



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.4>

УДК: 623.462.22:623.465.757

МЕТОД ОЦЕНКИ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИ-ФОКУСНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ

Е.С. Емельянов

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
94064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Аннотация. Рассмотрена возможность использования специальных (мульти-фокусных) полей для решения задач экспериментальной оценки отражательных характеристик объектов. Уточнены закономерности формирования мульти-фокусных полей в трехмерном случае. Показаны достоинства предлагаемого подхода в части гибкой настройки алгоритмов обработки на основе методов цифровой фильтрации сигналов, что обеспечивает получение радиолокационных характеристик объектов с учетом особенностей построения однопозиционных, би- и мульти-статических систем локации.

Ключевые слова: радиолокационная заметность, эффективная поверхность рассеяния (отражения), матричный метод, мульти-фокусные поля, сферические волновые гармоники.

Автор для переписки: Емельянов Евгений Сергеевич, cap_emela@mail.ru

Введение

Последнее десятилетие характеризуется рядом уникальных достижений по реализации би- и мульти-статических радиолокационных систем (РЛС) [1]. Основной особенностью таких систем с позиции оценки заметности является неопределенность положения пассивных приемных элементов. Для повышения достоверности оценки вероятности обнаружения объекта такими системами необходим анализ и обобщение совокупности данных по би- и мульти-статическим энергетическим отражательным характеристикам объекта (эффективной площади рассеяния (ЭПР)), учитывающих реализацию различных вариантов расположения приемной и передающей позиций. Практическое получение исходных данных на основе прямого измерения ЭПР сопряжено с рядом технических сложностей, связанных с воспроизведением условий дальней зоны, т.е. созданием плоских полей облучения и приема, распространяющихся под различными углами. В качестве альтернативы целесообразно рассмотреть возможность проведения измерений в ближней зоне в специальных мульти-фокусных полях [2], формирование которых эффективно реализуется комплексами, построенными на основе матричного метода измерений [3-6].

В этой связи разработка способов оценки энергетических отражательных характеристик объектов не в плоском поле представляет практический интерес. Кроме того, для повышения достоверности оценки вероятности обнаружения объекта за счет учета особенностей пространственной конфигурации би- и мульти-статических РЛС целесообразно рассмотреть возможность оценки дополнительных радиолокационных характеристик (РЛХ).

Целью данной статьи является разработка метода оценки рассеиваемой объектом мощности падающего поля на основе результатов зондирования мульти-фокусными полями (МФП).

С учетом широкого применения в задачах оценки эффективности снижения заметности моделей плоских полей целесообразно установить связь между плоскими и предлагаемыми, как альтернативный вариант, мульти-фокусными полями. Для двумерного случая такие закономерности установлены в [2]. Для уточнения закономерности распределения пространственной интенсивности и связи МФП с плоскими полями облучения для трехмерного случая, воспользуемся известным выражением разложения плоской волны с единичной амплитудой по полям сферических волновых гармоник (СВГ) [7]:

$$\exp(-jk\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = 4\pi \sum_{n=0}^{\infty} i^n j_n(kr) \sum_{m=-n}^n Y_n^{m*}(\mathbf{k}) Y_n^m(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где Y_n^m – сферические функции,

j_n – сферические функции Бесселя;

$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}|}$ – волновой вектор.

$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}$ – вектор координат точки наблюдения.

Сферические волновые гармоники описывают МФП в трехмерном пространстве, а распределение их интенсивности описывается выражением:

$$P_{mn}(\mathbf{r}) = j_n(kr) Y_n^m(\mathbf{r}). \quad (2)$$

Для примера на рисунке 1 представлено пространственное распределение интенсивности мульти-фокусного поля в виде поверхностей одинаковой амплитуды (по уровню 0,7).

