

Научная статья
УДК 621.396.96
doi: 10.34822/1999-7604-2022-2-29-38

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕООБРАЗОВАНИЙ

Евгений Леонидович Шошин

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
shoshin6@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2750-4797>

Аннотация. Рассматриваются поляризационные характеристики метеообразований с эквивалентным радиусом от десятков микрон до единиц миллиметров. Приведены примеры радиолокационных изображений, полученных при облучении метеообразований сигналами линейной и круговой поляризации. Рассчитаны поляризационные характеристики явлений природы, связанных с выпадением осадков. Описан алгоритм измерения поляризационных характеристик метеообразований методом комплексного локационного зондирования. Получена оценка степени поляризации двукратно рассеянных дымкой, облаками и градом сигналов.

Ключевые слова: дифференциальная отражаемость, явления погоды, степень поляризации, двукратное рассеяние

Для цитирования: Шошин Е. Л. Методы измерения поляризационных характеристик метеообразований // Вестник кибернетики. 2022. № 2 (46). С. 29–38. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-29-38.

Original article

METHODS FOR MEASURING POLARIZATION CHARACTERISTICS OF METEOROLOGICAL FORMATIONS

Evgeniy L. Shoshin

Surgut State University, Surgut, Russia
shoshin6@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2750-4797>

Abstract. The polarization characteristics of meteorological formations with an equivalent radius from tens of microns to units of millimeters are studied. When irradiating meteorological formations with linear and circular polarization signals, examples of radar images are obtained. The polarization characteristics of natural phenomena associated with precipitation are calculated. The article describes an algorithm for measuring the polarization characteristics of meteorological formations using the method of integrated sensing. The degree of polarization of signals double scattered by haze, clouds and hail is estimated.

Keywords: differential reflectivity, weather phenomena, degree of polarization, double scattering

For citation: Shoshin E. L. Methods for Measuring Polarization Characteristics of Meteorological Formations // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 2 (46). P. 29–38. DOI 10.34822/1999-7604-2022-2-29-38.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании явлений природы и установлении законов климатообразования на региональных территориях широко используются методы метеорологической радиолокации [1–3]. Радиолокационное зондирование метеообразований позволяет измерять интенсивность выпадения осадков, классифицировать их на зоны с жидкими, тающими и твердыми

метеочастицами [4]. К метеорадиолокационным системам предъявляют требования точности, оперативности и надежности измерений. Особенности рассеяния сверхвысокочастотных сигналов в атмосфере не позволяют метеорадиолокационной системе проводить измерения характеристик рассеяния тропосферного аэрозоля, ледяных гексагональных кристаллов, капель облаков и тумана. Улуч-

шение показателей назначения метеорадиолокационных систем связывают с включением в их состав миллиметрового канала измерения для повышения количественных измерений микроструктуры облаков и осадков, а также фазированных активных решеток для увеличения скорости обзора и повышения оперативности [5]. Другим способом расширить функциональные возможности метеорадиолокационных систем является комплексирование средств активной радио- и оптической локации и радиометрии, что позволяет получить всепогодность измерений, построить профиль ветра и повысить качество сверхкраткосрочного прогноза гроз и града [6–7].

Целью исследования является анализ поляризационных характеристик метеообразований, разработка метода комплексного локационного зондирования и оценка степени поляризации двукратно рассеянных дымкой, облаками и градом оптических и радиолокационных сигналов.

Поляризационные характеристики метеообразований. К поляризационным характеристикам метеообразований относятся [8–10]:

- дифференциальная отражаемость

$$Z_{DR} = 10 \lg \left(\frac{E_{HH}^2}{E_{VV}^2} \right); \quad (1)$$

- линейное и круговое деполяризационное отношение

$$L_{DR} = 10 \lg \left(\frac{E_{HV}^2}{E_{HH}^2} \right); \quad (2)$$

$$C_{DR} = 10 \lg \left(\frac{E_{RR}^2}{E_{RL}^2} \right); \quad (3)$$

- коэффициент поляризационной анизотропии

$$K_{RV} = 10 \lg \left(\frac{E_{RR}^2}{E_{VV}^2} \right); \quad (4)$$

где E_{HH} – амплитуда рассеянного сигнала при горизонтальной поляризации облучающего поля и принятого с той же поляризацией;

E_{VV} – амплитуда рассеянного сигнала при вертикальной поляризации облучающего поля и принятого с той же поляризацией;

E_{HV} – амплитуда рассеянного сигнала при горизонтальной поляризации облучающего поля и принятого с вертикальной поляризацией;

E_{RR} – амплитуда рассеянного сигнала при круговой поляризации облучающего поля и принятого с той же поляризацией;

E_{RL} – амплитуда рассеянного сигнала при круговой поляризации одного направления вращения облучающего поля и принятого с круговой поляризацией противоположного направления вращения.

