

Моделирование поля рассеяния противотанковой ракеты FGM-148 Javelin в САПР Altair Feko

И. Ф. Купряшкин¹✉, К. Ю. Заводских²

¹ ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия

² АО «НПО Корпорация "РИФ"», Воронеж, Россия

✉ ifk78@mail.ru

Аннотация

Введение. Системы автоматизированного проектирования СВЧ-устройств являются эффективным инструментом оценки отражающих характеристик объектов сложной формы. Однако проведение этих расчетов часто сопряжено со значительными вычислительными затратами, особенно при больших значениях отношения характерных размеров объекта к длине волны. Использование асимптотических методов в сочетании с укрупнением сетки разбиения модели объекта позволяет существенно снизить эти затраты, однако в каждом практическом случае это приводит к труднопрогнозируемому ухудшению точности получаемых оценок.

Цель работы. Проведение сравнительной оценки результатов моделирования поля рассеяния в САПР СВЧ-устройств при использовании различных методов расчета и детализации модели объекта в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн.

Материалы и методы. В качестве объекта рассматривается противотанковая управляемая ракета FGM-148 Javelin, моделирование поля рассеяния осуществляется в САПР СВЧ-устройств Altair FEKO методами моментов и физической оптики в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц и углов от 0 до 180°. Осуществляется сравнение одномерных диаграмм обратного рассеяния и двумерных радиолокационных портретов, полученных с использованием указанных методов.

Результаты. Для рассматриваемого класса объектов использование метода физической оптики обеспечивает приемлемую точность результатов на частотах от 5 ГГц и выше при шаге разбиения поверхности модели около одного сантиметра и общей продолжительности расчета в пределах единиц минут (ПЭВМ Intel Core i5-4460/3,2 ГГц/ОЗУ 8 Мбайт). На меньших частотах приемлемая точность и аналогичная продолжительность расчетов достигаются при расчете методом моментов и шаге разбиения около 20 см. Продемонстрирована возможность применения САПР Altair FEKO для моделирования двумерных радиолокационных портретов объектов с разрешением не хуже 20 см.

Заключение. Полученные результаты дополняют известные исследования в области сравнительной оценки временных и точностных характеристик различных методов расчета поля рассеяния объектов сложной формы в САПР СВЧ-устройств.

Ключевые слова: диаграмма обратного рассеяния, эффективная поверхность рассеяния, метод физической оптики, метод моментов, двумерный радиолокационный портрет, противотанковая управляемая ракета

Для цитирования: Купряшкин И. Ф., Заводских К. Ю. Моделирование поля рассеяния противотанковой ракеты FGM-148 Javelin в САПР Altair Feko // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 5. С. 66–79. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-66-79

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.08.2021; принята к публикации после рецензирования 13.09.2021; опубликована онлайн 29.11.2021

Modeling of the Scattering Field of an FGM-148 Javelin Anti-Tank Missile in Altair Feko

Ivan F. Kupryashkin¹ ✉ Kirill Yu. Zavodskiyh²

ME&SC of the Air Force "Air Force Academy n. a. Professor N. E. Zhukovsky
and Yu. A. Gagarin", Voronezh, Russia

² JSC «NPO Corporation "RIF"», Voronezh, Russia

✉ ifk78@mail.ru

Abstract

Introduction. Computer-aided design systems for microwave devices are an effective tool for assessing the backscattering characteristics of complex-shaped objects. However, these calculations are often associated with significant computational costs, especially at large values of the ratio of the characteristic dimensions of the object to the wavelength. The use of asymptotic methods in combination with the mesh coarsening of object partition can significantly reduce these costs. However, in each practical case, this leads to a deterioration in the accuracy of the estimates obtained, which is hard to predict.

Aim. Comparative assessment of the results of modeling the scattering field in the CAD of microwave devices using various methods for calculating and detailing the object model in the decimeter and centimeter wavelength ranges.

Materials and methods. The research object was an anti-tank guided missile FGM-148 Javelin. The scattering field of Altair FEKO microwave devices was modeled in CAD using the methods of moments and physical optics in the frequency range from 1 to 10 GHz and angles from 0 to 180°. A comparison of one-dimensional backscatter diagrams and radar images obtained using these methods was carried out.

Results. For the class of objects under consideration, the method of physical optics provides acceptable accuracy at frequencies of 5 GHz and higher with a step of partitioning the model surface of the order of one centimeter and a total calculation duration of the order of several minutes (Intel Core i5-4460 PC / 3.2 GHz / 8 MB RAM). At lower frequencies, acceptable accuracy and a similar calculation duration are achieved when calculating by the method of moments and a partitioning step of about 20 cm. The possibility of using the Altair FEKO CAD system for modeling radar images of objects with a resolution of at least 20 cm is demonstrated.

Conclusion. The results obtained complement the well-known studies in the field of comparative assessment of the time and accuracy characteristics of various methods for calculating the scattering field of objects in the CAD of microwave devices.

Keywords: backscatter diagram, radar cross section, physical optics, method of moments, radar image, anti-tank guided missile

For citation: Kupryashkin I. F., Zavodskiyh K. Yu. Modeling of the Scattering Field of an FGM-148 Javelin Anti-Tank Missile in Altair Feko. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 5, pp. 66–79. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-5-66-79

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Submitted 09.08.2021; accepted 13.09.2021; published online 29.11.2021

Введение. Противотанковые управляемые ракеты (ПТУР) являются одним из наиболее эффективных средств поражения авто- и бронетехники, поэтому своевременное обнаружение и уничтожение этих ракет является необходимой мерой защиты.

Задачи защиты этих объектов от реактивных противотанковых гранат, ПТУР, кумулятивных снарядов танковых пушек, а также бронебойных подкалиберных снарядов решаются современными многоцелевыми комплексами активной защиты [1]. Для этого в их состав включаются активные ра-

диолокационные датчики, при обосновании технических характеристик которых существенную роль играют оценки эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) перечисленных боеприпасов противника.

Исследование отражающей способности перечисленных объектов может осуществляться посредством проведения натурных измерений с использованием масштабных моделей или моделирования поля рассеяния на ЭВМ. Учитывая возможности современной вычислительной техники и достигнутый уровень методов теории дифракции второй способ более предпочтителен, так как позволяет получать оценки ЭПР объектов в широком частотном диапазоне и в то же время не требует использования специального оборудования (макета ракеты, безэховой камеры, РЛС и др.).

Однако несмотря на очевидные преимущества, достоверное моделирование процесса отражения радиоволн требует разработки эффективных алгоритмов решения дифракционной задачи и трудоемкого ввода информации о поверхности объекта. Существенно облегчить эту задачу позволяет использование современных САПР СВЧ-устройств (Ansoft HFSS, FEKO, Epsilon и др.) [2–4], обладающих развитым пользовательским интерфейсом и широким набором методов электродинамического моделирования.

Тем не менее, основной проблемой при расчете ЭПР является практически экспоненциальное возрастание требований к вычислительной мощности и объему памяти ЭВМ при увеличении отношения размеров объекта к длине волны. Смягчению этих требований способствует применение асимптотических методов расчета, а также уменьшение количества элементов разбиения модели объекта. Однако неизбежной платой за достигаемый выигрыш в скорости расчетов является снижение точности получаемых результатов.

Таким образом, целью работы является проведение сравнительной оценки результатов моделирования поля рассеяния в САПР СВЧ-устройств при использовании различных методов расчета и детализации модели объекта в дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн.

Для обоих диапазонов это позволит осуществить рациональное сочетание степени детальности описания объекта и используемого метода расчета, при котором оценка характеристик рассеяния с приемлемой

точностью может быть получена за относительно короткое время (единицы минут).

Методы. Одним из наиболее совершенных противотанковых ракетных комплексов на сегодняшний день является комплекс FGM-148 Javelin, принятый на вооружение в 1996 г. [5]. Ракета комплекса выполнена по нормальной аэродинамической схеме с раскрывающимися крыльями (рис. 1). Диаметр ракеты составляет 126.9 мм, длина – 1081.2 мм.



Рис. 1. Внешний вид ракеты комплекса FGM-148 Javelin
Fig. 1. FGM-148 Javelin Anti-Tank Guided Missile

Среди современных САПР СВЧ-устройств (Ansoft HFSS, FEKO, Epsilon и др.) наиболее удобной с точки зрения решаемой задачи авторам настоящей статьи представляется САПР Altair FEKO [6–11]. Сравнительная оценка результатов натурных измерений и моделирования поля рассеяния фрагмента авиационной ракеты продемонстрировала высокую точность данных, получаемых с помощью данной САПР [12].

