УДК 621.396.41

Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин, К.В. Кокоулин

Анализ изменчивости линейного депolarизационного отношения при радиолокационном зондировании неоднородной среды, заполненной гидрометеорами

Получены расчетные соотношения для оценки величины линейного депolarизационного отношения в точке приема радиолокационных сигналов. Это сделано с использованием компонент вектора Джонса собственного базиса однородного участка среды распространения и комплексного фазора рассеянного сигнала. При этом имеется в виду, что данный сигнал рассеивается вторым участком, который следует непосредственно за однородным участком; характеризуется анизотропными по поляризации свойствами и имеет угол ориентации собственного поляризационного базиса, отличный от угла ориентации собственного базиса однородного участка среды распространения. При этом анализируются изменения поляризационной структуры радиолокационного сигнала в процессе его распространения в указанной среде в зависимости от начального угла ориентации поляризационного базиса РЛС относительно собственного базиса однородного участка, величины степени анизотропии второго участка, угла ориентации собственного поляризационного базиса второго участка. Приводятся результаты расчетов величины линейного депolarизационного отношения в точке приема радиолокационного сигнала для осадков в виде дождя различной интенсивности. Полученные результаты анализируются.

Ключевые слова: поляризация, угол эллиптичности, угол ориентации эллипса поляризации, дифференциальное ослабление, дифференциальный фазовый сдвиг, угол ориентации поляризационного базиса однородного участка, степень поляризационной анизотропии, угол ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка, линейное депolarизационное отношение.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-7-13

Под неоднородной средой распространения понимается воздушное пространство, заполненное частицами осадков: каплями дождя, частицами града, снежинками и состоящее из участка однородной среды и следующего за ним второго участка, отличающегося анизотропными свойствами [1, 2]. Под однородным участком среды следует понимать участок, заполненный частицами метеообразований, имеющими одинаковую ориентацию и размеры, находящимися в одном и том же фазовом состоянии [1, 3, 4]. Базис такого участка среды является линейным [4].

В случае дистанционного зондирования метеообразований с использованием метеорadiолокатора поляризационная структура радиолокационных сигналов оказывается в значительной степени подвержена искажающему воздействию дифференциальных факторов среды (дифференциального ослабления $\Delta\alpha$ и дифференциального фазового сдвига $\Delta\Phi$) [3, 4]. Это обстоятельство существенно снижает эффективность идентификации анизотропного участка метеообразования, расположенного на периферии от передней границы метеообразования.

Кроме того, то обстоятельство, что угол ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка среды, как правило, является отличным от ориентации базиса однородного участка среды, обуславливает многофакторность воздействия метеообразований на поляризационную структуру радиолокационного сигнала. Указанные отличия угла ориентации базиса θ могут быть обусловлены как наличием поперечных (к трассе распространения) сдвигов ветра, так и наличием зон повышенного статического электричества (зон грозовой активности) [5].

Постановка задачи

Результаты оценки интенсивности осадков и алгоритмы распознавания опасных зон метеообразований на основе поляризационных измерений с применением двух ортогональных линейных поляризаций [6, 7] и использовании существующих методик не позволяют учесть указанные выше факторы и вызывают затруднение при идентификации опасных участков метеообразований (сдвиги ветра, зоны грозовой активности). Кроме того, весьма существенным оказывается многофакторное воздействие таких метеообразований на поляризационную структуру радиолокационного сигнала. Указанное воздействие влияет:

- на величину угла β_n между измерительным базисом, связанным с РЛС, и собственным базисом первого (однородного) участка среды;
- величину угла θ между ориентацией поляризационного базиса второго (анизотропного по поляризации) участка и ориентацией первого (однородного) участка среды;
- степень поляризационной анизотропии второго участка среды μ .

Эти обстоятельства обуславливают необходимость поиска способов, позволяющих оценить значимость влияния указанных факторов на получаемые результаты измерения и определить характер изменчивости параметра $LDR(z)$, где z – длина трассы распространения радиолокационного сигнала в однородном участке среды, заполненной гидрометеорами.

