

УДК 621.396.96

А.В. ПОПОВ

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ АКТИВНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены основные известные теоремы декомпозиции поляризационных свойств объектов активного аэрокосмического дистанционного зондирования и выделяемые на их основе поляризационные характеристики объектов. На основе теоретико-информационных критериев различимости классов объектов выполнен анализ полученных автором экспериментальных данных. Показано, что для распознавания объектов активного дистанционного зондирования наиболее информативными являются инвариантные поляризационные передаточные характеристики, получаемые при использовании операторной когерентной декомпозиции поляризационной матрицы рассеяния.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, поляризационная матрица рассеяния, декомпозиция, поляризационные передаточные характеристики, различимость объектов, распознавание.

Введение

Системы активного дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей широко применяются сегодня при решении задач экологического мониторинга окружающей среды, картографирования, предупреждения чрезвычайных ситуаций [1] и т.д. Одним из направлений их совершенствования является использование поляризационно-многоканальных бортовых радиолокационных систем (РЛС), т.н. поляриметров [2], 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 выделению информативных признаков для обнаружения, селекции и распознавания объектов ДЗ.

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 [1]. Недостатком ПМР является зависимость ее элементов от поляризации антенн РЛС [2]. Вследствие изменения ориентации летательного аппарата в процессе полета наблюдаемые значения ПМР также изменяются. Используя 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 [2].

В 1992 г. в работе А. Фримена (A. Freeman) и С. Дурдена (S. Durden) [3] был предложен феноменологический подход к решению проблемы интерпретации поляриметрической информации. Предлагалось выделять «свойства объектов» (Feature-Motivated Decomposition), – коэффициенты подобия ПХ объекта характеристикам эталонных отражателей (поверхность, двугранный отражатель, сфера). Данный подход был развит в 1995 г. в работах Е. Крогагера (E. Krogager) [4]. Предлагалось определять коэффициенты подобия объекта сфере, двугранному отражателю и спирали (Sphere – Diplane – Helix Decomposition). Принципиальным недостатком такого подхода является неортогональность разделяющих матриц и, как следствие, коррелированность коэффициентов разложения [8].

В работах С. Клода (S.R. Cloude) и Е. Поттье (E. Pottier) [5,6] (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, работы [5,6] 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 [7].

Альтернативный подход к решению проблемы интерпретации поляриметрической информации был предложен еще в 1978 году [8] Д. Хайненом (J. Huijnen), заключающийся в физически обоснованной инвариантной когерентной декомпозиции ПМП объекта на основе определения т.н. собственных и нулевых поляризаций объекта ДЗ [9]. К сожалению, технический уровень средств ДЗ тех лет не позволял реализовать предложенную в [8, 9] теорию на практике. За рубежом активные исследования в данном направлении начались лишь с запуском спутника RADARSAT-2 (например, [10]).

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского „ХАИ” исследования инвариантных неэнергетических ПХ объектов ДЗ проводились с 80-х годов с помощью мобильного автоматизированного радиолокационного поляриметра 3-х см диапазона, обеспечивающего получение полной поляриметрической информации об объектах ДЗ [11]. Была экспериментально доказана высокая информативность инвариантных ПХ и эффективность их применения при решении различных задач ДЗ [12].

Дальнейшее развитие теория инвариантной когерентной декомпозиции ПМП объекта получила в работе [13] (2009 г.), в которой на основе теории поляризационной модуляции сигналов и математического аппарата двойной комплексной плоскости [14] было введено операторное описание объекта ДЗ, позволяющее получать информативные собственные ПХ объекта за счет выделения независимых передаточных функций, отдельно описывающих амплитудные, фазовые и поляризационные (эллиптичности, ориентации) преобразования сигнала при его отражении объектом ДЗ [15, 16]. Проведенный в работе [17] сравнительный теоретический анализ теорем декомпозиции ПХ объектов ДЗ показал взаимосвязь поляризационных передаточных функций с такими геометрическими характеристиками объектов ДЗ, как выпуклость, ориентация и т.д.

Постановка задачи исследований

Поиск методов обработки данных ДЗ, обеспечивающих решение проблемы достоверной интерпретации поляриметрической информации, проводился рядом авторов, например, [1–10, 12, 15–17] в течение последних 40 лет. 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 на основе экспериментальных данных о ПХ реальных объектов для определения наиболее перспективных методов выделения признаков для распознавания объектов аэрокосмического 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 $\{x, y\}$ [9].

