

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.11>

УДК: 621.396.96

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С УЧЕТОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ БЛИЗОСТИ

Е.Л. Шошин

Сургутский государственный университет
628400, Сургут, пр. Ленина, 1

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2024 г.

Аннотация. Рассматривается поляризационная близость и глубина поляризационной модуляции радиоволн, рассеянных стабильными радиолокационными целями. Выполнен анализ функции поляризационной близости радиоволн, рассеянных двухгранным уголкового отражателем при облучении линейно поляризованными сигналами, модулированными по углу ориентации. Проведено моделирование поляризационных характеристик радиоволн, рассеянных двух- и трехгранными уголковыми отражателями, невзаимным объектом и линейным вибратором. Исследован режим полного поляризационного сканирования малоконтрастной радиолокационной цели.

Ключевые слова: поляризационная близость, глубина модуляции, полное поляризационное сканирование, матрица рассеяния, вектор Стокса.

Автор для переписки: Шошин Евгений Леонидович, shoshin6@mail.ru

Введение

При обнаружении радиолокационных целей и измерении их характеристик используется поляризационная модуляция зондирующих сигналов [1, 2]. Известные алгоритмы измерения поляризационных характеристик направлены на оперативное получение информации о рассеивающих характеристиках радиолокационных целей с реализуемой при этом погрешностью [3-5].

В [6] R.M.A. Azzam и N.M. Bashara было введено понятие поляризационной близости двух состояний поляризаций (отвечающих точкам P_1 и P_2 на комплексной плоскости) как доля интенсивности волны, характеризуемую состоянием P_1 , приходящуюся на состояние P_2 . В качестве меры поляризационной близости выступает квадрат расстояния между сферическими отображениями точек P_1 и P_2 на сфере Римана:

$$N(P_1, P_2) = \frac{|P_1|^2 |P_2|^2 + P_1^* P_2 + P_1 P_2^* + 1}{|P_1|^2 |P_2|^2 + |P_1|^2 + |P_2|^2 + 1}. \quad (1)$$

Функция удаленности этих же состояний поляризации задается соотношением:

$$H(P_1, -1/P_2^*) = 1 - N(P_1, P_2) = \frac{|P_1|^2 + |P_2|^2 - P_1^* P_2 - P_1 P_2^*}{|P_1|^2 |P_2|^2 + |P_1|^2 + |P_2|^2 + 1}. \quad (2)$$

В [7] установлено, что функции поляризационной близости и удаленности инвариантны к выбору поляризационного базиса.

Понятие поляризационной близости радиоволн в настоящее время не используется при проведении измерений поляризационных характеристик радиолокационных целей. Целью исследования является анализ поляризационной близости и глубины модуляции радиоволн, рассеянных стабильными радиолокационными целями при облучении поляризационно-модулированными сигналами.

1. Использование Стоксова пространства для оценки поляризационной близости радиолокационных сигналов

При нахождении близости состояний поляризации в задаче обработки радиолокационных сигналов может использоваться скалярное произведение 4-х мерных векторов $St_1=(I_1, Q_1, U_1, V_1)^T$ и $St_2=(I_2, Q_2, U_2, V_2)^T$, заданных в Стоксовом пространстве [8]:

$$St_1 \cdot St_2 = I_1 \cdot I_2 + Q_1 \cdot Q_2 + U_1 \cdot U_2 + V_1 \cdot V_2. \quad (3)$$

Нормированные векторы St_1 и St_2 могут быть представлены в виде, не зависящем от способа представления поляризационных отношений [7]:

$$St_1 = \left\{ 1, \frac{2 \operatorname{Re} P_1}{1 + |P_1|^2}, \frac{2 \operatorname{Im} P_1}{1 + |P_1|^2}, \frac{|P_1|^2 - 1}{1 + |P_1|^2} \right\}, \quad (4)$$

$$St_2 = \left\{ 1, \frac{2 \operatorname{Re} P_2}{1 + |P_2|^2}, \frac{2 \operatorname{Im} P_2}{1 + |P_2|^2}, \frac{|P_2|^2 - 1}{1 + |P_2|^2} \right\}. \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3), можно получить

$$St_1 \cdot St_2 = 2 \frac{|P_1|^2 |P_2|^2 + P_1^* P_2 + P_1 P_2^* + 1}{|P_1|^2 |P_2|^2 + |P_1|^2 + |P_2|^2 + 1} = 2N(P_1, P_2). \quad (6)$$

Как свидетельствует (6) скалярное произведение нормированных векторов Стокса анализируемых радиоволн равно удвоенному значению их поляризационной близости.

