

## Оценка анизотропных свойств метеобразований на основе использования кругового деполаризационного отношения

*Е.В. Масалов, А.С. Рудометова, Н.Н. Кривин*

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия)

## Estimation of the Hydrometeors' Anisotropic Properties Based on the Use of Circular Depolarization Ratio

*E.V. Masalov, A.S. Rudometova, N.N. Krivin*

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russia)

Рассматриваются вопросы, связанные с возможностью оценки анизотропных свойств метеобразований и их последующей интерпретацией на основе использования кругового деполаризационного отношения. С учетом того, что к числу факторов, ограничивающих эффективность метода кругового деполаризационного отношения, относится его выраженная зависимость от дифференциального фазового сдвига, вносимого средой распространения между ортогональными компонентами электромагнитной волны, проводится определение погрешности в оценке кругового деполаризационного отношения, возникающей при наличии дополнительного фазового сдвига между ортогональными компонентами. Особое внимание уделяется оценке изменчивости разности фаз сигналов, принятых с круговыми поляризациями правого и левого направлений вращения. Приводятся результаты расчетов. Полученные результаты анализируются. Иллюстрируется, в частности, применимость процедуры оценки разности фаз сигналов для осуществления идентификации зондируемых метеобразований в неоднозначных ситуациях. Показано, что появление фазового сдвига, вносимого метеобъектом, приводит к существенному отличию величины измеряемого кругового деполаризационного отношения от истинного значения степени поляризационной анизотропии зондируемых метеобразований.

**Ключевые слова:** поляризация, круговое деполаризационное отношение, степень поляризационной анизотропии, электрический фактор формы.

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-08

**Введение.** Постановка задачи. Использование сигналов круговой поляризации при дистанционном зондировании метеобразований основано на том фак-

In the paper, a question about an estimation possibility of the hydrometeors' anisotropic properties by using of circle depolarization ratio is considered and discussed. It is known that the factors limiting the efficiency of the circular depolarization ratio method include the pronounced dependence of the method upon the differential phase shift. The last one is introduced by a propagation medium between orthogonal components of electromagnetic wave. On this basis, a determination of the circular depolarization ratio estimation error is carried out. Such an error appears with an additional phase shift between orthogonal components of an electromagnetic wave. When receiving signals with circular polarization states of the right and left rotation direction, a special attention is given to the evaluation of its phase difference variability. Also, an interpretation of given results stands apart as another important question to discuss. The calculation data are presented and analyzed. In particular, an applicability of the signals' phase difference estimation procedure is illustrated. It is needed for an implementation of probed meteorological formations identification in case of ambiguous situations. It is found that appearance of the phase shift, introduced by the propagation medium, leads to a significant distinction between the measured circular depolarization ratio value and the polarization anisotropy true value of the probed meteorological formations.

**Key words:** polarization, circular depolarization ratio, measure of polarization anisotropy, electrical form factor.

те, что чем больше форма капель дождя отличается от сферической, что наблюдается при росте интенсивности дождя, тем больше поляризация отраженного

сигнала будет отличаться от круговой, трансформируясь в эллиптическую [1, с. 1076–1080]. Указанные обстоятельства являются предпосылкой к использованию для отображения и интерпретации результатов измерений так называемого кругового деполаризационного отношения  $Z_{CDR}$  [2, с. 47–51], которое, как указано в работах [3, с. 1–4; 4, с. 4212–4213; 5, с. 628–629, 637], почти не зависит от ориентации гидрометеоров и менее подвержено влиянию сторонних шумов. Однако существенным недостатком  $Z_{CDR}$  является его сильная зависимость от эффектов распространения электромагнитной волны, в частности, от дифференциального фазового сдвига, вносимого между ее ортогональными компонентами. Работы [5–8] посвящены оценке анизотропных свойств гидрометеоров для разных условий наблюдения, а также сравнению эффективности разных поляризметрических методов. В частности, результаты работы [8, с. 5] свидетельствуют о существовании связи между круговым деполаризационным отношением и максимальным диаметром одиночной капли дождя, а также интенсивностью осадков.

