

Качественная оценка вычислительных методов электродинамики

на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн

В статье приведено сравнение результатов СВЧ-моделирования двух микрополосковых антенн, выполненных с помощью пяти предназначенных для этих целей широко распространенных коммерческих программных продуктов и одного научного пакета собственной разработки. Авторы приложили максимум усилий, чтобы гарантировать наиболее оптимальное использование настроек и возможностей каждой программы для выявления различий в полученных результатах. Данное исследование подчеркивает необходимость понимания принципов трехмерного моделирования электромагнитных (EM) полей и демонстрирует свойственные методам недостатки. Кроме того, предложены некоторые рекомендации, которые могут упростить начальный выбор EDA-продуктов для EM-моделирования.

**Александр Васильченко
Ив Схольц
Вальтер Де Раад
Ги Ванденбош**

Введение

В настоящее время многие разработчики антенн используют специализированные EDA-программы для EM-расчетов. В основе работы подобных программных продуктов лежит численное решение уравнений Максвелла в интегральной или дифференциальной форме. Основополагающий метод решения, несомненно, влияет на эффективность и точность, с которыми могут быть смоделированы те или иные высокочастотные компоненты. Однако коммерческий интерес в большей степени фокусируется не на подобных теоретических суждениях, а на доступных методах представления результатов. Поэтому у пользователей EDA-продуктов может сложиться впечатление, что имеющийся в наличии тот или иной программный пакет способен предоставить строгое решение для задач электродинамики любой сложности. Данная статья призвана сформировать у читателя правильное представление по данному вопросу, и поэтому фокусируется, главным образом, на возможностях и ограничениях методов прикладной электродинамики. Представленные программы для расчетов EM-полей базируются на различных методиках, а именно: на методе моментов (МоМ), методе конечных элементов (FEM) и методе конечного интегрирования (FIT). Данная статья ограничивается оценкой качества расчета коэффициента возвратных потерь антенны, оставляя читателю сравнение таких характеристик, как соотношение цены и качества или удобство пользовательского интерфейса.

Сравниваемые программные пакеты

Сначала было выполнено сравнение возможностей программы MAGMAS 3D, разработанной для на-

учных целей в Католическом университете Лювена (Бельгия), с другими коммерческими программами, использующими метод моментов (МоМ). Несколько позднее в настоящий обзор были включены результаты, полученные с помощью программ, использующих FEM- и FIT-методы. Ниже перечислены сравниваемые программы для расчета EM-задач, где первые четыре МоМ-пакета расположены в порядке возрастания сложности геометрии рассчитываемых структур:

1. ADS Momentum [1] предоставляет разносторонние настройки по контролю наложения сетки. Сетка может комбинировать не только треугольники и прямоугольники, но и полигоны любой сложности. Это позволяет существенно сократить количество переменных для расчета плоскостойких структур, тем самым ускоряя вычисления. Однако моделированию полностью трехмерных структур препятствует неспособность рассчитывать диэлектрические слои конечных размеров. Это ограничение было снято в последней версии пакета ADS, куда был включен модуль EMDS, базирующийся на методе конечных элементов (FEM).
2. MAGMAS 3D [2, 3] — некоммерческий программный продукт, использующий МоМ в спектральной области, и поэтому относительно быстрый. Доступность исходного кода программы предоставляет пользователям максимальную гибкость настроек. Способность рассчитывать ограниченные по объему диэлектрики в квазитрехмерном приближении позволяет анализировать объекты с неоднородными диэлектрическими подложками.
3. IE3D [4] — пакет способен рассчитывать полностью трехмерные объекты, используя неоднородную сетку, состоящую из треугольников и прямоугольников.

4. FEKO Suite [5] позволяет моделировать полностью трехмерные структуры, используя МоМ или комбинацию МоМ и FEM на треугольной сетке разбиения. Кроме того, комбинация метода моментов с методом геометрической оптики или единой теории дифракции делает возможным EM-моделирование очень больших объектов.
5. HFSS [6] — пакет использует FEM-метод с тетраэдральным разбиением моделируемой структуры. Каждый отдельный элемент сетки может состоять из определенного материала, что позволяет программе HFSS анализировать очень сложные геометрии с различными диэлектрическими неоднородностями. Автоматизированный механизм адаптации сетки разбиения позволяет правильно воспроизводить форму объектов без вмешательства пользователя.