2. Поляризационная близость излученных и рассеянных радиоволн

На практике при анализе поляризационных характеристик стабильной цели используют поляризационно-модулированные зондирующие сигналы, при этом уровень рассеянных сигналов в общем случае меняется, демонстрируя ту или иную степень глубины поляризационной модуляции. Проведем исследование поляризационной близости излученных и рассеянных сигналов и глубины модуляции в зависимости от вида поляризационной модуляции радиолокационных сигналов, формируемых одноканальной поляриметрической

РЛС. Преобразование поляризации радиоволн совокупностью приборов одноканальной РЛС описывается с использованием формализма векторов и матриц Джонса:

$$E_{\text{out}} = [D_{\Pi}] \left\{ [R(\theta)]^{-1} [D_F] [R(\theta)] \right\}^T [S] [R(\theta)]^{-1} [D_F] [R(\theta)] E_{\text{in}}, \quad (7)$$

где D_F – матрица Джонса фазовой пластины, T – символ транспонирования,

$$R(\theta) = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \text{ – матрица поворота из опорного базиса в собственную}$$

систему координат фазовой пластины,

$$D_{\Pi} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \text{ – поляризатор канала приема,}$$

S – матрица рассеяния радиолокационной цели,

$$E_{\text{in}} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} \text{ – вектор Джонса входной радиоволны вертикальной поляризации,}$$

E_{out} – вектор Джонса выходной радиоволны.

Найдем поляризационные характеристики радиоволны, формируемой при прохождении фазовой пластины. Вектор Джонса формируемой радиоволны равен:

$$E_{\text{rad}} = [R(\theta)]^{-1} [D_F] [R(\theta)] E_{\text{in}}. \quad (8)$$

Подставим в (8) матрицу Джонса полуволновой фазовой пластины

$$D_F = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-j\pi} \end{vmatrix}, \quad (9)$$

и получим:

$$E_{\text{rad}} = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{bmatrix} E_{\text{in}} = W E_{\text{in}}. \quad (10)$$

Осуществим переход от (10) к формализму векторов Стокса и матриц Мюллера, заменяя E_{in} вектором-столбцом $\{1, 1, 0, 0\}^T$ и используя преобразование [9]:

$$M = \Lambda [W \otimes W^*] \Lambda^{-1}, \tag{11}$$

здесь в квадратных скобках стоит кронекеровское произведение матрицы W на комплексно-сопряженную, а

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{vmatrix}. \tag{12}$$

Получим вектор Стокса излучаемого сигнала:

$$St_{rad} = M \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(4\theta) & \sin(4\theta) & 0 \\ 0 & \sin(4\theta) & -\cos(4\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ \cos(4\theta) \\ \sin(4\theta) \\ 0 \end{vmatrix}. \tag{13}$$

Выражение (13) свидетельствует, что полуволновая фазовая пластина, ориентированная под углом θ в секции круглого волновода, осуществляет поворот плоскости поляризации входной волны на угол 2θ . Вращение секции круглого волновода приводит к поляризационной модуляции излучаемых радиоволн, отображаемых точками вдоль экваториальной линии на сфере Пуанкаре (рис. 1а, ПК и ЛК – правая и левая кругополяризованные волны).

