

РОЙОВИЙ МЕТОД ТЕМАТИЧНОГО СЕГМЕНТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ БОРТОВИХ СИСТЕМ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Худов Г.В.¹, Хижняк І.А.¹, Соломоненко Ю.С.¹, Маковейчук О.М.²

¹Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
вул. Сумська, 77/79, 61023, м. Харків

²Харківський національний університет радіоелектроніки,
пр. Науки, 14, 61166, м. Харків
2345kh_hg@ukr.net

У статті запропоновано для тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу використання ройового методу штучної бджолиної колонії. Уведена цільова функція, що враховує дисперсії розподілу яскравості тематичних сегментів оптико-електронного зображення. Сформульована оптимізаційна задача, яка полягає в мінімізації цільової функції. Наведено результат тематичного сегментування оптико-електронного зображення. Розраховані значення помилок тематичного сегментування першого та другого роду. *Ключові слова:* екологічний моніторинг, оптико-електронне зображення, тематичне сегментування, ройовий метод, об'єкти інтересу.

Роевой метод тематического сегментирования изображений бортовых систем экологического мониторинга. Худов Г.В., Хижняк И.А., Соломоненко Ю.С., Маковейчук А.Н. В статье предложено для тематического сегментирования изображений бортовых систем экологического мониторинга использовать роевой метод искусственной пчелиной колонии. Введена целевая функция, которая учитывает дисперсии распределения яркости тематических сегментов оптико-электронного изображения. Сформулирована оптимизационная задача, которая заключается в минимизации целевой функции. Приведен результат тематического сегментирования оптико-электронного изображения. Рассчитаны значения ошибок тематического сегментирования первого и второго рода. *Ключевые слова:* экологический мониторинг, оптико-электронное изображение, тематическое сегментирование, роевой метод, объекты интереса.

Swarm method of thematic segmentation of images of on-board environmental monitoring systems. Khudov G., Khizhnyak I., Solomonenko Yu., Makoveychuk A. It is proposed to use the swarm method of artificial bee colony for thematic segmentation of images of on-board environmental monitoring systems. A target function was introduced that takes into account the dispersion of the brightness distribution of the thematic segments of the optoelectronic image. The optimization problem, which is to minimize the objective function, is formulated. The result of thematic segmentation of the optical-electronic image is given. The values of thematic segmentation errors of the first and second kind are calculated. *Key words:* environmental monitoring, optoelectronic image, thematic segmentation, swarm method, objects of interest.

Постановка проблеми. Процес дешифрування оптико-електронних зображень (далі – ОЕЗ) в інтересах екологічного моніторингу складається з декількох етапів, які ведуть дешифрувальника до розпізнавання об'єктів, а потім до їх загальної оцінки, визначення стану складного об'єкта й формування інформації про нього [2].

У статті основна увага приділяється етапу тематичного сегментування, від якості якого залежить результат обробки всього ОЕЗ. Результатом тематичного сегментування ОЕЗ є розділення зображення на штучні об'єкти (об'єкти інтересу) та природні об'єкти (фон).

Актуальність дослідження. У ході ведення бойових дій на території Донецької та Луганської областей виникають численні екологічні проблеми, які в основному пов'язані із застосуванням озброєння й військової техніки. Як відомо, техногенні екологічні фактори (забруднення) класифікуються за механізмом, ступенем, рівнем,

наслідками, масштабом впливу тощо. З погляду механізму впливу на навколишнє природне середовище розрізняють три види забруднень: фізичної, хімічної та біологічної природи, а озброєння й військова техніка здатні генерувати найнебезпечніші типи всіх трьох видів [1].

Натепер ґрунтова поверхня десятків тисяч гектарів земель порушена воронками від мін і снарядів, пошкоджена гусеницями танків і важкою військовою технікою, а також забруднена нафтопродуктами, які у великому об'ємі можуть потрапити на ґрунт із пошкодженої військової техніки та нафтозховищ, а потім й у ґрунтові води. Уже сьогодні доцільно приступити до аналізу таких можливих техногенних катастроф з використанням бортових систем екологічного моніторингу. Значну частку серед таких даних, виходячи з їх наочності та придатності до точних вимірювань, займають дані, що отримані засобами оптико-електронного моніторингу повітряного й космічного базування [2–3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кількість робіт, що присвячені розробленню, модернізації й застосуванню методів сегментування ОЕЗ, постійно зростає [4–6]. Це зумовлено значним впливом сегментування на кінцеву якість обробки та дешифрування зображення.