Методика решения

Как известно, величина $LDR(z)$ определяется соотношением [8–11]

$$LDR(z) = 20 \cdot \lg(|\dot{E}_{Pxy}(z)| / |\dot{E}_{Pxx}(z)|), \quad (1)$$

где $|\dot{E}_{Pxy}(z)|$ – амплитуда сигнала, излученного с горизонтальной поляризацией и принятого с вертикальной; $|\dot{E}_{Pxx}(z)|$ – амплитуда сигнала, излученного и принятого с горизонтальной поляризацией.

Для нахождения указанных амплитуд целесообразно использовать подход, описанный в [4]. Данный подход основан на использовании методики определения компонент вектора Джонса [12] в собственном базисе среды распространения с последующим переходом в собственный базис РЛС. При этом анализируемые сигналы определяются на выходе прямоугольных волноводов, принимающих сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. При этом согласно результатам работы [4] определение угла ориентации измерительного поляризационного базиса и определение угла ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка целесообразно производить относительно поляризационного базиса однородного участка среды распространения, а оценку трансформации поляризационной структуры радиолокационного сигнала целесообразно проводить в собственном базисе однородного участка среды распространения.

Тогда комплексные амплитуды, необходимые для определения $LDR(z)$ в точке приема (расположение РЛС), могут быть определены из приведенных ниже выражений:

$$\dot{E}_{Pxx}(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} [R^{-1}(\beta_H)] [R(\beta_P(z, \beta_H))] \begin{bmatrix} \cos \alpha_P(z) \\ j \sin \alpha_P(z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\dot{E}_{Pxy}(z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [R^{-1}(\beta_H)] [R(\beta_P(z, \beta_H))] \begin{bmatrix} \cos \alpha_P(z) \\ j \sin \alpha_P(z) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) использованы следующие обозначения:

$\begin{bmatrix} \cos \alpha_P(z) \\ j \sin \alpha_P(z) \end{bmatrix}$ – вектор Джонса эллиптически поляризованной волны в базисе анизотропного участка;

$$[R(\beta_P(z, \beta_H))] = \begin{bmatrix} \cos \beta_P(z, \beta_H) & \sin \beta_P(z, \beta_H) \\ -\sin \beta_P(z, \beta_H) & \cos \beta_P(z, \beta_H) \end{bmatrix} –$$

оператор перехода из базиса анизотропного участка в базис однородного участка среды;

$$[R^{-1}(\beta_H)] = \begin{bmatrix} \cos \beta_H & -\sin \beta_H \\ \sin \beta_H & \cos \beta_H \end{bmatrix} –$$

оператор перехода в базис локатора из базиса однородного участка среды;

$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – матрица Джонса прямоугольного волновода, принимающего сигнал с горизонтальной поляризацией;

$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица Джонса прямоугольного волновода, принимающего сигнал с вертикальной поляризацией;

$\alpha_P(z)$ и $\beta_P(z)$ представляют собой значения угла ориентации эллипса поляризации и угла эллиптич-

ности эллипса поляризации соответственно, изменяющиеся в процессе распространения сигнала, рассеянного анизотропным участком, в однородном участке среды.

Для учета указанных выше факторов воспользуемся моделью среды распространения, когда зондирующий сигнал распространяется в однородной среде, а его рассеяние происходит анизотропным участком, заполненным гидрометеорами. В рамках предложенной модели неоднородной среды, для характеристики анизотропного участка метеообразования, целесообразно использовать матрицу рассеяния следующего вида [13]:

$$S = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2) \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2 – собственные числа матрицы рассеяния, $\lambda_1 > \lambda_2$; θ – угол ориентации собственного базиса метеообъекта относительно измерительного; $\mu = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$ – степень поляризационной анизотропии объекта.