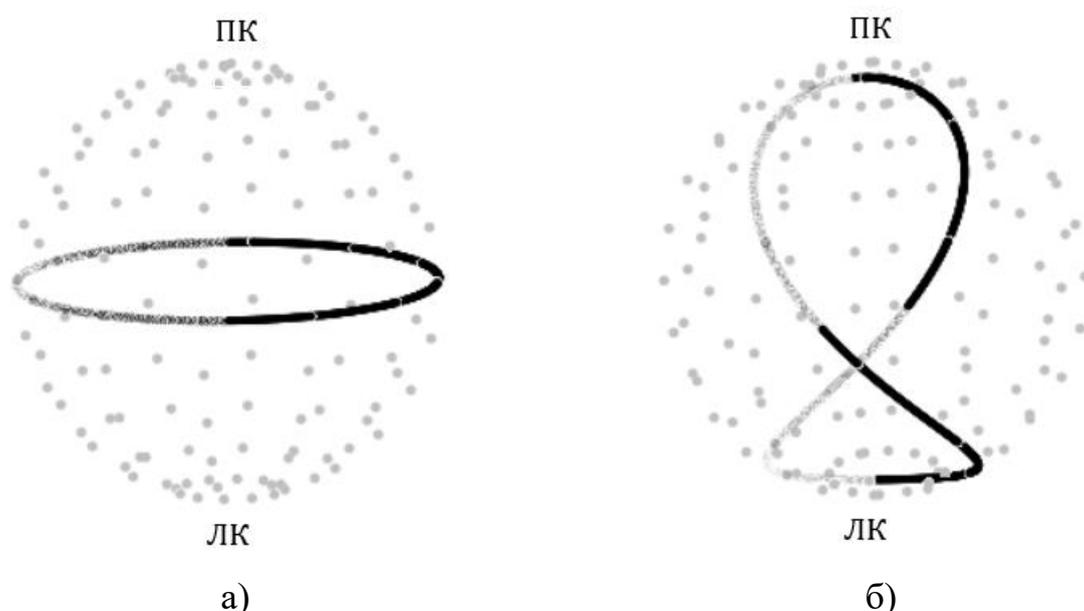


Рис.1. Поляризационная модуляция зондирующих сигналов:
 а) вращение полуволновой фазовой пластины,
 б) вращение четвертьволновой фазовой пластины.

Частота поляризационной модуляции определяется угловой скоростью вращения фазовой пластины.

С тем, чтобы определить поляризационные характеристики рассеянного сигнала необходимо перемножить матрицы, входящие в (7), в результате чего получим:

$$E_{\text{out}} = \begin{vmatrix} s_{11} \cos^2(2\theta) + s_{21} \sin(4\theta) + s_{22} \sin^2(2\theta) & \frac{(s_{11} - s_{22}) \sin(4\theta)}{2} - s_{21} \cos(4\theta) \\ \frac{(s_{11} - s_{22}) \sin(4\theta)}{2} - s_{21} \cos(4\theta) & s_{11} \sin^2(2\theta) - s_{21} \sin(4\theta) + s_{22} \cos^2(2\theta) \end{vmatrix} E_{\text{in}}, \quad (14)$$

при условии $s_{21} = s_{12}$. Процедуру расчета поляризационной близости излученных и рассеянных сигналов проиллюстрируем применительно к двухгранному уголкового отражателю, матрица рассеяния которого имеет вид [7]:

$$S = \begin{vmatrix} \cos(2\theta) & -\sin(2\theta) \\ -\sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{vmatrix}, \quad (15)$$

где 2θ – угол между плоскостью поляризации излучаемого сигнала и ребром отражателя, ориентированным по вертикали. Подставляя (15) в (14), получим

$$E_{\text{out}} = \begin{vmatrix} \cos(6\theta) & \sin(6\theta) \\ \sin(6\theta) & -\cos(6\theta) \end{vmatrix} E_{\text{in}}. \quad (16)$$

Для нахождения вектора Стокса рассеянной волны, воспользуемся соотношениями, связывающие элементы матрицы рассеяния S радиолокационной цели с ее же матрицей Кено K [10]:

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{1}{2} (|s_{11}|^2 + 2|s_{21}|^2 + |s_{22}|^2), \quad k_{12} = k_{21} = \frac{1}{2} (|s_{11}|^2 - |s_{22}|^2), \\ k_{13} = k_{31} &= \text{Re } s_{21} s_{11}^* + \text{Re } s_{22} s_{21}^*, \quad k_{14} = k_{41} = \text{Im } s_{11} s_{21}^* + \text{Im } s_{21} s_{22}^*, \\ k_{22} &= \frac{1}{2} (|s_{11}|^2 - 2|s_{21}|^2 + |s_{22}|^2), \quad k_{23} = k_{32} = \text{Re } s_{21} s_{11}^* - \text{Re } s_{22} s_{21}^*, \\ k_{24} = k_{42} &= \text{Im } s_{11} s_{21}^* - \text{Im } s_{21} s_{22}^*, \quad k_{33} = \text{Re } s_{22} s_{11}^* + |s_{21}|^2, \\ k_{34} = k_{43} &= \text{Im } s_{11} s_{22}^*, \quad k_{44} = |s_{21}|^2 - \text{Re } s_{22} s_{11}^*. \end{aligned} \quad (17)$$

