

УДК 621.396.96

Е.П. ШАПОВАЛ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО ИНВАРИАНТНЫМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОБЪЕКТА

В целях адекватной интерпретации данных дистанционного зондирования выполнен теоретический анализ информативности инвариантных поляриметрических характеристик радиолокационного объекта. Получены математические соотношения для собственных чисел и собственных векторов поляризационной матрицы рассеяния, представленных функциями параметров двухдипольной модели. Разработан алгоритм восстановления поляриметрической информации о радиолокационном объекте по данным дистанционного зондирования, в основу которого положена традиционная двухдипольная модель и представление поляризационной матрицы рассеяния объекта в собственном базисе.

Ключевые слова: поляризация, собственные числа, собственные вектора, поляризационная матрица рассеяния.

Введение

Методы радиолокационной поляриметрии находят всё более широкое применение в системах активного дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей. Радиолокационные поляриметры позволяют организовать эффективное подавление помеховых сигналов от подстилающей поверхности и гидрометеообразований [1, 2], расширить признаковое пространство для принятия решений в системах распознавания [3], выделять информативные признаки, связанные с геометрическими и электрофизическими особенностями радиолокационных объектов [4, 5]. К основным областям применения получаемых поляриметрических данных относятся изучение морской поверхности, динамики объема морских льдов, мониторинг таких процессов, как обезлесение и опустынивание, сельское хозяйство и многое другое [2 – 6].

Об актуальности использования радиолокационной поляриметрии свидетельствует множество запущенных за последние пять лет спутников, таких как TerraSAR X, ENVISAT, ALOS.

Но в настоящее время существует проблема адекватного восстановления поляриметрической информации по получаемым многоканальным изображениям [6 – 8].

Целью работы является теоретический анализ информативности поляризационных характеристик радиолокационных объектов и разработка алгоритма восстановления поляриметрической информации о радиолокационном объекте по поляризационной матрице рассеяния.

1. Поляризация радиолокационных сигналов

Известно [9], что распространяющаяся в пространстве электромагнитная волна может быть описана комплексными числами – проекциями комплексного вектора \vec{E} на орты ортогонального поляризационного базиса $\{x, y\}$:

$$\begin{aligned} \dot{E}_X &= E_{X\max} \cdot e^{j(\omega t + \psi_X)}, \\ \dot{E}_Y &= E_{Y\max} \cdot e^{j(\omega t + \psi_Y)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где ψ_X, ψ_Y – фазовые углы компонент \dot{E}_X и \dot{E}_Y соответственно (рис. 1).

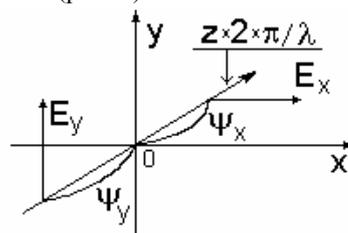


Рис. 1. Поляризационные компоненты-ЭМВ

Комплексные амплитуды \dot{E}_X и \dot{E}_Y ортогонально поляризованных компонент (1) образуют вектор поляризации

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_X \cdot e^{j\psi_X} \\ E_Y \cdot e^{j\psi_Y} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для количественного описания поляризации электромагнитной волны используются геометрические параметры эллипса (рис. 2):

– угол эллиптичности

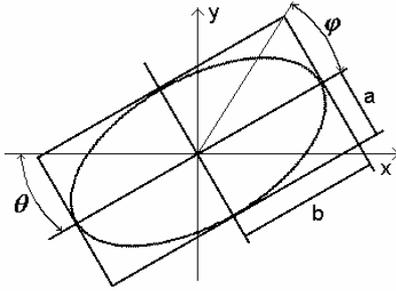


Рис. 2. Геометрические параметры поляризационного эллипса

$$\varphi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right); \quad \varphi \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right], \quad (3)$$

где b и a – малая и большая полуоси эллипса (угол эллиптичности φ принимают положительным для правого направления вращения вектора \vec{E});

– угол ориентации θ – угол между ортом \vec{n}_x и большой полуосью эллипса, ограниченный пределами $\theta \in [0.. \pi]$.

Известно [10], что отраженный от радиолокационного объекта сигнал \dot{E}_R вида (2) связан с излученным сигналом \dot{E}_S комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМР) \dot{S} размером 2×2 как

$$\dot{E}_R = \dot{S} \cdot \dot{E}_S. \quad (4)$$

ПМР \dot{S} описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях a, b :

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{aa} & \dot{S}_{ab} \\ \dot{S}_{ba} & \dot{S}_{bb} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

а квадраты модулей ее элементов соответствуют эффективным поверхностям рассеяния объекта. Для моностатической радиолокации $\dot{S}_{ab} = \dot{S}_{ba}$ [10]. В матрице (5) содержится вся информация об отражающих свойствах объекта при заданной частоте зондирования и фиксированном ракурсе наблюдения, однако значения ее элементов зависят от выбора ортогональных поляризаций a, b . Обычно используется вертикальная (V) и горизонтальная (H) поляризации.

