

МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ ОБЪЕКТОВ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ FEKO

А.Курушин, к.т.н.¹, И.Мюхкеря², С.Подковырин

УДК 004.942
ВАК 05.27.00

Электродинамическое моделирование СВЧ-структур и антенн – важный этап проектирования сложных радиотехнических систем. Для решения этих задач разработчики используют мощные и эффективные средства САПР, в которых реализован широкий набор методов электромагнитного моделирования. Одним из таких инструментов является программный комплекс FEKO от компании Altair. FEKO – многофункциональная программная среда для численного электромагнитного моделирования, основанная на современных вычислительных технологиях. Рассмотрим, как с помощью FEKO решается задача обеспечения электромагнитной совместимости антенных систем, установленных на летательных аппаратах.

Требования к вычислительным ресурсам компьютеров, используемых для электромагнитного моделирования, возрастают по мере повышения сложности и увеличения физических размеров антенных систем. В определенный момент времени ресурсов, имеющихся для расчета электрически больших объектов, может оказаться недостаточно. Для решения этой проблемы программный комплекс FEKO предоставляет следующие возможности:

- эффективное решающее устройство записывает матричные блоки на жесткий диск в процессе работы, позволяя обрабатывать сложные задачи на компьютерах с меньшей оперативной памятью;

- применяется параллельная обработка решаемой задачи на многоядерных процессорах;
- многоуровневый быстрый метод многополюсников (Multi-Level Fast Multipole Method – MLFMM) позволяет значительно уменьшить потребности в вычислительных ресурсах по сравнению с методом моментов (Method of Moments – MoM);
- приближенные асимптотические методы, такие как метод физической оптики (Physical Optics – PO) и метод однородной теории дифракции (Uniform Theory of Diffraction – UTD), идеально подходят для решения задач излучения и рассеяния электрически очень больших объектов.

Анализ рассеяния электромагнитного поля на электрически больших объектах всегда был сложной задачей. Для достижения высокой точности расчета в FEKO обычно используются методы электродинамического

¹ Учебный центр компании "Родник", с.н.с.

² НПО "Ленинец" (С.-Петербург), начальник отдела.

анализа МоМ или MLFMM. Для электрически больших структур применяют асимптотические методы, такие как метод РО. Однако применение электродинамических методов на крупных объектах ограничивается вычислительными ресурсами компьютера, в то время как метод РО может использовать очень плотную сетку разбиения, что резко увеличивает время расчета.

Для решения этих проблем в FEKO был реализован метод геометрической оптики с лучевым распространением (Ray Launching Geometrical Optics – RL-GO), который позволяет использовать возбуждение плоской волны. Метод RL-GO основан на моделировании лучей, падающих и отраженных от модели объектов, в соответствии с теорией распространения, отражения и преломления оптических лучей. Воздействие лучей на металлические и диэлектрические структуры моделируется при помощи источников Гюйгенса, помещаемых в каждую точку контакта лучей с материальными границами. Процессом распространения лучей (ray launching) легко управлять на основе углового (для локализованных источников) или поперечного (для источников плоской волны) интервала лучей и количества многократных разрешенных интерференций.

Метод RL-GO обеспечивает высокую степень совпадения результатов с методом MLFMM при меньших требованиях к вычислительным ресурсам компьютера. Пример моделирования рассеяния электромагнитного поля на летательном аппарате (рис.1) показывает, что метод RL-GO требует всего 4,6 Мбайт памяти, в то время как для метода MLFMM нужно 441 Мбайт при существенно большем времени расчета. Столь радикальное снижение требований к вычислительным ресурсам – решающий фактор при решении сложных задач.

Преимущества метода RL-GO наглядно проявляются также при анализе зеркальных антенн и линз. В этом случае оптимальный вариант – сочетание методов RL-GO и МоМ. Антенны излучения, освещающие линзу или зеркало, могут быть смоделированы по методу МоМ, а при работе с большой структурой очень эффективен метод RL-GO, использующий связь по дальнему или ближнему полю.