Рис. 1. Готовая к измерениям антенна на однородной подложке со смонтированным SMA-разъемом

6. CST MWS [7] использует FIT-метод, который в случае применения декартовой системы координат может рассматриваться как метод конечных разностей во временной области, поэтому сетка выполнена в виде шестигранников (кубической формы). Вычисления во временной области позволяют решать EM-задачу для всего диапазона частот за одну итерацию, что делает этот метод быстрым для решения сверхширокополосных задач. Кроме того, в пакет CST MWS включен вычислительный модуль, основанный на FEM-методе и использующий пирамидальную сетку, а также модуль для вычислений собственных мод (Eigenmode).

Тестовые микрополосковые антенны

В качестве тестовых структур для EDA-пакетов были выбраны прямоугольные микрополосковые антенны, получившие широкое распространение из-за простоты моделирования и изготовления. Первая «классическая» планарная антенна изготовлена на однородной подложке из высокочастотного ламината компании Rogers RO4003C ($\epsilon = (3,38 - j0,0074) \epsilon_0$) и толщиной 1,524 мм (рис. 1). Программы, основанные на МоМ, строго моделируют по-

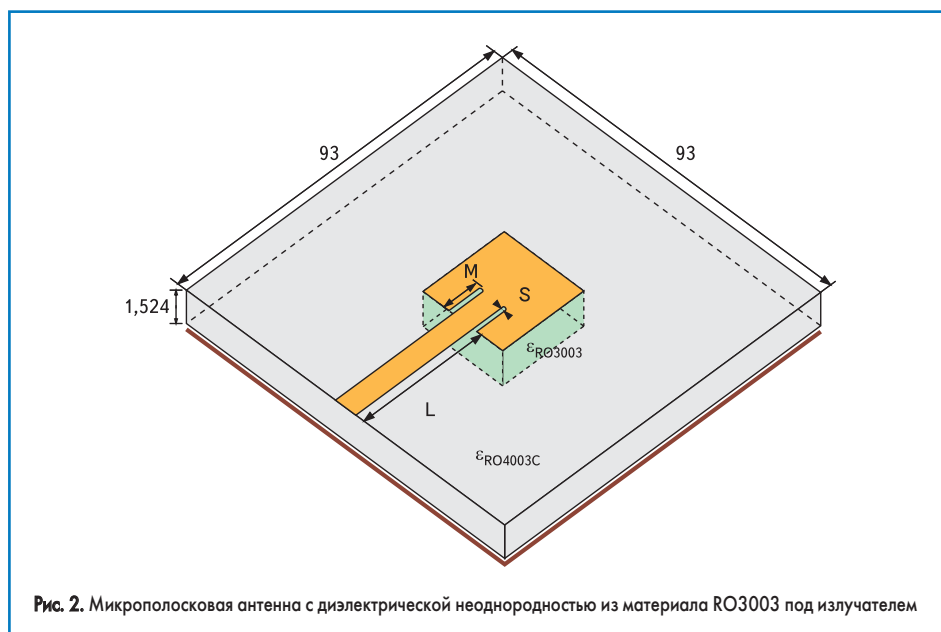


Рис. 2. Микрополосковая антенна с диэлектрической неоднородностью из материала RO3003 под излучателем