Поляризационными инвариантами радиолокационного объекта являются собственные числа матрицы (5) λ_1 и λ_2 [10]:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Характеристическое уравнение для (5) задается в виде

$$\dot{S} \times \vec{x} = \lambda \times \vec{x}. \quad (7)$$

Собственный вектор, соответствующий (6), при этом имеет вид

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \Theta \\ j \sin \Theta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где Φ и Θ – поляризационные параметры собственной поляризации объекта.

Физически собственные поляризации характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. Т.е. при облучении объекта сигналом его собственной поляризации амплитуда отраженного сигнала будет максимальна [11].

Традиционно считается, что собственные поляризации соответствуют собственным числам (8) матрицы (6).

2. Двухдипольная модель

Как известно, в большинстве случаев реальные цели представляют собой достаточно сложные объекты, поляризационные свойства которых не поддаются теоретическому расчету и, как правило, определяются экспериментально. При экспериментальном подходе к изучению радиолокационных целей большое значение приобретают математические модели, позволяющие тем или иным образом описать сложный физический процесс рассеяния электромагнитных волн реальными отражающими объектами.

ПМР (5) является математической моделью, описывающей поляризационные свойства цели. Но представление радиолокационного объекта с помощью ПМР в общем случае не даёт наглядного представления о поляризационных свойствах цели. В [11] показано, что объект ДЗ с произвольными поляризационными характеристиками можно представить в виде двух линейных электрических вибраторов (см. рис. 3).

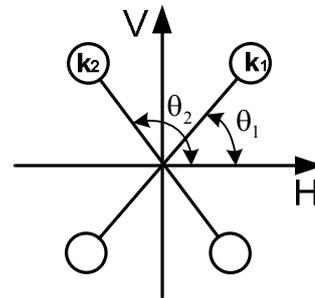


Рис. 3. Двухдипольная модель стабильной радиолокационной цели

В таком случае элементы матрицы рассеяния в системе координат $\{H, V\}$ могут быть представлены как функции параметров модели [11]:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{\text{HH}} &= k_1 \cos^2 \theta_1 e^{j\psi_1} + k_2 \cos^2 \theta_2 e^{j\psi_2}; \\ \dot{s}_{\text{VV}} &= k_1 \sin^2 \theta_1 e^{j\psi_1} + k_2 \sin^2 \theta_2 e^{j\psi_2}; \\ \dot{s}_{\text{HV}} &= 1/2(k_1 \sin 2\theta_1 e^{j\psi_1} + k_2 \sin 2\theta_2 e^{j\psi_2}), \end{aligned} \quad (9)$$

где k_2 и k_1 – постоянные коэффициенты, представляющие собой максимальные значения коэффициентов рассеяния (отражения) вибраторов;

θ_1 и θ_2 – ориентация диполей относительно выбранной системы координат;

ψ_1 и ψ_2 – фазы колебаний сигналов, отраженных диполями.

Данная модель поляризационных характеристик широко используется в аналитических исследованиях [12].

3. Аналитическое исследование математических моделей

Как было показано выше, собственные числа и собственные вектора являются инвариантными характеристиками ПМР. В [11] было предложено представлять элементы ПМР как функции параметров двухдипольной модели. В таком случае инвариантные характеристики ПМР могут быть также описаны как функции параметров двухдипольной системы.

Собственные числа и вектора для ПМР (9) могут быть получены по стандартной методике нахождения собственных чисел и векторов [8, 9]. Собственные числа могут быть определены из уравнения

$$(\dot{s}_{\text{HH}} - \lambda)(\dot{s}_{\text{VV}} - \lambda) - \dot{s}_{\text{VH}}\dot{s}_{\text{HV}} = 0, \quad (10)$$

откуда следует

$$\lambda_{1,2} = \frac{\dot{s}_{\text{VV}} + \dot{s}_{\text{HH}} \pm \sqrt{d}}{2}, \quad (11)$$

где $d = (\dot{s}_{\text{VV}} + \dot{s}_{\text{HH}})^2 + 4(\dot{s}_{\text{VH}}^2 - \dot{s}_{\text{VV}}\dot{s}_{\text{HH}})$.

