

УДК 004.89

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>

І. М. БУТКО

МОДЕЛЬ ТЕМАТИЧНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ВИДОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Предметом дослідження в статті є тематична інтерпретація видових зображень. **Мета** роботи – розробка моделі тематичної інтерпретації видових зображень, яка базується на моделі формування видових зображень та додатково враховує географічне зонування. В статті вирішується наступне **завдання**: розробка моделі тематичної інтерпретації видових зображень, яка враховує недоліки існуючих моделей та базується на моделі формування видових зображень, проводить обернену трансформацію координат зображення у геопросторіві координати і кластеризацію зображення на окремі класи по їх кольору та текстурі, додатково враховуючи географічне зонування, що забезпечує можливість розширеного аналізу і прогнозування часової динаміки даних у системах обробки геопросторової інформації. Використовуються такі **методи**: математичний апарат теорії матриць, методи математичного моделювання, методи кластеризації даних, методи диференційного обчислення, методи цифрової обробки зображень. Отримано наступні **результати**: проаналізовано групи існуючих моделей інтерпретації результатів дистанційного зондування Землі, їх переваги та недоліки; сформована у загальній формі математична модель формування видового зображення для ділянки земної поверхні; сформована у загальній формі математична модель тематичної інтерпретації видових зображень; розглянуто оператор перетворення координат, оператори кластеризації, оператори зонування та їх явний вигляд; отримано модель тематичної інтерпретації видових зображень в операторній формі. **Висновки**: вперше розроблено модель тематичної інтерпретації видових зображень, яка, базуючись на моделі формування видових зображень, проводить обернену трансформацію координат у геопросторіві координати і кластеризацію по їх кольору та текстурі, додатково враховуючи географічне зонування, що забезпечує можливість розширеного аналізу і прогнозування часової динаміки даних у системах обробки геопросторової інформації.

Ключові слова: видове зображення; тематична інтерпретація; дешифрування; модель; геопросторова інформація; геопросторові координати; сегментація.

Вступ

На сьогоднішній день данні дистанційного зондування Землі – видові зображення, які представлені в цифровій формі у вигляді растрових зображень [1]. Тому проблема обробки та інтерпретації даних дистанційного зондування Землі напряму пов'язана з цифровою обробкою зображень. Данні дистанційного зондування Землі сьогодні у вільному доступі доступні великій кількості користувачів та застосовуються не тільки в наукових дослідженнях, а й в інших сферах людської діяльності [2-3]. Такі данні є також основним джерелом актуальних та оперативних даних для геоінформаційних систем. Географічна інформаційна система містить дані про просторові об'єкти у формі їх цифрових представлень та є великим класом інформаційних систем, що дозволяє працювати з просторовими даними. В сучасних геоінформаційних системах виконується комплексна обробка такої інформації – від збору до зберігання, представлення та оновлення [1].

Вирішення задачі тематичної обробки видових зображень є етапом аналізу, тобто інтерпретації, зображення після попередньої цифрової обробки. Кінцевим результатом вирішення такого завдання є реалізація процесу виявлення та розпізнавання об'єктів. На практиці такий процес називається дешифруванням зображення [4].

Результатом дешифрування є тематична карта території, що була представлена на видовому зображенні, з нанесеними інтерпретованими розпізнаними об'єктами. Інтерпретація може проводитися за допомогою візуальних та автоматизованих моделей тематичної інтерпретації видових зображень.

Аналіз проблеми та існуючих методів

На сьогоднішній день тематична інтерпретація видових зображень земної поверхні проводиться за допомогою великої кількості моделей. Усі їх умовно можна поділити на три окремі групи моделей інтерпретації або дешифрування результатів дистанційного зондування Землі [4-7].

