

УДК 621.396.96

А.В. ПОПОВ

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕМ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ АКТИВНОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены основные известные теоремы декомпозиции поляризационных свойств объектов активного дистанционного зондирования, проведен сравнительный анализ методов обработки поляриметрических данных и выделяемых на их основе поляризационных характеристик объектов. Методами математического и статистического моделирования показано, что наиболее информативными являются инвариантные поляризационные характеристики, получаемые при использовании операторной когерентной декомпозиции поляризационной матрицы рассеяния на совокупность независимых модулирующих функций, отдельно описывающих амплитудные, фазовые и поляризационные преобразования сигнала при его отражении объектом.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, поляризационная матрица рассеяния, декомпозиция, поляризационные характеристики, оператор рассеяния, моделирование.

Введение

Системы активного дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей широко применяются сегодня при решении задач экологического мониторинга окружающей среды, картографирования, предупреждения чрезвычайных ситуаций [1 – 3] и т.д. Одним из направлений их совершенствования является использование поляризационно-многоканальных бортовых радиолокационных систем (РЛС), т.н. поляриметров [3,4], обеспечивающих как всепогодность наблюдений, так и значительное повышение их информативности. Об актуальности данного направления свидетельствует внедрение поляриметрических режимов работы практически во всех РЛС искусственных спутников Земли, запущенных развитыми странами в последние 5 лет. Так, например, изменяемая поляризация излучения и приема (HH, VH, HV, VV) применена в бортовых РЛС космических аппаратов:

- RADARSAT-2 Канадского космического агентства (запущен в декабре 2007 г.);
- TerraSAR-X, TerraDEM-X немецкого аэрокосмического центра DLR (запущены в 2007 и 2010 гг.);
- COSMO-SkyMed 1-4 Итальянского Космического Агентства ASI (2007–2010).

Эффективность решения задач ДЗ во многом зависит от методов обработки материалов космических съемок и методов интерпретации поляриметрической информации, которые в свою очередь определяются подходом к формированию базовых математических моделей.

Традиционным базовым описанием поляризационных характеристик (ПХ) объектов ДЗ является поляризационная матрица рассеяния (ПМР), представляющая собой матрицу комплексных коэффициентов отражения при облучении объекта двумя сигналами с ортогональной поляризацией и приеме отраженного сигнала двухкомпонентной антенной в том же поляризационном базисе [4]. Недостатком ПМР является зависимость ее элементов от поляризации антенн РЛС [4]. Вследствие изменения ориентации летательного аппарата в процессе полета наблюдаемые значения ПМР также изменяются. Использувавшиеся до середины 90-х годов различные ПХ, основанные непосредственно на ПМР объекта либо ее ковариационной матрице, в силу своей неинвариантности не обеспечивали эффективной интерпретации поляриметрической информации [4].

В 1992 г. в работе А. Фримена (A. Freeman) и С. Дурдена (S. Durden) [5] был предложен феноменологический подход к решению проблемы интерпретации поляриметрической информации. На основе декомпозиции ковариационной матрицы (target covariance matrix) предлагалось выделять «свойства объектов» (Feature-Motivated Decomposition), – коэффициенты подобия ПХ объекта характеристикам эталонных отражателей (поверхность, двугранный отражатель, сфера). В 2005 г. набор эталонов был дополнен спиралью.

Применительно к ПМР объекта в 1995 г. Е. Кротагером (E. Krogager) [6] и У. Камероном (W. Cameron) [7] предлагалось определять коэффициенты подобия объекта сфере, двугранному отражателю и спирали (Sphere – Diplane – Helix Decom-

position). Принципиальным недостатком такого подхода является неортогональность разделяющих матриц и, как следствие, коррелированность коэффициентов разложения [8].

«Революцию» в радиолокационной поляриметрии произвели работы С. Клода (S.R. Cloude) и Е. Поттье (E. Pottier) [9,10] (1996, 1997 г.), в которых на основе декомпозиции матрицы когерентности объекта (Target Coherence Matrix) была показана целесообразность использования математических неэнергетических ПХ объектов, не имеющих явного физического обоснования, – поляризационной «вероятности», «энтропии» и «анизотропии». Несмотря на недостаточную физическую обоснованность введенных параметров, работы [9,10] получили всемирное признание и сформировали доминирующую на сегодняшний день феноменологическую теорию радиолокационных целей, что позволило Э. Поттье в 2008 г. говорить о «стандартизации» в радиолокационной поляриметрии [11].

Альтернативный подход к решению проблемы интерпретации поляриметрической информации был предложен еще в 1978 году [12] Д. Хайненом (J. Huijnen), заключающийся в физически обоснованной инвариантной когерентной декомпозиции ПМР объекта на основе определения т.н. собственных и нулевых поляризаций объекта ДЗ [13]. К сожалению, технический уровень средств ДЗ тех лет не позволял реализовать предложенную в [12] теорию на практике. За рубежом активные исследования в данном направлении начались с запуском спутника RADARSAT-2 (например, [14]).

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского „ХАИ” исследования инвариантных неэнергетических ПХ объектов ДЗ проводились с конца 80-х годов с помощью мобильного автоматизированного радиолокационного поляриметра 3-х см диапазона, обеспечивающего получение полной поляриметрической информации об объектах ДЗ [15]. Была экспериментально доказана высокая информативность инвариантных ПХ [16, 17] и эффективность их применения при решении различных задач ДЗ [18].

Дальнейшее развитие теория инвариантной когерентной декомпозиции ПМР объекта получила в работе [19] (2009 г.), в которой на основе теории поляризационной модуляции сигналов и математического аппарата двойной комплексной плоскости [20] было введено операторное описание объекта ДЗ, позволяющее получать информативные собственные ПХ объекта [21] за счет выделения независимых модулирующих функций, отдельно описывающих амплитудные, фазовые и поляризационные (эллиптичности, ориентации) преобразования сигнала при его отражении объектом ДЗ.

Постановка задачи исследований

Поиск методов обработки данных ДЗ, обеспечивающих решение проблемы достоверной интерпретации поляриметрической информации, проводился рядом авторов, например, [3–12, 16–19] в течение последних 40 лет. Анализ доступных литературных источников показал, что все практически значимые результаты были получены при использовании неэнергетических ПХ объектов, однако к их выделению имеется как минимум четыре принципиально различных подхода, определяющих методологию обработки поляриметрических данных ДЗ.