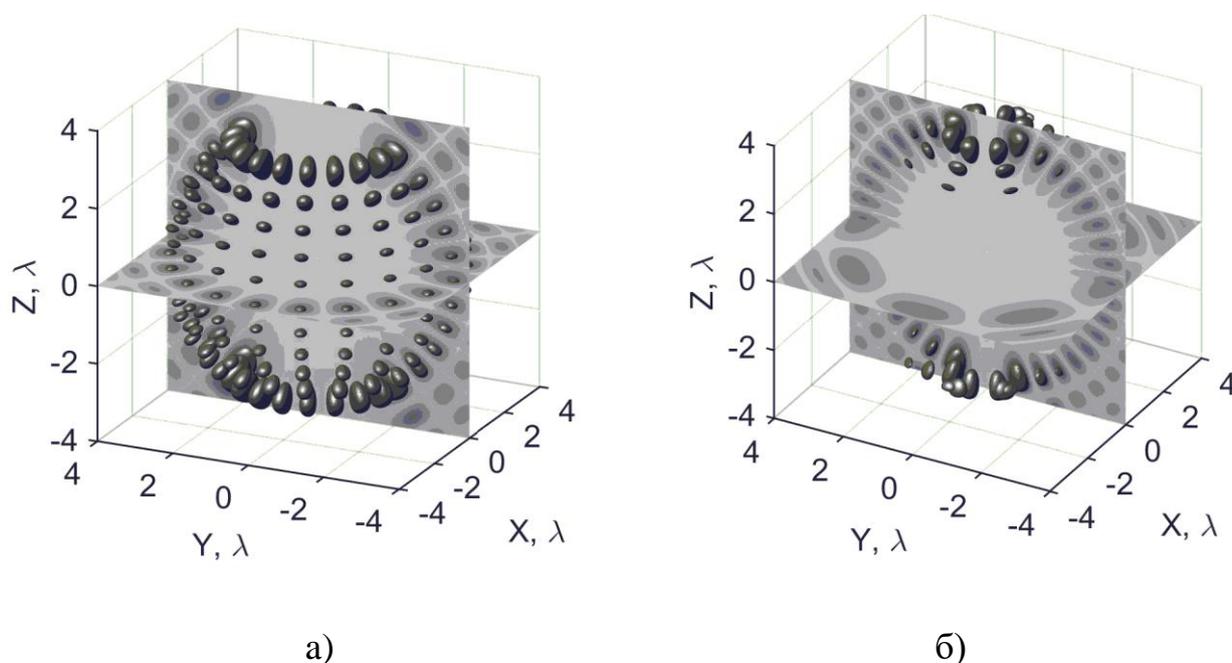


Рис. 1. Качественная картина пространственного распределения интенсивности мульти-фокусного поля, соответствующего сферическим гармоникам (а) – $P_{20 10}$ и (б) – $P_{20 4}$.

Анализ выражения (2) показывает, что по аналогии с двумерным случаем [2] закономерности пространственного распределения интенсивности МФП, характеризуются локализацией первых максимумов на поверхности сферы, радиус которой определяется порядком МФП. При этом амплитуда поля внутри этой сферы по мере приближения к центру резко спадает и может считаться равной нулю.

На основе результатов, полученных в [2] могут быть сформулированы основные достоинства использования МФП при оценке энергетических отражательных характеристик объектов.

Во-первых, МФП описываемые СВГ, представляют собой базис в пространстве плоских полей. Данный базис состоит из собственных векторов пространства и имеет диагональную матрицу собственных значений. Это позволяет рассчитать мощность падающего на объект поля путем суммирования диагональных элементов матрицы собственных значений.

Во-вторых, спектр СВГ дискретный, в отличие от углового спектра плоских полей. Это обстоятельство с учетом распределения интенсивности МФП в пространстве по радиальной координате позволяет априори ограничить

порядок учитываемых гармоник N исходя из размеров объекта D_{ob} в соответствии с выражением [2]:

$$N = kD_{ob}. \quad (3)$$

В-третьих, формирование МФП в рабочей зоне измерительного комплекса матричного типа может быть реализовано «виртуально», т.е. на основе апостериорной обработки результатов измерений в других известных полях. Подробно процесс формирования «виртуальных» полей на измерительных комплексах матричного типа рассмотрен в [2, 3].

