

Моделирование планарной антенны GPS с помощью современных программных комплексов

Александр Курушин (Москва)

В статье описаны особенности моделирования планарной антенны приёмника GPS с помощью различных методов. Сравняются результаты расчёта, полученные с помощью основных коммерческих программ электродинамического моделирования.

В практике проектирования СВЧ-устройств широко используются современные программные системы – HFSS [1], CST [2], FEKO [3] и др. В настоящее время вычислительный эксперимент является одним из важных этапов научных исследований. Информация, полученная с помощью численных расчётов, позволяет не только правильно понять физические явления, наблюдаемые в эксперименте, но и в некоторых случаях заменить натурный эксперимент компьютерным.

Планарные антенны (ПА) широко применяются в современной радиоаппаратуре, мобильных компьютерах, сотовых телефонах и спутниковых приёмниках систем определения координат GPS (Global Position System) благодаря компактности, низкой стоимости и удобному согласованию с другими печатными устройствами. Современные ПА являются резонансными устройствами, электрические размеры которых соизмеримы с длиной волны. Реальная антенна имеет сложную структуру, отличную от прямоугольной, поскольку включает элементы подстройки для согласования. Форма ПА может иметь скошенные края и щели.

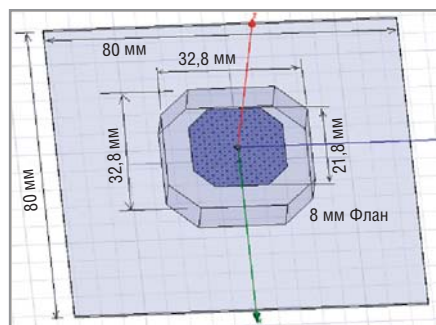


Рис. 1. Внешний вид ПА на подложке с параметрами $\epsilon = 16$, $\text{tg}\delta = 0,01$, $h = 8$ мм и медной поверхностью

При проектировании ПА критическим фактором становятся диссипативные потери в элементах конструкции, которые могут быть сопоставимы с полезными потерями на излучение в свободное пространство. В таком случае диссипативные потери влияют на КПД устройства и полосу рабочих частот. Поэтому модель малогабаритной антенны должна учитывать омические потери в проводящих элементах и тепловые потери в диэлектриках.

Особенностью ПА является наличие острых кромок металлических проводников, вблизи которых наблюдается концентрация токов, увеличивающая потери в металле. Это предъявляет жёсткие требования к точности компьютерной модели, которая должна адекватно описать сложное распределение поля в окрестности таких кромок. Потери внутри металла также могут описываться разными способами. Поэтому правильный выбор способа учёта потерь и точная настройка системы проектирования обеспечивают необходимую точность решения электродинамической задачи для ПА.

Целью данной статьи является сопоставление – по совокупности показателей качества – различных систем электродинамического моделирования на примере расчёта ПА. Для этого с помощью программ HFSS Ansoft [1], CST MWS [2] и FEKO [3] (т.н. «большая тройка») были выполнены расчёты ПА и произведено их сравнение с результатами эксперимента. Три выбранные программы используют различные методы решения электродинамических задач – метод конечных элементов, метод FDTD и метод моментов.

Для корректного сравнения расчёты выполнялись на одном и том же ком-

пьютере, оснащённом 2 Гб оперативной памяти и двухъядерным процессором с частотой 2,26 ГГц. Во всех случаях решение системы уравнений происходило без обращения к жёсткому диску компьютера.

Далее приводится расчёт следующих характеристик планарной антенны (см. рис. 1):

- резонансной частоты, на которой реальная часть входного импеданса имеет максимальное значение;
- рабочей полосы частот;
- диаграммы направленности (ДН) и КПД антенны.

Планарные антенны имеют невысокую направленность и устанавливаются так, что принимают сигнал почти во всей верхней полусфере. Потери в ПА сосредоточены в диэлектрической подложке, где они оцениваются тангенсом угла диэлектрических потерь, а также в металле излучающей формы ПА и земляной плоскости.

