

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИГОДНОСТИ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДЕКОМПОЗИЦИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ В ЗАДАЧЕ МОНИТОРИНГА ЛЕСНОГО ПОКРОВА

Ушенкин В.А., с.н.с. НИИ «Фотон» РГРТУ, к.т.н., foton@rsreu.ru;
Соловьев А.В., техник НИИ «Фотон» РГРТУ, foton@rsreu.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPLICABILITY OF POLARIMETRIC DECOMPOSITIONS OF IMAGES FROM SPACE RADAR OBSERVING SYSTEMS IN THE PROBLEM OF FOREST COVER MONITORING

Ushenkin V.A., Solovyev A.V.

The analysis of the most common polarimetric decompositions is carried out for their applicability in the problem of monitoring the forest cover of the earth's surface. Methods for assessing the applicability of the polarimetric decomposition in the set tasks are considered. Examples of analysis of the presence of high-altitude vegetation on a radar image using various polarimetric decompositions are given. Polarimetric decompositions of Pauli, Krogager, van Zijl, Freeman-Durden, Huygen, Barnes-Holm in two versions, the dominant scattering mechanism according to Claude-Potier and H-A-Alpha are considered. The results of the analysis showed that the Freeman-Durden and H-A-Alpha decompositions are the most applicable for the problem of monitoring the forest cover of the earth's surface.

Key words: polarimetric decomposition, SAR image processing, high-altitude vegetation detection.

Ключевые слова: поляриметрическая декомпозиция, обработка радиолокационных изображений, обнаружение высотной растительности.

Введение

В настоящее время для наблюдения Земли из космоса, вместо традиционных оптико-электронных приборов видимого и инфракрасного диапазонов применяются радиолокаторы. Это обусловлено рядом преимуществ радиолокационной съемки: способностью вести наблюдение независимо от времени суток и при наличии облачного покрова, возможностью регистрировать не только интенсивность, но также фазу и поляризацию зондирующего сигнала [1].

Радиолокационная съемка подразумевает излучение электромагнитных волн в виде коротких модулированных радиоимпульсов и последующий приём отраженных обратных сигналов. При излучении и приёме могут использоваться различные поляризации электромагнитных волн. В современных радиолокаторах обычно применяется линейная поляризация: вертикальная (V) и горизонтальная (H). Таким образом, комбинируя различные поляризации при излучении и приеме, можно получить до четырёх комбинаций: HH, HV, VH и VV. Каждой из перечисленных комбинаций соответствует отдельное радиолокационное изображение. В этом проявляется некоторое сходство со спектральной оптической съемкой, при которой также формируется несколько изображений одной и той же местности, но не с разными поляризациями, а в различных диапазонах электромагнитного спектра [2]. Мультиполяризационный набор радиолокационных изображений обладает гораздо большей информативностью, чем отдельное изображение фиксированной поляризации.

Производится анализ наиболее распространенных поляриметрических декомпозиций на предмет их применимости в задаче мониторинга лесного покрова земной поверхности. Приводятся примеры анализа наличия высотной растительности на радиолокационном снимке с использованием различных поляриметрических декомпозиций.

С применением мультиполяризационных радиолокационных изображений можно решать широкий спектр различных задач, одной из которых является мониторинг лесного покрова.

Высотная растительность при отражении от неё радиосигналов изменяет их поляризацию. За счет этого на радиолокационных изображениях ортогональной поляризации (HV или VH) леса выглядят более яркими, чем на изображениях согласованной поляризации (HH или VV). Это позволяет автоматически выявлять леса по мультиполяризационному набору РЛИ.

Анализ мультиполяризационного набора РЛИ традиционно основывается на выполнении той или иной поляриметрической декомпозиции – разложении мультиполяризационного сигнала на несколько составляющих. Обычно таких составляющих три. Первая из них соответствует так называемому двойному отражению (отражению от двух граней уголкового отражателя, в качестве которых могут выступать фасады зданий, заборы, столбы и т.д.). Вторая составляющая соответствует так называемому объемному рассеянию, которое характерно как раз для лесов. Третья составляющая описывает рассеяние от умеренно шероховатой поверхности.