Радиолокационная дифференциальная отражаемость используется при измерении интенсивности метеоосадков, образованных из жидких и твердых частиц с эквивалентным радиусом $0,2 \div 8$ мм. Капли дождя при падении испытывают давление воздуха и приобретают форму эллипсоида с вытянутой по горизонтали главной осью, вследствие чего дифференциальная радиолокационная отражаемость принимает значения 1 дБ...5 дБ [11]. Твердые осадки – снег, крупа, град – при падении имеют случайную ориентацию, благодаря чему амплитуды E_{HH} и E_{HV} рассеянных сигналов оказываются близкими между собой, при этом $Z_{DR} \approx 0$.

На линейное деполяризационное отношение рассеянных метеообразованиями сигналов влияет дифференциальный фазовый сдвиг между ортогональными поляризационными компонентами, а также дифференциальное ослабление и поляризационная анизотропия участков атмосферы. В зависимости от угла ориентации метеообразований L_{DR} принимает значения 40 дБ...10 дБ [8]. Линейное деполяризационное отношение света, рассеянного жидкими частицами, кристаллами и ядрами конденсации с размером $10 \div 200$ мкм, составляет значения -2 дБ... -5 дБ [12, 13].

Круговое поляризационное отношение мало подвержено влиянию сторонних шумов и не зависит от угла ориентации метеообразования. Коэффициент поляризационной анизотропии характеризуется диапазоном значений -30 дБ... 0 дБ, что позволяет при одинаковой погрешности измерения

дифференциальной отражаемости получать более точные оценки поляризационных параметров, таких как степень поляризационной анизотропии и фактор формы.

Поляризационные характеристики света, рассеянного метеобразованиями, могут быть представлены матрицей Мюллера (далее – ММ). Оптическая ММ капельных и кристаллических частиц путем матричного преобразования приводится к блочно-диагональному виду [15, 16]:

$$M'(\alpha) = R(\alpha) \cdot M \cdot R(\alpha) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $R(\alpha)$ – оператор вращения вокруг волнового вектора.

$$m_{11} = m_{22} = \frac{P_1 + P_2}{2}; \quad m_{12} = m_{21} = \frac{P_1 - P_2}{2}; \quad (7)$$

$$m_{33} = m_{44} = P_3; \quad m_{43} = -m_{34} = P_4,$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 – значения, связанные с рассеянием сферических полидисперсных частиц в оптическом и СВЧ-диапазоне [17].

Элемент m_{44} является инвариантом к преобразованию (5) и от азимутальной ориентации не зависит. Характеристикой степени азимутальной ориентации является:

$$\chi = \frac{m_{22} + m_{33}}{m_{11} + m_{44}}. \quad (8)$$

Состояние ориентации облачных частиц характеризуется параметрами m_{44}, α и χ [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании методов измерения поляризационных характеристик метеобразований будем использовать формализм векторов Джонса, что позволит найти амплитуду рассеянных сигналов в зависимости от поляризации облучающих сигналов. Данные расчетов характеристик метеосадков получат проверку с помощью эксперимента, проводимого в радиолокационном диапазоне.

Установим связь параметров $Z_{DR}, L_{DR}, C_{DR}, K_{RV}$ со значениями элементов матрицы рассеяния осесимметричных метеобразований [14]:

$$S = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho e^{j\Delta\varphi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где ρ – фактор формы;

$\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг между ортогональными компонентами;

α – угол ориентации.

Оценим амплитуду рассеянных сигналов, используя формализм векторов Джонса:

$$\dot{E} = [P] \cdot [S] \cdot [E_0], \quad (10)$$

где E_0 – вектор Джонса облучающей волны;

P – поляризатор.

В табл. 1 приведены векторы Джонса облучающих волн, типы поляризаторов и аналитические выражения по расчету амплитуд рассеянных сигналов.

