

УДК 621.396.96

Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамарев

Точностные характеристики оценки модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости при дистанционном зондировании неоднородного метеообразования

Рассмотрены вопросы, связанные с определением погрешности величины модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости, возникающей при зондировании неоднородной среды, заполненной гидрометеорами, на поляризационные характеристики распространяющихся в ней электромагнитных волн. Предложен подход для определения тенденции изменчивости такой погрешности при различных значениях интенсивности осадков, значениях степени анизотропии метеообразования и углах ориентации собственного базиса удалённого анизотропного участка, а также углах ориентации измерительного поляризационного базиса. Получены оценки погрешности, позволяющие оценить области с занижением истинного значения оценки степени анизотропии метеообъекта.

Ключевые слова: поляризация, дифференциальное ослабление, дифференциальный фазовый сдвиг, степень поляризационной анизотропии, угол ориентации собственного базиса анизотропного участка, матрица рассеяния, модифицированная дифференциальная радиолокационная отражаемость, погрешность величины модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-19-25

Влияние однородной и неоднородной сред распространения на величину модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости (МДРО), возникающее при решении задач дистанционного зондирования метеообразований, было рассмотрено в работах [1, 2]. При этом, как показано в работах [2, 3], под однородной средой понимается участок, заполненный частицами метеообразований (каплями, частицами града), имеющими одинаковую ориентацию и размеры, а также находящимися в одном и том же фазовом состоянии. Под неоднородной следует понимать среду, состоящую из указанного выше однородного участка и следующего за ним второго участка, отличающегося анизотропными свойствами. Причинами появления таких участков являются грозовая активность и поперечный к трассе распространения ветровой сдвиг.

Постановка задачи

Для достоверной оценки МДРО удалённого анизотропного участка, расположенного на периферии от передней границы метеообразования, необходимо, прежде всего, определить воздействие однородной среды на поляризационную структуру радиолокационного сигнала, возникающее в процессе распространения до этого участка. Поэтому возникает потребность в оценке её влияния на МДРО с целью определения тенденции изменчивости величины погрешности. Это позволит в дальнейшем определить тенденцию изменчивости величины погрешности в оценке МДРО в точке расположения РЛС.

При этом, как показано в [4], в силу сложности процессов трансформации поляризационной структуры зондирующего сигнала, проходящего через среду гидрометеоров, особое значение приобретает интерпретация результатов измерений, а также точность, с которой они сделаны.

Методика решения

Согласно работам [1, 2], величина МДРО, $Z_{\text{МДРО}}$ может быть определена в виде

$$Z_{\text{МДРО}} = 20 \lg \left(\frac{|\dot{E}_R^{\text{IN}}|}{|\dot{E}_X^{\text{IN}}|} \right), \quad (1)$$

где \dot{E}_R^{IN} – комплексная амплитуда излучённого сигнала с круговой поляризацией (например, правого вращения) и принятого с той же круговой поляризацией, \dot{E}_X^{IN} – комплексная амплитуда излучённого сигнала с линейной горизонтальной и принятого с той же линейной горизонтальной поляризацией.

Исходя из модели, предложенной в работе [1], процесс распространения радиолокационного сигнала в однородной среде графически можно представить в виде рис. 1.

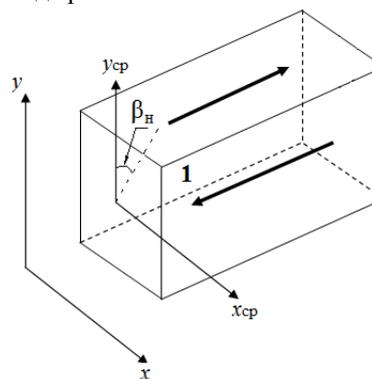


Рис. 1. Графическое изображение трассы распространения сигнала в однородном гидрометеорологическом образовании

На рис. 1 обозначено: 1 – однородный участок метеообразования с поляризационным базисом $(x_{\text{ср}}, y_{\text{ср}})$, (x, y) – измерительный поляризационный базис, $\beta_{\text{н}}$ – угол ориентации измерительного базиса относительно собственного базиса однородного участка.

Как известно из работ [5], факторами, определяющими поляризационную структуру рассеянного

сигнала для случая однородной среды, являются дифференциальное ослабление $\Delta\alpha$ (дБ/км) и дифференциальный фазовый сдвиг $\Delta\Phi$ (град/км). Они обуславливают изменения угла эллиптичности α и угла ориентации β эллипса поляризации для сигнала с круговой поляризацией по законам (2) и (3), а для сигнала с линейной поляризацией – (4) и (5):

$$\alpha_R(z) = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \sin \left(\Delta\Phi z + \frac{\pi}{2} \right)}{1 + 10^{0,1\Delta\alpha z}} \right), \quad (2)$$

$$\beta_R(z) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \cos \left(\Delta\Phi z + \frac{\pi}{2} \right)}{1 - 10^{0,1\Delta\alpha z}} \right) \pm \frac{\pi n}{2}, \quad (3)$$

$$\alpha_x(z, \beta_H) = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}(\beta_H) \sin(\Delta\Phi z)}{1 + 10^{0,1\Delta\alpha z} \operatorname{tg}^2(\beta_H)} \right), \quad (4)$$

$$\beta_x(z, \beta_H) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}(\beta_H) \cos \Delta\Phi z}{1 - 10^{0,1\Delta\alpha z} \operatorname{tg}^2(\beta_H)} \right) \pm \frac{\pi n}{2}, \quad (5)$$

где z – длина трассы распространения в однородном участке.