Поскольку одним из основных методов описания свойств, отвечающих за преобразование поляризации сигналов метеообъектами, является их матрица рассеяния (в частности, степень поляризационной анизотропии  $\mu$ ), то имеет место необходимость определения зависимости  $Z_{CDR}$  от параметра  $\mu$  и других характеристик, к числу которых следует отнести прежде всего фазовый сдвиг между ортогональными составляющими электромагнитной волны и электрический фактор формы. Особое внимание следует уделить оценке погрешности в определении анизотропных свойств метеообразований, возникающих под воздействием указанных выше факторов.

**1. Методика решения.** Зондируемый метеообъем характеризует его матрица рассеяния, которая может быть записана следующим образом [9, с. 322]:

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + 0,5(\lambda_1 - \lambda_2) \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$$

и преобразована к виду:

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \right),$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  — собственные числа матрицы рассеяния [9, с. 322; 10, с. 506];

$\theta$  — угол ориентации собственного базиса метеообъекта относительно измерительного;  $\mu = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) = (1 - \rho) / (1 + \rho)$  — степень поляризационной анизотропии метеообъекта;  $\rho = \lambda_2 / \lambda_1$ , где  $\lambda_1 \geq \lambda_2$ .

Рассмотрим случай, когда зондируемый метеообъект облучается круговой поляризацией одного направления вращения (например, правой), а принимаются

сигналы как с той же круговой поляризацией  $\dot{E}_{RR}$ , так и с противоположным направлением вращения  $\dot{E}_{RL}$ .

Тогда получим:

$$\dot{E}_{RR} = \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \times \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = (\lambda_1 - \lambda_2) e^{-j2\theta} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{RL} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \times \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (2)$$

Определив амплитуды принимаемых сигналов в указанных выше случаях (т.е. найдя модули  $|\dot{E}_{RR}|$  и  $|\dot{E}_{RL}|$  в (1) и (2)), найдем величину кругового деполаризационного отношения в следующем виде:

$$Z_{CDR} = |\dot{E}_{RR}| / |\dot{E}_{RL}| = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2) = \mu \quad (3)$$

Указанная в формуле (3) оценка степени анизотропии будет адекватной в случае, когда осуществляется зондирование переднего фронта метеообразования. По мере распространения радиолокационного сигнала к периферии метеообразования представляет интерес и тот случай, когда зондируемый метеообъем вносит дополнительный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между ортогональными компонентами облучающего сигнала, например, за счет экспериментально установленного наличия дифференциального фазового сдвига между ортогональными компонентами [11, с. 230–233; 12, с. 30–31]. В этом случае матрица рассеяния может быть записана с учетом результатов работы [9, с. 322] в следующем виде:

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2 e^{j\Delta\varphi}) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + 0,5(\lambda_1 - \lambda_2 e^{j\Delta\varphi}) \cdot \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}$$

В этом случае, осуществляя операции, аналогичные описанным ранее, получим следующие выражения для комплексных амплитуд принимаемых сигналов:

$$\dot{E}_{RR} = \dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2 = \sqrt{\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2 \cos \Delta\varphi + \lambda_2^2} \cdot e^{j\delta_1};$$

$$\dot{E}_{RL} = \dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 = \sqrt{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\lambda_2 \cos \Delta\varphi + \lambda_2^2} \cdot e^{j\delta_2},$$

где

$$\delta_1 = \arctg \left( -\frac{\lambda_2 \sin \Delta\varphi}{\lambda_1 - \lambda_2 \cos \Delta\varphi} \right) - 2\theta, \quad (4)$$

$$\delta_2 = \arctg\left(\frac{\lambda_2 \sin \Delta\varphi}{\lambda_1 + \lambda_2 \cos \Delta\varphi}\right) - 2\theta. \quad (5)$$

Тогда поляризационное отношение будет иметь вид

$$\frac{\dot{E}_{RR}}{\dot{E}_{RL}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{\sqrt{\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2 \cos \Delta\varphi + \lambda_2^2}}{\sqrt{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\lambda_2 \cos \Delta\varphi + \lambda_2^2}} \cdot e^{j(\delta_1 - \delta_2)}. \quad (6)$$

Вынесем в выражении (6) величину  $\lambda_1^2$  и в числителе, и в знаменателе. Тогда, учитывая, что  $\rho = \lambda_2/\lambda_1$ , запишем выражение для модуля кругового деполаризационного отношения (6) в следующем виде:

$$Z_{CDR} = \frac{|\dot{E}_{RR}|}{|\dot{E}_{RL}|} = \frac{\sqrt{1 - 2\rho \cos \Delta\varphi + \rho^2}}{\sqrt{1 + 2\rho \cos \Delta\varphi + \rho^2}}. \quad (7)$$