Таблица 1

Расчет амплитуд рассеянных сигналов

Амплитуда	Вектор Джонса E_0	Поляризатор	Выражение
E_{HH}	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\sin^2 \alpha + \rho e^{j\Delta\varphi} \cos^2 \alpha$

Окончание табл. 1

Амплитуда	Вектор Джонса E_0	Поляризатор	Выражение
E_{VV}	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\cos^2 \alpha + \rho e^{j\Delta\varphi} \sin^2 \alpha$
E_{HV}	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	$(1 + \rho e^{j\Delta\varphi}) \sin \alpha \cos \alpha$
E_{RR}	$\begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & -j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$1 - \rho e^{j\Delta\varphi}$
E_{RL}	$\begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$1 + \rho e^{j\Delta\varphi}$

Примечание: составлено автором.

Используя табл. 1 и соотношения (1)–(4), получим поляризационные характеристики:

$$Z_{DR} = 10 \lg \times \left(\frac{\sin^4 \alpha + 2\rho \cos \Delta\varphi \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \rho^2 \cos^4 \alpha}{\cos^4 \alpha + 2\rho \cos \Delta\varphi \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \rho^2 \sin^4 \alpha} \right), \quad (11)$$

$$L_{DR} = 10 \lg \times \left(\frac{(1 + 2\rho \cos \Delta\varphi + \rho^2) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{\sin^4 \alpha + 2\rho \cos \Delta\varphi \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \rho^2 \cos^4 \alpha} \right), \quad (12)$$

$$C_{DR} = 10 \lg \left(\frac{1 - 2\rho \cos \Delta\varphi + \rho^2}{1 + 2\rho \cos \Delta\varphi + \rho^2} \right), \quad (13)$$

$$K_{RV} = 10 \lg \times$$

$$\times \left(\frac{1 - 2\rho \cos \Delta\varphi + \rho^2}{\cos^4 \alpha + 2\rho \cos \Delta\varphi \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \rho^2 \sin^4 \alpha} \right). \quad (14)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные поляризационные характеристики различных явлений погоды, связанных с формированием рассеянных сигналов от переднего фронта и выпадением осадков, ось симметрии которых формируется под действием сил притяжения ($\alpha = 0$, $\Delta\varphi = 0$).

Таблица 2

Поляризационные характеристики явлений погоды

Явление погоды	ρ [14]	Z_{DR} , дБ	C_{DR} , дБ	K_{RV} , дБ
Гроза	0,52...0,81	-5,7...-1,8	-19,6...-10,0	-12,6...-0,7
Ливень	0,64...0,81	-3,9...-1,8	-13,2...-10,0	-12,6...-5,0
Обложной дождь	0,75...0,79	-2,5...-2,0	-18,6...-16,9	-11,5...-9,5
Обложной снег	0,68...0,79	-3,4...-2,0	-14,4...-16,9	-11,5...-6,5
Зона таяния	0,64...0,70	-3,9...-3,1	-13,2...-15,1	-7,4...-5,0

Примечание: составлено автором.

Данные табл. 2 свидетельствуют от том, что параметры C_{DR} и K_{RV} имеют больший диапазон значений, в сравнении с Z_{DR} , и могут использоваться для выделения метеорообразований с известными поляризационными характеристиками. Так, при селекции поляризационно-изотропных образований воздушное пространство, согласно (4), (14), будет подвергнуто облучению волнами вертикальной и круговой поляризации с последующим

формированием на выходе логарифмического приемника разности квадратичных значений амплитуд рассеянных сигналов E_{RR} и E_{VV} , равной значению коэффициента поляризационной анизотропии. При подавлении поляризационно-изотропных метеорообразований достаточно облучить воздушное пространство волнами круговой поляризации с последующим приемом волн той же поляризации.

На рис. 1а приведено изображение индикатора секторного обзора бортового метеонавигационного радиолокатора X-диапазона, сформированное при ориентации антенны с нулевым углом места и вертикальной поляризации зондирующих сигналов. На рис. 1а наблюдаются отражения от метеобразований (1) и земной поверхности (2). На рис. 1б

приведено радиолокационное изображение участка местности и воздушного пространства, полученное при зондировании метеобразований волнами круговой поляризации. Рис. 1б свидетельствует о подавлении отражений от метеобразований, уровень отражений от земной поверхности (2) при этом несколько уменьшился.