Однако в случае зондирования анизотропного участка среды, а также совокупности однородного и неоднородного участков величина МДРО определяется уже не только дифференциальными факторами среды распространения, но и степенью анизотропии μ и углом ориентации собственного базиса анизотропного участка θ .

Комплексные амплитуды принятых сигналов с круговой и линейной поляризациями для удалённого анизотропного участка будут определяться выражениями (6) и (7) соответственно:

$$\dot{E}_R^{\text{IN}} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\pi}{4}} \begin{vmatrix} 1 & j \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot [S] \cdot \begin{vmatrix} 1 \\ j \end{vmatrix} = \sqrt{2} \cdot \mu \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{4} + 2\theta\right)}, \quad (6)$$

$$\dot{E}_x^{\text{IN}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot [S] \cdot \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix} = 1 + \mu \cdot \cos(2\theta), \quad (7)$$

где $\begin{vmatrix} 1 \\ j \end{vmatrix}$, $\begin{vmatrix} 1 \\ 0 \end{vmatrix}$ – векторы Джонса сигналов, излучённых с круговой правой и линейной горизонтальной поляризацией соответственно, S – матрица рассеяния анизотропного участка [6]

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \left(\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} + \mu \begin{vmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{vmatrix} \right), \quad (8)$$

В выражении (8): $\mu = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2)$ – степень поляризационной анизотропии рассеивающего метеобъекта; λ_1 , λ_2 – собственные числа матрицы рассеяния, $\lambda_1 \geq \lambda_2$ [7–9].

Поскольку, как отмечено в [10], метеообразования являются объёмными целями, образованными независимыми рассеивателями, то матрицу рассея-

ния (8), степень анизотропии μ , собственные числа λ_1 , λ_2 и угол ориентации собственного базиса анизотропного участка θ следует понимать как совокупную матрицу рассеяния объёмной метеоцели и её характеристики $(\mu, \lambda_1, \lambda_2, \theta)$ соответственно.

Тогда выражение для определения МДРО анизотропного участка при отсутствии однородной среды, $Z_{\text{МДРО}}^*$, будет иметь вид (9):

$$Z_{\text{МДРО}}^* = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \mu}{1 + \mu \cdot \cos(2\theta)} \right). \quad (9)$$

Для случая неоднородной среды в виде совокупности однородного и неоднородного участков воспользуемся моделью, предложенной в [2]. Графически процесс распространения радиолокационного сигнала показан на рис. 2.

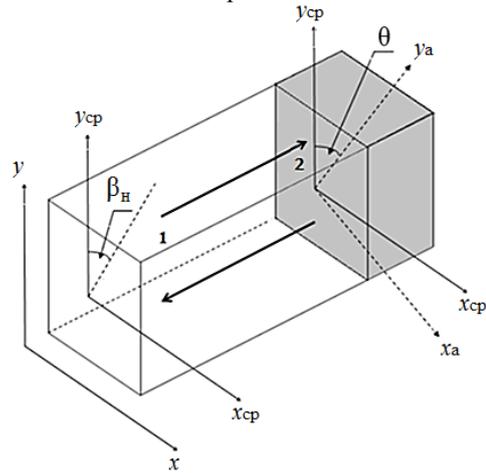


Рис. 2. Графическое изображение трассы распространения сигнала в неоднородном гидрометеорологическом образовании

На рис. 2 обозначено: 1 – однородный участок метеообразования с поляризационным базисом $(x_{\text{cp}}, y_{\text{cp}})$, 2 – анизотропный участок метеообразования с поляризационным базисом (x_a, y_a) , (x, y) – измерительный поляризационный базис, β_H – угол ориентации измерительного базиса относительно собственного базиса однородного участка, θ – угол ориентации собственного базиса анизотропного участка относительно базиса однородного участка.

В этом случае углы эллиптичности и ориентации эллипса поляризации имеют более сложные зависимости, отличающиеся от аналогичных законов, приведённых выше. Выражения, определяющие $\alpha_p(z)$ и $\beta_p(z)$, будут иметь вид [11]

– для случая сигнала с горизонтальной поляризацией:

$$\beta_{\text{xp}}(z) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A_1}{B_1} \right), \quad (10)$$

где

$$A_1 = 2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \operatorname{tg}(\gamma_{\text{xpH}}(z)) \cdot \cos(\varphi_{\text{xpH}}(z) + \Delta\Phi z), \quad (11)$$

$$B_1 = 1 - 10^{0,1\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2(\gamma_{\text{xpH}}(z)), \quad (12)$$

$$\alpha_{xp}(z) = \frac{1}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{C_1}{D_1}\right), \quad (13)$$

где

$$C_1 = 2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \operatorname{tg}(\gamma_{xp}(z)) \cdot \sin(\varphi_{xp}(z) + \Delta\Phi z), \quad (14)$$

$$D_1 = 1 + 10^{0,1\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2(\gamma_{xp}(z)); \quad (15)$$

– для случая сигнала с круговой правой поляризацией:

$$\beta_{Rp}(z) = \frac{1}{2} \cdot \arctg\left(\frac{A_2}{B_2}\right), \quad (16)$$