1. Візуальні моделі. Коли оператор-дешифрувальник за допомогою спеціальної апаратури виконує візуальну інтерпретацію видових зображень та на основі попередніх результатів інтерпретації та знань, що отримані за допомогою власного досвіду, робить деякі висновки. Дана модель є дуже поширеною незважаючи на низьку точність з боку математичного опису. Група таких моделей є неприємною у випадку тематичної інтерпретації великої кількості видових зображень або необхідності прийняття оперативного рішення за результатами даних дистанційного зондування Землі. Також група даних моделей має й ряд інших суттєвих недоліків, а саме: візуальна інтерпретація має суб'єктивний характер, вимагає зв'язки отриманих результатів інтерпретації з реальними результатами та є надто тривалим процесом у часі [4].

2. Математичні моделі. Коли при обробці видового зображення обчислюються різні параметри, на основі аналізу яких оператор-дешифрувальник приймає рішення про віднесення об'єкту на зображенні до того чи іншого класу. З точки зору математичної реалізації, дана група моделей є значно точнішою, однак при цьому вони потребують достатньо високого рівня знань оператора-дешифрувальника в галузі теорії імовірності та математичної статистики [5]. Також дана група моделей інтерпретації видових зображень має

недоліки й групи візуальних моделей.

3. Аналітичні моделі. Коли до видового зображення застосовуються алгоритми контрольованої або неконтрольованої класифікації. Перша група алгоритмів класифікації потребує задання еталонних областей, що є важковирішуваною задачею в умовах нечіткого розділення поверхні на видовому зображенні [6]. Основними недоліками алгоритмів неконтрольованої класифікації є ймовірна поява класів, з якими оператор-дешифрувальник може не погодитися або обмеженість контролю класів та їх властивостей з боку оператора.

Метою даної статті є розробка моделі тематичної інтерпретації видових зображень, яка буде базуватися на моделі формування видових зображень та додатково враховувати географічне зонування.

Вирішення завдання

Математична модель формування видового зображення I для ділянки земної поверхні g (**TGeoSurface** → **TImage**) у загальній формі може бути представлена, як результат дії двох операторів:

1) оператора \hat{T} , що здійснює перетворення координат:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \hat{T} \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де $\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}$ – вектор географічних координат (довгота, широта, висота над рівнем моря); $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ – вектор координат на зображенні.

2) операторів $\hat{\Phi}$, що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні g у спектральному каналі c :

$$I_c = \hat{\Phi}_c(g). \quad (2)$$

Математична модель тематичної інтерпретації видових зображень (побудови набору бінарних масок M для геознак по видовому зображенню I) у загальній формі може бути представлена, як результат дії таких операторів:

1) оператора \hat{T}^{-1} (оберненого до оператора \hat{T}), який здійснює перетворення координат:

$$\hat{T}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}, \quad (3)$$

2) операторів \hat{C}_k , які проводять кластеризацію зображення (**TImage** → **TMap**) за деякою ознакою k :

$$M_k = \hat{C}_k(I), \quad (4)$$

3) операторів \hat{Z}_l , які проводять зонування (**TDecision** → **TMap**) за деякою ознакою l (наприклад, виділення адміністративних районів):

$$M_l = \hat{Z}_k. \quad (5)$$

Розглянемо докладніше введені оператори та їх явний вигляд.

Оператор перетворення координат. Даний оператор \hat{T}^{-1} є оберненим до оператора \hat{T} , явний вигляд якого задається виразом (6):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/p_x & \tan \chi & c_x \\ 0 & f/p_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^T & -R^T t \\ \theta^T & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \left[R_{Earth} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right], \quad (6)$$

де p_x, p_y – розміри пікселя матриці сканера; χ – кут нахилу пікселя; (c_x, c_y) – координати головної точки; f – фокусна відстань сканера, R_{Earth} – радіус Землі.

В (6) R^T – транспонована 3x3-матриця повороту площини сканера відносно земної поверхні (кут між відповідними нормаллями), t – 3-вектор зміщення центру сканера відносно його проекції на поверхню Землі, θ^T – транспонований нульовий 3-вектор-стовбець (іншими словами, нульовий 3-вектор-рядок).