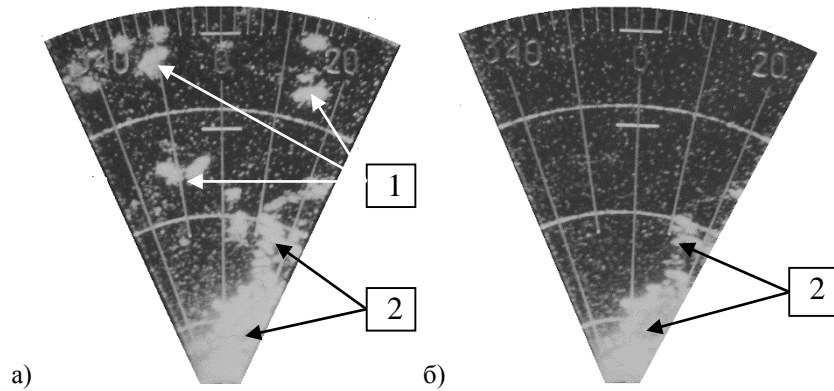


Рис. 1. Радиолокационное изображение участка местности и воздушного пространства:
 а) при облучении сигналами вертикальной поляризации; б) при облучении сигналами круговой поляризации
Примечание: составлено автором.

Радиолокационная ММ метеобразований связана с матрицей рассеяния преобразованием вида [18]:

$$M = \Lambda [S \otimes S^*] \Lambda^{-1}, \quad (15)$$

здесь в квадратных скобках стоит кронекеровское произведение матрицы рассеяния на комплексно-сопряженную, а

$$\Lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

– матрица преобразования.

Подставляя (9) в (15), получим радиолокационную ММ вида:

$$M'(\alpha) = R(\alpha) \cdot M \cdot R(\alpha) = \begin{pmatrix} \frac{1+\rho^2}{2} & \frac{1-\rho^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1-\rho^2}{2} & \frac{1+\rho^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho \cos \Delta\varphi & -\rho \sin \Delta\varphi \\ 0 & 0 & \rho \sin \Delta\varphi & \rho \cos \Delta\varphi \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что свойства симметрии радиолокационной ММ соответствуют (5). Это означает, что радиолокационная ММ осесимметричных гидрометеоров приводится к блочно-диагональной форме, а состояние ориентации метеобразований характеризует величина $\rho \cos \Delta\varphi$ и параметры α и $\chi = 1$.

Измерение поляризационных характеристик метеобразований методом комплексного локационного зондирования. Общие принципы реализации радио- и оптической локации и свойства по распространению электромагнитных волн позволяют предложить метод комплексного локационного зондирования атмосферы. Основу метода составляет одинаковая скорость распространения радиолокационных и световых волн, направленный характер излучения при помощи антенн, проявление поляризационных свойств поперечных электромагнитных волн.

Техническая реализация метода комплексного локационного зондирования атмосферы включает в себя излучение в направлении до исследуемого метеобразования высокочастотных импульсов радиолокационного и оптического диапазона, согласованных по дли-

тельности и имеющих одинаковое поляризационное состояние.

На рис. 2 приведена структурная схема комплексной локационной системы (далее – КЛС),

выполняющей измерение поляризационных характеристик метеообразований в радиолокационном и оптическом диапазоне длин волн.

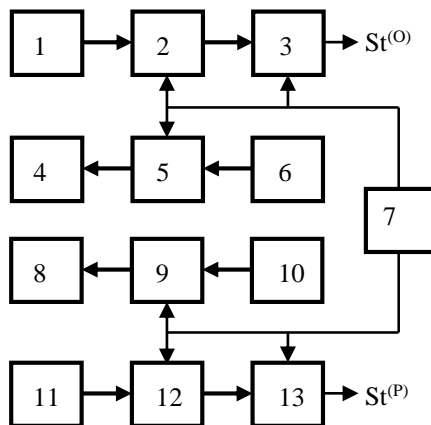


Рис. 2. Комплексная локационная система:

1, 4 – оптические антенны; 2, 5 – поляризационные модуляторы оптических сигналов;
 3, 13 – приемники; 6, 10 – передатчики; 7 – синхронизатор; 8, 11 – радиолокационные антенны;
 9, 12 – поляризационные модуляторы радиолокационных сигналов

Примечание: составлено автором.

Оптические оси радиолокационных и оптических антенн КЛС сопряжены. Длительность зондирующих радиолокационных и оптических импульсов может составлять 3,4–10 нс. Синхронизатор обеспечивает излучение радиолокационных и оптических импульсов с частотой повторения 10...1000 Гц. Наличие поляризационных модуляторов в радиолокационном и оптическом передающем тракте обеспечивает формирование зондирующих сигналов одинаковой поляризации.