Следует отметить, что несмотря на то, что СВГ ортогональны в условиях свободного пространства результаты зондирования реальных объектов МФП не ортогональны.

В виду аналогичности свойств МФП в двумерном и трехмерном случаях далее ограничимся рассмотрением способов оценки РЛХ объектов применительно к двумерному случаю. В качестве тестовых объектов, представленных на рисунке 2, выбраны: прямоугольный уголкового отражателя – длина ребра 6λ , линейный отражатель – длина 10λ и отражатель цилиндрической формы – радиус 5λ . Результаты моделирования измерения спектра МФП тестовых объектов приведены на рисунке 3.

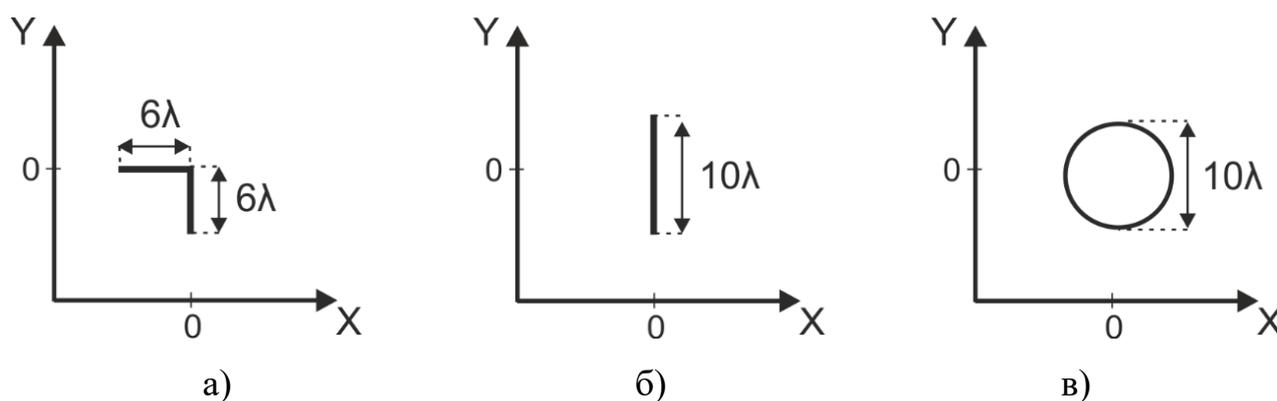


Рис. 2. Геометрия тестовых объектов: уголкового отражателя (а), линейного отражателя (б), цилиндрического отражателя (в).