Щоб відобразити той факт, що матрицю $\begin{pmatrix} R^T & -R^T t \\ \theta^T & 1 \end{pmatrix}$ формують складні об'єкти – виділили їх жирним шрифтом (на відміну від звичайного числа 1 у правому нижньому кутку матриці).

Зауважимо, що знаходження оберненої функції за виразом (6) неможливе для 1 окремої точки (у зв'язку із втратою інформації), отже, вимагає набору точок. Розв'язок при цьому знаходиться як розв'язок оптимізаційної задачі. Знаходження оператора \hat{T}^{-1} , який дозволяє ототожнити точки зображення з відповідними точками земної поверхні, носить назву *задачі геоприв'язки* [7]–[9].

Задача геоприв'язки певною мірою є оберненою до задачі калібрування: маючи набори відповідних точок (7):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i, \quad (7)$$

оскільки земна поверхня не є пласкою, то проводимо компенсацію нелінійних спотворень (8)–(11) [10]:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i, \quad (8)$$

$$X'_i = (X_i - \bar{X}_i)(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + \bar{X}_i, \quad (9)$$

$$Y'_i = (X_i - \bar{Y}_i)(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + \bar{Y}_i, \quad (10)$$

$$r_i^2 = (X_i - \bar{X}_i)^2 + (X_i - \bar{Y}_i)^2, \quad (11)$$

де X'_i , Y'_i – координати із скомпенсованими нелінійностями; \bar{X}_i , \bar{Y}_i – середні значення для X_i , Y_i відповідно; k_1 , k_2 – параметри радіальних спотворень.

І знаходимо матрицю P^{-1} (зауважимо, що ми не обертаємо матрицю, дане позначення просто підкреслює зв'язок із раніше введеною матрицею P), таку, що мінімізує квадрат

$$\min_P \sum_i \left\| P^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i - \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i \right\|^2. \quad (12)$$

Отже

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

і оскільки параметри радіальних спотворень k_1 , k_2 відомі, то

$$X = \frac{X' - \bar{X}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{X}, \quad (14)$$

$$Y = \frac{Y' - \bar{Y}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{Y}, \quad (15)$$

де r_i^2 знаходиться за формулою (11).

Перейдемо від координат $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ до координат

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}:$$

$$\varphi = a \tan \frac{Y}{X},$$

$$\theta = a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}}, \quad (16)$$

$$h = Z - R_{Earth} \cos a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}}.$$

Таким чином, враховуючи все вищесказане, явний деталізований вигляд оператора перетворення координат \hat{T}^{-1} пропонується задавати у вигляді (17):

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$X = \frac{X' - \bar{X}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{X},$$

$$Y = \frac{Y' - \bar{Y}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{Y}, \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \tan \frac{Y}{X} \\ a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}} \\ h = Z - R_{Earth} \cos a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}} \end{pmatrix},$$

де матриця P^{-1} знаходиться як розв'язок задачі геоприв'язки.

Оператори кластеризації. Розглянемо, введений вище, явний деталізований вигляд оператора $\hat{\Phi}$, що визначає яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні (18):

$$I(X, Y, c) = S \left[\alpha_c + \beta_c \sum_k \rho_{k,c} \delta_{k,k'} \cdot \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{1 + \Omega_x \frac{\partial h}{\partial X} + \Omega_y \frac{\partial h}{\partial X}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial Y}\right)^2}} d\Omega \right], \quad (18)$$

де c – спектральний канал; $S(i)$ – функцію чутливості сканера; ρ – коефіцієнт відбивання світла від поверхні, який залежить від того, до якого класу k належить об'єкт, і від спектрального каналу c , тобто $\rho = \rho(k, c)$.

