

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАДИОВОЛН

© 2022 г. Е. Л. Шошин*

Сургутский государственный университет,
просп. Ленина, 1, Сургут, 628400 Российская Федерация

*E-mail: shoshin_el@surgu.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Приведен алгоритм измерения матрицы Мюллера радиолокационной цели с использованием неполяризованных зондирующих сигналов. Получены оценки погрешности измерения поляризационных характеристик в зависимости от углов ориентации и эллиптичности облучающих радиосигналов. Описан алгоритм устранения влияния передающей и приемной антенн радиолокатора на результат измерения поляризационных характеристик радиолокационных целей с использованием радиолокационного отражателя с переключаемыми поляризационными свойствами. Приведены результаты численного расчета матрицы Мюллера двухгранного уголкового и невзаимного отражателей до и после компенсации влияния передающей и приемной антенн на измеряемые поляризационные характеристики.

DOI: 10.31857/S0033849422090157

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При измерении поляризационных характеристик радиолокационных целей используют методы, направленные на увеличение точности формируемых оценок [1–3]. При проведении измерений используется поляризационная модуляция радиолокационных сигналов [4]. Находят применение алгоритмы измерения матрицы обратного рассеяния при использовании зондирующих сигналов с линейной и круговой поляризацией [5]. Устранение искажений, вносимых передающей и приемной антеннами поляриметра на результат измерения значений элементов матрицы рассеяния, выполняется с помощью методов внешней калибровки с использованием двухгранных и трехгранного уголкового отражателей [6, 7].

Неполяризованные электромагнитные волны могут использоваться при внешней калибровке каналов измерения параметров Стокса методом поляризационной модуляции рассеянных сигналов [8]. Для этого в качестве калибровочной цели используется радиолокационный отражатель с переключаемыми поляризационными свойствами, соответствующими свойствам двухгранных, трехгранного и невзаимного отражателей. Неполяризованные электромагнитные волны могут использоваться для устранения искажений, вносимых передающей и приемной антеннами поляриметра

при проведении измерений значений элементов матрицы Мюллера (ММ), обладающей свойством симметрии элементов [8].

В [9] описан дискретный поляризационный модулятор радиолокационных сигналов, способный формировать на интервале времени NL неполяризованную радиоволну как векторную сумму поляризованных радиоволн:

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{4N} \sum_{k=1}^N \left\{ \begin{pmatrix} I^k \\ Q^k \\ U^k \\ V^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I^k \\ Q^k \\ -U^k \\ -V^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I^k \\ -Q^k \\ U^k \\ -V^k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I^k \\ -Q^k \\ -U^k \\ V^k \end{pmatrix} \right\}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность неполяризованной радиоволны; k – индекс временного интервала; N – количество интервалов длительностью L ; I , Q , U , V – параметры Стокса, связанные с E_x и E_y – напряженностями x - и y -компоненты электромагнитного поля и фазовым сдвигом между компонентами поля ϕ соотношениями

$$\begin{aligned} I &= E_x^2 + E_y^2; & Q &= E_x^2 - E_y^2; \\ U &= 2E_x E_y \cos(\phi); & V &= 2E_x E_y \sin(\phi). \end{aligned} \quad (2)$$

Входящие в (1) векторы Стокса

$$\begin{aligned} \overline{\text{St}}_1^k &= (I^k, Q^k, U^k, V^k)^T, \\ \overline{\text{St}}_2^k &= (I^k, Q^k, -U^k, -V^k)^T, \\ \overline{\text{St}}_3^k &= (I^k, -Q^k, U^k, -V^k)^T, \\ \overline{\text{St}}_4^k &= (I^k, -Q^k, -U^k, V^k)^T \end{aligned}$$

задают интенсивность и поляризационное состояние радиоволн, имеющих длительность $L/4$ и формируемых последовательно на k -м временном интервале длительностью L ($k = 1, 2, \dots, N$). На интервале времени NL число поляризационных состояний радиоволн, формируемых поляризационным модулятором, составляет $4N$, при этом среднее значение интенсивности оказывается равным

$$I_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I^k. \quad (3)$$

Связь векторов Стокса $\overline{\text{St}}_1^k, \overline{\text{St}}_2^k, \overline{\text{St}}_3^k, \overline{\text{St}}_4^k$, формируемых последовательно на k -м интервале времени L ($k = 1, 2, \dots, N$) поляризованных радиоволн единичной интенсивности со значениями углов эллиптичности α^k и ориентации β^k при опущенном индексе k , задается соотношениями

$$\begin{aligned} \overline{\text{St}}_1 &= (1, \cos(2\alpha) \cos(2\beta), \cos(2\alpha) \sin(2\beta), \sin(2\alpha))^T; \\ \overline{\text{St}}_2 &= (1, \cos(2(-\alpha)) \cos(2(-\beta)), \cos(2(-\alpha)) \times \\ &\quad \times \sin(2(-\beta)), \sin(2(-\alpha)))^T; \\ \overline{\text{St}}_3 &= (1, \cos(2(-\alpha)) \cos(2(-\beta + 90^\circ)), \\ &\quad \cos(2(-\alpha)) \sin(2(-\beta + 90^\circ)), \sin(2(-\alpha)))^T; \\ \overline{\text{St}}_4 &= (1, \cos(2\alpha) \cos(2(\beta + 90^\circ)), \\ &\quad \cos(2\alpha) \sin(2(\beta + 90^\circ)), \sin(2\alpha))^T \end{aligned} \quad (4)$$

и может быть представлена через полярные координаты сферы Пуанкаре [9].

Электромагнитные волны, формируемые согласно (1) и (4), чередуются во времени, что позволяет выполнить усреднение параметров Стокса на интервале времени kL ($k = 1, 2, \dots, N$). Уравнение (1) позволяет использовать электромагнитные волны произвольной поляризации – линейной, круговой, эллиптической.

Целью работы является разработка алгоритма измерения ММ радиолокационной цели без учета свойств симметрии, оценка ошибок измерения и устранение влияния антенно-фидерного тракта радиолокатора на результат поляризационных измерений с использованием неполяризованных радиоволн.

2. СВЯЗЬ МАТРИЦЫ МЮЛЛЕРА С МАТРИЦЕЙ РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА

Поляризационные характеристики радиолокационной цели задаются матрицей рассеяния (МР), имеющей вид

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В общем случае МР радиолокационной цели состоит из четырех комплексных элементов. При выполнении свойства взаимности при распространении падающих и рассеянных радиоволн МР становится симметричной ($\dot{S}_{12} = \dot{S}_{21}$).

