УДК 621.396.96

Е.В. Масалов, Н.Н. Кривин

Представление матрицы рассеяния среды, содержащей гидрометеоры

Рассмотрены вопросы, связанные с определением представления матрицы рассеяния применительно к задачам радиолокационного зондирования среды, заполненной гидрометеорами. Предложен подход для оценки влияния среды на трансформацию поляризационной структуры зондирующего сигнала, основанный на использовании функциональной зависимости параметра матрицы рассеяния от дифференциального ослабления и дифференциального фазового сдвига. Особенностью предлагаемого подхода являются расчётные соотношения для определения модуля и фазы указанного параметра. Получены оценки величины его модуля и фазы, позволяющие определить области метеообразований с повышенной интенсивностью осадков.

Ключевые слова: круговая поляризация, весовой коэффициент, степень поляризационной анизотропии, матрица рассеяния, дифференциальный фазовый сдвиг, дифференциальное ослабление.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-114-118

Применительно к задачам дистанционного зондирования под содержащей гидрометеоры средой принято понимать участки атмосферы вдоль трасс распространения сигнала, заполненные частицами осадков в виде дождя, снега, града [1]. В этом случае наряду с ориентацией собственного базиса указанной среды в процессе распространения в ней зондирующего сигнала существенным оказывается воздействие дифференциального фазового сдвига $\Delta\Phi$ и дифференциального ослабления $\Delta\alpha$ на его поляризационную структуру [2]. При этом под $\Delta\alpha$ и $\Delta\Phi$ понимают соответственно затухание и задержку по фазе сигнала одной собственной поляризации по отношению к сигналу другой собственной поляризации среды распространения.

Постановка задачи

Решение задач поляризационной радиолокации применительно к дистанционному зондированию метеообразований обуславливает необходимость использования характеристик этих радиолокационных объектов, позволяющих оценить степень и характер преобразования поляризационной структуры зондирующего радиолокационного сигнала при его рассеянии целью. При этом очевидно, что наилучшими будут такие радиолокационные характеристики радиолокационных объектов, которые:

- связаны с дифференциальными характеристиками среды распространения;
- могут быть оценены на основе информативных параметров принятого сигнала.

Матрица рассеяния радиолокационного объекта позволяет осуществить наиболее полное описание трансформации поляризации зондирующего сигнала. Поиск соответствующего представления в рассматриваемом случае следует осуществлять с учетом того, что собственный базис для равномерного дождя является линейным [2]. Орты этого базиса обычно выбирают параллельными средним направлениям проекций осей сфероидальных гидрометеоров на плоскость, перпендикулярную направлению распространения электромагнитной волны [3].

В силу специфики воздействия дифференциальных факторов $\Delta\alpha$ и $\Delta\Phi$ для осадков в виде дождя

разной интенсивности [4] условно воздействие совокупного метеообъекта и его матрицы рассеяния на зондирующий сигнал можно соотнести к двум участкам:

- передняя граница метеообразования, когда длина трассы распространения составляет 1–2 кванта дальности, что, например, при длительности зондирующего сигнала в 1 мкс составит 150–300 м. В этом случае воздействие дифференциального фазового сдвига даже при высокой интенсивности дождя не превышает одного градуса [5] и может не учитываться в представлении матрицы рассеяния;
- в более общем случае произвольной протяженности трассы, когда значимым становится не только дифференциальное ослабление $\Delta\alpha$, но и дифференциальный фазовый сдвиг $\Delta\Phi$, возникает необходимость получения представления матрицы рассеяния метеообразования, позволяющего учесть такие факторы среды, как $\Delta\alpha$, $\Delta\Phi$, β_H (угол ориентации собственного базиса среды распространения относительно измерительного).

Если в первом случае (передняя граница) адекватным является непосредственное использование такого параметра, как степень поляризационной анизотропии μ , то во втором случае возможность введения подобной характеристики требует дополнительного анализа.

Методика решения

Для случая передней границы метеообразования с учетом указанных выше особенностей собственного базиса среды может быть использовано представление матрицы рассеяния в виде, аналогичном приведенному в работе [6]:

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

где λ_1 , λ_2 – собственные числа матрицы рассеяния совокупного метеообъекта; $\mu = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2)$ – степень поляризационной анизотропии совокупного метеообъекта; β_H – угол ориентации собственного базиса совокупного метеообъекта относительно измерительного базиса.