Розглянемо спочатку множник

$$w = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \left(\frac{1 + \Omega_x \frac{\partial h}{\partial X} + \Omega_y \frac{\partial h}{\partial Y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial Y}\right)^2}} \right) d\Omega. \quad (18)$$

Цей множник очевидно залежить тільки від геометрії поверхні і не залежить від коефіцієнта відбивання, в такому випадку в моделі формування зображення він буде відповідати за *текстуру* зображення. Якщо кожен об'єкт поверхні має свою геометрію, то w буде залежати від класу об'єкта k , тобто $w = w_k$, і в такому випадку (18) можна переписати у вигляді:

$$I(X, Y, c) = S \left(\alpha_c + \beta_c \sum_{k'} \rho_{k,c} w_k \delta_{k,k'} \right). \quad (19)$$

Отже оператори \hat{C}_k , які проводять кластеризацію зображення, повинні повертати бінарні маски належності об'єкту до класу k в залежності від кольору зображення та його текстури для всіх спектральних каналів і реалізуються за допомогою методів сегментації мультиспектральних зображень. Слід зауважити, що для даних методів є необхідним попередній етап навчання, для того щоб ототожнити кожен клас сегментації зображення (відповідну бінарну маску) з конкретною геоознакою.

Найчастіше з цією метою використовується метод сегментації алгоритмом k -середніх (англ. k -means), суть якого – поділ n спостережень на k кластерів таким чином, щоб кожне спостереження належало до кластера з найближчим до нього середнім значенням [11]-[14].

Розглянемо даний метод докладніше. Нехай в нас є набір спостережень $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, де кожне спостереження є d -мірним дійсним вектором, мета кластеризації – розділити n спостережень на k множин (при чому $k \leq n$) $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, так, щоб мінімізувати внутрішньокластерну суму квадратів відстаней (тобто дисперсію). Формально, метою є знайти таке розбиття на множини S :

$$S = \arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{\mathbf{x} \in S_i} \|\mathbf{x} - \mu_i\|^2 = \arg \min_S \sum_{i=1}^k |S_i| \text{var } S_i, \quad (20)$$

де μ_i – середнє по множині S_i , через $|S_i|$ позначено кількість елементів у S_i .

Це еквівалентно мінімізації попарних середньоквадратичних відхилень по кожному кластеру:

$$S = \arg \min_S \sum_{i=1}^k \frac{1}{2|S_i|} \sum_{\mathbf{x}, \mathbf{y} \in S_i} \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|^2. \quad (21)$$

Дана рівність впливає з того, що

$$\sum_{\mathbf{x} \in S_i} \|\mathbf{x} - \mu_i\|^2 = \sum_{\mathbf{x} \neq \mathbf{y} \in S_i} (\mathbf{x} - \mu_i)^T (\mu_i - \mathbf{y}). \quad (22)$$

Оскільки загальна дисперсія є константою, яка не залежить від порядку сумування, то вираз (21) еквівалентно максимізації суми квадратних відхилень між точками в різних кластерах (міжкластерною сумою квадратів, BCSS [15]).

Найпростіша версія алгоритму (т. зв. наївний k -means) використовує ітераційний метод уточнення [11]-[13]. В початковий момент роботи алгоритму довільним чином обираються центри кластерів, далі для кожного елемента множини ітеративно обраховується відстань від центрів з приєднанням кожного елемента до кластера з найближчим центром, виконуючи на кожній ітерації t по чергово два кроки:

1) крок зіставлення – зіставлення кожної точки з кластером, відстань до центру якого є мінімальна:

$$S_i^{(t)} = \left\{ x_p : \|x_p - \mu_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_p - \mu_j^{(t)}\|^2 \forall j, 1 \leq j \leq k \right\}. \quad (23)$$

де кожен x_p зіставляється рівно з одним кластером $S_i^{(t)}$, навіть якщо він міг бути віднесений до двох або більше;

2) крок оновлення – перерахунок середніх значень для спостережень, що зіставлені з кожним кластером:

$$\mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x_j \in S_i} x_j. \quad (24)$$

Незважаючи на очевидні переваги методу (простота та швидкість виконання), він має суттєві недоліки:

- результат класифікації сильно залежить від випадкових початкових позицій кластерних центрів;
- алгоритм чутливий до викидів, які можуть викривлювати середнє;
- кількість кластерів повинна бути заздалегідь визначена дослідником.

