

## АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Олюнин Н.Н., Сазонов В.В.

ОАО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца»

*Рассматривается задача распознавания радиолокационных целей по данным измерения поляризационной матрицы рассеяния в случае моностатической локации. На примере четырех различных целей демонстрируется качественный анализ влияния некоторых геометрических особенностей цели на ее поляриметрические отражающие свойства. Качественные выводы подтверждаются результатами вычисления матриц рассеяния с помощью асимптотических методов теории дифракции. Демонстрируется эффективность использования поляризационных признаков при распознавании.*

Доклад посвящен анализу информативности поляризационных признаков в задаче радиолокационного распознавания целей при использовании радиолокаторов с полным поляризационным приемом. Выделение особенностей распознаваемых целей и анализ влияния этих особенностей на характеристики рассеянного поля — важный шаг на пути построения процедуры распознавания по радиолокационным данным. Такой анализ во многих случаях позволяет априори оценить эффективность использования поляризационных признаков при распознавании радиолокационных целей.

Рассматривается задача распознавания по поляризационной матрице рассеяния цели (ПМР) в случае моностатической локации (обратное рассеяние). В этом случае ПМР будет симметричной. Числовые значения элементов матрицы рассеяния зависят от поляризационного базиса, в котором она записана. Будем предполагать, что изначально ПМР записана в линейном поляризационном базисе. Поляризационный базис, в котором ПМР диагональна, называется собственным базисом цели, а базисные поляризации — собственными поляризациями цели [1, 2].

Рассмотрим одну из собственных поляризаций. Вторая собственная поляризация однозначно определяется по первой. Пусть  $\alpha$  — угол эллиптичности, а  $\beta$  — угол ориентации эллипса выбранной собственной поляризации. Угол  $\alpha$  равен половине угла между диагоналями прямоугольника, в который вписан эллипс поляризации, а  $\beta$  — угол между большой осью эллипса поляризации и осью абсцисс выбранной прямоугольной системы координат. Также пусть диагонализированная матрица рассеяния имеет вид

$$\mathbf{S}_D = \begin{pmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{pmatrix}.$$

$S_{1,2}$  — это комплексные коэффициенты отражения для собственных поляризаций. Величины  $S_{1,2}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  параметризуют матрицу рассеяния. В то же время существует связь между этими параметрами и некоторыми геометрическими характеристиками цели. Поэтому такая параметризация ПМР очень удобна при анализе влияния геометрии цели на ее поляриметрические отражающие свойства.

Угол  $\beta$  определяется взаимной ориентацией цели и базиса, в котором записана ПМР. Этот угол меняется при вращении цели вокруг направления наблюдения. Параметры  $S_{1,2}$

и  $\alpha$  при таком вращении не меняются. Таким образом, из ПМР выделяется информация, которая инвариантна по отношению к вращению цели вокруг направления наблюдения.

Угол  $\alpha$  связан с симметричностью цели. Если у цели есть плоскость симметрии, и волновой вектор падающей волны лежит в этой плоскости, то для такой цели  $\alpha = 0$  [2]. Обратное, вообще говоря, не верно. Параметр  $\alpha$  всегда равен нулю для целей, обладающих симметрией вращения, в случае обратного рассеяния, поскольку волновой вектор падающей волны всегда будет лежать в плоскости симметрии такой цели. Также  $\alpha$  мало отличается от нуля у выпуклых целей с гладкой поверхностью, размеры которых больше или сравнимы с длиной волны, поскольку, в определенном приближении, их отражающая область симметрична.