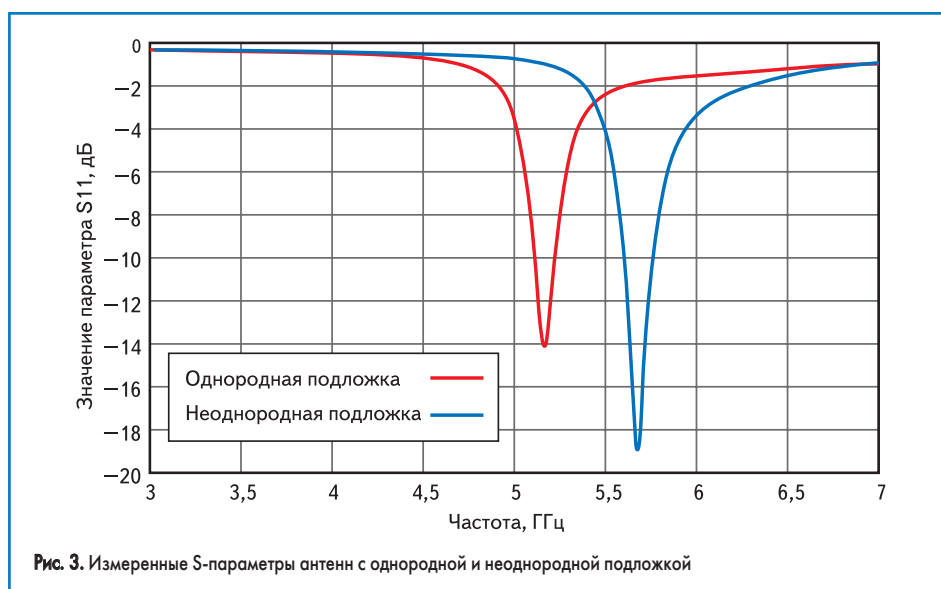


Рис. 3. Измеренные S-параметры антенн с однородной и неоднородной подложкой

добные слоистые структуры при условии, что подложка имеет бесконечно протяженные размеры по осям X и Y, но имеет конечную толщину по оси Z. Вторая антенна имеет те же размеры, что и первая, но выполнена с применением под излучающим элементом другого диэлектрика со значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_d = (3,00 - j0,0039) \epsilon_0$. Подобные технические приемы по изменению диэлектрических свойств подложки применяются для улучшения диаграммы направленности антенны или для контроля взаимной связи расположенных на подложке излучающих элементов [8, 9].

Микрополосковая антенна, содержащая диэлектрики конечных (под излучателем) и бесконечных размеров, является серьезным испытанием для методов как интегральных, так и дифференциальных уравнений. До тех пор, пока диэлектрическая неоднородность локализована и имеет относительно малые размеры, она может быть описана квазитрехмерными объемными токами с использованием МоМ, тогда как бесконечно «растянутая» подложка аналитически рассчитывается посредством функции Грина. Трудность для мето-

дов дифференциальных уравнений состоит в «сшивании» результирующих полей и токов на границе разных диэлектриков.

Структура антенны с неоднородной подложкой представлена на рис. 2. Квадратный излучатель с размерами 15,2×15,2 мм запитывается микрополосковой линией длиной $L = 30,4$ мм и шириной 3,8 мм. Волновое сопротивление всей антенны также контролируется симметричными прорезями в излучателе с размерами $M = 5,7$ мм и $S = 0,63$ мм. Нижняя часть антенны представляет собой сплошной заземленный экран. Для подключения измерительных приборов к микрополосковой линии на краю подложки обеих антенн был припаян прямой коаксиальный PCB-разъем типа SMA-S50-0-45 (Huber&Suhner) с сопротивлением 50 Ом. Измерения производились векторным анализатором цепей HP85107B в небольшой безэховой камере с ферритовыми поглотителями для подавления наведенных токов на коаксиальном кабеле. На рис. 3 изображены результаты измерения возвратных потерь (параметр S11) для антенн на однородной подложке (красная кривая) и на неоднородной подложке (синяя кривая).