Вектор Стокса радиоволны, рассеянной двухгранным уголкового отражателем, с учетом (17) будет равен:

$$St_{out} = K \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_{11} + k_{12} \\ k_{21} + k_{22} \\ k_{31} + k_{32} \\ k_{41} + k_{42} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} |s_{11}|^2 + |s_{12}|^2 \\ |s_{11}|^2 - |s_{12}|^2 \\ 2 \operatorname{Re} s_{21} s_{11}^* \\ 2 \operatorname{Im} s_{11} s_{21}^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ \cos(12\theta) \\ \sin(12\theta) \\ 0 \end{vmatrix}, \quad (18)$$

Используя (6), (10) и (18), найдем поляризационную близость поляризационно-модулированных излученных и рассеянных сигналов:

$$N = 0.5(1 \cdot 1 + \cos(4\theta) \cdot \cos(12\theta) + \sin(4\theta) \cdot \sin(12\theta)) = 0.5 + 0.5 \cos(8\theta). \quad (19)$$

На рис. 2 приведена зависимость поляризационной близости $N(\theta)$ излучаемых и рассеянных сигналов в зависимости от угла наклона фазовой полуволновой пластины, свидетельствующая о принимаемых значениях 1 (единица) при облучении двухгранного уголкового отражателя волнами линейной вертикальной и горизонтальной поляризации и значений 0 (нуль) при облучении волнами линейной поляризации с углом наклона плоскости поляризации $\phi = 2\theta = 45^\circ + 90^\circ m$, где $m = 0, 1, 2, \dots$

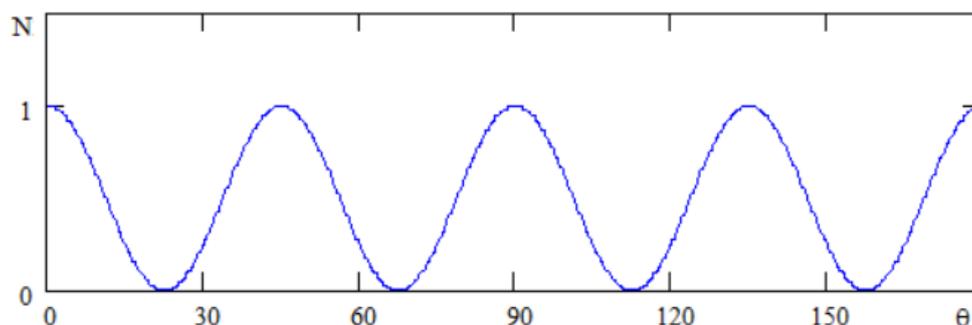


Рис. 2. Зависимость поляризационной близости излученных и рассеянных сигналов от угла наклона (в градусах) фазовой полуволновой пластины.

3. Моделирование поляризационной близости радиоволн, рассеянных стабильными радиолокационными целями

На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования поляризационной близости $N(\theta)$ и уровня сигнала $E(\theta)$ на выходе логарифмического приемника РЛС, полученные с использованием соотношений (2)-(5) для различных радиолокационных целей при использовании полуволновой ($\lambda/2$) и

четвертьволновой ($\lambda/4$) фазовых пластин, задающих при вращении вид поляризационной модуляции зондирующих волн (рис. 1).