Полученные в ходе численного эксперимента данные о полосе рабочих частот могут быть использованы для определения КПД антенны. Полоса рабочих частот пропорциональна суммарным потерям мощности электромагнитной энергии антенны. Эти потери складываются из полезных потерь на излучение α_r , диссипативных потерь в металле α_m и в диэлектрике α_d [Ом]. Тогда КПД антенны можно определить как отношение полезных потерь к общим потерям [4]:

$$\text{КПД} = \frac{\alpha_r}{\alpha_r + \alpha_m + \alpha_d}. \quad (1)$$

Учитывая пропорциональность полосы пропускания потерям, можно выразить КПД следующим образом:

$$\text{КПД} = \frac{\Delta f_p}{\Delta f}, \quad (2)$$

где Δf_p – полоса пропускания идеальной антенны без тепловых потерь, Δf – полоса антенны с тепловыми потерями.

Кроме того, КПД антенны, получаемый в численном эксперименте, равен

отношению мощности, поглощённой в дальнем поле, к мощности, подводимой к антенне:

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{подл}}}. \quad (3)$$

Три программы (HFSS, CST и FEKO) используют три разных метода расчёта. Во всех трёх методах анализируемая структура разбивается на элементы, в пределах которых решение можно задать в виде базисной функции. Элементы разбиения имеют различные формы (тетраэдр, параллелепипед и треугольник) и базисные функции, от которых зависят время и точность решения задачи.

РАСЧЁТ ПЛАНАРНОЙ АНТЕННЫ В СИСТЕМЕ HFSS

В программе HFSS в качестве базового метода решения в частотной области используется метод конечных элементов, при котором пространство анализа разбивается на трёхмерные тетраэдры, а компоненты электрического и магнитного поля во всех точках анализируемого пространства неизвестны.

Анализируемая антенна (см. рис. 1) представляет собой параллелограмм со скошенными углами, напылённый на диэлектрическую подложку с диэлектрической проницаемостью 16, тангенсом диэлектрических потерь 0,01 и толщиной 8 мм. Подложка установлена на экране размером 80 × 80 мм. Расчёт на HFSS в диапазоне частот 1,5...1,7 ГГц был выполнен с 12 итерациями уплотнения сетки и занял 4 мин. Число итераций обычно выбирается на основании тех ресурсов, которыми располагает разработчик. В данном случае на шаге 12 количество тетраэдров N достигло 50 000. Результаты расчёта модуля параметра S_{11} (коэффициента отражения на входе антенны) приведены на рисунке 2.

Полосу частот ПА будем определять по уровню 0,707 коэффициента отражения S_{11} . В этом случае на границах полосы половина мощности отражается от антенны. Расчёт показывает, что полоса ПА получается широкой – порядка 100 МГц. Такая полоса эквивалентна добротности антенны около 10.

В методах расчёта, основанных на разбиении пространства на элемен-

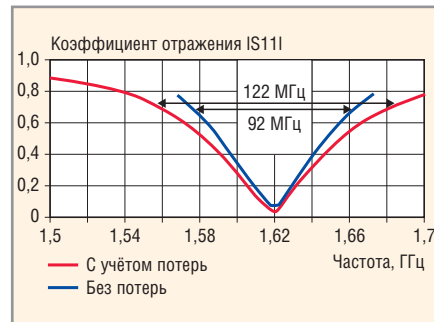


Рис. 2. АЧХ планарной антенны, рассчитанная с помощью HFSS (с учётом и без учёта потерь)

тарные ячейки, предполагается, что если при дополнительном разбиении решение не изменяется, то наступает его сходимость. Количество шагов адаптации в программе HFSS обычно составляет от 6 до 20, и время расчёта при увеличении количества тетраэдров N возрастает нелинейно. Анализ времени, которое затрачивает HFSS, показывает, что 30% времени решения на одной частотной точке занимает разбиение на сетку тетраэдров. Расчёт элементов матрицы рассеяния, которые зависят от свойств материалов и заполнения, занимает для данного конкретного примера 11 с (см.