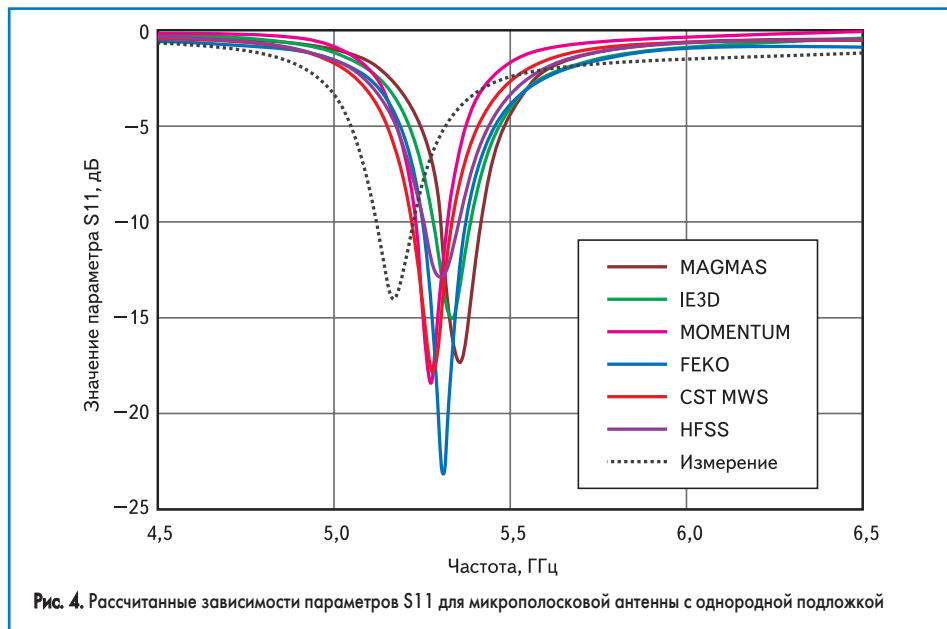


Рис. 4. Рассчитанные зависимости параметров S11 для микрополосковой антенны с однородной подложкой

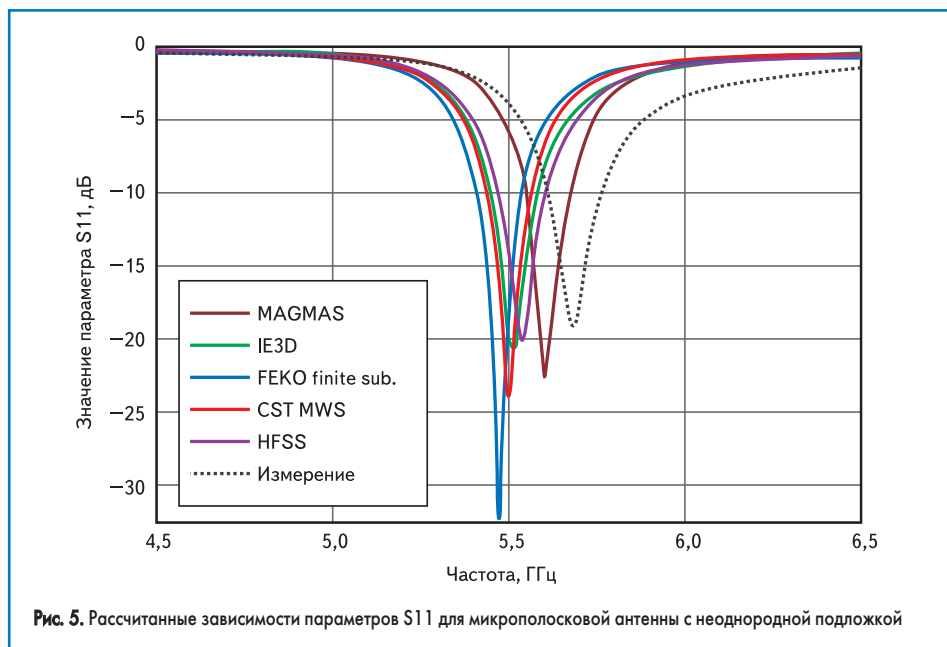


Рис. 5. Рассчитанные зависимости параметров S11 для микрополосковой антенны с неоднородной подложкой

