

УДК 537.862

А.О. Зайков, Д.В. Ключин

Оценка точности вычисления эффективной площади рассеяния методом моментов с использованием различных способов формирования матрично-векторного уравнения

Рассмотрены различные способы формирования матрично-векторного уравнения при расчете эффективной площади рассеяния проводящих структур методом моментов. Тестирование способов показало, что полученные результаты имеют незначительные отклонения от аналогичных из сторонней программы электродинамического анализа.

Ключевые слова: метод моментов, эффективная площадь рассеяния, проводящая структура, барицентрическое разделение треугольника, квадратуры Гаусса.

Современные исследования в области стелс-технологий и радиолокации сопровождаются измерением эффективной площади рассеяния (ЭПР) радиолокационных целей. Однако процедура экспериментальной оценки ЭПР является трудоемкой и требует специального измерительного оборудования [1], что приводит к необходимости разработки альтернативных методов определения ЭПР.

Для объектов со сложной формой применяют численные методы, позволяющие учесть геометрию и физические свойства объекта благодаря аппроксимации непрерывных уравнений Максвелла на дискретной расчетной сетке [2].

Решение интегрального уравнения электрического поля (ИУЭП, EFIE) методом моментов (МОМ) является наиболее широко используемым подходом моделирования задач электромагнитного рассеяния. Согласно данному подходу, поверхность исследуемого объекта представляется в виде треугольной полигональной сетки, а для аппроксимации токов в ячейках сетки используются RWG-функции, каждая из которых определена на двух треугольниках с общим ребром [3].

Для описания взаимодействия между различными парами треугольников формируется матрица СЛАУ порядка N (число RWG-функций) вида

$$\mathbf{Z}\mathbf{I} = \mathbf{V}, \quad (1)$$

где \mathbf{Z} – матрица импедансов, \mathbf{I} – вектор искомых токов, \mathbf{V} – вектор воздействующего напряжения.

Характеристики вторичного излучения объекта определяются по вычисленному вектору токов \mathbf{I} . Сначала напряженности магнитного и электрического полей определяются из токов в точке наблюдения в дальней зоне, затем ЭПР вычисляется как

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2}, \quad (2)$$

где E_1 – модуль амплитуды плоской волны, E_2 – модуль амплитуды напряженности поля, создаваемого в точке наблюдения рассеянным полем, R – расстояние до дальней зоны.

Более подробное математическое описание решения электродинамических задач по МОМ представлено в [4, 5].

Применительно к ИУЭП формирование матрицы \mathbf{Z} представляет собой сложную задачу, из-за

необходимости вычисления восьми сингулярных интегралов. Существует множество способов формирования матрицы \mathbf{Z} . Так, используются симметричные квадратуры Гаусса [6], барицентрическое разделение каждого треугольника на 9 субтреугольников [7], выражения в замкнутой форме (аналитические выражения) [8]. Кроме того, существуют комбинированные способы, при которых внутренние интегралы вычисляются аналитически, а внешние – численно.

Цель работы – оценка точности вычисления ЭПР произвольных проводящих структур для различных способов формирования матрично-векторного уравнения.

Вычислительный эксперимент

Для оценки точности вычисления ЭПР выбрано четыре типовых радиолокационных цели: прямоугольная пластина, куб, сфера и уголкового отражатель. Выполнено построение их моделей (рис. 1) и расчетной сетки в среде GMSH [9]. Для моделей пластины, уголкового отражателя и куба построены расчетные сетки из 5000, а для сферы – из 2000 треугольных элементов соответственно.