Сумма квадратов модулей коэффициентов отражения  $S_{1,2}$  равняется сумме квадратов модулей элементов ПМР в любом поляризационном базисе и называется полной ЭПР цели [2]:

$$\sigma_{\Sigma} = |S_1|^2 + |S_2|^2.$$

Различие модулей коэффициентов отражения  $S_{1,2}$  означает различие отражающей способности цели для ее собственных поляризаций. Мерой этого различия служит степень поляризационной анизотропии рассеивателя  $\mu$  [2]:

$$\mu = \frac{\left| |S_1|^2 - |S_2|^2 \right|}{|S_1|^2 + |S_2|^2}.$$

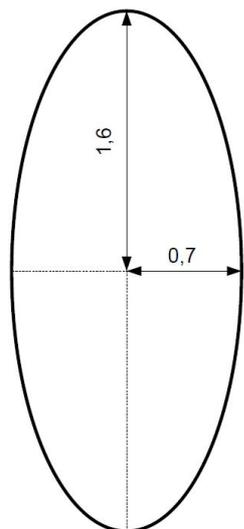
Эта величина меняется в пределах от 0 до 1 в зависимости от отношения  $|S_1|/|S_2|$ . Степень поляризационной анизотропии является мерой поляризационной избирательности цели. В частности для вибратора  $\mu = 1$ , а для сферической цели или двухгранного уголкового отражателя  $\mu = 0$ . Параметр  $\mu$  близок к нулю для любой цели с гладкой поверхностью, размеры которой больше или сравнимы с длиной волны. И этот параметр в общем случае будет отличен от нуля при наличии отражения от изломов поверхности или острых элементов цели.

Помимо амплитудной информации в коэффициентах  $S_{1,2}$  заключена еще и фазовая информация. Общая фаза  $S_{1,2}$  несущественна, поскольку она зависит от дальности до цели. Существенна разность фаз коэффициентов отражения:

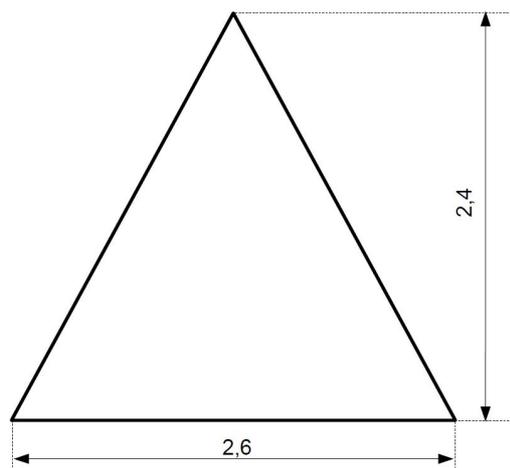
$$\delta = |\arg S_1 - \arg S_2|.$$

Можно выделить две наиболее очевидные причины возникновения разности фаз  $\delta$ . Во-первых, эта разность возникает в результате отражения от поляризационно избирательных объектов, разнесенных по дальности. Это могут быть как несколько рассеивателей, так и один рассеиватель, содержащий в себе несколько отражающих элементов. Во-вторых, разность фаз возникает при наличии переотражений в процессе рассеяния.

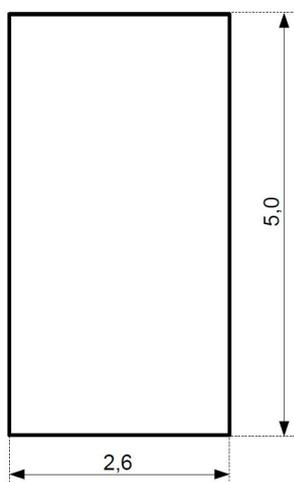
Далее рассмотрим четыре радиолокационных цели: эллипсоид вращения (рис. 1), конус (рис. 2), цилиндр (рис. 3), модель крылатой ракеты (рис. 4).



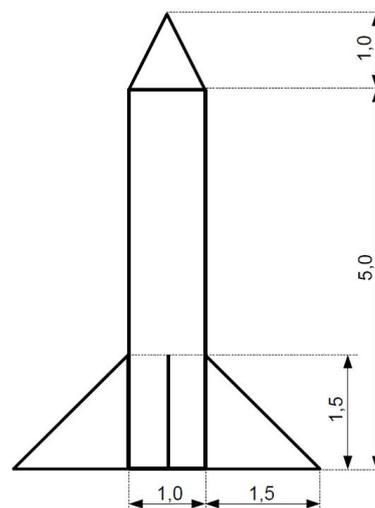
*Рис. 1. Эллипсоид вращения.*



*Рис. 2. Конус.*



*Рис. 3. Цилиндр.*



*Рис. 4. Модель крылатой ракеты.*

Размеры целей на рис. 1-4 указаны в длинах волн. Эти размеры подбирались таким образом, чтобы полные ЭПР целей, усредненные по ориентации, отличались не более, чем в 2 раза. Проанализируем, параметры  $\alpha$ ,  $\mu$  и  $\delta$  этих целей, стараясь увязать их с геометрическими особенностями каждой из целей.