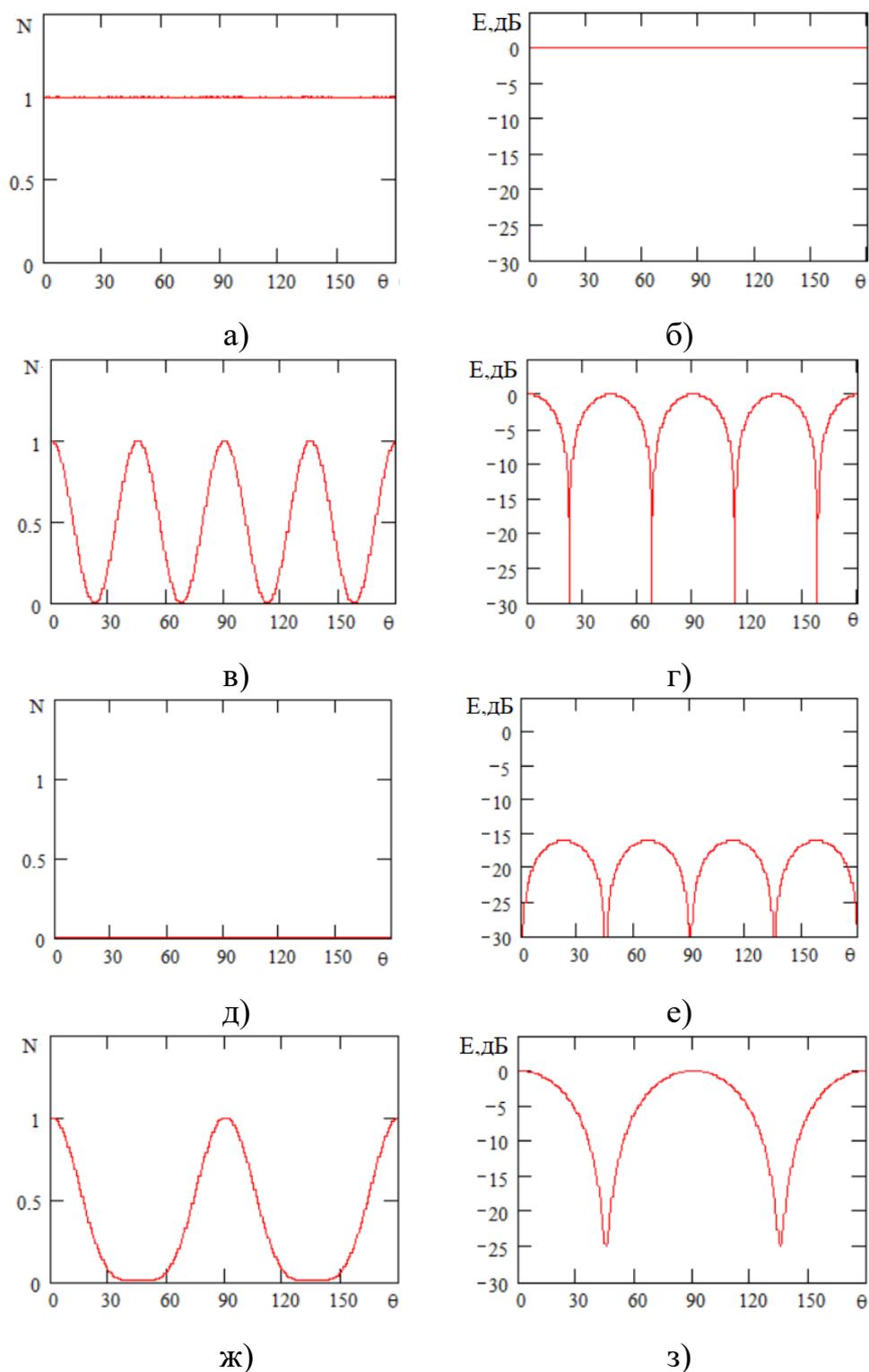
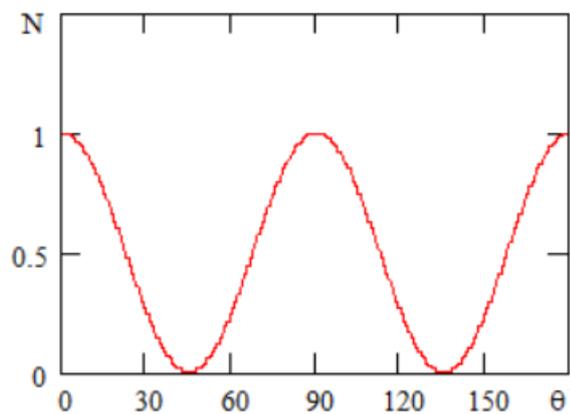
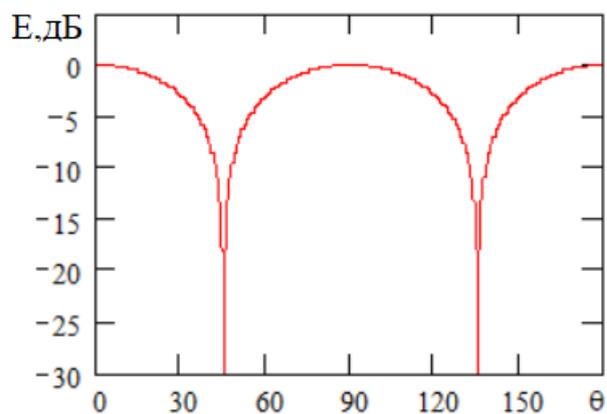