Как известно [2, 9], отраженный от радиолокационного объекта сигнал \vec{E}_{Sc} вида (1) связан с зондирующим сигналом \vec{E}_{In} комплексной поляризационной матрицей рассеяния (ПМП) \dot{S}

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

ПМП \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 $\dot{S}_{xy} = \dot{S}_{yx}$ [9].

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. Когерентная декомпозиция ПМР объекта

Когерентная декомпозиция ПМР (3) основана на ее представлении собственными числами λ_1, λ_2 и собственными векторами $\vec{\zeta}_E$ [9], которые определяются характеристическим уравнением

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

и имеют вид [9]:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \cdot e^{j\psi_1} & 0 \\ 0 & \lambda_2 \cdot e^{j\psi_2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\vec{\zeta}_E = \begin{bmatrix} \cos \theta_E & -\sin \theta_E \\ \sin \theta_E & \cos \theta_E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi_E \\ j \cdot \sin \phi_E \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где ϕ_E и θ_E – поляризационные параметры так называемой [9] собственной поляризации объекта. Физически собственные поляризации (5), соответствующие собственным числам (4) матрицы (3), характеризуются отсутствием в отраженном сигнале компонент, поляризованных ортогонально облучающей волне. Собственные числа λ_1, λ_2 ПМР \dot{S} являются комплексными коэффициентами отражения объекта при зондировании его сигналами собственных поляризаций, а собственные вектора $\vec{\zeta}_E$ (5), соответствующие собственным числам ПМР λ_1, λ_2 , являются ортогональными по определению и образуют собственный ортогонально эллиптический поляризационный базис объекта [14].

Дальнейшим развитием теории декомпозиции объектов ДЗ стала разработка поляризационного оператора объекта ДЗ [13]. В отличие от матричной декомпозиции (4) – (5), декомпозиция ПМР объекта на двойной комплексной плоскости [14] показывает в явном виде все преобразования зондирующего сигнала \vec{E}_{in} при его отражении от объекта ДЗ:

$$\vec{E}_{Sc} |_{HV} = k \cdot \ddot{S}(\phi_T, \theta_T, \psi_T, \phi_E, \theta_E) \times \vec{E}_{in} |_{HV}, \quad (6)$$

где \times – знак операторного умножения [14];

\ddot{S} – оператор рассеяния [13];

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

ϕ_E, θ_E – углы эллиптичности и ориентации собственного поляризационного базиса (5).

Параметры $k, \psi_T, \phi_T, \theta_T$ декомпозиции (6) определяются из ПМР \dot{S} по соотношениям, приведенным в [13]. Необходимо отметить, что разложение (6) является единственным, поскольку основано на анализе собственных чисел и векторов ПМР.

3. Феноменологическая декомпозиция ПМР объекта

Альтернативным подходом к декомпозиции ПМР объекта ДЗ является «выделение свойств» объектов (Feature – Motivated Decomposition), предложенное Е. Крогагером (E. Krogager) [4], – определение коэффициентов подобия объекта сфере, двугранному отражателю и спирали (т.н. SDH – декомпозиция – Sphere/ Dihedral /Helix Decomposition).

Согласно [4], ПМР объекта представляется в виде суммы ПМР эталонов

$$\dot{S} = C_S \cdot \dot{S}_S + e^{j\varphi} \cdot (C_D \cdot \dot{S}_D + C_H \cdot \dot{S}_H), \quad (7)$$

где $\dot{S}_S, \dot{S}_H, \dot{S}_D$ – ПМР сферы, двугранного отражателя и спирали соответственно;

φ – общая фаза элементов ПМР;

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).

Несмотря на явную неинвариантность и коррелированность параметров SDH–декомпозиции, идеи У. Камерона и Е. Крогагера стали методологической основой целого ряда последующих теорем декомпозиции объектов и нашли достаточно широкое применение в практике обработки данных ДЗ.

4. Декомпозиция матрицы когерентности объекта

Одной из наиболее широко используемых на сегодняшний день является декомпозиция матрицы когерентности зондирования (Target Coherence Matrix) объекта ДЗ, определяемой по т.н. вектору рассеяния Паули (Pauli Scattering Vector) [2]

$$\vec{S}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\dot{S}_{HH} + \dot{S}_{VV} \quad \dot{S}_{HH} - \dot{S}_{VV} \quad \dot{S}_{HV} + \dot{S}_{VH} \right]^T \quad (8)$$

как

$$\dot{T} = \left\langle \vec{S}_P \cdot \vec{S}_P^\oplus \right\rangle, \quad (9)$$

где \oplus – знак транспонирования и комплексного сопряжения.