Поскольку, как отмечается в работе [14], метеообразования являются объемными целями, образованными независимыми рассеивателями, то матрицу рассеяния (4), степень анизотропии μ , собственные значения матрицы λ_1, λ_2 и угол ориентации θ собственного базиса анизотропного участка следует понимать как совокупную матрицу рассеивания объемной метеоцели и ее характеристики ($\mu, \lambda_1, \lambda_2, \theta$).

Выражения, определяющие $\alpha_P(z)$ и $\beta_P(z)$, будут иметь следующий вид:

$$\alpha_P(z) = \frac{1}{2} \times \arcsin \left(\frac{2 \cdot 10^{0,05 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{PH}(z) \cdot \sin(\varphi_{PH}(z) + \Delta \Phi z)}{1 + 10^{0,1 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma_{PH}(z)} \right), \quad (5)$$

$$\beta_P(z) = \frac{1}{2} \times \operatorname{arctg} \left[\frac{2 \cdot 10^{0,05 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{PH}(z) \cdot \cos(\varphi_{PH}(z) + \Delta \Phi z)}{1 - 10^{0,1 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma_{PH}(z)} \right] + \frac{\pi n}{2}, \quad (6)$$

где $\operatorname{tg} \gamma_{PH}(z)$ – начальное значение модуля комплексного фазора рассеянной волны в зависимости от длины трассы распространения z ; $\varphi_{PH}(z)$ – начальное значение фазы комплексного фазора рассеянной волны.

Начальное значение комплексного фазора определяется с учетом матрицы рассеяния, представленной выше в виде [4]:

$$\operatorname{tg} \gamma_{PH}(z) = \frac{|\dot{E}_{yPH}(z)|}{|\dot{E}_{xPH}(z)|} = \frac{|S_{12} + S_{22} \cdot (\dot{E}_{y1}(z) / \dot{E}_{x1}(z))|}{|S_{11} + S_{12} \cdot (\dot{E}_{y1}(z) / \dot{E}_{x1}(z))|}. \quad (7)$$

Поскольку, как было указано выше, оценку трансформации поляризации сигнала, облучающего анизотропный участок, целесообразно проводить в собственном базисе однородного участка, то комплексный фазор $\dot{E}_{y1}(z)/\dot{E}_{x1}(z)$ облучающей этот участок волны может быть представлен согласно результатам работы [4] в виде

$$\frac{\dot{E}_{y1}(z)}{\dot{E}_{x1}(z)} = \operatorname{tg} \gamma_1(z) \cdot e^{-j\varphi(z)}, \quad (8)$$

где

$$\operatorname{tg} \gamma_1(z) = 10^{0,05 \cdot \Delta \alpha z} \cdot \operatorname{tg} \beta_H, \quad (9)$$

а изменение фазы фазора $\varphi(z)$ в процессе распространения составляет величину

$$\varphi(z) = \Delta \Phi \cdot z. \quad (10)$$

Подставив значения S_j из формулы (4) и выражения (9) и (10) в формулу (7) и проведя необходимые преобразования, получим, что

$$\gamma_{PH}(z) = \operatorname{arctg} \left[\frac{2\mu \cdot \sin 2\theta \cdot (1 - \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \operatorname{tg} \gamma_1(z) \cdot \cos \Delta \Phi z + \mu^2 \cdot \sin^2 2\theta + (1 - \mu \cdot \cos 2\theta)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma_1(z)}{2\mu \cdot (1 + \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \operatorname{tg} \gamma_1(z) \cdot \sin 2\theta \cdot \cos \Delta \Phi z + (1 + \mu \cdot \cos 2\theta)^2 + \mu^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma_1(z) \cdot \sin^2 2\theta} \right]^{0,5}. \quad (11)$$