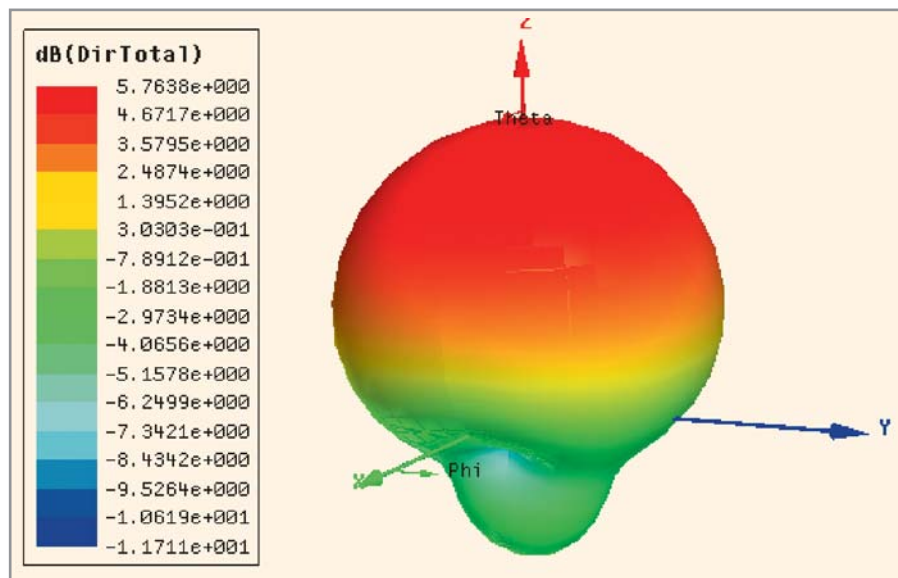


Рис. 3. Пространственная диаграмма направленности ПА, рассчитанная с помощью HFSS

таблицу 1). Следующим по затратам времени является решение матрицы, которое выполняется на каждой частоте.

Такой алгоритм проектирования можно считать положительной стороной HFSS, поскольку количество частотных точек можно выбрать минимальным, вплоть до одной. Оценка общего времени расчёта включает время, затраченное на предпроцессорную, процессорную и постпроцессорную обработку.

При использовании современных компьютеров (например, с ОЗУ 4 Гб) максимальное количество тетраэдров N не должно достигать 100 000, а решение одного варианта структуры должно занимать не более 20 мин, иначе теряется смысл выполнения операции подстройки и оптимизации в процессе инженерного проектирования. Практика проектирования показывает, что действенным средством экономии компьютерных ресурсов и уменьшения времени расчёта является выбор более плотного разбиения на ячейки только в тех местах структуры, где происходит наибольшее изменение характеристик при изменении геометрии.

Рассчитаем АЧХ планарной антенны без потерь (граничные условия уста-

новим как идеальные стенки, а тангенс угла потерь положим равным 0). Отметим, что в этом случае следует выполнить полное согласование антенны, т.е. найти такие её параметры, чтобы входной импеданс составил 50 Ом. Частотная характеристика ПА имеет полосу 92 МГц (см. рис. 2), тогда можно найти [4] КПД = $\Delta f / \Delta f_i = 92 / 122 = 74\%$, где Δf – полоса частот без учета потерь, Δf_i – полоса частот с учётом тепловых потерь. Это означает, что 26% мощности, подведённой к антенне, уходит на нагрев.

Расчёт (HFSS) антенны (см. рис. 1) показывает, что на частоте 1,61 ГГц мощность, поглощаемая антенной $P_{\text{полг}} = 0,8494$ Вт, мощность, излучаемая в дальней зоне $P_{\text{изл}} = 0,6235$ Вт, КПД, рассчитанный по формуле (3), равен 73,4%. Таким образом, можно считать, что значения КПД, рассчитанные по формулам (2) и (3), совпадают при расчёте мощности в полосе частот по уровню 0,707.

Пространственная диаграмма направленности ПА, рассчитанная с помощью HFSS (см. рис. 3), показывает, что КНД антенны равен 5,76 дБ. Критерием верности расчёта являются условия $|S_{11}| < 1$, КНД > 1 и сходимость к единственному решению.