## 2. Анализ полученных результатов.

Использование параметра электрического фактора формы  $\rho$  в данном случае представляется целесообразным, поскольку существует однозначная практически линейная связь между электрическим фактором  $\rho$  и геометрическим фактором  $\rho_T = b/a$  [10, с. 508–509]. Здесь  $b$  — малая полуось;  $a$  — большая полуось эллипсоида вращения, которым аппроксимируется форма дождевой капли. Геометрический фактор  $\rho_T$  практически линейно связан с эквивалентным диаметром капли. На основе указанных соотношений определим степень адекватности использования  $Z_{CDR}$  для оценки анизотропных свойств в рассматриваемом случае. Зависимость величины  $Z_{CDR}$  от параметра электрического фактора  $\rho$  при различных фиксированных значениях фазового сдвига  $\Delta\varphi$  представлены на рисунке 1.

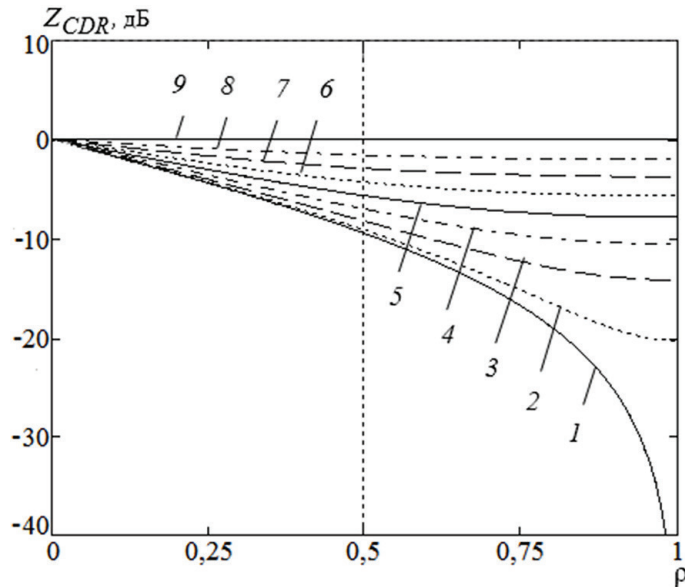


Рис. 1. Зависимость величины  $Z_{CDR}$  от параметра электрического фактора  $\rho$  при различных фиксированных значениях фазового сдвига  $\Delta\varphi$ : 1 —  $0^\circ$ ; 2 —  $11,25^\circ$ ; 3 —  $22,5^\circ$ ; 4 —  $33,75^\circ$ ; 5 —  $45^\circ$ ; 6 —  $55,25^\circ$ ; 7 —  $67,5^\circ$ ; 8 —  $78,75^\circ$ ; 9 —  $90^\circ$

Физически существующие размеры капель обуславливают изменение степени анизотропии  $\mu$  от 0 до 0,33. Для электрического фактора формы этот диапазон соответствует значениям  $\rho$  от 0,5 до 1. (Значению 0,5 соответствует пунктирная прямая, проведенная для удобства читателя перпендикулярно оси абсцисс). Из рисунка 1 видно, что адекватная оценка анизотропных свойств метеобъекта имеет место только в случае, когда  $\Delta\varphi = 0^\circ$ . По мере увеличения  $\Delta\varphi$  между ортогональными компонентами наблюдается уменьшение (по модулю) величины  $Z_{CDR}$  в децибелах (дБ). В крайнем случае, когда  $\Delta\varphi = 90^\circ$ , отношение  $Z_{CDR}$  от величины  $\rho$  не зависит (кривая 9).

Расчет величины погрешности в дБ, обусловленной фазовым сдвигом  $\Delta\varphi$ , можно провести по формуле

$$\Delta Z_{CDR} = Z_{CDR}(\Delta\varphi = 0) - Z_{CDR}^*(\Delta\varphi). \quad (8)$$

Графики зависимостей величины погрешности  $\Delta Z_{CDR}$  от фазового сдвига  $\Delta\varphi$  при определенных значениях электрического фактора формы  $\rho$  представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, наблюдается увеличение погрешности в оценке анизотропных свойств метеобразований при увеличении электрического фактора формы. При  $\Delta\varphi = 90^\circ$  и  $\rho = 0,83$  величина  $\Delta Z_{CDR}$  достигает максимального значения, равного 20 дБ.

