

УДК 621.371

**Результаты решения задач дифракции на телах большого электрического
размера с использованием программы FEKO**

Можарова О.А.

Студент, кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Научный руководитель: Ахияров В.В., к.т.н., доцент кафедры

«Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

МГТУ им. Н.Э. Баумана

mozharova.ollya@gmail.com

Задачи, связанные с определением характеристик электромагнитного поля, рассеянного объектами, называются дифракционными. Наиболее общим подходом к решению дифракционных задач является метод интегральных уравнений (ИУ). В программе FEKO реализован численный метод решения интегральных уравнений – метод моментов (МОМ), приближение физической оптики (ФО) а также ряд других методов [1]. В основе МОМ лежит дискретизация поверхности. Размер элемента разбиения выбирается так, чтобы плотность поверхностного тока в его пределах была постоянной (в программе FEKO поверхность объекта разбивается на треугольники). Таким образом, интегральное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Большой порядок СЛАУ требует больших вычислительных затрат. Для ускорения расчетов в программе FEKO используется быстрый многоуровневый метод мультиполей (multilevel fast multipole method - MLFMM). В отличие от МОМ, в методе мультиполей рассматривается взаимодействие между группами треугольных элементов. В случае, когда возможности компьютера, ограничены, для решения задач дифракции на телах большого электрического размера применяют метод физической оптики (ФО). Метод ФО позволяет решать

электродинамические задачи в сжатые сроки, но может привести к неконтролируемым ошибкам, поэтому перед его использованием требуется решение модельных задач.

Рассмотрим задачу дифракции на сфере, которая является эталонной, поскольку имеет аналитическое решение. В табл.1 и на рис.1 приведены результаты расчёта напряжённости электрического поля для сферы радиуса $a = 0,5$ м с электрическим размером $ka = 9,4$ ($k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ – волновое число), что соответствует $\lambda = 0,333$. Во всех рассматриваемых задачах поверхность объекта считается идеально проводящей, а поляризация приема полагается согласованной с поляризацией излучения. На рис.1 представлены диаграммы бистатистического рассеяния для различного числа треугольников N_{Δ} (при этом площадь элементов S_{Δ} также будет различной). По умолчанию длина стороны треугольника в программе FEKO принимается равной $l = \lambda/8$. Расчеты выполнялись при $l = \lambda/10$, $l = \lambda/5$ и $l = \lambda/3$. Размером элемента будет определяться размер СЛАУ.

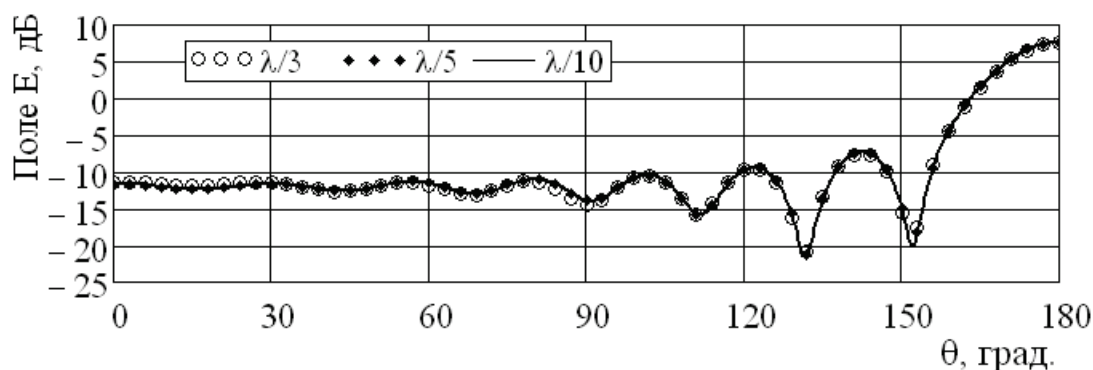


Рис. 1. Графики напряжённости электрического поля для сферы при $ka = 9,4$, $l = \lambda/10$, $l = \lambda/5$ и $l = \lambda/3$

Для рассматриваемой задачи максимальная погрешность (относительно решения, полученного при $l = \lambda/10$) составила 0,3 дБ ($l = \lambda/5$) и 1 дБ ($l = \lambda/3$), для $l = \lambda/3$ результат получен в 11,5 раз быстрее, чем для $l = \lambda/10$ (см. рис.1). Применение метода MLFMM позволяет получить решение в 3 раза быстрее (см. табл.1). Расчеты выполнялись на ПК с процессором Intel Core 2 Quad CPU (тактовая частота 2,40 ГГц), объем оперативной памяти – 4 ГБ.