где

$$A_2 = 2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \operatorname{tg}(\gamma_{Rp}(z)) \cos(\varphi_{Rp}(z) + \Delta\Phi z), \quad (17)$$

$$B_2 = 1 - 10^{0,1\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2(\gamma_{Rp}(z)), \quad (18)$$

$$\alpha_{Rp}(z) = \frac{1}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{C_2}{D_2}\right), \quad (19)$$

где

$$C_2 = 2 \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \operatorname{tg}(\gamma_{Rp}(z)) \sin(\varphi_{Rp}(z) + \Delta\Phi z), \quad (20)$$

$$D_2 = 1 + 10^{0,1\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2(\gamma_{Rp}(z)), \quad (21)$$

где $\operatorname{tg}(\gamma_{xp}(z))$, $\operatorname{tg}(\gamma_{Rp}(z))$ – начальные значения модулей комплексных фазов волн, рассеянных анизотропным участком, в случаях, когда зондирование метеообразования осуществлялось волнами с линейной и круговой поляризациями соответственно; $\varphi_{xp}(z)$, $\varphi_{Rp}(z)$ – начальные значения фаз комплексных фазов волн, рассеянных анизотропным участком, в случаях, когда зондирование метеообразования осуществлялось волнами, указанными выше.

Начальные значения комплексных фазов $\operatorname{tg}(\gamma_{xp}(z))$ и $\operatorname{tg}(\gamma_{Rp}(z))$ можно определить с учётом матрицы рассеяния в виде (22)–(23) [12]:

$$\operatorname{tg}(\gamma_{xp}(z)) = \frac{S_{12} + S_{22}(\dot{E}_{y1x} / \dot{E}_{x1x})}{S_{11} + S_{12}(\dot{E}_{y1x} / \dot{E}_{x1x})} = \frac{|\dot{E}_{1x}(z)|}{|\dot{E}_{2x}(z)|}, \quad (22)$$

$$\operatorname{tg}(\gamma_{Rp}(z)) = \frac{S_{12} + S_{22}(\dot{E}_{y1R} / \dot{E}_{x1R})}{S_{11} + S_{12}(\dot{E}_{y1R} / \dot{E}_{x1R})} = \frac{|\dot{E}_{1R}(z)|}{|\dot{E}_{2R}(z)|}, \quad (23)$$

где S_{ij} ($i, j = 1, 2$) – элементы матрицы рассеяния; $|\dot{E}_{1x}(z)|$ и $|\dot{E}_{2x}(z)|$ – реальные амплитуды ортогональных компонент сигнала, отраженного анизотропным участком при начальной (излучаемой) линейной поляризации сигнала РЛС; $|\dot{E}_{1R}(z)|$ и $|\dot{E}_{2R}(z)|$ – реальные амплитуды ортогональных компонент сигнала, отраженного анизотропным участком при начальной (излучаемой) круговой поляризации сигнала РЛС; \dot{E}_{y1x} , \dot{E}_{x1x} и \dot{E}_{y1R} , \dot{E}_{x1R} – ортогональные компоненты сигналов с линейной горизонтальной и правой круговой поляризациями

соответственно, облучающих анизотропный участок, выраженные через тригонометрические функции углов эллиптичности $\alpha(z)$ и наклона эллипса поляризации $\beta(z)$, которые имеют вид [1]

$$\dot{E}_{y1x} = -\sin(\beta_x(z, \beta_H)) \cos(\alpha_x(z, \beta_H)) + j \cos(\beta_x(z, \beta_H)) \sin(\alpha_x(z, \beta_H)), \quad (24)$$

$$\dot{E}_{x1x} = \cos(\beta_x(z, \beta_H)) \cos(\alpha_x(z, \beta_H)) + j \sin(\beta_x(z, \beta_H)) \sin(\alpha_x(z, \beta_H)), \quad (25)$$

$$\dot{E}_{y1R} = -\sin(\beta_R(z)) \cos(\alpha_R(z)) + j \cos(\beta_R(z)) \sin(\alpha_R(z)), \quad (26)$$

$$\dot{E}_{x1R} = \cos(\beta_R(z)) \cos(\alpha_R(z)) + j \sin(\beta_R(z)) \sin(\alpha_R(z)). \quad (27)$$

Оценку трансформации поляризации сигнала, облучающего анизотропный участок, целесообразно проводить в собственном базисе однородного участка [2].

Для сигнала линейной поляризации выражения для $\gamma_{xp}(z)$ и $\varphi_{xp}(z)$ будут иметь вид (28) и (29) соответственно:

$$\gamma_{xp}(z) = \arctg \frac{|\dot{E}_{1x}(z)|}{|\dot{E}_{2x}(z)|}, \quad (28)$$

$$\varphi_{xp}(z) =$$

$$= \arctg \left[\frac{C_{\beta 1} S_{\alpha 1} + \mu S_{2\theta} S_{\beta 1} S_{\alpha 1} - \mu C_{2\theta} C_{\beta 1} S_{\alpha 1}}{-S_{\beta 1} C_{\alpha 1} + \mu S_{2\theta} C_{\beta 1} C_{\alpha 1} + \mu C_{2\theta} S_{\beta 1} C_{\alpha 1}} \right] - \arctg \left[\frac{S_{\beta 1} S_{\alpha 1} + \mu C_{2\theta} S_{\beta 1} S_{\alpha 1} + \mu S_{2\theta} C_{\beta 1} S_{\alpha 1}}{C_{\beta 1} C_{\alpha 1} + \mu C_{2\theta} C_{\beta 1} C_{\alpha 1} - \mu S_{2\theta} S_{\beta 1} C_{\alpha 1}} \right], \quad (29)$$