Начальное значение фазы комплексного фазора рассеянной волны находится по формуле

$$\varphi_{PH}(z) = \xi_1(z) - \xi_2(z), \quad (12)$$

где $\xi_1(z) = \arg \dot{E}_{yPH}(z)$; $\xi_2(z) = \arg \dot{E}_{xPH}(z)$,

и будет определяться следующим выражением:

$$\varphi_{PH}(z) = \operatorname{arctg} \frac{\mu \cdot \sin 2\theta \cdot \operatorname{tg} \gamma_1(z)}{(1 + \mu \cdot \cos 2\theta) + \mu \cdot \sin 2\theta \cdot \operatorname{tg} \gamma_1(z)} \times \frac{\sin \Delta \Phi z}{\cos \Delta \Phi z} - \operatorname{arctg} \left(\frac{(1 - \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \operatorname{tg} \gamma_1(z)}{(\mu \cdot \sin 2\theta + (1 - \mu \cdot \cos 2\theta) \cdot \operatorname{tg} \gamma_1(z))} \times \frac{\sin \Delta \Phi z}{\cos \Delta \Phi z} \right). \quad (13)$$

Подставив значения $\gamma_{PH}(z)$ и $\varphi_{PH}(z)$, полученные по формулам (11) и (13), в формулы (5), (6) и используя полученные (после указанной подстановки) формулы (2), (3), получим выражения для амплитуды $|\dot{E}_{Pxy}(z)|$ сигнала, принятого с вертикальной поляризацией, и амплитуды $|\dot{E}_{Pxz}(z)|$ сигнала, принятого с горизонтальной поляризацией.

Осуществим перемножение в (2) и (3) и определим модули полученных произведений $|\dot{E}_{Pxz}(z)|$ и $|\dot{E}_{Pxy}(z)|$, тогда получим

$$|\dot{E}_{Pxy}(z)| = [\cos^2 \alpha_P(z) \cdot \sin^2 (\beta_H - \beta_P(z, \beta_H)) + \sin^2 \alpha_P(z) \cdot \cos^2 (\beta_H - \beta_P(z, \beta_H))]^{0,5}, \quad (14)$$

$$|\dot{E}_{Pxz}(z)| = [\cos^2 \alpha_P(z) \cdot \cos^2 (\beta_H - \beta_P(z, \beta_H)) + \sin^2 \alpha_P(z) \cdot \sin^2 (\beta_H - \beta_P(z, \beta_H))]^{0,5}. \quad (15)$$

Анализ полученных результатов

Расчеты величины $LDR(z)$ осуществлялись по формуле (1) с использованием значений амплитуд (14), (15).

На рис. 1 приведены результаты расчетов $LDR(z)$ для различных значений степени поляризационной анизотропии μ при интенсивности дождя $R = 12,5$ мм/ч.

Рис. 1. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков 12,5 мм/ч, $\beta_H = 45^\circ$ и степени поляризационной анизотропии μ : а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3

Расчеты приведены для следующих значений θ : $1 - \theta = 0^\circ$; $2 - \theta = 11,25^\circ$; $3 - \theta = 22,5^\circ$; $4 - \theta = 33,75^\circ$; $5 - \theta = 45^\circ$; $6 - \theta = 56,25^\circ$; $7 - \theta = 67,5^\circ$; $8 - \theta = 78,75^\circ$.

Расчеты приведены для значения $\beta_H = 45^\circ$. С одной стороны, при этом значении β_H происходят наиболее характерные изменения оценки $LDR(z)$, с другой стороны, согласно техническому описанию ДМРЛ-С [6], излучение сигнала с линейной поляризацией с углом ориентации плоскости поляризации $\beta_H = 45^\circ$ является одним из наиболее характерных режимов работы радиолокатора.

Расчеты проводились для линейно поляризованных излучаемых волн трехсантиметрового диапазона, для которых величины R , $\Delta\alpha$, $\Delta\Phi$ составляют следующие значения [4, 14]:

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

При этом под дифференциальным фазовым сдвигом следует понимать фазовый сдвиг между ортогональными компонентами облучающей волны, возникающий при распространении радиолокационного сигнала в среде, заполненной гидрометеорами. Наличие этого фазового сдвига установлено экспериментально в работах [14, 15].

Предел изменения значений степени анизотропии μ при расчетах выбран с учетом их соответствия минимальным и максимальным размерам капель, дающим основной вклад в радиолокационную отражаемость и представляющими значимый интерес при решении задач метеорологической радиолокации [15, 16].