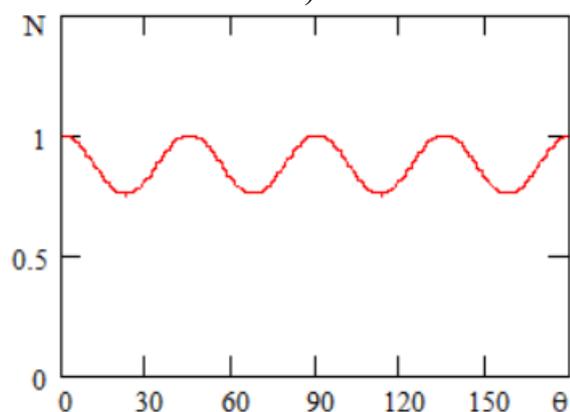
Рис. 3. Зависимости поляризационной близости и уровня принятого сигнала от угла ориентации (в градусах) $\lambda/2$ -фазовой пластины:
 а), б) – трехгранный уголковый отражатель,
 в), г) – двухгранный уголковый отражатель,
 д), е) – невзаимный объект с коэффициентом невзаимности 0.99,
 ж), з) – линейный вибратор.



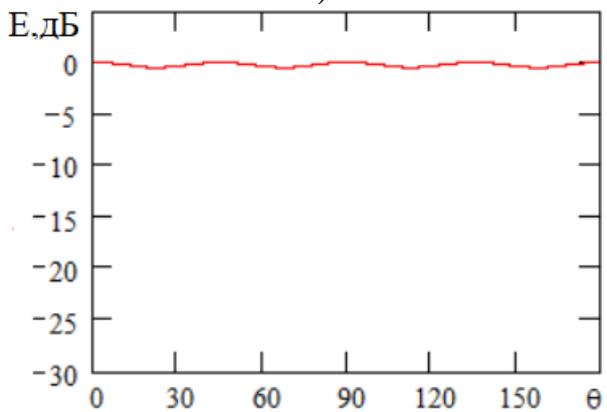
а)



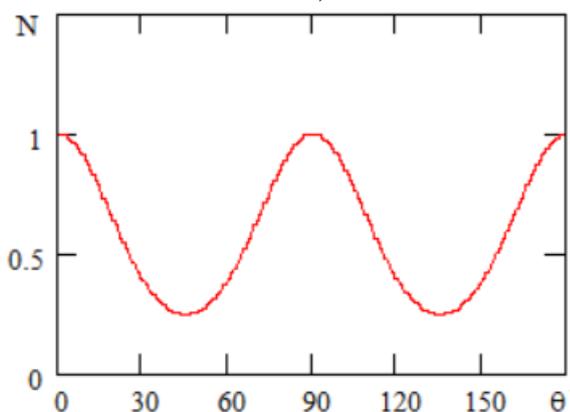
б)