Различные декомпозиции по-разному распределяют суммарный сигнал между перечисленными выше составляющими. В связи с этим возникает задача выбора декомпозиции, наиболее подходящей для автоматиче-

ского выявления лесов на мультиполяризационном наборе РЛИ. Эта декомпозиция должна на участках с лесным покровом обеспечивать такое распределение суммарного сигнала между составляющими, при котором наибольшая доля достается объемному рассеянию, а на участках без лесного покрова доля объемного рассеяния должна быть минимальной.

Целью настоящей работы является сравнение известных поляриметрических декомпозиций на предмет пригодности к решению задачи автоматического обнаружения лесов на мультиполяризационном наборе РЛИ и выбору декомпозиции, наиболее подходящей для этой задачи.

Теоретическая часть

Для выполнения поляриметрической декомпозиции мультиполяризационный сигнал каждого пикселя РЛИ представляется в виде одной из следующих поляриметрических матриц: рассеяния, ковариации и когерентности.

Элементами матрицы рассеяния $S(x, y)$ являются комплексные отсчеты сигнала соответствующих поляризацій:

$$S(x, y) = \begin{pmatrix} S_{HH}(x, y) & S_{HV}(x, y) \\ S_{VH}(x, y) & S_{VV}(x, y) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Матрицы ковариации $C(x, y)$ и когерентности $T(x, y)$ строятся на основе усреднения отсчетов в некоторой окрестности заданного пикселя:

$$C(x, y) = \begin{pmatrix} E(|S_{HH}|^2) & E(\sqrt{2}S_{HH}\overline{S_{HV}}) & E(S_{HH}\overline{S_{VV}}) \\ E(\sqrt{2}S_{HV}\overline{S_{HH}}) & E(|S_{HV}|^2) & E(\sqrt{2}S_{HV}\overline{S_{VV}}) \\ E(S_{VV}\overline{S_{HH}}) & E(\sqrt{2}S_{VV}\overline{S_{HV}}) & E(|S_{VV}|^2) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$T(x, y) = \begin{pmatrix} E(|\alpha_p|^2) & E(\alpha_p\overline{\beta_p}) & E(\alpha_p\overline{\gamma_p}) \\ E(\beta_p\overline{\alpha_p}) & E(|\beta_p|^2) & E(\beta_p\overline{\gamma_p}) \\ E(\gamma_p\overline{\alpha_p}) & E(\gamma_p\overline{\beta_p}) & E(|\gamma_p|^2) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где E – операция усреднения; α_p , β_p , γ_p – комплексные коэффициенты декомпозиции Паули, рассматриваемой ниже.

Выполнение поляриметрической декомпозиции заключается в нахождении коэффициентов разложения одной из матриц S , C или T на три ортогональные составляющие. Результат декомпозиции обычно представляется в виде трехканального цветного изображения, в каждый канал которого помещаются модули найденных коэффициентов. Общепринята следующая схема цветового кодирования результатов декомпозиции: красный канал соответствует двойному отражению, зелёный – объемному рассеянию, синий – рассеянию от умеренно шероховатой поверхности.

Исходя из вышесказанного, на результирующем изображении для участков поверхности, покрытых высокой растительностью, будет характерно преимущество второго канала над остальными. Таким образом, можно сделать следующий вывод: чтобы получить кар-

тину лесного покрова на основе результирующего изображения поляриметрической декомпозиции, следует выбрать те пиксели, в которых канал, отвечающий за объемное рассеяние, доминирует над остальными.

Рассмотрим наиболее распространенные поляриметрические декомпозиции.

Декомпозиции Паули и Крогагера применяются к матрице рассеяния.