Відомі методи сегментування зображень [4–6] не можуть бути прямо застосовані до сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу. Однією з причини неможливості прямого застосування є те, що ці методи не враховують особливості формування зображень з бортових систем екологічного моніторингу.

З аналізу відомих методів сегментування ОЕЗ встановлено, що їм властиві такі основні недоліки: більшість із них не визначають межі об'єктів, а лише підкреслюють їх і не проводять сегментування; проведення сегментування лише за критерієм рівня яскравості пікселя зображення, що не дає можливості визначити критерії гомогенності сегментів [4–5].

Для вирішення завдання тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного

моніторингу можуть бути використані ройові методи, до яких належать метод штучної бджолоїної колонії, мурашиний метод, метод рою частинок, метод зозулі тощо, які імітують соціальну поведінку живих істот [5].

Для тематичного сегментування ОЕЗ будемо використовувати метод штучної бджолоїної колонії (АВС-метод (artificial bee colony)), який має такі переваги: несхильність до зациклення в локальних оптимумах; мультиагентність реалізації; здатність адаптуватися до змін навколишнього середовища; можливість використання для вирішення як дискретних, так і безперервних оптимізаційних задач; грунтування пошуку кращого рішення на рішеннях усіх агентів (бджіл) [6].

Виклад основного матеріалу. Сегментування вихідного розвідувального зображення $f(x,y)$ визначається виразом (1):

$$f(x,y) \rightarrow fs(x,y), \quad (1)$$

де $f(x,y)$ – вихідне ОЕЗ; $fs(x,y)$ – сегментоване зображення, та передбачає відображення пікселів (точок) вихідного зображення з координатами (x, y) у деякий простір ознак і введення метрики (міри близькості) на цьому просторі ознак. Як ознака використовується яскравість пікселів зображення та її властивості – розривність та однорідність у деякому кольоровому просторі пікселів з координатами (x, y) на зображенні $f(x,y)$, метрикою є відстань між яскравостями пікселів у кольоровому просторі. Сегментування вихідного зображення, відповідно до (1), передбачає розбиття $f(x,y)$ на сегменти B_i , що задовольняє умовам (2):

$$\begin{cases} \bigcup_{i=1}^K B_i = B; \\ B_i \cap B_j = \emptyset, \text{ для } i \neq j; \forall i, j = \overline{1, K}; \\ LP(B_i) = 1; \forall i = \overline{1, K}; \\ LP(B_i \cap B_j) = 0, \text{ для } i \neq j; \forall i, j = \overline{1, K}. \end{cases} \quad (2)$$

де $B: B = \{B_1, B_2, \dots, B_K\}$ – сегменти на зображенні $fs(x,y)$;

K – кількість сегментів B_i , $(i=1, 2, \dots, K)$;

LP – предикат, що визначений на B та приймає значення «1» – істина тоді й тільки тоді, коли будь-яка пара точок із кожного сегменту B_i задовольняє деякому критерію однорідності – вираз (3):

$$LP(B_i) = \begin{cases} 1, \text{ при } f(x_1, y_1) = \dots = f(x_m, y_m); \\ 0, \text{ в іншому випадку,} \end{cases} \quad (3)$$

де $(x_m, y_m) \in B_i$; $m = 1, 2, \dots, M$; M – кількість точок у сегменті B_i .

Для визначення оптимального порогу тематичного сегментування та розділення зображення на штучні об'єкти й фон удосконалено метод тематичного сегментування зображень бортових систем спостереження, схема якого наведена на рис. 1. На відміну від відомих, для тематичного сегментування застосовується ройовий метод штучної бджолоїної