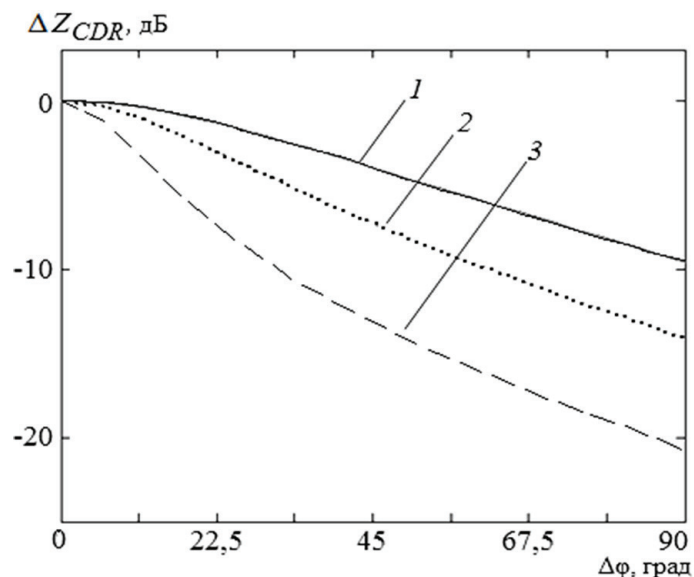


Рис. 2. Зависимость оценки погрешности кругового деполаризационного отношения  $\Delta Z_{CDR}$  от фазового сдвига  $\Delta\phi$  при  $\rho = \text{const}$ :  $\rho = 0,5$  (1);  $\rho = 0,67$  (2);  $\rho = 0,83$  (3)

В связи с этим представляет интерес оценка изменчивости величины  $\delta = \delta_1 - \delta_2$  в зависимости от электрического фактора формы  $\rho$  при различных значениях фазового сдвига  $\Delta\phi$ . После нормировки числителя и знаменателя аргументов арктангенсов к  $\lambda_1^2$  в (4) и (5) получим следующие выражения:

$$\delta_1 = \arctg\left(\frac{\rho \sin \Delta\phi}{1 - \rho \cos \Delta\phi}\right) - 2\theta; \quad (9)$$

$$\delta_2 = \arctg\left(\frac{\rho \sin \Delta\phi}{1 + \rho \cos \Delta\phi}\right) - 2\theta. \quad (10)$$

Используя известные из тригонометрии формулы для разности функций арктангенсов, получим выражение

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = \arctg\left(\frac{2\rho \sin \Delta\phi}{\rho^2 - 1}\right). \quad (11)$$

Откуда следует, что при  $\Delta\phi = 90^\circ$ ,

$$\delta = \arctg\left(\frac{2\rho}{\rho^2 - 1}\right). \quad (12)$$

С учетом формул (11) и (12) были выполнены расчеты, результаты которых приведены на рисунке 3. (Значению  $\rho = 0,5$  соответствует пунктирная прямая, проведенная для удобства читателя перпендикулярно оси абсцисс).