Матрица (9) имеет три положительных собственных числа $\lambda_{Ti}, i=1...3$ и три ортогональных собственных вектора \vec{e}_{Ti} . В работе [5] было предложено использовать отношения

$$P_i = \frac{\lambda_{Ti}}{\lambda_{T1} + \lambda_{T2} + \lambda_{T3}}, \quad i=1...3 \quad (10)$$

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

$$H_C = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \log_3 (P_i), \quad (11)$$

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}_{T_i} 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

$$\alpha_C = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \alpha_i; \quad (12)$$

$$\beta_C = \sum_{i=1}^3 P_i \cdot \beta_i.$$

Согласно [2], угол β_C связан с ориентацией отражателей в плоскости волнового фронта, а угол α_C характеризует тип отражателя:

- $\alpha_C = 0$ для изотропной поверхности,
- $\alpha_C = 45^\circ$ для диполя;
- $\alpha_C = 90^\circ$ для двугранного отражателя.

Система параметров «ориентация отражателя» β_C , «тип рассеяния» α_C , и «энтропия рассеяния» H_C была дополнена параметром «анизотропия рассеяния» [6] (получившим в литературе название «анизотропия Клода» – Cloud's Anisotropy)

$$A_C = \frac{\lambda_{T2} - \lambda_{T3}}{\lambda_{T2} + \lambda_{T3}}, \quad (13)$$

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

Таким образом, три различных подхода к декомпозиции отражательных свойств объекта ДЗ дают 3 системы поляризационных характеристик объектов ДЗ:

- поляризационные передаточные характеристики объекта по эллиптичности ϕ_T , ориентации θ_T , фазе сигнала ψ_T (6) и параметры собственного поляризационного базиса объекта ϕ_E, θ_E (5);
- параметры феноменологической декомпозиции «сфероидальность» C_S , «двугранность» C_D и «спиралевидность» C_H (7) объекта;
- характеристики «типа рассеяния» – «энтропия» H_C (11), тип α_C и ориентация отражателей β_C (12), анизотропия рассеяния A_C (13).

5. Экспериментальные исследования ПХ радиолокационных объектов

Для исследования возможности распознавания объектов ДЗ по поляризационным параметрам отраженных сигналов проводились натурные эксперименты по измерению сигналов, отраженных различными объектами. Исследования производились с помощью автоматизированного радиолокационного поляриметра 3-х см диапазона [12] с разрешающей способностью по дальности 75 м и угловым разрешением 3° , дальность до измеряемых объектов составляла 2 – 9 км. Наведение антенн осуществлялось с помощью оптической системы телевизионного контроля. Радиолокационный поляриметр обеспечивал в экспериментах измерение с частотой 100 Гц полной поляризационной матрицы рассеяния объекта (3) в ортогонально линейном (H, V) поляризационном базисе с погрешностью измерения амплитуд не более 1 дБ и фаз – не более $0,5^\circ$ при уровне поляризационной развязки каналов не менее 30 дБ. В режиме измерений со стробированием по дальности измерительная подсистема обеспечивала непрерывное накопление выборки ПМР объемом не менее 8192 отсчета в заданной точке пространства, положение которой устанавливалось программно с шагом 7,5 м и точностью не хуже $\pm 0,5$ м.

Исследовались различные объекты, накопленные данные о которых объединялись затем в классы объектов одинаковой физической природы:

- класс «море» объединяет ПХ морской поверхности с различной силой волнения при различных ракурсах ее наблюдения;
- класс «лес» – лесные хвойные и лиственные массивы;
- класс «поле» – земная поверхность с травяной и кустарниковой растительностью;
- класс «горы» – горные массивы;
- класс «металл» включает в себя различные наземные металлоконструкции (вышки, мачты, трубы промышленных объектов и т.д.), а также мобильные объекты (автомобильная техника различных конструкций);
- класс «бетон» – наземные здания и сооружения различной конфигурации.

В качестве примера на рис. 1 – 3 представлены гистограммы поляризационных характеристик «трансформация эллиптичности сигнала» ϕ_T , «двугранность объекта» C_D и «тип рассеяния» α_C 4-х объектов ДЗ (морская поверхность, лесной массив, бетонные здания, металлоконструкции), анализ которых показывает, что ПХ объектов ДЗ имеют достаточно сложные формы законов распределения и существенно зависят от типа наблюдаемого объекта.