При этом саму матрицу рассеяния и степень поляризационной анизотропии μ следует понимать как характеристику совокупной матрицы рассеяния объёмной метеоцели (метеобъекта) [3]. Для того чтобы получить матрицу рассеяния метеобъекта заполненной гидрометеорами среды для общего случая, в качестве исходного используем её представление, аналогичное приведенному в работе [1]. При этом будем учитывать, что в равномерных дождях большая полуось эллипсоида вращения аппроксимирующего форму капель ориентирована в горизонтальной плоскости [1, 7]. Тогда искомая матрица рассеяния может быть записана в виде

$$S = \begin{bmatrix} \cos\beta_H & -\sin\beta_H \\ \sin\beta_H & \cos\beta_H \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} \cos\beta_H & \sin\beta_H \\ -\sin\beta_H & \cos\beta_H \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Осуществляя перемножение матриц в (2) и переходя к функциям двойных углов, получим:

$$S = 0,5 \left(1 + 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \\ + 0,5 \left(1 - 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z} \right) \cdot \begin{bmatrix} \cos 2\beta_H & \sin 2\beta_H \\ \sin 2\beta_H & -\cos 2\beta_H \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где z – длина трассы распространения зондирующего сигнала.

Вынося $0,5(1 + 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z})$ за скобки, получим окончательное выражение для матрицы в виде

$$S = 0,5 \left(1 + 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z} \right) \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \right. \\ \left. + \dot{M}(z) \cdot \begin{bmatrix} \cos 2\beta_H & \sin 2\beta_H \\ \sin 2\beta_H & -\cos 2\beta_H \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

где

$$\dot{M}(z) = \frac{1 - 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z}}{1 + 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} e^{-j\Delta\Phi \cdot z}} = \\ = \frac{\sqrt{1 - 2 \cdot 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \cdot \cos(\Delta\Phi \cdot z) + 10^{-0,1\Delta\alpha \cdot z}}}{\sqrt{1 + 2 \cdot 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \cdot \cos(\Delta\Phi \cdot z) + 10^{-0,1\Delta\alpha \cdot z}}} \times \\ \times e^{j(\delta_1 - \delta_2)} = |\dot{M}(z)| e^{j\delta}, \quad (5)$$

$$\delta_1 = \arctg \left(\frac{10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \sin(\Delta\Phi \cdot z)}{1 - 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \cos(\Delta\Phi \cdot z)} \right) - 2\beta_H, \quad (6)$$

$$\delta_2 = \arctg \left(\frac{-10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \sin(\Delta\Phi \cdot z)}{1 + 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \cos(\Delta\Phi \cdot z)} \right) - 2\beta_H, \quad (7)$$

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = \arctg \left(\frac{2 \cdot 10^{-0,05\Delta\alpha \cdot z} \sin(\Delta\Phi \cdot z)}{1 - 10^{-0,1\Delta\alpha \cdot z}} \right), \quad (8)$$

где δ – разность фаз ортогональных компонент зондирующего сигнала.

Таким образом, в общем случае весовой коэффициент $\dot{M}(z)$ перед вторым матричным слагаемым [см. формулы (4), (5)] имеет комплексное зна-

чение и зависит от параметров $\Delta\alpha$, $\Delta\Phi$ среды распространения. Оценка модуля $|\dot{M}(z)|$ может быть получена на основе амплитудных измерений при излучении сигнала круговой поляризации одного направления вращения (например, правого $\dot{E}_{RR}$) и приеме сигнала круговой поляризации того же направления вращения, а также при приеме сигнала с круговой поляризацией обратного направления вращения (например, левого $\dot{E}_{RL}$). В этом случае оценку указанных амплитуд можно получить из следующих операторных последовательностей:

$$\dot{E}_{RR} = \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \\ = \sqrt{\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2 \cdot \cos(\Delta\Phi \cdot z) + \lambda_2^2} \cdot e^{j\delta_1}, \quad (9)$$

$$\dot{E}_{RL} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot [S] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix} = \\ = \sqrt{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\lambda_2 \cdot \cos(\Delta\Phi \cdot z) + \lambda_2^2} \cdot e^{j\delta_2}. \quad (10)$$

Из непосредственного анализа модуля этого коэффициента [см. формулу (5)] следует, в частности, что когда величина аргумента косинуса становится равной 90° , то в этой формуле числитель будет равен знаменателю, а модуль весового коэффициента $|\dot{M}(z)|$ будет равен единице независимо от величины дифференциального ослабления $\Delta\alpha$, что приводит к неоднозначности в интерпретации результатов оценки. Указанный факт подтверждают результаты расчета модуля этого весового коэффициента, выполненные для трех значений интенсивности дождя R и длины волны зондирующего сигнала 3 см.