Додатковим недоліком простого методу є порушення умови зв'язності елементів одного кластера, тому розвиваються різні модифікації методу, а також його нечіткі аналоги (англ. fuzzy k -means methods), у яких на першій стадії алгоритму допускається приналежність одного елемента множини до декількох кластерів (із різним ступенем приналежності) [16].

Оператори зонування. Ці оператори \hat{Z}_i просто задають відповідні набори бінарних масок у

географічних координатах $\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}$ і використовуються

для задання області інтересів, виділення адміністративних районів тощо.

Враховуючи все вищесказане, модель тематичної інтерпретації зображення в операторній формі задається як

$$M(\varphi, \theta, h) = \left\{ \bigcup_k \tilde{C}_k \{I(\hat{T}^{-1}\{x, y\})\} \bigcup_i \tilde{Z}_i \{\varphi, \theta, h\} \right\}, \quad (25)$$

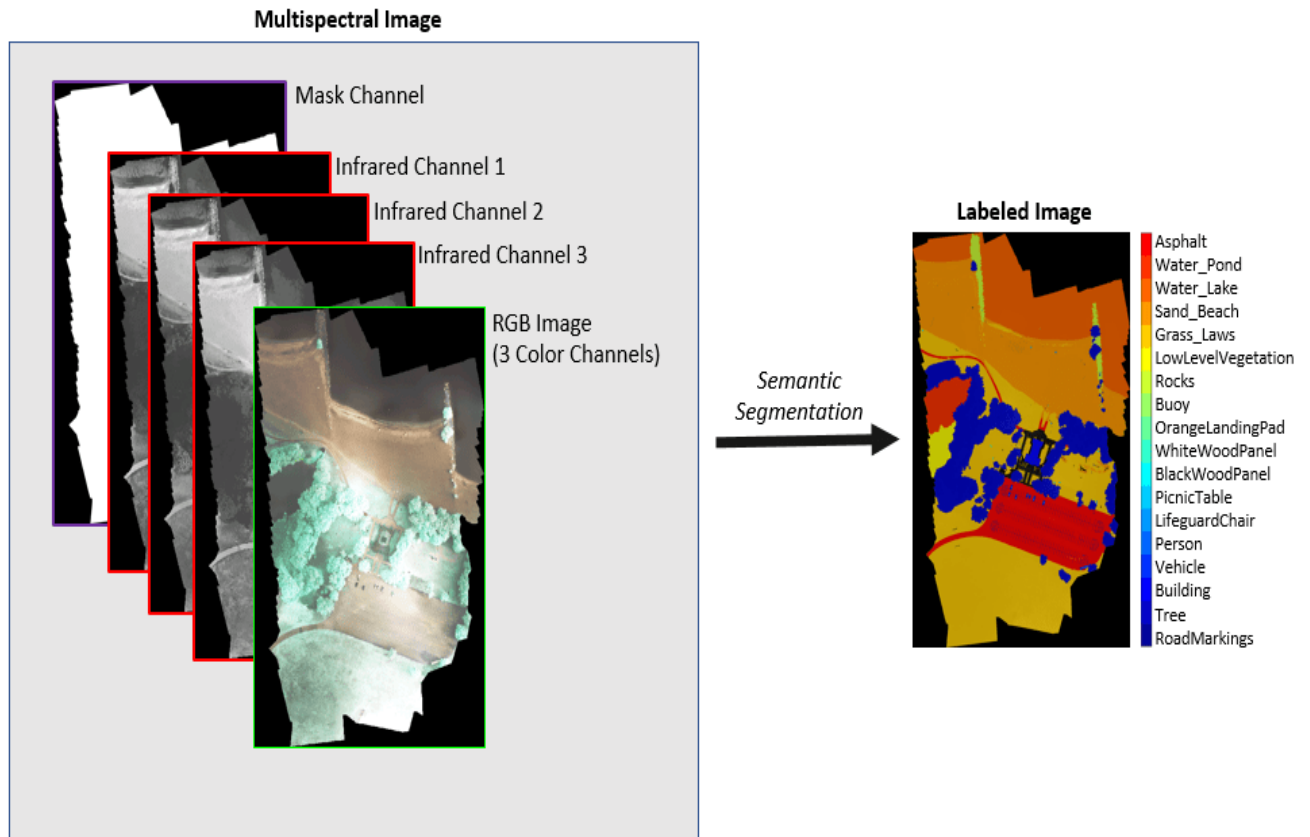


Рис. 1. Приклад тематичної інтерпретації вихідного мультиспектрального зображення з використанням удосконаленої моделі