Целью данной работы является сравнительный анализ известных методов декомпозиции ПХ объектов для определения наиболее перспективных методов обработки поляриметрических данных ДЗ.

1. Базовые поляризационные характеристики объектов ДЗ

Для описания электромагнитной волны (ЭМВ) традиционно используется ее представление в виде вектора ортогонально поляризованных компонент:

$$\vec{E}(t) = \begin{bmatrix} \dot{E}_X \\ \dot{E}_Y \end{bmatrix} \cdot e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где ω – несущая частота сигнала;

\dot{E}_X , \dot{E}_Y – комплексные амплитуды проекций на оси выбранной системы координат (x, y) , образующей т.н. поляризационный базис $\{x, y\}$ [4, 13].

Как известно [3, 4, 13], отраженный от радиолокационного объекта сигнал \vec{E}_{Sc} вида (1) связан с зондирующим сигналом \vec{E}_{In} комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМР) \dot{S}

$$\vec{E}_{Sc} = \dot{S} \cdot \vec{E}_{In}. \quad (2)$$

ПМР \dot{S} описывает отражающие свойства объекта на ортогональных поляризациях x, y ,

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_{xx} & \dot{S}_{xy} \\ \dot{S}_{yx} & \dot{S}_{yy} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При моностатической радиолокации $\dot{S}_{xy} = \dot{S}_{yx}$ [4].

В матрице (3) содержится вся информация об отражающих свойствах объекта при заданной частоте зондирования и фиксированном ракурсе наблюдения, однако значения ее элементов зависят от выбора ортогональных поляризаций $\{x, y\}$.

В бортовых средствах ДЗ обычно используются вертикальная ($y=V$) и горизонтальная ($x=H$) поляризации.

2. Методология анализа информативности ПХ объектов ДЗ

Для исследования информативности ПХ методами моделирования использовалась известная двухвибраторная модель [13], позволяющая получить модельные ПМР с любыми свойствами. В фазовой плоскости ЭМВ размещаются два электрических диполя с коэффициентами отражения (эффективными действующими длинами) h_1 и h_2 (рис. 1), ориентацией в прямоугольной системе координат $\{x, y\}$ θ_1 и θ_2 и фазами колебаний, наводимых в диполях, ψ_1 и ψ_2 . Разные значения фаз могут трактоваться либо как результат различия физических свойств диполей, либо как результат их разнесения в пространстве по дальности.

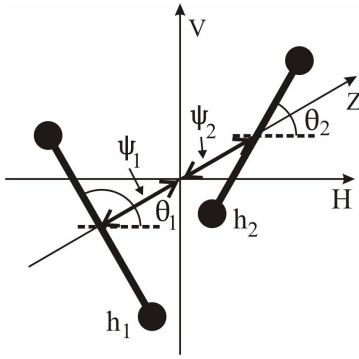


Рис. 1. Двухвибраторная модель объекта ДЗ

Элементы ПМР такой системы диполей определяются в поляризационном базисе $\{H, V\}$ как [13]

$$\begin{aligned} S_{HH} &= h_1 \cos^2 \theta_1 \cdot e^{j\psi_1} + h_2 \cos^2 \theta_2 \cdot e^{j\psi_2}, \\ S_{HV} &= \frac{1}{2} (h_1 \sin 2\theta_1 \cdot e^{j\psi_1} + h_2 \sin 2\theta_2 \cdot e^{j\psi_2}), \quad (4) \\ S_{VH} &= h_1 \sin^2 \theta_1 \cdot e^{j\psi_1} + h_2 \sin^2 \theta_2 \cdot e^{j\psi_2}. \end{aligned}$$

С помощью модели (4) можно исследовать различные зависимости ПМР от свойств объектов:

– изменение ориентации $\beta \in [0 \dots 90^\circ]$ объекта в плоскости волнового фронта:

$$\begin{aligned} h_1 &= \text{const}, \quad h_2 = \text{const}, \quad \psi_1 = \text{const}, \quad \psi_2 = \text{const}, \\ \theta_1 &= \beta, \quad \theta_2 = \beta + \Delta\theta, \end{aligned}$$

где $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$;

– изменение формы $f \in [0 \dots 1]$ объекта в плоскости волнового фронта:

$$h_1 = f, \quad h_2 = 1 - f,$$

$$\psi_1 = \text{const}, \quad \psi_2 = \text{const}, \quad \theta_1 = \text{const}, \quad \theta_2 = \text{const};$$

– изменение выпуклости (спиралевидности) $\vartheta \in [0 \dots 90^\circ]$ объекта:

$$h_1 = \text{const}, \quad h_2 = \text{const}, \quad \psi_1 = 0, \quad \psi_2 = \vartheta,$$

$$\theta_1 = \text{const}, \quad \theta_2 = \text{const}.$$

ПХ объектов ДЗ в радиолокационной поляриметрии принято описывать математическими свойствами их ПМР, сравнивая их со свойствами ПМР т.н. эталонных объектов. Выделяют [4] свойства симметричности объекта (сфера), асимметричности (спираль), анизотропности (диполь) и т.д. С помощью модели (4) могут быть получены ПМР типовых эталонных отражателей. Например, при $h_1 = 1$, $h_2 = 1$, $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$, $\psi_1 = 0^\circ$, $\psi_2 = 0^\circ$ ПМР (4) будет соответствовать ПМР сферы \dot{S}_S , а при $\psi_2 = 180^\circ$ – двугранного уголкового отражателя \dot{S}_D :

$$\dot{S}_S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \dot{S}_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Традиционной моделью флуктуаций сигнала в квадратурном канале приема является гауссовский некоррелированный шум с нулевым средним, мощность которого описывается дисперсией σ_n^2 [4]. При приеме поляриметрической информации используются 2 канала с ортогональной поляризацией приема (V и H), в каждом из которых установлен двухканальный квадратурный приемник, за счет чего обеспечивается синхронное измерение одной строки ПМР объекта, например:

$$\text{Re}(\dot{S}_{HH}), \quad \text{Im}(\dot{S}_{HH}), \quad \text{Re}(\dot{S}_{HV}), \quad \text{Im}(\dot{S}_{HV}).$$

Вторая строка ПМР ($\dot{S}_{VH}, \dot{S}_{VV}$) измеряется аналогично после посылки зондирующего импульса с вертикальной поляризацией. Таким образом, на вход приемника системы ДЗ поступает 8 некоррелированных случайных процессов.