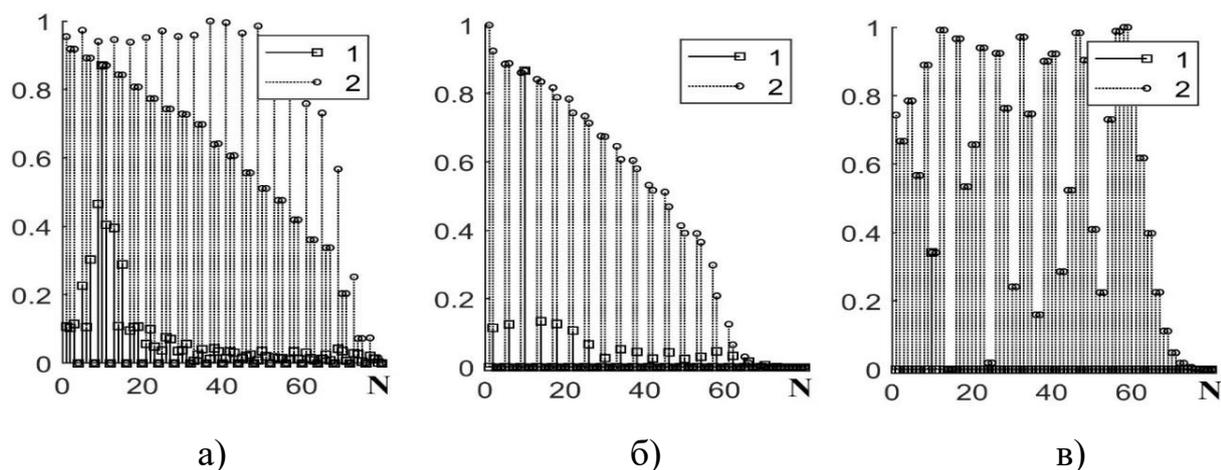


Рис. 3. Нормированные спектры рассеяния мульти-фокусных полей тестовых объектов: прямоугольный угловой отражатель – длина ребра 6λ (а), линейный отражатель – длина 10λ (б), отражатель цилиндрической формы – радиус 5λ (в), 1 – результата зондирования объекта МФП порядка 10, 2 – диагональные элементы матрицы рассеяния.

Из представленных на рисунке 3 зависимостей видно, что спектр МФП ограничен размерами тестовых объектов в соответствии с равенством (3). Результаты зондирования объектов МФП не ортогональны, однако максимальная амплитуда спектра рассеяния соответствует зондирующему МФП.

Результаты измерения спектра МФП позволяют определить отражательные энергетические характеристики объектов. При этом объекта может рассматриваться как фильтр нижних частот спектра МФП. Рассмотрим процедуру оценки, наиболее распространенной РЛХ – ЭПР на основе результатов измерений спектра МФП объекта.

В виду не ортогональности результатов измерений спектра МФП объекта необходима перекрестная регистрация, т.е. при облучении объекта МФП полем порядка n необходимо проведение измерения в всех МФП порядка $1, 2, \dots, N$. В таком случае результаты измерений удобно представлять в виде матрицы F размером $(N \times N)$ номер столбца которой соответствует порядку МФП облучения, а номер строки порядку МФП приема.

Мощность, рассеянная объектом при облучении его плоским полем с направления ϕ , рассчитывается как произведение матрицы F спектра МФП

объекта, и вектора $V(\phi)$ – спектра поля плоской волны, распространяющейся в направлении ϕ . Для определения рассеянной объектом мощности в угловом направлении θ необходимо дополнительно умножить полученный результат на комплексно-сопряженный вектор $V(\theta)$ – спектр поля плоской волны, распространяющейся в направлении θ . Сумма амплитуд полученных после двухэтапной фильтрации спектральных гармоник дает мощность, рассеянную объектом в направлении θ , при облучении объекта с направления ϕ :

$$\sigma(\phi, \theta) = \left| \left[F \cdot V(\phi) \right] \cdot V(\theta)^* \right|^2. \quad (4)$$

Полученное значение по определению является ЭПР объекта. На рисунке 4 представлены результаты расчета однопозиционной ЭПР на основе численного эксперимента по измерению спектра МФП тестовых объектов. Полученные зависимости совпадают с результатами расчета ЭПР тестовых объектах методом моментов [8].