где

$$|\dot{E}_{1x}(z)| = \left[\left(-S_{\beta 1} C_{\alpha 1} + \mu S_{2\theta} C_{\beta 1} C_{\alpha 1} + \mu C_{2\theta} S_{\beta 1} C_{\alpha 1} \right)^2 + \left(C_{\beta 1} S_{\alpha 1} + \mu S_{2\theta} S_{\beta 1} S_{\alpha 1} - \mu C_{2\theta} C_{\beta 1} S_{\alpha 1} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (30)$$

$$|\dot{E}_{2x}(z)| = \left[\left(C_{\beta 1} C_{\alpha 1} + \mu C_{2\theta} C_{\beta 1} C_{\alpha 1} - \mu S_{2\theta} S_{\beta 1} C_{\alpha 1} \right)^2 + \left(S_{\beta 1} S_{\alpha 1} + \mu C_{2\theta} S_{\beta 1} S_{\alpha 1} + \mu S_{2\theta} C_{\beta 1} S_{\alpha 1} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (31)$$

В выражениях (29)–(31) использовались следующие обозначения: $S_{\beta 1} = \sin(\beta_{xp})$, $C_{\beta 1} = \cos(\beta_{xp})$, $S_{\alpha 1} = \sin(\alpha_{xp})$, $C_{\alpha 1} = \cos(\alpha_{xp})$, $C_{2\theta} = \cos(2\theta)$, $S_{2\theta} = \sin(2\theta)$.

Для сигнала круговой поляризации выражения для $\gamma_{Rp}(z)$ и $\varphi_{Rp}(z)$ будут иметь вид (32) и (33) соответственно:

$$\gamma_{Rp}(z) = \arctg \frac{|\dot{E}_{1R}(z)|}{|\dot{E}_{2R}(z)|}, \quad (32)$$

$$\varphi_{Rp}(z) = \arctg \left[\frac{C_{\beta 2} S_{\alpha 2} + \mu S_{2\theta} S_{\beta 2} S_{\alpha 2} - \mu C_{2\theta} C_{\beta 2} S_{\alpha 2}}{-S_{\beta 2} C_{\alpha 2} + \mu S_{2\theta} C_{\beta 2} C_{\alpha 2} + \mu C_{2\theta} S_{\beta 2} C_{\alpha 2}} \right] -$$

$$-\arctg \left[\frac{S_{\beta_2} S_{\alpha_2} + \mu C_{2\theta} S_{\beta_2} S_{\alpha_2} + \mu S_{2\theta} C_{\beta_2} S_{\alpha_2}}{C_{\beta_2} C_{\alpha_2} + \mu C_{2\theta} C_{\beta_2} C_{\alpha_2} - \mu S_{2\theta} S_{\beta_2} C_{\alpha_2}} \right], \quad (33)$$

где

$$|\dot{E}_{1R}(z)| = \left[\left(-S_{\beta_2} C_{\alpha_2} + \mu S_{2\theta} C_{\beta_2} C_{\alpha_2} + \mu C_{2\theta} S_{\beta_2} C_{\alpha_2} \right)^2 + \left(C_{\beta_2} S_{\alpha_2} + \mu S_{2\theta} S_{\beta_2} S_{\alpha_2} - \mu C_{2\theta} C_{\beta_2} S_{\alpha_2} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (34)$$

$$|\dot{E}_{2R}(z)| = \left[\left(C_{\beta_2} C_{\alpha_2} + \mu C_{2\theta} C_{\beta_2} C_{\alpha_2} - \mu S_{2\theta} S_{\beta_2} C_{\alpha_2} \right)^2 + \left(S_{\beta_2} S_{\alpha_2} + \mu C_{2\theta} S_{\beta_2} S_{\alpha_2} + \mu S_{2\theta} C_{\beta_2} S_{\alpha_2} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (35)$$

В выражениях (33)–(35) использовались следующие обозначения: $S_{\beta_2} = \sin(\beta_{Rp})$, $C_{\beta_2} = \cos(\beta_{Rp})$, $S_{\alpha_2} = \sin(\alpha_{Rp})$, $C_{\alpha_2} = \cos(\alpha_{Rp})$, $C_{2\theta} = \cos(2\theta)$, $S_{2\theta} = \sin(2\theta)$.

Тогда выражение, согласно [2], для определения МДРО анизотропного участка в случае зондирования неоднородной среды распространения имеет вид (36):

$$Z_{\text{МДРО}} = 20 \lg \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sin(\alpha_{Rp}) - \cos(\alpha_{Rp}) \right) \right] - 20 \lg \left[\cos^2(\alpha_{xp}) \cos^2(\beta_{xp} - \beta_n) + \sin^2(\alpha_{xp}) \sin^2(\beta_{xp} - \beta_n) \right]^{0,5}. \quad (36)$$

Тогда оценку погрешности МДРО, $\Delta Z_{\text{МДРО}}$ можно произвести в соответствии с (37):

$$\Delta Z_{\text{МДРО}} = Z_{\text{МДРО}} - Z_{\text{МДРО}}^*. \quad (37)$$

Полученные расчётные соотношения позволяют осуществить определение зон с занижением истинного значения оценки степени анизотропии метеобъекта.