При измерении дифференциальной отражаемости, линейного деполаризационного отношения и коэффициента поляризационной анизотропии метеообразований КЛС с помощью поляризационных модуляторов, входящих в передающий и приемный тракт системы, формирует зондирующие сигналы вертикальной, горизонтальной и круговой поляризации и осуществляет прием рассеянных сигналов линейной и круговой поляризации. В радиолокационном диапазоне оценка $Z_{DR}^{(P)}$, $L_{DR}^{(P)}$, $C_{DR}^{(P)}$ и $K_{RV}^{(P)}$ формируется согласно (1), (2), (3), (4); в оптическом диапазоне поляризационные характеристики

связаны со значениями интенсивности рассеянных сигналов:

$$Z_{DR}^{(O)} = 10 \lg \left(\frac{I_{HH}}{I_{VV}} \right), \quad (18)$$

$$L_{DR}^{(O)} = 10 \lg \left(\frac{I_{HV}}{I_{HH}} \right), \quad (19)$$

$$C_{DR}^{(O)} = 10 \lg \left(\frac{I_{RR}}{I_{RL}} \right), \quad (20)$$

$$K_{RV}^{(O)} = 10 \lg \left(\frac{I_{RR}}{I_{VV}} \right). \quad (21)$$

При измерении ММ метеообразований КЛС формирует зондирующие радиолокационные и оптические сигналы линейной и круговой поляризации – $(I, Q, 0, 0)^T$, $(I, -Q, 0, 0)^T$, $(I, 0, U, 0)^T$, $(I, 0, 0, V)^T$, а в качестве измеряемых величин выступают параметры Стокса рассеянных волн. Процедура оценки элементов ММ метеообразо-

ваний при использовании зондирующих сигналов линейной и круговой поляризации описана в [19]. Погрешность определения значений элементов ММ прямо связана с погрешностью измерения параметров Стокса.

Рассеяние сигналов метеообразованиями. Функциональную связь между параметрами Стокса излученных и рассеянных оптических сигналов через характеристики рассеивающего объема и среды распространения определяет уравнение лазерной локации [19]:

$$St^{(O1)}(r) = \frac{AP_0 c \tau_u}{2r^2} M^O(r) St^0 e^{-2\tau(r)}, \quad (22)$$

где St^0 – нормированный вектор Стокса посылаемого излучения;

$S^{(O1)}(r)$ – вектор Стокса однократно рассеянного назад поляризованного излучения, поступающего на вход приемной системы с расстояния r ;

P_0 – мощность посылаемого в атмосферу излучения;

A – апертура приемной антенны;

c – скорость света;

τ_u – длительность импульса излучения;

$\tau(r)$ – оптическая толщина на участке трассы от 0 до r ;

$M^O(r)$ – оптическая ММ метеообразования.

Связь между параметрами Стокса излученных и рассеянных метеообразованиями радиолокационных сигналов определяет уравнение радиолокации [3]:

$$St^{(P1)}(r) = \frac{AP_0 G \sigma \tau_u}{(4\pi r^2)^2} M^P(r) St^0, \quad (23)$$

где $St^{(P1)}(r)$ – вектор Стокса однократно рассеянного назад поляризованного излучения, поступающего на вход приемной системы с расстояния r ;

σ – эффективная поверхность рассеяния объекта;

$M^P(r)$ – радиолокационная ММЧ.

Уравнения (22) и (23) связывают векторы Стокса излученных и однократно рассеянных сигналов:

$$St^{(1)}(r) = h M(r) St^0, \quad (24)$$

где h – коэффициент, учитывающий энергетические параметры системы и характеристики рассеяния метеообразования и расстояния до него.

В оптическом и радиолокационном диапазоне в общем случае на метеообразованиях происходит многократное рассеяние. При зондировании оптическим импульсом, поляризованным под углом 0, 45° и 90° относительно плоскости референции ансамбля метеочастиц, степень поляризации двукратно рассеянного сигнала равна [16]:

$$p = \frac{\int_0^{\pi/2} [P_1(\gamma)P_1(\pi - \gamma) + P_2(\gamma)P_2(\pi - \gamma) - 2P_3(\gamma)P_3(\pi - \gamma) - 2P_4(\gamma)P_4(\pi - \gamma)] \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma}{1/2 \int_0^{\pi/2} [P_1(\pi - \gamma)P_1(\gamma) + P_2(\pi - \gamma)P_2(\gamma)] \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma}, \quad (25)$$

а при зондировании импульсом круговой поляризации правого направления вращения степень поляризации двукратно рассеянного сигнала равна:

$$p = \frac{\int_0^{\pi/2} [2P_3(\gamma)P_3(\pi - \gamma) - 2P_4(\gamma)P_4(\pi - \gamma)] \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma}{\int_0^{\pi/2} [P_1(\pi - \gamma)P_1(\gamma) + P_2(\pi - \gamma)P_2(\gamma)] \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} d\gamma}. \quad (26)$$