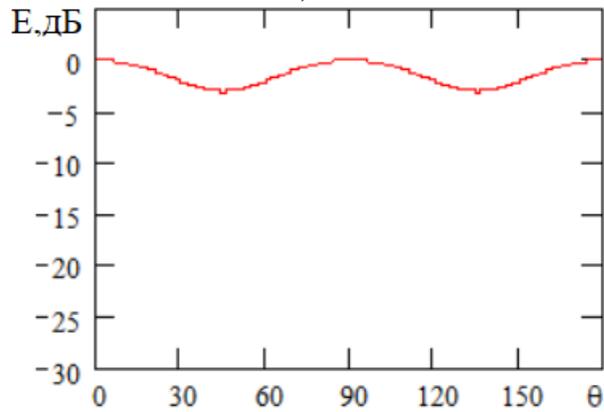
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Зависимости поляризационной близости и уровня принятого сигнала от угла ориентации (в градусах) $\lambda/4$ -фазовой пластины:
 а), б) – трехгранный уголкового отражатель,
 в), г) – двухгранный уголкового отражатель,
 д), е) – линейный вибратор.

Результаты моделирования свидетельствуют, что поляризационная близость излученных и рассеянных волн зависит от вида поляризационной модуляции и характеристик радиолокационной цели и дополняет измерения глубины модуляции уровня принятого сигнала.

В тех случаях, когда поляризационный контраст не позволяет уверенно обнаружить радиолокационную цель на фоне помех, может потребоваться более сложный вид поляризационной модуляции и длительное время наблюдения. Представляет интерес реализация поляризационной модуляции зондирующих волн последовательно соединенными и вращающимися с разной угловой скоростью $\lambda/2$ - и $\lambda/4$ -фазовыми пластинами. Такое сочетание позволяет реализовать режим полного поляризационного сканирования (ППС) радиолокационной цели (рис.5).

На рис. 6 приведены результаты моделирования поляризационной близости $N(\theta)$ и уровня принятого одноканальной РЛС сигнала $E(\theta)$, полученные в режиме ППС двухвibratorной цели с различием длин vibratorов в -3 дБ и углом эллиптичности 90° .

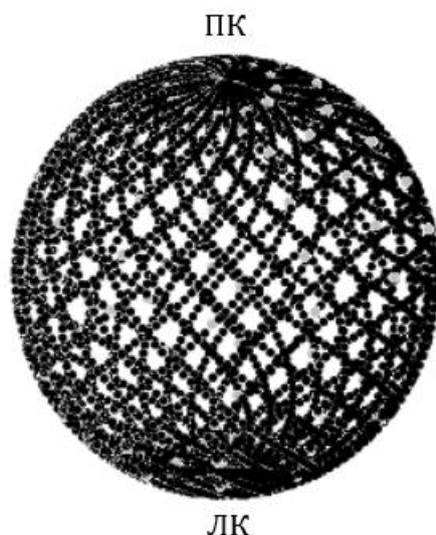


Рис. 5. Поляризационная модуляция зондирующих сигналов на основе вращающихся полуволновой и четвертьволновой фазовых пластин.

Для надежного обнаружения малоконтрастной радиолокационной цели, необходимо получить как можно больший диапазон изменений $N(\theta)$ и $E(\theta)$, что достигается выбором угловой скорости вращения фазовых пластин, при этом

скорость вращения $\lambda/4$ -пластины должна быть в 10-20 раз больше скорости вращения $\lambda/2$ -фазовой пластины. На рис.6 наибольший диапазон изменений значений поляризационной близости соответствует $\theta = 45^\circ$ и 135° , а наибольший диапазон изменений уровня принятого сигнала соответствует значениям $\theta = 18^\circ, 73^\circ, 107^\circ, 133^\circ$.