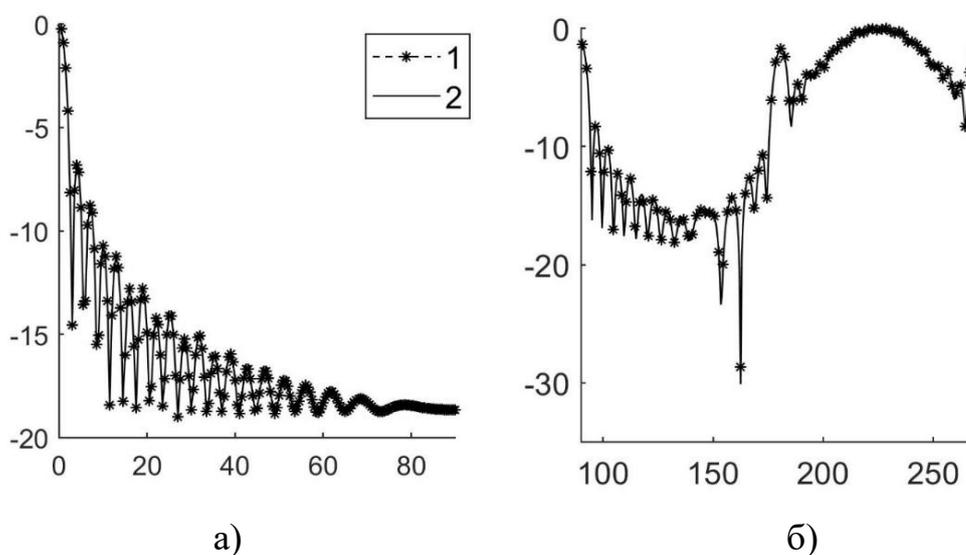


Рис. 4. Нормированные диаграмма обратного рассеяния линейного (а) и прямоугольного углового (б) отражателей,
1 – расчет на основе спектра МФП объекта,
2 – расчет на основе интегральных уравнений методом моментов.

Спектр МФП объекта позволяет провести оценку и других РЛХ таких как поглощение мощности объектом и интегральная и интегро-дифференциальная мощности рассеяния в плоском поле облучения. Рассмотрим способы проведения оценки таких РЛХ.

Способ оценки поглощения мощности объектом заключается в нахождении разности ΔW суммарной спектральной мощности отражения МФП от объекта до W_0 и после W применения радиопоглощающих материалов. Так как спектр МФП характеризует всю отраженную объектом мощность, такой способ позволяет оценить эффективность именно поглощающих свойств объекта. Формально процедура расчета записывается так:

$$\Delta W = W_0 - W = \sum_{ij} |F_{ij}^0|^2 - \sum_{ij} |F_{ij}|^2. \quad (5)$$

Способ оценки интегральной мощности рассеяния в плоском поле облучения заключается в фильтрации спектра рассеиваемой объектом мощности на основе спектра МФП плоских волн и расчете суммарной спектральной мощности:

$$\Omega(\phi_j) = \sum_i \left[\left[F \cdot V(\phi_j) \right] \cdot S_{ij}^* \right]^2. \quad (6)$$

где $S = \{V(\theta_1), V(\theta_2), \dots, V(\theta_M)\}$ – матрица, формируемая на основе векторов спектра МФП плоских полей, распространяющихся под различными углами, * – знак транспонирования и комплексного сопряжения.

Пример расчета нормированной интегральной пространственной мощности рассеяния прямоугольных угловых отражателей представлен на рисунке 5

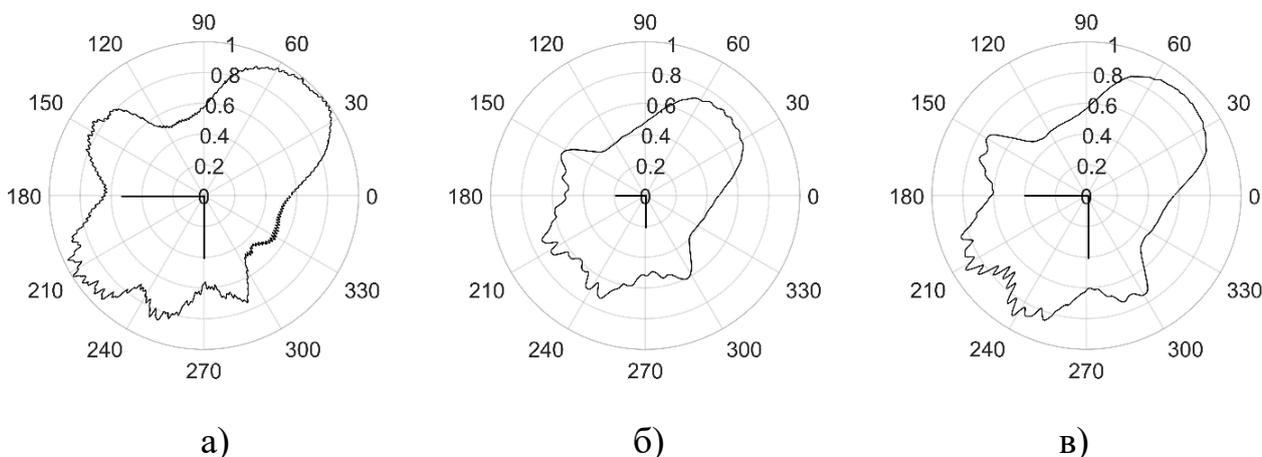


Рис. 5. Нормированная интегральная пространственная мощность рассеяния прямоугольных угловых отражателей с размерами граней: 10λ и 15λ (а), 6λ (б) и 10λ (в).