Таблица 1. Затраты времени и ОЗУ при расчёте с помощью программы HFSS

Процесс	Время	Используемый объём ОЗУ, Мб
Разбиение на сетку	1 мин 23 с	62,8 (50 372 тетраэдра)
Расчёт элементов матрицы	11 с	1240
Решение матрицы на одной частоте	20 с	1240
Постпроцессорная обработка данных	10 с	-
Общее время расчёта на всех частотах	4 мин 14 с	1240

РАСЧЁТ АНТЕННЫ ПРИ ПОМОЩИ CST MWS

Базовым методом в программе CST является метод FDTD – расчёт системы уравнений Максвелла во временной области. В этом методе пространство ПА разбивается на параллелепипеды, включая трёхмерную форму металлического покрытия толщиной 0,1 мм. Вычисление во временной области позволяет решать электромагнитную задачу для всего диапазона частот за одну итерацию, что делает метод FDTD удобным для расчёта сверхширокополосных устройств. Однако итерация может потребовать значительного времени расчёта.

При сравнении методов расчёта необходимо выяснить, в чём основное различие: в разбиении на ячейки основной конфигурации, в расчёте элементов матрицы или в точности расчёта системы уравнений? Например, в анализируемой модели ПА могут быть скошенные края, которые вызывают разное заполнение автономными блоками. Тогда погрешность объясняется недостаточной плотностью разбиения на ячейки.

Учёт потерь, сосредоточенных в металле и в подложке, очень важен для сравнения программ. Установив потери в подложке и в металле, в результате расчёта на CST MWS получаем частотные характеристики ПА, показанные на рисунках 4 и 5. Видно, что полоса пропускания антенны без потерь равна 68 МГц (см. рис. 4). С учётом потерь рассчитанная полоса увеличится.

Учёт потерь выполняется в различных программах и методах по-разному. В программе HFSS задают граничные условия на металлические поверхности с потерями как граничное условие Impedance (Ом/квadrat). Анализ и сравнение с экспериментальными данными показали значение $R = 0,015$ Ом/квadrat, что соответствует результату, полученному при полном заполнении пространства медью [4]. В отличие от HFSS, в программе CST MWS трёхмерная форма ПА полностью заполняется металлом.

Для учёта потерь (см. рис. 5) введём также тангенс угла диэлектрических потерь в подложке, равный 0,01. Ширина полосы 133 МГц получается при согласовании на центральной частоте 1,6 ГГц, для чего последовательно с портом вводится ёмкость 2 пФ. При оценке затрат на расчёт задачи следует

учесть, что алгебраические уравнения в методе FDTD записываются во временной форме, которая не создаёт большие матричные уравнения, обычные для методов MOM и FEM.

Использование ОЗУ в методе FDTD пропорционально N , по сравнению с $N \dots N^2$ для FEM и N^2 для MOM. Временные затраты в методе FDTD также пропорциональны N , по сравнению с N^2 для FEM и $N^2 \dots N^3$ для MOM. Хотя в общем случае вычислительные требования, предъявляемые FDTD, являются намного более жёсткими, чем при использовании метода MOM, моделирование структур малого и среднего размера с помощью FDTD может потребовать намного меньших вычислительных ресурсов. Однако для сильно изогнутых структур затраты метода FDTD обычно возрастают по сравнению с FEM. Временные затраты расчёта антенны, показанной на рисунке 1, с помощью программы CST приведены в таблице 2.

РАСЧЁТ АНТЕННЫ В СИСТЕМЕ FEKO

Пакет программ FEKO [5] позволяет моделировать полностью трёхмерные структуры, используя метод моментов на треугольной сетке разбиения (см. рис. 6). Кроме того, комбинация метода моментов с методом геометрической оптики или единой теории дифракции делает возможным EM-моделирование очень крупных объектов. Расчёт ПА с помощью программы FEKO даёт резонансную частоту порядка 1,62 ГГц (см. рис. 7).

Для того чтобы учесть потери, выполним численный эксперимент, в котором заполнение будет свободным пространством, а покрытие – металлом с потерями. В программе FEKO версии 5.5 невозможно реализовать структуру, в которой металл с потерями находится на диэлектрической подложке с потерями. Особенность метода моментов, реализованного в настоящее время в FEKO, заключается в том, что потери учитываются только в подложке либо в металле, который не касается диэлектрического материала. В таблице 3 приведены параметры и затраты вычислительных ресурсов.