Подставив значения ПМР (9) в (11) после преобразований получим

$$\lambda_{1,2} = \frac{k_1 e^{j\psi_1} + k_2 e^{j\psi_2} \pm \sqrt{D}}{2}, \quad (12)$$

где $D = k_1^2 e^{j2\psi_1} + k_2^2 e^{j2\psi_2} + 2k_1 k_2 e^{j(\psi_1 + \psi_2)} \cos(2(\theta_1 - \theta_2))$.

Из соотношения (12) следует

$$\lambda_1 + \lambda_2 = k_1 e^{j\psi_1} + k_2 e^{j\psi_2}, \quad (13)$$

и

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \sqrt{D}. \quad (14)$$

Преобразуем выражение (13) следующим образом:

$$\begin{aligned} (\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_2)^* &= \\ &= k_1^2 + k_2^2 + 2k_1 k_2 \cos(\psi_1 - \psi_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Также выполним преобразования в уравнении (14):

$$\begin{aligned} (\lambda_1 - \lambda_2)^2 &= (\lambda_1 + \lambda_2)^2 - 2k_1 k_2 e^{j\psi_1} e^{j\psi_2} + \\ &+ 2k_1 k_2 e^{j\psi_1} e^{j\psi_2} \cos 2(\theta_1 - \theta_2). \end{aligned} \quad (16)$$

Раскрыв скобки в уравнении (16), получим:

$$k_1 k_2 e^{j\psi_1} e^{j\psi_2} \sin^2(\theta_1 - \theta_2) = \lambda_1 \lambda_2. \quad (17)$$

Таким образом, из уравнения (17) следует:

$$k_1 k_2 \sin^2(\theta_1 - \theta_2) = |\lambda_1| |\lambda_2|, \quad (18)$$

и

$$\psi_1 + \psi_2 = \arg(\lambda_1) + \arg(\lambda_2). \quad (19)$$

Если диполи ортогональны $\theta_2 = \theta_1 + 90^\circ$, то выражение (12) преобразуется к виду

$$\lambda_{1,2} = k_{1,2} e^{j\psi_{1,2}}. \quad (20)$$

Собственные вектора могут быть определены из системы уравнений

$$\begin{cases} (\dot{s}_{\text{VV}} - \lambda)\eta_1 + \dot{s}_{\text{VH}}\eta_2 = 0; \\ \dot{s}_{\text{HV}}\eta_1 + (\dot{s}_{\text{HH}} - \lambda)\eta_2 = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Для однозначного решения системы уравнений (21) введём дополнительное условие

$$\sqrt{\eta_1^2 + \eta_2^2} = 1. \quad (22)$$

На основании условия (22) предположим, что

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \cos \alpha, \\ \eta_2 &= \sin \alpha, \end{aligned} \quad (23)$$

где α – некоторый угол.

Тогда система уравнений (21) примет вид

$$\begin{cases} (\dot{s}_{\text{VV}} - \lambda) \cos \alpha + \dot{s}_{\text{VH}} \sin \alpha = 0; \\ \dot{s}_{\text{HV}} \cos \alpha + (\dot{s}_{\text{HH}} - \lambda) \sin \alpha = 0. \end{cases} \quad (24)$$

В результате решения системы уравнений (24) получены следующие соотношения для собственных векторов:

$$\eta_1 = \sin \left(\arctg \left[-\frac{a}{b \mp \sqrt{D}} \right] \right) \quad (25)$$

или

$$\eta_1 = \sin \left(\arctg \left[-\frac{b \pm \sqrt{D}}{a} \right] \right); \quad (26)$$

$$\eta_2 = \cos \left(\arctg \left[-\frac{a}{b \mp \sqrt{D}} \right] \right) \quad (27)$$

или

$$\eta_2 = \cos \left(\arctg \left[-\frac{b \pm \sqrt{D}}{a} \right] \right); \quad (28)$$

где $a = k_1 e^{j\psi_1} \sin(2\theta_1) + k_2 e^{j\psi_2} \sin(2\theta_2)$,

$b = k_1 e^{j\psi_1} \cos(2\theta_1) + k_2 e^{j\psi_2} \cos(2\theta_2)$.

Если диполи ортогональны, то выражения (25) – (28) преобразуются к виду

$$\eta_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{pmatrix}, \quad (29)$$

$$\eta_2 = \begin{pmatrix} -\sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{pmatrix}. \quad (30)$$

4. Восстановление поляриметрической информации о радиолокационном объекте по его ПМР

Как показано в [11], двухдипольная модель полностью описывает поляризационные свойства стабильной радиолокационной цели, то есть параметры модели функционально связаны с элементами матрицы рассеяния цели \dot{s}_{HH} , \dot{s}_{VV} , \dot{s}_{HV} . Основываясь на соотношениях (9) по известным элементам ПМР можно рассчитать параметры двухдипольной модели k_2 , k_1 , θ_1 , θ_2 , ψ_1 , ψ_2 .