За результатами інтерпретації вихідного мультиспектрального зображення обчислено відсоток рослинного покриття в регіоні (рис. 1).

Висновки

Таким чином, в статті проаналізовано групи існуючих моделей інтерпретації видових зображень, їх переваги та недоліки. Сформульована у загальній формі математична модель формування видового зображення для ділянки земної поверхні, як результат оператору, що здійснює перетворення координат та операторів, що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні у спектральному каналі. Сформульована у загальній формі математична модель тематичної інтерпретації видових зображень, яка може бути представлена, як результат дії оператору, який здійснює перетворення координат, операторів, які проводять кластеризацію зображення та операторів, які проводять зонування за деякою ознакою. Розглянуто оператор перетворення координат,

де оператор \hat{T}^{-1} задається виразами (25), оператори \tilde{C}_k пропонується реалізувати у вигляді метода семантичної сегментації, а оператори \tilde{Z}_i задають географічне зонування.

Приклад тематичної інтерпретації вихідного мультиспектрального зображення з використанням удосконаленої моделі наведений на рис. 1.

оператори кластеризації, оператори зонування та їх явний вигляд. Отримано модель тематичної інтерпретації видових зображення в операторній формі.

В результаті вперше розроблено модель тематичної інтерпретації видових зображень, яка, базуючись на моделі формування видових зображень, проводить обернену трансформацію координат зображення у геопросторіві координати і кластеризацію зображення на окремі класи по їх кольору та текстурі, додатково враховуючи географічне зонування, що забезпечує можливість розширеного аналізу і прогнозування часової динаміки даних у системах обробки геопросторової інформації.

Враховуючи складність проведення верифікації якості тематичної інтерпретації видових зображень, напрямком подальших досліджень є розробка методів вимірювання і оцінки ефективності класифікації, що мінімізують суб'єктивність оцінки та візуальну інтерпретацію видових зображень.

Список літератури

1. A-Xing Z., Fang-He Z., Peng L., Cheng-Zhi Q. Next generation of GIS: must be easy. *Annals of GIS*. 2021. Vol. 27. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1766563>
2. Fu W., Ma J., Chen P., Chen F. Remote Sensing Satellites for Digital Earth. In: Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. (eds) *Manual of Digital Earth*. Springer, Singapore. 2020. P. 55–123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_3
3. Кавац Ю.В. Інформаційна технологія дешифрування антропогенних змін на супутникових зображеннях. *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць "Системні технології"*. 2019. № 5 (124). С.77–83.
4. Пеньков В. О. Фотограмметрія : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 100 с.
5. Довбиш А. С., Шелехов І. В. Основи теорії розпізнавання образів : навч. посіб. : у 2 ч. Суми, 2015. 109 с.
6. Вершовский Е. А. Интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. *Системный анализ, управление и обработка информации*. 2010. С. 43–45.
7. Burrough P. A., McDonnell R. A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford, Oxford University Press, 1998. 333 p.
8. Schott J. Remote Sensing: The Image Chain Approach / 2nd ed. Oxford, Oxford University Press, 2007. 668 p.
9. Худов Г. В., Бутко И. М., Маковейчук А. Н. Теоретическое обоснование методики выбора реперных объектов на видовых изображениях. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2005. № 2. С. 92–94.
10. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research. 1998. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration. (дата звернення: 19.01.2020).
11. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений / под ред. А.А. Потапова. Москва: Физматлит, 2008. 456 с.
12. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. Москва: Бинум. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
13. Дэвид Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение. Современный поход. Москва: Вильямс, 2004. 928 с.
14. Желтов С.Ю. и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. Москва: Физматкнига, 2010. 672 с.
15. Yong Y. Image segmentation based on fuzzy clustering with neighborhood information. *Optica Applicata*, 2009. XXXIX.
16. Shumway R., Stoffer D. Time series analysis and its applications : with R examples (3rd ed.). Springer, 2010. ISBN 144197864X.