Основные результаты

Результаты расчетов $\Delta Z_{\text{МДРО}}$, выполненных в ходе проведённых исследований для волн трехсантиметрового диапазона, показывают, что с увеличением размеров капель жидкости, т.е. с ростом интенсивности осадков R , в зависимостях проявляются специфические изменения.

В расчётах использовались частотные зависимости измеренных значений дифференциального ослабления $\Delta\alpha$ и дифференциального фазового сдвига $\Delta\Phi$, приведённые в [13]. В случае сигналов трёхсантиметрового диапазона для различных значений интенсивностей осадков R эти величины составили:

- при $R = 12,5$ мм/ч:
 $\Delta\alpha = 0,02$ дБ/км; $\Delta\Phi = 1$ град/км;
- при $R = 50$ мм/ч:
 $\Delta\alpha = 0,1$ дБ/км; $\Delta\Phi = 4$ град/км;
- при $R = 150$ мм/ч:
 $\Delta\alpha = 0,8$ дБ/км; $\Delta\Phi = 14$ град/км.

Расчеты выполнялись для сигналов с линейной и круговой поляризациями излучаемой волны при

следующих дискретных значениях углов β_n ориентации собственного базиса однородного участка относительно измерительного базиса и углов ориентации базиса анизотропного участка метеообразования θ относительно собственного базиса однородного участка: 11,25; 22,5; 33,75; 45; 56,25; 67,5; 78,75°, а также при следующих значениях степени анизотропии μ : 0,1; 0,2; 0,3 [11, 14]. Интервал изменений значений степени анизотропии μ при расчётах выбран с учётом их соответствия минимальным и максимальным размерам капель, дающих основной вклад в радиолокационную отражаемость и представляющих значимый интерес при решении задач дистанционного зондирования метеообразований.

На рис. 3 приведены результаты расчётов величины МДРО при зондировании удалённого участка. С увеличением степени анизотропии μ величина $Z_{\text{МДРО}}^*$ увеличивается, достигая значения -5 дБ (при $\mu = 0,33$). Влияние угла θ на разброс значений МДРО незначительное, он достигает порядка 10 дБ (от -15 до -5 дБ при $\mu = 0,33$). Наблюдается тенденция к его уменьшению с уменьшением степени анизотропии.

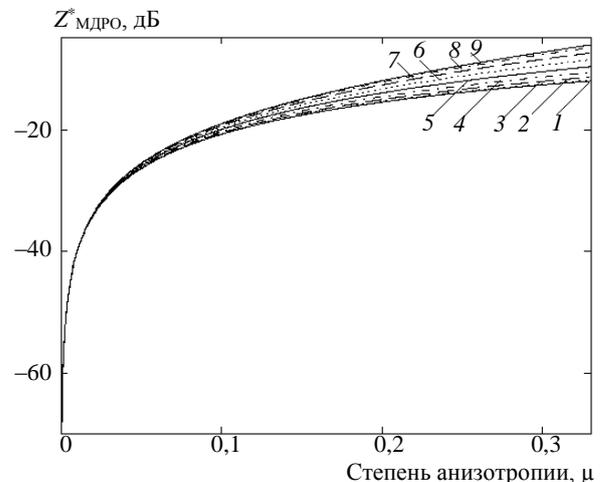


Рис. 3. Рассчитанные зависимости $Z_{\text{МДРО}}^*$ от μ при $\theta = 0^\circ$ (1), $\theta = 11,25^\circ$ (2); $\theta = 22,5^\circ$ (3); $\theta = 33,75^\circ$ (4); $\theta = 45^\circ$ (5), $\theta = 56,25^\circ$ (6); $\theta = 67,5^\circ$ (7); $\theta = 78,75^\circ$ (8); $\theta = 90^\circ$ (9)

Для интенсивности осадков 12,5 мм/ч (рис. 4) при $\mu = 0,1$ и $\beta_n = 90^\circ$ графики погрешности $\Delta Z_{\text{МДРО}}$ имеют близкий к линейному характер. Нелинейность проявляется на длинах трассы более 30 км для углов θ в диапазоне от 0 до 22,5°. Значения величин варьируются от -4 дБ ($\theta = 0^\circ$) до -2 дБ ($\theta = 90^\circ$) в начале трассы распространения ($z = 1$ км) и от -24 дБ ($\theta = 0^\circ$) до 2 дБ ($\theta = 90^\circ$) в конце трассы распространения ($z = 40$ км).

Расчёты также показывают, что с увеличением степени анизотропии наблюдается расширение диапазона значений $\Delta Z_{\text{МДРО}}$ в начале трассы распространения до 6 дБ ($\mu = 0,33$, $\beta_n = 67,5^\circ$).

Приведённые выше значения соответствуют случаю, когда угол β_H превышает 45° . Для меньших значений угла β_H диапазон варьируются от 16 дБ ($\theta = 90^\circ$) до 18 дБ ($\theta = 0^\circ$) в начале трассы распространения ($z = 1$ км) и от 14 дБ ($\theta = 90^\circ$) до 15,8 дБ ($\theta = 33,75^\circ$) в конце трассы распространения ($z = 40$ км) с аналогичным расширением диапазона в начале трассы распространения при увеличении степени анизотропии μ .