Таблица 1

Затраты времени и памяти при расчёте в программе FEKO для сферы с $ka = 9,4$

Длина стороны Δ l , м	Метод рас- чета	Площадь S_{Δ} , м ²	Кол-во N_{Δ}	Требуемая па- мять, Мб	Время расчёта, мин	$E_{\text{обр.рас.}}$, дБ
-----------------------------------	--------------------	--	------------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------------

$\lambda/3$	MOM	0,098	762	10	0,052	-11,4
$\lambda/5$	MOM	0,060	2020	71	0,224	-11,6
$\lambda/10$	MOM	0,029	8748	1289	4,27	-11,6
$\lambda/10$	MLFMM	0,029	8748	225	1,73	-11,6

При дальнейшем увеличении электрического размера сферы для ускорения вычислений возможно применение метода ФО. Результаты расчетов напряженности поля с использованием MOM, MLFMM и ФО приведены для $ka = 28,4$ и $ka = 159$ на рис.2 и в табл.2.

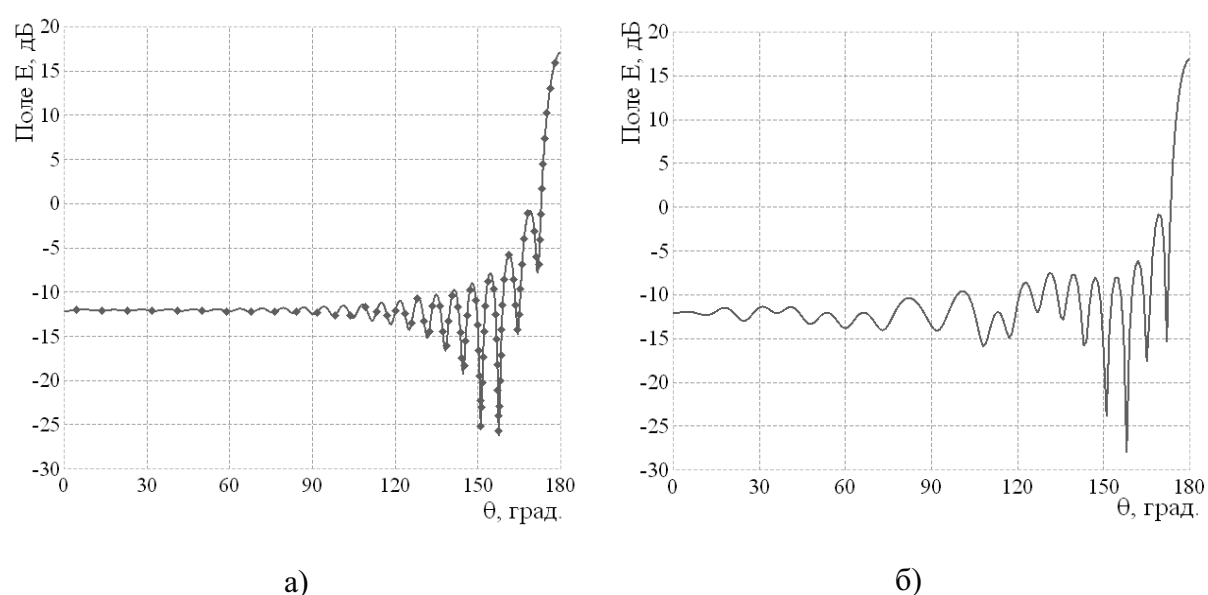


Рис. 2. Графики напряжённости электрического поля для сферы с $ka = 28,4$;

а) – MOM (сплошная линия), MLFMM (точки); б) – физическая оптика

Таблица 2

Затраты времени и памяти при расчёте в программе FEKO для сферы

с $ka = 28,4$ и $ka = 159$

λ , м	ka	Длина стороны Δ	Метод расчета	S_{Δ} , м ²	N_{Δ}	Требуемая память, Мб	Время расчёта, мин	$E_{\text{обр.р.}}$, дБ
0,111	28,3	$\lambda/10$	MOM	0,0098	76448	404	1089,5 (18,2 ч)	-12,1
0,111	28,3	$\lambda/10$	MLFMM	0,0098	76448	1252	54,76	-12,1