Дифракционная задача в САПР FEKO может решаться методами геометрической или физической оптики, однородной теории дифракции, физической теории дифракции, быстрым мультипольным методом или методом моментов [6].

Для исследования радиолокационных характеристик ПТУР Javelin в САПР Altair FEKO была разработана ее 3D-модель (рис. 2). Поверхность модели принималась идеально проводящей. Осуществлялось сравнение двух методов расчета: метода физической оптики (PO) [13] и метода моментов (MoM), являющегося наиболее точным из реализованных в FEKO. САПР FEKO обеспечивает возможность автоматического разбиения поверхности модели на треугольные элементы (фацеты), и в данном случае при задании средней длины стороны 0.1 см их количество составило 12 914 (рис. 2, а). Размер каждой фацеты определяется САПР автоматически исходя из особенностей геометрии конкретного участка поверхности объекта. Здесь минимальная длина стороны составила 0.25 см, максимальная – 1.45 см.

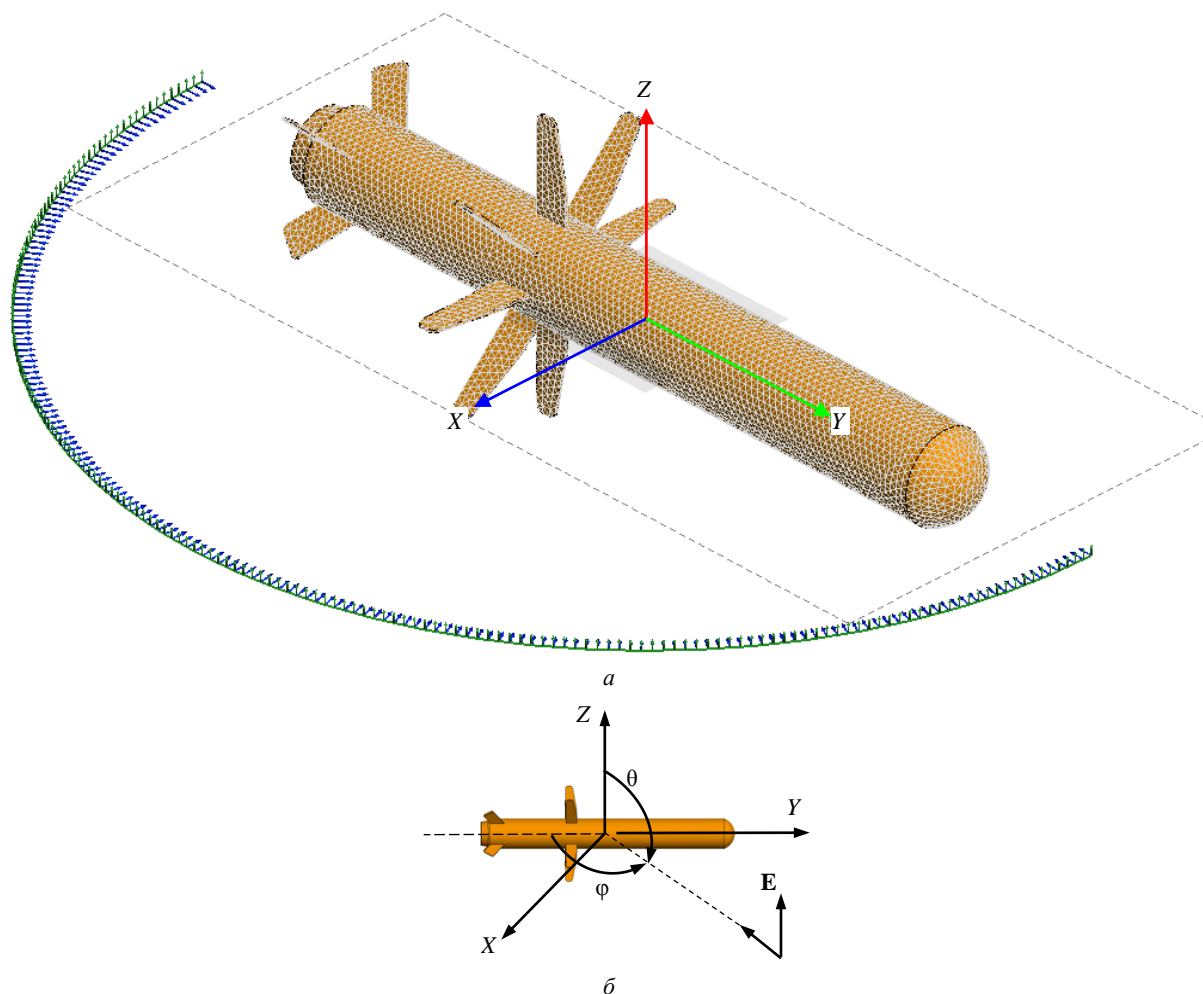


Рис. 2. Фацетная модель: вид (а) и схема ее облучения (б)

Fig. 2. View of the facet model (a) and the scheme of its irradiation (b)

Исходя из цели работы диапазоны частот и угловых ракурсов падающего излучения задавались в пределах $1 \dots 10$ ГГц с шагом 1 ГГц и $\varphi = 0 \dots 180^\circ$ с шагом 1° соответственно (рис. 2, а) при заданном угле θ . Обозначения величин, характеризующих геометрию облучения и ориентацию вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} , приведены на рис. 2, б. Нулевое значение азимута соответствует облучению с направления двигателя ракеты, значение 180° – со стороны носовой части. Угол θ принимался равным 90° , что соответствует условиям наблюдения ПТУР, характеризующейся небольшой максимальной высотой полета (до 160 м), однопозиционной РЛС. Поляризация на передачу и прием вертикальная, т. е. вектор \mathbf{E} параллелен оси Z. Диапазон азимутов от 0 до 180° достаточен для оценки круговой диаграммы обратного рассеяния в силу симметрич-

ной формы ракеты. Потери в среде распространения не учитывались, так как дальность наблюдения ПТУР небольшая (до двух километров), и в этом случае атмосферными потерями в выбранных диапазонах можно пренебречь.

Результаты расчета диаграмм обратного рассеяния при высокой детализации модели объекта. Результаты расчета диаграмм обратного рассеяния (ДОР) на различных частотах приведены на рис. 3. Из-за неточности моделирования двигателя (детально конструкция сопла не воспроизводилась) и головки самонаведения (обтекатель является радиопрозрачным, а электрические характеристики элементов оптической системы наведения неизвестны) оценки ЭПР около 0 или 180° могут несколько отличаться от реальных значений.

Из анализа зависимостей, показанных на рис. 3, следует, что по мере увеличения частоты (укорочения длины волны) пик ДОР около 90° становится все более выраженным и узким.