В табл. 3 приведены состояния поляризации зондирующего излучения в виде нормированного вектора-параметра Стокса, а также результаты расчета векторов Стокса и степени поляризации оптических и радиолокационных сигналов, однократно и двукратно рассеянных водяной дымкой, капельными облаками и градом. В качестве метеообразований использовались модели М, С3, L и H, осуществляющие рассеяние на длинах волн $\lambda = 0,45$ мкм и $\lambda = 3,3$ см [17]. При расчете степени поляризации двукратно рассеянных оптических и радиолокационных сигналов были использованы формулы (25) и (26).

**Векторы Стокса и степень поляризации при однократном и двукратном
 рассеянии излученных сигналов в атмосфере**

Модель	Длина волны	S^0	$St^{(1)}$	$St^{(2)}$	p
Дымка М	0,45 мкм	$(1,1,0,0)^T$	$(0.033,0.033,0,0)^T$	$(0.033,0.02,0,0)^T$	0,62
		$(1,0,0,1)^T$	$(0.033,0,0,0.033)^T$	$(0.033,0,0,0.008)^T$	0,24
Облако СЗ		$(1,1,0,0)^T$	$(0.047,0.047,0,0)^T$	$(0.047,0.022,0,0)^T$	0,46
		$(1,0,0,1)^T$	$(0.047,0,0,0.047)^T$	$(0.047,0,0,0.004)^T$	0,08
Облако L	3,3 см	$(1,1,0,0)^T$	$(0.115,0.115,0,0)^T$	$(0.115,0.099,0,0)^T$	0,86
		$(1,0,0,1)^T$	$(0.115,0,0,0.115)^T$	$(0.115,0,0,0.089)^T$	0,77
Град Н		$(1,1,0,0)^T$	$(0.136,0.136,0,0)^T$	$(0.136,0.113,0,0)^T$	0,83
		$(1,0,0,1)^T$	$(0.136,0,0,0.136)^T$	$(0.136,0,0,0.105)^T$	0,77

Примечание: составлено автором.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные на рис. 1 радиолокационные изображения воздушного пространства свидетельствуют о том, что поляризационная модуляция зондирующих сигналов и векторная обработка, направленная на формирование коэффициента поляризационной анизотропии рассеянных сигналов, позволяют выделить отражения от поляризационно-изотропных метеочастиц. Зондирование атмосферы волнами круговой поляризации и прием сигналов той же поляризации позволяют подавить отражения от капель дождя, облака и градин при формировании изображения воздушного пространства. Формирование волн круговой поляризации может осуществляться при помощи четвертьволновой фазовой пластины, вмонтированной в отрезок круглого волновода.

Комплексирование данных радиолокационного и лидарного зондирования метеобразований направлено на получение поляризационных характеристик – дифференциальной отражаемости, линейного и кругового деполяризационного отношения, матрицы Мюллера. Для реализации всепогодных измерений целесообразно выполнять радиолокационное зондирование в Ка- и Х-диапазонах, а оптическое излучение – на длине волны 1 550–1 570 нм [6].

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что при облучении дымки М и перистых облаков СЗ оптическими волнами круговой поляризации степень поляризации двукратно рассеянных сигналов уменьшается до 0,08–0,24 в сравнении со степенью поляризации

при однократном рассеянии. При облучении дождевого облака L и града Н волнами линейной и круговой поляризации на длине волны 3,3 см отраженные сигналы демонстрируют степень поляризации 0,77–0,86, что указывает на меньшее влияние двукратного рассеяния на формирование рассеянных сигналов в радиолокационном диапазоне в сравнении оптическим диапазоном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Матрица Мюллера метеобразований обладает свойством симметрии элементов в радиолокационном и оптическом диапазоне, что позволяет привести ее к блочно-диагональной форме представления. Комплексная локационная система, использующая поляризационно-модулированные зондирующие сигналы, способна измерять поляризационные характеристики метеобразований в радиолокационном и оптическом диапазоне.

Отражения от поляризационно-изотропных метеобразований могут быть выделены путем поляризационной модуляции зондирующих сигналов и векторной обработки рассеянных сигналов с формированием коэффициента поляризационной анизотропии.

Двукратное рассеяние дождевыми облаками и градом сигналов в радиолокационном диапазоне приводит к большим значениям степени поляризации отраженных сигналов по сравнению с поляризационными характеристиками оптических сигналов, рассеянных дымкой и перистыми облаками.