0,111	28,3	$\lambda/10$	ФО	0,0098	77130	129	1,04	-12,1
0,111	28,3	$1,5 \cdot \lambda$	ФО large	0,1541	308	0, 773	0,1144	-10,1
0,02	157,9	$\lambda/10$	ФО	0,0036	569140	953	15,88	-12,1
0,02	157,9	$1,5 \cdot \lambda$	ФО large	0.0265	10482	21	0,283	-12,2

Как видно из представленных в табл.2 результатов, расчеты методом физической оптики выполняются примерно в 50 раз быстрее, чем при использовании MLFMM. Из рис.2 видно, что диаграмма бистатического рассеяния, полученная методом ФО, отличается от решений MOM и MLFMM, однако, в областях прямого и обратного рассеяний наблюдается очень хорошее соответствие результатов.

При дальнейшем увеличении электрического размера объекта число элементов N_{Δ} существенно возрастает. Для решения таких задач в программе FEKO предусмотрена возможность увеличить сторону треугольника примерно на порядок: $l = 1,5 \cdot \lambda$ и использовать метод решения ФО large. В качестве примера на рис.3 представлены результаты расчетов методом ФО для сферы с электрическим размером $ka = 159$ при $l = \lambda/10$ (рис.3,а) и $l = 1,5 \cdot \lambda$ (рис.3,б). В направлении обратного рассеяния отличие между расчетами не превышает 0,05 дБ (рис.3). Решение методом ФО large тем точнее, чем больше электрический размер тела (см. табл.2).

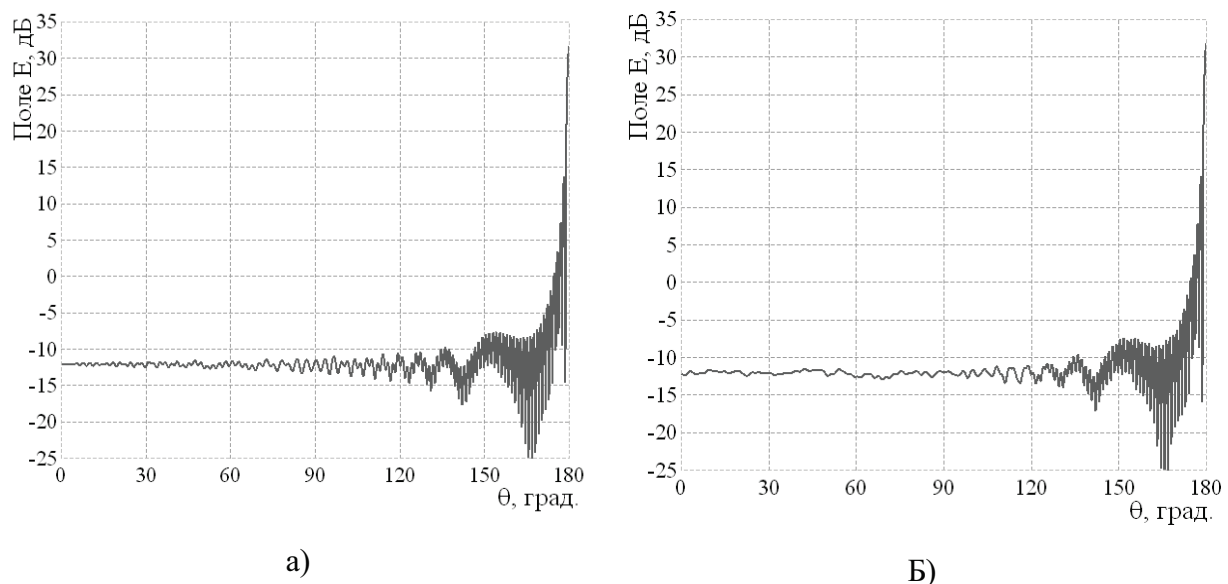


Рис. 3. Графики напряжённости электрического поля для сферы с $ka = 159$;

а) метод ФО, б) ФО с большими элементами разбиения (ФО large)

Как показали результаты вычислительных экспериментов, прямое применение метода MOM возможно до значений $ka < 50$. Реализованный в FEKO быстрый метод муль-

типолей позволяет существенно ускорить процесс вычислений без потери точности. С другой стороны, полученные результаты свидетельствуют о том, что реализованные в программе FEKO методы ФО и ФО large пригодны для решения задач обратного рассеяния на телах большого электрического размера ($ka > 150$). Это позволяет вычислять эффективную площадь рассеяния различных объектов (например, гражданских и военных самолетов).