При использовании формализма векторов Стокса поляризационные характеристики радиолокационного объекта описывает ММ, связанная с матрицей рассеяния \mathbf{S} преобразованием вида [10]

$$\mathbf{M} = \mathbf{\Lambda} [\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*] \mathbf{\Lambda}^{-1}, \quad (6)$$

здесь в квадратных скобках – кронеккеровское произведение матрицы рассеяния на комплексно-сопряженную матрицу, а

$$\mathbf{\Lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

– матрица преобразования.

В общем случае ММ состоит из 16 элементов. В частных случаях ММ проявляет симметрию элементов. Для случая взаимного рассеяния назад ММ радиолокационного объекта проявляет свойства симметрии [11]:

$$\begin{aligned} m_{ij} &= m_{ji} \quad \text{если } i, j \neq 3; \\ m_{ij} &= -m_{ji} \quad \text{если } i, j = 3. \end{aligned} \quad (8)$$

Для случая рассеяния вперед ММ имеет вид [11]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{13} & m_{14} & m_{33} & m_{34} \\ -m_{14} & -m_{24} & -m_{34} & m_{44} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены матрицы рассеяния и свойства симметрии ММ двухгранного углового отражателя [10] и невзаимного отражателя [12], полученные согласно (6).

Алгоритмы измерения ММ радиолокационной цели должны функционировать без учета симметрии элементов.

Таблица 1. Матрицы рассеяния и свойства матрицы Мюллера радиолокационных объектов

Матрица	Двухгранный уголкового отражателя [10]	Невзаимный отражатель [12]
S	$\begin{vmatrix} \cos(2\varphi) & -\sin(2\varphi) \\ -\sin(2\varphi) & -\cos(2\varphi) \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} \cos(2\gamma) & -\sin(2\gamma) \\ \sin(2\gamma) & \cos(2\gamma) \end{vmatrix}$
M	$\begin{aligned} m_{11} = -m_{44} = 1, m_{21} = m_{24} = m_{12} = m_{13} = m_{14} = 0, \\ m_{31} = m_{34} = m_{41} = m_{42} = m_{43} = 0, \\ m_{22} = -m_{33}, m_{32} = m_{23}. \end{aligned}$	$\begin{aligned} m_{11} = m_{44} = 1, m_{21} = m_{24} = m_{12} = m_{13} = m_{14} = 0, \\ m_{31} = m_{34} = m_{41} = m_{42} = m_{43} = 0, \\ m_{22} = m_{33}, m_{32} = -m_{23}. \end{aligned}$

Примечание: φ – угол ориентации ребра, γ – угол поворота плоскости поляризации.

3. ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ МЮЛЛЕРА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ РАДИОСИГНАЛОВ

Рассмотрим способ оценки значений элементов ММ (\mathbf{M}^r) радиолокационного объекта, сохраняющего стабильность своих поляризационных характеристик на интервале измерений L . В качестве зондирующих сигналов будем использовать радиоволны, векторы Стокса которых $\vec{St}_1^e, \vec{St}_2^e, \vec{St}_3^e, \vec{St}_4^e$ определяются в соответствии с (4). Векторы Стокса обратно рассеянного радиосигнала $\vec{St}_1^r, \vec{St}_2^r, \vec{St}_3^r, \vec{St}_4^r$ связаны с приборными векторами Стокса соотношением

$$\vec{St}_{1,2,3,4}^r = h \mathbf{M}^r \vec{St}_{1,2,3,4}^e, \quad (10)$$

где

$$h = \frac{\sigma_0}{(4\pi)^2 R^4}, \quad (11)$$

σ_0 – эффективная поверхность рассеяния объекта, R – расстояние от объекта до поляриметра. При частоте посылки зондирующих сигналов 400 Гц, временной интервал формирования зондирующих сигналов и измерения векторов Стокса $\vec{St}_1^r, \vec{St}_2^r, \vec{St}_3^r, \vec{St}_4^r$ рассеянных сигналов составляет 10 мс. Линейная комбинация параметров Стокса рассеянных радиосигналов позволяет выполнить оценку

значений элементов матрицы Мюллера радиолокационного объекта

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \frac{0.25}{hI^e} (G_1^r + G_2^r + G_3^r + G_4^r); \\ m_{j2} &= \frac{0.25}{hQ^e} (G_1^r + G_2^r - G_3^r - G_4^r); \\ m_{j3} &= \frac{0.25}{hU^e} (G_1^r - G_2^r + G_3^r - G_4^r); \\ m_{j4} &= \frac{0.25}{hV^e} (G_1^r - G_2^r - G_3^r + G_4^r); \end{aligned} \quad (12)$$

$$G_{1,2,2,4}^r = \begin{cases} I_{1,2,3,4}^r, & j = 1 \\ Q_{1,2,3,4}^r, & j = 2 \\ U_{1,2,3,4}^r, & j = 3 \\ V_{1,2,3,4}^r, & j = 4 \end{cases}$$

Точность формируемых оценок связана с погрешностями измерения параметров Стокса. При использовании цифровой обработки в реальном времени погрешность оценки параметров Стокса будет определяться ошибками квантования при аналого-цифровом преобразовании измеряемых сигналов. Быстродействующий восьмиразрядный АЦП, на вход которого поступают измеряемые сигналы с уровнями $-5 \dots 5$ В, выполняет преобразование аналогового сигнала с погрешностью квантования 39 мВ (0.39%).

Дополнительным фактором, влияющим на точность оценки значений элементов \mathbf{M}^r , является выбор углов α и β , задающих поляризацию облучающих электромагнитных волн. На рис. 1 приведены зависимости относительной ошибки измерения значений элементов ММ невзаимного

радиолокационного объекта (см. табл. 1) от угла эллиптичности облучающих радиосигналов, которые получены при $\beta = 67^\circ$ и погрешности измерения параметров Стокса 0.39%. Зависимости, представленные на рис. 1 свидетельствует, что при $\alpha = 0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ$ относительная ошибка измерения элементов \mathbf{M}^r может достигать 10%. Данное обстоятельство связано с тем, что при этих условиях значения параметров Стокса Q^e, U^e и V^e становятся близкими к 0, а формируемые согласно (12) оценки значений m_{ji} ($i = 2, 3, 4; j = 2, 3, 4$) при делении на малые величины становятся неточными. При использовании зондирующих радиоволн с углами $\alpha = 2^\circ \dots 30^\circ$ и $60^\circ \dots 88^\circ$, $\beta = 2^\circ \dots 30^\circ$ и $60^\circ \dots 88^\circ$ относительная погрешность измерения значений элементов \mathbf{M}^r не превышает 0.25%. При $\alpha = 17.5^\circ$ и 67.5° , $\beta = 17.5^\circ$ и 67.5° параметры Стокса Q^e, U^e и V^e становятся равными по модулю между собой и оценка значений элементов \mathbf{M}^r выполняется с одинаковой погрешностью.

