11

Обобщенная матрица рассеяния радиолокационного объекта

© *В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
E-mail: gulkovl@rts.tusur.ru

Поступило в Редакцию 3 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 30 марта 2026 г.
Принято к публикации 30 марта 2026 г.

Рассмотрена двухвибраторная модель радиолокационного объекта с неортогонально взаимно ориентированными вибраторами. В рамках данной модели получена обобщенная матрица рассеяния стабильного радиолокационного объекта в параметрической форме с использованием инвариантных поляризационных параметров, имеющих ясную физическую трактовку.

Ключевые слова: двухвибраторная модель, неортогонально взаимно ориентированные вибраторы, оператор поворота, инвариантные поляризационные параметры.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63141.20642

Наиболее полно рассеивающие свойства радиолокационного объекта (РЛО) в поляризационной радиолокации описываются матрицей рассеяния (МР) в линейном поляризационном базисе в виде трех комплексных чисел $\dot{S}_{XX}$, $\dot{S}_{YY}$ и $\dot{S}_{XY}$ [1–3]. В параметрической форме МР стабильного РЛО в линейном поляризационном базисе имеет вид [3–5]:

$$[S]=\lambda_1\begin{bmatrix}\cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta\\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta\end{bmatrix} + \lambda_2\exp(j\Delta\varphi)\begin{bmatrix}\sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta\\ -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta\end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где λ_1 и λ_2 — модули собственных чисел МР, $\Delta\varphi$ — разность аргументов собственных чисел МР, θ задает ориентацию собственной системы координат МР.

Эта МР (1) получена в рамках двухвибраторной модели с ортогонально взаимно расположенными вибраторами [3,4]. Из (1) следует, что стабильный РЛО может быть представлен суммой двух ортогонально ориентированных вибраторов, что справедливо для класса осесимметричных РЛО [3,4]. Физический смысл параметров МР (1) становится понятным, если обратиться к двухвибраторной модели РЛО, где собственные числа МР λ_1 и λ_2 имеют смысл эффективной длины вибраторов, а их квадраты — эффективной поверхности рассеяния объекта. Разность аргументов собственных чисел МР $\Delta\varphi$ равна фазовой длине пути между вибраторами $\Delta R=\Delta\varphi\lambda/4\pi$ [3,4]. Ориентация собственной системы координат МР совпадает с ориентацией вибраторов для вырожденного объекта. В общем случае параметр θ определяется конфигурацией объекта, его ориентацией в пространстве и электрофизическими характеристиками [3,4].

Если предположить, что $\lambda_1>\lambda_2$, то, вынося из МР (1) модуль большего собственного числа λ_1, получим МР в параметрической форме

$$[S]=\sqrt{\sigma_m}\left\{\begin{bmatrix}\cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta\\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta\end{bmatrix} + \rho\exp(j\Delta\varphi)\begin{bmatrix}\sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta\\ -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta\end{bmatrix}\right\}, \qquad (2)$$