Одна из важных задач, стоящих перед проектировщиками радиоканалов летательных аппаратов (ЛА), – обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоканалов. Необходимость ее решения обусловлена, во-первых, большим количеством разнообразных радиоэлектронных средств (РЭС), в том числе с перекрывающимися частотными диапазонами, а во-вторых, быстро меняющимся взаиморасположением ЛА в пространстве и в группировке.

Для обеспечения ЭМС функционирование РЭС в составе комплекса (включение, выключение, переключение режимов работы) должно регламентироваться по пространственному (диаграммы направленности антенн), частотному и временному разному. Это можно обеспечить путем создания системы управления параметрами электромагнитного излучения (частотным, мощностным и временным режимами, а также направлением излучения антенн) всех взаимодействующих РЭС [1].

При решении данной задачи требуется определить в режиме реального времени внутрисистемную электромагнитную обстановку, включая вычисление коэффициентов электромагнитной связи попарно всех антенн комплекса РЭС (каждая с каждой). В то же время, сложность геометрии ЛА, влияющая на характеристики излучения антенн, обуславливает необходимость применения электродинамических методов расчета, требующих значительных вычислительных ресурсов [2].

На предварительном этапе в программной среде MATLAB формируется ограниченное дискретное множество сценариев взаимного расположения ЛА в пространстве. С помощью ЦЭВМ, обладающей необходимыми вычислительными ресурсами, решается серия соответствующих задач на электродинамическом уровне. По результатам электродинамического расчета коэффициентов электромагнитных связей попарно всех антенн комплекса РЭС для множества сценариев формируется база данных (БД). После необходимой компиляции БД помещается в бортовые вычислители всех ЛА для последующего использования данных в режиме реального времени.

В рамках рассматриваемой концепции на электродинамическом уровне можно выделить три класса задач:

- вычисление коэффициентов связи каждой пары антенн одного борта (для каждого ЛА группи-



Рис.1. Модель летательного аппарата

- ровки). В этот класс задач входят и задачи определения коэффициентов связи антенн одного борта при нахождении рядом других ЛА, фюзеляжи которых влияют на анализируемые связи;
- определение параметров излучения в дальней зоне для всех антенн с учетом влияния собственного фюзеляжа и соседних (например, затеняющих) ЛА. Результаты вычисления диаграмм направленности всех антенн для различных сценариев взаимного расположения ЛА в пространстве образуют массив данных умеренного объема (в форме аппроксимирующих функций или их дискретного представления);
 - ослабление взаимных помех и помех от собственных токонесущих частей ЛА для увеличения отношения сигнал / шум при приеме и обработке сигналов связи, наведения и слежения.

В качестве антенн в моделях ЛА реализованы четвертьволновые вибраторы на металлическом корпусе ЛА. Проводные порты размещены у оснований вибраторов.

Пространственное расположение каждого ЛА (рис.2) определяется координатами начала связанной системы координат (СК) каждого ЛА относительно земной СК и ориентацией ее осей, описываемой тремя углами Эйлера (углом курса, углом тангажа и углом крена). Таким образом, мгновенное положение каждого ЛА характеризуется шестью обобщенными координатами. Для описания сценариев взаимного расположения ЛА в пространстве используется понятие нечетких обобщенных координат (НОК) каждого ЛА



Рис.2. Модели ЛА в группировке, развернутые один относительно другого по трем пространственным координатам

группировки (три декартовы координаты начала связанной СК и три угла Эйлера) [1].

Нечеткие обобщенные координаты – это нечеткое подмножество S универсального (базового) множества Q обобщенных координат $\vec{q} \in Q$, имеющее нормальную и выпуклую многомерную функцию принадлежности $\mu_c(\vec{q})$, то есть такую, что, во-первых, существует значение носителя, в котором функция принадлежности равна единице, а во-вторых, при отступлении от своего максимума в любом направлении функция принадлежности не возрастает.