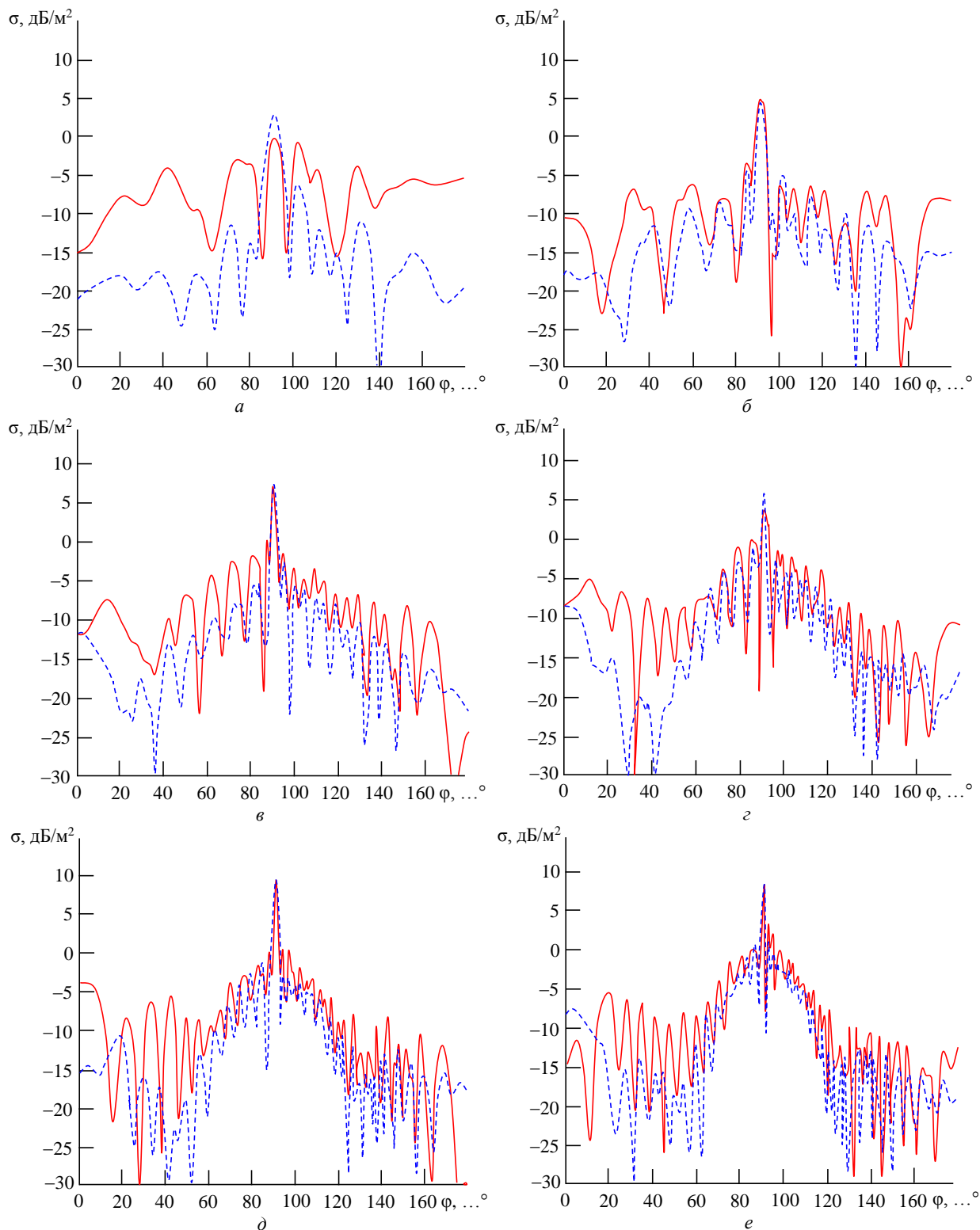


Рис. 3. Азимутальные диаграммы обратного рассеяния ПТУР Javelin на частотах
 1 ГГц (а), 2 ГГц (б), 3 ГГц (в), 4 ГГц (г), 5 ГГц (д), 6 ГГц (е), 7 ГГц (ж), 8 ГГц (з), 9 ГГц (и), 10 ГГц (к)

Fig. 3. Backscatter diagrams of Javelin ATGM at frequencies
 of 1 GHz (a), 2 GHz (b), 3 GHz (c), 4 GHz (d), 5 GHz (e), 6 GHz (f), 7 GHz (g), 8 GHz (h), 9 GHz (i), 10 GHz (k)

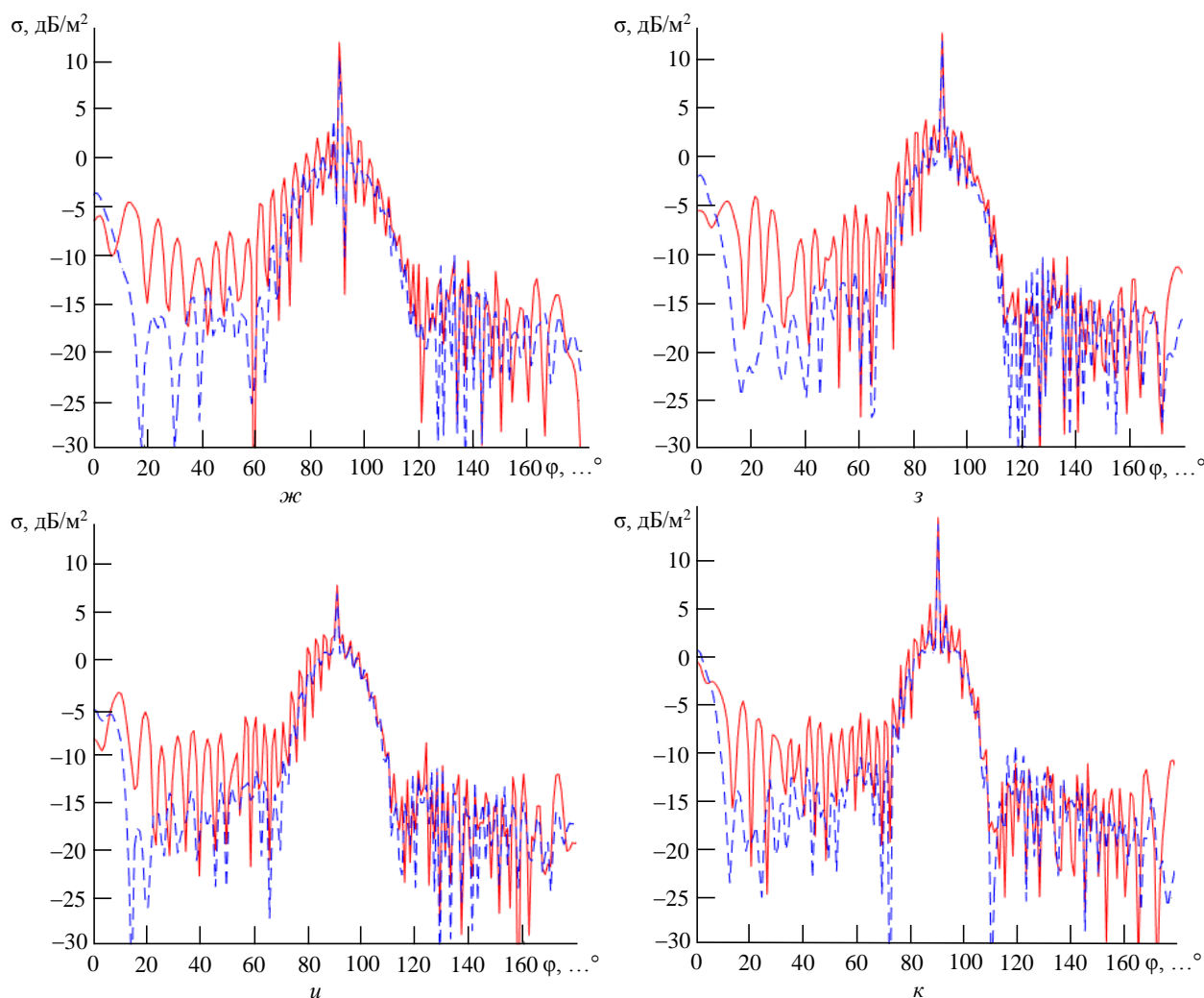


Рис. 3. Окончание

Fig. 3. Finish

Это объясняется вполне очевидными соображениями исходя из цилиндрической формы фюзеляжа ракеты. Максимальное значение ЭПР составляет примерно $1...3 \text{ м}^2$ ($0...5 \text{ дБ/м}^2$) на частотах до 4 ГГц и от 10 до 30 м^2 ($10...15 \text{ дБ/м}^2$) на частотах 5...10 ГГц. Значения ЭПР в области максимума, полученные с помощью различных методов, на частотах от 2 ГГц и выше приблизительно одинаковы. Общий характер ДОР также примерно одинаков для частот от 3 ГГц и выше, имеющиеся различия не превышают 0.3 м^2 . Наиболее существенные различия, вплоть до двукратного в области максимума, наблюдаются на частоте облучения около 1 ГГц. Длина волны при этом составляет 30 см и превышает диаметр и характерные размеры элементов конструкции ракеты. По всей видимости, это отличие обуслов-

лено большей точностью расчетов с помощью МоМ по сравнению с асимптотическим методом РО при небольшом отношении размеров объекта к длине волны.

Высокая точность результатов моделирования обеспечивается в случае, когда средняя длина стороны facets l_ϕ не превышает одной десятой длины волны ($10 l_\phi \leq \lambda = c/f$) [6].