Поскольку, как было указано выше, величина $|\dot{M}(z)|$ может быть получена на основе использования измеряемых величин, то представляется целесообразной оценка $|\dot{M}(z)|$ в децибелах, тогда:

$$|\dot{M}(z)| = 20 \lg \frac{\sqrt{1 - 2 \cdot 10^{-0,05\Delta\alpha z} \cos(\Delta\Phi z) + 10^{-0,1\Delta\alpha z}}}{\sqrt{1 + 2 \cdot 10^{-0,05\Delta\alpha z} \cos(\Delta\Phi z) + 10^{-0,1\Delta\alpha z}}}. \quad (11)$$

Анализ полученных результатов

На рис. 1–3 приведены результаты расчетов величины модуля весового коэффициента $|\dot{M}(z)|$, а на рис. 4–6 – результаты расчетов фазы весового коэффициента δ .

Расчеты проводились для однородной среды и линейно поляризованных излучаемых волн трехсантиметрового диапазона, для которых величины R , $\Delta\alpha$, $\Delta\Phi$ принимают следующие значения [1]: $\Delta\alpha = 0,02$ 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.

Анализ расчетных зависимостей $|\dot{M}(z)|$, приведенных на рис. 1–3, показывает, что при небольших значениях длины трассы z (по отношению к передней границе метеообразования) имеет место значительный перепад значений указанной величины,

который составляет при $z = 5$ км величину порядка 25 дБ (для $R = 12,5$ мм/ч), 15 дБ (для $R = 50$ мм/ч), 40 дБ (для $R = 150$ мм/ч) соответственно.

Рис. 1. График зависимости модуля весового коэффициента $\dot{M}(z)$ от длины трассы при $R = 12,5$ мм/ч

Рис. 2. График зависимости модуля весового коэффициента $\dot{M}(z)$ от длины трассы при $R = 50$ мм/ч

Рис. 3. График зависимости модуля весового коэффициента $\dot{M}(z)$ от длины трассы при $R = 150$ мм/ч

При этом, начиная с осадков интенсивностью 50 мм/ч, появляются области положительных значений указанной оценки $|\dot{M}(z)|$. Для $R = 50$ мм/ч максимальным значением $|\dot{M}(z)|$ в положительной об-

ласти является 12,5 дБ, а для $R = 150$ мм/ч – значение порядка 6–7 дБ. В двух последних случаях $|\dot{M}(z)|$ принимает нулевое значение при длине трассы 22,5 км ($R = 50$ мм/ч) и четыре нулевых значения при значениях длины трассы 6,45; 19,3; 32,15 и 45 км ($R = 150$ мм/ч) соответственно.

Это обусловлено тем, что, как следует из формулы (11), в этих случаях значение аргумента косинуса составляет $90^\circ \cdot n$, где $n = 1, 3, 5, 7$.

Указанная неоднозначность может быть исключена, если реализовать процедуру оценки разности фаз δ по формуле (8). Тогда, определив величину δ для указанных выше точек, получим

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg}(\delta_1 - \delta_2) = \frac{(-1)^k \cdot 2 \cdot 10^{-0,05 \cdot \Delta \alpha \cdot z}}{1 - 10^{-0,1 \cdot \Delta \alpha \cdot z}}, \quad (12)$$

где $k = 0,5(n-1)$, а n – указанные выше значения.

Тот факт, что величина разности фаз δ в указанных выше точках неоднозначности $|\dot{M}(z)|$ отличается от нуля, иллюстрируется результатами расчетов δ , приведенными на рис. 4–6.

Рис. 4. График зависимости фазы δ весового коэффициента $\dot{M}(z)$ от длины трассы при $R = 12,5$ мм/ч

Рис. 5. График зависимости фазы δ весового коэффициента $\dot{M}(z)$ от длины трассы при $R = 50$ мм/ч

Из рис. 4 видно, в частности, что при $R = 12,5$ мм/ч изменение фазы δ незначительно и составляет величину порядка $1,5^\circ$ при длине трассы $z = 50$ км.

При $R = 50$ мм/ч (см. рис. 5) это изменение становится весьма существенным и достигает величины порядка 80 град, причем наблюдается изменение знака фазового сдвига. Величина δ обращается в ноль при $z = 45$ км.