Поскольку промежуточные выкладки достаточно объёмны, приведём лишь окончательные аналитические выражения.

При известных \dot{s}_{HH} , \dot{s}_{VV} , λ_1 и λ_2 разность фаз определяется как:

$$\Delta\psi = \arccos[\{c - h\} / 4|\lambda_1||\lambda_2|], \quad (31)$$

где $\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2$;

$$c = (\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_2)^*;$$

$$h = (\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV})(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV})^* + 4\dot{s}_{VH}\dot{s}_{VH}^*.$$

Уравнение (31) имеет решение, если $|\dot{\lambda}_1| \neq 0$ или $|\dot{\lambda}_2| \neq 0$, что возможно лишь при $k_1 \neq 0$ или $k_2 \neq 0$. Данный частный случай будет рассмотрен ниже.

Учитывая (19), ψ_1 и ψ_2 могут быть однозначно определены как:

$$\begin{aligned} \psi_1 = \\ = 0,5 \left(\arccos \left[\frac{c - h}{4|\lambda_1||\lambda_2|} \right] + \arg(\lambda_1) + \arg(\lambda_2) \right), \end{aligned} \quad (32)$$

$$\text{и} \quad \psi_2 = \arg(\lambda_1) + \arg(\lambda_2) - \psi_1. \quad (33)$$

При условии, что величины ψ_1 и ψ_2 могут быть найдены из (32) и (33), k_2 и k_1 определяются из системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cos \psi_1 + k_2 \cos \psi_2 = \operatorname{Re}(\lambda_1 + \lambda_2); \\ k_1 \sin \psi_1 + k_2 \sin \psi_2 = \operatorname{Im}(\lambda_1 + \lambda_2). \end{cases} \quad (34)$$

По правилу Крамера [13]:

$$k_1 = \frac{\operatorname{Re}(\lambda_1 + \lambda_2) \sin \psi_2 - \operatorname{Im}(\lambda_1 + \lambda_2) \cos \psi_2}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (35)$$

$$k_2 = \frac{\operatorname{Im}(\lambda_1 + \lambda_2) \cos \psi_1 - \operatorname{Re}(\lambda_1 + \lambda_2) \sin \psi_1}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}. \quad (36)$$

$$\text{Система (28) имеет решение, если} \\ \psi_2 - \psi_1 \neq n\pi, \quad (37)$$

где $n=0,1,2,\dots,\infty$. Случай $\psi_1 = \psi_2 = 0$ будет рассмотрен ниже.

Величины θ_1 и θ_2 могут быть определены из систем уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cos \psi_1 \cos 2\theta_1 + k_2 \cos \psi_2 \cos 2\theta_2 = \\ = \operatorname{Re}(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV}); \\ k_1 \sin \psi_1 \cos 2\theta_1 + k_2 \sin \psi_2 \cos 2\theta_2 = \\ = \operatorname{Im}(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV}); \end{cases} \quad (38)$$

и

$$\begin{cases} k_1 \cos \psi_1 \sin 2\theta_1 + k_2 \cos \psi_2 \sin 2\theta_2 = \\ = \operatorname{Re}(2\dot{s}_{VH}); \\ k_1 \sin \psi_1 \sin 2\theta_1 + k_2 \sin \psi_2 \sin 2\theta_2 = \\ = \operatorname{Im}(2\dot{s}_{VH}). \end{cases} \quad (39)$$

Величины θ_1 и θ_2 определяются как

$$\theta_1 = \frac{|\arccos(f_1)| \cdot \operatorname{sign}[\arcsin(g_1)]}{2}, \quad (40)$$

$$\theta_2 = \frac{|\arccos(f_2)| \cdot \operatorname{sign}[\arcsin(g_2)]}{2}, \quad (41)$$

где

$$\begin{aligned} f_1 &= \{\operatorname{Re}(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV}) \sin \psi_2 - \\ &- \operatorname{Im}(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV}) \cos \psi_2\} / k_1 \sin(\psi_2 - \psi_1); \\ f_2 &= \{\operatorname{Im}(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV}) \sin \psi_1 - \\ &- \operatorname{Re}(\dot{s}_{HH} - \dot{s}_{VV}) \cos \psi_1\} / k_2 \sin(\psi_2 - \psi_1); \\ g_1 &= \frac{\operatorname{Re}(2\dot{s}_{VH}) \sin \psi_2 - \operatorname{Im}(2\dot{s}_{VH}) \cos \psi_2}{k_1 \sin(\psi_2 - \psi_1)}; \\ g_2 &= \frac{\operatorname{Im}(2\dot{s}_{VH}) \cos \psi_1 - \operatorname{Re}(2\dot{s}_{VH}) \sin \psi_1}{k_2 \sin(\psi_2 - \psi_1)}. \end{aligned}$$