Для рассматриваемой задачи в [1] предложено использовать унимодальные НОК, когда функция принадлежности нечеткой координаты S имеет максимальное значение только в единственной точке (точнее, имеет бесконечно малую область толерантности). На каждом носителе НОК для описания физической величины определяем аппроксимирующую функцию $f_c(\vec{q})$. Каждая из этих функций может быть построена различными способами: при помощи разных аналитических функций, либо путем обучения искусственных нейронных сетей (можно получить наиболее точную аппроксимацию). Способ построения аппроксимирующих функций для каждой задачи выбирается исходя из двух показателей качества: точности аппроксимации и минимизации вычислительных ресурсов.

Для решения задачи в условиях случайного распределения положения ЛА и, как следствие, характеристик связи и наведения используется следующий алгоритм [3]:

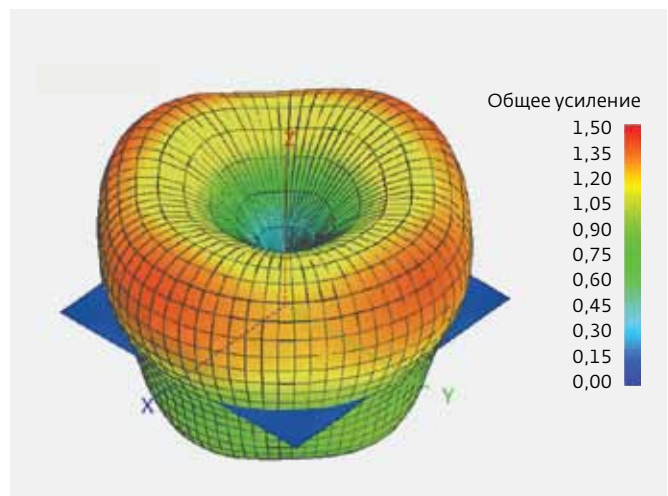


Рис.3. Диаграмма направленности монопольной антенны на металлической плоскости конечного размера

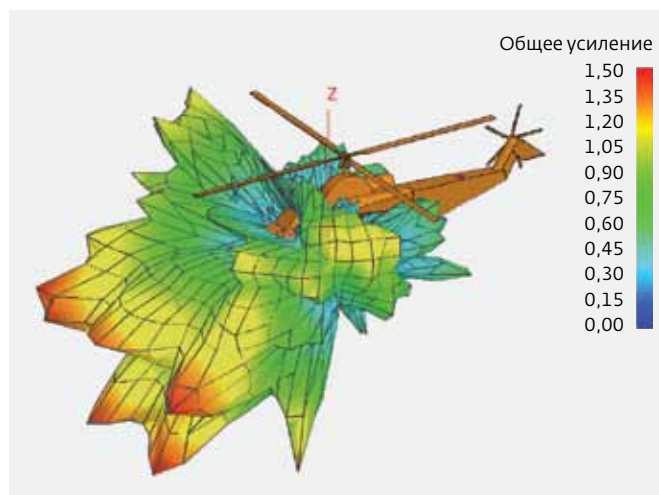


Рис.4. Рассчитанная трехмерная ДН антенны, находящейся на ЛА

- формируется дискретное множество сценариев пространственного расположения ЛА группировки в связанной СК ЛА-передатчика, в которых ЛА-приемник и другие ЛА, влияющие на распространение электромагнитного излучения, располагаются в модах НОК $\{C_n\}$. Множество сценариев строится для каждой пары антенн;
- для каждого сценария определяется коэффициент электромагнитной связи для рассматриваемой пары антенн в среде ФЕКО. Путем расчета коэффициентов связи для произвольных значений НОК формируется система аппроксимирующих (базисных) функций $\{\varphi_{c_n}(\vec{q})\}$ и определяется аппроксимирующая функция коэффициента электромагнитной связи антенн. Все указанные вычисления производятся в "домашнем" режиме;
- полученный ограниченный объем информации (множество мод $\{C_n\}$) и система аппроксимирующих (базисных) функций $\{\varphi_{c_n}(\vec{q})\}$ для каждого сценария запоминаются в бортовых вычислителях ЛА группировки;
- в режиме реального времени для каждой пары антенн на борту ЛА вычисляются относительные обобщенные координаты \vec{q} и определяется соответствующий коэффициент связи.