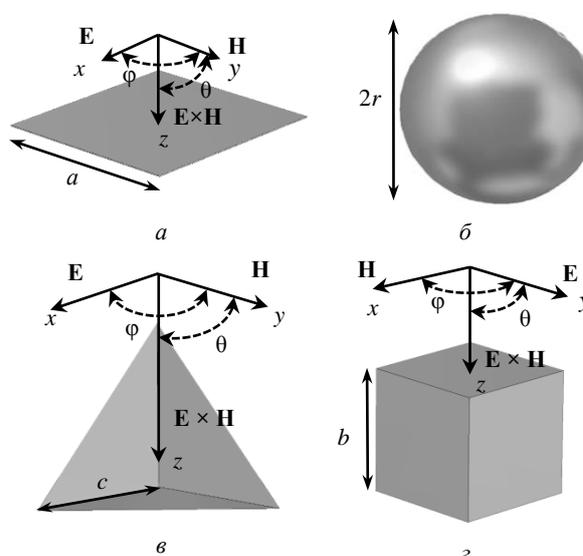


Рис. 1. Модели типовых радиолокационных целей ($a = 15$ см, $r = 2$ м, $c = 10$ см, $b = 1$ м): пластины (а), сферы (б), уголкового отражателя (в), куба (г)

Моделирование тестовых структур выполнено с использованием различных вариантов формирования матрицы \mathbf{Z} : барицентрическое деление на 9 субтреугольников (способ I), аналитический (способ II), с использованием квадратур Гаусса с числом точек дискретизации 3 (способ III) и 12 (способ IV), комбинация аналитических выражений и барицентрического деления на 9 субтреугольников (способ V), комбинация аналитических выражений и квадратур Гаусса с числом точек дискретизации 12 (способ VI). Результаты моделирования с помощью МОМ сравнивались с аналогичными результатами из системы электромагнитного моделирования EMPro [10] и опубликованными данными.

На рис. 2 представлены результаты моделирования моностатической ЭПР пластины, полученные при помощи способов I–VI и в EMPro, а также из [11]. Вычисления выполнены на частоте $f = 6$ ГГц, в плоскости $\varphi = 0^\circ$ и при горизонтальной поляризации плоской электромагнитной волны.

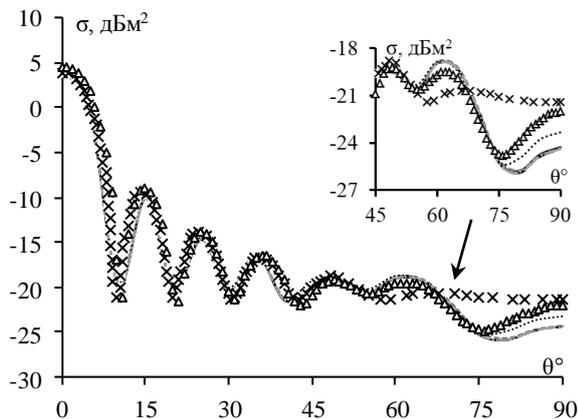


Рис. 2. ЭПР прямоугольной пластины, вычисленная в EMPro ($\Delta\Delta$) и способами I (—), II (- - -), III (.....), IV (- · - ·), V (.....), VI (- - -), а также из [11] ($\times\times\times$)

Из рис. 2 видно, что результаты, полученные с использованием различных способов формирования матрицы \mathbf{Z} , согласуются с результатами, полученными в EMPro и [11]. Наибольшие расхождения наблюдаются в диапазоне углов θ от 50 до 90° . В данном диапазоне различия в амплитудах составляют 0,1–3,5 дБм². В этом же диапазоне расхождение между результатами, полученными способами I–VI, составило примерно 0,01–0,2 дБм². Лучше всего с результатами из EMPro сходятся результаты, полученные способом III. Для этих наборов результатов ЭПР вычислен эквивалентный уровень многолучевого распространения (EMPL) [12] как

$$\text{EMPL} = 10 \log_{10} \left(\frac{\|\sigma_1\| - \|\sigma_2\|}{2} \right), \quad (3)$$

где σ_1 – первый набор данных ЭПР, σ_2 – второй набор данных ЭПР.

Результаты вычислений представлены на рис. 3, видно, что практически во всем диапазоне θ значения EMPL меньше –20 дБ, а среднее значение EMPL составляет –29,1 дБ.