References

1. A-Xing Z., Fang-He Z., Peng L., Cheng-Zhi Q. (2021), "Next generation of GIS: must be easy", *Annals of GIS*, Vol. 27. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1766563>
2. Fu, W., Ma, J., Chen, P., Chen, F. (2020), "Remote Sensing Satellites for Digital Earth", In: *Guo, H., Goodchild, M. F., Annoni, A. (eds) Manual of Digital Earth*, Springer, Singapore, P. 55–123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_3
3. Kavats, Yu. V. (2019), "Information technology for decoding anthropogenic changes in satellite images" ["Informatsiina tekhnolohiia deshyfruvannya antropohennykh zmin na suputnykovykh zobrazhenniakh"], *Regional interuniversity collection of scientific works "System technologies"*, Vol. 5, No. 124, P. 77–83.
4. Penkov, V. O. (2019), *Photogrammetry: lecture notes [Fotohrammetriia : konspekt lektsii]*, Kharkiv : KhNUMG them O. M. Beketova, 100 p.
5. Dovbysh, A. S., Shelekhov, I. V. (2015), *Fundamentals of pattern recognition theory [Osnovy teorii rozpoznavannya obraziv]* : textbook in 2 parts, Sumy, 109 p.
6. Vershovskiy, E. A. (2010), "Interpretation of Earth Remote Sensing Data" ["Ynterpretatsiya dannykh dystantsyonnoho zondirovaniya Zemly"], *System analysis, management and information processing*, P. 43–45.
7. Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998), *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford, Oxford University Press, 333 p.
8. Schott, J. (2007), *Remote Sensing: The Image Chain Approach / 2nd ed*, Oxford, Oxford University Press, 668 p.
9. Khudov, H. V., Butko, Y.M., Makoveichuk, A.N. (2005), "Theoretical substantiation of the method for selecting reference objects in view images" ["Teorytycheskoe obosnovanye metodyky vibora repnykh ob'ektov na vydovykh yzobrazheniyakh"], *Aerospace engineering and technology*, No. 2, P. 92–94.
10. Zhang, Z. (1998), "A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research", available at : https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration (last accessed: 19.01.2020).
11. Potapov, A. A., Huliyev, Yu. V., Nykytov, S. A., Pakhomov, A. A., Herman, V. A. (2008), *The latest methods of image processing [Noveishye metody obrabotky yzobrazheniy]* / ed. A. A. Potapova, Moscow : Fizmatlit, 456 p.
12. Shapuro, L., Stokman, Dzh. (2006), *Computer vision [Kompiuternoe zrenye]*, Moscow : Bynom, Knowledge laboratory, 752 p.
13. Forsait, D., Pons, Z. (2004), *Computer vision. Modern hike [Kompiuternoe zrenye. Sovremennii pokhod]*, Moscow : Vyliams, 928 p.
14. Zheltov, S.Iu. et al. (2010), *Image processing and analysis in machine vision tasks [Obrabotka y analiz yzobrazheniy v zadachakh mashynnoho zreniya]*, Moscow : Fizmatbook, 67 p.
15. Yong, Y. (2009), "Image segmentation based on fuzzy clustering with neighborhood information", *Optica Applicata*, XXXIX.
16. Shumway, R., Stoffer, D. (2010), *Time series analysis and its applications : with R examples (3rd ed.)*, Springer. ISBN 144197864X.

Надійшла (Received) 25.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бутко Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Державне підприємство "Центр державного земельного кадастру", заступник генерального директора, Київ, Україна; email: butko_igor@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2859-0351>.