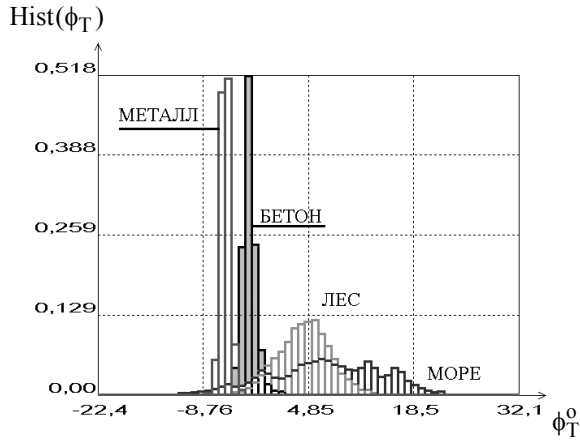


Рис. 1. Гистограммы поляризационного признака «трансформация эллиптичности сигнала» ϕ_T для различных классов объектов

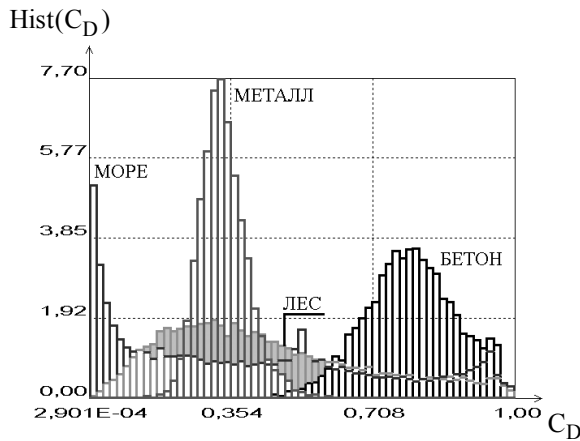


Рис. 2. Гистограммы поляризационного признака «двугранность объекта» C_D для различных классов объектов

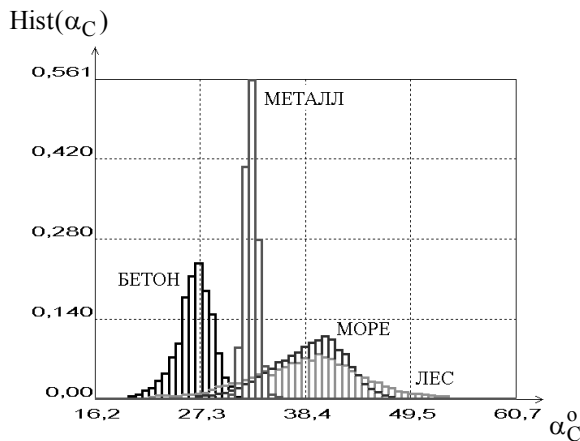


Рис. 3. Гистограммы поляризационного признака «тип рассеяния» α_C для различных классов объектов

6. Различимость классов объектов

Сравнительный анализ информативности поляризационных характеристик объектов ДЗ, получае-

мых на основе рассмотренных выше теорем декомпозиции, может быть проведен с использованием теоретико-информационных критериев различимости классов объектов [18].

Допустим, система ДЗ наблюдает множество классов объектов $A=\{a_k\}$, $k=\overline{1,K}$ с дискретным распределением априорных вероятностей

$$P=P(a_k), k=\overline{1,K}, \sum_{k=1}^K P(a_k) = 1,$$

регистрируя при этом сигнал $S(t, \xi)$, содержащий информацию об объектах в системе поляризационных характеристик $\xi = \{\xi_1, \dots, \xi_m\}$. Каждый класс объектов a_k описывается плотностью распределения $\rho(\bar{x} | a_k)$, где вектором \bar{x} обозначена конкретная реализация случайного вектора ξ . Система распознавания объектов ДЗ по результатам измерений параметров \bar{x} должна определить класс a_k .

Мерой различимости двух классов объектов a_k и a_j по совокупности параметров сигнала ξ является дивергенция Кульбака [19]

$$J(a_k, a_j | \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} [\rho(\bar{x} | a_k) - \rho(\bar{x} | a_j)] \cdot \ln \frac{\rho(\bar{x} | a_k)}{\rho(\bar{x} | a_j)} d\bar{x}, \quad (14)$$

применимая лишь в случае двух классов объектов.

