

УДК 621.396.96

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

Анализ влияния гидрометеоров на величины дифференциальной радиолокационной отражаемости и линейного деполаризационного отношения радиолокационных сигналов

На основе анализа компонент вектора Джонса в собственном базисе среды распространения получены расчетные соотношения для оценки величин дифференциальной радиолокационной отражаемости и линейного деполаризационного отношения радиолокационных сигналов. При этом анализируются изменения радиолокационного сигнала, возникающие в процессе его распространения в среде, заполненной гидрометеорами. Под средой распространения понимается воздушное пространство, заполненное частицами осадков: каплями дождя, частицами града, снежинками. Приводятся результаты расчетов этих величин 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, дифференциальная радиолокационная отражаемость, линейное деполаризационное отношение.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-2-28-32

Дистанционное зондирование метеообразований с использованием поляризационной структуры сигналов, с одной стороны, позволяет значительно увеличить количество информации о метеообразованиях, с другой стороны, сама поляризационная структура радиолокационных сигналов оказывается в значительной степени подвержена искажающему воздействию факторов среды [1, 2]: дифференциальному ослаблению $\Delta\alpha$ [дБ/км] и дифференциальному фазовому сдвигу $\Delta\Phi$ [град/км].

Кроме того, ещё одним негативным фактором, влияющим на изменчивость дифференциальной радиолокационной отражаемости Z_{DR} и линейного деполаризационного отношения (LDR), является несогласование углов ориентации собственного поляризационного базиса среды распространения и измерительного базиса, связанного с РЛС.

Постановка задачи

Указанные выше факторы являются причиной неадекватности результатов оценки интенсивности осадков и алгоритмов распознавания опасных зон метеообразований на основе поляризационных измерений с применением двух ортогональных линейных поляризаций [3]. Перечисленные обстоятельства обуславливают необходимость поиска путей, позволяющих оценить значимость влияния указанных факторов на получаемые результаты измерения и определить характер изменчивости измеряемых параметров $Z_{DR}(z)$ и $LDR(z)$, где z – длина трассы распространения радиолокационного сигнала в среде, заполненной гидрометеорами.

Методика решения

В данной работе величина $LDR(z)$ определяется соотношением

$$LDR(z) = 20 \cdot \lg \left(\left| \dot{E}_{XY}(z) \right| / \left| \dot{E}_{XX}(z) \right| \right), \quad (1)$$

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

Величина дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ на выходе приёмника с логарифмической характеристикой может быть определена в виде [1]

$$Z_{DR}(z) = 20 \cdot \lg \left(\left| \dot{E}_{XX}(z) \right| / \left| \dot{E}_{YY}(z) \right| \right), \quad (2)$$

где $\left| \dot{E}_{XX}(z) \right|$ – амплитуда сигнала, излученного с горизонтальной поляризацией и принятого той же антенной; $\left| \dot{E}_{YY}(z) \right|$ – амплитуда сигнала, излученного с вертикальной поляризацией и принятого той же антенной.

Для нахождения указанных амплитуд использована методика определения компонент вектора Джонса в собственном базисе среды распространения [4] с последующим переходом в собственный базис РЛС и определением сигналов на выходе прямоугольных волноводов, принимающих сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно.

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

$$\dot{E}_{XX}(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \left[R^{-1}(\beta_H) \right] \left[R(\beta(z, \beta_H)) \right] \begin{bmatrix} \cos \alpha(z) \\ j \sin \alpha(z) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\dot{E}_{XY}(z) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \left[R^{-1}(\beta_H) \right] \left[R(\beta(z, \beta_H)) \right] \begin{bmatrix} \cos \alpha(z) \\ j \sin \alpha(z) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для оценки параметра $Z_{DR}(z)$ помимо указанной выше комплексной амплитуды $\dot{E}_{XX}(z)$, необходимо определить величину $\dot{E}_{YY}(z)$, для чего достаточно учесть, что Y -компонента излученного сигнала повернута относительно X -компоненты на 90° , поэтому к углу β_H следует добавить 90° . Также при расчетах коэффициента эллиптичности $\alpha(z)$ и в угле ориентации $\beta(z)$ для этой компоненты необходимо будет использовать начальный угол наклона плоскости поляризации, равный $\beta_H + 90^\circ$. Тогда