В 1998 г. нашими коллегами были получены диаграммы обратного рассеяния для модели самолета B2 Spirit [2]. В настоящее время существует возможность использования более совершенных САПР, позволяющих получить более точную модель объекта. Модель самолета B2 Spirit (рис.4,б), заимствованная с сайта [3], имеет воздухозаборники и кабину пилотов (которая полагается неостекленной) и отличается от оригинала (рис.4,а), тем что имеет округлые очертания хвостовой части.



а)



б)

Рис. 4. Модель самолета B2 Spirit;
а) реальная, б) в программе FEKO

Для расчета можно использовать смешанное нанесение сетки: на кромках и неровных участках применить разбиение, соизмеримое с $\lambda/8$, уменьшая его до $\lambda/3$ на гладких поверхностях. В данном случае использовалась однородная сетка, рассеянное поле вычислялось с использованием методов ФО и ФО large с учетом дифракции на кромках. Считаем, что плоская волна облучает самолет под углом 5° снизу от осевой линии планера (см. рис.5). Длина волны выбрана равной 1 м и 3 см, поляризация излучения – горизонтальная.

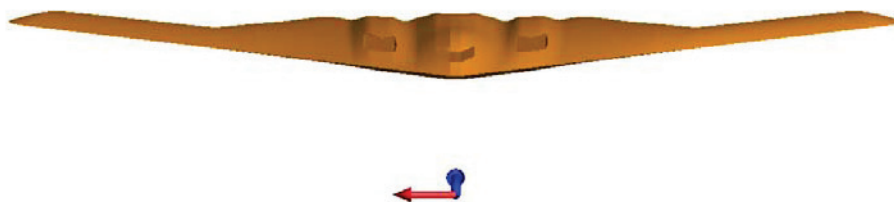


Рис. 5. Геометрия задачи в программе FEKO

На рис.6 показана плотность распределения поверхностного тока, на рис.7 – напряженность электрического поля в ближней зоне. Из рис.6 видно, что наибольшее значение плотности тока достигается в районе воздухозаборников и кабины пилотов, а из рис.7 – что рассеяние вперед практически отсутствует. Диаграммы бистатической эффективной площади рассеяния для длин волн 1 м и 3 см показаны на рисунках 8,а и 8,б. Полученные результаты демонстрируют малое рассеяние в обратном направлении, в направлениях $\pm 70^\circ$ наблюдаются отражения от крыльев.