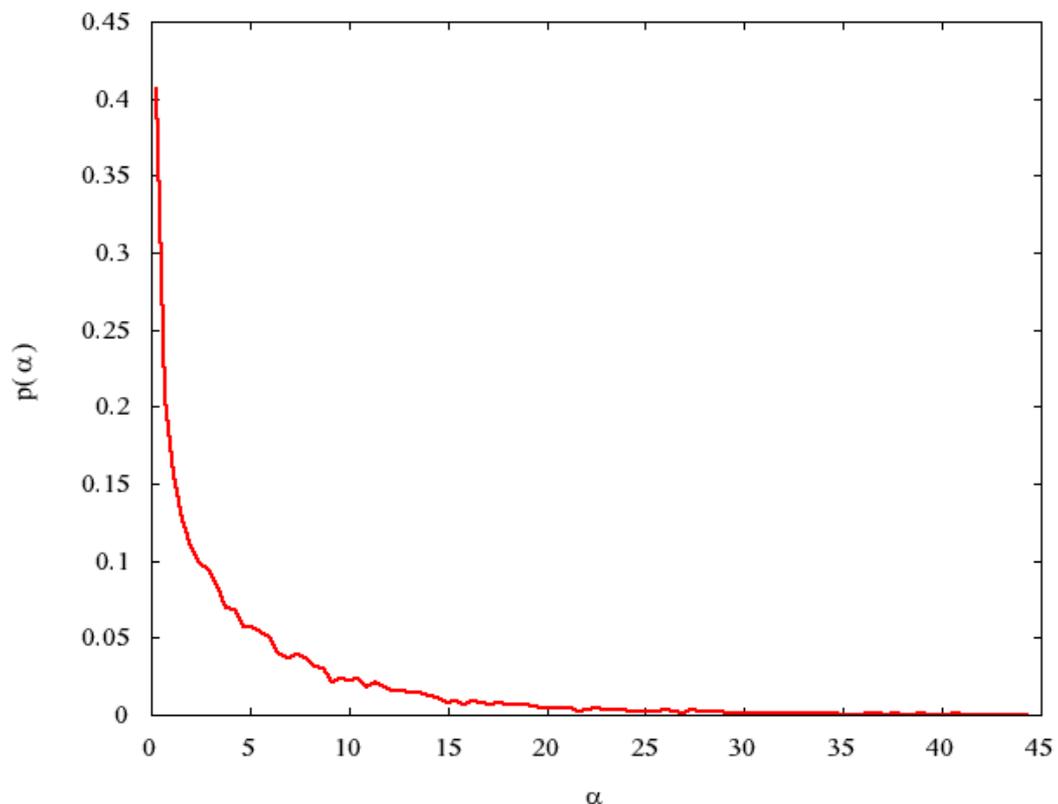
Начнем с угла эллиптичности собственных поляризаций  $\alpha$ . Эллипсоид, конус и цилиндр — это тела вращения. Поэтому, независимо от ракурса, угол эллиптичности собственных поляризаций этих целей будет равен нулю. Что касается ракеты, то из-за наличия у нее крыльев, волновой вектор падающей волны в общем случае не будет лежать в ее плоскости симметрии. Поэтому в тех ракурсах, в которых отражение от крыльев вносит существенный вклад в рассеянное поле, угол эллиптичности собственных поляризаций может принимать любые допустимые значения.