Случай $\psi_1 = \psi_2$ всегда можно привести к виду $\psi_1 = \psi_2 = 0$, разделив ПМР на $e^{j\psi}$. Тогда уравнения (9) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} s_{HH} &= k_1 \cos^2 \theta_1 + k_2 \cos^2 \theta_2; \\ s_{VV} &= k_1 \sin^2 \theta_1 + k_2 \sin^2 \theta_2; \\ s_{HV} &= 1/2(k_1 \sin 2\theta_1 + k_2 \sin 2\theta_2). \end{aligned} \quad (42)$$

Таким образом, при $\psi_1 = \psi_2$ \dot{s}_{HH} , \dot{s}_{VV} , \dot{s}_{HV} становятся действительными и система (9) преобразуется в систему уравнений (42) с тремя уравнениями и четырьмя неизвестными, т.е. система (42) не имеет однозначного решения.

В данном случае можно лишь ввести эквивалентные диполи как (20) и (29), (30).

Рассмотрим уравнения (9) при $k_1 = 0$ или $k_2 = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{HH} &= k \cos^2 \theta e^{j\psi} ; \\ \dot{s}_{VV} &= k \sin^2 \theta e^{j\psi} ; \\ \dot{s}_{HV} &= 0.5k \sin 2\theta e^{j\psi} . \end{aligned} \quad (43)$$

Тогда собственные числа ПМР равны:

$$\lambda = k e^{j\psi} , \quad (44)$$

а собственные вектора:

$$\eta_1 = \begin{pmatrix} -\cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} , \quad (45)$$

$$\eta_2 = \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} . \quad (46)$$

Таким образом, если $k_1 = 0$ или $k_2 = 0$, величины k и ψ определяются из собственного вектора ПМР, а угол θ из собственных векторов ПМР.

Основываясь на приведенных выкладках может быть сформирован алгоритм восстановления поляриметрической информации о радиолокационном объекте по его ПМР. Фазы колебаний сигналов, отраженных диполями ψ_1 и ψ_2 , могут быть получены из выражений (32) и (33). После определения значений ψ_1 и ψ_2 k_2 и k_1 вычисляются по (35) и (36) и, затем, ориентации диполей θ_1 и θ_2 рассчитываются по формулам (40) и (41).

5. Численная проверка работы алгоритма восстановления поляриметрической информации

Для проверки предлагаемого алгоритма восстановления поляриметрической информации об объекте по данным ДЗ было разработано программное обеспечение на языке программирования высокого уровня Фортран.

По соотношениям (9) для произвольно выбранных параметров двухдипольной модели формировалась ПМР (5). По разработанному алгоритму для сформированной ПМР восстанавливались параметры двухдипольной модели, и оценивалось их соответствие исходным данным.

Приведём пример работы данной программы для случайно выбранных исходных параметров двухдипольной модели (табл. 1).

Таблица 1

Исходные параметры двухдипольной модели

№	k	θ , град	ψ , град
1	5,8	-17,7	23,4
2	27,3	34,1	-11,6

По исходным параметрам была сформирована тестовая ПМР:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} 23,168 - 1,673i & 10,873 - 3,216i \\ 10,873 - 3,216i & 8,898 - 1,512i \end{bmatrix} . \quad (47)$$

По формуле (11) были определены собственные числа матрицы (47):

$$\lambda_1 = 28,932 - 4,348i , \quad (48)$$

$$\lambda_2 = 3,134 + 1,162i . \quad (49)$$

Из соотношений (32) и (33) определяются фазы колебаний сигналов, отраженных диполями, ψ_1 и ψ_2 соответственно

$$\psi_1 = 23,4^\circ , \quad (50)$$

$$\psi_2 = -11,6^\circ . \quad (51)$$

При расчётах по данному алгоритму всегда выполняется условие $\psi_1 \geq \psi_2$, то есть первым считается диполь с большим значением фазы ψ .

Максимальные значения коэффициентов рассеяния (отражения) вибраторов k_1 и k_2 находятся из выражений (35) и (36) соответственно

$$k_1 = 27,3 , \quad (52)$$

$$k_2 = 5,8 . \quad (53)$$

Ориентации диполей θ_1 и θ_2 относительно выбранной системы координат $\{H, V\}$ определяются по формулам (40) и (41) соответственно

$$\theta_1 = -17,7^\circ , \quad (52)$$

$$\theta_2 = 34,1^\circ . \quad (53)$$

Очевидно, что расчетные параметры полностью совпадают с исходными параметрами двухдипольной модели (см. табл. 1). Таким образом, проведенные расчеты показывают, что разработанный алгоритм полностью восстанавливает поляриметрическую информацию об объекте по его ПМР.

