

УДК 004.932

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.161860

Сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування землі методом штучної бджолоїної колонії

І. В. Рубан, Г. В. Худов, О. М. Маковейчук, І. А. Хижняк, В. Г. Худов,
В. О. Подліпаєв, В. О. Шумейко, О. В. Атрасевич, А. А. Нікітін, Р. Г. Худов

Встановлено, що відомі методи сегментування зображень не можуть бути напряму застосовані до сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі. Сформульовано математична задача сегментування таких зображень. Встановлено, що результатом сегментування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі є розділення зображення на штучні об'єкти (об'єкти інтересу) та природні об'єкти (фон). Запропоновано для сегментування зображень використання методу штучної бджолоїної колонії. Викладена сутність методу, який передбачає визначення положень агентів, їх міграцію, умов зупинки ітераційного процесу за критерієм мінімуму цільової функції та визначення оптимального значення порогового рівня. Введена цільова функція, що має фізичний смисл суми дисперсії яскравості сегментів сегментованого зображення. Сформульовано оптимізаційна задача сегментування зображення бортової системи оптико-електронного спостереження, яка полягає в мінімізації цільової функції при певних припущеннях та обмеженнях.

Наведені результати експериментального дослідження застосування методу штучної бджолоїної колонії до сегментування оптико-електронного зображення. Експериментальні дослідження сегментування оптико-електронного зображення підтвердили працездатність методу штучної бджолоїної колонії. На сегментованому зображенні для прикладу визначені можливі об'єкти інтересу, а саме: ємності з нафтою або паливом для літаків, літаки, аеродромні споруди тощо.

Проведена визуальна оцінка якості сегментування. Розраховані помилки першого та другого роду. Встановлено, що застосування методу штучної бджолоїної колонії дозволить підвищити якість обробки оптико-електронних зображень. При цьому помилки сегментування першого та другого роду знижені в середньому на величину від 7 % до 33 %

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, зображення, сегментування, метод штучної бджолоїної колонії

1. Вступ

Відомо, що оперативне отримання матеріалів дистанційного зондування Землі з космосу та повітря дозволяє вирішувати велику кількість складних та важливих завдань у різних областях життєдіяльності [1]. До них відносяться, наприклад, проблеми екології та моніторингу навколишнього середовища,

природокористування та ефективного управління земельними ресурсами, військова справа, боротьба з тероризмом, картографування тощо [1].

Основною операцією, від якої залежить результат обробки матеріалів дистанційного зондування Землі, є їх сегментування [2–3]. Актуальність розробки ефективного методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі також обумовлена [3]:

- удосконаленням спеціального математичного та програмного забезпечення для автоматизації найбільш складних етапів обробки інформації спостереження;

- зменшенням часу обробки і підвищенням достовірності результуючих документів;

- інтелектуалізацією процесів обробки даних (детальне спостереження об'єктів інтересу, вирішення масштабних тематичних завдань для значних територій).

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Кількість робіт, що присвячені розробці, модернізації та застосуванню методів сегментування оптико-електронних зображень, постійно зростає [3–9]. Це зумовлено значним впливом сегментування на кінцеву якість обробки та дешифрування зображення. Проведемо аналіз відомих методів сегментування, які, в тому числі, використовуються і для сегментування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі.

В [4] для сегментування зображень запропоновано метод k-means. Основні недоліки методу наступні:

- результати в значній мірі залежать від початкових параметрів методу та специфіки зображення;

- результат сегментування досягається в результаті проведення багатократних ітерацій.

Указані недоліки ускладнюють процес обробки зображень в реальному масштабі часу.

В [5] запропонований метод сегментування Otsu. Основним недоліком методу є чутливість порогової бінарзації до нерівномірностей яскравості зображення через те, що введений лише один глобальний поріг.

В [6] для сегментування зображення запропоновано виділення контурів об'єктів інтересу методами просторового диференціювання, в тому числі методами Собеля, Превіта, Кірша, Уолліса, Канні. Основними недоліками указаних методів є наявність розривів, точок та штрихів, які утворюють завадний фон, необхідність знання початкового наближення до шуканої границі і великі обчислювальні витрати.