Как следует из расчетных зависимостей величины $LDR(z)$, для случая интенсивности осадков 12,5 мм/ч характер изменения линейного деполяризационного отношения подвержен изменению в зависимости от угла ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка и степени поляризационной анизотропии этого участка.

На рис. 1, а величина $LDR(z)$ принимает значение при длине трассы распространения $z = 0$ от -14 до -33 дБ в зависимости от угла ориентации собственного базиса θ . При длине трассы $z = 50$ км значение $LDR(z)$ для различных θ находится в диапазоне от -15 до -17 дБ. Подобное изменение расчетного линейного деполяризационного отношения также характерно для случаев, показанных на рис. 1, б и в. При этом величина $LDR(z)$ принимает значение при $z = 0$ от -10 до -33 дБ для рис. 1, б и от -7 до -33 дБ для случая представленного на рис. 1, в, а при $z = 50$ км – от -12 до -14 и от -9 до -11 дБ соответственно.

Также, как видно из рис. 1, а, имеет место изменение характера $LDR(z)$ с убывающего на возрастающий. Наиболее выраженным случаем (см. рис. 1, а) является расчетная зависимость $LDR(z)$ при $\theta = 67,5^\circ$ при длине трассы распространения от 0 до 10 км, значение которой изменяется от -33 ($z = 0$ км) до -38 дБ ($z = 5$ км).

Расчеты также показывают, что при интенсивности осадков $R = 12,5$ мм/ч и значениях углов $\beta_H < 45^\circ$ наблюдается изменение характера зависи-

мости $LDR(z)$ по сравнению с зависимостями, представленными на рис. 1, а–в. При $\beta_H = 0^\circ$, $\mu = 0,1$ разброс значений $LDR(z)$ составляет порядка 10 дБ (между значениями $LDR(z)$ при $\theta = 0^\circ$ и значениями $LDR(z)$ при $\theta = 33,75^\circ$) на всем протяжении длины трассы распространения (при $z = 50$ км), при этом изменения $LDR(z)$ имеют возрастающий характер. Для значений углов $\beta_H > 45^\circ$ характер изменения $LDR(z)$ убывающий. В случае $\beta_H = 78,75^\circ$, $\mu = 0,1$ имеет место разброс значений $LDR(z)$ до 4 дБ (между значениями $LDR(z)$ при $\theta = 67,5^\circ$ и значениями $LDR(z)$ при $\theta = 78,75^\circ$).

На рис. 2 представлены расчетные зависимости $LDR(z)$ для случая интенсивности дождя 50 мм/ч и $\beta_H = 45^\circ$. Значения θ соответствуют значениям на рис. 1.

Изменение характера зависимости $LDR(z)$ происходит на интервале z от 0 до 4 км, при этом имеет место перепад, составляющий порядка 6 дБ (см. рис. 2, а для случая $\theta = 67,5^\circ$), тогда как в предыдущем случае интервал z соответствующий подобным характерным изменениям $LDR(z)$, составляет от 0 до 10 км.

В отличие от предыдущего случая ($R = 12,5$ мм/ч), при длине трассы z от 40 до 50 км появляется повторная смена характера изменения расчетной величины $LDR(z)$: возрастающий характер меняется на убывающий с наличием характерных пиков (до 18 дБ для случая $\theta = 78,75^\circ$, см. рис. 2, в) на графике $LDR(z)$. С увеличением μ эти пики становятся более выраженными.

На длине трассы распространения до 11 км весьма выражено влияние угла θ на расчетную величину: разброс значений $LDR(z)$ составляет порядка 20 дБ при изменении θ от $67,5$ до $78,75^\circ$ (см. рис. 2, а) и от 45 до $78,75^\circ$ (см. рис. 2, б и в).