И хотя для рассматриваемого случая это условие выполняется при частотах до 3 ГГц, результаты оценок максимальной ЭПР и ширины главного лепестка ДОР можно считать точными и для более высоких частот благодаря тому, что фюзеляж ракеты имеет относительно простую цилиндрическую форму.

Сравнение результатов расчета диаграмм обратного рассеяния при высокой, средней и низкой детализациях модели объекта. Вид используемого метода расчета помимо точности результатов в значительной степени определяет и общую длительность процедуры их получения. Ее также определяет общее количество facets, на которое разбивается поверхность объекта. Для сравнительной оценки продолжительности расчетов было дополнительно проведено моделирование поля рассеяния для двух более грубых разбиений поверхности ракеты (рис. 4).

Характеристики facетных моделей, а также результирующая продолжительность расчетов на ПЭВМ (Intel Core i5-4460/3.2 ГГц/ОЗУ 8 Мбайт) с распараллеливанием на 4 вычислительных потока приведены в таблице.

Несмотря на то, что в случаях средней и низкой детальности разбиения средние длины facет являлись практически одинаковыми, необходимо понимать, что это в основном относится к достаточно небольшим элементам конструкции ПТУР (крыльям, хвостовому оперению). Размеры facет, которыми аппроксимировалась поверхность фюзеляжа ракеты, отличались более существенно (рис. 4) и при низкой детальности достигали десятков сантиметров.

На рис. 5–8 приведены ДОР ракеты, рассчитанные обоими методами при трех степенях детализации ее поверхности для частот 1, 3, 6 и 10 ГГц соответственно (поляризация вертикальная). Установлено, что существенно в большей степени детальность разбиения поверхности влияет на результаты расчетов при использовании метода моментов. На частоте 1 ГГц результаты расчетов при использовании одного и того же метода расчета для разной детализации практически не различаются (рис. 5). Это обусловлено выполнением условия $10l_{\phi} \leq \lambda = c/f$, так как λ в данном случае составляет 30 см, а средняя длина facеты l_{ϕ} не превышает 0.3 см даже при низкой детализации разбиения. Различия в результатах расчетов остаются несущественными и для частоты 3 ГГц (рис. 6), когда выполняется условие $5l_{\phi} \leq \lambda$.

При частоте облучения 6 ГГц (рис. 7) эти различия увеличиваются, а при 10 ГГц (рис. 8) низкая детализация разбиения, когда средняя длина facеты сопоставима с длиной волны, становится совершенно неприемлемой. Это особенно заметно при использовании метода моментов, когда характерная картина с отчетливо выраженным пиком ДОР в области 90° перестает быть наблюдаемой (рис. 8, а).

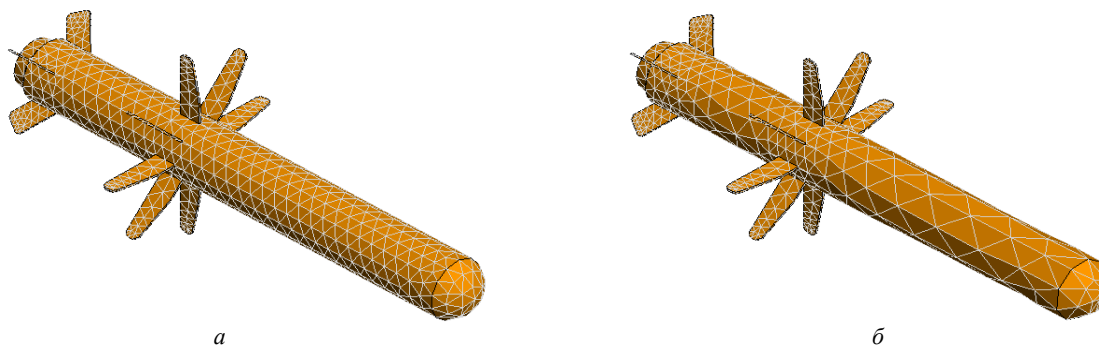


Рис. 4. Вид facетных моделей ракеты при средней (а) и низкой (б) детальности разбиения

Fig. 4. View of faceted models of the missile under medium (a) and low (b) splitting detailing

Продолжительность расчетов при различной детализации модели объекта
Duration of calculations with a different detailing of the object model

| Детальность разбиения поверхности ПТУР | Количество facет | Минимальная/средняя/максимальная длина facеты, мм | СКО длины facеты, мм | Метод расчета, мин | |
|--|------------------|---|----------------------|--------------------|-----|
| | | | | МоМ | PO |
| Высокая (High) | 12 914 | 2.5/9.78/14.5 | 1.1 | 57 | 6 |
| Средняя (Medium) | 2410 | 2.5/21.75/45.56 | 8.78 | 6 | 3 |
| Низкая (Low) | 1804 | 2.5/23/126.6 | 16.96 | 3 | 2.5 |

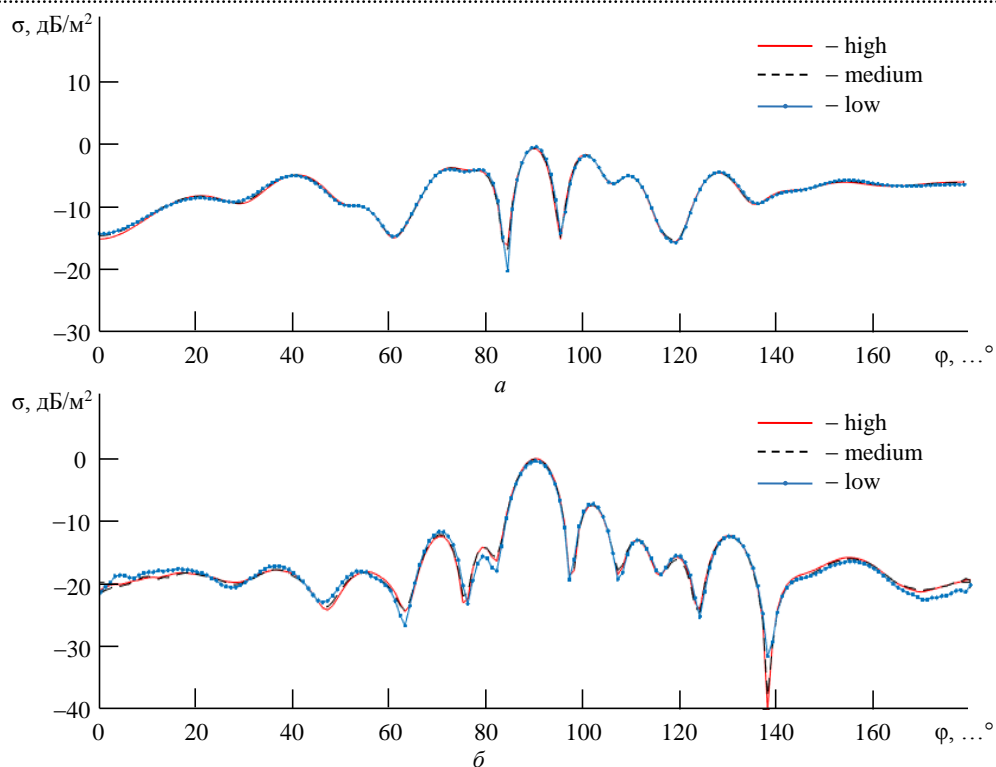


Рис. 5. ДОР ракеты при трех степенях детализации (high, medium, low) на частоте 1 ГГц, рассчитанная методом моментов (а) и физической оптики (б)

Fig. 5. Backscatter diagrams of the missile under study at three levels of detailing (high, medium, low) at a frequency of 1 GHz, calculated by the method of moments (a) and physical optics (б)