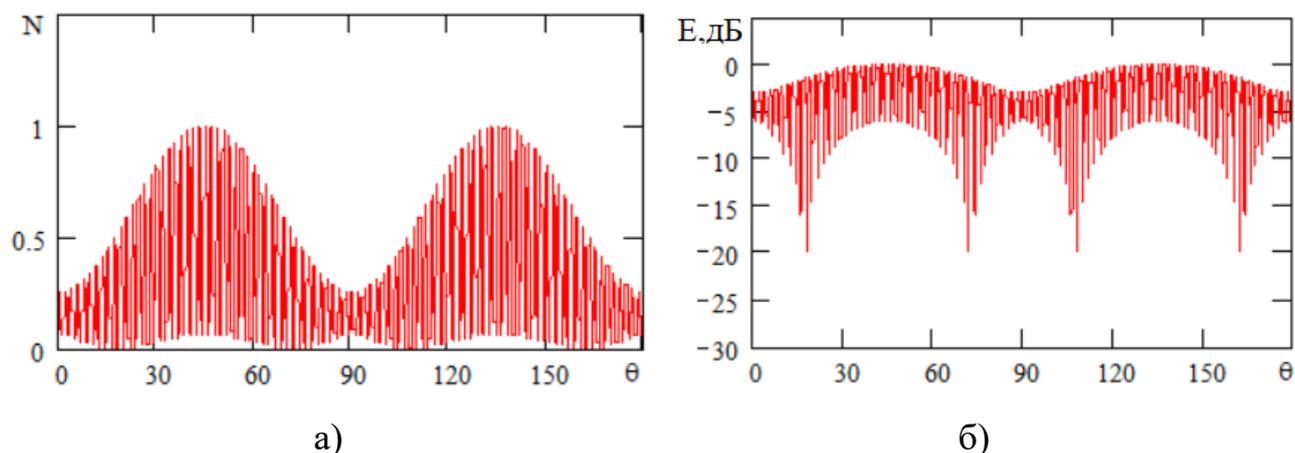


Рис. 6. Зависимость поляризационной близости (а) и уровня принятого сигнала (б) от угла ориентации (в градусах) $\lambda/2$ -фазовой пластины в режиме ППС двухвibratorной цели.

Заключение

Измерения поляризационной близости излученных и рассеянных радиоволн дополняют измерения глубины модуляции уровня рассеянных сигналов и позволяют проводить различие радиолокационных целей по их поляризационным свойствам.

Облучение трехгранного уголкового отражателя линейно-поляризованными модулированными сигналами приводит к постоянным значениям N и E (дБ) (рис. 3а, б), в то время как поляризационная модуляция $\lambda/4$ -фазовой пластиной приводит к значениям $0 \leq N \leq 1$ и глубине модуляции принятого сигнала $-30 \text{ дБ} < E \leq 0 \text{ дБ}$ (рис. 4а, б). Диапазон изменений N и E при облучении двухгранного уголкового отражателя поляризационно-модулированными волнами меньше в случае модуляции $\lambda/4$ -фазовой пластины (рис. 4в, г) в сравнении с модуляцией $\lambda/2$ -фазовой пластиной (рис. 3.3в, г). Облучение невзаимного объекта поляризационно-модулированными волнами

приводит к близким к нулю значениям N , а уровень рассеянного сигнала E оказывается ослаблен и не превышает -15 дБ (рис. 3.3д, е) от уровня сигналов, формируемых при рассеянии поляризационно-изотропным объектом (таким, как трехгранным уголковым отражателем). Диапазон изменений N и E , формируемый при рассеянии линейным вибратором, больше в случае поляризационной модуляции волн $\lambda/2$ -фазовой пластиной (рис. 3.3ж, з) в сравнении с модуляцией $\lambda/4$ -фазовой пластиной (рис. 3.4д, е).

Режим полного поляризационного сканирования потенциально позволяет получить как можно больший диапазон изменений поляризационной близости и глубины поляризационной модуляции рассеянных сигналов, что может использоваться для обнаружения малоконтрастных радиолокационных целей.

Литература

1. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополев А.П. Поляризационная модуляция. – Советское радио, 1974.
2. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – Советское радио, 1966.
3. Shoshin E.L. Methods for measuring the polarization characteristics of radar targets using polarized radio waves // Journal of Communications Technology and Electronics. 2022. Vol. 67. № 9. PP. 1096-1104.
4. Кауль Б.В., Самохвалов И. В. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений // Томск: Изд-во СО РАН. – 1997. – С. 295.
5. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – 1981.
6. Татаринов В.Н., Татаринов С.В., Лигтхарт Л.П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. – 2012.
7. О'нейл Э. Введение в статистическую оптику. – Мир, 1966.

8. Потехин В.А., Татаринов В.Н. Теория когерентности электромагнитного поля. – 1978.
9. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Книга 2. Радиолокационная поляриметрия. – 2007.

Для цитирования:

Шошин Е.Л. Формирование и обработка радиолокационных сигналов с учетом поляризационной близости. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.11>