

Новые возможности электродинамического анализа геометрически сложных структур в Altair FEKO

Владимир Литун (Москва)

Методы компьютерного анализа и автоматизированного проектирования электродинамических структур за последние десятилетия стали неотъемлемым инструментом инженеров и исследователей в областях прикладной электродинамики, антенн и микроволновых устройств. Ведущие производители программных продуктов отрасли осваивают как новые вычислительные технологии, так и постоянно работают над качественным улучшением уже реализованных алгоритмов и методов. В статье показаны новые возможности Altair FEKO в области анализа геометрически сложных структур с оптимизацией требований к вычислительным ресурсам за счёт криволинейного разбиения поверхностей и проволочных элементов.

Тенденции разработки программ электродинамического анализа

При проведении электродинамического моделирования наиболее сложными проблемами являются корректное упрощение геометрически сложных элементов и наложение сетки разбиения. Критерием корректности и качества в обоих случаях является сохранение потенциальной близости результатов численного анализа эквивалентному физическому эксперименту при минимизации вычислительной сложности. Вне зависимости от реализуемого метода и расчётной области разработчики прикладных программ электродинамического анализа вынуждены постоянно оптимизировать свои продукты по данным показателям, поскольку именно сетка во многом определяет практическое качество получаемого результата.

Безусловно, ряд задач в области антенной и микроволновой техники, а также исследований диаграмм обратного рассеяния (эквивалентной площади рассеяния) различных объектов могут быть решены с использованием только строгих аналитических формулировок, что однозначно гарантирует качество получаемых результатов. В большинстве реальных инженерных задач разработчики сталкиваются с формами и конструкциями, геометрическая сложность которых не позволяет реализовать данный подход. По этой причине произво-

дители программ электродинамического моделирования вынуждены развивать и объединять различные методы численного анализа [1].

Упрощение геометрии и качественное наложение сетки разбиения являются связанными задачами, поскольку в абсолютном большинстве программ электродинамического анализа элементы разбиения обладают линейными или плоскими границами, а функции, описывающие изменение компонент вектора электрической напряжённости (или тока) в их границах, чаще всего, линейны [1, 2].

Среди популярных программных комплексов Altair FEKO занимает достаточно прочные позиции, постоянно расширяя свой функционал. Описание реализованных в нём численных методов и основных особенностей работы представлено в в русскоязычной литературе [1, 3].

Одним из направлений усовершенствования, выбранных инженерами и программистами Altair FEKO для развития своего продукта, является применение криволинейных элементов разбиения и использование базисных функций высшего порядка [4]. Остановимся на каждом из них более подробно.

ПРИМЕНЕНИЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗБИЕНИЯ В ALTair FEKO

При наличии в модели геометрически сложных проводящих поверхностей, границ раздела сред или проволочных

элементов наложение сетки обычно сопряжено с внесением в результат расчёта ошибок, связанных с несовпадением фактически анализируемой структуры и исходной геометрии. В ряде случаев это может приводить к значительному различию между аналитическим и численным результатом.

В программном пакете электродинамического анализа Altair FEKO 14.0 полностью поддерживается использование криволинейных сеток (Curvilinear Mesh) при анализе методом моментов (Method of Moments, MoM) и многоуровневым быстрым мультипольным методом (Multilevel Fast Multipole Method, MLFMM) как для поверхностей (Face), так и для проволочных (Wire) элементов модели. При анализе в квазиоптическом приближении также поддерживается использование криволинейных сеток для проводящих поверхностей и границ диэлектрических объектов.

Возможности использования неплоских элементов разбиения открылись перед пользователями FEKO ещё в 2013 г., когда была представлена версия 7.0. На практике замена плоских треугольных полигонов (см. [рис. 1а](#)) на криволинейные (см. [рис. 1б](#)) может быть обусловлена необходимостью обеспечения максимально точного повторения формы объектов без значительного уплотнения сетки.

Для повышения точности при достаточно специфичных расчётах, например, полноволновом анализе неплоских многослойных (особенно, тонких) диэлектрических покрытий с использованием принципа эквивалентных поверхностей (Surface Equivalence Principle, SEP), такая сетка полезна даже при использовании стандартных базисных функций Рао-Вилтона-Глиссона (Rao-Wilton-Glisson, RWG). Для них рекомендуется выбирать межузловое расстояние сетки не более 0,125 длины волны на частоте моделирования.