Для корректного сравнения расчётов следует выполнить согласование в точке, в которой достигается максимальное (и равное 50 Ом) значение реальной части входного импеданса антенны. Для выполнения полной ком-

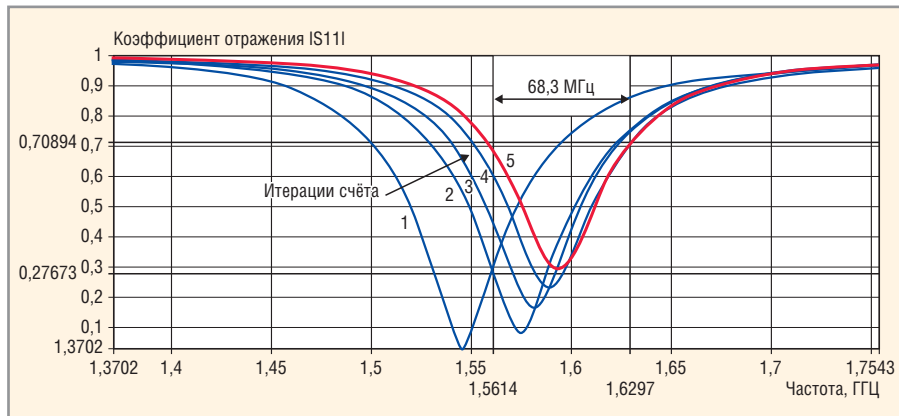


Рис. 4. Частотная характеристика S_{11} антенны без потерь, рассчитанная для ряда итераций MWS

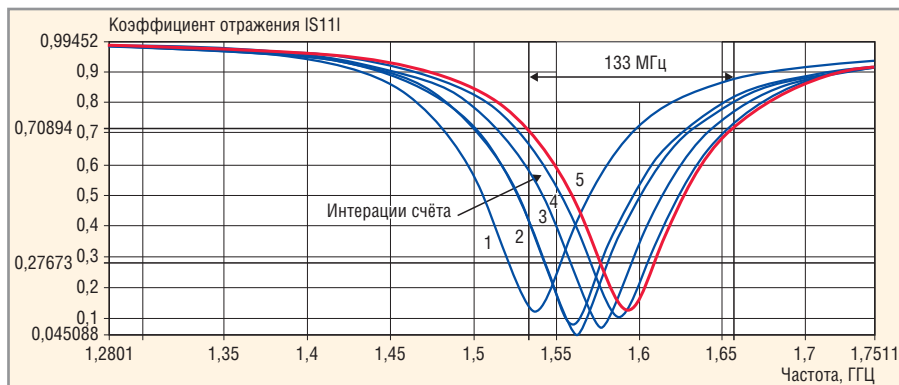


Рис. 5. Частотная характеристика ПА с потерями, рассчитанная для ряда итераций FDTD

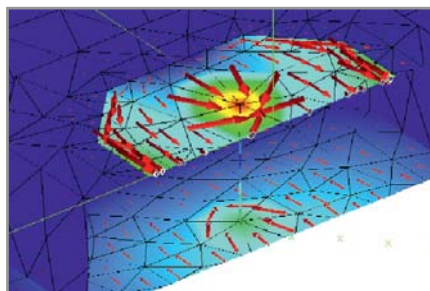


Рис. 6. Разбиение металлических поверхностей на треугольники в программе FEKO и токи, протекающие на поверхностях ПА

пенсации реактивной части (которая у ПА имеет индуктивный характер) последовательно с ПА устанавливается ёмкость 1,5...2 пФ.