Рассмотрим monopольную антенну, расположенную на металлической плоскости конечного размера в пространстве (рис.3). У такой антенны излучение вдоль вертикальной оси отсутствует. Можно сказать, что это направление, вдоль которого наблюдается подавление сигнала.

Изменение положения диаграммы направленности (ДН) антенны позволяет отслеживать направление

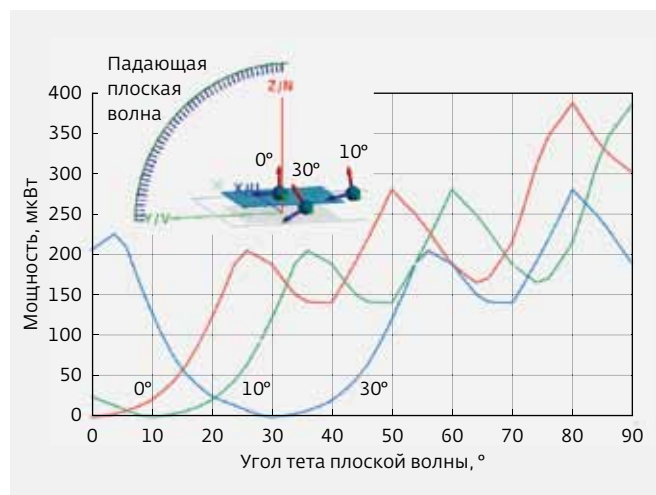


Рис.5. Мощность, принятая антеннами при облучении ЛА плоской волной, падающей под различными углами в диапазоне 0...90°

появления помехи и подавлять ее, увеличивая таким образом отношение сигнал / шум на входе приемника. Однако при установке такой антенны на корпус сложного летательного аппарата вид ДН заметно меняется (рис.4). Чтобы менять положение приемной антенны на корпусе, можно ДН, рассчитанную как отдельную задачу, использовать в качестве приемной антенны (receiver antenna) и изменять положение только этого объекта для решения задачи связи и рассеяния поля.

Выполним расчет ЛА длиной 20 м на частоте 200 МГц (см. рис.4). Время расчета по методу MFLMM на компьютере с ОЗУ объемом 16 Гбайт и тактовой частотой процессора 1 ГГц составляет 10 мин на частотную точку.

Кроме расчета ДН этот метод позволяет определить связь между антеннами, находящимися на корпусе ЛА, в диапазоне частот, а также оптимизировать положение антенн. Трехмерную ДН, записан-

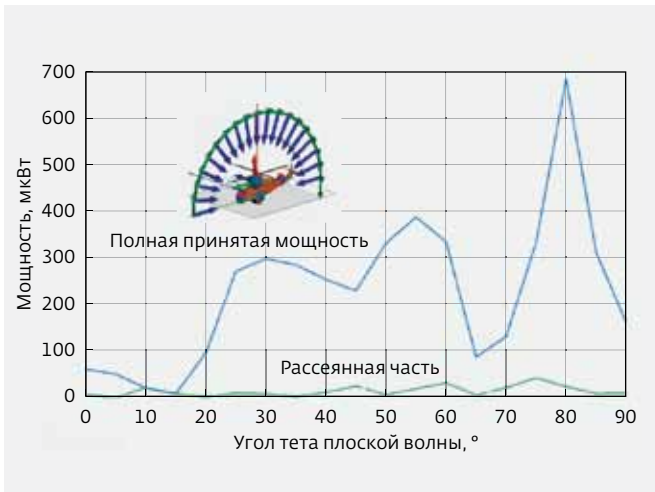


Рис.6. Зависимость мощности на входе приемной антенны, находящейся на корпусе ЛА, при изменении угла падения плоской волны

ную в файл, можно использовать как для описания возбуждения такой антенны в виде точечного источника, так и в качестве приемной антенны с такой же ДН. Таким образом, задача взаимодействия ЛА с учетом НОК упрощается и сводится к анализу характеристик радиоканалов. Для оценки полной мощности, принятой антенной, а также рассеяния, наведенного металлическими объектами, в FEKO предусмотрена специальная опция Include Only the Scattered Part of the Field (только рассеянная часть поля). Эта опция служит для оценки полной и рассеянной части мощности, принятой отдельными антеннами, установленными на ЛА сложной формы.