Участки поверхности с радиусом кривизны более длины волны на частоте моделирования аппроксимируются достаточно точно с использованием

плоских RWG-треугольников максимально допустимого размера для снижения вычислительной сложности задачи. В случае меньшего радиуса кривизны требуется либо уплотнение сетки, что нелинейно (относительно анализируемого количества элементов) повышает и требуемый объём оперативной памяти, и время расчёта, либо использование криволинейных треугольников. Криволинейные элементы разбиения также требуются для обеспечения качественной аппроксимации поверхности на удалении от узловых точек при больших межузловых расстояниях, которое допустимо при работе с использованием более сложных базисных функций. Такой вариант рассматривается в следующем разделе статьи.

В версии Altair FEKO 14.0 появилась поддержка криволинейного разбиения для проволоочных элементов. На практике это нововведение важно при анализе и проектировании проволоочных структур сложной формы, включая спиральные антенны и бескорпусные катушки индуктивности.

При анализе проволоочных структур минимальная длина сегмента разби-

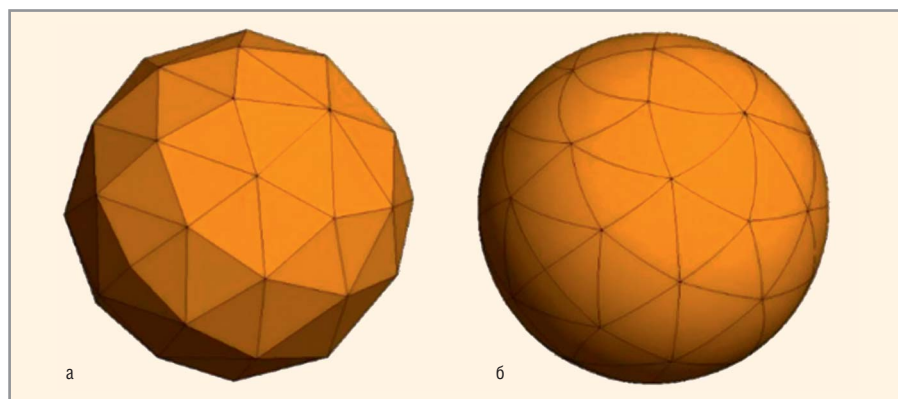


Рис. 1. Варианты разбиения различными сетками на примере шара:

а – стандартная; б – криволинейная

ния ограничена: она должна превосходить диаметр его сечения в два и более раз (желательно, более 5). Это гарантирует выполнение тонкопроволочного приближения, когда отсутствует необходимость учёта не только продольных, но и поперечных компонент тока на них, а, следовательно, и рассмотрения поверхности провода с наложением на неё полноценной сетки.

Проблема моделирования структур с проводниками сложной формы, радиус изгиба которых отличается от диа-

метра проволоки менее 5 раз, широко распространена. Различия анализируемых структур с применением классических (см. рис. 2а) и криволинейных (см. рис. 2б) сегментов очевидны. В приведённом примере радиус изгиба проводника превосходит диаметр его сечения в 5 раз, длина сегмента разбиения – тоже в 5 раз.

Простейшей практической иллюстрацией использования новшества может служить анализ ближнего поля рассеяния от спирали в результате

Тратите время на обработку недостоверных результатов моделирования?

При использовании программы FEKO, вам становятся доступны:

Непревзойденная точность сложных электромагнитных расчетов

Высокая скорость вычислений

Полный комплекс численных методов по оптимальной цене

Поддержка всех форматов САПР – теперь бесплатно!

Реклама

FEKO
Comprehensive Electromagnetic Solutions

Дизайн-проекты, техническая поддержка и обучение
Тел.: +7 (499) 613-7001, www.rodnik.ru