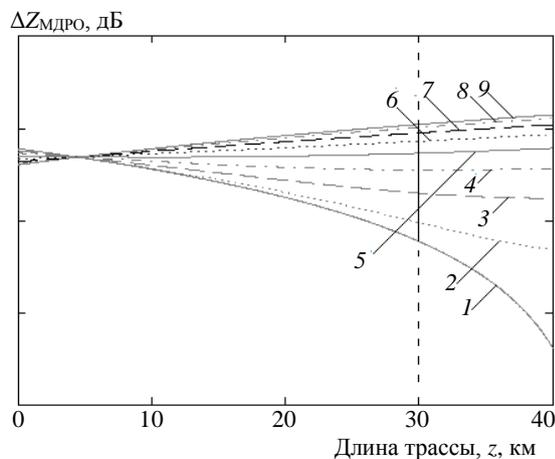


Рис. 4. Рассчитанные зависимости величины погрешности МДРО от длины трассы для $R = 12,5$ мм/ч, $\beta_H = 90^\circ$, $\mu = 0,1$ при $\theta = 0^\circ$ (1), $\theta = 11,25^\circ$ (2); $\theta = 22,5^\circ$ (3); $\theta = 33,75^\circ$ (4); $\theta = 45^\circ$ (5), $\theta = 56,25^\circ$ (6); $\theta = 67,5^\circ$ (7); $\theta = 78,75^\circ$ (8); $\theta = 90^\circ$ (9)

Для интенсивности осадков 50 мм/ч, как видно из рис. 5, при $\mu = 0,1$ и $\beta_H = 90^\circ$ графики погрешности $\Delta Z_{\text{МДРО}}$ имеют выраженный нелинейный характер. Аномально низкие значения погрешности МДРО наблюдаются в интервале длин трассы z от 5 до 12 км и достигают значения $-67,1$ дБ ($z = 8,5$ км, $\theta = 0^\circ$). При увеличении степени анизотропии μ такие минимумы наблюдаются на больших длинах трассы распространения.

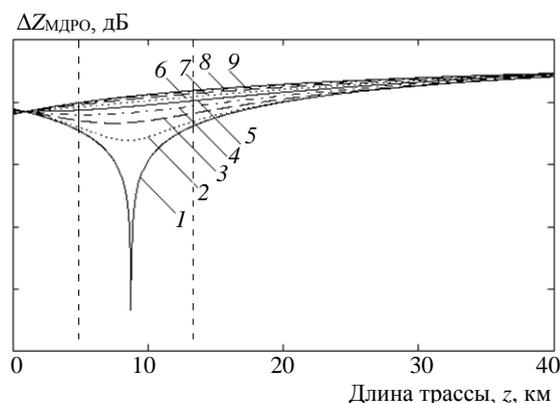


Рис. 5. Рассчитанные зависимости величины погрешности МДРО от длины трассы для $R = 50$ мм/ч, $\beta_H = 90^\circ$, $\mu = 0,1$ при $\theta = 0^\circ$ (1), $\theta = 11,25^\circ$ (2); $\theta = 22,5^\circ$ (3); $\theta = 33,75^\circ$ (4); $\theta = 45^\circ$ (5), $\theta = 56,25^\circ$ (6); $\theta = 67,5^\circ$ (7); $\theta = 78,75^\circ$ (8); $\theta = 90^\circ$ (9)

Расчёты также показывают, что при интенсивности осадков 150 мм/ч (см. рис. 6) при $\mu = 0,1$ и $\beta_H = 90^\circ$ аномально низкие значения величины $\Delta Z_{\text{МДРО}}$ проявляются на длинах трассы от 5 до 13 км и достигают минимального значения -70 дБ ($z = 8$ км, $\theta = 0^\circ$). С ростом степени анизотропии метеообъектов наблюдается уменьшение величины погрешности МДРО до -80 дБ.

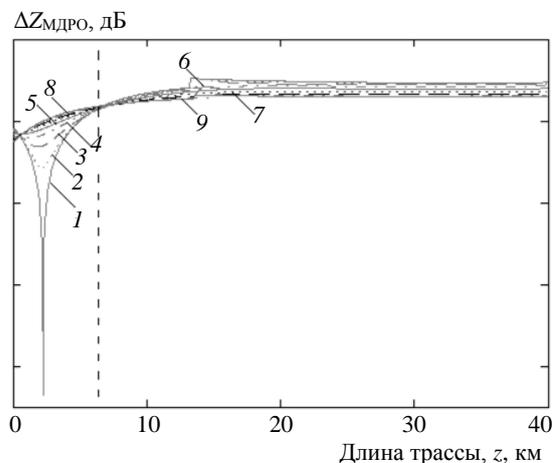


Рис. 6. Расчётные зависимости величины погрешности МДРО от длины трассы для $R = 150$ мм/ч, $\beta_H = 90^\circ$, $\mu = 0,1$ при $\theta = 0^\circ$ (1), $\theta = 11,25^\circ$ (2); $\theta = 22,5^\circ$ (3); $\theta = 33,75^\circ$ (4); $\theta = 45^\circ$ (5), $\theta = 56,25^\circ$ (6); $\theta = 67,5^\circ$ (7); $\theta = 78,75^\circ$ (8); $\theta = 90^\circ$ (9)

При интенсивностях осадков 50 и 150 мм/ч аномально низкие значения приведены для случая, когда β_H превышает 45° . Для меньших значений угла β_H эти значения составили в среднем -25 и -15 дБ соответственно на тех же длинах трассы распространения.