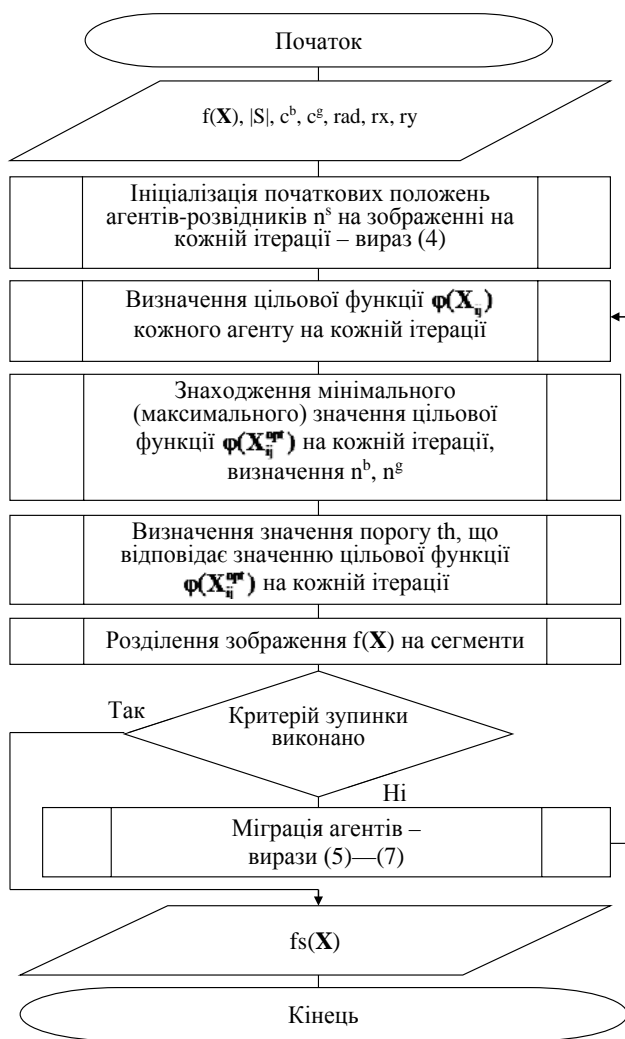
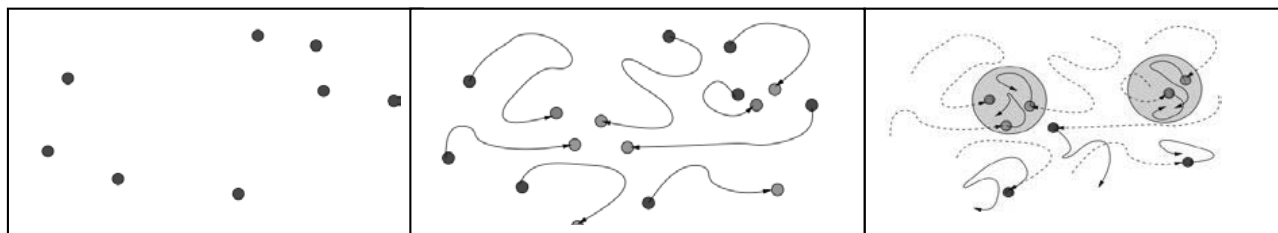


Рис. 1. Схема методу тематичного сегментування ОЕЗ бортових систем спостереження



а) б) в)

Рис. 2. Положення агентів ройового методу тематичного сегментування:

а) ініціалізація початкових положень, б) міграція, в) визначення оптимального положення

колонії, що передбачає визначення положень агентів (рис. 2а, вираз (4)), їх міграцію (рис. 2б, вирази (5)–(7)), умов зупинки ітераційного процесу за критерієм мінімуму фітнес-функції та визначення оптимального значення порогового рівня (рис. 2в):

$$\mathbf{X}_{i1} = \text{rand}(f(\mathbf{X})), \quad (4)$$

де $\mathbf{X} = (x, y)$ – вектор положень агентів;

$\mathbf{X}_{i1} = (x_{i1}, y_{i1})$ – вектор положень агентів на першій ітерації;

$\text{rand}(f(\mathbf{X}))$ – генератор випадкових чисел;

$n^s = 1, \dots, n^s$; $n^s \cdot i = 1$ – кількість агентів-розвідників на першій ітерації;

$$\mathbf{X}_{((i-1)c^b+k)_j} = N_{i(j-1)}^b + \text{Rnd} \cdot \text{rad}, \quad (5)$$

де $\mathbf{X}_{((i-1)c^b+k)_j}$ – вектор положень кращих агентів на j -ій ітерації;

N_{ij}^b – краща позиція i -го агента на j -ій ітерації;