$$\begin{aligned} \dot{E}_{YY}(z) = & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_H + 90^\circ) & -\sin(\beta_H + 90^\circ) \\ \sin(\beta_H + 90^\circ) & \cos(\beta_H + 90^\circ) \end{bmatrix} \times \\ & \times \begin{bmatrix} \cos\beta(z, \beta_H + 90^\circ) & \sin\beta(z, \beta_H + 90^\circ) \\ -\sin\beta(z, \beta_H + 90^\circ) & \cos\beta(z, \beta_H + 90^\circ) \end{bmatrix} \times \\ & \times \begin{bmatrix} \cos\alpha(z, \beta_H + 90^\circ) \\ j \sin\alpha(z, \beta_H + 90^\circ) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

В формулах (3), (4) и (5) использованы следующие обозначения: $\begin{bmatrix} \cos\alpha(z) \\ j \sin\alpha(z) \end{bmatrix}$ – вектор Джонса эллиптически поляризованной волны в базисе среды; $[R(\beta(z, \beta_H))] = \begin{bmatrix} \cos\beta(z, \beta_H) & \sin\beta(z, \beta_H) \\ -\sin\beta(z, \beta_H) & \cos\beta(z, \beta_H) \end{bmatrix}$ – оператор перехода в базис среды из базиса локатора; $[R^{-1}(\beta_H)] = \begin{bmatrix} \cos\beta_H & -\sin\beta_H \\ \sin\beta_H & \cos\beta_H \end{bmatrix}$ – оператор перехода в базис локатора из базиса 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; $\alpha(z)$ и $\beta(z)$ – характеристики эллипса поляризации, представляющие собой его угол эллиптичности и его угол наклона соответственно; β_H – угол рассогласования поляризационных базисов РЛС и среды распространения зондирующего сигнала.

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

$$|\dot{E}_{XY}(z)| = [\cos^2\alpha(z) \cdot \sin^2(\beta_H - \beta(z, \beta_H)) + \sin^2\alpha(z) \cdot \cos^2(\beta_H - \beta(z, \beta_H))]^{0,5}, \quad (6)$$

$$|\dot{E}_{XX}(z)| = [\cos^2\alpha(z) \cdot \cos^2(\beta_H - \beta(z, \beta_H)) + \sin^2\alpha(z) \cdot \sin^2(\beta_H - \beta(z, \beta_H))]^{0,5}. \quad (7)$$

Для амплитуды $|\dot{E}_{YY}(z)|$, исходя из формулы (5), получим

$$\begin{aligned} |\dot{E}_{YY}(z)| = & \left[\cos^2\alpha(z, \beta_H + 90^\circ) \cdot \sin^2\left(\left(\beta_H + 90^\circ\right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \beta(z, \beta_H + 90^\circ)\right) + \sin^2\alpha(z, \beta_H + 90^\circ) \times \right. \\ & \left. \times \cos^2\left(\left(\beta_H + 90^\circ\right) - \beta(z, \beta_H + 90^\circ)\right) \right]^{0,5}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для расчета зависимостей $\alpha(z)$ и $\beta(z)$ в формулах (3)–(5) воспользуемся известными по [1, 2] соотношениями:

$$\alpha(z) = \frac{1}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta_H \cdot 10^{0,05\Delta\alpha z} \cdot \sin(\Delta\Phi z)}{1 + 10^{0,1\Delta\alpha z} \cdot \operatorname{tg}^2\beta_H}\right), \quad (9)$$

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

где β_H – угол ориентации измерительного поляризационного базиса (связанного с РЛС) относительно собственного базиса среды.

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов $\alpha(z)$ и $\beta(z)$ соответственно, полученные для интенсивности осадков $R = 12,5$ мм/ч, при которой величины $\Delta\alpha$ и $\Delta\Phi$ составляют 0,02 дБ/км и 1 град/км соответственно [2].