Расчеты также показывают, что при интенсивности осадков $R = 50$ мм/ч и значениях углов $\beta_H < 45^\circ$ наблюдается уменьшение влияния значения θ при всех значениях степени поляризационной анизотропии μ . При $\mu = 0,3$ и $\beta_H = 0^\circ$ разброс значений $LDR(z)$ уменьшается до 10 дБ. Причем в области положительных значений $LDR(z)$ указанный разброс также уменьшается до 10 дБ. Для случая, когда значения углов $\beta_H > 45^\circ$, также наблюдается существенное уменьшение влияния θ на величину $LDR(z)$ при всех μ . При $\mu = 0,3$ и $\beta_H = 78,75^\circ$ разброс значений $LDR(z)$ уменьшается до 12 дБ, при этом $LDR(z)$ находится в области отрицательных значений для любых значений θ .

Выраженный характер изменений имеют расчетные зависимости величины $LDR(z)$ при интенсивности осадков 150 мм/ч и том же угле начальной ориентации измерительного базиса относительно базиса среды $\beta_H = 45^\circ$ (рис. 3). Значения θ соответствуют значениям на рис. 1.

Для всех расчетных зависимостей величины $LDR(z)$, представленных на рис. 3, имеют место участки z со сменой характера изменений с возрастающего на убывающий. Появляющиеся при таком характере изменений перепады достигают величины порядка 12 дБ (см. рис. 3, в для $\theta = 78,75^\circ$ в диапазоне z от 0 до 8 км), при этом сама величина $LDR(z)$ изменяется в пределах значений от -43 (см. рис. 3, б для $\theta = 45^\circ$) до 4 дБ (см. рис. 3, б для всех значений θ).

Рис. 2. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков 50 мм/ч, $\beta_H = 45^\circ$ и степени поляризационной анизотропии μ : а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3

С увеличением степени поляризационной анизотропии влияние θ на величину $LDR(z)$ увеличивается.

Расчеты также показывают, что при интенсивности осадков равной 150 мм/ч, в случае когда углы $\beta_H < 45^\circ$, зависимость $LDR(z)$ будет аналогичной приведенной на рис. 3 а–в.

Рис. 3. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков 150 мм/ч, $\beta_H = 45^\circ$ и степени поляризационной анизотропии μ : а – 0,1; б – 0,2; в – 0,3

Однако минимальные значения величины линейного деполаризационного отношения увеличиваются до значений порядка -20 дБ ($\beta_H = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ и $\mu = 0,3$). В случае значений углов $\beta_H > 45^\circ$ для указанной интенсивности осадков также сохраняется характер зависимости $LDR(z)$, приведенной на рис. 3 а–в от -25 дБ при $\theta = 67,5^\circ$ до -5 дБ при $\theta = 0$ для случая $\beta_H = 78,75^\circ$, $\mu = 0,1$.

В указанных расчетных зависимостях угол θ с физической точки зрения соответствует изменению ориентации поляризационного базиса анизотропного участка, возникающему вследствие изменения геометрической ориентации каплей дождя под воздействием ветрового сдвига и (или) статического электричества [5, 15]. В приведенных расчетах указанное влияние анизотропного участка проявляется в использовании матрицы рассеяния S , содержащей тригонометрические функции угла θ , вследствие чего зависимости $LDR(z)$ носят немонотонный характер.

Заключение

При дистанционном зондировании неоднородной вдоль трассы среды распространения, в отличие от однородной среды [8], появляется ряд характерных особенностей изменчивости линейного деполаризационного отношения, связанных как с воздействием дифференциальных факторов среды распространения, так и, в особенности, с изменением угла ориентации собственного поляризационного базиса анизотропного участка и изменением степени поляризационной анизотропии этого участка. Эти особенности проявляются в выраженном уменьшении величины линейного деполаризационного отношения на малых дальностях (до величин $LDR(z)$ порядка 40 дБ) с последующим резким возрастанием и изменением знака величины $LDR(z)$ при интенсивности осадков 50 и 150 мм/ч, причем в последнем случае изменение знака величины $LDR(z)$ наблюдается при гораздо меньшей длине трассы распространения порядка 12 км.