Декомпозиция Паули описывается следующим матричным уравнением:

$$\sqrt{2}S = \alpha_p \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + \beta_p \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} + \gamma_p \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где искомыми являются комплексные коэффициенты α_p (рассеяние поверхностью), β_p (объемное рассеяние) и γ_p (двойное отражение).

Декомпозиция Крогагера описывается следующим матричным уравнением:

$$S = \left\{ e^{j\phi} k_s e^{j\phi_s} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} + k_d \begin{pmatrix} \cos 2\psi & \sin 2\theta \\ \sin 2\psi & -\cos 2\theta \end{pmatrix} + k_h e^{\pm 2\theta} \begin{pmatrix} 1 & \pm j \\ \pm j & 1 \end{pmatrix} \right\}, \quad (5)$$

где искомыми величинами являются шесть действительных величин: ϕ , ϕ_s , θ – фазы; k_s , k_d и k_h – амплитудные коэффициенты. Как и в случае с декомпозицией Паули, поляриметрическое изображение строится из амплитудных коэффициентов, а фазы игнорируются [6].

Декомпозиции Фримана-Дурдена и ван Зейла выполняются на основе матрицы ковариации.

Декомпозиция Фримана-Дурдена описывается уравнением:

$$C = \frac{f_V}{8} \begin{pmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix} + f_D \begin{pmatrix} |\alpha_{FD}|^2 & 0 & \alpha_{FD} \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{FD} & 0 & 1 \end{pmatrix} + f_S \begin{pmatrix} |\beta_{FD}|^2 & 0 & \beta_{FD} \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta_{FD} & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где f_S , f_V и f_D – действительные промежуточные параметры, а α_{FD} и β_{FD} – комплексные промежуточные параметры. Данное матричное уравнение сводится к системе из четырех уравнений с пятью неизвестными, а, следовательно, имеет бесконечное число решений. Отсюда следует, что декомпозиция Фримана-Дурдена имеет бесконечное множество вариантов, из которого выбирается один по специальному алгоритму, предложенному авторами декомпозиции [5]. Итоговое поляриметрическое изображение составляется из величин $\sqrt{f_V}$, $\sqrt{f_D(1+|\alpha_{FD}|^2)}$ и $\sqrt{f_S(1+|\beta_{FD}|^2)}$.

Декомпозиция ван Зейла описывается уравнением:

$$C = \Lambda_1 \begin{pmatrix} |\alpha_Z|^2 & 0 & \alpha_Z \\ 0 & 0 & 0 \\ \alpha_Z & 0 & 1 \end{pmatrix} + \quad (7)$$

$$+ \Lambda_2 \begin{pmatrix} |\beta_Z|^2 & 0 & \beta_Z \\ 0 & 0 & 0 \\ \overline{\beta_Z} & 0 & 1 \end{pmatrix} + \Lambda_3 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где параметры Λ_1 , Λ_2 , Λ_3 , α_Z , β_Z вычисляются на основе собственных чисел матрицы ковариации.

Поляриметрическое изображение составляется из коэффициентов $\sqrt{\Lambda_1(1+|\alpha_Z|^2)}$ (рассеяние поверхностью), $\sqrt{\Lambda_2(1+|\beta_Z|^2)}$ (двойное отражение) и $\sqrt{\Lambda_3}$ (объемное рассеяние) [4].

На основе матрицы когерентности выполняются 5 видов декомпозиции: Гюйгена, Барнса-Холма двух видов, доминирующий механизм рассеяния по Клоду-Потье и Н-А- α .

В декомпозициях Гюйгена и Барнса-Холма поляриметрический снимок представляется не как набор откликов на точечные цели, а как комбинация откликов на точечные цели и площадные объекты. Декомпозиция выполняется только для точечных объектов. В таком случае матрица когерентности записывается в следующем виде:

$$T = \begin{pmatrix} 2\tilde{A}_0 & C - j\tilde{D} & H + j\tilde{G} \\ \tilde{C} + j\tilde{D} & \tilde{B}_0 + \tilde{B} & \tilde{E} + j\tilde{F} \\ \tilde{H} - j\tilde{G} & \tilde{E} - j\tilde{F} & \tilde{B}_0 - \tilde{B} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

после чего представляется как сумма матриц T_0 (когерентности точечного объекта) и T_N (когерентности площадного объекта) [3].