В отличие от измерительных алгоритмов, использующих зондирующие электромагнитные волны фиксированной поляризации (обычно линейной и круговой поляризации) [5], алгоритм (12) позволяет выполнить оценку \mathbf{M}^r , облучая радиолокационную цель электромагнитными волнами с произвольными поляризациями в соответствии с (4). В тех случаях, когда радиолокационная цель обладает линейными или круговыми поляризациями нулевого приема, алгоритм (12) демонстрирует преимущество при измерении поляризационных характеристик. При формировании зондирующего неполяризованного радиосигнала на интервале времени $N L$ число поляризационных состояний возрастает до $4N$, что позволяет реализовать N -е количество раз алгоритм (12). Матричный массив, составленный из N независимых оценок \mathbf{M}^r , позволяет сформировать статистически эффективную оценку ММ стабильной точечной или составной радиолокационной цели, а в случае поляризационной нестабильности получить оценку динамики изменения рассеивающих свойств.

4. ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ МАТРИЦЫ МЮЛЛЕРА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ

При измерении матрицы рассеяния \mathbf{S}^c радиолокационным поляриметром привносятся искажения, связанные с влиянием излучающей и приемной антенн, описываемых матрицами \mathbf{T} и \mathbf{R} , а

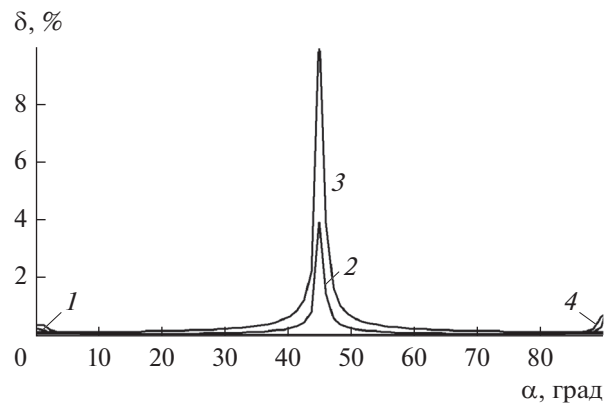


Рис. 1. Зависимости относительных ошибок оценки значений элементов матрицы Мюллера от угла эллиптичности облучающих сигналов: 1 – m_{44} , 2 – m_{33} , 3 – m_{22} , 4 – m_{34} .

также проявляется влияние паразитных связей, характеризуемых матрицей \mathbf{I} [6]. Измеренная искаженная матрица рассеяния имеет вид

$$\mathbf{S}^r = \mathbf{I} + \mathbf{R}\mathbf{S}^c\mathbf{T}. \quad (13)$$

Используя преобразование (6) для матриц, входящих в (13), осуществим переход к измеренной ММ радиолокационного объекта:

$$\mathbf{M}^r = \mathbf{J} + \mathbf{F}\mathbf{M}^c\mathbf{P}, \quad (14)$$

где \mathbf{M}^c – исходная ММ радиолокационного объекта; $\mathbf{J}, \mathbf{P}, \mathbf{F}$ – матрицы Мюллера, имеют размерность 4 на 4, при этом матрица \mathbf{P} моделирует прямую передачу сигналов между входными зажимами передающей антенны до исследуемого объекта, матрица \mathbf{F} моделирует прямую передачу сигналов между объектом и выходными зажимами приемной антенны, матрица \mathbf{J} моделирует ошибки перекрестных связей передающей и приемной антенн поляриметра. Число независимых переменных матрицы \mathbf{M}^c составляет 16, число переменных \mathbf{P} и \mathbf{F} согласно свойству симметрии (9) составляет 10.

Из (14) можем выразить неискаженную ММ радиолокационного объекта:

$$\mathbf{M}^c = \mathbf{F}^{-1}(\mathbf{M}^r - \mathbf{J})\mathbf{P}^{-1}. \quad (15)$$

Элементы матрицы \mathbf{J} могут быть определены при калибровке путем ориентирования передающей и приемной антенн поляриметра на радиолокационный объект с малой эффективной поверхностью рассеяния. Значения элементов матриц \mathbf{F}, \mathbf{P} также определяются в ходе калибровки. Вводя матрицу

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}^r - \mathbf{J}. \quad (16)$$

получим

$$\mathbf{W} = \mathbf{F}\mathbf{M}^c\mathbf{P}, \quad (17)$$

и задача калибровки сводится к определению 20 неизвестных коэффициентов f_{ij} и p_{ij} матриц \mathbf{F} и \mathbf{P} .

Для того чтобы определить матрицы \mathbf{F} и \mathbf{P} , будем использовать радиолокационный отражатель [8], обладающий известным значением эффективной поверхности рассеяния (σ_0) и переключаемыми поляризационными свойствами, соответствующими следующим матрицам рассеяния: трехгранного уголкового отражателя (TR) –

$$\delta_0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (18)$$

двухгранного уголкового отражателя с углом ориентации ребра $\varphi = 0$ ($D1$) –

$$\delta_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad (19)$$

двухгранного уголкового отражателя с углом ориентации ребра $\varphi = -45^\circ$ ($D2$) –

$$\delta_2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (20)$$

невзаимного отражателя (NR) –

$$\delta_3 = \begin{vmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

При переключении поляризационных свойств и облучении электромагнитной волной фиксированной поляризации радиолокационный отражатель формирует рассеянный сигнал, поляризационные характеристики которого соответствуют (4) [8].