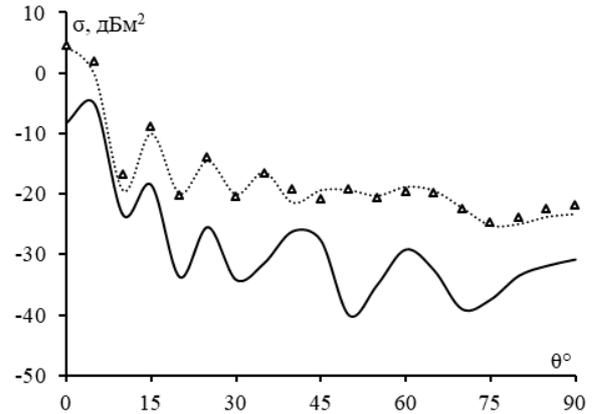


Рис. 3. ЭПР прямоугольной пластины, вычисленная способом III (.....), EMPro (Δ), а также EMPL (—)

На рис. 4 представлены результаты моделирования моностатической ЭПР куба, полученные при помощи различных способов формирования матрицы \mathbf{Z} , а также из EMPro и [13]. Вычисления проведены на частоте $f = 300$ МГц, в плоскости $\theta = 0^\circ$ и при вертикальной поляризации плоской электромагнитной волны.

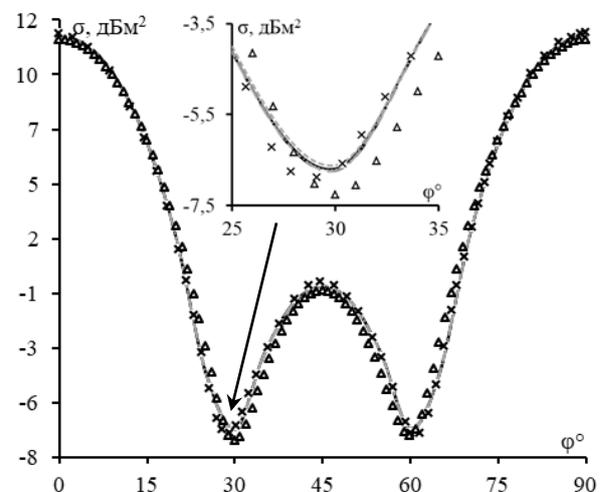


Рис. 4. ЭПР куба, вычисленная в EMPro ($\Delta\Delta$) и способами I (—), II (- - -), III (.....), IV (- · - ·), V (.....), VI (- - -), а также из [13] ($\times\times\times$)

Из рис. 4 видно, что результаты согласуются, но расхождения наблюдаются во всем диапазоне φ и составляют 0,1–0,5 дБм². В значениях, полученных МОМ, наблюдаются расхождения в амплитудах в пределах 0,01–0,2 дБм².

Результаты, полученные с помощью способа II, лучше всего сходятся с EMPro. Для этих результатов вычислен EMPL (рис. 5). Из рис. 5 видно, что среднее значение EMPL составило –11,2 дБ, при этом максимум EMPL составил –5,5 дБ при $\varphi = 90^\circ$.

На рис. 6 представлены результаты моделирования моностатической ЭПР уголкового отражателя, полученные при помощи различных способов формирования матрицы \mathbf{Z} , а также в EMPro и [14]. Вычисления выполнены на частоте $f = 10$ ГГц, в плоскости $\varphi = 45^\circ$ и при горизонтальной поляризации плоской электромагнитной волны.

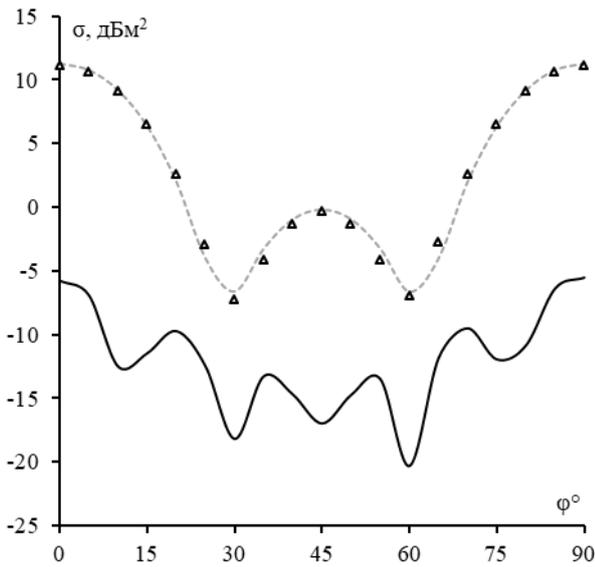


Рис. 5. ЭПР куба, вычисленная способом II (---), EMPro (Δ), а также EMPL (—)