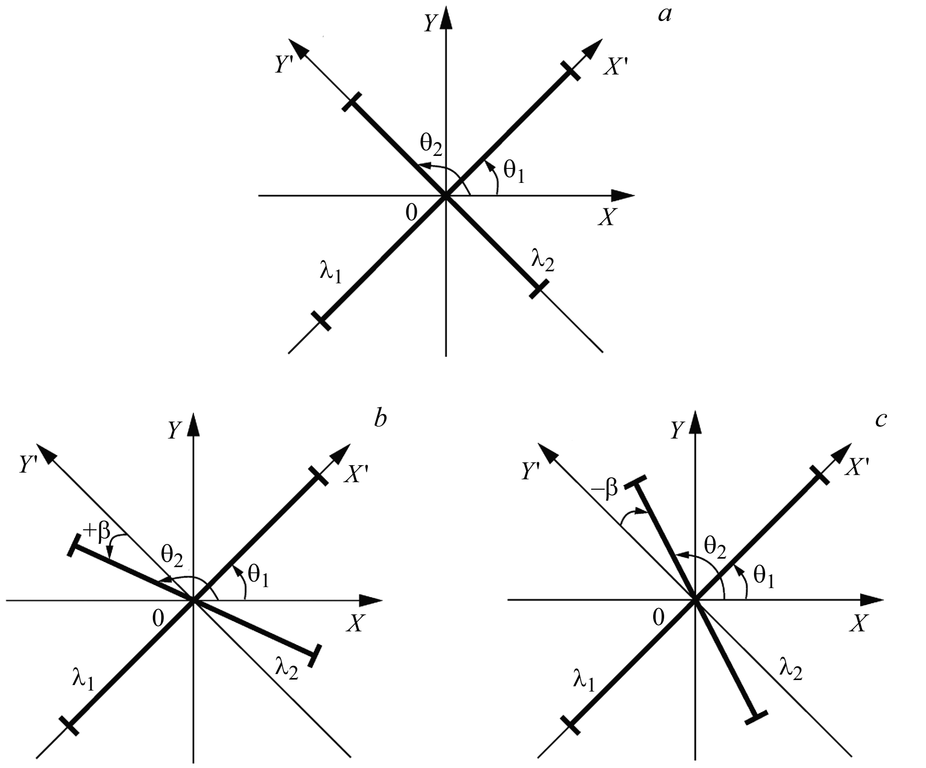
где $\sigma_m=\lambda_1^2$ — максимально возможная эффективная поверхность рассеяния объекта при облучении его линейно поляризованной волной, $\rho=\lambda_2/\lambda_1$ — фактор формы объекта.

Из (2) видно, что в таком представлении традиционная МР стабильного объекта из трех комплексных чисел может быть заменена набором из четырех действительных чисел. Набор включает в себя один энергетический параметр σ_m и три поляризационных параметра (ПП) ρ, $\Delta\varphi$ и θ. Эти ПП полностью описывают поляризационные характеристики определенного класса симметричных объектов, к которым относятся тела вращения [2–5]. Поскольку ПП не зависят от способа задания МР (2), они являются инвариантными ПП [3–5]. МР (2) может быть представлена через эти ПП в любом из поляризационных базисов.

Недостаток существующих представлений МР стабильного РЛО в параметрической форме (1) и (2) заключается в том, что они справедливы только в рамках двухвибраторной модели рассеяния с ортогонально взаимно ориентированными вибраторами и ограничены классом осесимметричных объектов.

В работе рассматривается двухвибраторная модель рассеяния РЛО с неортогонально взаимно ориентированными вибраторами. Получена обобщенная МР РЛО в параметрической форме с использованием ее инвариантных поляризационных параметров.

Пусть угловое положение первого вибратора с эффективной длиной λ_1 зафиксировано, составляет угол θ_1 с положительной полуосью OX опорной системы



Пояснение к двухвибраторной модели с неортогонально расположенными вибраторами λ_1 и λ_2 для $\Delta R = 0$ при $\theta_2 - \theta_1 = 90^\circ$ (a), $90^\circ + \beta$ (b), $90^\circ - \beta$ (c).

координат (ОСК) XOY и совпадает по направлению с положительной полуосью OX' собственной системы координат (ССК) $X'OY'$ РЛО. Угловое положение второго вибратора с эффективной длиной λ_2 в исходном состоянии ортогонально угловому положению первого вибратора, составляет угол θ_2 с положительной полуосью OX ОСК XOY и совпадает с положительной полуосью OY' ССК $X'OY'$ РЛО (см. рисунок, a). Для упрощения рисунка пусть фазовые центры рассеяния первого и второго вибраторов совпадают, т. е. $\Delta R = 0$.