В [7–9] для сегментування медичних зображень використовуються еволюційні методи. Відомі еволюційні методи сегментування медичних зображень [7–9] не можуть бути використані для сегментування зображень дистанційного зондування Землі. По-перше, це пов'язано з різними умовами формування зображень та інформаційною складовою, що представлена на

зображенні. По-друге, це пов'язано з різними завданнями, що вирішуються при обробці зображень.

Основним недоліком застосування нейромережевих методів [10] для сегментування зображень є необхідність участі оператора та проведення попередньої обробки зображень. Різні початкові умови отримання зображень приводять до різних кінцевих результатів сегментування. Навчання нейронної мережі реалізується на основі випадкового вибору, підсумкові вагові коефіцієнти для вихідних нейронів залежать від вихідної послідовності. Завершення процесу навчання не засновано на строгих оптимізаційних математичних моделях. Таким чином, нейромережеві методи малопридатні для проведення сегментування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі.

В [11–13] розроблено ефективні, з точки зору проведення обчислювальних процедур, непараметричні методи кластеризації та методи спектрально-текстурного сегментування супутникових зображень високого просторового розрізнення. Але методи [11–13] можуть бути використані лише для сегментування крупних ландшафтів (ліс, поле, водна поверхня і т.і.) на зображеннях бортових систем дистанційного зондування Землі.

В [14–15] розроблено методи сегментування об'єктів земної поверхні по даним гіперспектрального знімання з використанням методів штучного інтелекту: кластеризації на основі нечітких множин, штучних нейронних мереж та генетичних методів. Новизна методів [14–15] полягає у гібридизації відомих методів штучного інтелекту та застосування їх для сегментування зображення, що отримано в результаті гіперспектрального знімання. Основним недоліком указаних методів є необхідність навчання штучних нейронних мереж, що значно знижує ефективність запропонованих методів сегментування. До того ж є певні труднощі з визначенням функції нормалізованої взаємної інформації та середньої нормалізованої взаємної інформації.

В технології комп'ютерного дешифрування даних дистанційного зондування Землі використовуються спеціалізовані програмні засоби. Найбільш розповсюдженими спеціалізованими програмними засобами обробки матеріалів дистанційного зондування Землі є: ERDAS IMAGINE, TNTmips, ER Mapper, ENVI, GRASS, INTERGRAPH, Arc View, ScanViewer, IMAGE Transformer, MODIS Processor, IRS Processor, ScanMagic, SCANEX NERIS, LESSA та інші [16–20]. Аналіз роботи зазначених спеціалізованих програмних засобів показав, що в деяких з них завдання сегментування взагалі не вирішуються, в інших використовуються відомі методи сегментування, що проаналізовані вище.

В [3, 21] запропоновано для сегментування зображень бортових систем спостереження використання мурашиного методу. Основним недоліком мурашиного методу є пересегментування – наявність на сегментованому зображенні великої кількості контурів об'єктів малого розміру («сміттєвих» об'єктів).

В [22] запропоновано для сегментування зображень бортових систем спостереження використання ройових методів. Однак в [22] є лише посилання на необхідність використання цільової функції в оптимізаційній задачі. Але

Обґрунтування вигляду та визначення складових цільової функції не наводиться.

Таким чином, існуючі методи сегментування зображень не можуть бути напряму застосовані до сегментування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі. По-перше, не враховуються особливості формування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі. По-друге, не враховується складноструктурованість зображень дистанційного зондування Землі, а саме:

- наявність великої кількості різнорідних об'єктів;
- об'єкти на зображенні відносяться до різних структурно-просторових елементів;
- кожному виду об'єкта притаманні власні значимі характеристики, що необхідно враховувати;
- об'єкти є морфологічно складними структурами;
- об'єкти є компактними та малоконтрастними у порівнянні з фоном.

Отже, для сегментування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі актуальним є розробка методу сегментування, що є вільним від основних недоліків відомих методів. Для проведення подальшого дослідження для сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі оберемо метод штучної бджолоїної колонії [23–28]. Метод штучної бджолоїної колонії у відомих роботах [23–28] застосовується для знаходження глобальних оптимумів складних функцій (функція сфери, Растрігіна, Швевелля та інших). Основними перевагами методу є:

- неохильність до зациклення в локальних оптимумах;
- мультиагентність реалізації;
- здатність адаптуватися до змін навколишнього середовища;
- можливість використання для вирішення як дискретних, так і безперервних оптимізаційних задач;
- ґрунтування пошуку кращого рішення на рішеннях всіх агентів (бджіл).