Рис. 6. График зависимости фазы δ весового коэффициента $\dot{M}(z)$ от длины трассы при $R = 150$ мм/ч

При $R = 150$ мм/ч (см. рис. 6) имеет место значительный перепад порядка 70 град уже при длине трассы $z = 12$ км. Затем происходят периодические (с увеличением длины трассы) изменения знака аргумента $\dot{M}(z)$. Причем характерным является тот факт, что появление значений δ , равных нулю, наблюдается при значениях длины трассы z , отличных от значений этого параметра, обуславливающих равенство нулю модуля $|\dot{M}(z)|$. Величина δ обращается в ноль при значениях длины трассы 12,85; 25,75; 38,55 и 50 км соответственно.

Заключение

В заключении необходимо отметить следующее.

Получено представление матрицы рассеяния применительно к задачам радиолокационного зондирования среды, заполненной гидрометеорами.

Модуль весового коэффициента перед вторым матричным слагаемым в полученном представлении матрицы рассеяния (4) связан с дифференциальными характеристиками среды распространения – дифференциальным ослаблением $\Delta\alpha$ и дифференциальным фазовым сдвигом $\Delta\Phi$.

Изменчивость $|\dot{M}(z)|$ имеет ярко выраженный характер и значительные перепады (до -40 дБ) на небольших расстояниях (z порядка 5 км) от передней границы метеообразования.

Установленное изменение знака $|\dot{M}(z)|$ (дБ) является несомненным признаком наличия осадков с высокой интенсивностью в зондируемом метеообразовании.

Определение указанных областей метеообразований с высокой интенсивностью осадков может быть выполнено, например, при использовании указанной выше методики возможной оценки парамет-

ра $|\dot{M}(z)|$, основанной на излучении и приеме сигналов с круговыми поляризациями и использовании отношения амплитуд $\dot{E}_{RR}$ и $\dot{E}_{RL}$, в дБ, в качестве оценки указанного параметра. В этом случае свидетельством о наличии зоны с высокой интенсивностью осадков может служить появление положительных значений указанного отношения амплитуд. Как видно из рис. 2, при интенсивности дождя 50 мм/ч положительные значения $|\dot{M}(z)|$ появляются при длине трассы, превышающей 22,5 км. В случае интенсивности осадков 150 мм/ч указанные положительные значения появляются при длине трассы свыше 6,45 км (см. рис. 3).

Специфический характер воздействия дифференциального фазового сдвига $\Delta\Phi$ на модуль весового коэффициента приводит к тому, что при высоких интенсивностях осадков появляются участки, на которых $|\dot{M}(z)|$ либо принимает значение 0 дБ, либо находится близко к нему независимо от величины дифференциального ослабления $\Delta\alpha$.

Исключить указанную неоднозначность дает реализация алгоритмов, позволяющих получить оценку разности фаз δ по формуле (8), и использование соотношения (12).

Литература

1. 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.
2. Масалов Е.В. Трансформация поляризационной структуры радиолокационных сигналов под воздействием среды, содержащей гидрометеоры / Е.В. Масалов, О.С. Кореньков // Матер. междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения». – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 242–246.
3. Экспериментальные исследования анизотропии рассеяния радиолокационных сигналов облаками и осадками / Н.Н. Бадулин, А.П. Бацула, Е.Б. Кульшенева и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 505–510.
4. Масалов Е.В. Влияние дифференциальных факторов распространения на поляризационные характеристики электромагнитной волны / Е.В. Масалов, С.Ю. Ещенко // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 28–33.
5. Родимов А. П. Особенности использования поляризационных параметров электромагнитных волн в системах связи миллиметрового диапазона / А.П. Родимов, В.В. Поповский, В.И. Дмитриев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1980. – № 7. – С. 25–37.
6. Масалов Е.В. Представления матрицы рассеяния метеоцели / Е.В. Масалов, В.А. Потехин, В.Н. Татаринов // Изв. вузов. Физика. – 1983. – № 7. – С. 1–10.
7. Огути Т. Распространение и рассеяние электромагнитных волн в дожде и других гидрометеорах // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71, № 9. – С. 6–65.

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
Тел.: +7-913-882-91-87
Эл. почта: freeman46@yandex.ru

Masalov E.V., Krivin N.N.

**Scattering matrix representation of the medium
containing hydrometeors**

The issue of the scattering matrix representation determination for the radar sensing of the medium filled with hydrometeors is considered. An approach for the estimation of the medium influence on radar signal polarization structure has been offered. The approach based on the scattering matrix parameter depending upon the differential attenuation and differential phase shift. The feature of such approach is calculation ratios for the module and phase values determination of mentioned parameter.

Keywords: circular polarization, weighting coefficient, scattering matrix, differential phase shift, differential attenuation, degree of polarization anisotropy.