Для случая $K > 2$ классов объектов в работе [20] введено обозначение $\rho(\bar{x} | \bar{a}_k)$ для смеси плотностей вероятностей всех классов, за исключением a_k ,

$$\rho(\bar{x} | \bar{a}_k) = \frac{1}{1 - P(a_k)} \sum_{i \neq k=1}^K P(a_i) \cdot \rho(\bar{x} | a_i), \quad (15)$$

позволяющее определить меру различимости класса a_k на фоне остальных классов как

$$J(a_k | \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} [\rho(\bar{x} | a_k) - \rho(\bar{x} | \bar{a}_k)] \cdot \ln \frac{\rho(\bar{x} | a_k)}{\rho(\bar{x} | \bar{a}_k)} d\bar{x}. \quad (16)$$

Среднее значение $J(a_k | \xi)$, $k=\overline{1,K}$, согласно [20], будет представлять собой меру различимости множества классов $\{A\}$ на совокупности параметров $\{\xi\}$

$$J(\xi) = \sum_{k=1}^K P(a_k) \cdot J(a_k | \xi). \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет выполнять сравнение информативности различных систем параметров $\{\xi\}$, выделяемых из сигнала $S(t, \xi)$.

7. Общий анализ информативности ПХ объектов ДЗ по экспериментальным данным

На этапе общего анализа информативности поляризационных признаков объектов ДЗ для 6 указанных в п. 5 классов объектов на основе их статистических моделей производился расчет различимости каждого объекта на фоне остальных классов по каждому исследуемому поляризационному признаку $J(a_k | \xi)$ (16), $k = \overline{1, K}$, $K = 6$, а также расчет обобщенной различимости 6 классов объектов $J(\xi)$ (17) по признаку ξ . Результаты расчетов, упорядоченные по убыванию различимости $J(\xi)$, представлены в табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает, что наиболее информативными являются поляризационные характеристики объектов ДЗ, получаемые на основе инвариантной декомпозиции ПМР объекта (см. п.2):

– углы эллиптичности и ориентации собственного поляризационного базиса объекта ϕ_E , θ_E ($J(\phi_E) = 8,96$ и $J(\theta_E) = 6,61$);

– поляризационные передаточные функции объекта, характеризующие трансформацию поляризации сигнала при его отражении объектом, по фазе ψ_T ($J(\psi_T) = 8,48$), эллиптичности ϕ_T ($J(\phi_T) = 7,37$) и ориентации θ_T ($J(\theta_T) = 6,23$).

Анализ составляющих различимости $J(\xi)$ показывает, что максимальные значения различимости одного класса объектов на фоне остальных достигаются для малоразмерных (сосредоточенных) объектов. Так высокую различимость класса «металл» обеспечивают инвариантные признаки ϕ_E , θ_T , ϕ_T , ψ_T ($J(a_k | \xi) = 18 \dots 20$), класса «бетон» – ψ_T , θ_E .

Для пространственно распределенных объектов максимальные значения различимости существенно ниже $\max_{a_k, \xi} J(a_k | \xi) < 10$, при этом наблюдается эффект маскирования одних классов объектов другими (см. рис. 1 – 3). Так, например, максимум различимости горных массивов наблюдается для признака ϕ_E , по которому различимость растительности (классы «лес» и «поле») не превышает 3.

Таким образом, результаты исследования информативности поляризационных характеристик «крупных» классов объектов ДЗ, с одной стороны, подтверждают высокую (по сравнению с другими ПХ) информативность инвариантных признаков для решения задач распознавания, но, с другой стороны, требуют детального анализа различимости объектов ДЗ по их поляризационным признакам.

8. Анализ информативности по экспериментальным данным ПХ металлических объектов ДЗ

Практический интерес представляет исследование возможности распознавания объектов с одинаковыми электрофизическими свойствами, в частности, металлических, но с различной конфигурацией и ориентацией в пространстве. Для этого проводился сравнительный анализ различимости сооружений (мачта телецентра г. Харьков, трубы промышленных объектов, вышка ретранслятора, опоры линий электропередач, наземные трубопроводы и др.), а также наземной техники (автомобили МАЗ-516, ГАЗ-66 и др.). Фрагмент результатов расчета обобщенной различимости $J(\xi)$ (17) и различимости каждого объекта на фоне остальных классов по каждому исследуемому поляризационному признаку $J(a_k | \xi)$ (16), $k = \overline{1, K}$, $K = 6$, на основе статистических моделей, построенных по экспериментальным данным, представлен в таблице 2.

Анализ табл. 2 показывает, что наиболее информативными для распознавания металлических объектов являются поляризационные признаки, связанные выпуклостью объекта (см., например, [17]) и его ориентацией ($J(\xi) > 12$):

- ϕ_E - эллиптичность собственного поляризационного базиса;
- C_H - «спиралевидность» объекта;
- θ_E - ориентация собственного поляризационного базиса;
- β_C - ориентация отражателей объекта.