Перечисленные особенности изменчивости линейного деполаризационного отношения позволяют обеспечить дистанционное получение информации для принятия решения о наличии в зондируемой области метеопреобразований

1) процессов, связанных с поперечными сдвигами ветра;

2) зон повышенного статического электричества (зон грозовой активности).

Приведенные в данной статье результаты расчетов справедливы, как было указано выше, для радиолокационных сигналов трехсантиметрового диапазона.

Поскольку указанные выше явления представляют собой опасные факторы для различных областей хозяйственной деятельности, например полетов воздушных судов гражданской авиации, результаты, полученные в данной работе, имеют практическую значимость.

Литература

1. Galletti M. Measurement and characterization of entropy and degree of polarization of weather radar targets / M. Galletti, D.H.O. Bebbington, M. Chandra, T. Boerner // IEEE T. Geosci. Remote. – 2008. – Vol. 46, No. 10. – P. 3196–3207.
2. 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.
3. Масалов Е.В. Точностные характеристики поляризационного радиолокатора при зондировании среды, заполненной гидрометеорами / Е.В. Масалов, С.В. Янов // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 17–19.

4. Масалов Е.В. Трансформация линейно поляризованных электромагнитных волн в средах, содержащих гидрометеоры // Матер. междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 77–79.

5. Масалов Е.В. Поляризационные измерения в задачах радиолокационной метеорологии / Е.В. Масалов, В.Н. Татаринов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 4. – С. 44–52.

6. Вовшин Б.М. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации [Электронный ресурс] / Б.М. Вовшин, И.С. Вылегжанин, В.Ю. Жуков и др. // Матер. V Всерос. конф. «Вторые Всерос. Арmandовские чтения» (Муром). – 2012. – С. 49–54. – Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/P5.pdf>, свободный (дата обращения: 25.05.2018).

7. Galletti M. Degree of polarization at simultaneous transmit: Theory and applications for weather radar / M. Galletti, D.S. Zmic, V.M. Melnikov, R.J. Doviak // IEEE T. Geosci. Remote. – 2012. – Vol. 9, No. 3. – P. 383–387.

8. Масалов Е.В. Анализ влияния гидрометеоров на величины дифференциальной радиолокационной отражаемости и линейного деполаризационного отношения радиолокационных сигналов / Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин, К.В. Кокоулин // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 2(20). – С. 28–35.

9. Eigenvalue Signal Processing for Weather Radar Polarimetry: Removing the Bias Induced by Antenna Coherent Cross-Channel Coupling / M. Galletti, D. S. Zmic, F. Gekat, P. Goetz // IEEE T. Geosci. Remote. – 2014. – Vol. 52, No. 12. – P. 7695–7707.

10. Galletti M. Zenith/Nadir pointing mm-wave radars: linear or circular polarization? / M. Galletti, D. Huang, P. Kollias // IEEE T. Geosci. Remote. – 2014. – Vol. 52, No. 1. – P. 628–639.

11. Montopoli M. Meteorological radar systems / M. Montopoli, F.S. Marzano // Integrated ground-based observing systems. – Berlin: Springer, Heidelberg, 2010. – P. 33–57.

12. 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.

13. Масалов Е.В. Представление матрицы рассеяния метеоцели / Е.В. Масалов, В.А. Потехин, В.Н. Татаринов // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – Томск, 1983. – № 7. – С. 1–10.

14. Родимов А.П. Особенности использования поляризационных параметров ЭМВ в системах связи миллиметрового диапазона / А.П. Родимов, В.В. Поповский, В.И. Дмитриев // ЗРЭ. – 1980. – № 7. – С. 25–37.

15. Огути Т. Распространение и рассеяние электромагнитных волн в дожде и других гидрометеорах // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 9. – С. 6–65.

16. 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.

Масалов Евгений Викторович

Д-р техн. наук, профессор каф. конструирования и производства радиоаппаратуры (КИПР) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) 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

Кокоулин Константин Владимирович

Студент каф. КИПР ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-913-845-15-06
Эл. почта: jelikavar@gmail.com

Masalov E.V., Krivin N.N., Kokoulin K.V.

