

УДК 621.396.96

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

## Особенности использования кругового деполаризационного отношения при дистанционном зондировании метеообразований

В работе рассматриваются вопросы, связанные с возможностью оценки анизотропных свойств метеообразований и их последующей интерпретацией на основе использования кругового деполаризационного отношения. Приводятся результаты расчетов. Полученные результаты анализируются.

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

**doi:** 10.21293/1818-0442-2017-20-2-33-35

Использование сигналов круговой поляризации при дистанционном зондировании метеообразований основано на том факте, что чем больше форма капля дождя отличается от сферической (что наблюдается при росте интенсивности дождя), тем больше поляризация отраженного сигнала будет отличаться от круговой, трансформируясь в эллиптическую. Указанные обстоятельства являются предпосылкой к использованию для отображения и интерпретации так называемого кругового деполаризационного отношения  $Z_{CDR}$ . Вопросы, связанные с особенностями применения величины  $Z_{CDR}$  и ее практическим применением, рассмотрены в работе [1].

### Постановка задачи

Поскольку одним из основных методов описания свойств, отвечающих за преобразование поляризации 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 матрицы рассеяния зондируемого метеообъекта.

### Методика решения

Зондируемый метеообъем характеризует его матрица рассеяния, которая, с учетом результатов работы [2], может быть записана следующим образом:

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

и преобразована к виду

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

Поскольку, как указывается в работе [3], метеообразования представляют собой объемные цели, образованные независимыми рассеивателями, то в данном случае в качестве матрицы рассеяния (1) и (2) следует понимать предложенное в работах [3, 4] понятие совокупной матрицы рассеяния объемной метеоцели. В этом же качестве на основании того же подхода к рассматриваемому подходу [3, 4] следует рассматривать перечисленные ниже характеристики:  $\lambda_1, \lambda_2$  – собственные числа совокупной матрицы рассеяния объемной метеоцели (метеообъекта);  $\theta$  –

угол ориентации собственного базиса объемной метеоцели (метеообъекта) относительно измерительного;  $\mu = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$  – степень поляризационной

анизотропии метеоцели (метеообъекта);  $\rho = \lambda_2 / \lambda_1$  – электрический фактор формы объемной метеоцели (метеообъекта), где  $\lambda_1 \geq \lambda_2$  [3].

При использовании сигналов круговой поляризации в метеорологических радиолокаторах рассмотрим случай, когда зондируемый объемный метеообъект облучается волной с круговой поляризацией одного направления вращения (например, правой), а принимаются сигналы как с той же круговой поляризацией, так и с противоположным направлением вращения.

Оценим амплитуды ортогональных составляющих принимаемых сигналов в указанных выше случаях, используя следующие соотношения, с учетом выражений (1) и (2):

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

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

Определим модули этих выражений:

$$|\dot{E}_R| = E_R = \lambda_1 - \lambda_2; \quad |\dot{E}_L| = E_L = \lambda_1 + \lambda_2.$$

Тогда, поделив эти модули друг на друга, получим оценку степени поляризационной анизотропии в виде

$$\mu = \frac{E_R}{E_L} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}.$$

Указанная оценка степени анизотропии будет адекватной в случае, фазовый сдвиг  $\Delta\phi$ , вносимый между ортогональными компонентами волны, равен нулю ( $\Delta\phi = 0$ ), что имеет место, например, при зондировании переднего фронта метеообразования.

Однако представляет интерес случай, когда зондируемый метеообъем вносит непосредственный фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между ортогональными компонентами облучающего сигнала за счет экспериментально установленного наличия дифференциального фазового сдвига между ортогональными компонентами [6]. В этом случае совокупная матрица рассеяния объемной метеоцели может быть записана в виде

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2 e^{j\Delta\varphi}) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + 0,5(\lambda_1 - \lambda_2 e^{j\Delta\varphi}) \times \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда, осуществляя операции, аналогичные описанным ранее, получим следующие выражения для комплексных амплитуд ортогональных составляющих принимаемых сигналов:

$$\dot{E}_R = \dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2 = \sqrt{\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2 \cos\Delta\varphi + \lambda_2^2} e^{j\delta_1}; \quad (4)$$

$$\dot{E}_L = \dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 = \sqrt{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\lambda_2 \cos\Delta\varphi + \lambda_2^2} e^{j\delta_2}, \quad (5)$$

где

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

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

Тогда поляризационное отношение будет иметь вид [2]

$$\frac{\dot{E}_R}{\dot{E}_L} = \frac{\dot{\lambda}_1 - \dot{\lambda}_2}{\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2} = \frac{\sqrt{\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2 \cos\Delta\varphi + \lambda_2^2}}{\sqrt{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\lambda_2 \cos\Delta\varphi + \lambda_2^2}} e^{j(\delta_1 - \delta_2)}. \quad (6)$$

Вынесем из подкоренных выражений в числителе и знаменателе величину  $\lambda_1^2$ . Тогда, учитывая, что  $\rho = \lambda_2/\lambda_1$ , получим выражение для кругового деполаризационного отношения (6)

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

#### Анализ полученных результатов

Использование параметра электрического фактора  $\rho$  в данном случае представляется целесообразным, поскольку существует однозначная практически линейная связь между электрическим фактором и геометрическим  $\rho_r = b/a$  [3]. Здесь  $b$  – малая полуось,  $a$  – большая полуось эллипсоида вращения, которым аппроксимируется форма дождевой капли. Геометрический фактор  $\rho_r$  практически линейно связан с эквивалентным диаметром капли.

Графики зависимости величины  $Z_{CDR}$  от параметра электрического фактора  $\rho$  при различных фиксированных значениях фазового сдвига  $\Delta\varphi$  представлены на рис. 1.

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.