Полученные по экспериментальным данным результаты хорошо согласуются с результатами исследований взаимосвязи ПХ со свойствами объектов ДЗ [15-17], что позволяет сделать вывод о том, что поляризационные характеристики, в первую очередь, собственного поляризационного базиса объекта θ_E , ϕ_E дают возможность оценивать ориентацию и форму объекта ДЗ.

Практический интерес представляет также тот факт, что поляризационные передаточные характеристики объекта θ_T , ϕ_T , ψ_T , описывающие трансформацию поляризации сигнала при его отражении объектом, дают крайне низкую ($J(\xi) < 4$) различимость металлических объектов различной формы, в то время как, согласно табл. 1, они обладают высокой информативностью для распознавания классов объектов с различными электрофизическими свойствами. Этот факт позволяет предположить, что эти ПХ могут использоваться для распознавания металлических объектов произвольной формы и ориента-

ции на фоне подстилающей поверхности, т.е. являются инвариантными (не зависящими от формы и ориентации) признаками металлических объектов.

Таблица 1
Информативность поляризационных характеристик основных классов объектов ДЗ

№	Признак ξ	Информативность $J(\xi)$	Различимость класса объектов $J(a_k \xi)$ на фоне остальных классов					
			Море	Лес	Поле	Горы	Металл	Бетон
1	Φ_E	8,96	5,44	2,98	2,80	10,50	20,09	11,94
2	Ψ_T	8,48	3,03	6,73	1,88	2,02	18,25	18,95
3	Φ_T	7,37	5,78	3,67	1,92	6,15	19,05	7,68
4	Θ_E	6,61	3,76	4,96	2,73	1,76	12,56	13,92
5	Θ_T	6,23	2,03	0,69	1,04	0,86	19,67	13,09
6	C_H	5,80	1,02	1,15	2,71	1,35	18,90	9,69
7	α_C	5,07	1,22	0,68	0,82	0,67	13,35	13,70
8	β_C	4,78	1,07	1,06	0,32	0,84	12,51	12,88
9	C_D	4,54	1,09	1,37	3,55	0,50	8,97	11,79
10	H_C	4,39	0,72	0,65	0,77	0,50	11,15	12,56
11	A_C	4,28	0,97	0,84	1,24	1,38	11,31	9,95
12	C_S	3,87	0,77	0,71	0,51	0,58	9,76	10,92

Таблица 2
Информативность поляризационных характеристик металлических объектов ДЗ

№	Признак ξ	Информативность $J(\xi)$	Различимость $J(a_k \xi)$ объекта на фоне остальных классов					
			Телецентр	Труба верт.	Мачта	МАЗ-516	ГАЗ-66	Трубопровод
1	Φ_E	13,98	13,58	16,30	11,01	16,97	13,89	12,14
2	Θ_E	13,97	11,94	11,95	11,44	18,06	11,15	19,27
3	β_C	13,54	10,64	14,84	13,69	12,54	9,93	19,57
4	C_H	12,90	13,48	16,51	8,69	16,23	13,82	8,65
5	A_C	10,46	9,64	9,41	11,56	12,22	6,27	13,66
6	A_C	9,03	7,21	8,82	14,97	4,72	8,59	9,87
7	α_C	5,54	1,28	3,25	12,40	2,54	5,98	7,77
8	C_S	5,08	3,28	9,28	7,26	4,67	2,83	3,16
9	C_D	4,25	3,82	4,29	7,08	3,58	3,99	2,74
10	Ψ_T	4,24	1,85	2,85	6,65	2,42	6,97	4,73
11	Φ_T	3,83	7,03	0,91	5,35	1,97	2,61	5,11
12	Θ_T	2,80	0,85	2,18	2,65	2,79	4,06	4,29

9. Анализ информативности ПХ для распознавания металлических объектов на фоне местности

При решении задач картографирования местности, мониторинга технических объектов, поисково-спасательных работ и т.д. необходимо обеспечить распознавание малоразмерных объектов на фоне подстилающей (земной, морской) поверхности. Как было показано в п. 7, 8, поляризационные признаки позволяют выделять объекты ДЗ с различными электрофизическими свойствами и геометрическими характеристиками, однако их различимость существенно зависит от типа «фоновых» пространственно-распределенных объектов (см. табл. №1). Практический интерес представляет зависимость информативности ПХ наземных малоразмерных объектов (зданий, сооружений, техники) от типа поверхности, на которой они находятся. Для этого проводился сравнительный анализ различимости металлических сооружений (мачта телецентра г. Харьков, трубы промышленных объектов, вышка ретранслятора, опоры линий электропередач, наземные трубопроводы и др.) и наземной техники (автомобили МАЗ-516, ГАЗ-66 и др.), объединенных в класс 1 - «металлические объекты», на фоне железобетонных и кирпичных зданий, объединенных в класс 2 - «здания», горных массивов (класс 3 - «горы»), морской поверхности при различной силе волнения (класс 4 - «море»), растительности (травяной покров, кустарник, лесной массив - класс 5 «растительность»).