Расчитанные на FEKO частотные характеристики ПА приведены на рисунке 7. Видно, что при внесении потерь резонансная частота уменьшается, а ширина полосы увеличивается. Метод моментов, реализованный в

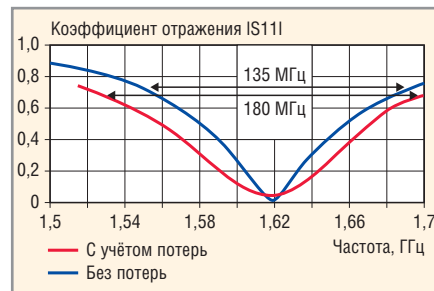


Рис. 7. АЧХ, рассчитанная с помощью программы FEKO (без потерь и с учётом всех потерь)

FEKO, учитывает потери в токонесущих частях структуры с помощью объёмного тока, который также учитывает потери в диэлектрических заполнениях модели. Эти потери отражаются в расширении полосы (см. рис. 7).

На рисунке 8 приведено сечение диаграммы направленности ПА, рассчитанной на частоте 1,61 ГГц. На этот же график нанесены результаты расчётов

Таблица 2. Затраты времени и ОЗУ при расчёте с помощью программы CST

Процесс	Время	Используемый объём ОЗУ, Мб
Разбиение на параллелепипеды	1 мин 23 с	600 (350 000 элементов)
Расчёт параметров элементов	11 с	890
Решение временного процесса на первой итерации	13 мин	890
Решение временного процесса на второй итерации	2 мин 10 с	–
Постобработка (обратное преобразование Фурье)	15 мин 14 с	562
Общее время расчёта (5 итераций)	59 мин	

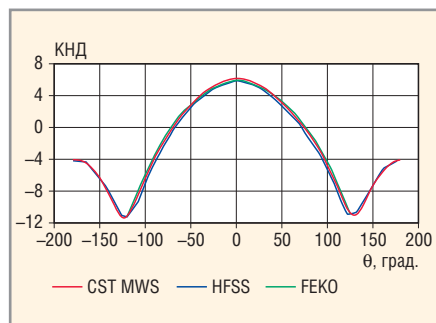


Рис. 8. Диаграммы направленности ПА, рассчитанные с помощью программы FEKO, HFSS и CST и нанесённые на один график

с помощью HFSS и CST MWS. Видно, что диаграммы направленности, полученные в программах, использующих различные методы расчёта, совпадают, что свидетельствует как о высокой точности расчёта, так и о достоверности результатов.

Обсуждение результатов

Расчёт с помощью различных программ (см. рис. 9), как показывает практика, даёт разную точность. Требуемые вычислительные ресурсы и временные затраты также отличаются. Общих рекомендаций по выбору программы пока не выработано. Очевидно, что каждая программа оптимальна для решения своего класса задач. Поэтому на примере расчёта ПА можно выяснить, какая программа из «большой тройки» является оптимальной для решения конкретной задачи. Для этого все временные затраты и используемые ресурсы ОЗУ были сведены в таблицу 4 для сравнения.

Эксперимент показал центральную частоту антенны как фильтра $f = 1,625$ ГГц и полосу частот 122 МГц по критерию спада. Таким образом, в данном конкретном случае результат расчёта с помощью HFSS оказался наиболее близок к эксперименту и был получен за минимальное время, по сравнению с другими программами.

Для того чтобы выбрать метод расчёта и, соответственно, программу для решения конкретной задачи, необходимо сравнить и требуемые ресурсы (см. таблицу 4), и много других факторов, главным образом, по результатам расчёта характеристик [5]. Например, когда в методе, работающем в частотной области, используется более эффективный и устойчивый алгоритм решения системы линейных уравнений, такой подход может быть более эффективным, чем решение во временной области для широкополосного анализа антенн. Помимо использования быстрого решающего устройства, метод расчёта в частотной области предоставляет три уникальные возможности:

- использование разных плотностей сетки разбиения на различных частотах, т.е. более грубой сетки на более низкой частоте, что может значительно ускорить моделирование. Напротив, плотность сетки в решении во временной области должна быть определена для самой высокой частоты, представляющей интерес;
- простоту организации параллельных вычислений для широкополосного моделирования. После созда-

ния сетки процессор выполняет аналогичные расчёты на различных частотах. Здесь можно использовать новый метод распараллеливания расчёта, который не рассматривается в статье, но прост, не требует никакой межпроцессорной связи и очень эффективен;

- поскольку в частотной области большая электромагнитная задача может быть представлена моделью меньшего размера, можно последовательно рассчитать отдельные фрагменты структуры. Например, свойство антенны, которая первоначально характеризуется матрицей, имеющей порядок нескольких тысяч, может быть представлено намного меньшей матрицей, имеющей порядок нескольких десятков. Эта особенность позволяет разработать специальные методы, с помощью которых можно рассчитать очень большие антенные решётки. (В противном случае придётся их моделировать с миллионами или даже миллиардами степеней свободы.) Благодаря таким расширениям, методы расчёта в частотной области останутся важными инструментальными средствами моделирования антенн.