Способ оценки интегро-дифференциальной мощности рассеяния в плоском поле облучения заключается в фильтрации спектра рассеиваемой объектом мощности на основе спектра МФП плоских волн и расчете суммарной спектральной мощности в ограниченном секторе углов $\Delta\theta = [\theta_1, \dots, \theta_N]$:

$$\Omega(\phi, \Delta\theta) = \left| [F \cdot V(\phi)] \cdot S(\Delta\theta) \right|^2. \quad (7)$$

Пример расчета нормированной интегро-дифференциальной пространственной мощности рассеяния прямоугольных уголкового отражателей представлен на рисунке 6.

Интегро-дифференциальная мощность рассеяния, в отличие от интегральной представляет больший практический интерес, т.к. позволяет оценить рассеиваемую мощность в ограниченном секторе углов, что всегда выполняется для типовых условий локации объекта.

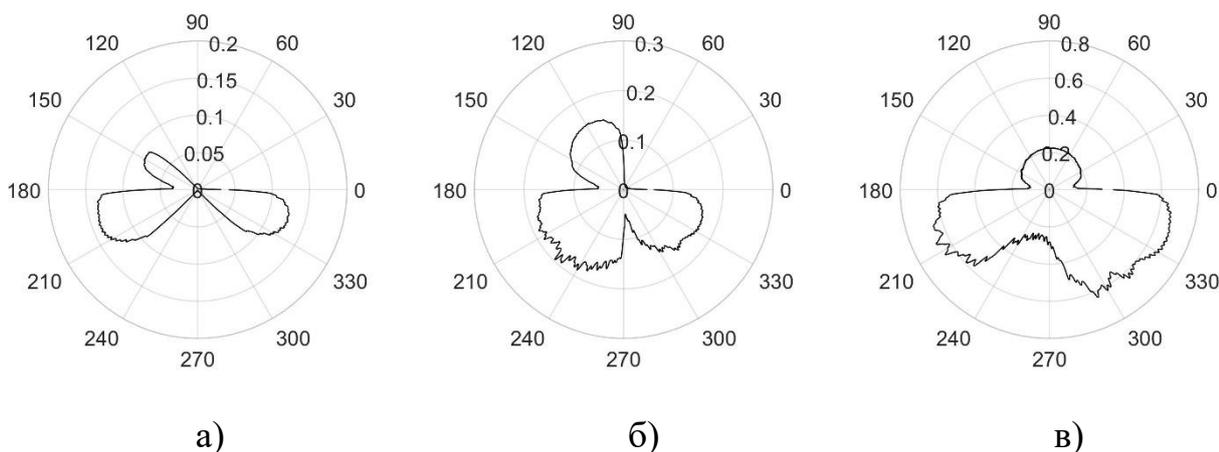


Рис. 6. Нормированная на $\max(\Omega(\phi))$ интегро-дифференциальная мощность рассеяния прямоугольного уголкового отражателя с размерами граней 10λ и 15λ : в секторе углов $[0, 45]$ (а), $[0, 90]$ (б), $[0, 180]$ (в).

Спектр МФП позволяет наряду с интегральными и интегро-дифференциальными (усредненными в секторе углов) оценками получать диаграмму мощности рассеяния и применительно к конкретной пространственной конфигурации би- или мульти-статической РЛС на основе выражения (7). В этом случае набор пространственных фильтров формируется исходя из рассматриваемой системы локации. Пример расчета нормированной диаграммы мощности рассеяния применительно к однопозиционной и мульти-статическим системам представлен на рисунке 7. Для мульти-статических

систем приведены диаграммы для случая когерентного и некогерентного приема. Представленные диаграммы показывают существенное различие в средней регистрируемой РЛС мощности, рассеиваемой объектом, в зависимости от принципа построения и пространственной конфигурации.