Для нахождения матриц \mathbf{F} и \mathbf{P} необходима серия из 16 измерений, включающих в себя облучение калибровочной цели неполяризованными радиосигналами, формируемыми согласно (4), и измерение параметров Стокса радиосигналов, рассеянных отражателем в режиме динамического переключения своих характеристик. Полученный набор векторов Стокса позволяет выполнить оценку матриц \mathbf{M}_{TR}^r , \mathbf{M}_{D1}^r , \mathbf{M}_{D2}^r , \mathbf{M}_{NR}^r согласно

(12). Линейная комбинация измеренных матриц приводит к нахождению значений элементов матриц \mathbf{F} и \mathbf{P} :

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{M}_{TR}^r + \mathbf{M}_{D1}^r + \mathbf{M}_{D2}^r + \mathbf{M}_{NR}^r}{4} = \begin{vmatrix} f_{11}p_{11} & f_{11}p_{12} & f_{11}p_{13} & f_{11}p_{14} \\ f_{12}p_{11} & f_{12}p_{12} & f_{12}p_{13} & f_{12}p_{14} \\ f_{13}p_{11} & f_{13}p_{12} & f_{13}p_{13} & f_{13}p_{14} \\ -f_{14}p_{11} & -f_{14}p_{12} & -f_{14}p_{13} & -f_{14}p_{14} \end{vmatrix}, \quad (22)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{M}_{TR}^r + \mathbf{M}_{D1}^r - \mathbf{M}_{D2}^r - \mathbf{M}_{NR}^r}{4} = \begin{vmatrix} f_{12}p_{12} & f_{12}p_{22} & f_{12}p_{23} & f_{12}p_{24} \\ f_{22}p_{12} & f_{22}p_{22} & f_{22}p_{23} & f_{22}p_{24} \\ f_{23}p_{12} & f_{23}p_{22} & f_{23}p_{23} & f_{23}p_{24} \\ -f_{24}p_{12} & -f_{24}p_{22} & -f_{24}p_{23} & -f_{24}p_{24} \end{vmatrix}, \quad (23)$$

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{M}_{TR}^r - \mathbf{M}_{D1}^r + \mathbf{M}_{D2}^r - \mathbf{M}_{NR}^r}{4} = \begin{vmatrix} f_{13}p_{13} & f_{13}p_{23} & f_{13}p_{33} & f_{13}p_{34} \\ f_{23}p_{13} & f_{23}p_{23} & f_{23}p_{33} & f_{23}p_{34} \\ f_{33}p_{13} & f_{33}p_{23} & f_{33}p_{33} & f_{33}p_{34} \\ -f_{34}p_{13} & -f_{34}p_{23} & -f_{34}p_{33} & -f_{34}p_{34} \end{vmatrix}, \quad (24)$$

$$\mathbf{D} = \frac{\mathbf{M}_{TR}^r - \mathbf{M}_{D1}^r - \mathbf{M}_{D2}^r + \mathbf{M}_{NR}^r}{4} = \begin{vmatrix} -f_{14}p_{14} & -f_{14}p_{24} & -f_{14}p_{34} & f_{14}p_{44} \\ -f_{24}p_{14} & -f_{24}p_{24} & -f_{24}p_{34} & f_{24}p_{44} \\ -f_{34}p_{14} & -f_{34}p_{24} & -f_{34}p_{34} & f_{34}p_{44} \\ -f_{44}p_{14} & -f_{44}p_{24} & -f_{44}p_{34} & f_{44}p_{44} \end{vmatrix}. \quad (25)$$

Заменяя коэффициенты матриц \mathbf{F} и \mathbf{P} значениями элементов матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} согласно (22)–(25), запишем связь элементов матриц \mathbf{W} и \mathbf{M}^c в виде столбцов:

$$\mathbf{W} = \mathbf{Z}\mathbf{M}^c, \quad (26)$$

где

$$\mathbf{W} = \|w_{11}w_{12}w_{13}w_{14}w_{21}w_{22}w_{23}w_{24}w_{31}w_{32}w_{33}w_{34}w_{41}w_{42}w_{43}w_{44}\|^T;$$

$$\mathbf{M}^c = \|m_{11}m_{12}m_{13}m_{14}m_{21}m_{22}m_{23}m_{24}m_{31}m_{32}m_{33}m_{34}m_{41}m_{42}m_{43}m_{44}\|^T;$$

\mathbf{Z} – матрица, состоящая из субматриц \mathbf{Z}_1 , \mathbf{Z}_2 , \mathbf{Z}_3 , \mathbf{Z}_4 размерностью 8 на 8 каждая

$$\mathbf{Z} = \left\| \begin{matrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{matrix} \right\|, \quad (27)$$

где

$$Z_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & -a_{14} & a_{21} & a_{22} & a_{23} & -a_{24} \\ a_{12} & a_{11} \frac{b_{12}}{a_{21}} & a_{11} \frac{c_{12}}{a_{31}} & a_{11} \frac{-b_{14}}{a_{21}} & b_{11} & b_{12} & b_{13} & -b_{14} \\ a_{13} & a_{11} \frac{b_{13}}{a_{12}} & a_{11} \frac{c_{13}}{a_{31}} & a_{11} \frac{-c_{14}}{a_{31}} & a_{23} & b_{13} & a_{21} \frac{c_{13}}{a_{31}} & a_{21} \frac{-c_{14}}{a_{31}} \\ a_{14} & a_{11} \frac{b_{14}}{a_{21}} & a_{11} \frac{c_{14}}{a_{31}} & a_{11} \frac{-d_{14}}{a_{41}} & a_{24} & b_{14} & a_{21} \frac{c_{14}}{a_{31}} & a_{21} \frac{-d_{14}}{a_{41}} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & -a_{24} & b_{21} \frac{a_{21}}{b_{11}} & b_{21} & b_{22} \frac{a_{23}}{b_{12}} & b_{22} \frac{-a_{24}}{b_{12}} \\ a_{22} & b_{12} & b_{13} & -b_{14} & b_{21} & b_{22} & b_{23} & -b_{24} \\ a_{23} & b_{13} & a_{21} \frac{c_{13}}{a_{31}} & a_{21} \frac{-c_{14}}{a_{31}} & b_{22} \frac{a_{23}}{b_{12}} & b_{23} & b_{22} \frac{c_{23}}{b_{32}} & b_{22} \frac{-c_{24}}{b_{32}} \\ a_{24} & b_{14} & a_{21} \frac{c_{14}}{a_{31}} & a_{21} \frac{-d_{14}}{a_{41}} & b_{22} \frac{a_{24}}{b_{12}} & b_{24} & b_{22} \frac{c_{24}}{b_{32}} & b_{22} \frac{-d_{24}}{b_{42}} \end{pmatrix};$$