Все рассмотренные в статье программы реализуют сеточные методы расчёта. Такие методы решают задачи, размер геометрии которых соизмерим с длиной волны и ограничен примерно 15 длинами волн. Чтобы увеличить размер задачи, необходимо либо привести её к двумерному или одномерному случаю, либо применять методы расчёта типа геометрической и физической оптики, в которых часть пространства и электромагнитная волна представлены в виде одномерного луча.

Широкое внедрение в практику проектирования электродинамических программ универсального назначения можно считать естественным процессом развития современного подхода к проектированию антенн и СВЧ-устройств. Аналитические методы, даже заключённые в оболочку современной программы, воспринимаются как численные компьютерные расчёты.

На практике важными являются и точность, и скорость расчёта. Проектирование СВЧ-структур произвольной формы акцентирует внимание разработчика на задаче описания, выбора и подтверждения достоверности модели. Построение достоверной мо-

Таблица 3. Затраты ресурсов при расчёте с помощью программы FEKO

Число металлических треугольников	1786
Число диэлектрических треугольников	242
Число базисных функций MOM	3670
Подготовка геометрии, с	0,1
Расчёт элементов матрицы, с	19,8
Решение системы линейных уравнений, с	6,8
Расчёт дальнего поля, с	5,5
Общее время решения, с	33,0
Используемый объём ОЗУ, Мб	104,3

Таблица 4. Сравнение затрат вычислительных ресурсов при расчете ПА

Требуемые ресурсы	HFSS	CST	FEKO
Время расчёта, мин	8	60	3
Используемый объём ОЗУ, Мб	200	700	56
Сетка разбиения	18 тыс. тетраэдров	12 тыс. параллелепипедов	900 треугольников
Расчитанная полоса пропускания, МГц	122 (40 точек)	133	180 (40 точек)
Центральная резонансная частота, ГГц	1,625	1,6	1,62

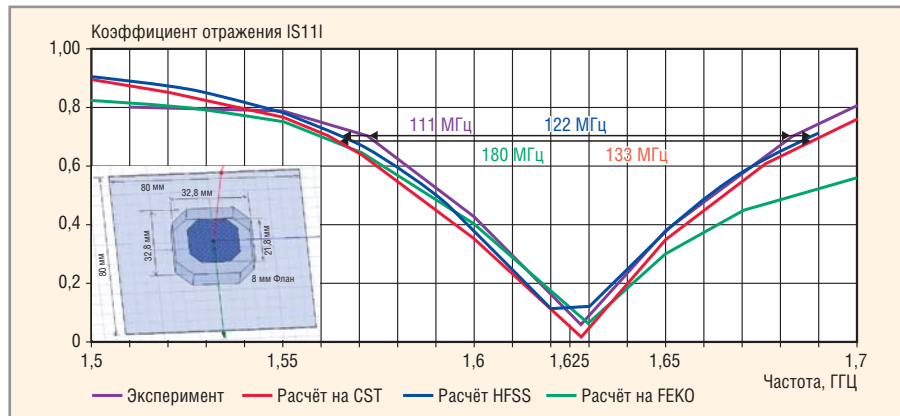


Рис. 9. Рассчитанные с помощью программ HFSS, CST и FEKO частотные характеристики параметра S_{11} и зависимость, полученная экспериментально

дели, в свою очередь, связано с задачей расчёта и анализа характеристик физической системы, реализуемой на этом устройстве. Это – первый важный вопрос, решаемый в процессе проектирования. Наличие современных пакетов проектирования, анализа и синтеза СВЧ-устройств ещё не гарантирует достоверность модели. Умение построить адекватную реальной задаче модель является крайне важным для разработчика, и его следует развивать путём самостоятельных исследований.