6. Экспериментальная проверка работы алгоритма восстановления поляриметрической информации

Для исследований поляризационных характеристик радиолокационных объектов применяются импульсные двухканальные по поляризации радиолокационные станции. Для адекватного восстановления поляриметрической информации в таких поляриметрах обеспечивают синхронный двухканальный (по поляризации) прием отраженных сигналов в одном из ортогональных поляризационных базисов (например, линейном или круговом) с неортогональностью поляризационного базиса не выше $0,1^\circ$ и уровнем паразитной кроссполяризации не более -30 дБ, а при работе по метеорологическим объектам – до -50 дБ [15].

Экспериментальная проверка работы алгоритма проводилась на экспериментальных данных, полученных с помощью радиолокационного поляриметра 3см диапазона, обеспечивающего зондирование объектов сигналами различной поляризации, двухканальный прием с квадратурной обработкой отраженных сигналов [15]. Основные характеристики поляриметра, использовавшегося при экспериментальных исследованиях, приведены в табл. 2.

Таблица 2
Основные характеристики радиолокационного поляриметра

Длина волны	3,2 см
Мощность передатчика	10 кВт/имп
Длительность импульса	0,5 мкс
Частота повторения импульсов	100..1000 Гц
Поляризации излучения и приема	H, V
Разрядность АЦП	12+10
Дальность действия, км	до 250
Погрешность измерения ЭПР (не более):	
в диапазоне дальностей 1...10 км	1 дБ
в диапазоне дальностей 10...100 км	1,5 дБ

На рис. 4 представлен план участка местности размером 2×2 км, на которой расположены различные по электрофизическим свойствам объекты: поля с травяным покровом, лиственный лес, здания, дороги, линии электропередач. В эксперименте радиолокационный поляриметр измерял амплитуды и фазы отражённых объектами сигналов (4) при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирования в диапазоне дальностей 1,5...3,4 км с шагом 7,5 м при сканировании лучом по азимуту в пределах 4°...29° с шагом 0,2°. По результатам измерений формировались многоканальные радиолокационные изображения.

На рис. 5 – 7 представлены радиолокационные изображения исследуемого участка местности при горизонтальной и вертикальной поляризации зондирования с визуализацией амплитуды отраженного сигнала в дБ.

Результаты обработки экспериментальных данных по предложенному алгоритму восстановления поляриметрической информации об объекте показаны на рис. 8 и 9. На рис. 8 визуализирована разность фаз $\Delta\psi$, совмещённая с планом местности. На рис. 9 показана ориентация θ_1 первого диполя модели (рис. 3) относительно выбранной системы координат, совмещённая с планом местности. Как видно на рис. 8 и 9, можно различить области леса и поля. Области поля характеризуются неоднородностью получаемых данных, что связано с наличием растительности различного типа. Как на рис. 8, так и на рис. 9 хорошо различимы здания, отличающиеся по своим поляризационным свойствам от естественных объектов.

Заключение

Повышение эффективности средств ДЗ за счёт использования поляриметрической информации ограничено проблемой её адекватного восстановления по получаемым многоканальным изображениям.

Традиционная двухдипольная модель стабильной радиолокационной цели широко используется для аналитических исследований и дает физическую трактовку свойств объекта, однако методики оценки ее параметров по данным ДЗ в доступных литературных источниках найдено не было.

Получены аналитические соотношения для определения параметров двухдипольной модели по измеренной ПМР объекта ДЗ. Проведённый анализ полученных соотношений показал, что физическая трактовка инвариантных моделей радиолокационных объектов отличается от общепринятой [7, 8, 11]. Так, например, при ортогональном расположении диполей ($\theta_2 = \theta_1 + 90^\circ$) выражению (20) можно дать следующую физическую трактовку: информация о расстоянии между диполями содержится в фазе комплексных собственных чисел, а собственный вектор показывает лишь угол ориентации. Этот вывод отличается от общепринятого мнения о том, что углы ориентации и эллиптичности содержатся в собственных векторах (8) [7, 11, 12].

В общем случае модуль собственного числа не равен максимальному значению коэффициентов рассеяния (отражения) вибраторов, как предполагается в двухдипольной модели [11, 12].

Разработан алгоритм восстановления поляриметрической информации по данным ДЗ, в основу которого положена традиционная двухдипольная модель и представление поляризационной матрицы рассеяния объекта в собственном базисе. Проведенные численные и экспериментальные исследования подтверждают эффективность применения данного алгоритма для решения задачи повышения информативности поляриметрических изображений. В частности, получаемые поляризационные параметры позволяют оценивать характер растительных покровов и различать объекты естественного и искусственного происхождения, что создает предпосылки для разработки новых алгоритмов обработки поляриметрических изображений.