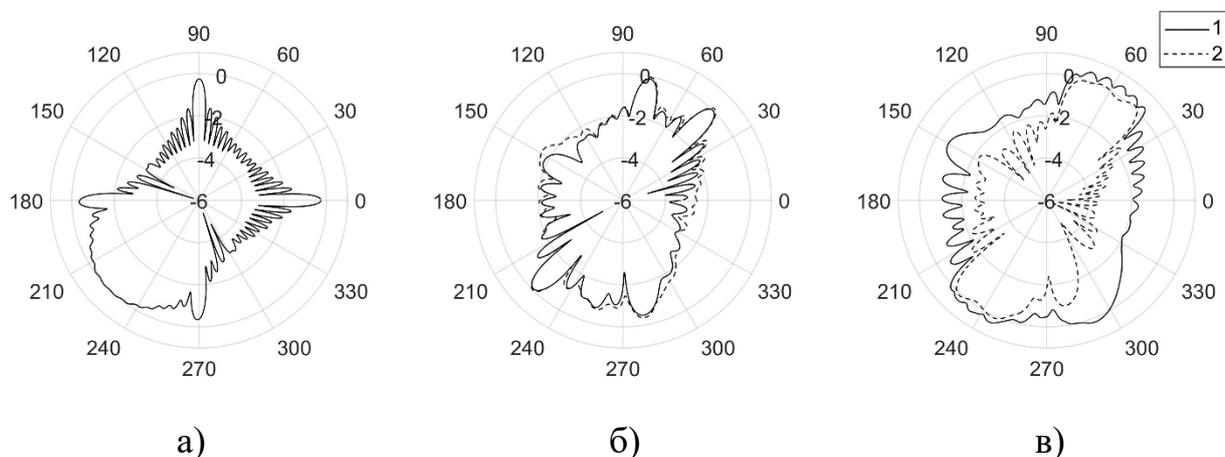


Рис. 7. Нормированная мощность рассеяния прямоугольного уголкового отражателя с размерами граней 10λ : для однопозиционной системы (а), для мульти-статической с одним облучателем и двумя приемными элементами (углы приема 225 и 275 град.) (б), и четырьмя приемными элементами (углы приема 225, 232, 240, 255 град) (в), 1 – когерентный прием, 2 – некогерентный прием.

Заключение

Таким образом, при решении задач оценки отражательных характеристик объектов могут быть использованы результаты зондирования объекта мульти-фокусными полями. Такие результаты позволяют эффективно применить методы цифровой фильтрации сигналов для получения интегральных, интегро-дифференциальных (усредненных в секторе углов), поглощающих РЛХ объектов с учетом принципа построения и пространственной конфигурации би- или мульти-статической РЛС.

Литература

1. Chernyak V.S. Fundamentals of multisite radar systems: multistatic radars and multistatic radar systems. – Routledge, 2018.
2. Емельянов Е.С. Закономерности формирования плоских полей на радиолокационных комплексах матричного типа с кольцевыми антенными решетками // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66. – №. 6. – С. 523-532.
3. Кирьянов О.Е. Мартынов Н.А. Понькин В.А. Матричный метод оценки радиолокационных характеристик объектов в ближней и дальней зонах облучения и приема // Антенны. – 2005. №. 6. – С. 99-103
4. Hu C. et al. A near-field to far-field RCS measurement method for multiple-scattering target // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – Т. 68. – №. 10. – С. 3733-3739.
5. Hu C. et al. A near-field to far-field RCS measurement method for multiple-scattering target // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – Т. 68. – №. 10. – С. 3733-3739.
6. Kim W. et al. Near-field to far-field RCS prediction on arbitrary scanning surfaces based on spherical wave expansion // Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 24. – С. 7199.
7. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. – 1967.
8. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. Численный анализ дифракции радиоволн. – 1982.

Для цитирования:

Емельянов Е.С. Метод оценки отражательных характеристик объектов с использованием мульти-фокусных зондирующих полей. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.2.4>