Второй важный аспект проектирования – всё более разнообразные и обобщённые показатели качества, при помощи которых оценивается устройство. В условиях высокого темпа производства современный исследователь, перед которым ставится задача проектирования отдельного узла или всей системы, должен знать, какой метод (программу) следует выбрать для решения конкретной задачи с заданной степенью точности. Поскольку путь достижения цели лежит через поиск приоритетов, можно утверждать, что программа HFSS остаётся на сегодняшний день оптимальной для решения срочных инженерных задач.

Основными конкурентами HFSS [1] можно считать программы CST Microwave Studio [2] и FEKO [3]. Современная реальность проектирования такова, что часто возникает необходимость решить задачу с помощью нескольких программ (различных методов расчёта), и только при получении близких результатов можно утверждать, что задача решена правильно, а модель построена верно.

Например, в программе FEKO не во всех структурах можно описать потери (например, невозможно задать потери в металле, лежащем на диэлектрике), но она обеспечивает меньшее вре-

мя расчёта в ближнем поле. Разбиение на сетку выполняется вручную, с повышением плотности на краях. Окружающее пространство не входит в область расчёта, поэтому используемый объём ОЗУ меньше, чем в программах HFSS и CST. Недостатком программы FEKO является длительный расчёт коэффициентов матрицы (из-за функций Грина), особенно для многослойных, анизотропных сред.

Все современные программы реализуют несколько встроенных методов расчёта, однако набор методов FEKO, в который входят методы физической оптики и теории дифракции, позволяет решить задачи большого электрического размера.

В целом сравнение программ по их возможностям является неблагоприятным занятием, поскольку время жизни каждой версии программы не превышает полугод. Поэтому можно говорить только о тенденции сегодняшнего дня.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.ansys.com/>.
2. www.cst.com.
3. www.feko.info/antennamagus.
4. Васильченко А., Схолец И., Де Раад В., Ванденбош Г. Качественная оценка вычислительных методов электродинамики на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн. Технологии в электронной промышленности. 2008. № 3. С. 52–56.
5. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А., Пашков К. Проектирование микрополосковой антенны с учётом тепловых потерь. Современная электроника. 2008. № 8. С. 48–53.
6. Jian-Ming Jin, Riley D.J. Finite Element Analysis of Antennas and Arrays. John Wiley & Sons, 2009.

Новости мира

Драйвер шагового двигателя от TI

Компания Texas Instruments представила 2.5-F драйвер шагового двигателя с уменьшением нагрева при работе вплоть до 30% по сравнению с ближайшими аналогами. DRV8818 с высокой степенью интеграции характеризуется низким сопротивлением канала в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$, что позволяет улучшить тепловые характеристики, уменьшить температуры платы и окружающего воздуха.



Устройство повышает надёжность и производительность, обеспечивая высокую эффективность работы двигателя для систем промышленного, медицинского и бытового применения, например, в текстильном производстве, для насосов, оборудования лёгкой промышленности и принтеров.

Ключевые особенности и преимущества:

- превосходные тепловые характеристики. Типовое значение $R_{DS(ON)}$ 150 мОм ключа нижнего плеча и 220 мОм ключа верхнего плеча увеличивает эффективность и позволяет избежать повышения температуры платы и окружающей среды, улучшая тем самым надёжность системы;
- возможность настройки работы двигателя: гибкие режимы торможения и временные параметры снижают низкочастотный шум и вибрации, улучшая устойчивость и рабочие характеристики системы;
- встроенный микрошаговый режим: интегрированный индекса́тор упрощает регулирование тока, обеспечивая режим работы с полным шагом, 1/2, 1/4 или 1/8 шага для более плавного движения;
- устойчивость, надёжность и полная защита: улучшенная встроенная защита, включая защиту от перегрузок по току, превышения температуры, бросков и провалов напряжения, повышает надёжность системы и объём выпуска продукции;
- совместимость с выпускающимся 1,9-A драйвером DRV8811 для слаботочных систем обеспечивает масштабируемость тока в пределах одного проекта.

www.ti.com/