Повернем против часовой стрелки второй вибратор на угол $+\beta$. Тогда его угловое положение в ОСК XOY будет равно $\theta_2 = 90^\circ + \theta_1 + \beta$ (см. рисунок, b). Тогда с учетом (1), используя известные из [3–6] операторы прямого и обратного поворотов, получим обобщенную МР в линейном поляризационном базисе в ОСК XOY вида

$$[S_0] = \lambda_1 \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

$$+\lambda_2 \exp(j\Delta\varphi)\Big[[R(\beta)]^{-1}\begin{bmatrix} \sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta \end{bmatrix}[R(\beta)]\Big], \tag{3}$$

где $\big[R(\beta)\big] = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}$ — оператор прямого поворота второго вибратора на угол $+\beta$ против часовой стрелки [2–4], $\big[R(\beta)\big]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}$ — оператор обратного поворота второго вибратора на угол $-\beta$ по часовой стрелке [2–4].

После матричных вычислений получим обобщенную МР вида

$$[S_0] = \lambda_1 \begin{bmatrix} \cos^2\theta_1 & \sin\theta_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1\cos\theta_1 & \sin^2\theta_1 \end{bmatrix}$$

$$+\lambda_2 e^{j\Delta\varphi}\begin{bmatrix} \sin^2(\theta_1+\beta) & -\sin(\theta_1+\beta)\cos(\theta_1+\beta) \\ -\sin(\theta_1+\beta)\cos(\theta_1+\beta) & \cos^2(\theta_1+\beta) \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Обобщенная МР (4) справедлива для случая, когда вибраторы ориентированы взаимно неортогонально с разностью углов $\theta_2 - \theta_1 = 90^\circ + \beta$ (см. рисунок, b).

По аналогии, если второй вибратор повернуть относительно первого вибратора на угол $-\beta$ по часовой стрелке, разность углов будет иметь вид $\theta_2 - \theta_1 = 90^\circ - \beta$ (см. рисунок, c).

Окончательно получим обобщенную МР вида

$$[S_0] = \lambda_1 \begin{bmatrix} \cos^2\theta_1 & \sin\theta_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1\cos\theta_1 & \sin^2\theta_1 \end{bmatrix}$$

$$+\lambda_2 e^{j\Delta\varphi}\begin{bmatrix} \sin^2(\theta_1\pm\beta) & -\sin(\theta_1\pm\beta)\cos(\theta_1\pm\beta) \\ -\sin(\theta_1\pm\beta)\cos(\theta_1\pm\beta) & \cos^2(\theta_1\pm\beta) \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Выражение (5) представляет собой обобщенную МР РЛО, полученную в рамках двухвибраторной модели с неортогонально взаимно ориентированными вибраторами в параметрической форме. Действительно, подставляя в (5) $\beta = 0^\circ$, получим частный случай ортогонально ориентированных вибраторов (1).

Если предположить, что $\lambda_1 > \lambda_2$, то, вынося из обобщенной МР (5) модуль большего собственного члена λ_1, получим ее вид в параметрической форме

$$[S_0] = \sqrt{\sigma_m}\left\{\begin{bmatrix}\cos^2\theta_1 & \sin\theta_1\cos\theta_1\\ \sin\theta_1\cos\theta_1 & \sin^2\theta_1\end{bmatrix}\right.$$

$$\left.+\rho e^{j\Delta\varphi}\begin{bmatrix}\sin^2(\theta_1\pm\beta) & -\sin(\theta_1\pm\beta)\cos(\theta_1\pm\beta)\\ -\sin(\theta_1\pm\beta)\cos(\theta_1\pm\beta) & \cos^2(\theta_1\pm\beta)\end{bmatrix}\right\}, \tag{6}$$

где β — параметр, характеризующий величину взаимной неортогональности вибраторов.

Величина взаимной неортогональности β в (6) является мерой отклонения вибраторов от состояния ортогональности (перпендикулярности).