$i = 1, \dots, n^s$; $k = 1, c^b$; n^b – кількість кращих позицій на j -ій ітерації;

c^b – кількість агентів, що відправляються (мігрують) до кращих позицій;

Rnd – випадкове число;

rad – коефіцієнт, що визначає розсіяння агентів при відправленні на кращі та перспективні позиції;

$$\mathbf{X}_{(n^b c^b + (i-1)c^b + k)_j} = N_{i(j-1)}^g + \text{Rnd} \cdot \text{rad}, \quad (6)$$

де N_{ij}^g – перспективна позиція i -го агента на j -ій ітерації; $i = 1, \dots, n^s$; $k = 1, c^g$; n^g – кількість перспективних позицій на j -ій ітерації; c^g – кількість агентів, що відправляються (мігрують) до перспективних позицій;

$$\mathbf{X}_{(n^b c^b + n^g c^g + i)_j} = \text{rand}(f(\mathbf{X})), \quad (7)$$

де, $i = 1, \dots, n^s$, n^s – кількість агентів-розвідників на j -ій ітерації.

До цільової функції $\varphi(\mathbf{X}_{ij})$ висуваються такі вимоги: задоволення умови адекватності задачі; використання мінімуму обчислювального ресурсу; мінімум кількості локальних оптимумів; не повинна бути занадто «гострою». У як цільову функцію обрано суму дисперсії яскравості сегментів зображення (вираз (8)):

$$D(\text{th}) = D_1(\text{th}) + D_2(\text{th}), \quad (8)$$

де $D(\text{th})$ – цільова функція;

th – значення порогу тематичного сегментування;

$D_1(\text{th})$ – сума дисперсії яскравості пікселів тематичних сегментів, що мають яскравість вищу за пороговий рівень (штучні об'єкти);

$D_2(\text{th})$ – сума дисперсії яскравості пікселів тематичних сегментів, що мають яскравість нижчу за пороговий рівень (фон).

У загальному вигляді оптимізаційна задача вибору оптимального порогу тематичного сегментування сформульована виразами (9)–(14) і полягає в мінімізації введеної цільової функції (9) з урахуванням визначень та обмежень (10)–(14):

$$D(\text{th}) = \sum_{j=1}^K D_j(\text{th}) \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$D_j(\text{th}) = \frac{1}{N_{1j}(\text{th}) - 1} \sum_{k=1}^{N_{1j}(\text{th})} (U_{kj} - \mu_j(\text{th}))^2 - \text{для } U_{kj} > \text{th}; \quad (10)$$

$$D_j(\text{th}) = \frac{1}{N_{0j}(\text{th}) - 1} \sum_{k=1}^{N_{0j}(\text{th})} (U_{kj} - \mu_j(\text{th}))^2 - \text{для } U_{kj} \leq \text{th}; \quad (11)$$

$$\mu_j(\text{th}) = \frac{1}{N_{1j}(\text{th})} \sum_{k=1}^{N_{1j}(\text{th})} U_{kj} - \text{для } U_{kj} > \text{th}; \quad (12)$$

$$\mu_j(\text{th}) = \frac{1}{N_{0j}(\text{th})} \sum_{k=1}^{N_{0j}(\text{th})} U_{kj} - \text{для } U_{kj} \leq \text{th}; \quad (13)$$

$$0 \leq \text{th} \leq U_{\max}, \quad (14)$$

де K – кількість сегментів; N_{0j} – кількість пікселів в j -му сегменті, яскравість яких менша або дорівнює значенню порогового рівня th ; N_{1j} – кількість пікселів в j -му сегменті, яскравість яких більша за значення порогового рівня th ; U_{kj} – яскравість k -го пікселя в j -му сегменті; μ_j – математичне очікування яскравості в j -му сегменті; U_{\max} – максимальне значення яскравості пікселів на зображенні.

Оптимізаційна задача (9) вирішується методом ітераційних розрахунків. Проведемо сегментування тонового зображення бортової системи спостереження, що отримано із зони ведення антитерористичної операції [6], удосконаленим методом тематичного сегментування зображень. Вихідне та сегментоване зображення наведені на рис. 3–4 відповідно.

Результати сегментування вихідного зображення (рис. 3) відомими методами [4–6] наведені на рис. 5.