Перейдем к степени поляризационной анизотропии  $\mu$ . Эллипсоид с указанными размерами не обладает поляризационной избирательностью. Поэтому для него  $\mu$  будет равно нулю во всех ракурсах. Отражающая область на изломе поверхности конуса

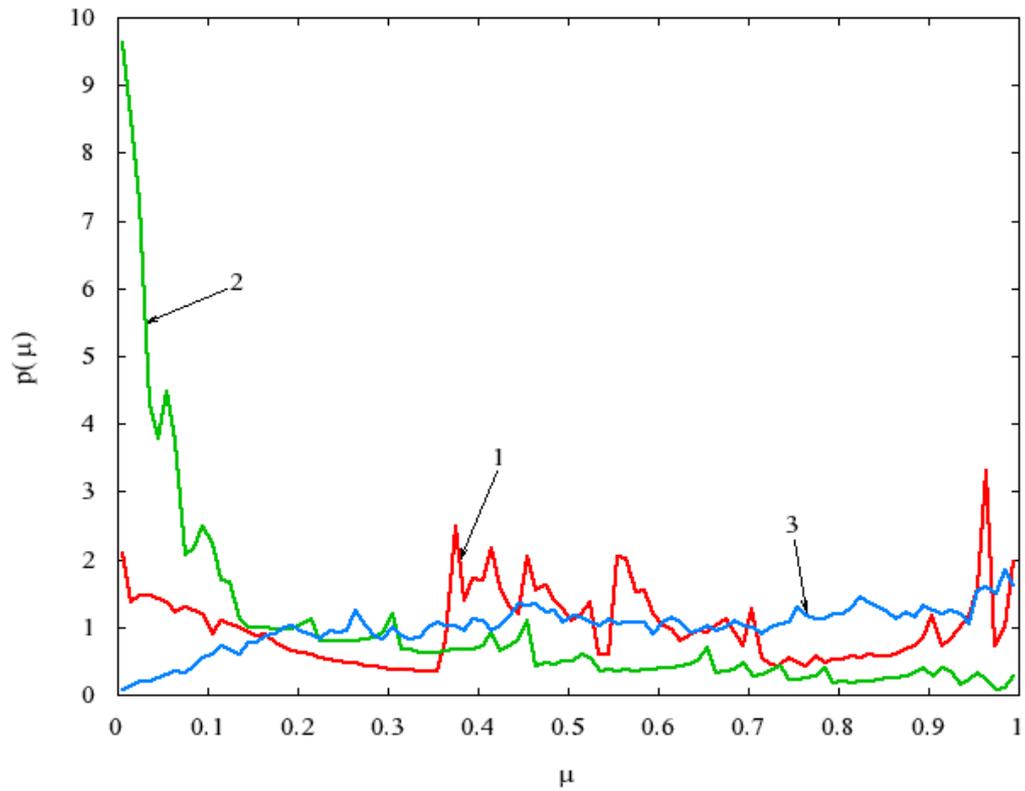
обладает ярко выраженной поляризационной избирательностью. Вклад в рассеянное поле от этой отражающей области в большинстве ракурсов сравним с вкладом от гладкой поверхности, поэтому параметр  $\mu$  у конуса будет меняться в широком диапазоне при изменении ракурса наблюдения. Торцы цилиндра, ввиду наличия изломов поверхности, также обладают поляризационной избирательностью. Но вклад в рассеянное поле от гладкой поверхности цилиндра в большинстве ракурсов больше, чем вклад от изломов на торцах. Поэтому в большинстве ракурсов параметр  $\mu$  у цилиндра не будет значительно отличаться от нуля.

Рассмотрим, наконец, разность фаз  $\delta$ . У эллипсоида во всех ракурсах только одна гладкая отражающая область, и его размеры порядка длины волны. Поэтому у эллипсоида параметр  $\delta$  равен нулю во всех ракурсах. У конуса, цилиндра и ракеты есть поляризационно избирательные отражающие области, разнесенные по дальности, поэтому  $\delta$  у этих целей может принимать любые значения. Ввиду большего разноса по дальности отражающих областей у цилиндра и ракеты, а также возможности переотражения между крыльями ракетами, параметр  $\delta$  у этих целей будет меняться значительней при изменении ракурса, нежели у конуса.