3. Ціль та задачі дослідження

Ціллю дослідження є підвищення якості сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі за рахунок застосування методу штучної бджолоїної колонії.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити метод сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі;
- обґрунтувати вибір цільової функції для сегментування оптико-електронного зображення;
- провести експериментальні дослідження щодо сегментування розробленим методом типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі;

– провести оцінку якості сегментування типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі розробленим та відомими методами сегментування.

4. Матеріали дослідження сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі методом штучної бджолоїної колонії

4.1. Розробка методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі

Сегментування вихідного оптико-електронного зображення $f(x, y)$ визначається виразом (1):

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

де $f(x, y)$ – вихідне оптико-електронне зображення; $fs(x, y)$ – сегментоване зображення,

Сегментування передбачає відображення пікселів (точок) вихідного зображення з координатами (x, y) в деякий простір ознак та введення метрики (міри близькості) на цьому просторі ознак. У якості ознаки використовується яскравість пікселів зображення та її властивості – розривність та однорідність у деякому кольоровому просторі. 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, коли люба пара точок з 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 в сегменті B_i .

Результатом сегментування зображень бортових систем дистанційного зондування Землі є розділення зображення на штучні об'єкти (об'єкти інтересу)

та природні об'єкти (фон). Тобто, кількість сегментів на сегментованому зображенні дорівнює $K=2$.

Для сегментування оптико-електронного зображення та розділення його на штучні та природні об'єкти необхідно визначити оптимальний поріг сегментування. Для визначення такого порогу сегментування будемо використовувати метод штучної бджолоїної колонії.

Метод сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі представимо у наступному вигляді. Положення агентів методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі представлено на рис. 1.

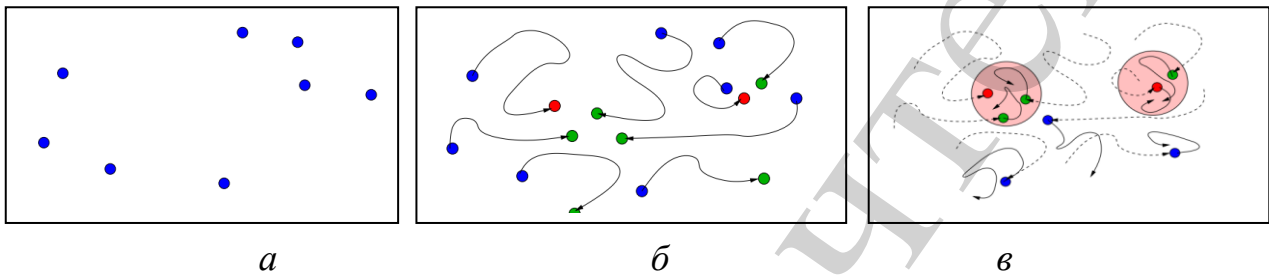


Рис. 1. Положення агентів методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі; *a* – ініціалізація початкових положень; *б* – міграція; *в* – визначення оптимального положення

1. Ініціалізація початкових положень агентів на зображенні (рис. 1, *a*). Умова виконується тільки для n^s агентів-розвідників на першій ітерації ($j=1$) (вираз (4)):

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

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

2. Визначення цільової функції $\varphi(\mathbf{X}_{ij})$ кожного i -го агента ($i=1, 2, \dots, |S|$; $|S|$ – кількість агентів) на поточній j -ій ітерації.

3. Формування кращих N_{ij}^b та перспективних N_{ij}^s позицій агентів з урахуванням значень цільової функції $\varphi(\mathbf{X}_{ij})$ кожного i -го агента.