Список источников

References

1. Жуков В. Ю., Щукин Г. Г. Современные проблемы метеорологической радиолокации // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 10. С. 927–939.
2. Zrnic D. S., Ryzhkov A. V. Polarimetry for Weather Surveillance Radars // Bulletin of the American Meteorological Society. 1999. Vol. 80, Is. 3. P. 389–406.
3. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 350 с.
4. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 360 с.
5. Азаров А. С., Егоров А. С., Суханов Е. С. и др. Бортовой метеорологический радиолокатор со сжатием радиоимпульсов // Радиолокационное исследование природных сред : тр. 28-го Всерос. симпозиума, 2013. Т. 2, Вып. 10. С. 309–317.
6. Щукин Г. Г., Борейшо А. С., Ильин М. Ю., Коняев М. А., Жуков В. Ю. Перспективы и применение всепогодных лидарно-радиолокационных комплексов // Актуал. проблемы радиофизики (АПР-2019) : VIII Междунар. науч.-практ. конф. Томск : ИД ТГУ, 2019. С. 304–308.
7. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков и туманов. СПб. : РГГМУ, 2012. 342 с.
8. Масалов Е. В., Кривин Н. Н., Кокоулин К. В. Анализ влияния гидрометеоров на величины дифференциальной радиолокационной отражаемости и линейного деполаризационного отношения радиолокационных сигналов // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 2. С. 28–32.
9. Масалов Е. В., Рудометова А. С., Кривин Н. Н. Особенности использования кругового деполаризационного отношения при дистанционном зондировании метеобразований // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 2. С. 33–35.
10. Бадулин Н. Н., Кульшенева Е. Б., Татаринов В. Н. Способ измерения интенсивности дождя и устройство для его реализации. Авт. свидетельство 1128211 СССР. Бюл. № 45. Опубл. 07.12.1984.
11. Жуков В. Ю., Щукин Г. Г. Распознавание опасных явлений погоды в современной метеорологической радиолокации // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды : материалы VI Всерос. науч. конф. СПб., 2020. С. 40–50.
12. Коношонкин А. В., Кустова Н. В., Боровой А. Г. Особенности в деполаризационном отношении лидарных сигналов для хаотически ориентированных ледяных кристаллов перистых облаков // Оптика атмосферы и океана. 2013. № 5. С. 385–387.
13. Шишко В. А., Коношонкин А. В., Кустова Н. В., Боровой А. Г., Матвиенко Г. Г., Chenbo X., Dong L., Yingjian W. Исследование перистых облаков поляризационным лидаром в юго-восточном Китае
1. Zhukov V. Yu., Shchukin G. G. Sovremennyye problemy meteorologicheskoi radiolokatsii // Radiotekhnika i elektronika. 2016. Vol. 61, No. 10. P. 927–939. (In Russian).
2. Zrnic D. S., Ryzhkov A. V. Polarimetry for Weather Surveillance Radars // Bulletin of the American Meteorological Society. 1999. Vol. 80, Is. 3. P. 389–406.
3. Stepanenko V. D. Radiolokatsiia v meteorologii. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1973. 350 p. (In Russian).
4. Guidelines on Monitoring and Applying Information Obtained from Non-Automated Radars Weather Radar-1, Weather Radar-2, Weather Radar-5. Regulatory Guide 52.04.320-91. St. Petersburg : Gidrometeoizdat, 1993. 360 p. (In Russian).
5. Azarov A. S., Egorov A. S., Sukhanov E. S. et al. Bortovoi meteorologicheskii radiolokator so szhatiem radioimpulsov // Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnnykh sred : Proceedings of the 28th All-Russian Symposium, 2013. Vol. 2, Is. 10. P. 309–317. (In Russian).
6. Shchukin G. G., Boreisho A. S., Ilyin M. Yu., Konyaev M. A., Zhukov V. Yu. Perspektivy i primeneniye vsepogodnykh lidarno-radiolokatsionnykh kompleksov // Current Trends of Radiophysics (CTRP-2019) : Proceedings of the VIII International Research-to-Practice Conference. Tomsk : Publishing House Tomsk State University, 2019. P. 304–308. (In Russian).
7. Koloskov B. P., Korneev V. P., Shchukin G. G. Metody i sredstva modifikatsii oblakov i tumanov. St. Petersburg : Russian State Hydrometeorological University, 2012. 342 p. (In Russian).
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 the TUSUR University. 2017. Vol. 20, No. 2. P. 28–32. (In Russian).
9. Masalov E. V., Rudometova A. S., Krivin N. N. Features of the Use of a Circular Depolarization Ratio in Remote Sensing of Meteorological Formations // Proceedings of the TUSUR University. 2017. Vol. 20, No. 2. P. 33–35. (In Russian).
10. Badulin N. N., Kulsheneva E. B., Tatarinov V. N. Method and Device for Measuring Intensity of Rain. Authorship Certificate 1128211, USSR. Certificate No. 45. Published 07.12.1984. (In Russian).
11. Zhukov V. Yu., Shchukin G. G. Raspoznavanie opasnykh iavlenii pogody v sovremennoi meteorologicheskoi radiolokatsii // Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontroliia sostoianiia prirodnoi sredy : Proceedings of the VI All-Russian Science Conference. St. Petersburg, 2020. P. 40–50. (In Russian).
12. Konoshonkin A. V., Kustova N. V., Borovoi A. G. Peculiarities of the Depolarization Ratio in Lidar Signals for Randomly Oriented Ice Crystals of Cirrus Clouds // Atmospheric and Oceanic Optics. 2013. No. 5. P. 385–387. (In Russian).