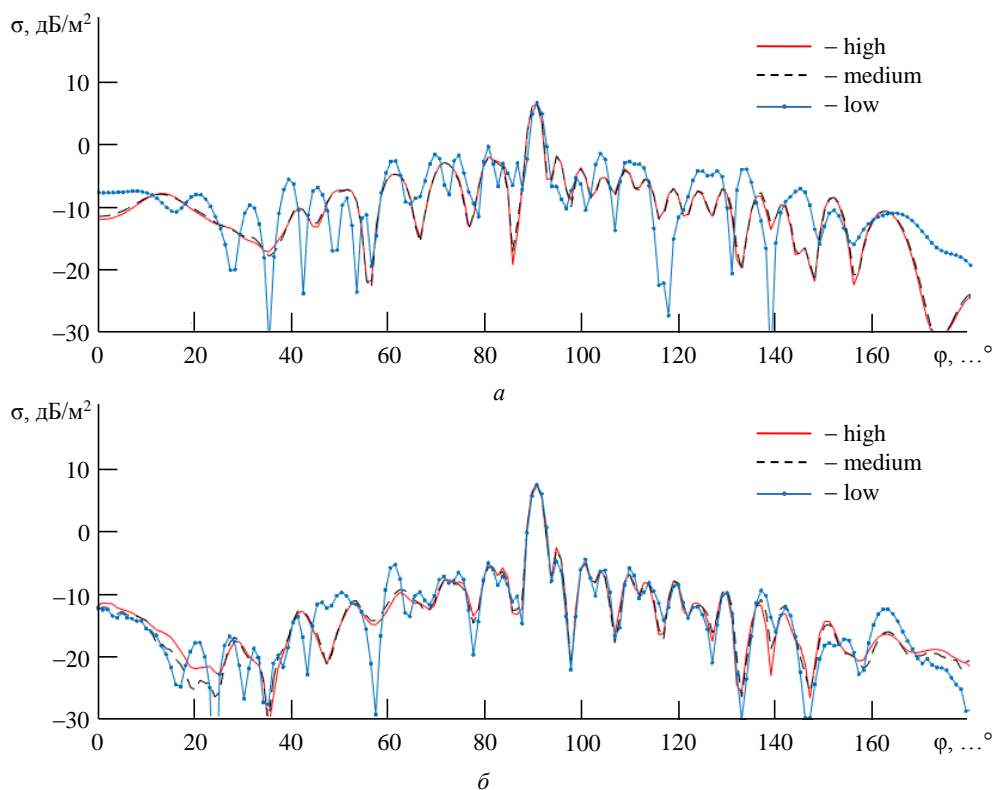


Рис. 6. ДОР ракеты при трех степенях детализации (high, medium, low) на частоте 3 ГГц, рассчитанная методом моментов (а) и физической оптики (б)

Fig. 6. Backscatter diagrams of the missile under study at three levels of detailing (high, medium, low) at a frequency of 3 GHz, calculated by the method of moments (a) and physical optics (б)

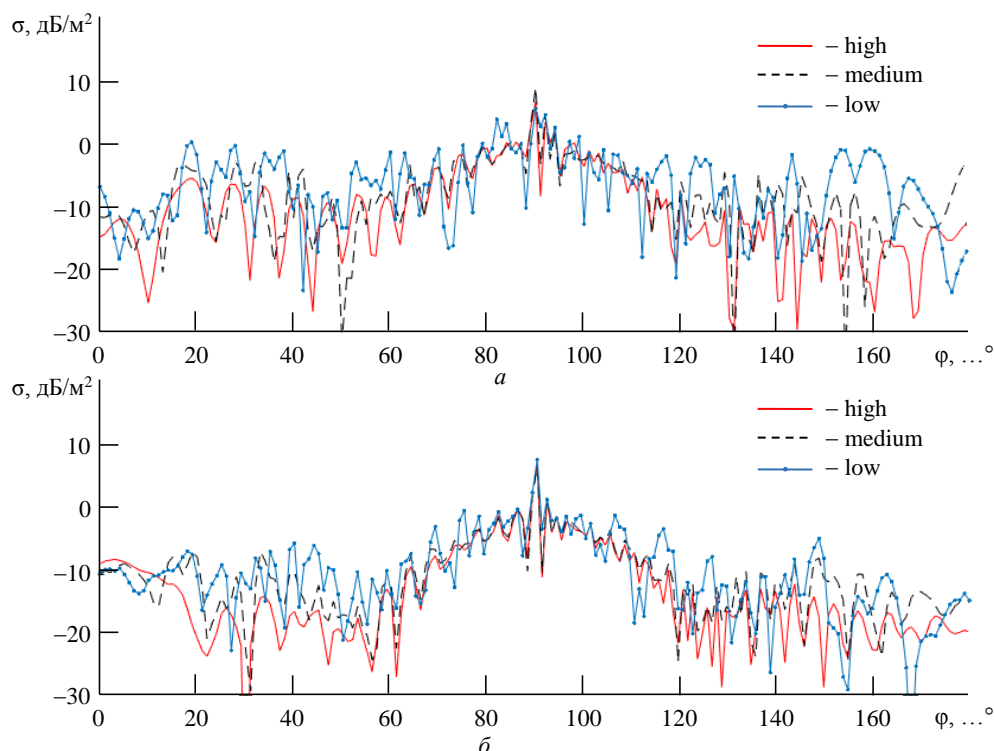


Рис. 7. ДОР ракеты при трех степенях детализации (high, medium, low) на частоте 6 ГГц, рассчитанная методом моментов (а) и физической оптики (б)

Fig. 7. Backscatter diagrams of the missile under study at three levels of detail (high, medium, low) at a frequency of 6 GHz, calculated by the method of moments (a) and physical optics (b)

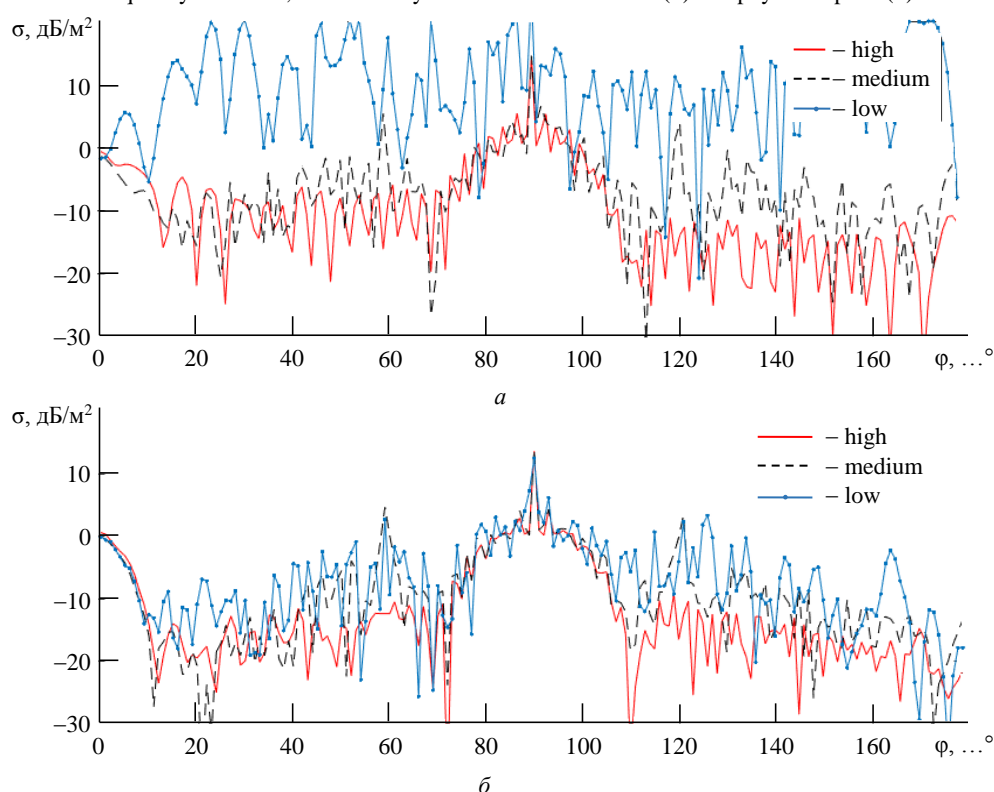


Рис. 8. ДОР ракеты при трех степенях детализации (high, medium, low) на частоте 10 ГГц, рассчитанная методом моментов (а) и физической оптики (б)

Fig. 8. Backscatter diagrams of the missile under study at three levels of detailing (high, medium, low) at a frequency of 10 GHz, calculated by the method of moments (a) and physical optics (b)

Значения максимальной разности ЭПР, полученные при различной детализации модели с использованием различных расчетных методов, иллюстрируют диаграммы на рис. 9 и 10. Отдельные столбцы диаграмм соответствуют значениям, полученным по правилам:

$$\Delta_{if}^{\text{MoM}} = \max \left\{ \left| \sigma_{1fn} - \sigma_{ifn} \right| \right\}, n \in N_{\varphi}; \quad (1)$$

$$\Delta_{if}^{\text{PO}} = \max \left\{ \left| \sigma_{4fn} - \sigma_{ifn} \right| \right\}, n \in N_{\varphi} \quad (2)$$

соответственно.