С 1991 года
РОДНИК
СИСТЕМНЫЙ ИНТЕГРАТОР

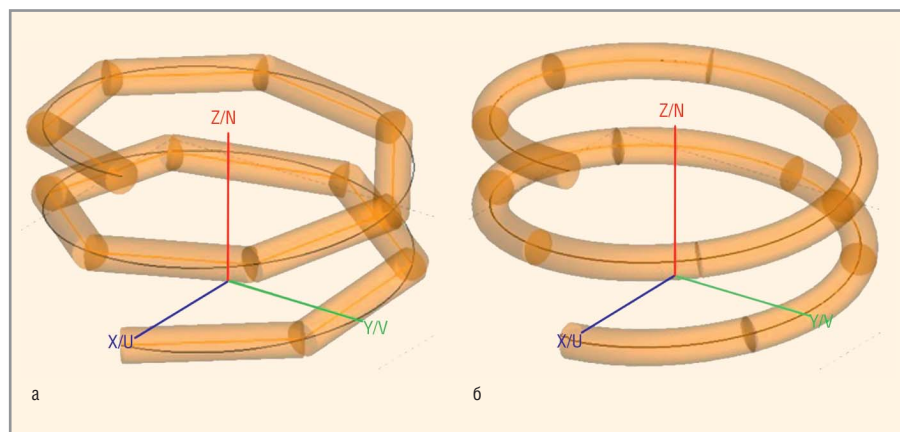


Рис. 2. Варианты разбиения различными сетками на примере спирали:

а – классическими сегментами; б – криволинейными сегментами

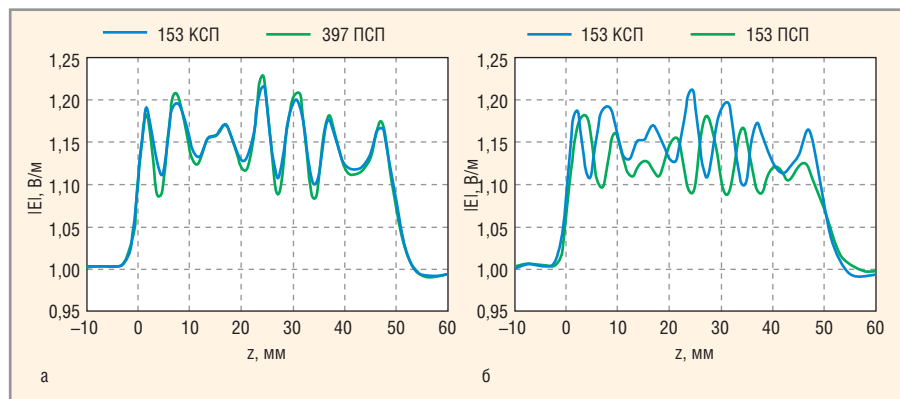


Рис. 4. Результаты анализа поля рассеяния от проволоочной спирали:

а – устойчивый результат; б – сравнительный результат при равном количестве сегментов

падения на неё плоской электромагнитной волны [5] (см. рис. 3). Количество витков – 20, радиус – 2,5 мм, высота спирали – 50 мм, анализ поля проводится вдоль линии параллельно её оси на расстоянии 5 мм. Рассматриваются варианты разбиения классическими прямолинейными сегментами (ПСП) и криволинейными сегментами (КСП) фиксированного диаметра.

Результаты анализа показывают, что для достижения устойчивых (не изменяющихся значимо при уплотнении сетки) результатов необходимо применять 397 ПСП или 157 КСП. При этом заметен близкий, но более скачкообразный характер зависимости амплитуды ближнего поля ($|E|$) в случае ПСП (см. рис. 4а). При равном количестве сегментов разбиения (см. рис. 4б) результаты моделирования заметно отличаются. Следо-

вательно, использование КСП позволило снизить вычислительную сложность и объём используемой оперативной памяти почти в 7 раз при уменьшении количества сегментов сетки в 2,6 раза.

Также можно рассмотреть задачу о взаимодействии расположенных параллельно на расстоянии 7,5 мм 20-витковых спиралей радиусом 2,5 мм и высотой 50 мм с радиусом проводника 0,25 мм (см. рис. 5) [6]. Возбуждение спиралей осуществляется точечными портами, связанными непосредственно с их нижними концами, а с верхними – через проводники, располагающиеся вдоль осей.

Для достижения устойчивой картины частотной зависимости амплитуды коэффициента передачи ($|S_{21}|$) потребовалось использовать либо 3002 ПСП, либо 504 КСП. Результаты моде-