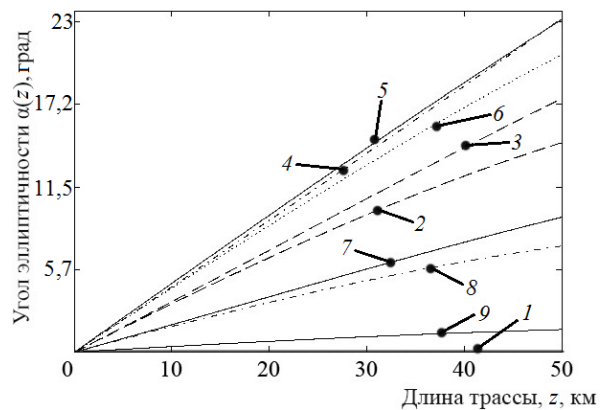


Рис. 1. Зависимость изменения угла эллиптичности от длины трассы

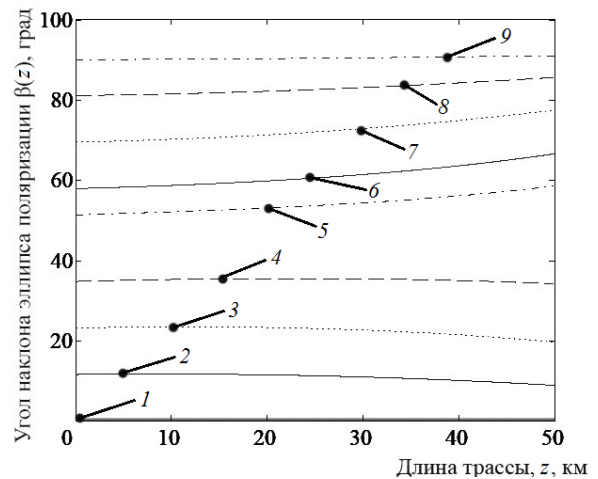


Рис. 2. Зависимость изменения угла ориентации от длины трассы

Расчеты приведены для значения β_H : 1 – $\beta_H = 0^\circ$; 2 – $\beta_H = 11,25^\circ$; 3 – $\beta_H = 22,5^\circ$; 4 – $\beta_H = 33,75^\circ$; 5 – $\beta_H = 45^\circ$; 6 – $\beta_H = 56,25^\circ$; 7 – $\beta_H = 67,5^\circ$; 8 – $\beta_H = 78,75^\circ$; 9 – $\beta_H = 90^\circ$.

При интенсивности $R = 12,5$ мм/ч характер изменения характеристик $\alpha(z)$ и $\beta(z)$ носит в целом близкий к линейному характер изменения на трассе протяженностью 50 км, величина $\alpha(z)$ не превышает значения 23 град; $\beta(z)$ изменяется от 0 до 90 град. Угол эллиптичности $\alpha(z)$ в случае начального угла

ориентации эллипса поляризации $\beta_H = 45^\circ$ по мере увеличения расстояния от точки излучения линейно возрастает и достигает максимального значения, равного 23 град. Угол ориентации $\beta(z)$ в зависимости от каждого начального угла β_H ориентации эллипса поляризации изменяется слабо.

Определяя величину дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ на выходе приёмника с логарифмической характеристикой в виде (2), после подстановки формул (7) и (8) получим

$$Z_{DR}(z) = 10 \cdot \lg \left(\frac{|\dot{E}_{XX}(z)|^2}{|\dot{E}_{YY}(z)|^2} \right). \quad (11)$$

Анализ полученных результатов

На рис. рисунке 3 приведены результаты расчетов $LDR(z)$ для различных значений интенсивности дождя R . Значения β_H соответствуют приведенным выше для рис. 1 и 2.