В качестве модели флуктуирующего сигнала может использоваться модель вида (4), при фиксированных параметрах которой вычисляются комплексные значения ПМР эталонного объекта $\dot{S}_{HH}, \dot{S}_{HV}, \dot{S}_{VH}, \dot{S}_{VV}$, генерируется 8 независимых случайных реализаций $\text{Re}(\dot{\sigma}_{HHi}), \text{Im}(\dot{\sigma}_{HHi}), \dots, \text{Re}(\dot{\sigma}_{VV_i}), \text{Im}(\dot{\sigma}_{VV_i}), i = 1 \dots N$ (N – объем выборки) с нормальным законом распределения, нулевым средним и заданной дисперсией и формируются результаты «измерения» ПМР объекта (аддитивный шум в 8 каналах приема, $i = 1 \dots N$):

$$\text{Re}(\hat{S}_{HHi}) = \text{Re}(\dot{S}_{HH}) + \text{Re}(\dot{\sigma}_{HHi}),$$

$$\text{Im}(\hat{S}_{HHi}) = \text{Im}(\dot{S}_{HH}) + \text{Im}(\dot{\sigma}_{HHi})$$

и т.д. для всех элементов ПМР. Полученная таким образом матрица оценок элементов ПМР \hat{S} используется для вычисления выборок оценок исследуемых ПХ.

3. Когерентная декомпозиция ПМР объекта

Когерентная декомпозиция ПМР (3) основана на ее представлении собственными числами $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ и собственными векторами $\vec{\zeta}_E$ [13], которые определяются характеристическим уравнением

$$\dot{S} \cdot \vec{\zeta}_E = \lambda \cdot \vec{\zeta}_E$$

и имеют вид [4,13]:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \cdot e^{j\psi_1} & 0 \\ 0 & \lambda_2 \cdot e^{j\psi_2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\vec{\zeta}_E = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E \\ \sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \varphi_E \\ j \cdot \sin \varphi_E \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где φ_E и θ_E – поляризационные параметры так называемой [13] собственной поляризации объекта. Физически собственные поляризации (6), соответствующие собственным числам (5) матрицы (3), характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. При этом собственные числа $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ ПМР \dot{S} являются комплексными коэффициентами отражения объекта при зондировании его сигналами собственных поляризаций, а собственные вектора $\vec{\zeta}_E$ (6), соответствующие собственным числам ПМР $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$, являются ортогональными по определению и образуют собственный синфазный ортогонально эллиптический поляризационный базис объекта.

Анализ зависимостей параметров собственного поляризационного базиса от параметров модели (4) показал, что ориентация собственного базиса θ_E является инвариантным индикатором ориентации объекта в плоскости волнового фронта, поскольку линейно зависит только от угла поворота β . Особыми свойствами обладает эллиптичность собственной поляризации сигнала φ_E , которая при ортогональных диполях в модели (4) ($\theta_2 = \theta_1 + \pi/2$, см. рис. 1) всегда равна нулю независимо от изменений параметров модели. При неортогональном расположении элементарных отражателей собственные вектора ПМР (6) становятся комплексными, и φ_E начинает зависеть от формы объекта f и разности фаз ϑ (рис. 2, 3), но при этом не зависит от ориентации объекта β , что позволяет использовать данную ПХ в качестве индикатора неортогональности элементарных отражателей объекта ДЗ.

Д.Хайнен (J.R.Huipen) предложил [12] следующую форму представления собственных чисел $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ ПМР:

$$\dot{\lambda}_1 = m \cdot \exp(2j\upsilon), \dot{\lambda}_2 = m \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot \exp(-2j\upsilon), \quad (7)$$

представляющую собой инвариантную декомпозицию ПМР объекта.

При этом объект, помимо собственных поляризаций, характеризуется еще тремя вещественными параметрами, которым Хайненом дана следующая физическая трактовка:

– m – "заметность или величина объекта", имеет смысл максимальной ЭПР объекта;

– υ – "угол скольжения объекта", $\upsilon \in [-\pi/4, \pi/4]$, характеризует множественность переотраженный сигнала от объекта (для однократного отражения $\upsilon=0^\circ$, для двукратного – $\upsilon=\pm 45^\circ$);

– γ – "угол поляризации объекта", $\gamma \in [0, \pi/4]$, характеризует способность объекта поляризовать падающее на него неполяризованное излучение ($\gamma=0^\circ$ для полностью поляризованного и $\gamma=45^\circ$ для неполяризованного отраженных сигналов).

Анализ результатов моделирования показывает, что "угол поляризации объекта" γ зависит только от формы объекта (рис.4), а удвоенный "угол скольжения объекта" υ равен разности фаз элементарных отражателей объекта ϑ (рис. 5), что подтверждает эффективность инвариантной декомпозиции свойств объекта.

Необходимо отметить, что разложение (5) – (7) является единственным в силу единственности собственных чисел и собственных векторов симметричной матрицы, а его параметры являются поляризационными инвариантами объекта ДЗ, однако, несмотря на данную Хайненом их «физическую трактовку», не дают представления о преобразовании поляризации зондирующего сигнала при его отражении от объекта ДЗ.

Дальнейшим развитием теории декомпозиции объектов ДЗ стала разработка поляризационного оператора объекта ДЗ [19]. В отличие от матричной декомпозиции (5) – (7), декомпозиция ПМР объекта на двойной комплексной плоскости [20] показывает в явном виде все преобразования зондирующего сигнала \ddot{E}_{in} при его отражении от объекта ДЗ:

$$\begin{aligned} \ddot{E}_{Sc} \Big|_{HV} &= \left[k \cdot \ddot{S}(\varphi_T, \theta_T, \psi_T, \theta_E) \times \right. \\ &\times \ddot{E}_{in} \Big|_{HV} \cdot e^{ij\varphi_E} \cdot e^{-\theta_E} \Big] \cdot e^{-ij\varphi_E} \cdot e^{\theta_E}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $k, \psi_T, \varphi_T, \theta_T$ – параметры изменений амплитуды, фазы, эллиптичности, ориентации и сигнала при отражении его объектом;

φ_E, θ_E – углы эллиптичности и ориентации собственного поляризационного базиса (6).