Матрица T_0 представляется в виде произведения векторов $T_0 = k_i \bar{k}_i^T$. Результирующее поляриметрическое изображение составляется из модулей комплексных элементов векторов k_i .

В декомпозиции Гюйгена:

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{2\tilde{A}_0}} \begin{pmatrix} 2\tilde{A}_0 \\ \tilde{C} + j\tilde{D} \\ \tilde{H} - j\tilde{G} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

В декомпозиции Барнса-Холма 1 варианта

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{2(\tilde{B}_0 - \tilde{F})}} \begin{pmatrix} \tilde{C} - \tilde{G} + j(\tilde{H} - \tilde{D}) \\ B_0 + \tilde{B} - \tilde{F} + j\tilde{E} \\ \tilde{E} + j(\tilde{B}_0 - \tilde{B} - \tilde{F}) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

В декомпозиции Барнса-Холма 2 варианта

$$k_3 = \frac{1}{\sqrt{2(\tilde{B}_0 - \tilde{F})}} \begin{pmatrix} \tilde{H} + \tilde{D} + j(\tilde{C} - \tilde{G}) \\ \tilde{E} + j(\tilde{B}_0 - \tilde{B} - \tilde{F}) \\ B_0 + \tilde{B} - \tilde{F} + j\tilde{E} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

В декомпозиции доминирующего механизма рассеяния по Клоду-Потье для матрицы когерентности находятся собственные числа $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. Если же все три числа ненулевые, то матрица когерентности может быть представлена в виде линейной комбинации трёх видов рассеяния:

$$T = \sum_{i=1}^3 \lambda_i u_i u_i^{*T}. \quad (12)$$

Каждому из собственных чисел соответствует собственный вектор вида:

$$u_i = e^{j\varphi_i} (\cos \alpha_i (\sin \alpha_i \cos \beta_i) e^{j\delta_i} (\sin \alpha_i \sin \beta_i) e^{j\gamma_i})^T. \quad (13)$$

Для каждого собственного числа находится весовой коэффициент:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}. \quad (14)$$

Собственные числа и углы ориентации собственных векторов усредняются с учетом полученных ранее

весовых коэффициентов: $\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^3 P_i \lambda_i$, $\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^3 P_i \alpha_i$,

$$\bar{\beta} = \sum_{i=1}^3 P_i \beta_i.$$

Результирующее изображение составляется из величин $\sqrt{\bar{\lambda}} \sin \bar{\alpha} \cos \bar{\beta}$ (двойное отражение), $\sqrt{\bar{\lambda}} \sin \bar{\alpha} \sin \bar{\beta}$ (объемное рассеяние) и $\sqrt{\bar{\lambda}} \cos \bar{\alpha}$ (рассеяние поверхностью).

Результатом дальнейших исследований Клода и Потье стала декомпозиция Н-А- α . В отличие от других декомпозиций, величины H , A , α не являются коэффициентами разложения поляриметрического сигнала на ортогональные составляющие. Коэффициент H отвечает за энтропию рассеяния, A – за анизотропию, α – значение среднего угла ориентации собственного вектора. Основным достоинством этих величин является их независимость от угла ориентации отражателя (рассеивателя).

Энтропия является мерой упорядоченности и вычисляется по следующей формуле:

$$H = - \sum_{i=1}^3 P_i \log_3 P_i. \quad (15)$$

Данная величина нормируется от 0 (полный порядок) до 1 (полный хаос). Низкая энтропия соответствует слабо деполаризующему рассеивателю. В этом случае объект считается точечным и характеризуемым только одним механизмом рассеяния (велико только собственное число λ_1 , два других пренебрежительно малы). Высокая же энтропия соответствует сильно деполаризующему рассеивателю, который рассматривается как площадной объект, для которого в равной степени характерны 3 механизма рассеяния.