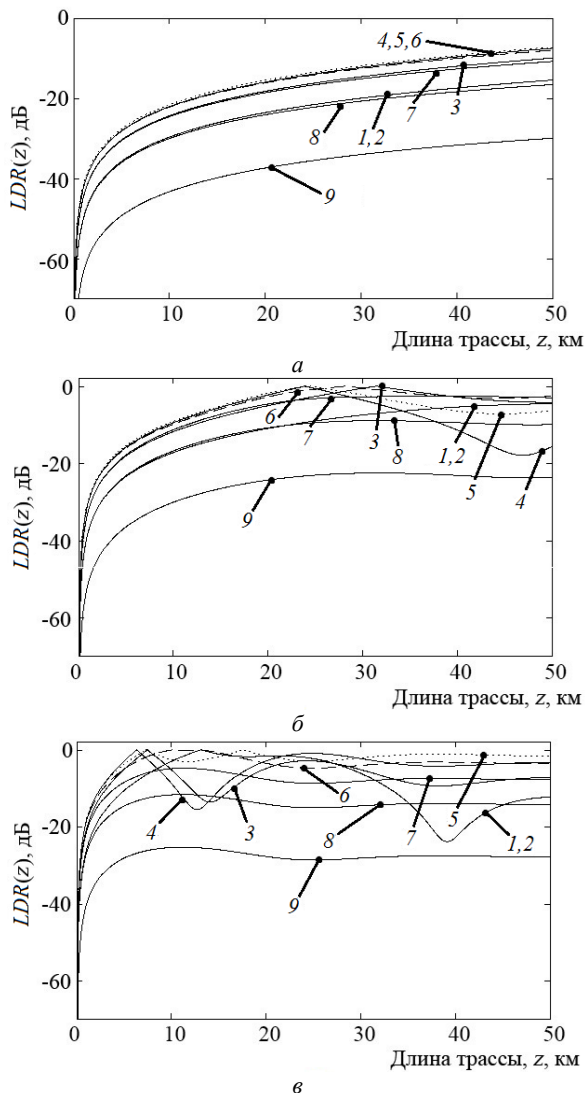


Рис. 3. Зависимость линейного деполаризационного отношения от длины трассы при интенсивности осадков: а – 12,5 мм/ч; б – 50 мм/ч; в – 150 мм/ч

Результаты расчетов по формуле (11) приведены на рис. 4–9.

Расчеты проводились для однородной среды и линейно поляризованных излучаемых волн трехсантиметрового диапазона, для которых величины R , $\Delta\alpha$, $\Delta\Phi$ составят следующие значения [2]:

$\Delta\alpha = 0,02$ 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.

Из рис. 3 видно, что для случая $R = 12,5$ мм/ч величина $LDR(z)$ линейно возрастает и достигает значения порядка -7 дБ при $\beta_H = 45^\circ$ и $z = 50$ км.

Как следует из расчетных зависимостей величины $LDR(z)$, для интенсивности дождя $R = 50$ мм/ч (см. рис. 3, б) также имеет место монотонность зависимостей $LDR(z)$ от длины трассы z . Однако в этом случае появляются участки z , на которых возрастающий характер изменяется на убывающий. В данном случае это проявляется при начальных углах ориентации $\beta_H = 22,5; 33,75; 45$ и $56,25^\circ$. Появляющийся при таком характере изменений перепад составляет величину порядка 15 дБ.

Еще более выраженной является изменчивость характера монотонной зависимости для случая интенсивности дождя $R = 150$ мм/ч, как видно из результатов расчета $LDR(z)$, приведенных на рис. 3, в. В этом случае на трассе длиной $z = 50$ км имеют место три участка с таким же, как и в предыдущем случае, характером изменения направленности. При этом в случае $\beta_H = 22,5; 33,75$ и 45° указанные особенности проявляются уже на интервале z от 0 до 15 км. Максимальный перепад в оценке $LDR(z)$ достигает порядка 20 дБ.

Далее рассмотрим результаты расчетов дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$, приведенные на рис. 4–9.