Параметры k , ψ_T , φ_T , θ_T декомпозиции (8) определяются из ПМР \dot{S} по соотношениям, приведенным в [19]. Необходимо отметить, что разложение (8) также является единственным, поскольку также основано на анализе собственных чисел и векторов ПМР, как и декомпозиция Д. Хайнена.

Анализ зависимостей параметров оператора объекта (8) от параметров модели (4) показывает, что «амплитудная модуляция» k линейно зависит только от размеров (общей ЭПР) объекта, «модуляция ориентации» θ_T практически линейно (рис. 6) зависит от формы объекта независимо от его ориентации и «выпуклости» (разности фаз компонент), «фазовая модуляция» ψ_T однозначно связана (рис. 7) с расстоянием между элементарными отражателями $\Delta\psi$ модели (4) (см. рис. 1). Параметр «модуляция эллиптичности» φ_T однозначно связан с эллиптичностью отраженного сигнала в равновесном базисе [19].

Таким образом, когерентная декомпозиция ПМР объекта дает полный комплекс инвариантных и независимых характеристик объекта ДЗ.

4. Феноменологическая декомпозиция ПМР объекта

Альтернативным подходом к декомпозиции ПМР объекта ДЗ является «выделение свойств» объектов (Feature – Motivated Decomposition), предложенное Е. Крогагером (E. Krogager) [6], – определение коэффициентов подобия объекта сфере, двугранному отражателю и спирали (т.н. SDH – декомпозиция – Sphere/ Dihedral /Helix Decomposition).

Согласно [6,7], ПМР объекта представляется в виде суммы ПМР эталонов

$$\dot{S} = C_S \cdot \dot{S}_S + e^{j\phi} \cdot (C_D \cdot \dot{S}_D + C_H \cdot \dot{S}_H), \quad (9)$$

где

$$\dot{S}_S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \dot{S}_H = \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix},$$

$$\dot{S}_D = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} -$$

ПМР сферы, двугранного отражателя и спирали соответственно;

ϕ – общая фаза элементов ПМР;

θ – угол ориентации двугранного отражателя;

C_S – коэффициент «сферичности» объекта, характеризующий «однократность рассеяния» (Single Scattering);

C_D – коэффициент «двугранности» объекта, характеризующий наличие двукратного отражения (Dihedral Scattering);

C_H – коэффициент «спиралевидности» объекта (Helix Scattering).

Анализ данных ПХ на модели (4) показал, что коэффициент «спиралевидности» $C_H=0$ для всех видов объектов с ортогональными отражателями. Для неортогональных отражателей он зависит как от формы, так и разности фаз отражателей (рис. 8) и по своим свойствам подобен эллиптичности собственного поляризационного базиса объекта. Коэффициент «сферичности» C_S инвариантен только к ориентации объекта, а коэффициент «двугранности» C_D зависит как от ориентации и формы, так и от разности фаз отражателей объекта (рис. 9).

Несмотря на явную неинвариантность и коррелированность параметров SDH–декомпозиции, идеи У. Камерона и Е. Крогагера стали методологической основой целого ряда последующих теорем декомпозиции объектов.

5. Декомпозиция ковариационной матрицы объекта

Рассмотренные в п. 3, 4 поляризационные характеристики объектов ДЗ определялись путем обработки мгновенных реализаций комплексной ПМР объекта ДЗ. Альтернативный «оптический» подход к описанию поляризации сигналов основан на представлении ЭМВ в виде частично-поляризованной волны [4] и предполагает усреднение измеряемых данных для нахождения статистик второго порядка.

На основе лексикографической векторизации ПМР объекта в трехмерном пространстве (в силу равенства $\dot{S}_{HV} = \dot{S}_{VH}$)

$$\dot{S} \rightarrow \vec{\dot{S}}_L^{(3)} = [\dot{S}_{HH} \quad \sqrt{2}\dot{S}_{HV} \quad \dot{S}_{VV}]^T \quad (10)$$

формируется ковариационная матрица (Covariance Matrix) размером 3x3 как

$$\dot{C} = \left\langle \vec{\dot{S}}_L^{(3)} \cdot \vec{\dot{S}}_L^{(3)*} \right\rangle, \quad (11)$$

где * – знак комплексного сопряжения;

$\langle \bullet \rangle$ – оператор усреднения по реализациям.

Использование в (11) нормированных на дисперсию элементов ПМР дает нормированную ковариационную матрицу, содержащую в недиагональных элементах коэффициенты корреляции между элементами ПМР объекта.

Исследованию свойств (11) для различных объектов ДЗ посвящено огромное количество работ, в т.ч. [1 – 4]. Однако в силу неинвариантности матрицы \dot{C} с начала 90-х годов интенсивно ведутся исследования путей выделения на ее основе информативных ПХ, позволяющих решать задачи классифи-

кации объектов ДЗ. Основополагающими в данном направлении исследований стали работы А. Фримена (A.J. Freeman) и Й. Ямагучи (Y. Yamaguchi) [5, 22], в которых было предложено разложение ковариационной матрицы \dot{C} (10) на четыре составляющих, характеризующих подобно рассмотренным в п. 4 ПХ, отражательные свойства объектов ДЗ:

$$\dot{C} = f_S \cdot \dot{C}_S + f_D \cdot \dot{C}_D + f_V \cdot \dot{C}_V + f_H \cdot \dot{C}_H, \quad (12),$$

где f_S – коэффициент поверхностного рассеяния (Surface Scattering);

f_D – коэффициент «двугранности» (Double-bounce Scattering);

f_V – коэффициент «объемного» рассеяния (Volume Scattering);

f_H – коэффициент «спиралевидности» объекта (Helix Scattering);

$\dot{C}_S, \dot{C}_D, \dot{C}_V, \dot{C}_H$ – ковариационные матрицы, полученные на основе ПМР соответствующих эталонных объектов.