4. Міграція агентів (рис. 1, *б*). Після формування кращих та перспективних позицій агентів в околиці цих позицій направляються робочі агенти. В околицю кожної кращої позиції направляється c^b робочих агентів, в околицю кожної перспективної позиції направляється c^s робочих агентів. Позиції всіх робочих агентів визначаються за виразами (5), (6):

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

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; $i=1, \dots, n^b$, $k=1, \dots, c^b$; 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;

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

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

Агенти-розвідники відправляються на позиції, координати яких є випадковими величинами, що рівномірно розподілені по всьому допустимому діапазоні значень (по всьому зображенню) (7):

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

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

5. Коефіцієнти (параметри) методу, що використовуються у виразах (5)–(6), входять до вектору вихідних параметрів коефіцієнтів методу $\mathbf{P}=\{n^s, n^b, n^s, c^b, c^s, \text{rad}, rx, ry\}$ (rx та ry – розмір околиць кращих та перспективних позицій по відповідним координатам).

6. Вихідними даними методу є визначення оптимального положення агентів (рис. 1, в), при якому забезпечується мінімальне чи максимальне значення цільової функції $\varphi(\mathbf{X}_{ij})$ та оптимальне значення порогу сегментування th .

Таким чином, узагальнена схема методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі, в основу якого покладено метод штучної бджолиної колонії, наведена на рис. 2.