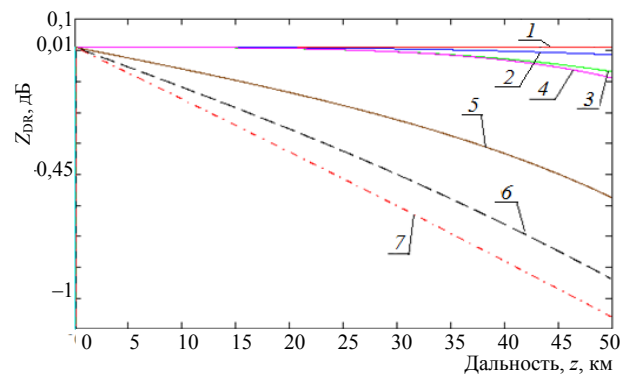


Рис. 4. Зависимости дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ при различных значениях β_H для интенсивности дождя $R = 12,5$ мм/ч

Угол β_H изменялся от 0 до 90° с дискретом $11,25^\circ$. На рис. 4, 6, 8 начальный угол наклона плоскости поляризации излучаемых колебаний β_H принимает значения: 1 – 0° ; 2 – $11,25^\circ$; 3 – $22,5^\circ$; 4 – $33,75^\circ$; 5 – $56,25^\circ$; 6 – $67,5^\circ$; 7 – $78,75^\circ$.

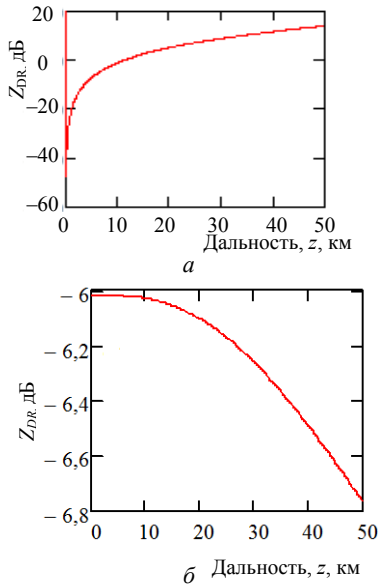


Рис. 5. Зависимость дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ для интенсивности дождя $R = 12,5$ мм/ч при $\beta_H = 45^\circ$ (а) и 90° (б)

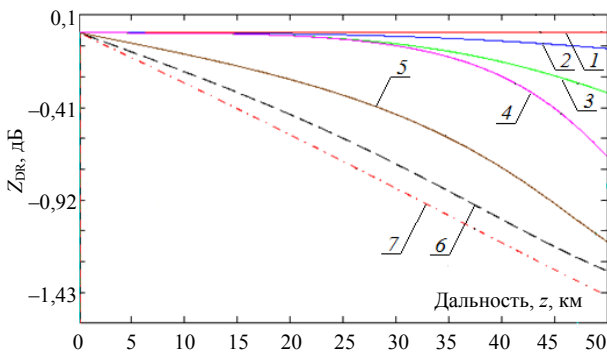


Рис. 6. Зависимости дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ при различных значениях β_H для интенсивности дождя $R = 50$ мм/ч

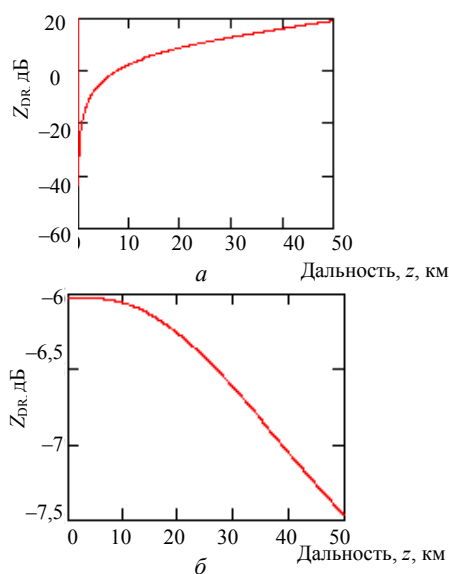


Рис. 7. Зависимость дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ для интенсивности дождя $R = 50$ мм/ч при $\beta_H = 45^\circ$ (а) и 90° (б)