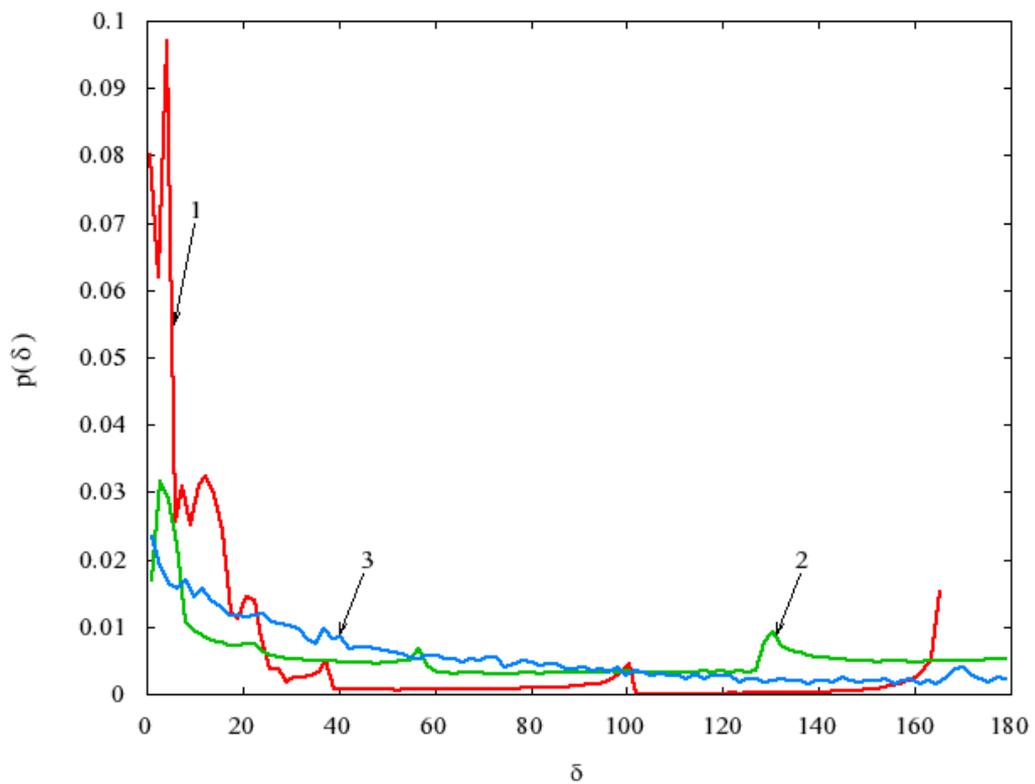
Таким образом, особенности целей сказываются на всех трех параметрах  $\alpha$ ,  $\mu$  и  $\delta$ . Поэтому можно сделать вывод, что при распознавании данных четырех целей все эти параметры будут достаточно информативными, и их целесообразно использовать в качестве признаков для распознавания.