Фрагмент результатов расчета различимости (14) $J(a_j; a_j | \xi)$, $j = 2, 5$ и различимости каждого объекта на фоне остальных классов по каждому исследуемому поляризационному признаку $J(a_1 | \xi)$ (15), на основе статистических моделей, построенных по экспериментальным данным, представлен в табл. 3. Полученные результаты в целом соответствуют результатам обобщенного анализа (табл. 1), однако детальный анализ табл. №3 показывает, что для распознавания металлических объектов в городских массивах наиболее информативны признаки:

- Θ_T - передаточная характеристика объекта по ориентации, $J(a_1, a_2 | \Theta_T) = 33,3$;

- Φ_E - эллиптичность собственного поляризационного базиса объекта $J(a_1, a_2 | \Phi_E) = 31,8$.

При распознавании металлических объектов на фоне гор помимо эллиптичности собственного поляризационного базиса Φ_E ($J(a_1, a_3 | \Phi_E) = 38,11$) вы-

сокой информативностью обладает ориентация собственного базиса объекта θ_E ($J(a_1, a_3 | \theta_E) \approx 17$).

На фоне морской поверхности металлические объекты наиболее «заметны» помимо эллиптичности собственного поляризационного базиса ϕ_E ($J(a_1, a_4 | \phi_E) = 37,3$) по признакам трансформации фазы сигнала (передаточная характеристика объекта по фазе) ψ_T ($J(a_1, a_4 | \psi_T) = 28,9$) и ориентации собственного базиса θ_E .

На фоне растительности металлические объекты хорошо различимы по трансформации фазы сигнала ψ_T ($J(a_1, a_5 | \psi_T) = 23,3$), трансформации эллиптичности ϕ_T и ориентации собственного базиса объекта θ_E (различимость 17...19).

Необходимо отметить, что информативность систем поляризационных признаков, получаемых на основе феноменологической декомпозиции ПМР (см. п. 3) и декомпозиции матрицы когерентности объекта (см. п. 4) существенно «отстают» по информативности как в общем случае (распознавание объектов различной электрофизической природы, табл. 1), так и при решении конкретных задач ДЗ.

Таким образом, поляризационные характеристики объектов ДЗ, получаемые на основе инвариантной декомпозиции ПМР, входят в группу наиболее информативных признаков при решении задач выделения металлических объектов на фоне подстилающей поверхности и местных объектов, однако выбор признакового пространства для их распознавания должен определяться исходя из условий конкретной задачи ДЗ.

Таблица 3
Информативность поляризационных характеристик для распознавания металлических объектов на фоне местности

№	Признак ξ	Информативность признака $J(a_1 \xi)$	Различимость класса «металл» (1) на фоне:			
			Бетон (2)	Горы (3)	Море (4)	Лес (5)
1	ϕ_E	29,90	31,86	38,11	37,35	12,28
2	ψ_T	23,67	26,04	16,33	28,97	23,33
3	θ_E	19,38	20,85	17,19	21,53	17,96
4	ϕ_T	18,82	22,59	16,62	16,09	19,97
5	θ_T	17,86	33,36	15,15	16,84	6,07
6	C_H	7,34	9,21	7,41	6,42	4,34
7	α_C	5,06	0,31	5,27	6,56	8,11
...						
12	A_C	0,77	0,66	0,13	1,11	1,17

Заключение

Одним актуальных направлений совершенствования аэрокосмических средств ДЗ является использование радиолокационной поляриметрии, однако интерпретация получаемых при этом данных существенно зависит от методов выделения информативных признаков объектов ДЗ. Анализ результатов обработки экспериментальных данных тремя основными методами выделения ПХ объектов ДЗ показал, что для решения задач распознавания объектов ДЗ наиболее информативными являются инвариантные ПХ, получаемые при использовании операторной когерентной декомпозиции ПМР на совокупность независимых передаточных функций, раздельно описывающих амплитудные, фазовые и поляризационные преобразования сигнала при его отражении объектом.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить на оценке эффективности использования этих ПХ объектов при решении конкретных задач ДЗ.