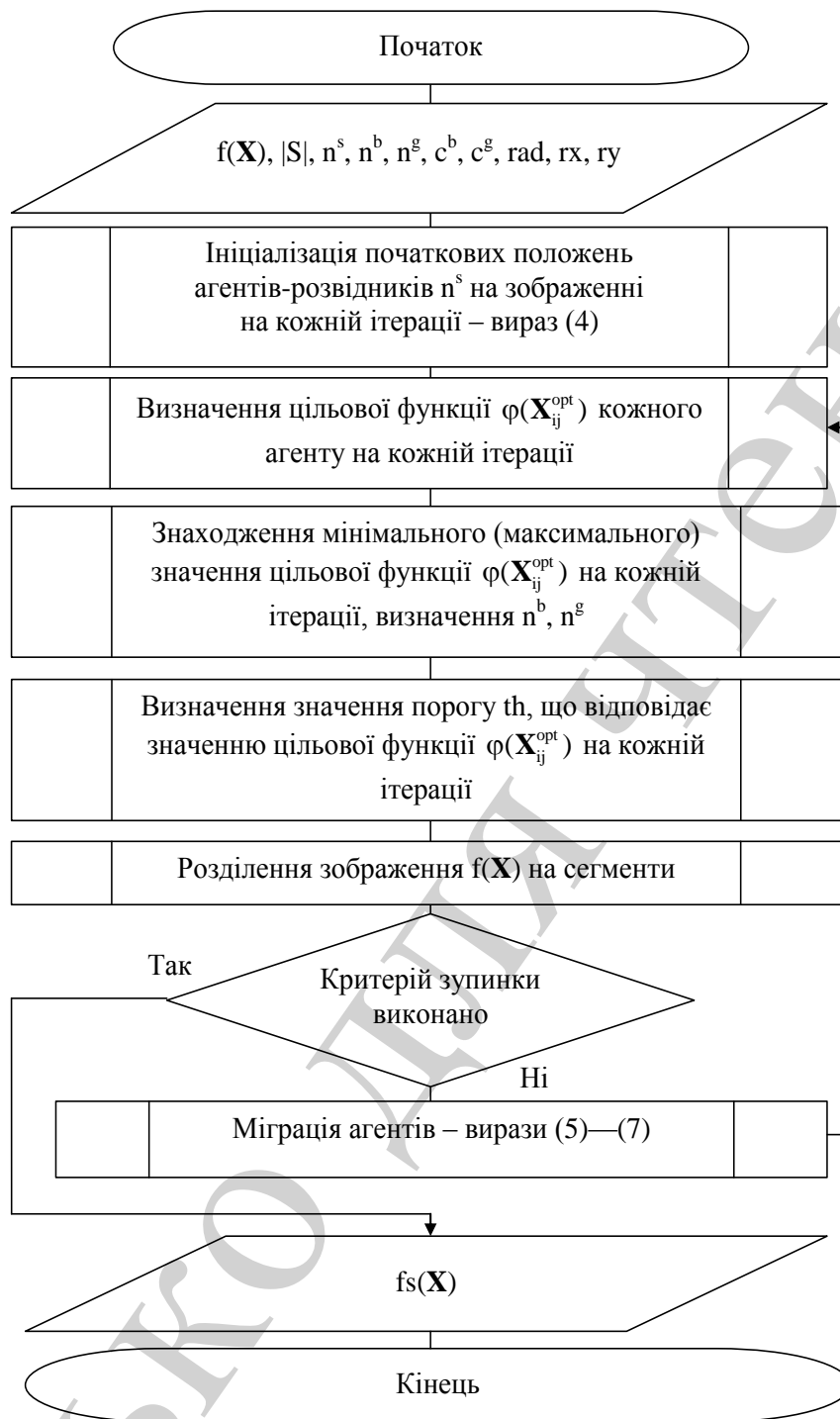


Рис. 2. Узагальнена схема методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі

В основі поведінки агентів методу штучної бджолиної колонії лежить самоорганізація. Самоорганізація – множина динамічних механізмів, відповідно до яких система регулюється на глобальному рівні за рахунок взаємодії компонентів на нижньому рівні без прямої взаємодії між цими компонентами. Основні складові самоорганізації агентів методу штучної бджолиної колонії при сегментуванні оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі наступні:

– позитивний зворотній зв'язок: досягається за рахунок виконання простих поведінкових емпіричних прийомів, які забезпечують знаходження рішень. Позитивний зворотній зв'язок полягає в тому, що агенти, ґрунтуючись на інформації від інших агентів, починають рухатися до зазначеного джерела ресурсів;

– негативний зворотній зв'язок: урівноважує позитивний зворотній зв'язок, що веде до стабілізації колективної поведінки. У агентів негативний зворотній зв'язок полягає в тому, що агент, ґрунтуючись на інформації від інших агентів, може вирішити, що знайдена ним позиція є гіршою;

– нестійкість позитивного зворотного зв'язку: поведінка агентів заснована на стохастичних правилах, тому випадкові відхилення в рішеннях – основа для пошуку нових рішень. Агент, що збився з курсу, може знайти нові, неопрацьовані позиції і привести за собою інших агентів;

– вимога множинної взаємодії між агентами, за рахунок чого досягається поява нових кращих рішень. Множинність взаємодії методу штучної бджолиної колонії полягає в тому, що інформація про позицію, що знайдена одним агентом, доступна для всіх інших агентів.

Для застосування методу (рис. 2) до сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі актуальним необхідно визначити цільову функцію $\varphi(\mathbf{X}_{ij})$ та сформулювати оптимізаційну задачу для визначення оптимального значення порогу сегментування.

До цільової функції $\varphi(\mathbf{X}_{ij})$ висуваються наступні вимоги: задоволення умові адекватності задачі; використання мінімуму обчислювального ресурсу; мінімум кількості локальних оптимумів; не повинна бути занадто "гострою".

4.2. Обґрунтування вибору цільової функції для сегментування оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі

Для обґрунтування вибору цільової функції методу сегментування оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі розглянемо модельні зображення (рис. 3). На рис. 3, а наведений випадок, коли об'єкт (внутрішній квадрат) та фон розділяються. На рис. 3, б наведений випадок, коли об'єкт (внутрішній квадрат) та фон не розділяються.

Розмір фону значно перевищує розміри об'єкту. Яскравості пікселів об'єкту та фону розподілені по нормальному закону з параметрами (рис. 4):

– математичне очікування: для об'єкту $\mu_1=0,75$; для фону $\mu_2=0,25$;

– середньоквадратичне відхилення: для об'єкту і фону $\sigma_1=\sigma_2=0,01$ (об'єкт та фон розділяються), $\sigma_1=\sigma_2=0,1$ (об'єкт та фон не розділяються).