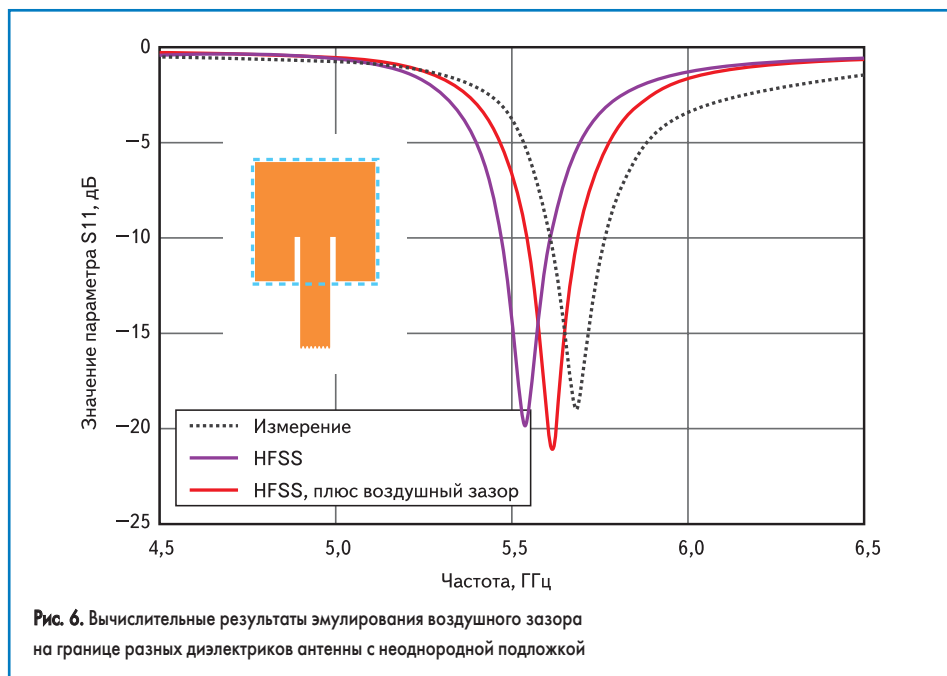


Рис. 6. Вычислительные результаты эмуляции воздушного зазора на границе разных диэлектриков антенны с неоднородной подложкой

Сравнение результатов вычисления

Рассчитанные частотные зависимости параметров S11 для частотного диапазона от 4,5 до 6,5 ГГц показаны на рис. 4, 5. Эти результаты обобщены в таблицах 1, 2. Минимальное (Fmin) и максимальное (Fmax) значения частоты при уровне возвратных потерь S11 = -10 дБ. Разность между Fmax и Fmin определяет ширину полосы пропускания при S11 = -10 дБ. Результаты вычислений показывают предсказуемое смещение резонансной частоты в сторону более высоких частот, когда RO4003C подложка локально заменена диэлектриком RO3003. Это согласуется с теорией и измерениями, так как добавление материала с меньшей диэлектрической проницаемостью уменьшает «электрические» размеры антенны.

Более детальное рассмотрение результатов вычислений показывает их существенные расхождения в различных EDA-пакетах. Разброс измеренной и рассчитанной резонансной частот (F_c = (F_{max}+F_{min})/2) оказывается порядка 3,8% и 5,3% для антенн на однородной и неоднородной подложках соответственно. Таблица 3 представляет относительные результаты вычислений, где F_c-shift — отклонение между значениями F_c измеренного и F_c, промоделированного программой. Рассчитанное отклонение центральной частоты (F_{cD}) позволяет исключить неточности в изготовлении антенн и, соответственно, ошибки измерения. Параметр F_{cD} показывает разброс значений только результатов численного моделирования и определяется выражением:

$$F_{cD} = F_c - F_{cAV},$$

где $F_{cAV} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{ci}$ — только для вычислительных результатов.

Максимальный разброс $F_{cD} \leq 1,58\%$ указывает на погрешности в физической реализации и измерении обеих антенн:

- При присоединении коаксиального разъема к микрополосковой линии неизбежно появляется паразитная индуктивность, что создает сдвиг измеренного резонанса в сторону низших частот. При численном моделировании используется «идеализированный», а сам разъем не моделируется.
- Характеристики, представленные на рис. 6, подтверждают предположение о неплотном контакте диэлектриков и, соответственно, о сдвиге резонанса для антенны, выполненной на неоднородной подложке, в более высокочастотную область.