Анизотропия – величина, дополняющая энтропию:

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3}. \quad (15)$$

Её значение учитывается только при высокой энтропии и также нормируется от 0 до 1. Леса и водная поверхность обычно характеризуются низкой анизотропией, а высокой – городская застройка.

Средний угол α мал в случае водоёмов, а для лесных массивов и городов характерны значения от 45 до 90 градусов.

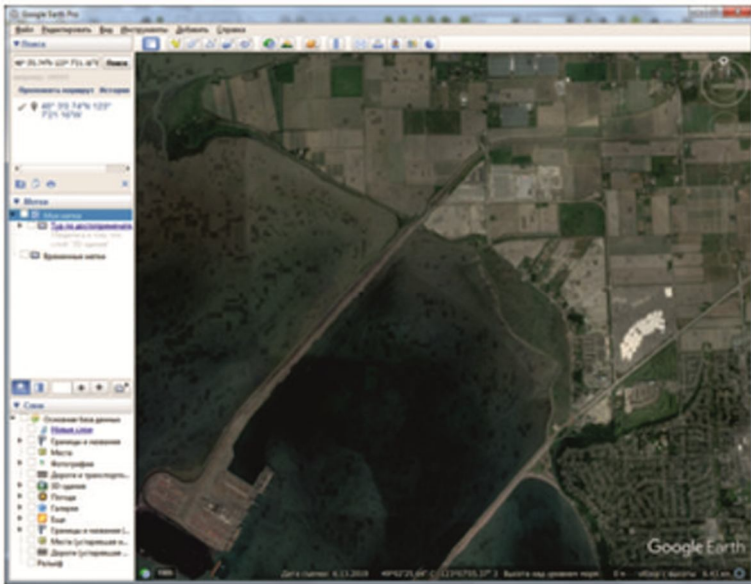


Рис. 1. Карты исследуемого участка: а) по данным Google Планета Земля; б) полученная бинарная маска наличия лесного покрова

Таким образом, в декомпозиции H - A - α ни один из коэффициентов строго не соответствует трем классическим типам рассеяния. Однако, как показывает практика, для двойного отражения характерны большие значения α , для объемного рассеяния – H , для рассеяния от умеренно шероховатой поверхности – A .

Как было отмечено ранее, величины H и A лежат в диапазоне от 0 до 1, тогда как угол α может принимать значения от 0 до 90° . Поэтому необходимо привести все величины к единому диапазону значений. С этой целью значение α для каждого пикселя результата декомпозиции делится на 90.

Экспериментальная часть

Основной целью настоящей работы является экспериментальное исследование рассмотренных выше декомпозиций на предмет их применимости в задаче мониторинга лесного покрова. Для проведения данного исследования решено взять 10 мультиполяризационных снимков разных участков поверхности Земли со средним количеством пикселей около 20 млн.

На каждом изображении вручную выделены участки, покрытые высотной растительностью, по данным открытого источника Google Планета Земля. В результате для каждого изображения, участвующего в эксперименте, получена бинарная маска, на которой черным цветом обозначены участки с лесным покровом, а белым – участки без лесного покрова [7]. На рис. 1 приведен пример бинарной маски и данных Google Планета Земля, на основе которых она была построена.

После формирования бинарных масок для каждого изображения выполнены все рассмотренные выше поляриметрические декомпозиции. Пиксели на результирующих поляриметрических изображениях, в которых значение яркости второго канала доминирует над остальными, были классифицированы как лес.

Имея бинарную маску и набор результатов классификации по данным каждой из декомпозиций, можно выполнить серию попиксельных сравнений.

