуктов. Он содержит обновления программного обеспечения и имеет функцию отслеживания, которая упрощает подачу заявок и последующее управление ими. Функция поиска помогает найти и отсортировать доступные решения по дате, популярности или по рейтингу. Кроме того, в центре знаний работают форумы по обсуждению продуктов, на которых можно общаться с другими пользователями, инженерами поддержки и разработчиками. И вы можете пройти дистанционное обучение там, где удобно и когда удобно через краткие электронные курсы и информационные сессии.

Процесс проектирования каждой группы разработчиков имеет свои уникальные особенности. Чтобы сберечь время и учесть ваши специфические требования, воспользуйтесь нашими консультациями по СВЧ ИС, ВЧ ИС, платам, модулям и проектированию системного уровня.

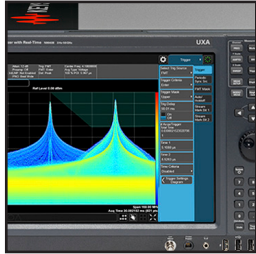
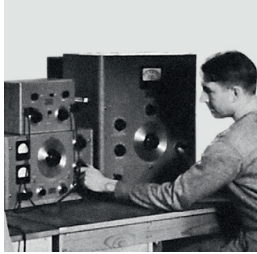
Дополнительная информация о САПР Keysight приведена на странице www.keysight.com/find/eesof.

Если вам нужна дополнительная помощь по тестированию и измерениям, посетите страницу www.keysight.com/find/contactus.

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по проверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

www.keysight.com/find/eesof

Российское отделение

Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб, 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-16-10-14)



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.

Сертифицировано DEKRA на соответствие стандарту ISO 9001:2015

Система управления качеством