Порівняння результатів тематичного сегментування відомими методами (рис. 5) і запропонованим удосконаленим ройовим методом штучної бджолиної колонії (рис. 4) показують, що візуально об'єкти інтересу краще визначаються на рис. 4. Як об'єкти



Рис. 3. Вихідне тонове ОЕЗ



Рис. 4. Сегментоване тонове ОЕЗ



Метод Otsu



Метод k-means



Метод Random forest



Мурашиний метод

Рис. 5. Результати тематичного сегментування ОЕЗ існуючими методами

Таблиця 1

Оцінка помилок першого та другого роду тематичного сегментування ОЕЗ різними методами

Методи тематичного сегментування	Otsu	Канні	k-means (k=2)	k-means (k=3)	k-means (k=4)	Random forest	Мурашиний	ABC
α_1 , %	18,30	10,50	18,50	17,30	15,50	15,90	4,15	2,70
β_2 , %	25,70	14,30	25,80	23,70	20,30	17,76	6,84	4,55

інтересу визначені вцілілий і пошкоджений літаки, сховища з нафтою, аеродромні споруди тощо.

Для кількісної оцінки якості тематичного сегментування зображень розраховуються класичні показники оцінки – ймовірності помилок тематичного сегментування першого (α_1) і другого (β_2) роду [8–9]. Значення указаних помилок для різних методів тематичного сегментування наведено в таблиці 1.

Аналіз даних таблиці 1 свідчить про те, що впровадження вдосконаленого методу тематичного сегментування зображень бортових систем екологічного моніторингу в модернізацію наявних і розроблення перспективних систем обробки зображень дасть змогу підвищити якість обробки оптико-електронних зображень, а саме знизити помилки сегментування першого та другого роду на величину від 4% до 13%.

Головні висновки. У статті проаналізовано основні недоліки відомих методів сегментування

ОЕЗ. Для тематичного сегментування ОЕЗ бортових систем екологічного моніторингу запропоновано використання ройового методу штучної бджолиної колонії. Визначена цільова функція у вигляді суми дисперсії сегментів сегментованого зображення. Сформульована оптимізаційна задача, в якій як параметр, що оптимізується, обрано поріг сегментування, а оптимізація полягає в мінімізації цільової функції.

Наведені результати тематичного сегментування вихідного ОЕЗ відомими методами та запропонованим удосконаленим ройовим методом штучної бджолиної колонії. Візуальна оцінка якості тематичного сегментування дає змогу визначити об'єкти інтересу значно краще.

Розраховані значення помилок тематичного сегментування першого та другого роду. Застосування вдосконаленого ройового методу штучної бджолиної колонії дасть змогу підвищити якість обробки опти-

ко-електронних зображень, а саме знизити помилки сегментування першого та другого роду на величину від 4% до 13% порівняно з іншими відомими методами сегментування.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані під час модернізації наявних і розроблення перспективних систем екологічного моніторингу.

Література

1. Каракеян В.И. Мониторинг загрязнения окружающей среды. Москва: Юрайт, 2016. 397 с.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010. 560 с.
3. Попов М.О., Гринюк С.В. Стан і перспективи розвитку гіперспектральних систем аерокосмічної розвідки. Наука і оборона. Київ, 2012. № 2. С. 39–47.
4. Барталев С.А., Ховратович Т.С. Анализ возможностей применения методов сегментации спутниковых изображений для выявления изменений в лесах. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 44–62.
5. Ayman El-Baz, Jiang X., Suru J.S. Biomedical image segmentation: advances and trends. US: CRC Press, 2016. 546 p.
6. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method / I. Ruban, H. Khudov, V. Khudov, I. Khizhnyak, O. Makoveichuk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 5/9 (89). P. 49–57.
7. Karaboga D. and Akay B. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. Appl. Math. Computing. 2009. Vol. 214. P. 108–132.
8. Метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення / І.А. Хижняк, О.М. Маковейчук, Р.Г. Худов, В.О. Подліпаєв, Г.В. Горбань, Г.В. Худов. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. № 2 (48). С. 91–96.
9. Худов В.Г., Маковейчук О.М., Хижняк І.А. Оцінка якості еволюційного методу сегментування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження. Системи управління, навігації та зв'язку. 2017. № 4 (44). С. 133–137.