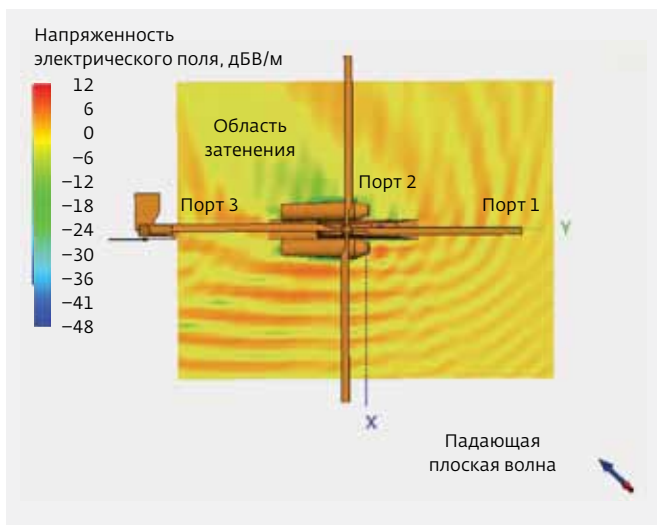


Рис.7. Падение плоской волны на ЛА и моделирование распространения волн во временной области

Выполним расчет мощности на отдельных приемных антеннах, развернутых в пространстве под углом 0, 10 и 30°, при облучении ЛА плоской волной, падающей под различными углами в диапазоне $\Theta = 0-90^\circ$ (рис.5). Затем поместим элемент рассчитанной ДН антенны на полную модель ЛА и рассчитаем зависимость рассеянной части мощности от угла падения (рис.6). Рассчитав этот параметр во всех направлениях с заданным угловым шагом, получим необходимую информацию для формирования банка данных, используя которые процессор будет корректировать принятые с заданного направления сигналы.

В последних версиях FEKO реализован еще один метод – расчет во временной области. В этом случае падающий радиоимпульс электромагнитного поля, развернутый по временной оси, позволяет выделить временной процесс как падающего, так и отраженного импульса, появившегося на входе антенны из-за отражения от заднего хвостового оперения и от металлических токонесущих частей корпуса ЛА (рис.7).

* * *

Мощная САПР электродинамического моделирования FEKO позволяет рассчитать диаграммы направленности крупных антенных систем, установленных на летательных аппаратах, в условиях нечетких систем координат. Когда связь между летательными аппаратами, постоянно меняющими свое положение относительно друг друга, носит случайный характер, важно обеспечить высокую точность и скорость расчета. В данной статье показано, как с помощью САПР FEKO можно улучшить связь между радиоканалами и свести к минимуму наводимые пространственные помехи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Курушин А.А., Мюккья И.В., Подковырин С.И.** Определение электромагнитных связей антенн радиоэлектронных средств в группировке летательных аппаратов // Международная конференция "Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий" REDS-2015 РНТОРЭС им. А.С.Попова. Доклады. Серия: Научные конференции, посвященные Дню радио (выпуск LXX). – М., 2015. С. 262–265.
2. **Банков С.Е., Грибанов А.Н., Курушин А.А.** Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. – М., OneBook, 2013.
3. **Веденькин Д.А., Латышев В.Е., Седельников Ю.Е.** Оценка коэффициентов связи антенн для задач обеспечения ЭМС бортового РЭО перспективных беспилотных авиационных комплексов // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 12.