Пусть Ω – множество всех пикселей поляриметрического изображения. Обозначим множество пикселей, соответствующих лесному покрову согласно эталонным данным, как

$$\Omega_M = \{(x, y) : M(x, y) = 0\}, \quad (16)$$

где $M(x, y)$ – значение бинарной маски в соответствующем пикселе.

Множество пикселей, классифицированных как лесной покров по результату декомпозиции, обозначим как

$$\Omega_D = \{(x, y) : D_o(x, y) > D_o(x, y) \quad (17)$$

и $D(x, y) > D_n(x, y)\}$,

где $D_o(x, y)$, $D_o(x, y)$, $D_n(x, y)$ – значения коэффициента двойного отражения, объемного рассеяния и рассеяния умеренно шероховатой поверхностью соответственно.

Для декомпозиции H - A - α множество пикселей, классифицированных как лесной покров, выразим как

$$\Omega_D = \left\{ (x, y) : \frac{\alpha(x, y)}{90} > H(x, y) \text{ и } \frac{\alpha(x, y)}{90} > A(x, y) \right\}. \quad (18)$$

С учетом введенных обозначений определим вероятность верного определения лесных участков в процентах как

$$P_1 = \frac{|\Omega_M \cap \Omega_D|}{|\Omega_M|} * 100\%, \quad (19)$$

а вероятность ложного определения участка как леса для поляриметрической декомпозиции в процентах, как

$$P_2 = \frac{|\overline{\Omega_M} \cap \Omega_D|}{|\Omega_M|} * 100\%. \quad (20)$$

Результаты расчета P_1 и P_2 , усредненные по всем изображениям, участвующим в эксперименте, представлены в табл. 1.

Для наглядности на рис. 2 приведем пример выделения лесов на фрагменте снимка города Ванкувер от космического аппарата «RadarSat-2» с помощью каждой из декомпозиций. Для этого построим карты попиксельного сопоставления результатов классификации с эта-

Таблица 1. Результаты расчета вероятностей верного и ложного определения лесных участков по данным поляриметрических декомпозиций

Декомпозиция	$P_1, \%$	$P_2, \%$
Фримана-Дурдена	77,122	27,126
Н-А- α	59,499	23,782
Барнса-Холма 2	27,209	6,222
Барнса-Холма 1	26,553	6,179
Паули	16,337	5,951
Крогагера	16,137	8,275
Гюйгена	8,105	4,754
Доминирующий механизм рассеяния по Клоду-Потье	6,180	1,307
ван Зейла	2,736	0,568