$$Z_2 = \begin{pmatrix} a_{31} & a_{32} & a_{33} & -a_{34} & a_{41} & a_{42} & a_{43} & -a_{44} \\ a_{32} & a_{31} \frac{b_{12}}{a_{21}} & c_{12} & a_{31} \frac{-b_{14}}{a_{21}} & -a_{42} & a_{41} \frac{-b_{12}}{a_{21}} & a_{41} \frac{-b_{13}}{a_{21}} & d_{12} \\ a_{33} & c_{12} & c_{13} & -c_{14} & -a_{43} & a_{41} \frac{-b_{13}}{a_{21}} & a_{41} \frac{-c_{13}}{a_{31}} & d_{13} \\ a_{34} & a_{31} \frac{b_{14}}{a_{21}} & c_{14} & a_{31} \frac{-d_{14}}{a_{41}} & -d_{11} & -d_{12} & -d_{13} & d_{14} \\ b_{31} \frac{a_{21}}{b_{11}} & b_{31} & c_{21} & b_{32} \frac{-a_{24}}{b_{12}} & b_{41} \frac{-a_{21}}{b_{11}} & -b_{41} & b_{42} \frac{-a_{23}}{b_{12}} & d_{21} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & -b_{34} & -b_{41} & -b_{42} & -b_{43} & d_{22} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & -c_{24} & b_{42} \frac{-a_{23}}{b_{12}} & -b_{43} & b_{43} \frac{-c_{23}}{b_{33}} & d_{23} \\ b_{32} \frac{d_{21}}{b_{42}} & b_{34} & c_{24} & b_{32} \frac{-d_{24}}{b_{42}} & -d_{21} & -d_{22} & -d_{23} & d_{24} \end{pmatrix};$$

$$Z_3 = \begin{pmatrix} a_{31} & a_{32} & a_{33} & -a_{34} & b_{31} \frac{a_{21}}{b_{11}} & b_{31} & c_{21} & b_{32} \frac{-a_{24}}{b_{12}} \\ a_{32} & a_{31} \frac{b_{12}}{a_{21}} & c_{12} & a_{31} \frac{-b_{14}}{a_{21}} & b_{31} & b_{32} & b_{33} & -b_{34} \\ a_{33} & c_{12} & c_{13} & -c_{14} & c_{21} & c_{22} & c_{23} & -c_{24} \\ a_{34} & a_{32} \frac{b_{14}}{a_{21}} & c_{14} & a_{32} \frac{-d_{14}}{a_{42}} & c_{22} \frac{a_{34}}{c_{12}} & b_{34} & c_{24} & c_{22} \frac{-d_{34}}{c_{42}} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & -a_{44} & b_{41} \frac{a_{21}}{b_{11}} & a_{22} & b_{41} \frac{a_{23}}{b_{11}} & -d_{21} \\ a_{42} & d_{12} \frac{b_{42}}{d_{22}} & d_{12} \frac{b_{43}}{d_{22}} & -d_{12} & b_{41} & b_{42} & b_{43} & -d_{22} \\ a_{43} & d_{13} \frac{c_{42}}{d_{33}} & d_{13} \frac{c_{43}}{d_{33}} & -d_{13} & b_{43} \frac{a_{23}}{b_{13}} & b_{43} & b_{43} \frac{c_{23}}{b_{33}} & -d_{23} \\ a_{44} & d_{12} & d_{13} & -d_{14} & d_{21} & d_{22} & d_{23} & -d_{24} \end{pmatrix};$$

Таблица 2. Расчет матрицы Мюллера радиолокационных объектов

Параметр	Двухгранный угловой отражатель ($\varphi = 20^\circ$)	Невзаимный отражатель ($\gamma = 20^\circ$)
S	$\begin{vmatrix} 0.766 & -0.643 \\ -0.643 & -0.766 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0.766 & -0.643 \\ 0.643 & -0.766 \end{vmatrix}$
M^c	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.174 & -0.985 & 0 \\ 0 & -0.985 & -0.174 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.174 & -0.985 & 0 \\ 0 & 0.985 & 0.174 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$
F	$\begin{vmatrix} 1 & 0.02 & 0.03 & 0.01 \\ 0.02 & 1 & 0.02 & 0.02 \\ 0.03 & 0.02 & 1 & 0.1 \\ -0.01 & -0.02 & -0.1 & 1 \end{vmatrix}$	
P	$\begin{vmatrix} 1 & 0.02 & 0.05 & 0.01 \\ 0.02 & 1 & 0.1 & 0.02 \\ 0.05 & 0.1 & 1 & 0.05 \\ -0.01 & -0.02 & -0.05 & 1 \end{vmatrix}$	
J	$\begin{vmatrix} 0.02 & 0 & 0.01 & 0.02 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0.01 \\ -0.01 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0.02 & 0.01 & 0 & 0.02 \end{vmatrix}$	
M^r	$\begin{vmatrix} 1.018 & -0.008 & 0.033 & 0.018 \\ -0.026 & 0.066 & -0.971 & -0.056 \\ -0.008 & -0.998 & -0.275 & -0.129 \\ 0.024 & 0.129 & 0.096 & -0.976 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1.02 & 0.051 & 0.048 & 0.04 \\ -0.025 & 0.105 & -0.962 & -0.015 \\ 0.046 & 1.002 & 0.259 & 0.128 \\ -0.002 & -0.112 & -0.058 & 1.018 \end{vmatrix}$
M^r_{TR}	$\begin{vmatrix} 1.002 & 0.043 & 0.082 & 0.022 \\ 0.041 & 1.002 & 0.12 & 0.041 \\ 0.079 & 0.119 & 0.999 & 0.151 \\ -0.025 & -0.05 & -0.152 & 0.995 \end{vmatrix}$	
M^r_{D1}	$\begin{vmatrix} 0.999 & 0.037 & 0.023 & -0.001 \\ 0.039 & 0.999 & 0.082 & -8 \times 10^{-4} \\ -0.019 & -0.077 & -0.991 & -0.149 \\ 0.005 & 0.01 & 0.148 & -0.995 \end{vmatrix}$	
M^r_{D2}	$\begin{vmatrix} 1.001 & 0.003 & 0.079 & 0.001 \\ 0.001 & -0.997 & -0.078 & -0.039 \\ 0.081 & 0.083 & 1.005 & -0.05 \\ -0.005 & 0.03 & -0.048 & -1.005 \end{vmatrix}$	
M^r_{NR}	$\begin{vmatrix} 0.998 & -0.003 & 0.018 & 0.018 \\ -0.002 & -1.002 & 0.120 & -8 \times 10^{-4} \\ -0.021 & -0.121 & -1.005 & 0.05 \\ -0.015 & 0.01 & 0.052 & 1.005 \end{vmatrix}$	