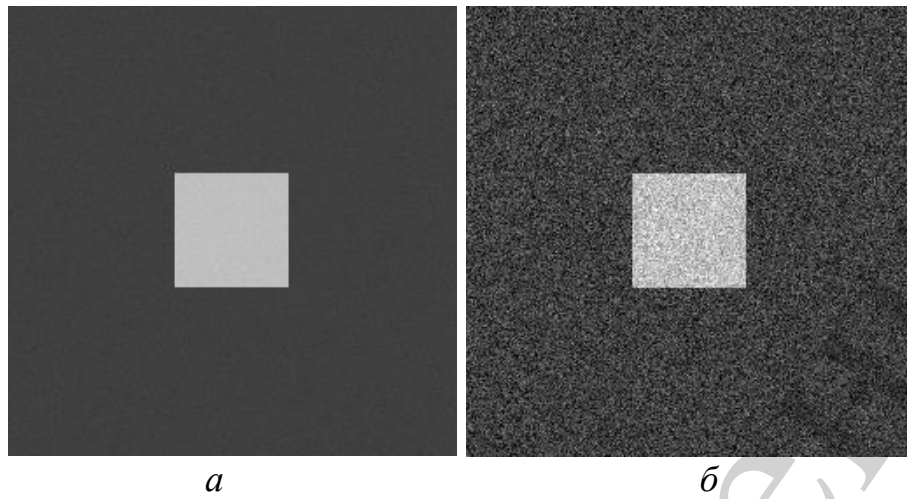


Рис. 3. Модельні зображення об'єкту та фону: *a* – об'єкт та фон розділяються; *б* – об'єкт та фон не розділяються

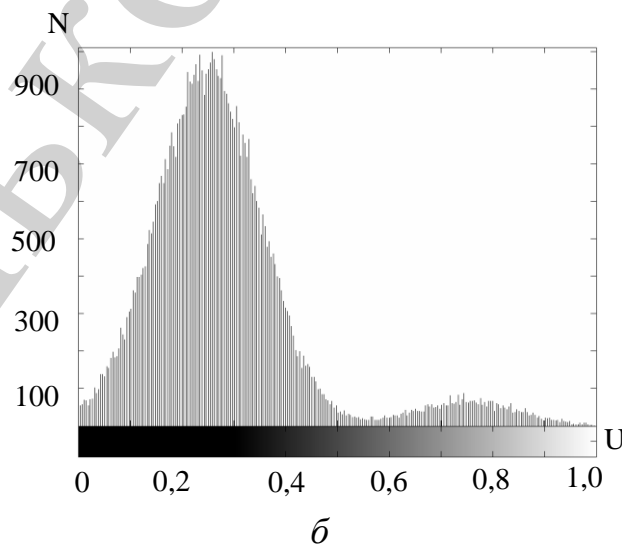
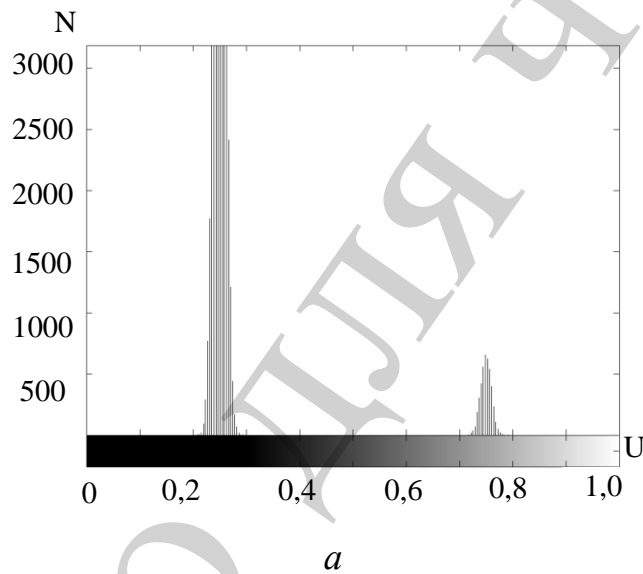


Рис. 4. Гістограми розподілу яскравості модельних зображень: *a* – об'єкт та фон розділяються; *б* – об'єкт та фон не розділяються

Сегментування модельного зображення полягає у визначенні оптимального значення порогу th розділення об'єкту від фону. Припустимо, що таке значення порогу знайдено. Тоді, для випадку, коли об'єкт та фон розділяються (рис. 3, *a*) проведемо бінарізацію зображення та розглянемо залежність значення дисперсії інтенсивності підпорогових $D_1(th)$ та надпорогових $D_2(th)$ пікселів як функції від порогу th . Для граничних значень порогу $D_1(th=0)=0$, $D_2(th=0)=D_0$, $D_1(th=1)=D_0$, $D_2(th=1)=0$, де D_0 – дисперсія модельного зображення (рис. 3, *a*).