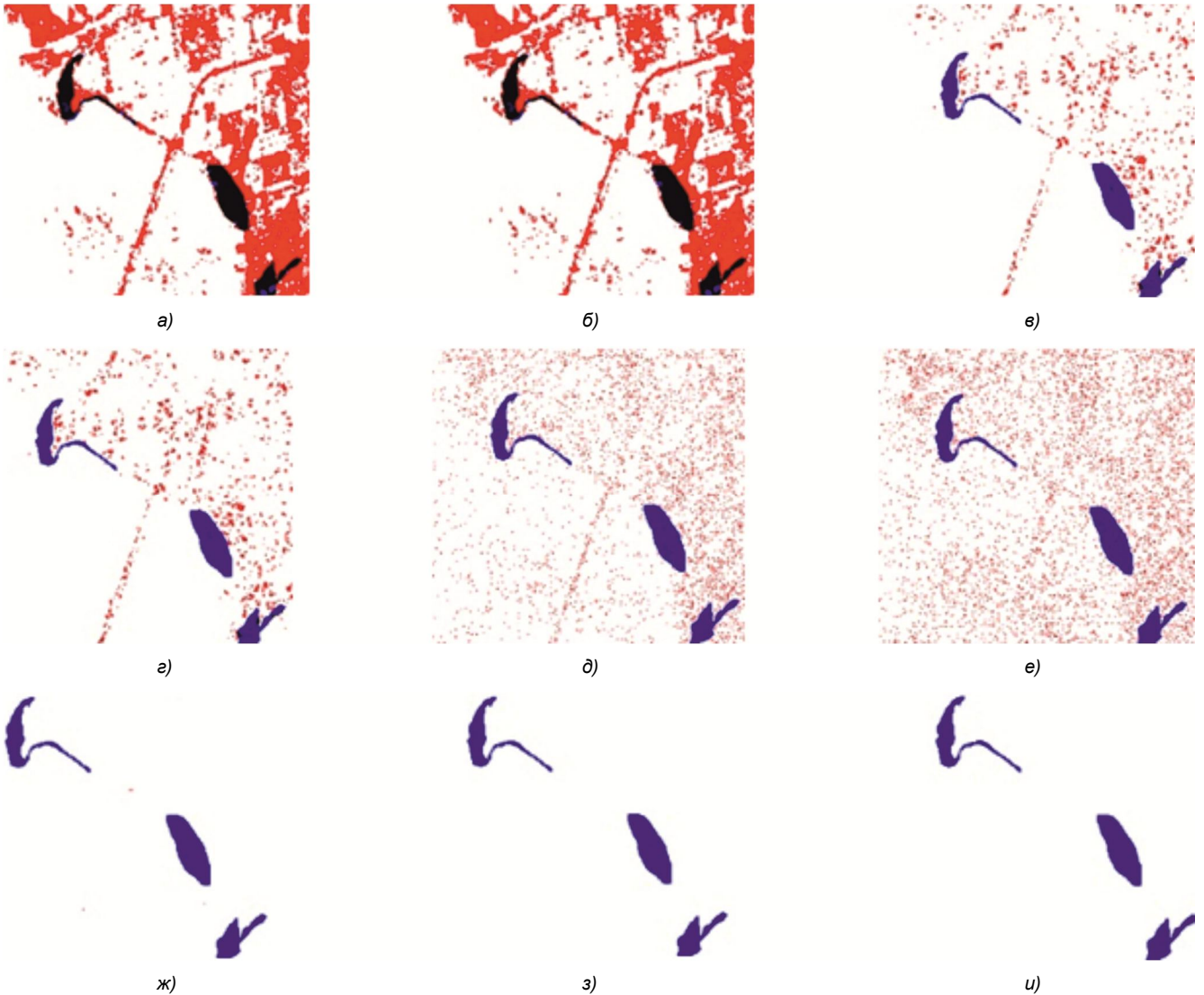


Рис. 2. Карты попиксельного сопоставления с эталоном результатов выявления лесного покрова с помощью декомпозиций: а) Фримана-Дурдена; б) Н-А- α ; в) Барнса-Холма 1; г) Барнса-Холма 2; д) Паули; е) Крогагера; ж) Доминирующий механизм рассеяния по Клоду-Потье; з) ван Зейла; и) Гюйгена

лонной бинарной маской, на которых обозначим:

- участки с лесным покровом, определённые верно, – чёрным цветом;
- участки с лесным покровом, не определенные соответствующим образом, – синим цветом;
- участки без лесного покрова, ошибочно определённые как лес, – красным цветом;
- участки без лесного покрова, определённые верно, –

белым цветом.

Из табл. 1 и рис. 2 можно сделать вывод, что наиболее пригодными для задачи мониторинга лесного покрова на основе поляриметрических данных являются декомпозиции Фримана-Дурдена и Н-А- α , так как у них наибольшая вероятность верного обнаружения участка с лесным покровом. Результативность данных декомпозиций превосходит остальные со значительным отрывом. Данные

результаты можно считать вполне ожидаемыми.

Декомпозиции Паули и Крогагера обеспечивают низкую вероятность верного определения наличия лесного покрова. Это связано с тем, что в декомпозиции Паули коэффициент объемного рассеяния определяется как матрица рассеяния двугранного углового отражателя, расположенного под углом 45° , а в декомпозиции Крогагера за объемное рассеяние принимается матрица рассеяния левой или правой спирали. Оба эти способа являются слишком примитивными, тогда как рассеяние радиоволн высотной растительностью носит более сложный характер.