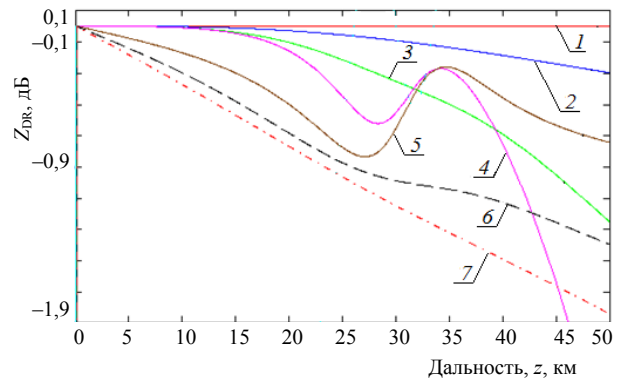


Рис. 8. Зависимости дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ при различных значениях β_H для интенсивности дождя $R = 150$ мм/ч

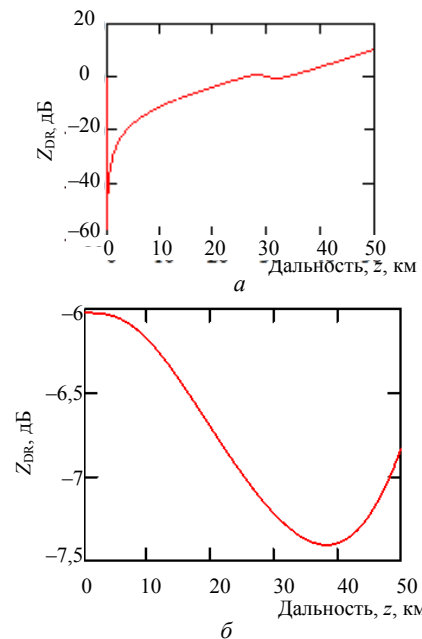


Рис. 9. Зависимость дифференциальной радиолокационной отражаемости $Z_{DR}(z)$ для интенсивности дождя $R = 150$ мм/ч при $\beta_H = 45^\circ$ (а) и 90° (б)

Как видно из рис. 4, при интенсивности осадков 12,5 мм/ч изменения дифференциальной радиолокационной отражаемости имеют убывающий характер в зависимости от начального угла наклона β_H плоскости поляризации излучаемых колебаний и от длины трассы. Оценка $Z_{DR}(z)$ изменяется от 0 до $-0,959$ дБ. Однако при $\beta_H = 45$ и 90° зависимость $Z_{DR}(z)$ резко меняет характер и пределы изменения. При $\beta_H = 45^\circ$ дифференциальная радиолокационная отражаемость увеличивается с увеличением длины трассы z в пределах от -60 до -5 дБ. При $\beta_H = 90^\circ$ дифференциальная радиолокационная отражаемость уже уменьшается в пределах от -6 до $-6,75$ дБ. Последнее иллюстрируют рис. 5, а, б.

По мере увеличения интенсивности осадков до 50 мм/ч (см. рис. 6) дифференциальная радиолокационная отражаемость $Z_{DR}(z)$ имеет также убывающий характер изменения в пределах от 0 до

–1,452 дБ. Так же, как и при интенсивности осадков 12,5 мм/ч, при $\beta_H = 45^\circ$ и $\beta_H = 90^\circ$ зависимость $Z_{DR}(z)$ резко меняет характер и предел изменения.

При $\beta_H = 45^\circ$ (см. рис. 7, а) для указанной выше интенсивности осадков значение дифференциальной радиолокационной отражаемости растёт с увеличением длины трассы z в пределах от –40 до 10 дБ. При $\beta_H = 90^\circ$ (см. рис. 7, б) дифференциальная радиолокационная отражаемость уже уменьшается в пределах от –6 до –7 дБ. Из рис. 6 следует, что величина $Z_{DR}(z)$ зависит, помимо длины трассы z , как от ориентации собственного базиса среды распространения β_H , так и от дифференциальных характеристик среды $\Delta\alpha$ и $\Delta\Phi$.