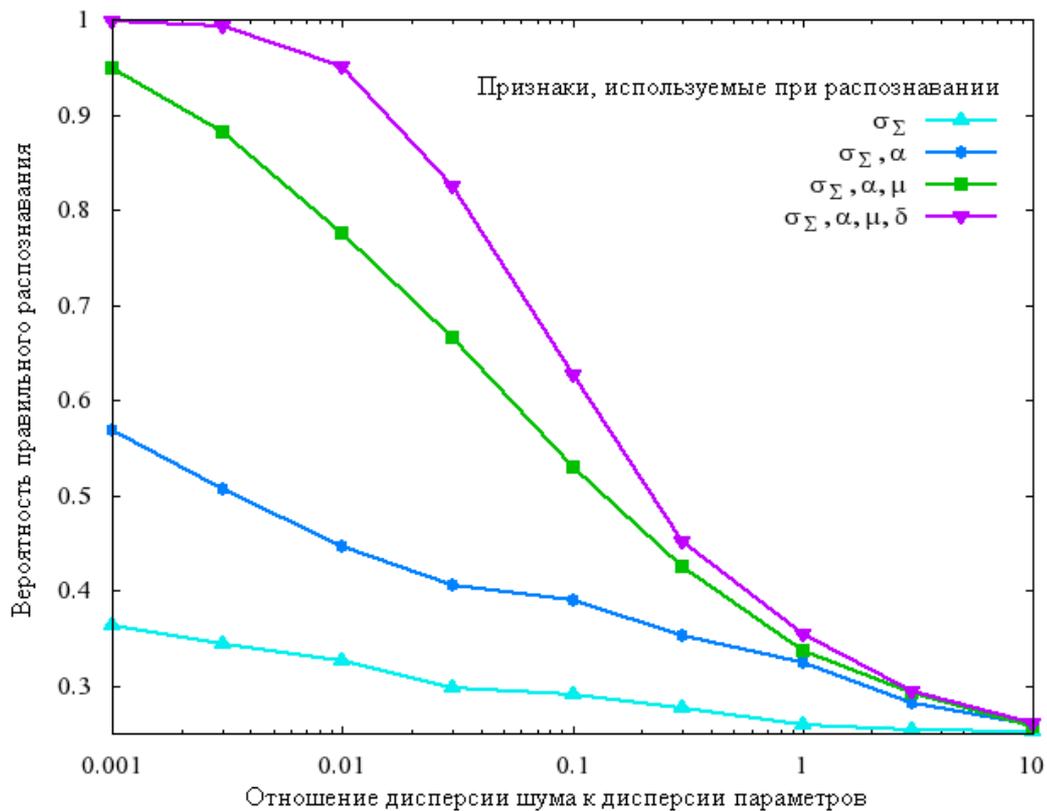
**Рис. 5.** Распределение параметра  $\alpha$  для ракеты.



**Рис. 6.** Распределение параметра  $\mu$  : 1 — для конуса, 2 — для цилиндра, 3 — для ракеты.



**Рис. 7.** Распределение параметра  $\delta$  : 1 — для конуса, 2 — для цилиндра, 3 — для ракеты.



**Рис. 8.** Результаты моделирования распознавания.

Для подтверждения этих выводов о влиянии геометрии данных целей на поляриметрические характеристики рассеяния был проведен численный эксперимент. Для каждой из целей и для всех возможных ракурсов были получены ПМР путем вычисления с использованием приближенных методов теории дифракции. Для вычисления поля, рассеянного гладкой поверхностью тел, использовалось приближение физической оптики. А для вычисления рассеяния на изломах поверхности использовался метод краевых волн. Однократное переотражение учитывалось следующим образом: сначала вычислялась отраженная волна в геометрооптическом приближении, затем вычислялась переотраженная волна в приближении физической оптики. Более подробно процедура вычисления рассеянного поля описана в [3].

Далее, предполагая ориентацию цели случайной и полагая все ориентации равновероятными, были построены графики распределения параметров  $\alpha$ ,  $\mu$  и  $\delta$  для каждой из целей. Результаты вычислений приведены на рис. 5-7. Как видно из приведенных графиков, результаты вычислений подтвердили качественные выводы.

По различным наборам признаков моделировалось распознавание этих четырех целей. Все цели и все их возможные ориентации предполагались равновероятными. В качестве банка эталонных данных в процедуре распознавания использовались результаты вычислений ПМР. Далее бралась случайная выборка из банка данных, и к ней добавлялся шум таким образом, чтобы отношение дисперсии шума к дисперсии каждого из параметров было одинаковым. Затем осуществлялась процедура распознавания целей по критерию минимума расстояния [4]. Результаты моделирования распознавания представлены на рис. 8. По оси абсцисс отложено отношение дисперсии шума,

добавляемого к каждому из параметров, к дисперсии параметра. По оси ординат — вероятность правильного распознавания. Построены графики для четырех различных наборов признаков. Наилучшие результаты распознавания получились при использовании в качестве признаков всех четырех параметров  $\sigma_{\Sigma}$ ,  $\alpha$ ,  $\mu$ , и  $\delta$ .

## Литература

1. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. — Москва: Советское радио, 1966.
2. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. — Москва: Радиотехника, 2007.
3. Олюнин Н.Н. Моделирование рассеяния радиолокационных сигналов в коротковолновом приближении // Диссертация на соискание степени магистра. — МФТИ, 2008.
4. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. — Москва: Мир, 1978.