Литература

1. Popov A. Informability of polarimetric radar invariants. / A. Popov, O. Pogrebnyak // Proc. SPIE. – 2003. – V. 5151. – P. 74-84.
2. Potential of Estimating Soil Moisture Under Vegetation Cover by Means of PolSAR / I. Hajnsek, T. Jagdhuber, H. Schon, K.P. Papathanassio // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2009. – V. 47, №2. – P. 442-454.

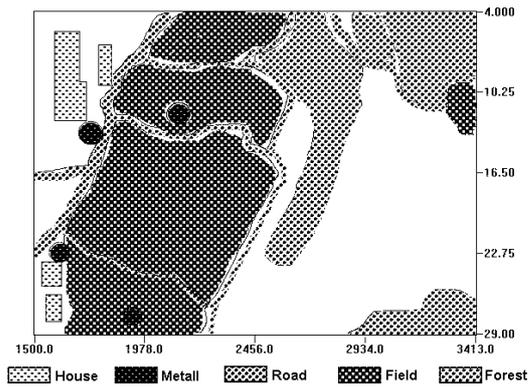


Рис. 4. План местности, составленный по данным GPS

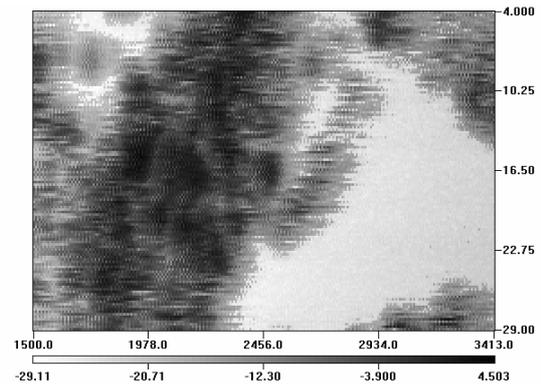


Рис. 5. Радиолокационное изображение при вертикальной поляризации зондирования и приема (S_{VV})

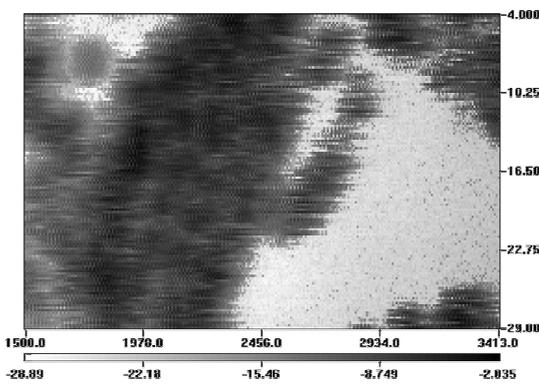


Рис. 6. Радиолокационное изображение при вертикальной поляризации зондирования и горизонтальной приема (S_{VH})

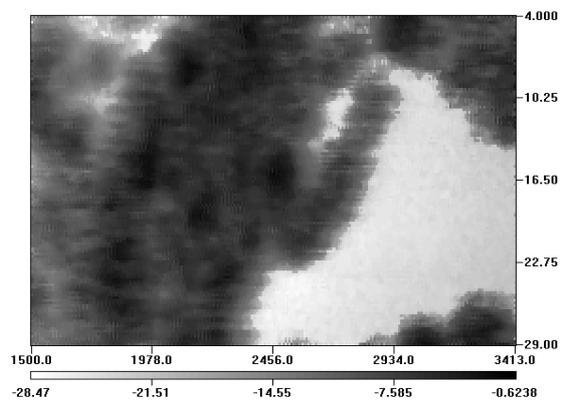


Рис. 7. Радиолокационное изображение при горизонтальной поляризации зондирования и приема (S_{HH})

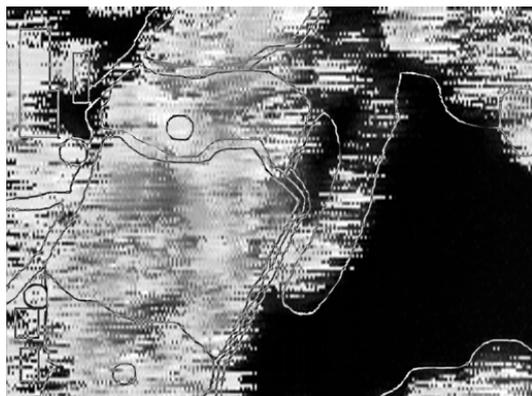


Рис. 8. Радиолокационное изображение с визуализацией разности фаз колебаний сигналов, отраженных диполями ($\Delta\psi$ в (31))