Таблица 2. Продолжение

Параметр	Двухгранный угловой отражатель ($\varphi = 20^\circ$)	Невзаимный отражатель ($\gamma = 20^\circ$)																																																																																																
Z_1	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>-0.01</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>1</td><td>0.1</td><td>-0.02</td></tr> <tr><td>0.05</td><td>0.1</td><td>1</td><td>-0.05</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>1</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.02</td></tr> </table>	1	0.02	0.05	-0.01	0.02	1	0.1	-0.02	0.05	0.1	1	-0.05	0.01	0.02	0.05	1	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	0.001	0.002	0.02	-0.001	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	<table border="1"> <tr><td>0.02</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td><td>0.05</td><td>0.1</td><td>1</td><td>-0.05</td></tr> <tr><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.02</td><td>0.01</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>1</td></tr> </table>	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	0.001	0.002	0.02	-0.001	0.05	0.1	1	-0.05	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	0.01	0.02	0.05	1																																
1	0.02	0.05	-0.01																																																																																															
0.02	1	0.1	-0.02																																																																																															
0.05	0.1	1	-0.05																																																																																															
0.01	0.02	0.05	1																																																																																															
0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}																																																																																															
4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}																																																																																															
0.001	0.002	0.02	-0.001																																																																																															
2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02																																																																																															
0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}																																																																																											
4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}																																																																																											
0.001	0.002	0.02	-0.001	0.05	0.1	1	-0.05																																																																																											
2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	0.01	0.02	0.05	1																																																																																											
Z_2	<table border="1"> <tr><td>0.03</td><td>6×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-3×10^{-4}</td></tr> <tr><td>6×10^{-4}</td><td>0.03</td><td>0.003</td><td>-6×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.003</td><td>0.03</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>3×10^{-4}</td><td>6×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.03</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.02</td></tr> </table>	0.03	6×10^{-4}	0.001	-3×10^{-4}	6×10^{-4}	0.03	0.003	-6×10^{-4}	0.001	0.003	0.03	-0.001	3×10^{-4}	6×10^{-4}	0.001	0.03	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	0.001	0.002	0.02	-0.001	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	<table border="1"> <tr><td>-0.01</td><td>-2×10^{-4}</td><td>-5×10^{-4}</td><td>10^{-4}</td><td>-0.01</td><td>-2×10^{-4}</td><td>-5×10^{-4}</td><td>10^{-4}</td></tr> <tr><td>2×10^{-4}</td><td>0.01</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td><td>2×10^{-4}</td><td>0.01</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>5×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.01</td><td>-5×10^{-4}</td><td>5×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.01</td><td>-5×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>2×10^{-4}</td><td>5×10^{-4}</td><td>0.01</td><td>2×10^{-4}</td><td>5×10^{-4}</td><td>0.01</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>-2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>-0.001</td><td>-2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>-0.001</td><td>-2×10^{-4}</td><td>-2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.02</td><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.020</td></tr> </table>	-0.01	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	10^{-4}	-0.01	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	10^{-4}	2×10^{-4}	0.01	0.001	-2×10^{-4}	2×10^{-4}	0.01	0.001	-2×10^{-4}	5×10^{-4}	0.001	0.01	-5×10^{-4}	5×10^{-4}	0.001	0.01	-5×10^{-4}	0.01	2×10^{-4}	5×10^{-4}	0.01	2×10^{-4}	5×10^{-4}	0.01	0.01	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	-0.001	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	-0.001	-2×10^{-4}	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	0.001	0.002	0.02	-0.001	0.001	0.002	0.02	-0.001	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.020
0.03	6×10^{-4}	0.001	-3×10^{-4}																																																																																															
6×10^{-4}	0.03	0.003	-6×10^{-4}																																																																																															
0.001	0.003	0.03	-0.001																																																																																															
3×10^{-4}	6×10^{-4}	0.001	0.03																																																																																															
0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}																																																																																															
4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}																																																																																															
0.001	0.002	0.02	-0.001																																																																																															
2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02																																																																																															
-0.01	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	10^{-4}	-0.01	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	10^{-4}																																																																																											
2×10^{-4}	0.01	0.001	-2×10^{-4}	2×10^{-4}	0.01	0.001	-2×10^{-4}																																																																																											
5×10^{-4}	0.001	0.01	-5×10^{-4}	5×10^{-4}	0.001	0.01	-5×10^{-4}																																																																																											
0.01	2×10^{-4}	5×10^{-4}	0.01	2×10^{-4}	5×10^{-4}	0.01	0.01																																																																																											
-2×10^{-4}	4×10^{-4}	-0.001	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	-0.001	-2×10^{-4}	-2×10^{-4}																																																																																											
4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}																																																																																											
0.001	0.002	0.02	-0.001	0.001	0.002	0.02	-0.001																																																																																											
2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.020																																																																																											
Z_3	<table border="1"> <tr><td>0.03</td><td>6×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-3×10^{-4}</td></tr> <tr><td>6×10^{-4}</td><td>0.030</td><td>0.003</td><td>-6×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.003</td><td>0.03</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>3×10^{-4}</td><td>6×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.03</td></tr> <tr><td>-0.010</td><td>-2×10^{-4}</td><td>-5×10^{-4}</td><td>10^{-4}</td></tr> <tr><td>-2×10^{-4}</td><td>-0.010</td><td>-0.001</td><td>2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>-5×10^{-4}</td><td>-0.001</td><td>-0.010</td><td>5×10^{-4}</td></tr> <tr><td>-1×10^{-4}</td><td>-2×10^{-4}</td><td>-5×10^{-4}</td><td>-0.01</td></tr> </table>	0.03	6×10^{-4}	0.001	-3×10^{-4}	6×10^{-4}	0.030	0.003	-6×10^{-4}	0.001	0.003	0.03	-0.001	3×10^{-4}	6×10^{-4}	0.001	0.03	-0.010	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	10^{-4}	-2×10^{-4}	-0.010	-0.001	2×10^{-4}	-5×10^{-4}	-0.001	-0.010	5×10^{-4}	-1×10^{-4}	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	-0.01	<table border="1"> <tr><td>0.02</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>-2×10^{-4}</td></tr> <tr><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.02</td><td>0.002</td><td>-4×10^{-4}</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.02</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.02</td><td>2×10^{-4}</td><td>4×10^{-4}</td><td>0.001</td><td>0.020</td></tr> </table>	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	0.001	0.002	0.02	-0.001	0.001	0.002	0.02	-0.001	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.020																																