Относительно расхождения результатов численного моделирования между собой можно сделать несколько допущений:

1. Точность ввода параметров моделей и правильность выбора настроек вычисления: файлы проектов представленных вычислений были согласованы с экспертами всех производителей программных пакетов. Это позволило исключить «человеческий фактор» и несколько улучшить сходимость представленных результатов.

Таблица 1. Абсолютные результаты вычисления параметра S11 при уровне возвратных потерь — 10 дБ для микрополосковой антенны с однородной подложкой

Программа	F _{min} , ГГц	F _{max} , ГГц	F ₀ , ГГц	BW, ГГц
MAGMAS	5,305	5,423	5,364	0,118
IE3D	5,29	5,4	5,345	0,11
FEKO	5,226	5,374	5,3	0,148
MOMENTUM	5,23	5,322	5,276	0,092
HFSS	5,255	5,353	5,304	0,098
CST MWS	5,213	5,326	5,27	0,113
Измерение	5,115	5,22	5,168	0,105

Таблица 2. Абсолютные результаты вычисления параметра S11 при уровне возвратных потерь — 10 дБ для микрополосковой антенны с неоднородной подложкой

Программа	F _{min} , ГГц	F _{max} , ГГц	F ₀ , ГГц	BW, ГГц
MAGMAS	5,55	5,68	5,615	0,13
IE3D	5,47	5,611	5,541	0,141
FEKO	5,322	5,437	5,38	0,115
MOMENTUM	–	–	–	–
HFSS	5,47	5,608	5,539	0,138
CST MWS	5,43	5,555	5,493	0,125
Измерение	5,603	5,758	5,681	0,155

Таблица 3. Относительные результаты вычисления параметра S11 для обеих антенн

Программа	Однородная подложка		Неоднородная подложка	
	F ₀ -shift (%)	F ₀ D (%)	F ₀ -shift (%)	F ₀ D (%)
MAGMAS	0,038	1,02	0,012	1,84
IE3D	0,034	0,66	0,025	0,50
FEKO	0,026	-0,19	0,053	-2,42
MOMENTUM	0,021	-0,64	–	–
HFSS	0,026	-0,11	0,025	0,46
CST MWS	0,02	-0,75	0,033	-0,37
Измерение	0	-2,67	0	3,04

- Сходимость метода:** напрямую зависит от разрешения сетки, при помощи которой происходит дискретизация объекта для численного моделирования. Индуктивная связь рядом расположенных металлических объектов может существенно различаться из-за особенностей наложения как трехмерной, так и двухмерной сетки. Адекватность стандартных настроек разрешения сетки была проверена ручным форсированием разрешения сетки в 2–3 раза. Сетки с повышенным и стандартным разрешением выдавали практически одинаковые результаты, подтверждая сходимость использованных методов.
- Точность при моделировании потерь** является важным фактором для материалов с большими потерями, таких как широко распространенный PCB-ламинат FR4 ($\tan\delta = 0,02$). Испытуемые антенны с медными проводниками на подложках из ламинатов Rogers с пренебрежительно малыми значениями $\tan\delta = 0,002$ продемонстрировали схожие результаты, будучи промоделированными с потерями или без

Таблица 4. Время, затраченное на вычисления каждым программным продуктом

Программа	Однородная подложка			Неоднородная подложка		
	Количество неизвестных	Время расчета одной частоты, с	Время расчета всего диапазона, с	Количество неизвестных	Время расчета одной частоты, с	Время расчета всего диапазона, с
MAGMAS	579	3,2	132	3627	55	2255
IE3D	403	1	13	999	84	1093
FEKO	598	9,4	122	13 801	929	12 075
MOMENTUM	384	4,3	65	–	–	–
HFSS	60 718	19,7	237	73 394	24,6	296
CST MWS	353 912	–	111	353 912	–	107