Заключение

В заключении необходимо отметить следующее.

Использование предложенного алгоритма для оценки погрешности величины модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости при решении задач дистанционного зондирования метеообразований позволяет выделить области с занижением истинного значения степени анизотропии метеообъекта.

Аномально низкие значения величины $\Delta Z_{\text{МДРО}}$ обусловлены, как и в работе [15], структурной трансформацией излучаемого сигнала круговой поляризации в сигнал с «поляризацией нулевого сигнала» для канала приема сигнала круговой поляризации на разных интервалах длин трассы z . Причём с ростом интенсивности осадков этот диапазон длин трасс смещается в область низких значений z .

Низкое значение оценки МДРО (-25 дБ и менее) соответствует [11] мелкокапельной части (эквивалентный диаметр каплей $d_s \leq 1$ мм) метеообразований. Реальные подобные метеообъекты, как правило, не представляют опасности для различных видов народнохозяйственной деятельности, напри-

мер, для полётов судов гражданской авиации. В то же время полученные значения оценок МДРО в дождях с интенсивностью $R = 12,5$ мм/ч и выше являются ошибочными и могут привести к неадекватной интерпретации результатов дистанционного зондирования.

Областью практического применения полученных результатов является дистанционное зондирование неоднородных протяжённых метеорологических объектов радиолокационным способом. К числу направлений дальнейших исследований по данной тематике следует отнести прежде всего поиск алгоритма формирования радиолокационного изображения в рассматриваемой поляризованной РЛС, обеспечивающего адекватную интерпретацию результатов дистанционного зондирования.

Литература

1. Masalov E.V. Analysis of the influence of a uniform hydrometeorological formation on the polarization characteristics of an electromagnetic wave / E.V. Masalov, N.N. Krivin, and S.Yu. Eshchenko // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 60, No. 9. – P. 1469–1475.
2. Masalov E.V. Analysis of the influence of an inhomogeneous hydrometeorological formation on the polarization structure of an electromagnetic wave / E.V. Masalov, N.N. Krivin, D.E. Pomarev // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 61, No. 9. – P. 1580–1589.
3. Масалов Е.В. Трансформация линейно поляризованных волн в средах, содержащих гидрометеоры // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 77–79.
4. Масалов Е.В. Точностные характеристики радиолокационного измерителя дифференциальной радиолокационной отражаемости / Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин // Журнал Сиб. фед. ун-та. Сер.: Техника и технологии. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 97–105.
5. Masalov E.V. Influence of the differential characteristics of the propagation medium on the polarization characteristics of an electromagnetic wave / E.V. Masalov, S.Yu. Eshchenko // Russian Physics Journal. – 2012. – Vol. 55, No. 3. – P. 271–276.
6. Масалов Е.В. Представление матрицы рассеяния метеоцели / Е.В. Масалов, В.А. Потехин, В.Н. Татаринцов // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 1983. – № 7. – С. 1–10.
7. Татаринцов В.Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования: учеб. пособие / В.Н. Татаринцов., Л.П. Литхарт, С.В. Татаринцов. – Томск: ТУСУР, 2012. – Т. 1. – 380 с.
8. Degree of polarization at simultaneous transmit: Theory and applications for weather radar / M. Galletti, D.S. Zrnica, V.M. Melnikov, R.J. Doviak // IEEE Trans. Geosci. Remote. – 2012. – Vol. 9, No. 3. – P. 3863–3871.
9. Galletti M. Fully polarimetric analysis of weather radar signatures / M. Galletti, D.H.O. Bebbington, M. Chandra, T. Boerner // IEEE Radar Conf. – 2008. – P. 561–566.
10. Экспериментальные исследования анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками / Е.В. Масалов, Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева, С.П. Лукьянов, В.Н. Татаринцов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 505–510.

11. Масалов Е.В. Анализ изменчивости линейного деполаризационного отношения при радиолокационном зондировании неоднородной среды, заполненной гидрометеорами / Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин, К.В. Кокоулин // Доклады ТУСУР. – 2018. – № 3(21). – С. 7–13.

12. Масалов Е.В. Трансформация поляризационной структуры радиолокационных сигналов под воздействием среды, содержащей гидрометеоры / Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 242–246.

13. Родимов А.П. Особенности использования поляризованных параметров электромагнитных волн в линиях связи миллиметрового диапазона / А.П. Родимов, В.В. Поповский, В.И. Дмитриев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – № 7. – С. 25–37.

14. Огути Т. Распространение и рассеяние электромагнитных волн в дожде и других гидрометеорах // ТИИ-ЭР. – 1983. – Т. 71, № 9. – С. 6–65.

15. Masalov E.V. Analysis of the variability of the circular depolarization ratio in remote sensing of an inhomogeneous medium / E.V. Masalov, N.N. Krivin, and A.S. Rudometova // Russian Physics Journal. – 2019. – Vol. 62, No. 1. – P. 147–155.

Масалов Евгений Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУРа) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-846-42-13
Эл. почта: e-v-masalov@yandex.ru

Кривин Николай Николаевич

Канд. техн. наук, доцент каф. КИПР ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-882-91-87
Эл. почта: freeman46@yandex.ru

Понамарев Дмитрий Евгеньевич

Студент каф. КИПР ТУСУРа Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-876-02-39
Эл. почта: dmitri4ponamarev@gmail.com

Masalov E.V., Krivin N.N., Pomarev D.E.