0.03	6×10^{-4}	0.001	-3×10^{-4}																																																																																															
6×10^{-4}	0.030	0.003	-6×10^{-4}																																																																																															
0.001	0.003	0.03	-0.001																																																																																															
3×10^{-4}	6×10^{-4}	0.001	0.03																																																																																															
-0.010	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	10^{-4}																																																																																															
-2×10^{-4}	-0.010	-0.001	2×10^{-4}																																																																																															
-5×10^{-4}	-0.001	-0.010	5×10^{-4}																																																																																															
-1×10^{-4}	-2×10^{-4}	-5×10^{-4}	-0.01																																																																																															
0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}	0.02	4×10^{-4}	0.001	-2×10^{-4}																																																																																											
4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}	4×10^{-4}	0.02	0.002	-4×10^{-4}																																																																																											
0.001	0.002	0.02	-0.001	0.001	0.002	0.02	-0.001																																																																																											
2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.02	2×10^{-4}	4×10^{-4}	0.001	0.020																																																																																											
Z_4	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>-0.01</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>1</td><td>0.10</td><td>-0.02</td></tr> <tr><td>0.05</td><td>0.10</td><td>1</td><td>-0.05</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>1</td></tr> <tr><td>-0.10</td><td>-0.002</td><td>-0.005</td><td>0.001</td></tr> <tr><td>-0.002</td><td>-0.10</td><td>-0.01</td><td>0.002</td></tr> <tr><td>-0.005</td><td>-0.01</td><td>-0.10</td><td>0.005</td></tr> <tr><td>-0.001</td><td>-0.002</td><td>-0.005</td><td>-0.10</td></tr> </table>	1	0.02	0.05	-0.01	0.02	1	0.10	-0.02	0.05	0.10	1	-0.05	0.01	0.02	0.05	1	-0.10	-0.002	-0.005	0.001	-0.002	-0.10	-0.01	0.002	-0.005	-0.01	-0.10	0.005	-0.001	-0.002	-0.005	-0.10	<table border="1"> <tr><td>0.10</td><td>0.002</td><td>0.005</td><td>-0.001</td><td>0.10</td><td>0.002</td><td>0.005</td><td>-0.001</td></tr> <tr><td>0.002</td><td>0.10</td><td>0.01</td><td>-0.002</td><td>0.002</td><td>0.10</td><td>0.01</td><td>-0.002</td></tr> <tr><td>0.005</td><td>0.01</td><td>0.1</td><td>-0.005</td><td>0.005</td><td>0.01</td><td>0.1</td><td>-0.005</td></tr> <tr><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.005</td><td>0.10</td><td>0.001</td><td>0.002</td><td>0.005</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>-0.01</td><td>1</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>-0.01</td></tr> <tr><td>0.02</td><td>1</td><td>0.10</td><td>-0.02</td><td>0.02</td><td>1</td><td>0.10</td><td>-0.02</td></tr> <tr><td>0.05</td><td>0.10</td><td>1</td><td>-0.05</td><td>0.05</td><td>0.10</td><td>1</td><td>-0.05</td></tr> <tr><td>0.01</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>1</td><td>0.01</td><td>0.02</td><td>0.05</td><td>1</td></tr> </table>	0.10	0.002	0.005	-0.001	0.10	0.002	0.005	-0.001	0.002	0.10	0.01	-0.002	0.002	0.10	0.01	-0.002	0.005	0.01	0.1	-0.005	0.005	0.01	0.1	-0.005	0.001	0.002	0.005	0.10	0.001	0.002	0.005	0.10	1	0.02	0.05	-0.01	1	0.02	0.05	-0.01	0.02	1	0.10	-0.02	0.02	1	0.10	-0.02	0.05	0.10	1	-0.05	0.05	0.10	1	-0.05	0.01	0.02	0.05	1	0.01	0.02	0.05	1
1	0.02	0.05	-0.01																																																																																															
0.02	1	0.10	-0.02																																																																																															
0.05	0.10	1	-0.05																																																																																															
0.01	0.02	0.05	1																																																																																															
-0.10	-0.002	-0.005	0.001																																																																																															
-0.002	-0.10	-0.01	0.002																																																																																															
-0.005	-0.01	-0.10	0.005																																																																																															
-0.001	-0.002	-0.005	-0.10																																																																																															
0.10	0.002	0.005	-0.001	0.10	0.002	0.005	-0.001																																																																																											
0.002	0.10	0.01	-0.002	0.002	0.10	0.01	-0.002																																																																																											
0.005	0.01	0.1	-0.005	0.005	0.01	0.1	-0.005																																																																																											
0.001	0.002	0.005	0.10	0.001	0.002	0.005	0.10																																																																																											
1	0.02	0.05	-0.01	1	0.02	0.05	-0.01																																																																																											
0.02	1	0.10	-0.02	0.02	1	0.10	-0.02																																																																																											
0.05	0.10	1	-0.05	0.05	0.10	1	-0.05																																																																																											
0.01	0.02	0.05	1	0.01	0.02	0.05	1																																																																																											
W	<table border="1"> <tr><td>0.998</td><td>-0.0084</td><td>0.023</td><td>-0.0017</td></tr> <tr><td>-0.026</td><td>0.056</td><td>-0.971</td><td>-0.066</td></tr> <tr><td>0.0017</td><td>-0.998</td><td>-0.285</td><td>-0.129</td></tr> <tr><td>0.0034</td><td>0.119</td><td>0.096</td><td>-0.996</td></tr> </table>	0.998	-0.0084	0.023	-0.0017	-0.026	0.056	-0.971	-0.066	0.0017	-0.998	-0.285	-0.129	0.0034	0.119	0.096	-0.996	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>0.051</td><td>0.038</td><td>0.020</td></tr> <tr><td>-0.025</td><td>0.095</td><td>-0.962</td><td>-0.025</td></tr> <tr><td>0.056</td><td>1.002</td><td>0.249</td><td>0.128</td></tr> <tr><td>-0.022</td><td>-0.122</td><td>-0.058</td><td>0.998</td></tr> </table>	1	0.051	0.038	0.020	-0.025	0.095	-0.962	-0.025	0.056	1.002	0.249	0.128	-0.022	-0.122	-0.058	0.998																																																																
0.998	-0.0084	0.023	-0.0017																																																																																															
-0.026	0.056	-0.971	-0.066																																																																																															
0.0017	-0.998	-0.285	-0.129																																																																																															
0.0034	0.119	0.096	-0.996																																																																																															
1	0.051	0.038	0.020																																																																																															
-0.025	0.095	-0.962	-0.025																																																																																															
0.056	1.002	0.249	0.128																																																																																															
-0.022	-0.122	-0.058	0.998																																																																																															