Декомпозиция ван Зейла, которая очень похожа на декомпозицию Фримана-Дурдена, обладает гораздо меньшей пригодностью для поставленной задачи по причине того, что единственный член, отличающийся в указанных декомпозициях, отвечает как раз за объемное рассеяние. В декомпозиции Фримана-Дурдена используется сложная матрица когерентности, описывающая рассеяние облаком случайно ориентированных цилиндров, что близко к реальной структуре ветвей деревьев, а в декомпозиции ван Зейла для вычисления объемного рассеяния используется слишком простая матрица когерентности всего с одним ненулевым элементом.

Декомпозиции Гюйгена и Барнса-Холма применяют к рассеянию от точечных объектов, в то время как лес – площадной объект.

Декомпозиция доминирующего механизма рассеяния по Клоду-Потье также не подходит для задачи мониторинга лесного покрова, так как леса являются сильно деполаризующим объектом, для которого нет четко выраженного доминирующего механизма рассеяния.

Исследования показали, что декомпозиция $H-A-\alpha$ обеспечивает неплохую вероятность выявления лесного покрова, несмотря на то, что не вычлняет в явном виде объемное рассеяние. Это связано с тем, что высокая энтропия оказалась более достоверным признаком наличия высотной растительности, чем коэффициенты объемного рассеяния в большинстве других декомпозиций.

Более всего для задачи мониторинга лесного покрова подходит декомпозиция Фримана-Дурдена. Это связано с тем, что она разрабатывалась специально для анализа растительности и в ней используется модель объемного рассеяния, близкая к реальному рассеянию радиолокационного сигнала лесами. Её использование для мониторинга лесного покрова наиболее целесообразно.

Тем не менее, несмотря на высокую вероятность верного обнаружения лесного покрова, которую обеспечивают декомпозиции $H-A-\alpha$ и Фримана-Дурдена, для

них характерна относительно высокая (порядка 20-30 %) вероятность ложного обнаружения. Это связано с тем, что преобладание объемного рассеяния характерно не только для лесов, но и для других типов объектов земной поверхности. Следовательно, для снижения вероятности ложного обнаружения, помимо упомянутых декомпозиций, для выявления лесного покрова требуется привлечение дополнительных признаков. Этот вопрос является целью дальнейших исследований.

Заключение

В настоящей работе проведено сравнение различных вариантов поляриметрической декомпозиции на предмет их пригодности к использованию для мониторинга лесного покрова. Анализ полученных результатов позволил выделить в качестве наиболее пригодных декомпозиции Фримана-Дурдена и $H-A-\alpha$.

В дальнейшем целесообразно проведение исследований по привлечению дополнительных признаков с целью снижения вероятности ложного выявления лесного покрова по данным поляриметрических декомпозиций радиолокационных изображений.

Литература

1. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. Москва: Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2019.
2. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019.
3. Holm W.A., Barnes R.M. On radar polarization mixed target state decomposition techniques. Proceedings 1988 USA National Radar Conference, 1988, pp. 249-254.
4. Van Zyl, J. J. Application of Cloude's target decomposition theorem to polarimetric imaging radar data // Proceedings SPIE conference of radar polarimetry, 1992, vol 1748, pp. 184-212.
5. Freeman A., Durden S.L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1998, vol. 36 (3), pp. 936-973
6. Krogager E. A new decomposition of the radar target scattering matrix // Electronics Letter. 1990, vol. 26 (18), pp. 1525-1526.
7. Соловьев А.В., Ушенкин В.А. Анализ пригодности поляриметрических декомпозиций космических радиолокационных изображений для обнаружения высотной растительности. Сборник трудов IV Международного научно-технического форума: в 10 т. Том. 6. Рязань: Book Jet, 2021. С. 5-10.