Видим, что в таком представлении в обобщенной МР (6) появляется дополнительный поляризационный параметр β к существующим трем ρ, $\Delta\varphi$, θ_1. Эти ПП полностью описывают поляризационные характеристики рассеяния объекта в рамках двухвибраторной модели с неортогональным взаимным расположением вибраторов и имеют ясную физическую трактовку. Поскольку перечисленные параметры не зависят от способа задания обобщенной МР (6), они являются ее инвариантными ПП. В любом из поляризационных базисов обобщенная МР может быть выражена через эти параметры, причем ее элементы в (6) представляют собой функции параметров предлагаемой двухвибраторной модели с неортогональными вибраторами.

Исследуем свойства обобщенной МР (6), задавая различные значения параметров двухвибраторной модели с неортогональными вибраторами. Для этого понизим степень слагаемых, отвечающих за МР первого и второго вибраторов, входящих в (6), и осуществим переход к тригонометрическим функциям двойных аргументов. Тогда (6) будет иметь вид

$$[S_0] = 0.5\sqrt{\sigma_m}\left\{\left(\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1\\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1\end{bmatrix}\right)\right.$$

$$\left.+\rho e^{j\Delta\varphi}\left(\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}\cos 2(\theta_1\pm\beta) & \sin 2(\theta_1\pm\beta)\\ \sin 2(\theta_1\pm\beta) & -\cos 2(\theta_1\pm\beta)\end{bmatrix}\right)\right\}. \tag{7}$$

Пусть фазовые центры рассеяния вибраторов совпадают, т. е. $\Delta\varphi = 0$, а эффективные длины вибраторов $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$. Тогда (7) преобразуется к виду

$$[S_0] = \sqrt{\sigma_m}\left\{\left(\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}+0.5\begin{bmatrix}\cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1\\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1\end{bmatrix}\right)\right.$$

$$\left.-0.5\begin{bmatrix}\cos 2(\theta_1\pm\beta) & \sin 2(\theta_1\pm\beta)\\ \sin 2(\theta_1\pm\beta) & -\cos 2(\theta_1\pm\beta)\end{bmatrix}\right\}, \tag{8}$$

где $\sigma_m = \lambda^2$.

Обобщенная МР (8) представляет собой совокупность из трех МР: первая и вторая МР соответствуют сумме поляризационно-изотропного объекта (трехгранный уголковый отражатель, сфера) и анизотропного объекта (двугранный уголковый отражатель), а третья МР характеризует анизотропную часть объекта, учитывающую величину неортогональности вибраторов.

Пусть величина неортогональности вибраторов $\beta = 0$, т. е. вибраторы взаимно ортогональны, тогда (8) будет иметь вид

$$[S] = \sqrt{\sigma_m}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{9}$$

Из (9) следует, что обобщенная МР (8) трансформируется в МР $[S]$, которая соответствует поляризационно-изотропному объекту (сфера, металлический лист, трехгранный уголковый отражатель) и не зависит от ориентации ССК $X'OY'$ РЛО, что полностью согласуется с известной традиционной МР (2), представленной в рамках частного случая двухвибраторной модели с ортогональными вибраторами.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FEWM-2026-0007).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.R. Cloude, *Polarisation: applications in remote sensing* (OUP Oxford, 2010).

[2] Y. Yamaguchi, *Polarimetric SAR imaging: theory and applications* (CRC Press, Boca Raton, 2020).

[3] А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев, *Поляризационная структура радиолокационных сигналов* (Радиотехника, М., 2005).

[4] В.Н. Татаринов, С.В. Татаринов, Л.П. Лигтхарт, *Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов* (Изд-во Томск. ун-та, Томск, 2012), т. 1.

[5] В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков, ПТЭ, № 6, 130 (2022). DOI: 10.31857/S0032816222050172 [V.L. Gulko, A.A. Mescheryakov, Instrum. Exp. Tech., **65** (6), 1000 (2022). DOI: 10.1134/S0020441222050165].

[6] В.Л. Гулько, А.А. Мещеряков, В.М. Рулевский, *Методы и техника поляриметрии в радиомаячных системах навигации* (Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, Томск, 2025), с. 64–75.