Таблица 5. Версии программных пакетов и конфигурации компьютеров, использованных при вычислениях

Программа	Тип процессора	ОЗУ, Гбайт	Операционная система
MAGMAS 3D	Intel Xeon 2,66 ГГц	2	Linux Fedora Core 6
IE3D ver. 12.22	Intel Xeon 2,8 ГГц	4	Windows XP Professional 2002 SP2
FEKO Suite 5.3	AMD Athlon 64 3800+	3,5	Linux x86_64 2.6.11.9
ADS 2006A.400 Momentum	2×AMD Opteron 250 (2,4 ГГц) 64 бит	4	Red Hat Linux 2.4.21-27.ELsmp
Ansoft HFSS ver. 10.1	2×Dual-Core AMD Opteron 285 (2,6 ГГц) 64 бит	8	Windows Server 2003, Standard x64 Edition, SP1
CST MWS 2006B.03	Intel Xeon 2,8 ГГц	4	Windows XP Professional 2002 SP2

потерь. Однако стоит заметить, что производители подобных высокочастотных ламинатов не всегда обеспечивают однородность их диэлектрических свойств, что зачастую является причиной несовпадения численных результатов с результатами измерений.

4. Реализация шага частотной развертки во всех коммерческих пакетах выполнена с помощью адаптивной аппроксимации. Это позволяет интерполировать значения S-параметров, значительно уменьшая количество рассчитываемых точек частотной развертки без априорного знания вычисляемого параметра. Такой подход позволяет значительно уменьшить время вычислений по сравнению с использованием дискретного шага частотной развертки. Для решений в частотной области необходимо задавать достаточно мелкий шаг частоты, чтобы не пропустить узкополосные резонансы. При работе в пакете CST MWS пользователь не нуждается в данных предосторожностях, хотя решение во временной области здесь дает менее точный результат для высокочастотных структур. Использование встроенного авторегрессивного фильтра (AR-filter) в пакете CST MWS обеспечивает быструю сходимость вычислений и предотвращает появление типичных осцилляций, наблюдаемых в зоне заглушающих колебаний.

5. Моделирование точных размеров диэлектрической подложки или ее бесконечно протяженная аппроксимация: несмотря на то, что во всех программах, использующих метод моментов, были использованы модели бесконечно протяженных подложек, пакеты FEKO и IE3D позволяют моделировать диэлектрические подложки конечных размеров. Численно форсируя граничные условия сверху и снизу подложки, MoM-программы ощутимо теряют присущую методу точность, тогда как строгое решение на поверхностях диэлектрика находится аналитически для бесконечно удаленной подложки.

6. Выбор метода возбуждения вызывает наибольшие изменения результатов конечного моделирования. Ранее упоминалось, что при моделировании антенн не был учтен коаксиальный разъем, так как цель этой статьи состоит в сравнении теоретических возможностей моделирования программных пакетов. Подобный подход в моделировании является стандартным для большинства разработчиков антенн. Однако повсеместное присутствие высокочастотных разъемов при измерениях, вне сомнений, изменяет результаты, требуя от пользователя подобных программ всегда брать в расчет присутствие трехмерной модели разъема. Сегодня непосредственно в MoM-программах это реализовать невозможно, а в FIT- и FEM-программах это приводит к существенному увеличению времени анализа.

Время, затраченное для расчетов одной частотной точки, всего частотного диапазона, а также общее количество переменных анализа представлено в таблице 4. Авторы намеренно представили количество переменных анализа вместо количества анализируемых ячеек, так как это наиболее точно отображает размерность задачи. Для численной задачи модель поля в ячейке описывается ограниченным количеством переменных. Это количество для одной ячейки сетки может варьироваться в зависимости от выбранных пользователем или создателями программы порядком и типом базисных функций. В результате, при одном и том же количестве анализируемых ячеек, но с применением разных базисных функций, реальная сложность задачи может существенно различаться. Поэтому строгое описание размерности численной задачи представлено в таблице 4 количеством неизвестных матрицы. Вследствие лицензионных ограничений расчеты были выполнены на компьютерах различных конфигураций. В таблице 5 показаны использованные конфигурации компьютеров, что дает возможность сравнить относительную скорость вычислений разных программных продуктов.