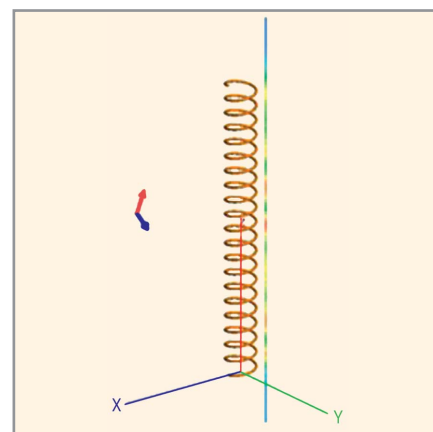


Рис. 3. Вычисление поля рассеяния

от проволоочной спирали

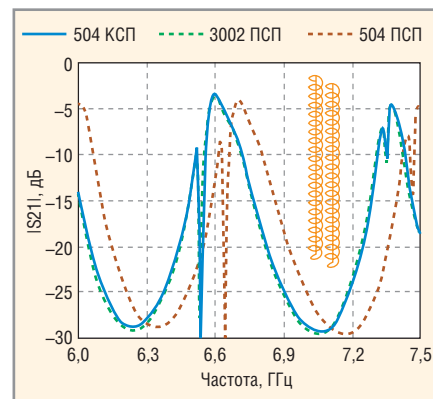


Рис. 5. Результаты применения

криволинейного разбиения проводников

лирования в обоих случаях достаточно хорошо совпадают. В модели системы с использованием 504 ПСП результирующая кривая хотя и обладает схожей формой, но сдвинута по частотной оси вверх. Качественный выигрыш от использования КСП в данном случае состоит в снижении потребления оперативной памяти в 27 раз и необходимости заметно меньшего количества итераций улучшения сетки для получения стабильного результата.

ПРИМЕНЕНИЕ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА В ALTAIR FEKO

Начиная с версии FEKO 6.2, возможно использование для аппроксимации токов на элементе поверхности базисных функций высшего порядка (High Order Basis Function, HOBF) для MoM и MLFMM. Таким образом, стал доступен учёт нелинейного распределения токов на полигонах. Стандартный RWG-элемент является HOBF-элементом порядка 0,5 (HOBF-0,5).

Максимальная степень HOBF-элемента в Altair FEKO 14.0 составляет 3,5, что позволяет без потери качества

Характеристики HOBF-элементов различного порядка

Порядок HOBF-элемента	Количество степеней свободы	Длина стороны элемента разбиения (в долях длины волны, не более)		
		Допустимый максимум	Стандарт	Высокое качество
0,5	3	1/8	1/12	1/16
1,5	8	3/8	1/4	3/16
2,5	15	5/8	5/12	5/16
3,5	24	5/4	5/6	5/8

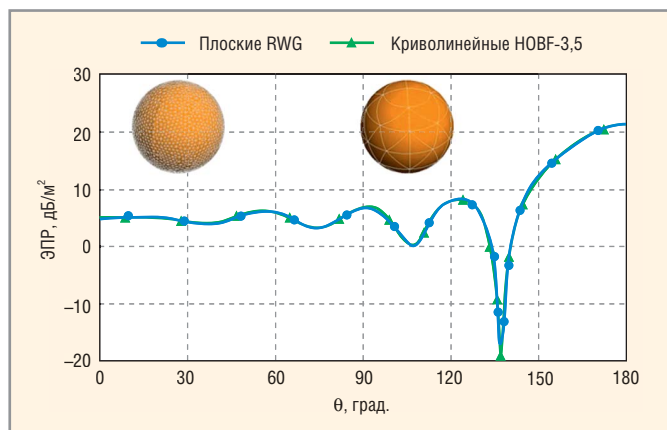


Рис. 6. Пример использования элементов NOBF-3,5 при анализе ЭПР сферы

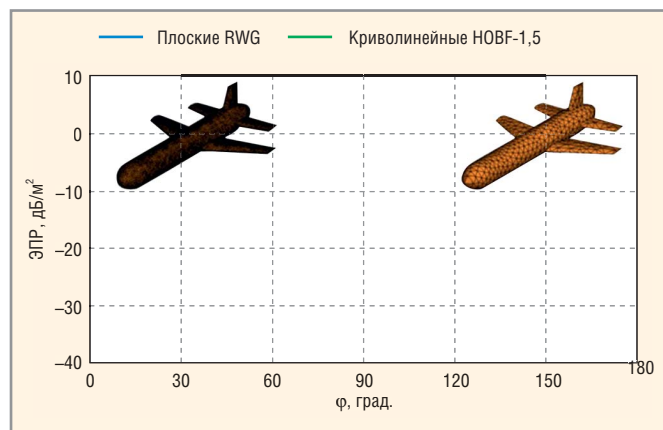


Рис. 7. Пример использования элементов NOBF-1,5 при анализе ЭПР БПЛА

результата увеличивать размер элемента разбиения до 10 раз по сравнению с NOBF-0,5 (RWG). В таблице приведено сравнение количества степеней свободы и рекомендуемых разработчику размеров сетки разбиения для NOBF-элементов различного порядка [4].