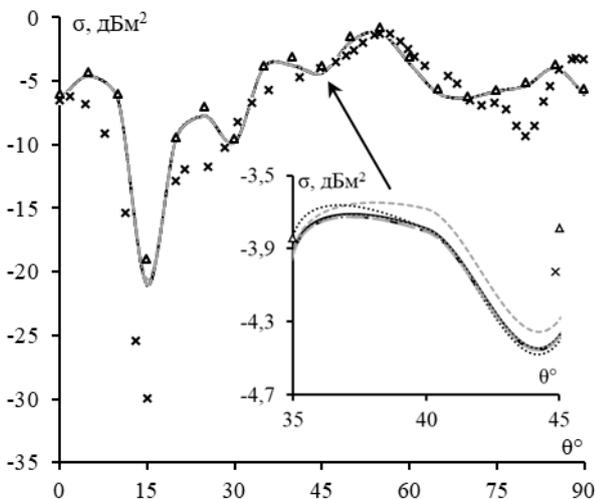


Рис. 6. ЭПР уголкового отражателя, вычисленная в EMPro (Δ) и способами I (—), II (---), III (.....), IV (- · - ·), V (-----), VI (----), а также из [14] (×××)

Из рис. 6 видно, что результаты, полученные MOM, хорошо согласуются с результатами, полученными в EMPro. Почти на всем диапазоне углов θ разница амплитуд составила 0,1–2 дБм², однако результаты, полученные моделированием плохо сходятся с результатами из [14] (максимальная разница по амплитуде составила до 9 дБм²). Вероятно, такие расхождения вызваны погрешностью измерений ЭПР в безэховой камере, выполненных в [14]. Кроме того, все результаты, полученные MOM, отличаются не более чем на 0,2 дБм².

Результаты из EMPro лучше всего сходятся с результатами, полученными способом II. Для этих результатов вычислен EMPL (рис. 7). Из рис. 7 видно, что максимум EMPL не превышает –15 дБ, а среднее значение составляет –21,6 дБ.

На рис. 8 представлены нормированные значения ЭПР сферы, полученные при помощи различных способов формирования матрицы Z , а также

[15]. Вычисления выполнены в диапазоне частот f от 2 до 148 МГц и при горизонтальной поляризации плоской электромагнитной волны.

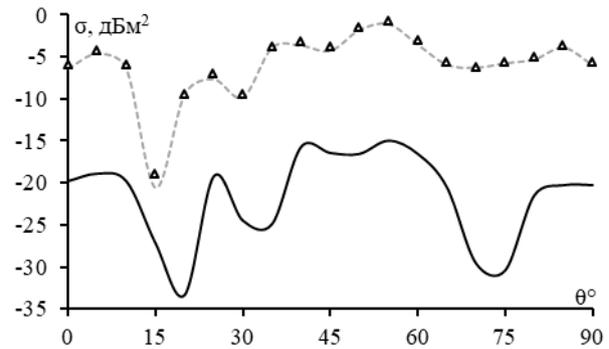


Рис. 7. ЭПР уголкового отражателя, вычисленная способом II (---), EMPro (Δ), а также EMPL (—)

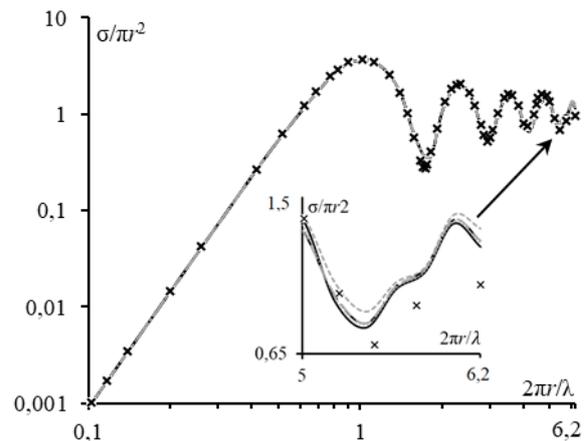


Рис. 8. ЭПР сферы, вычисленная способами I (—), II (---), III (.....), IV (- · - ·), V (-----), VI (----), а также из [15] (×××)

Из рис. 8 видно, что результаты, полученные с использованием различных способов формирования матрицы Z , сходятся с результатами из [15], однако можно заметить незначительные отклонения в результатах от 5,2 до 6,2, составляющие 0,1–0,7. В значениях между всеми способами формирования матрицы Z наблюдаются минимальные расхождения на всем диапазоне частот (не более 0,1).