Разложение (12) не является ортогональным, его коэффициенты f_i находятся итерационным алгоритмом, детально рассмотренным в [22], тем не менее, оно нашло достаточно широкое применение в обработке и интерпретации данных аэрокосмического дистанционного зондирования [3, 8].

Необходимо отметить, что разложение А. Фримена – Й. Ямагучи, несмотря на иной подход к формированию коэффициентов подобия эталонным объектам, при анализе на модельных данных дает зависимости от параметров модели, аналогичные SDH – декомпозиции (9) (например, см. рис. 8, 10).

6. Декомпозиция матрицы когерентности объекта

Одной из наиболее широко используемых на сегодняшний день является декомпозиция матрицы когерентности объекта ДЗ. В квантовой механике, теории относительности, теории поля используются матрицы Паули, образующие базис для комплексных матриц:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}.$$

Известно [4], что любая комплексная матрица \dot{S} может быть разложена по матрицам Паули как

$$\dot{S} = \dot{s}_0 \cdot \mathbf{P}_0 + \dot{s}_1 \cdot \mathbf{P}_1 + \dot{s}_2 \cdot \mathbf{P}_2 + \dot{s}_3 \cdot \mathbf{P}_3. \quad (13)$$

В теории радиополяриметрии используется аналогия между матрицами Паули и ПМР эталон-

ных отражателей: \mathbf{P}_0 структурно подобна ПМР сферы, \mathbf{P}_1 – ПМР двугранного углового отражателя, \mathbf{P}_2 – ПМР двугранного углового отражателя, ориентированного под углом 45° в системе координат $\{H, V\}$, \mathbf{P}_3 ассоциируется со спиралью [4].

Таким образом, предполагается, что поляризационные свойства объекта, содержащиеся в ПМР, могут быть описаны совокупностью коэффициентов «подобия» ($\dot{s}_i, i=1..4$ в (13)) объекта теоретическим эталонам [7].

Приведение вектора ПМР к системе матриц Паули выполняется путем перемножения лексикографического вектора \vec{S} (10) на соответствующие матрицам Паули лексикографические вектора:

$$\dot{S}_{Pi}^{(4)} = \vec{S}^T \cdot \vec{P}_i, \quad i=0..3,$$

что с учетом $\dot{S}_{HV} = \dot{S}_{VH}$ дает т.н. вектор рассеяния Паули (Pauli Scattering Vector) [10]

$$\vec{S}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [\dot{S}_{HH} + \dot{S}_{VV} \quad \dot{S}_{HH} - \dot{S}_{VV} \quad \dot{S}_{HV} + \dot{S}_{VH}]^T, \quad (14)$$

на основе которого формируется матрица когерентности объекта дистанционного зондирования (Target Coherence Matrix) как

$$\dot{T} = \langle \vec{S}_P \cdot \vec{S}_P^\oplus \rangle, \quad (15)$$

где \oplus – знак транспонирования и комплексного сопряжения.

Матрица (15) имеет три положительных собственных числа $\lambda_{Ti}, i=1..3$ и три ортогональных собственных вектора \vec{e}_{Ti} , позволяющих представить (15) в виде суммы [3, 8]

$$\dot{T} = \sum_{i=1}^3 \lambda_{Ti} \cdot (\vec{e}_{Ti} \cdot \vec{e}_{Ti}^\oplus) = \dot{T}_1 + \dot{T}_2 + \dot{T}_3. \quad (16)$$

Собственные числа $\lambda_{Ti}, i=1..3$ в (16) также связаны с различными типами рассеяния, поэтому в работе [10] было предложено использовать отношения

$$P_i = \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{T1} + \lambda_{T2} + \lambda_{T3}}, \quad i=1..3 \quad (17)$$

в качестве оценок «вероятности i -го механизма рассеяния», на основе которых был предложен поляризационный признак «энтропия рассеяния» (Scattering Entropy)

$$H_C = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \log_3(P_i), \quad (18)$$

равный нулю для отражателя, полностью поляризующего падающее на него излучение (например, диполь), и равный единице для объекта, создающего

«неполяризованный» отраженный сигнал.

Собственные вектора \vec{e}_{Ti} в (16) могут быть описаны в ортогональной системе координат тремя углами: ϕ_i , α_i и β_i ($i=1...3$). На их основе могут быть определены «средние» углы

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \alpha_i \quad \text{и} \quad \beta = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \beta_i. \quad (19)$$

Согласно [3], угол β связан с ориентацией отражателей в плоскости волнового фронта, а угол α характеризует тип отражателя: $\alpha=0$ для изотропной поверхности, $\alpha=45^\circ$ для диполя и $\alpha=90^\circ$ для двугранного отражателя.

Система параметров «ориентация отражателя» β , «тип рассеяния» α , и «энтропия рассеяния» H_C была дополнена параметром «анизотропия рассеяния» [10] (получившим в литературе название «анизотропия Клода» – Cloud's Anisotropy)

$$A_C = \frac{\lambda_{T2} - \lambda_{T3}}{\lambda_{T2} + \lambda_{T3}}, \quad (20)$$

введенным исходя из того, что теоретически $\lambda_{T3}=0$ для случая однократного отражения от осесимметричных объектов.

Анализ параметров (18) – (20) на модельных данных показал, что угол β соответствует ориентации отражателя в плоскости волнового фронта, «тип рассеяния» α зависит как от формы, так и от «выпуклости» отражателя подобно коэффициентам «двугранности» C_D (9) Е. Крогагера и f_D (11) А. Фримена (см. рис. 9). «Энтропия рассеяния» (18) H_C сложным образом зависит как от формы, так и от разности фаз отражателей (рис. 11). Коэффициент анизотропии Клода (20) $A_C=1$ при любых параметрах модели при отсутствии флуктуаций, поскольку для их определения требуется ненулевая дисперсия отсчетов сигнала. При наличии флуктуаций значение A_C обратно пропорционально их дисперсии.