Литература

1. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей [Текст] / Под ред. С.Н. Конюхова, В.И. Драновского, В.Н. Цимбала. – К.: НАНУ, 2007. – 440 с.
2. Cloude, S.R. Polarisation: Applications in Remote Sensing [Text] / S.R. Cloude. – Oxford: Oxford University Press, 2009. – 352 p.
3. Freeman, A. Three-component scattering model to describe polarimetric SAR data [Text] / A. Freeman, S. Durden // Proc. of SPIE. Radar Polarimetry. – 1992. – V. 1748. – P. 213 – 224.
4. Krogager, E. Properties of the Sphere, Diplane, and Helix Decomposition [Text] / E. Krogager, Z.H. Cysz // Proceedings of the Third International Workshop on Radar Polarimetry, IRESTE, University of Nantes, April 1995. – P.106 – 114.
5. Cloude, S.R. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry [Text] / S.R. Cloude, E.Pottier // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1996. – V. 34, No. 2. – P. 498 – 518.
6. Cloude, S.R. Application of the H/A/ α polarimetric decomposition theorem for land classification [Text] / S.R. Cloude, E. Pottier // Proc. of SPIE. – 1997. – V. 3120. – P. 132 – 143.
7. Pottier, E. Radar polarimetry towards a future standardization [Text] / S.R. Cloude, E. Pottier // Annals of Telecom. – 2008. – V. 54, N. 1–2. – P. 137–141.
8. Huijnen, J.R. Phenomenological theory of radar targets [Text] / J.R. Huijnen // Electromagnetic scattering. – 1978. – P. 653 – 712.
9. Канарейкин, Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов [Текст] / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.

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

11. Радиолокационный измерительный комплекс для поляризационных исследований [Текст] / 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.*

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

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

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

15. Попов, А.В. Оценка параметров движения объектов дистанционного зондирования по данным

радиолокационного поляриметра [Текст] / А.В. Попов, Р.В. Колесник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 6 (63). – С. 93 – 100.

16. Попов, А.В. О поляризационной модуляции радиолокационных сигналов, отраженных морской поверхностью [Текст] / А.В. Попов, М.В. Борцова // *Системы управления, навигации та зв'язку*. – 2011. – №1 (17). – С. 46 – 55.

17. Попов, А.В. Сравнительный анализ теорем декомпозиции поляризационных характеристик объектов активного аэрокосмического дистанционного зондирования [Текст] / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 5 (72). – С. 90 – 99.

18. Фукунага, К. Введение в статистическую теорию распознавания образов [Текст]: пер. с англ. / К. Фукунага. – М.: Наука, 1979. – 367 с.

19. Кульбак, С. Теория информации и статистика [Текст] : пер. с англ. / С. Кульбак. – М.: Наука, 1968. – 302 с.

20. Попов, А.В. Критерий информативности параметров сигналов для радиолокационного распознавания объектов [Текст] / А.В. Попов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 1999. – № 12. – С.44 – 47.

Поступила в редакцию 27.09.2011

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

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНФОРМАТИВНОСТІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПЕРЕДАТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ АКТИВНОГО ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

А.В. Попов

Розглянуто основні відомі теореми декомпозиції поляризаційних властивостей об'єктів активного аэрокосмічного дистанційного зондування і виділювані на їхній основі поляризаційні характеристики об'єктів. На основі теоретико-інформаційних критеріїв розрізнення класів об'єктів виконано аналіз отриманих автором експериментальних даних. Показано, що для розпізнавання об'єктів активного дистанційного зондування найбільш інформативними є інваріантні поляризаційні передатні характеристики, що отримано при використанні операторної когерентної декомпозиції поляризаційної матриці розсіювання.

Ключові слова: дистанційне зондування, поляризаційна матриця розсіювання, декомпозиція, поляризаційні передатні характеристики, розрізнення об'єктів, розпізнавання.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INFORMATIVITY OF ACTIVE REMOTE SENSING OBJECTS' POLARIZATION TRANSFER CHARACTERISTICS

A.V. Popov

Main known theorems for decomposing active aerospace remote sensing objects' polarization properties and the objects' polarization signatures derived on the basis of the decomposition theorems are viewed. An analysis of experimental data received by the author is carried out on the grounds of the information-theoretic distinguishability criteria for classes of objects. It is shown that for recognizing active remote sensing objects the invariant polarization transfer characteristics derived using operational coherent decomposition of the polarization scattering matrix are the most informative.

Key words: remote sensing, polarization scattering matrix, decomposition, polarization transfer characteristic, objects distinguishability, recognition

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.