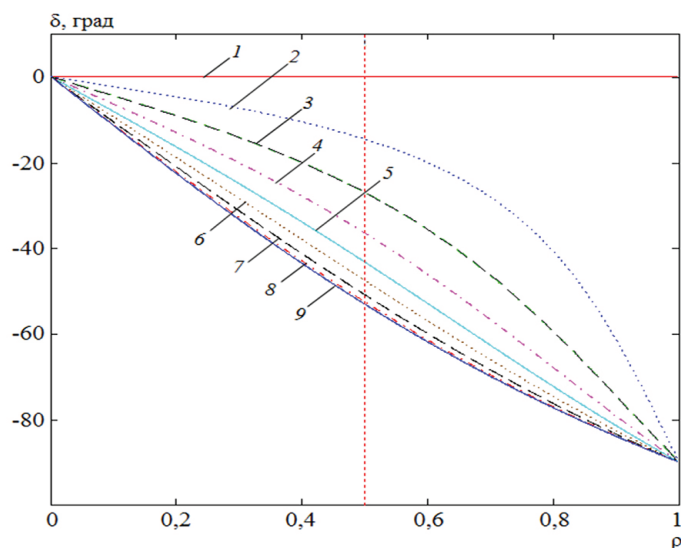


Рис. 3. Зависимость величины разности фаз  $\delta$  от параметра электрического фактора  $\rho$  при различных фиксированных значениях  $\Delta\phi$ : 1 —  $0^\circ$ ; 2 —  $11,25^\circ$ ; 3 —  $22,5^\circ$ ; 4 —  $33,75^\circ$ ; 5 —  $45^\circ$ ; 6 —  $56,25^\circ$ ; 7 —  $67,5^\circ$ ; 8 —  $78,75^\circ$ ; 9 —  $90^\circ$

Поскольку, как указывалось выше, величина  $Z_{CDR}$  при  $\Delta\varphi=90^\circ$  будет равна 1 независимо от истинных значений  $\rho$  зондируемого участка метеообразования, то осуществление процедуры оценки фазы  $\delta$  позволяет провести идентификацию зондируемого метеообразования в терминах параметра  $\rho$  и при  $\Delta\varphi=90^\circ$

**Заключение.** Таким образом, появление фазового сдвига  $\Delta\varphi$ , вносимого метеообъектом, приводит к существенному отличию  $Z_{CDR}$  от истинного значения

$\mu$ , которое будет составлять примерно 20 дБ при  $\rho=1$  и порядка 10 дБ при  $\rho = 0,5$ .

С учетом полученных результатов реализация процедуры измерения разности фаз  $\delta$  является, несомненно, целесообразной и представляет, безусловно, важную информационную составляющую. Полученное обстоятельство требует учета при построении алгоритмов дистанционного зондирования указанного типа.

## Библиографический список

1. Al-Jumily J. K., Charlton R. B., Humphries R. G. Identification of rain and hail with circular polarization radar // *Journal of Applied Meteorology*. — 1991. — Vol. 30.
2. Масалов Е.В., Татаринов В.Н. Поляризационные измерения в задачах радиолокационной метеорологии // *Зарубежная радиоэлектроника*. — 1987. — №4.
3. Ryzhkov A., Zhang P., Cao Q., Matrosov S., Melnikov V., Knight M. Measurements of circular depolarization ratio with the radar with simultaneous transmission/reception // ERAD 2014 — The Eighth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. — 2014. [Electronic resource]. URL: [http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/232\\_Ryzhkov.pdf](http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/232_Ryzhkov.pdf) (дата обращения: 18.01.2017).
4. Nicolet M., Schnaiter M., Stetzer O. Circular depolarization ratios of single water droplets and finite ice circular cylinders: a modeling study // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2012. — Vol. 12.
5. Galletti M., Huang D., Kollias P. Zenith/Nadir Pointing mm-Wave Radars: Linear or Circular Polarization? // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. — 2014. — Vol. 52, № 1.
6. Jameson A.R., Dave J.H. An interpretation of circular polarization measurements affected by propagation differential phase shift // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. — 1988. — Vol. 5.
7. Torlaschi E., Holt A.R. A comparison of different polarization schemes for the radar sensing of precipitation // *Radio Science*. — 1998. — Vol. 33, №5.
8. Galletti M., Huang D., Kollias P., Giangrande S.E. Towards a CDR-based Rain Rate Estimation Algorithm for Zenith-pointing Cloud Radars at Ka band // ERAD 2012 — The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. — 2012. [Electronic resource]. URL: [http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended\\_abs/CR\\_100\\_ext\\_abs.pdf](http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/CR_100_ext_abs.pdf) (дата обращения: 25.01.2017).
9. Татаринов В.Н., Лигтхарт Л.П., Татаринов С.В. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования : учебное пособие. — Томск, 2012. — Т. 1.
10. Бадулин Н.Н., Бацула А.П., Кульшенева Е.Б., Лукьянов С.П., Масалов Е.В., Татаринов В.Н. Экспериментальные исследования анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. — 1984. — Т. 20, №6.
11. Kumjian M.R. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part 1: Description of the polarimetric radar variables // *Journal of Operational Meteorology*. — 2013. — Vol. 1(19).
12. Масалов Е.В., Ещенко С.Ю. Влияние дифференциальных факторов среды распространения на поляризационные характеристики электромагнитной волны // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2012. — Т. 55, №3.