В (1) и (2) индекс i характеризует метод расчета и степень детализации поверхности ($i=1$ – MoM-high, $i=2$ – MoM-medium, $i=3$ – MoM-low, $i=4$ – PO-high, $i=5$ – PO-medium, $i=6$ – PO-low), индекс f соответствует частоте в гигагерцах, индекс $n = \overline{1, N_{\varphi}}$ – направлению облучения в азимутальной плоскости.

Из рис. 9 видно, что при использовании метода моментов различная детализация разбиения способна привести к различию результатов более чем на 20 дБ/м² (100 м²). В случае метода физической оптики (рис. 10) получаемые результаты менее чувствительны к детальности модели и разница не превышает 8 дБ/м² (около 6.5 м²).

Таким образом, при необходимости быстрого проведения расчетов ДОР ПТУР на частотах от 5 ГГц использование метода физической оптики приемлемо, если допустимая погрешность оценки максимальной ЭПР составляет до 5...7 дБ/м² (соответствует максимальной разнице полученных результатов для MoM-high и PO-high, рис. 9 и 10).

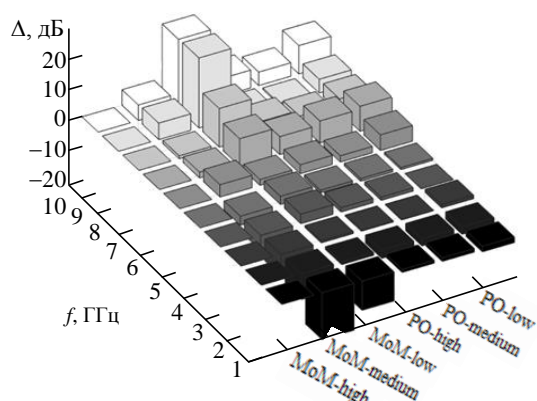


Рис. 9. Значения максимальной разности ЭПР относительно результатов расчета MoM-high
Fig. 9. Values of the maximum RCS difference relative to the results of MoM-high calculation

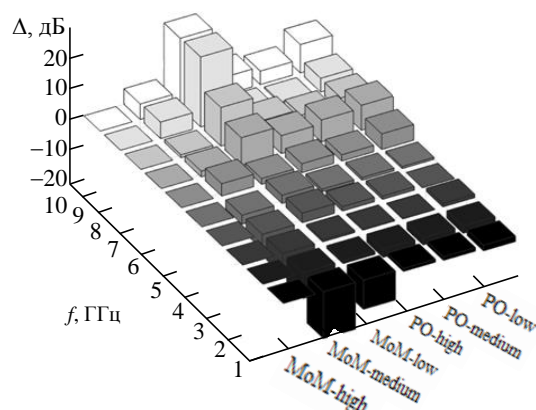


Рис. 10. Значения максимальной разности ЭПР относительно результатов расчета PO-high

Fig. 10. Values of the maximum RCS difference relative to the results of PO-high calculation

Детализация модели может быть высокой, так как даже в этом случае общая продолжительность расчета не превышает единиц минут. На частотах менее 5 ГГц максимальная разница оценки максимальной ЭПР не превышает –1 дБ/м² (между MoM-high и PO-low, рис. 9 и 10), поэтому целесообразно использование метода моментов как более точного при средней детализации модели (MoM-medium). В этом случае результаты моделирования практически не отличаются от результатов при высокой детализации, а время расчетов уменьшается на порядок и также составляет единицы минут.

Результаты формирования двумерного радиолокационного портрета. Возможности САПР СВЧ-устройств не ограничиваются только лишь оценкой эффективной поверхности рассеяния, т. е. энергетической характеристики. В общем случае выходным результатом расчетов является набор значений комплексных амплитуд электрической напряженности поля на вертикальной и горизонтальной поляризациях, и при задании условий моделирования, предполагающих облучение в широком диапазоне угловых ракурсов и частот, становится возможным формирование детальных двумерных поляриметрических радиолокационных портретов объектов, являющихся характеристикой пространственного распределения их отражающей способности. Это позволяет более детально проанализировать вклад отдельных элементов ПТУР в результирующее значение ее ЭПР.

Синтез радиолокационного портрета осуществляется в соответствии с выражением

$$I_{ij} = \sum_{n=1}^{N_\varphi} \sum_{m=1}^{N_f} W_{fn} \dot{E}_{fn} \exp \left\{ -\frac{4\pi f_m}{c} R_{ijn} \right\}, \quad (3)$$

где W_{fn} – отсчеты оконной функции, используемой для снижения уровня боковых лепестков наиболее ярких отражателей в архитектуре ПТУР («блестящих точек»); \dot{E}_{fn} – комплексная амплитуда электрической напряженности поля, рассеянного объектом на частоте f_m при облучении

с направления φ_n ; $m = \overline{1, N_f}$; $f_m = f_H + m\Delta f$; $\Delta f = \frac{f_B - f_H}{N_f - 1}$; f_H, f_B – нижняя и верхняя границы полосы частот облучения; $n = \overline{1, N_\varphi}$; $\varphi_n = \varphi_H + n\Delta\varphi$; $\Delta\varphi = \frac{\varphi_K - \varphi_H}{N_\varphi - 1}$; φ_H, φ_K – начальный и конечный углы, характеризующие интервал углов облучения по азимуту;