- (г. Хейфэй) // Оптика атмосферы и океана. 2016. № 12. С. 53–55.
14. Бадулин Н. Н., Бацула А. П., Кульшенева Е. Б., Лукьянов С. П., Масалов Е. В., Татаринов В. Н. Экспериментальное исследование анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 6. С. 505–510.
 15. Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Трансформация матриц обратного рассеяния света кристаллических облаков при изменении зенитного угла зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 405–411.
 16. Самохвалов И. В., Брюханова В. В. Лазерное зондирование облаков на основе теории двукратного рассеяния // Вестн. Томск. гос. ун-та. 2003. № 278. С. 104–110.
 17. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М. : Мир, 1971. 165 с
 18. Татаринов В. Н., Татаринов С. В., Лигтхарт Л. П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразования : моногр. Томск: Томск. гос. ун-т, 2006. 380 с.
 19. Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Поляризационные лидарные измерения характеристик атмосферных аэрозолей // Регионал. мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / под общ. ред. М. В. Кабанова. Томск : Изд. СО РАН, 1997. С. 34–58.
 13. Shishko V. A., Konoshonkin A. V., Kustova N. V., Borovoi A. G., Matvienko G. G., Chenbo X., Dong L., Yingjian W. Observation of Cirrus Clouds by the Polarization Lidar in South-East China (Hefei) // Atmospheric and Oceanic Optics. 2016. No. 12. P. 53–55. (In Russian).
 14. Badulin N. N., Batsula A. P., Kulsheneva E. B., Lukyanov S. P., Masalov E. V., Tatarinov V. N. Eksperimentalnoe issledovanie anizotropii rasseianiia radiolokatsionnykh signalov oblakami i osadkami // Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Atmospheric and Oceanic Physics. 1984. Vol. 20, No. 6. P. 505–510. (In Russian).
 15. Kaul B. V., Samokhvalov I. V. Transformation of the Light Backscattering Matrices of Crystal Clouds at Variation of the Zenith Angle of the Sensing // Atmospheric and Oceanic Optics. 2010. Vol. 23, No. 5. P. 405–411. (In Russian).
 16. Samokhvalov I. V., Bryukhanova V. V. Laser Sounding of Clouds Based on the Theory of Double Scattering // Tomsk State University Journal. 2003. No. 278. P. 104–110. (In Russian).
 17. Deirmendzhan D. Rasseianie elektromagnitnogo izlucheniia sfericheskimi polidispersnymi chastitsami. Moscow : Mir, 1971. 165 p. (In Russian).
 18. Tatarinov V. N., Tatarinov S. V., Ligtkhart L. P. Vvedenie v sovremennuyu teoriu poliarizatsii radiolokatsionnykh signalov. Vol. 1. Poliarizatsiia ploskikh elektromagnitnykh voln i ee preobrazovaniia : Monograph. Tomsk : Tomsk State University, 2006. 380 p. (In Russian).
 19. Kaul B. V., Samokhvalov I. V. Poliarizatsionnye lidarnye izmereniia kharakteristik atmosferynykh aerozolei // Regional. monitoring atmosfery. Pt. 2. Noveye pribory i metodiki izmerenii / Ed. M. V. Kabanov. Tomsk : Publishing House Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1997. P. 34–58. (In Russian).

Информация об авторе

Е. Л. Шошин – кандидат технических наук.

Information about the author

E. L. Shoshin – Candidate of Sciences (Engineering).