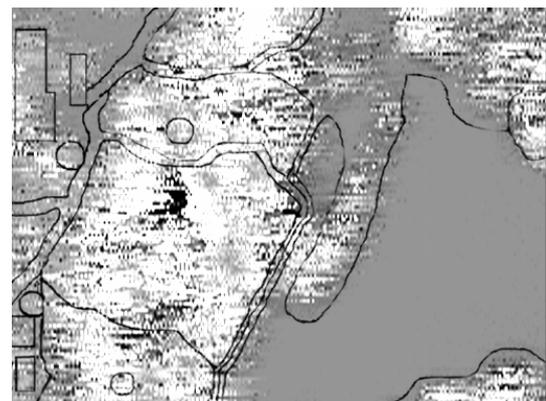


Рис. 9. Радиолокационное изображение с визуализацией ориентации диполя (θ_1 в (40))

3. Tropical-Forest-Parameter Estimation by Means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign / I. Hajnsek, F. Kugler, S.-K Lee, K.P. Papathanassiou // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2009. – V. 47, №2. – P. 481-493.

4. Bouvet A. Monitoring of the Rice Cropping System in the Mekong Delta Using ENVISAT/ASAR Dual Polarization Data / A. Bouvet, T. Le Toan, N. Lam-Dao // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2009. – V. 47, №2. – P. 517-526.

5. Garestier F. Forest Height Inversion Using High-Resolution P-Band Pol-InSAR Data / F. Garestier, P.C. Dubois-Fernandez, I. Champion // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2008. – V. 46, №1, part 1. – P. 3544-3559.
6. Ballester-Berman J. David Retrieval of biophysical parameters of agricultural crops using polarimetric SAR interferometry / J. David Ballester-Berman, Juan M. Lopez-Sanchez // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2005. – V. 43, №4. – P. 683-684.
7. Cloude S.R. A Review of target decomposition theorems in radar polarimetry / S.R. Cloude, E. Pottier // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 1996. – V. 34, №2. – P. 448-518.
8. Cloude S.R. Symmetry, zero correlations and target decomposition theorems / S.R. Cloude // *Proceeding 4th Int. Workshop on radar polarimetry.* – 1998. – P. 56-66.
9. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные колебания и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В.Зернов. – М.: Сов. радио, 1956. – 640 с.
10. Канарейкин А.Б. Морская поляриметрия / А.Б. Канарейкин, В.А.Потехин, И.Ф. Шишкин. – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.
11. Канарейкин А.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / А.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
12. Algorithms for Estimating the Complete Group of Polarization Invariants of the Scattering Matrix (SM) Based on Measuring All SM Elements / V.I. Karnychev, V.A. Khlusov, Leo P. Lighthart, G. Sharygin // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2004. – V. 42, №3. – P. 529-539.
13. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
14. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике / А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1967. – 640 с.
15. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // *Зарубежная радиоэлектроника.* – 1999. – №11. – С. 54-57.

Поступила в редакцию 14.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры производства радиоэлектронных систем ЛА Г.Я. Красовский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗА ІНВАРІАНТНИМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБ'ЄКТА

О.П. Шаповал

В цілях адекватної інтерпретації даних дистанційного зондування виконано теоретичний аналіз інформативності інваріантних поляриметричних характеристик радіолокаційного об'єкта. Отримані математичні співвідношення для власних чисел та власних векторів поляризаційної матриці розсіяння, представлених функціями параметрів двухдипольної моделі. Розроблено алгоритм відновлення поляриметричної інформації о радіолокаційному об'єкті за даними дистанційного зондування, в основу якого покладено традиційна двухдипольна модель і зображення поляризаційної матриці розсіяння у власному базисі.

Ключові слова: поляризація, власні числа, власні вектори, поляризаційна матриця розсіяння.

INTERPRETATION OF POLARIMETRIC DATA OF REMOTE SENSING ON INVARIANT POLARIZING CHARACTERISTICS OF OBJECT

O.P. Shapoval

With a view of adequate interpretation of remote sensing data the theoretical analysis of informativity of invariant polarimetric characteristics of radar object is executed. Mathematical expressions for eigenvalues and eigenvectors of a scattering matrix represented as functions of tow-dipole model are received. The restoration algorithm of polarimetric data of radar object according to remote sensing data on the basis of the traditional two-dipole model and representation of a scattering matrix in proper basis is developed.

Key words: polarization, eigenvalues, eigenvectors, scattering matrix.

Шаповал Елена Петровна – магистр кафедры производства радиоэлектронных систем ЛА, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.