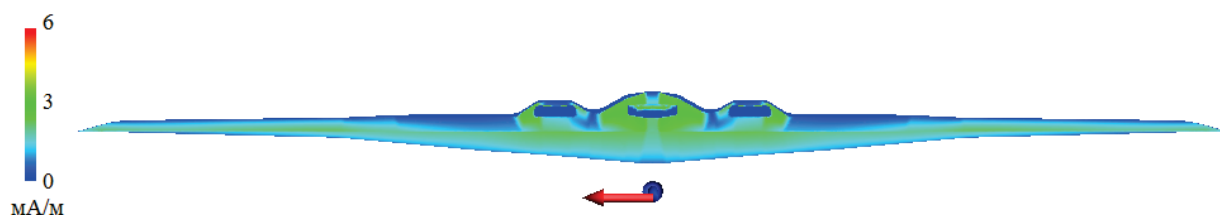


Рис. 6. Распределение плотности поверхностного тока при $\lambda = 1$ м

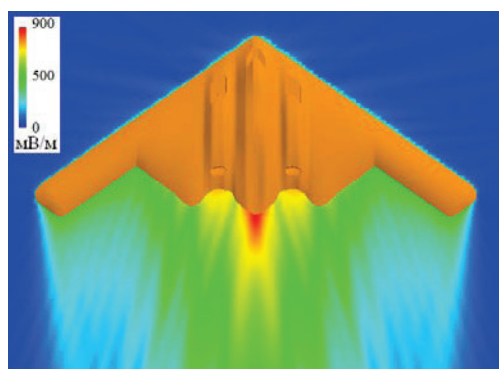


Рис. 7. Распределение поля в ближней зоне при $\lambda = 1$ м

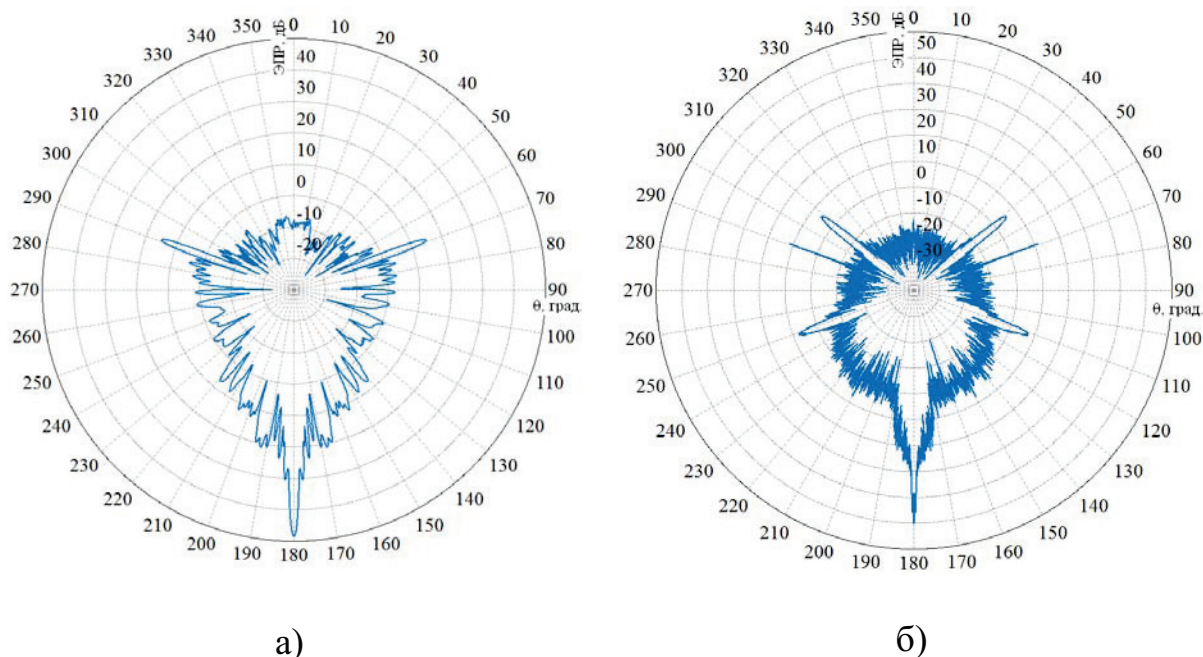


Рис. 8. Диаграммы бистатической ЭПР: а) $\lambda = 1$ м, б) $\lambda = 3$ см

Из диаграмм бистатической ЭПР для длин волн 1 м и 3 см, видно, что в широком секторе углов средние значения ЭПР примерно равны -10 дБ и -20 дБ, что соответствует $0,1 \text{ м}^2$ и $0,01 \text{ м}^2$. ЭПР при обратном рассеянии равна $0,16 \text{ м}^2$ ($\lambda = 1$ м) и $0,057 \text{ м}^2$ ($\lambda = 3$ см). По данным свободной интернет-энциклопедии (Википедии), ЭПР самолета B2 лежит в пределах $0,0014 \text{ м}^2$ до $0,1 \text{ м}^2$, полученный при $\lambda = 3$ см результат находится в указанном диапазоне. Такое значение ЭПР очень мало для самолёта с размахом крыльев 52,40 м, длиной 20,90 м, высотой 5,45 м и площадью несущей поверхности $464,5 \text{ м}^2$ [4].

Список литературы

1. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР.М., 2008. 276 с.
2. А.Б.Борзов, Р.П.Быстров, А.В.Соколов Анализ радиолокационных характеристик объектов сложной пространственной конфигурации. <http://jre.cplire.ru/mac/dec98/4/text.html> (дата обращения: 13.02.2013).
3. Модель самолёта B2 Spirit. <http://grabcad.com/library/northrop-b2> (дата обращения: 13.02.2013).
4. Авиационная энциклопедия «Уголок неба». Параметры бомбардировщика B-2 Spirit. <http://www.airwar.ru/enc/bomber/b2.html> (дата обращения: 12.02.2013).