Необходимо отметить особенность поляризационных характеристик (17) – (20), не отмечавшуюся в доступных автору литературных источниках: оценки параметров декомпозиции матрицы когерентности объекта существенно зависят от объема выборки, по которому осуществлялось усреднение матрицы когерентности (16).

В качестве примера на рис. 11 приведены гистограммы «энтропии рассеяния» (18) $P(H_C)$, полученные при неизменных параметрах модели (4) и различных объемах выборки при усреднении в (15). Очевидно, что оценки данных поляризационных характеристик растут с увеличением количества усредняемых данных.

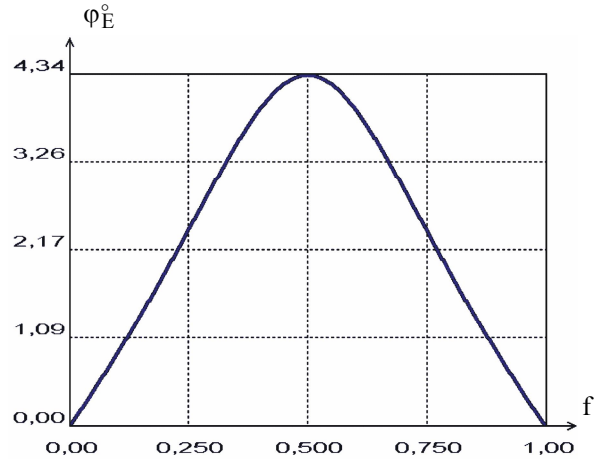


Рис. 2. Зависимость эллиптичности собственной поляризации ϕ_E от формы объекта f

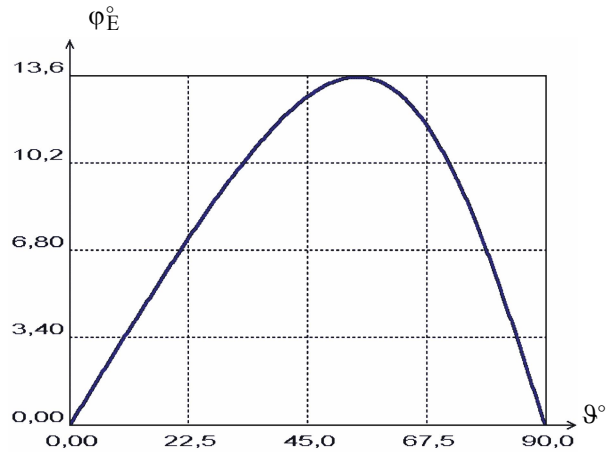


Рис. 3. Зависимость эллиптичности собственной поляризации ϕ_E разности фаз отражателей ϑ

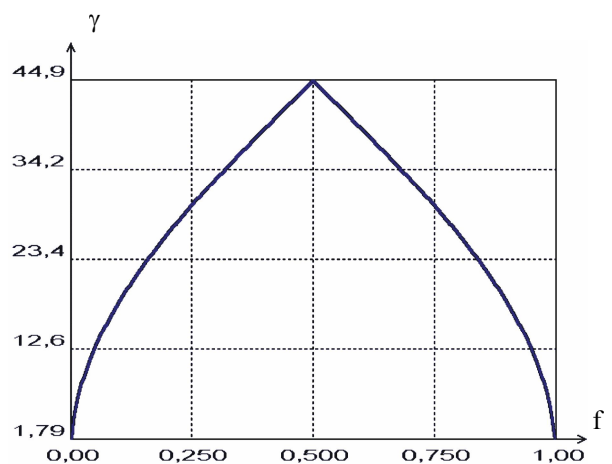


Рис. 4. Зависимость «угла поляризации объекта» γ от формы объекта f

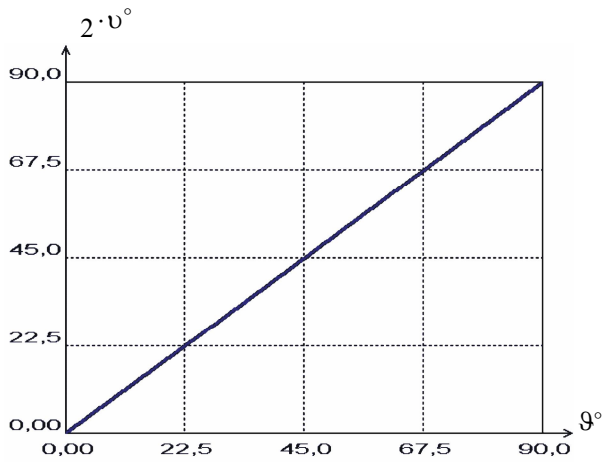


Рис. 5. Зависимость "угла скольжения объекта" ν от разности фаз отражателей объекта ϑ

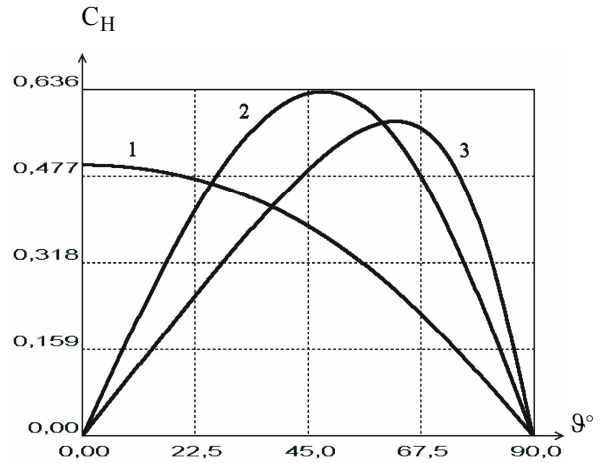


Рис. 8. Зависимости коэффициента «спиралевидности» C_H от разности фаз ϑ при различной ориентации объекта β :
 1 – $\beta = 30^\circ$; 2 – $\beta = 45^\circ$; 3 – $\beta = 60^\circ$