Из рис. 1 видно, что адекватная оценка анизотропных свойств объемного метеообъекта 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 дБ. В крайнем случае, когда  $\Delta\varphi = 90^\circ$ , отношение  $Z_{CDR}$  от величины  $\rho$  не зависит (кривая 9).

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

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

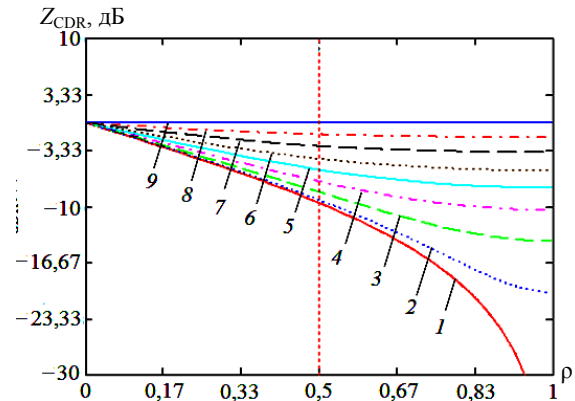


Рис. 1. Графики зависимости величины  $Z_{CDR}$  от параметра электрического фактора  $\rho$  при различных фиксированных значениях фазового сдвига  $\Delta\varphi$ : 1 –  $\Delta\varphi = 0^\circ$ ; 2 –  $\Delta\varphi = 11,25^\circ$ ; 3 –  $\Delta\varphi = 22,5^\circ$ ; 4 –  $\Delta\varphi = 33,75^\circ$ ; 5 –  $\Delta\varphi = 45^\circ$ ; 6 –  $\Delta\varphi = 56,25^\circ$ ; 7 –  $\Delta\varphi = 67,5^\circ$ ; 8 –  $\Delta\varphi = 78,75^\circ$ ; 9 –  $\Delta\varphi = 90^\circ$

Графики зависимостей величины погрешности  $Z_{CDR}$  от фазового сдвига  $\Delta\varphi$  при определенных значениях электрического фактора формы  $\rho$  представлены на рис. 2.

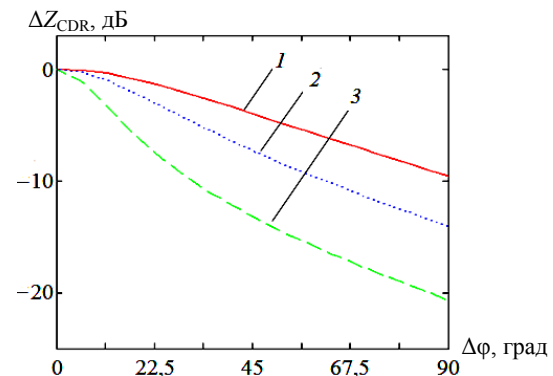


Рис. 2. Зависимость погрешности кругового деполаризационного отношения  $\Delta Z_{CDR}$  от фазового сдвига  $\Delta\varphi$  при  $\rho = \text{const}$ :  $\rho = 0,5$  (1);  $\rho = 0,67$  (2);  $\rho = 0,83$  (3)

Как видно из рис. 2, наблюдается увеличение погрешности в оценке анизотропных свойств метеообразований при увеличении электрического фактора формы. При  $\Delta\varphi = 90^\circ$  и  $\rho = 0,83$  величина  $\Delta Z_{CDR}$  достигает максимального значения, равного  $-20$  дБ.

### Заключение

Таким образом, появление фазового сдвига  $\Delta\varphi$ , вносимого объёмным метеорообъектом, приводит к существенному отличию  $Z_{CDR}$  от истинного значения, которое будет составлять примерно 20 дБ при  $\rho = 1$  и порядка 10 дБ при  $\rho = 0,5$ .

Полученное обстоятельство требует учета при построении поляризационных РЛС, использующих алгоритмы указанного типа.

### Литература

1. Масалов Е.В. Поляризационные измерения в задачах радиолокационной метеорологии / Е.В. Масалов, В.Н. Татаринов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 4. – С. 44–52.
2. Татаринов В.Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования: учеб. пособие / В.Н. Татаринов, Л.П. Лигтхарт, С.В. Татаринов. – Томск: ТУСУР, 2012. – Т. 1. – 380 с.
3. Экспериментальные исследования анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками / Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 505–510.
4. Дистанционное зондирование микрофизической структуры облаков с использованием поляризационной манипуляции / Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева и др. // Изв. вузов. Физика. – 1983. – № 6. – С. 219–227.
5. Масалов Е.В. Влияние ориентации собственного базиса метеорообъекта на точностные характеристики поляризационного радиолокатора / Е.В. Масалов, С.Ю. Ещенко // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 14–15.

6. Масалов Е.В. Влияние дифференциальных факторов среды распространения на поляризационные характеристики электромагнитной волны / Е.В. Масалов, С.Ю. Ещенко // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 28–33.

---

### Масалов Евгений Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) ТУСУРа  
Тел.: +7-913-846-42-13  
Эл. почта: e-v-masalov@yandex.ru

### Рудометова Анастасия Станиславовна

Студентка каф. КИПР ТУСУРа  
Тел.: +7-923-417-74-51  
Эл. почта: a.rudometova03@gmail.com

### Кривин Николай Николаевич

Канд. техн. наук, ст. преп. каф. КИПР  
Тел.: +7-913-882-91-87  
Эл. почта: freeman46@yandex.ru

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

### Features of the use of a circular depolarization ratio in remote sensing of meteorological formations

The paper deals with issues related to the possibility of estimating the anisotropic properties of meteorological formations and their subsequent interpretation based on the use of a circular depolarization ratio. The results of calculations are presented. The results are analyzed.

**Keywords:** circular polarization, circular depolarization ratio, degree of polarization anisotropy, electrical form factor.