Таблица 2. Окончание

Параметр	Двухгранный угловой отражатель ($\varphi = 20^\circ$)	Невзаимный отражатель ($\gamma = 20^\circ$)
M	$\begin{vmatrix} 1 & -3.0 \times 10^{-6} & -10^{-5} & -1.45 \times 10^{-6} \\ -3.8 \times 10^{-6} & 0.174 & -0.985 & 2.80 \times 10^{-6} \\ -6.0 \times 10^{-6} & -0.985 & -0.174 & 4.40 \times 10^{-8} \\ 1.3 \times 10^{-6} & -2.0 \times 10^{-8} & -6.4 \times 10^{-8} & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 3.0 \times 10^{-6} & 9.8 \times 10^{-6} & 1.45 \times 10^{-6} \\ 3.8 \times 10^{-6} & 0.174 & -0.985 & -2.80 \times 10^{-8} \\ 6.0 \times 10^{-6} & 0.985 & 0.174 & -4.40 \times 10^{-8} \\ -1.3 \times 10^{-6} & 2.0 \times 10^{-8} & 6.4 \times 10^{-8} & 1 \end{vmatrix}$

$$\mathbf{Z}_4 = \begin{vmatrix} c_{31} \frac{a_{31}}{c_{11}} & c_{31} \frac{a_{32}}{c_{11}} & c_{31} & c_{31} \frac{-a_{34}}{c_{11}} & c_{41} \frac{-a_{31}}{c_{11}} & c_{41} \frac{-a_{32}}{c_{11}} & -c_{41} & d_{31} \\ c_{32} \frac{a_{32}}{c_{12}} & c_{32} \frac{b_{32}}{c_{22}} & c_{32} & c_{32} \frac{-b_{34}}{c_{22}} & c_{42} \frac{-a_{32}}{c_{12}} & c_{42} \frac{-b_{32}}{c_{22}} & -c_{42} & d_{32} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & -c_{34} & -c_{41} & -c_{42} & -c_{43} & d_{33} \\ c_{32} \frac{a_{34}}{c_{12}} & c_{34} \frac{b_{34}}{c_{24}} & c_{34} & c_{34} \frac{-d_{34}}{c_{44}} & -d_{31} & -d_{32} & -d_{33} & d_{34} \\ c_{41} \frac{a_{31}}{c_{11}} & c_{41} \frac{a_{32}}{c_{11}} & c_{41} & -d_{31} & d_{41} \frac{-a_{41}}{d_{11}} & d_{41} \frac{-a_{42}}{d_{11}} & d_{41} \frac{-a_{43}}{d_{11}} & d_{41} \\ c_{42} \frac{a_{32}}{c_{12}} & c_{42} \frac{b_{32}}{c_{22}} & c_{42} & -d_{32} & d_{42} \frac{-b_{41}}{d_{22}} & d_{42} \frac{-b_{42}}{d_{22}} & d_{42} \frac{-b_{43}}{d_{22}} & d_{42} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & -c_{44} & d_{43} \frac{-c_{41}}{d_{33}} & d_{43} \frac{-c_{42}}{d_{33}} & d_{43} \frac{-c_{43}}{d_{33}} & d_{43} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & -d_{34} & -d_{41} & -d_{42} & -d_{43} & d_{44} \end{vmatrix}.$$

Из выражения (25) следует:

$$\mathbf{M}^c = \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{W}. \quad (28)$$

В качестве примера устранения искажений, вносимых передающей и приемной антеннами, рассмотрим примеры численного расчета ММ (без учета влияния ошибок измерения параметров Стокса):

- 1) невзаимного отражателя с $\gamma = 20^\circ$ (см. табл. 1);
- 2) двухгранного углового отражателя с $\varphi = 20^\circ$ (см. табл. 1).

Уровни боковых лепестков передающей и приемной антенн зададим со значениями $-20 \dots -10$ дБ относительно главного лепестка диаграммы направленности. Матрицу перекрестных связей зададим со значениями $-20 \dots -17$ дБ относительно коэффициента усиления передающей и приемной антенн. В табл. 2 приведен расчет ММ двухгранного углового и невзаимного отражателей до и после компенсации искажений с использованием данных калибровки и соотношений (6), (12), (16), (22)–(28).

Данные табл. 2 свидетельствуют, что относительная погрешность измерения ММ обоих радиолокационных объектов без компенсации искажений составляет от 2 до 18%. Использование радиолокационного отражателя с управляемыми

поляризационными свойствами и решение матричного уравнения (14) позволяет устранить влияние передающей и приемной антенн и вносимых перекрестных связей на измерение поляризационных характеристик. Относительная погрешность оценки значений элементов ММ после компенсации искажений составляет $10^{-6} \dots 10^{-4}\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование неполяризованных зондирующих радиоволн позволяет выполнить измерение матрицы Мюллера радиолокационной цели без учета свойств симметрии. Зондирующие неполяризованные радиоволны, формируемые при векторном сложении поляризованных волн с углами эллиптичности 17.5° , 67.5° и ориентации $\beta = 17.5^\circ$, 67.5° , обеспечивают одинаковую точность измерения значений элементов матрицы Мюллера радиолокационной цели.

Использование радиолокационного отражателя с переключаемыми поляризационными свойствами и соотношения (22)–(28) позволяют устранить искажения, вносимые передающей и приемной антеннами в результат измерения матрицы Мюллера радиолокационного объекта. При измерении поляризационных характеристик двухгранного углового и невзаимного отражателей

относительная погрешность измерения значений элементов матрицы Мюллера после устранения искажений составляет $10^{-6} \dots 10^{-4}\%$ без учета влияния ошибок измерения параметров Стокса.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М: Радиотехника, 2007.
2. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М: Радиотехника, 2008.
3. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966.
4. Гусев К.Г., Филатов А.Д., Соколов А.П. Поляризационная модуляция. М: Сов. радио, 1974.
5. Кауль Б.В., Самохвалов И.В. // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Спектр, 1997. С. 34.
6. Yueh S.H., Kong J.A., Barnes R.M., Shin R.T. // J. Electromagnetic Waves and Applications. 1990. V. 4. № 1. P. 27.
7. Izumi I Y., Demirci S., Baharuddin M.Z. et al. // Progress in Electromagnetics Research B. 2017. V. 73. P. 79.
8. Шошин Е.Л. // Измерит. техника. 2021. № 3. С. 45.
9. Шошин Е.Л. // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 6. С. 33.
10. Татаринев В.Н., Татаринев С.В., Лигтхарт Л.П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и ее преобразование. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2006.
11. Van De Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. N.Y.: Dover Publ. Inc, 1981.
12. Хлусов В.А. // Оптика атмосферы. 1995. Т. 8. № 10. С. 1441.