Accuracy characteristics for the assessment of modified differential radar reflectivity at remote sensing of inhomogeneous meteorological formation

The article considers the issues related to error determining in the magnitude of the modified differential radar reflectivity that occurs when probing an inhomogeneous medium filled with hydrometeors on the polarization characteristics of the electromagnetic waves propagating in it. An approach is proposed to define the variability trend of such an error for various values of precipitation intensity, values of the anisotropy degree of meteorological formation and the orientation angles of eigenbasis of the remote anisotropic region, as well as the orientation angles of the measuring polarization basis. The obtained error estimates allow evaluating the regions with

underestimation of the true estimation value of the anisotropy degree of the meteorological object.

Keywords: polarization, differential attenuation, differential phase shift, polarization anisotropy, eigenbasis orientation angle of anisotropic area, scattering matrix, modified differential radar reflectivity, magnitude error of the modified differential radar reflectivity.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-19-25

References

1. Masalov E.V., Krivin N.N., Eshchenko S.Yu. Analysis of the influence of a uniform hydrometeorological formation on the polarization characteristics of an electromagnetic wave. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 60, no. 9, pp. 1469–1475.
2. Masalov E.V., Krivin N.N., Ponomarev D.E. Analysis of the influence of an inhomogeneous hydrometeorological formation on the polarization structure of an electromagnetic wave. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 61, no. 9, pp. 1580–1589.
3. Masalov E.V. [Transformation of linearly polarized electromagnetic waves in media containing hydrometeors]. *Proceedings of international conference «Actual problems of electronic instrument making»*, Novosibirsk, NGTU, 2010, pp. 77–79 (in Russ.).
4. Masalov E.V., Krivin N.N. *Tochnostnije charakteristicii radiolokacionnogo izmeritelja differencialnoi radiolokacionnoi otrajaemosti*. [Accuracy characteristics of the differential radar reflectivity meter]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 97–105 (in Russ.).
5. Masalov E.V., Eshchenko S.Yu. Influence of the differential characteristics of the propagation medium on the polarization characteristics of an electromagnetic wave. *Russian Physics Journal*, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 271–276.
6. Masalov E.V., Potehin V.A., Tatarinov V.N. [Representation of the meteorological objects scattering matrix]. *Russian Physics Journal*, Tomsk, 1983, no. 7, pp. 1–10 (in Russ.).
7. Tatarinov V.N., Lighthart L.P., Tatarinov S.V. *Vvedenie v sovremennuju teoriju polarizacii radiolokacionnyh signalov. Polarizacija ploskih electromagnitnih voln i eje preobrazovanija*. [An introduction to the modern polarization theory of radar signals. The polarization of a plane electromagnetic waves and its transformations]. Tomsk, TUSUR, 2012, vol. 1, 380 p. (in Russ.).
8. Galletti M., Zmic D.S., Melnikov V.M., Doviak R.J. Degree of polarization at simultaneous transmit: Theory and applications for weather radar. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 383–3871.
9. Galletti M., Bebbington D.H.O., Chandra M., Boerner T. Fully polarimetric analysis of weather radar signatures. *IEEE Radar Conf.*, 2008, pp. 561–566.
10. Badulin N.N., Bacula A.P., Kulsheneva E.B. *Experimentalnie issledovanija anizotropii rassejanija radiolokacionnyh signalov oblakami i osadkami* [Experimental investigation of anisotropy of radar signal scattering by clouds and precipitation]. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 1984, vol. 20, no. 6, pp. 505–510 (in Russ.).
11. Masalov E.V., Krivin N.N., Kokoulin K.V. *Analiz ismenchivosti lineinogo depolarizacionnogo otnoshenija*. [Analysis of the linear depolarization ratio variability] *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 7–13 (in Russ.).
12. Masalov E.V. [Transformation of linearly polarized electromagnetic waves in media containing hydrometeors]. *Proceedings of international conference «Actual problems of electronic instrument making»*, Novosibirsk, NGTU, 2010, pp. 77–79 (in Russ.).
13. Rodimov A.P., Popovsky V.V., Dmitriev V.I. [Features of using the EMW polarization parameters in millimeter-wave communication systems]. *Russian Physics Journal*, 1980, no. 7, pp. 25–37 (in Russ.).
14. Oguti T. *Rasprostranenie i rassejanie electromagnitnih voln v dojde I drugih gidrometeorah*. [Electromagnetic waves propagation and scattering in rain and other hydrometeors]. *IEEE*, 1983, vol. 71, no. 9, pp. 6–65 (in Russ.).
15. Masalov E.V., Krivin N.N., Rudometova A.S. Analysis of the variability of the circular depolarization ratio in remote sensing of an inhomogeneous medium. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 147–155.

Evgenii V. Masalov

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Department of Radio Equipment Design and Production
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-846-42-13
Email: e-v-masalov@yandex.ru

Nikolai N. Krivin

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor,
Department of Radio Equipment Design and Production
TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-882-91-87
Email: freeman46@yandex.ru

Dmitri E. Ponomarev

Student, Department of Radio Equipment Design
and Production TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-876-02-39
Email: dmitri4ponamarev@gmail.com