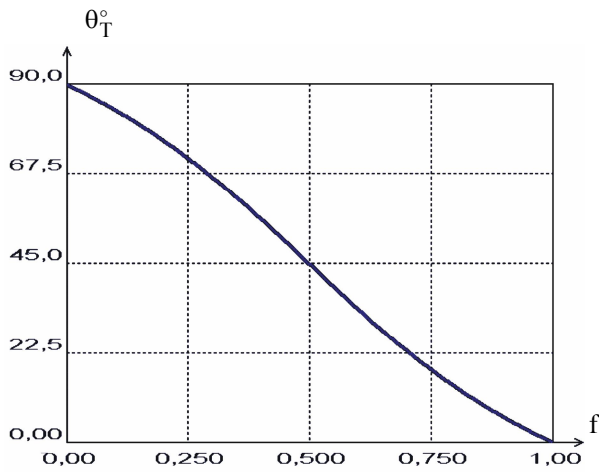


Рис. 6. Зависимость параметра «модуляция ориентации» θ_T от формы объекта f

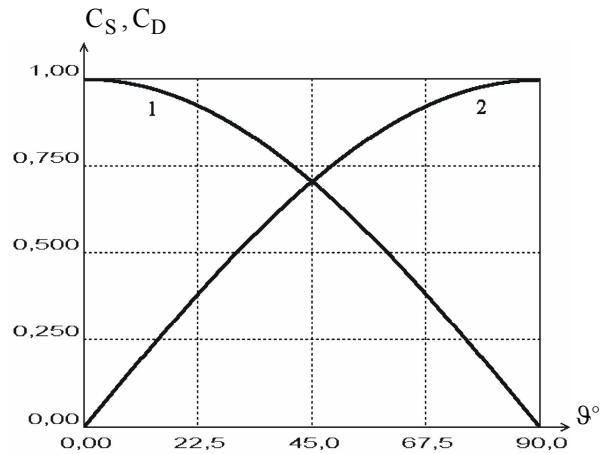


Рис. 9. Зависимости коэффициентов «сферичности» C_S (1) и «двугранности» C_D (2) от разности фаз ϑ

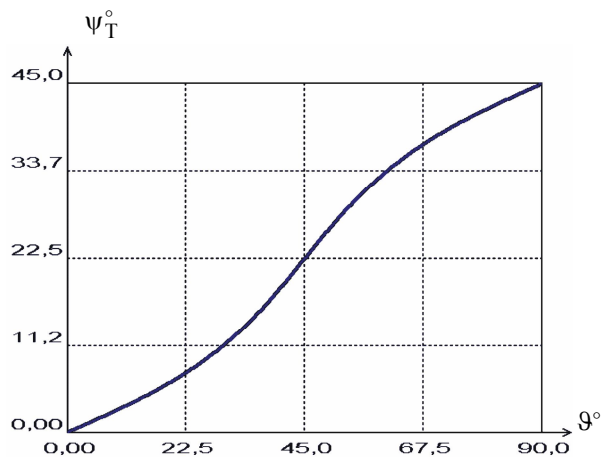


Рис. 7. Зависимость параметра «фазовая модуляция» ψ_T от разности фаз отражателей объекта ϑ

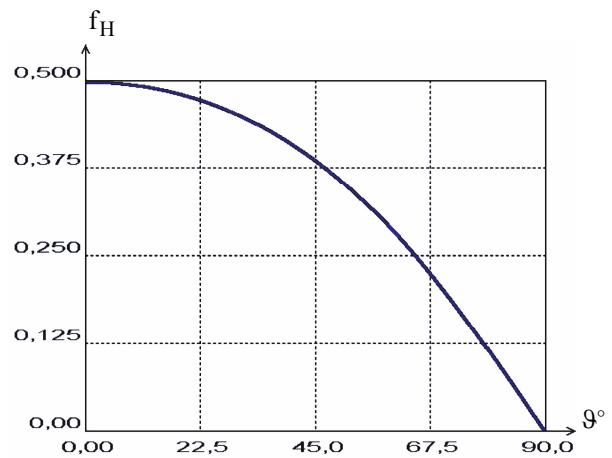


Рис. 10. Зависимость коэффициента «спиралевидности» f_H от разности фаз ϑ

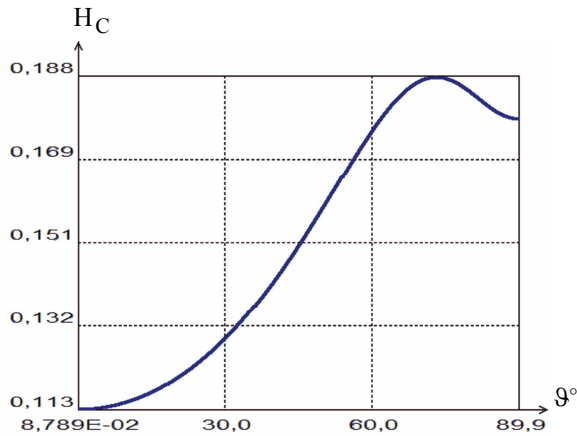


Рис. 11. Зависимость «энтропии рассеяния» H_C от разности фаз отражателей объекта φ

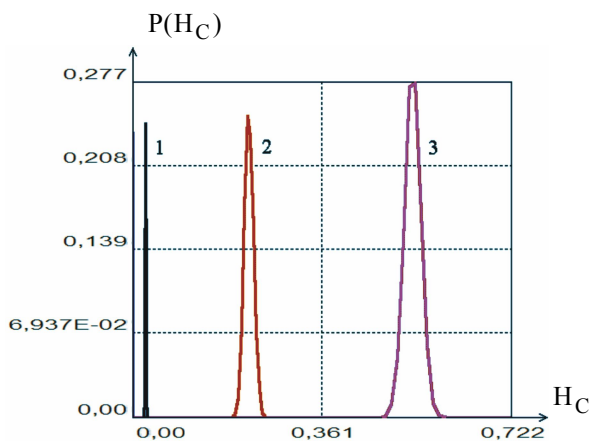


Рис. 12. Зависимость гистограмм «энтропии рассеяния» H_C от количества усредняемых отсчетов N :
1 – $N=4$; 2 – $N=16$; 3 – $N=64$

Заключение

Одним актуальных направлений совершенствования аэрокосмических средств ДЗ является использование радиолокационной поляриметрии, однако интерпретация получаемых при этом данных существенно зависит от методов их обработки.