Заключение

Микрополосковые антенны обладают множеством преимуществ: малыми размерами и весом, простотой изготовления и доступной ценой. Подобные антенны гармонично подходят для интеграции с другими планарными высокочастотными цепями и устройствами, поэтому разработчики программного обеспечения прилагают громадные усилия для создания удобных и точных программ для EM-моделирования. Проведенное сравнение шести таких программ позволяет сделать следующие выводы:

- «Классические» микрополосковые антенны рассчитываются каждым пакетом с разбросом результатов не более чем 1,5%. Программы на основе метода моментов помимо привлекательной цены демонстрируют еще и высокую скорость моделирования. В то же время программы, использующие методы FIT и FEM, способны моделировать более сложные трехмерные структуры.
- Адекватная модель возбуждения и корректное наложение сетки — два наиболее существенных фактора, предпрещающих успешное EM-моделирование. Адаптивное наложение сетки в HFSS и CST MWS позволяет лучше отслеживать сложные индуктивные связи в анализируемой модели в автоматическом режиме. Программы на основе МоМ требуют более внимательного контроля при построении сетки разбиения.

- Конструирование электрически малых антенн требует строгого моделирования пространственной и поверхностной дифракции электромагнитных волн, вызванной малыми размерами подложки. Вычисления МоМ-программ сходятся гораздо быстрее при использовании функции Грина, когда диэлектрическая подложка имеет бесконечно протяженные размеры. Практическая тенденция, направленная на миниатюризацию антенн, уменьшает преимущества использования МоМ-программ, так как при малых размерах подложки дифракция и отражения на ее границах становятся ярко выраженными. Таким образом, FEM- и FIT-программы на текущий момент лучше подходят для моделирования антенн малых размеров.

Предлагаемые по умолчанию методы возбуждения в современных EDA-программах являются недостаточно приспособленными для анализа малых структур со сложными индуктивными связями. Ни один из рассмотренных коммерческих пакетов не предлагает быстрое и строгое решение для моделирования неизбежно присутствующих разъемов, искажающих идеалистическую модель возбуждения антенн. В качестве компромиссного решения предлагается использование двух различных программ для EM-моделирования, использующих различные методы, что дает возможность качественной оценки результатов вычисления. Если эти результаты совпадают, то будет справедливо им доверять. Если ре-

зультаты демонстрируют значительные расхождения, то последующий анализ реальной структуры и ее модели неизбежен. ■

Литература

1. Agilent Technologies, EEsof EDA, Momentum, http://eesof.tm.agilent.com/products/momentum_main.html
2. MAGMAS 3D, <http://www.esat.kuleuven.be/telemic/antennas/magmas/>
3. Vrancken M., Vandenbosch G. A. E. Hybrid dyadic-mixed-potential and combined spectral-space domain integral-equation analysis of quasi-3-D structures in stratified media, IEEE Trans Microwave Theory Tech, vol 51. 2003.
4. IE3D v. 11.2 user manual. Zeland Software, Inc., Jan 2006, <http://www.zeland.com>
5. FEKO Suite 5.3 user manual. EMSS — EM Software & Systems Ltd, Jan 2006, <http://www.emss.co.za>
6. HFSS v. 10.1.1 user manual. Ansoft Corporation, Jul 2006, <http://www.ansoft.com>
7. CST Microwave Studio 2006 user manual. CST GmbH — Computer Simulation Technology, 2006, <http://www.cst.com>
8. Vaughan M. J., Hur K. Y., Compton R. C. Improvement of microstrip patch antenna radiation patterns // IEEE Trans Antennas Propag, vol 42. 1994.
9. Yook J.-G., Katehi L. P. B. Micromachined microstrip patch antenna with controlled mutual coupling and surface waves // IEEE Trans Antennas Propag, vol 49. 2001.