Важно отметить, что при увеличении размера сетки следует контролировать отсутствие значительных отклонений анализируемой геометрии от заданной. Для старших степеней (2,5 и 3,5) это замечание особенно актуально, поскольку допустимый размер сетки для них уже сопоставим или превышает половину длины волны.

Инженеры Altair FEKO внедрили возможность работы с NOBF в MoM (в версии 6.2) и MLFMM (в версии 6.3) и интегрировали её в гибридизации MoM/PO (в версии 7.0), а также MoM/RL-GO и MoM/UTD (в версии 14.0).

Качественный эффект от использования криволинейных NOBF-элементов в сравнении с классическими плоскими RWG можно проиллюстрировать на примере анализа эффективной площади рассеяния (ЭПР) сферы, радиус которой составляет одну длину волны (см. рис. 6).

Результирующие графики угловой зависимости бистатической ЭПР практически идентичны. Временные затраты в обоих случаях очень близки. При этом в первой модели (RWG) $3,8 \times 10^3$ плоских треугольных элементов сетки и $5,7 \times 10^3$ неизвестная переменная, а во второй (NOBF-3,5) — 72 криволинейных треугольных элемента и $1,3 \times 10^3$ неизвестных. Итоговый выигрыш от использования новых возможностей FEKO в рассматриваемом случае состоит в сокращении используемого объема оперативной памяти примерно в 19 раз.

Поскольку вычислительная сложность с применением NOBF старших

порядков по сравнению с более низкими при равном количестве элементов разбиения возрастает значительно, то в ряде случаев достаточно и NOBF-1,5. В качестве примера можно привести анализ моностатической ЭПР беспилотного летательного аппарата (БПЛА) длиной 1 м на частоте 3 ГГц [4], геометрия которого содержит элементы различной формы (см. рис. 7).

Близкие результаты удалось в данном случае получить при разбиении исходной геометрии модели на $28,9 \times 10^3$ плоских полигонов RWG и $1,2 \times 10^3$ криволинейных треугольников NOBF-1,5. Количество неизвестных переменных при расчёте составило $19,3 \times 10^3$ и $5,9 \times 10^3$ соответственно. Итоговый выигрыш от применения криволинейных NOBF-1,5 состоит в уменьшении требуемого объема оперативной памяти в 24 раза и снижении времени анализа в 6 раз.

Данная технология имеет и некоторые ограничения. Так, аналогичная геометрия модели, проанализированная MLFMM на частоте 12 ГГц при таком же по качеству разбиении на элементы RWG и NOBF-1,5, показала следующее: количество неизвестных уменьшилось в 5,8 раза (с 560×10^3 неизвестных до $96,4 \times 10^3$ для $373,5 \times 10^3$ RWG и $19,3 \times 10^3$ NOBF-1,5 соответственно), но время на моделирование возросло в 2,5 раза. Связано это с двумя факторами: во-первых, матрица ближних полей MLFMM для NOBF более плотная, во-вторых, сами матрицы для NOBF-элементов вычисляются дольше.

Таким образом, сравнивая для одной модели применение классических плоских RWG-элементов и криволинейных NOBF-элементов, видим, что новая технология снижает используемый объем оперативной памяти. При этом продолжительность вычислений зависит от

особенностей структуры матрицы задачи, что может приводить как к заметному ускорению, так и к замедлению получения итогового результата. Разработчик, выбирая NOBF, должен осознавать данную специфику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным выводом можно считать практическую значимость и важность успехов команды Altair FEKO по расширению функциональных возможностей разрабатываемого ими программного продукта и созданию новых степеней свободы для исследователей и проектировщиков электродинамических структур различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М. Солон-Пресс. 2010. 276 с.
2. Гринев А.Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. М. Радиотехника. 2012. 336 с.
3. Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ-структур с использованием FEKO. М. OneBook. 2013. 426 с.
4. Tonder J., Jakobus U. Introduction of Curvilinear Higher-Order Basis Functions for MoM and MLFMM in FEKO. Computational Electromagnetics Workshop (CEM). Izmir. 2013. Pp. 13–14.
5. Jakobus U. [et al.]. Latest Extensions of the Electromagnetic Field Solver Package FEKO. The 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Davos. 2016. Pp. 1–5.
6. Jakobus U. [et al.]. Review of the Latest Feature Additions to the Electromagnetic Solver FEKO. 2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES). March 2016.