Анализ доступных литературных источников показал, что все практически значимые результаты были получены при использовании неэнергетических ПХ объектов, однако к их выделению имеется как минимум четыре принципиально различных подхода, определяющих методологию обработки поляриметрических данных ДЗ.

Анализ методов обработки поляриметрических данных и выделяемых на их основе ПХ объектов ДЗ показал, что феноменологические методы декомпозиции дают сходные результаты, а получаемые на их основе ПХ либо не инвариантны, либо взаимозависимы, и не образуют полного множества парамет-

ров объекта. Наиболее информативными являются инвариантные ПХ, получаемые при использовании операторной когерентной декомпозиции ПМР на совокупность независимых модулирующих функций, отдельно описывающих амплитудные, фазовые и поляризационные преобразования сигнала при его отражении объектом. Дальнейшие исследования следует сосредоточить на экспериментальных исследованиях инвариантных ПХ объектов ДЗ.

Литература

1. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / под ред. С.Н. Конохова, В.И. Драновского, В.Н. Цимбала. – К.: НАНУ, 2007. – 440 с.
2. Волосюк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко; под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
3. Cloude S.R. Polarisation: Applications in Remote Sensing / S.R. Cloude. – Oxford: Oxford University Press, 2009. – 352 p.
4. Козлов А.И. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия / А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
5. Freeman A. Three-component scattering model to describe polarimetric SAR data / A. Freeman, S. Durden // Proc. of SPIE. Radar Polarimetry. – 1992. – V. 1748. – P. 213-224.
6. Krogager E. Properties of the Sphere, Diplane, and Helix Decomposition / E. Krogager, Z.H. Czyz // Proceedings of the Third International Workshop on Radar Polarimetry, IRESTE, University of Nantes, April 1995. – P.106 - 114.
7. Cameron W.L. Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes / W.L. Cameron, N. Youssef, L.K. Leung // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – V. 34, No. 3. – P. 793–803.
8. Lee J.-S. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications / Jong-Sen Lee, Eric Pottier. – CRC press, 2009. – 398 p.
9. Cloude S.R. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry / S.R. Cloude, E.Pottier // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – V. 34, No. 2. – P. 498 – 518.
10. Cloude S.R. Application of the $H/A/\alpha$ polarimetric decomposition theorem for land classification / S.R. Cloude, E. Pottier // Proc. of SPIE. – 1997. – V. 3120. – P. 132 – 143.
11. Pottier E. Radar polarimetry towards a future standardization / S.R. Cloude, E. Pottier // Annals of Telecommunications. – 2008. – V. 54, N. 1-2. – P. 137-141.
12. Huijnen J.R. Phenomenological theory of radar targets / J.R. Huijnen // Electromagnetic scattering. – 1978. – P. 653 – 712.

13. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.

14. Touzi R. Target scattering decomposition in terms of roll – invariant target parameters / R. Touzi // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2007. – V. 45, № 1. – P. 73 – 84.

15. Радиолокационный измерительный комплекс для поляризационных исследований / М.Ф. Бабаков, С.В. Кондратюк, О.А.Краснов, А.В. Попов, А.В.Узленков // *Радиоэлектронные устройства в информационно-измерительных системах: Темат. Научно-техн. сб. - Вып. 4. - X., 1989. - С. 21 – 24.*

16. Popov A.V. Informativity of polarimetric radar invariants / A.V. Popov, O.B. Pogrebnyak // *Proc. of SPIE*. – 2003. – V. 5151. – P. 74 – 84.

17. Бабаков М.Ф. Використання поляризаційних ознак для визначення електрофізичних параметрів земних поверхонь / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов, П.С. Сльцов // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: зб. наук. праць. - Вип. 3. - Хмельницький, 1999. - С. 29 – 33.*

18. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-

модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1999. - № 11. - С. 42-45.*

19. Попов А.В. Операторное описание поляризационных характеристик объектов активного дистанционного зондирования / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология. - 2009. - № 5 (62). - С. 94-102.*

20. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сополев. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.

21. Попов А.В. Оценка параметров движения объектов дистанционного зондирования по данным радиолокационного поляриметра / А.В. Попов, Р.В. Колесник // *Авиационно-космическая техника и технология. - 2009. - № 6 (63). - С. 93-100.*

22. Yamaguchi Y. Four – Component Scattering Model for Polarimetric SAR Image Decomposition / Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. - 2005. - Vol. 43, No. 8. - P. 1699-1706.*

Поступила в редакцию 5.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., начальник отдела радиолокации Г.И. Хлопов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕОРЕМ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ АКТИВНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

А.В. Попов

Розглянуто основні відомі теореми декомпозиції поляризаційних властивостей об'єктів активного дистанційного зондування, проведений порівняльний аналіз методів обробки поляриметричних даних і виділованих на їхній основі поляризаційних характеристик об'єктів. Методами математичного і статистичного моделювання показано, що найбільш інформативними є інваріантні поляризаційні характеристики, одержувані при використанні операторної когерентної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання на сукупність незалежних модулюючих функцій, що роздільно описує амплітудні, фазові і поляризаційні перетворення сигналу при його відображенні об'єктом.

Ключові слова: дистанційне зондування, поляризаційна матриця розсіювання, декомпозиція, поляризаційні характеристики, оператор розсіювання, моделювання.

COMPARATIVE ANALYSIS OF POLARIZATION CHARACTERISTICS OF ACTIVE AEROSPACE REMOTE SENSING OBJECTS DECOMPOSITION THEOREMS

A.V. Popov

Main decomposition theorems of polarimetric properties of active remote sensing objects are viewed. A comparative analysis of processing methods of polarimetric data and derived on their basis objects' polarization characteristics is done. By the methods of mathematical and statistical modeling it is shown that the most informative are the invariant polarization characteristics that are received during the operator coherent decomposition of a polarimetric scattering matrix to a group of independent modulating functions that separately describe amplitude, phase and polarization transformations of a signal when it is reflected by an object.

Key words: remote sensing, backscattering matrix, decomposition, polarization signatures, backscattering operator, modeling

Попов Анатолий Владиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: a.v.popov@inbox.ru.