Заключение

Выполнены вычисления ЭПР произвольных проводящих структур с использованием нескольких способов формирования матрицы Z , а также их сравнение с результатами из стороннего программного обеспечения. Сравнение различных способов формирования матрицы Z показало незначительное расхождение в получаемых результатах ЭПР, однако способы II и III сходятся с EMPro лучше всего.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165>.

Литература

1. Radar cross section measurement within reverberation chamber: stirrer position issues / A. Reis, F. Sarrazin,

P. Pouliguen, J. Sol, P. Besnier, E. Richalot // 2020 14th European conference on antennas and propagation (EuCAP). – 2020. – PP. 1–4.

2. Ruck G.T. Radar Cross Section Handbook / G.T. Ruck, D.J. Garber. – New York: Plenum Press, 2001. – 504 p.

3. Rao S. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape / S. Rao, D. Wilton, A. Glisson // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – Vol. 30, No. 3. – PP. 409–418.

4. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 432 с.

5. Makarov S. MoM antenna simulations, with Matlab: RWG basis functions // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2001. – Vol. 43, No. 5. – PP. 100–107.

6. Dunavant D.A. High degree efficient symmetrical Gaussian quadrature rules for the triangle // International journal for numerical methods in engineering. – 1985. – Vol. 21, No. 6. – PP. 1129–1148.

7. The application of barycentric subdivision method for numerical integration in method of moments / C. Xiang, X. Dang, M. Li, F. Yang, S. Xu // IEEE International conference on computational electromagnetics (ICCEM). – 2018. – PP. 1–3.

8. Костарев И.С. Аналитическая оценка элементов матрицы СЛАУ в задаче электромагнитного рассеяния поверхностями произвольной формы / И.С. Костарев, Т.Р. Газизов, Ю.М. Казанцев // Численные методы и вопросы организации вычислений: записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН. – 2013. – Т. 419. – С. 154–167.

9. Gmsh. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmsh.info>, свободный (дата обращения: 05.09.2023).

10. EMPro. Программная платформа электромагнитного трехмерного моделирования для анализа объемных ЭМ-эффектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://journals.urfu.ru/index.php/urj/article/download/3716/2997>, свободный (дата обращения: 05.09.2023).

11. O'Donnell R.M. Introduction to Radar Systems 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://radar-course.org/radar%20se%20Lecture%2016%20A.html>, свободный (дата обращения: 13.09.2023).

12. Gregson S.F. Histogram equalisation as a method for making an objective comparison between antenna patterns functions / S.F. Gregson, J. McCormick, C.G. Parini // IEEE First European conference on antennas and propagation. – 2006. – PP. 1–5.

13. Xiaogang X. A Fast algorithm for monostatic RCS based on LU decomposition / X. Xiaogang, Y. Tongbin, Q. Zuping, Z. Lei // Applied mechanics and materials. – 2013. – Vol. 347, No. 6. – PP. 2651–2655.

14. Экспериментальные исследования характеристик уголка проведены в безэховой камере центра коллективного пользования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://airpu.tsure.ru/mac/indexmac.php>, свободный (дата обращения: 13.09.2023).

15. Carvajal J. RCS estimation of 3D-metallic targets using the moment method and Rao-Wilton-Glisson basis functions // Applied computational electromagnetics society journal. – 2009. – Vol. 24, No. 5. – PP. 487–492.

Зайков Артем Олегович

Инженер науч.-исслед. лаб. безопасности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств (НИЛ «БЭМС РЭС») ТУСУРа
Эл. почта: artiomchik.zaikovu@gmail.com

Клюкин Дмитрий Владимирович

Мл. н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» ТУСУРа
Эл. почта: yuhoo11@mail.ru