Analysis of the linear depolarization ratio variability in the radiolocation sensing of inhomogeneous medium filled with hydrometeors

The theoretical results for estimating the linear depolarization ratio are obtained by using the Jones vector in eigenbasis of the homogeneous propagation medium and the complex phasor of the radar signal scattered by the second medium region which follows directly after the first, homogeneous medium region. The second medium region is characterized by anisotropic polarization properties and orientation angle of its eigenbasis. Herewith changes in the polarization structure of the radar signal in the process of its propagation in this medium are analyzed. Such changes depend on initial orientation angle of the polarization basis of the radar relative to the eigenbasis of the homogeneous region, the degree of anisotropy of the second region and orientation angle of its eigenbasis. Linear depolarization ratio calculation results in the radar signal reception point for the different rain intensity are given. Obtained results are analyzed.

Keywords: polarization, ellipticity angle, polarization ellipse orientation angle, differential attenuation, differential phase shift, orientation angle of the anisotropic region's eigenbasis, polarization anisotropy degree, linear depolarization ratio, precipitation.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-7-13

References

1. Galletti M., Bebbington D.H.O., Chandra M., Boerner T. Measurement and characterization of entropy and degree of polarization of weather radar targets. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2008, vol. 46, no. 10, pp. 3196–207.
2. Galletti M., Bebbington D.H.O., Chandra M., Boerner T. Fully polarimetric analysis of weather radar signatures. *IEEE Radar Conf.*, 2008, pp. 561–566.
3. Masalov E.V., Yanov S.V. Punctuality parameters of polarization radar at the hydrometeors remote sensing. *Proceedings of TUSUR University*, 2011, vol. 24, no. 2, pp. 17–19.
4. 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.
5. Masalov E.V., Tatarinov V.N. Polarization measurements in radar meteorology. *Russian physics journal*, 1987, no. 4, pp. 44–52.
6. Vovshin B.M., Vyligjanin I.S., Zhukov V.U., Pushkov A.A., Schukin G.G. Theory and practice of polarization measurements in meteorological radiolocation. *Proceedings of 5th Russian conference «Second Russian Armand Readings» (Murom)*, 2012, pp. 49–54 (In Russ.). Available at: <http://www.mivlg.ru/conf/armand2012/pdf/P5.pdf> (accessed: 25 May 2018).

7. Galletti M., Zrnic 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. 383–387.

8. Masalov E.V., Krivin N.N., Kokoulin K.V. An analysis of the influence of hydrometeors on the linear depolarization ratio and differential reflectivity of the radar signals. *Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 2, pp. 28–35.

9. Galletti M., Zrnic D. S., Gekat F., Goelz P. Eigenvalue Signal Processing for Weather Radar Polarimetry: Removing the Bias Induced by Antenna Coherent Cross-Channel Coupling. *IEEE T. Geosci. Remote*, 2014, vol. 52, no. 12, pp. 7695–7707.

10. Galletti M., Huang D., Kollias P. Zenith/Nadir pointing mm-wave radars: linear or circular polarization? *IEEE T. Geosci. Remote*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 628–639.

11. Montopoli M., Marzano F.S. *Meteorological radar systems. Integrated ground-based observing systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 33–57.

12. Tatarinov V.N., Lighthart L.P., Tatarinov S.V. *Vvedenie v sovremennuyu teoriju polarizacii radiolocacionnyh signalov. Polarizacija ploskih elektromagnitnyh voln i eje preobrazovanie*. [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.).

13. 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.)

14. 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.

15. Oguti T. Rasprostranenie i rassejanie elektromagnitnyh 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.).

16. Badulin N.N., Bacula A.P., Kulsheneva E.B. 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.

Evgenii V. Masalov

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

Nikolai N. Krivin

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

Konstantin V. Kokoulin

Student, Department of Radio Equipment Design
and Production TUSUR
40, Lenina pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-913-845-15-06
Email: jelikavar@gmail.com