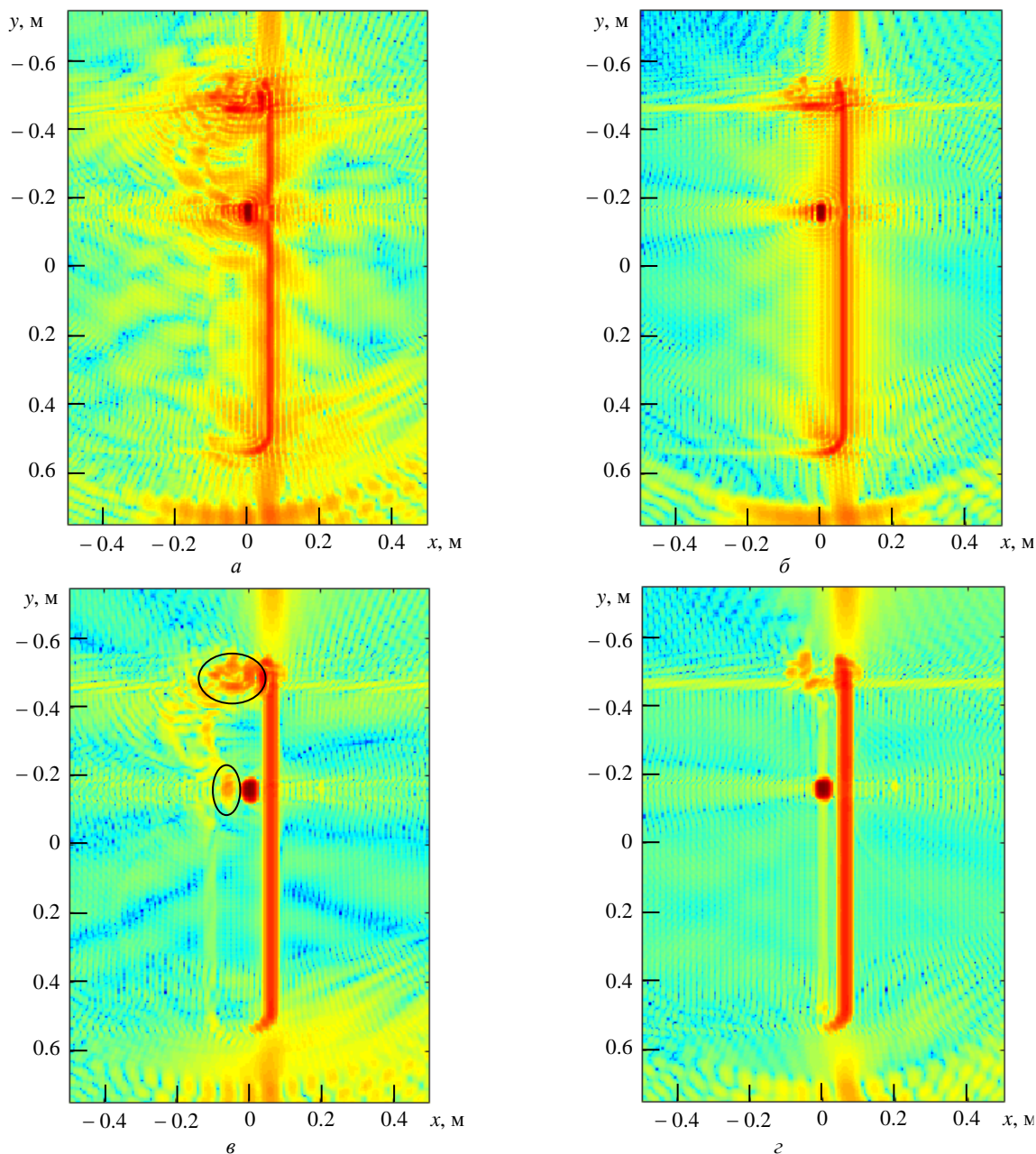


Рис. 11. Радиолокационные портреты ПТУР Javelin: MoM-high, прямоугольное окно (а); PO-high, прямоугольное окно (б); MoM-high, окно Дольфа–Чебышева-40 (в); PO-high, окно Дольфа–Чебышева-40 (г)

Fig. 11. Javelin ATGM radar images: MoM-high, rectangle window (a); PO-high, rectangle window (б); MoM-high, Dolph–Chebyshev-40 window (в); PO-high, Dolph–Chebyshev-40 window (г)

$R_{ijn} = x_j \cos \varphi_n + y_i \sin \varphi_n$; $y_i = (i - N_y/2)\Delta y$ и $x_j = (j - N_x/2)\Delta x$ – прямоугольные координаты отсчетов радиолокационного портрета с номерами $i = \overline{1, N_y}$ и $j = \overline{1, N_x}$ и пространственным шагом Δy и Δx соответственно; N_y и N_x – количество отсчетов радиолокационного портрета по соответствующим координатам.

В качестве примера на рис. 11 приведены радиолокационные портреты ПТУР Javelin, сформированные в соответствии с (3) на основе результатов моделирования поля рассеяния ее модели (детальность разбиения – высокая, см. таблицу) методами моментов и физической оптики при следующих условиях: $f_H = 1$ ГГц; $f_B = 10$ ГГц; $\Delta f = 50$ МГц; $\varphi_H = 0^\circ$; $\varphi_K = 180^\circ$; $\Delta\varphi = 1^\circ$; $N_x = 300$; $N_y = 200$; $\Delta x = \Delta y = 0.005$ м. Полное время расчета при использовании метода моментов (MoM-high) составило около 18 ч, метода физической оптики (PO-high) – около 3 ч.

Сравнение портретов на рис. 11, а и б, а также портретов на рис. 11, в и г, т. е. портретов, полученных с использованием различных расчетных методов, показывает, что при использовании МоМ более точно учитывается вклад участков ПТУР, для которых не выполняется условие оптической видимости (показаны эллипсами на рис. 11, в). Выделение этих участков на фоне боковых лепестков откликов ярких отражателей возможно только при использовании двумерных оконных функций, отличных от прямоугольных, что хорошо видно из сравнения портретов на рис. 11, а и в, а также б и г. В рассматриваемом примере взвешивание осуществлялось с помощью

оконной функции Дольфа–Чебышева, выбор которой обусловлен возможностью задания требуемого уровня (здесь –40 дБ) боковых лепестков относительно максимума.

Заключение. Таким образом, использование САПР СВЧ-устройств позволяет проводить детальную предварительную оценку рассеивающих характеристик ПТУР и аналогичных по конструкции и размерам ракет других классов в широком диапазоне условий радиолокационного наблюдения [14, 15]. Исследование их характеристик целесообразно проводить с учетом представленных в настоящей статье на примере ПТУР Javelin оценок временных затрат при различных степенях детализации моделей и используемых методах расчета. Так, при общей продолжительности расчета на ПЭВМ Intel Core i5-4460/3,2 ГГц/ОЗУ 8 Мбайт, не превышающей единиц минут, метод физической оптики обеспечивает приемлемую точность результатов на частотах от 5 ГГц и выше при шаге разбиения поверхности модели около 1 см. На меньших частотах, когда применение асимптотических методов невозможно, приемлемая точность при аналогичной продолжительности расчетов достигается при использовании метода моментов и шаге разбиения около 20 см. Продемонстрирована возможность применения САПР Altair FEKO для моделирования двумерных радиолокационных портретов объектов в интересах дальнейшей оценки рассеивающих характеристик элементов их конструкции. Так, с их помощью установлено, что метод моментов более точно учитывает вклад участков поверхности объекта, для которых не выполняется условие оптической видимости, а также участков в области изломов поверхности (крыльев и хвостового оперения).

Список литературы

1. Гусев Д. А. Комплексы активной защиты // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2016. Вып. 12, ч. 4. С. 90–104.
2. Considering CAD model accuracy for Radar Cross Section and signature calculations of electrically large complex targets / J. E. Cilliers, J. M. Steyn, J. C. Smit, C. Pienaar, M. Pienaar // Intern. Radar Conf., Lille, France, 2014. P. 1–6. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060313
3. Ахияров В. В. Решение задач дифракции с использованием САПР СВЧ-устройств // III Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, 2009. С. 1022–1026. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdffiles/pd005.pdf> (дата обращения 23.07.2021)
4. Comparison of Various Full-wave Softwares in Cal-

- culating the RCS of Simple Objects / M. B. Heydari, M. Asgari, M. Zolfaghari, N. Jafari // Intern. J. of Mechatronics, Electrical and Computer Technology. 2018. Vol. 8, № 30. P. 4002–4008. URL: https://www.aeuso.org/includes/files/articles/Vol8_Iss30_4002-4008_Comparison_of_Various_Full-wave_Sof.pdf (accessed 23.07.2021).
5. Harris J., Slegers N. Performance of a fire-and-forget anti-tank missile with a damaged wing // J. Mathematical and Computer Modelling. 2009. Vol. 50 (1–2). P. 292–305. doi: 10.1016/j.mcm.2009.02.009
6. RCS Results for an Electrically Large Realistic Model Airframe / C. Pienaar, J. W. Odendaal, J. C. Smit, J. Joubert, J. E. Cilliers // Applied Computational Electromagnetics Society J. 2018. Vol. 33, iss. 1. P. 87–90.

7. Wang X., Wang C., Liu Y. RCS computation and Analysis of Target Using FEKO // Proc. 3rd Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation, Harbin, China, 2014. P. 822–825. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992625 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6992625?arnumber=6992625> (accessed 23.07.2021)

8. Extended Solution Methods in FEKO to Solve Actual Antenna Simulation Problems: Accelerated MoM and Windscreen Antenna Modelling / M. Schick, U. Jakobus, M. Schoeman, M. Bingle, J. Tonder, W. Burger, D. Ludick // Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP), 2011. P. 3053–3055. URL: https://www.researchgate.net/publication/252004610_Extended_solution_methods_in_FEKO_to_solve_actual_antenna_simulation_problems_Accelerated_MoM_and_windscreen_antenna_modeling (accessed 23.07.2021)

9. Xiang H., Wuwei Y., Bin L. Fast RCS Modeling For Dynamic Target Tracking // Intern. J. on Smart Sensing and Intelligent Systems. 2015. Vol. 8, iss. 4. P. 1956–1976. doi: 10.21307/ijssis-2017-838. URL: https://www.researchgate.net/publication/317748532_Fast_RCS_modeling_for_dynamic_target_tracking (accessed 23.07.2021)

10. RCS of Simple and Complex Targets in the C-Band: A Comparison between Anechoic Chamber Measurements and Simulations / M. A. Alves, I. M. Martins, M. A. S. Miacci, M. C. Rezende // PERS Online. 2008. Vol. 4, iss. 7. P. 791–794. doi: 10.2529/PIERS071220090212

11. Mohammadzadeh H., Zeidaabadi-Nezhad A., Firouzeh Z. H. Modified Physical Optics Approximation for RCS Calculation of Electrically Large Objects with Coated Dielectric