Из рис. 8 для максимальной интенсивности осадков 150 мм/ч следует, что оценка $Z_{DR}(z)$, начиная с дальности $z = 25$ км, приобретает ярко выраженную зависимость от угла ориентации собственного базиса среды распространения относительно измерительного базиса. Также можно показать, что при $\beta_H = 56,25^\circ$ оценка $Z_{DR}(z)$ на 26 км достигает минимального значения –0,8 дБ. В случае $\beta_H = 33,75^\circ$ и $\beta_H = 56,25^\circ$ имеют место участки с изменением характера зависимости $Z_{DR}(z)$ с убывающего на возрастающий и наоборот. Максимальный размах изменчивости достигает 1,5 дБ.

При $\beta_H = 45^\circ$ (см. рис. 9, а) дифференциальная радиолокационная отражаемость также увеличивается с увеличением длины трассы. Нижний и верхний пределы изменения в этом случае составляют –30 и 0 дБ соответственно. При $\beta_H = 90^\circ$ (см. рис. 9, б) дифференциальная радиолокационная отражаемость уменьшается в пределах от –6 до –7,405 дБ на участке трассы длиной от 0 до 39 км, далее происходит монотонное возрастание до –6,8 дБ.

При увеличении интенсивности осадков с 12,5 до 50 мм/ч оценка $Z_{DR}(z)$ уменьшается до –1,452 дБ при длине трассы 50 км, а при интенсивности 150 мм/ч уже достигает –2,3 дБ. Это говорит о том, что чем больше степень влияния осадков на оценку $Z_{DR}(z)$, тем сильнее она подвержена резким изменениям и большим затуханиям в конце трассы.

Заключение

С увеличением интенсивности осадков влияние дифференциального фазового сдвига и дифференциального ослабления увеличивается, существенно увеличивая изменчивость $LDR(z)$. Для более точной интерпретации полученных данных учёт этого влияния представляет собой значимый фактор и требует дальнейших исследований, поскольку такой характер изменчивости $LDR(z)$ может быть использован в качестве дополнительного информационного признака.

В случае использования линейных ортогональных поляризаций имеет место выраженный характер рассогласования углов ориентации собственного поляризационного базиса среды распространения и измерительного базиса, связанного с РЛС.

Перечисленные выше обстоятельства позволяют утверждать, что в случае несовпадения базиса

среды и измерительного базиса при реализации метода, основанного на использовании линейной поляризации, принимаемый сигнал обладает поляризационными характеристиками, зависящими в большей степени от характеристик процесса распространения, а не от характеристик рассеивающего метеорообъекта.

С увеличением интенсивности осадков изменчивость дифференциальной радиолокационной отражаемости носит всё более выраженный характер.

Литература

1. Масалов Е.В. Точностные характеристики поляризационного радиолокатора при зондировании среды, заполненной гидрометеорами / Е.В. Масалов, С.В. Янов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2(24), ч. 3. – С. 17–19.
2. 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.
3. 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 Всероссийские Армандовские чтения» (Муром). – 2012. – С. 49–54. – Режим доступа: <http://www.mivlgu.ru/conf/armand2012/pdf/P5.pdf>, свободный (дата обращения: 11.12.2016).
4. Татаринцов В.Н. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования: учеб. пособие / В.Н. Татаринцов, Л.П. Лигтхарт, С.В. Татаринцов. – Томск: ТУСУР, 2012. – Т. 1. – 380 с.

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

Кривин Николай Николаевич

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

Кокоулин Константин Владимирович

Студент каф. КИПР ТУСУРа
Тел.: +7 (999) 495-04-94
Эл. почта: jelikavar@gmail.com

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

Based on the analysis of the Jones vector components in their own basis of the propagation medium, the calculated ratios for estimating the value of the linear depolarization ratio and the differential reflectivity are obtained. The results of calculations of this value at the point of reception of the radar signal are given. The results are analyzed.

Keywords: polarization, ellipticity angle, the angle of orientation of the polarization ellipse, the differential attenuation, differential phase shift, linear depolarization ratio, differential reflectivity.