Бутко Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Государственное предприятие "Центр государственного земельного кадастру", заместитель генерального директора, Киев, Украина.

Butko Ihor – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, SE "State Land Cadaster", Deputy general director, Kyiv, Ukraine.

МОДЕЛЬ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВИДОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предметом исследования в статье является тематическая интерпретация видовых изображений. **Цель** работы - разработка модели тематической интерпретации видовых изображений, которая будет базироваться на модели формирования видовых изображений и дополнительно учитывать географическое зонирование. В статье решается следующая **задача**: разработка модели тематической интерпретации видовых изображений, которая учитывает недостатки существующих моделей и базируется на модели формирования видовых изображений, проводит обратную трансформацию координат изображения в геопространственные координаты и кластеризацию изображения на отдельные классы по их цвету и текстуре, дополнительно учитывая географическое зонирование, что обеспечивает возможность расширенного анализа и прогнозирования временной динамики данных в системах обработки геопространственной информации. Используются следующие **методы**: математический аппарат теории матриц, методы математического моделирования, методы кластеризации данных, методы дифференциального исчисления, методы цифровой обработки изображений. Получены следующие **результаты**: проанализированы группы существующих моделей интерпретации результатов дистанционного зондирования Земли, их преимущества и недостатки; сформулирована в общей форме математическая модель формирования видового изображения для участка земной поверхности; сформулирована в общей форме математическая модель тематической интерпретации видовых изображений; рассмотрен оператор преобразования координат, операторы кластеризации, операторы зонирования и их явный вид; получена модель тематической интерпретации видовых изображений в операторной форме. **Выводы**: впервые разработана модель тематической интерпретации видовых изображений, которая, основываясь на модели формирования видовых изображений, проводит обратную трансформацию координат в геопространственные координаты и кластеризацию по их цвету и текстуре, дополнительно учитывая географическое зонирование, что обеспечивает возможность расширенного анализа и прогнозирования временной динамики данных в системах обработки геопространственной информации.

Ключевые слова: видовое изображение; тематическая интерпретация; дешифрирование; модель; геопространственная информация; геопространственные координаты; сегментация.

MODEL OF THEMATIC INTERPRETATION OF THE VIEW IMAGES

The **subject** matter of the article is thematic interpretation of species images. The **goal** of the work is to develop a model for thematic interpretation of species images, which will be based on the model for the formation of species images and additionally take into account geographic zoning. The following **task** was solved in the article: development of a model of thematic interpretation of view images, which takes into account the shortcomings of existing models and is based on the model of formation of view images, carries out the reverse transformation of the image coordinates into geospatial coordinates and clustering the image into separate classes according to their color and texture, additionally taking into account geographic zoning, which provides the possibility of advanced analysis and forecasting the temporal dynamics of data in geospatial information processing systems. The following **methods** used are – mathematical apparatus of the theory of matrices, methods of mathematical modelling, methods of data clustering, methods of differential calculus, methods of digital image processing. The following **results** were obtained – groups of existing models for interpreting the results of remote sensing of the Earth, their advantages and disadvantages have been analyzed; a mathematical model of the formation of a species image for a section of the earth's surface has been formulated in general form; a mathematical model of thematic interpretation of species images was formulated in general form; the operator of transformation of coordinates, operators of clustering, operators of zoning and their explicit form are considered; a model of thematic interpretation of species images in operator form is obtained. **Conclusions**: for the first time, a model of thematic interpretation of view images was developed, which, based on the model of formation of view images, carries out the inverse transformation of coordinates into geospatial coordinates and clustering by their color and texture, additionally taking into account geographical zoning, which provides the possibility of advanced analysis and forecasting of the temporal dynamics of data in processing systems geospatial information.

Keywords: species image; thematic interpretation; decryption; model; geospatial information; geospatial coordinates; segmentation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бутко І. М. Модель тематичної інтерпретації видових зображень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>

Butko, I. (2021), "Model of thematic interpretation of the view images", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>