// J. of Electrical and Computer Engineering Innovations, Isfahan, Iran. 2015. Vol. 3, № 2. P. 115–122. doi: 10.22061/JECEI.2016.450 URL: https://jecei.sru.ac.ir/article_450_ee801f3fdc9ee9b3331809c3eacca35b.pdf (accessed 23.07.2021)

12. Borries O., Jorgensen E., Meincke P. Monostatic RCS Analysis of Electrically Large Structures using Integral Equations // Proc. of the 11th European Conf. on Antennas and Propagation, Copenhagen, Denmark, 2017. P. 872–876. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928658. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7928658> (accessed 23.07.2021)

13. Active Calibration Target for Bistatic Radar Cross-Section Measurements / M. Pienaar, J. W. Odendaal, J. Joubert, J. E. Cilliers, C. J. Smit // Radio Sci. 2016. Vol. 51, iss. 5. P. 515–523. doi: 10.1002/2015RS005931. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2015RS005931> (accessed 23.07.2021)

14. Baoqian W., Tao W., Kun C. Simulation Research on Dynamic RCS Characteristics of Cruise Missile // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 300, iss. 2. P. 1–8. doi: 10.1088/1755-1315/300/2/022170. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/300/2/022170/pdf> (accessed 23.07.2021)

15. Perotoni M. B., Andrade L. A. Numerical evaluation of an air-to-air missile radar cross section signature at X-band // J. of Aerospace Technology and Management, São José dos Campos. 2011. Vol. 3, iss. 3. P. 287–294. doi: 10.5028/jatm.2011.03034111

Информация об авторах

Купряшкин Иван Фёдорович – доцент (2011), доктор технических наук (2017), начальник кафедры боевого применения средств РЭБ (с воздушно-космическими системами управления и наводящимся оружием) военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Автор более 100 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиолокационные системы, системы радиоэлектронного противодействия радиолокационным системам. Адрес: Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, д. 54 А, Воронеж, 394064, Россия E-mail: ifk78@mail.ru

Заводских Кирилл Юрьевич – инженер-технолог АО «НПО Корпорация "РИФ"». Сфера научных интересов – моделирование поля рассеяния объектов сложной формы в САПР СВЧ-устройств. Адрес: АО «НПО Корпорация "РИФ"», ул. Дорожная, д. 17/2, Воронеж, 394038, Россия E-mail: zavodskih.kirill@yandex.ru

References

1. Gusev D. A. Kompleksy aktivnoy zashchity [Active protection systems]. *Izv. TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of TulSU. Technical science]. 2016, vol. 12, no. 4, pp. 90–104. (In Russ.)

2. Cilliers J. E., Steyn J. M., Smit J. C., Pienaar C., Pienaar M. Considering CAD model accuracy for Radar Cross Section and signature calculations of electrically large complex targets. Intern. Radar Conf., Lille, France.

2014, pp. 1–6. doi: 10.1109/RADAR.2014.7060313

3. Ahiyarov V. V. Resheniye zadach difraktsii s ispolzovaniyem SAPR SVCh-ustroystv [Solving diffraction problems using CAD microwave devices] // Proc. of the III Russian Conf. Radars & Communications, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, 2009, pp. 1022–1026. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdffiles/pd005.pdf> (accessed 23.07.2021). (In Russ.)

4. Heydari M. B., Asgari M., Zolfaghari M., Jafari N. Comparison of Various Full-wave Softwares in Calculating the RCS of Simple Objects. *Intern. J. of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*. 2018, vol. 8, no. 30, pp. 4002–4008. URL: https://www.aeuso.org/includes/files/articles/Vol8_Iss30_4002-4008_Comparison_of_Various_Full-wave_Sof.pdf (accessed 23.07.2021)
5. Harris J., Slegers N. Performance of a fire-and-forget anti-tank missile with a damaged wing. *J. Mathematical and Computer Modelling*. 2009, vol. 50 (1–2), pp. 292–305. doi: 10.1016/j.mcm.2009.02.009
6. Pienaar C., Odendaal J. W., Smit J. C., Joubert J., Cilliers J. E. RCS Results for an Electrically Large Realistic Model Airframe. *Applied Computational Electromagnetics Society J.* 2018, vol. 33, iss. 1, pp. 87–90.
7. Wang X., Wang C., Liu Y. RCS computation and Analysis of Target Using FEKO. *Proc. of 3rd Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*. 2014, pp. 822–825. doi: 10.1109/APCAP.2014.6992625. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6992625?arnumber=6992625> (accessed 23.07.2021)
8. Schick M., Jakobus U., Schoeman M., Bingle M., Tonder J., Burger W., Ludick D. Extended Solution Methods in FEKO to Solve Actual Antenna Simulation Problems: Accelerated MoM and Windscreen Antenna Modeling. *Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP)*. 2011, pp. 3053–3055. URL: https://www.researchgate.net/publication/252004610_Extended_solution_methods_in_FEKO_to_solve_actual_antenna_simulation_problems_Accelerated_MoM_and_windscreen_antenna_modeling (accessed 23.07.2021)
9. Xiang H., Wuwei Y., Bin L. Fast RCS Modeling For Dynamic Target Tracking. *Intern. J. on Smart Sensing And Intelligent Systems*. 2015, vol. 8, no. 4, pp. 1956–1976. doi: 10.21307/ijssis-2017-838. URL: https://www.researchgate.net/publication/317748532_Fast_RCS_modeling_for_dynamic_target_tracking (accessed 23.07.2021)
10. Alves M. A., Martins I. M., Miacci M. A. S., Rezende M. C. RCS of Simple and Complex Targets in the C-Band: A Comparison between Anechoic Chamber Measurements and Simulations. *PIERS Online*. 2008, vol. 4, no. 7, pp. 791–794. doi: 10.2529/PIERS071220090212
11. Mohammadzadeh H., Zeidaabadi-Nezhad A., Firouzeh Z. H. Modified Physical Optics Approximation for RCS Calculation of Electrically Large Objects with Coated Dielectric. *J. of Electrical and Computer Engineering Innovations*. 2015, vol. 3, no. 2, pp. 115–122. doi: 10.22061/JECEI.2016.450. URL: https://journals.sru.ac.ir/article_450.html (accessed 23.07.2021)
12. Borries O., Jørgensen E., Meincke P. Monostatic RCS Analysis of Electrically Large Structures using Integral Equations. *Proc. of the 11th Eur. Conf. on Antennas and Propagation*. 2017, pp. 872–876. doi: 10.23919/EUCAP.2017.7928658. URL: <https://www.ticra.com/wp-content/uploads/2018/03/monostatic-rcs-analysis-of-electrically-large-structures-using-integral-equations.pdf> (accessed 23.07.2021)
13. Pienaar M., Odendaal J. W., Joubert J., Cilliers J. E., Smit J. C. Active Calibration Target for Bistatic Radar Cross-Section Measurements. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 5, pp. 515–523. doi: 10.1002/2015RS005931. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2015RS005931> (accessed 23.07.2021)
14. Baoqian W., Tao W., Kun C. Simulation Research on Dynamic RCS Characteristics of Cruise Missile. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 300, no. 2, pp. 1–8. doi: 10.1088/1755-1315/300/2/022170. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/300/2/022170/pdf> (accessed 23.07.2021)
15. Perotoni M. B., Andrade L. A. Numerical evaluation of an air-to-air missile radar cross section signature at X-band. *J. of Aerospace Technology and Management, São José dos Campos*. 2011, vol. 3, iss. 3, pp. 287–294. doi: 10.5028/jatm.2011.03034111

Information about the authors

Ivan F. Kupryashkin, Associate Professor (2011), Ph. D. in Engineering (2017), Head of the Department of Combat Use of Electronic Warfare Systems (with Aerospace Control Systems and Guided Weapons) of Military Educational and Scientific Center of the Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy". The author of more than 100 publications. Area of expertise: radar systems, systems of radio-electronic counteraction to radar.

Address: JSC «NPO Corporation "RIF"», 17/2 Doroznaya St., Voronezh, 394038 Russia
E-mail: ifk78@mail.ru

Kirill Yu. Zavodskiyh, Dipl. Eng. (2001) JSC «NPO Corporation "RIF"». Area of expertise: modeling of the backscatter field of complex-shaped objects in microwave devices CAD.

Address: Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy», 54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh, 394064 Russia
E-mail: zavodskih.kirill@yandex.ru