Для визначення виразу для дисперсії модельного зображення D_0 проведемо розрахунки для математичного очікування модельного зображення за виразом (8):

$$\mu = \frac{\tilde{s}_1 \mu_1^2 + \tilde{s}_2 \mu_2^2}{\tilde{s}_1 + \tilde{s}_2}, \quad (8)$$

де \tilde{s}_1 , \tilde{s}_2 – площини (кількість пікселів) об'єкту і фону, відповідно, на модельному зображенні (рис. 3, *a*).

Значення D_0 можна легко визначити – вираз (9):

$$D_0 = \frac{\tilde{s}_1 \mu_1^2 + \tilde{s}_2 \mu_2^2}{\tilde{s}_1 + \tilde{s}_2} - \mu^2. \quad (9)$$

При умові, що розподіли інтенсивності пікселів не перекриваються (рис. 4, *a*), повинно виконуватися умова (10):

$$(\mu_1 - 3\sigma_1) > (\mu_2 + 3\sigma_2). \quad (10)$$

Тоді,

$$D_1((\mu_2 + 3\sigma_2) < th < (\mu_1 - 3\sigma_1)) = \sigma_2^2, \quad (11)$$

$$D_2((\mu_2 + 3\sigma_2) < th < (\mu_1 - 3\sigma_1)) = \sigma_1^2. \quad (12)$$

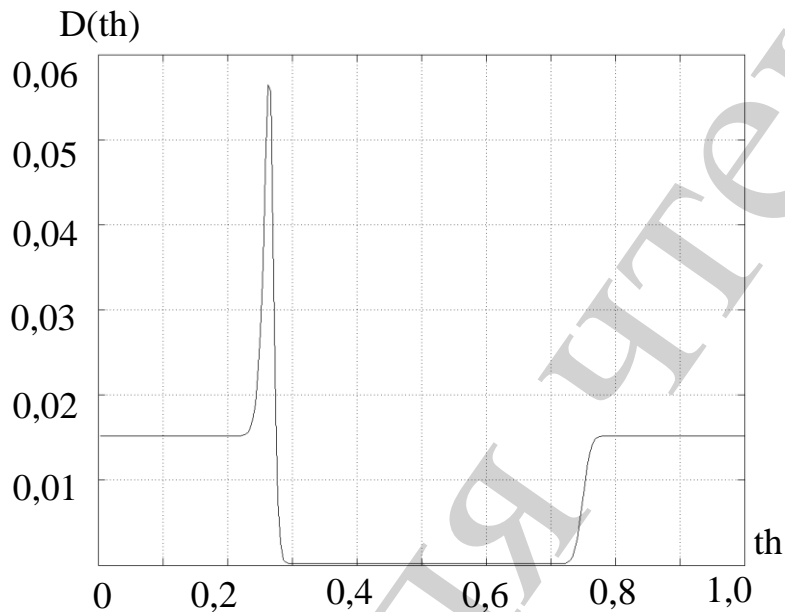
Розглянемо функцію $D(th)=D_1(th)+D_2(th)$, що має фізичний смисл суми дисперсії яскравості підпорогових та надпорогових пікселів. Маємо:

$$D(th=0)=D(th=1)=D_0, \quad (13)$$

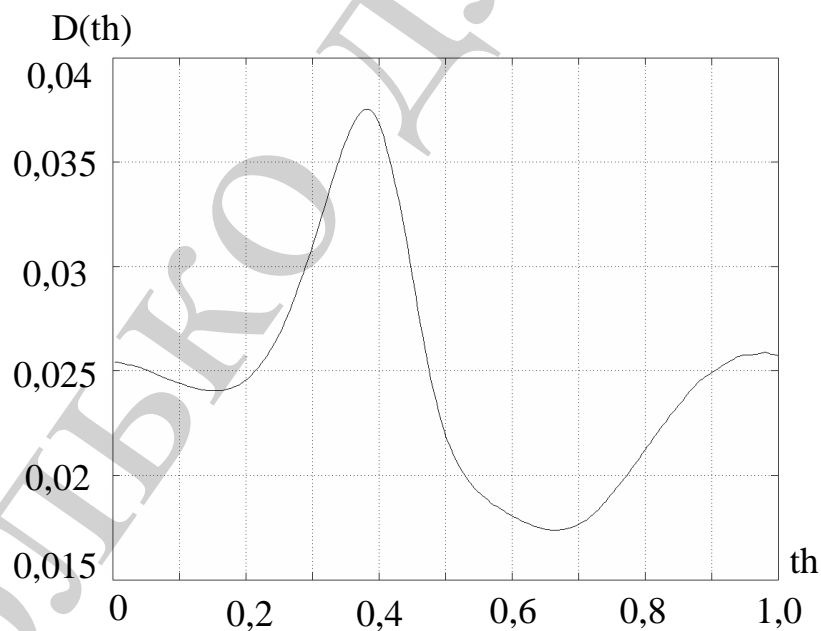
$$D((\mu_2 + 3\sigma_2) < th < (\mu_1 - 3\sigma_1)) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 < D_0. \quad (14)$$

Таким чином, в інтервалі значень порогу th , де об'єкт відділяється від фону, $D(th)=\min$.

На рис. 5, *a* зображено вигляд функції $D(th)$ для модельного зображення рис. 3, *a*, коли об'єкт і фон розділяються. У випадку, коли об'єкт та фон не розділяються (рис. 3, *б*) кількісний аналіз є більш складним і в роботі не наведений. Але, тим не менш, якісний вигляд функції $D(th)$ не змінюється та наведений на рис. 5, *б*. Таким чином, при використанні методу штучної бджолиної колонії для сегментування у якості цільової функції доцільно обирати функцію $D(th)$ – сума дисперсії яскравості сегментів сегментованого зображення.



a



б

Рис. 5. Вигляд функції $D(th)=D_1(th)+D_2(th)$: *a* – для модельного зображення рис. 3, *a*; *б* – для модельного зображення рис. 3, *б*

В загальному вигляді оптимізаційна задача вибору порогу сегментування оптико-електронного зображення на кожній j -ій ітерації представлена виразами (15)–(20) та полягає у мінімізації цільової функції (15) на кожній j -ій ітерації з урахуванням визначень і обмежень (16)–(20).

$$D(th) = \sum_{j=1}^K D_j(th) \rightarrow \min; \quad (15)$$

$$D_j(th) = \frac{1}{N_{1j}(th) - 1} \sum_{k=1}^{N_{1j}(th)} (U_{kj} - \mu_j(th))^2 - \text{для } U_{kj} > th; \quad (16)$$

$$D_j(th) = \frac{1}{N_{0j}(th) - 1} \sum_{k=1}^{N_{0j}(th)} (U_{kj} - \mu_j(th))^2 - \text{для } U_{kj} \leq th; \quad (17)$$

$$\mu_j(th) = \frac{1}{N_{1j}(th)} \sum_{k=1}^{N_{1j}(th)} U_{kj} - \text{для } U_{kj} > th; \quad (18)$$

$$\mu_j(th) = \frac{1}{N_{0j}(th)} \sum_{k=1}^{N_{0j}(th)} U_{kj} - \text{для } U_{kj} \leq th; \quad (19)$$

$$0 \leq th \leq U_{\max}, \quad (20)$$

де K – кількість сегментів; N_{0j} – кількість пікселів в j -му сегменті, яскравість яких менше або дорівнює значенню порогового рівня th ; N_{1j} – кількість пікселів в j -му сегменті, яскравість яких більше 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 вирішується методом ітераційних розрахунків. Умовою зупинки методу прийнято незмінність значення цільової функції на протязі 5 ітерацій.

4. 3. Результати експериментального дослідження застосування розробленого методу сегментування типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі

Розглянемо застосування методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі, в основу якого покладений метод штучної бджолиної колонії. На рис. 6 наведено вихідне оптико-електронне зображення, що отримано з космічного апарату Ikonos [22]. Зображення представлено в тонових градаціях яскравості сірого кольору від 0 до 255. Розмір зображення – (868 на 847) пікселів. Вихідне оптико-електронне

зображення (рис. 6) є складноструктурованим типовим зображенням бортових систем дистанційного зондування Землі і містить:

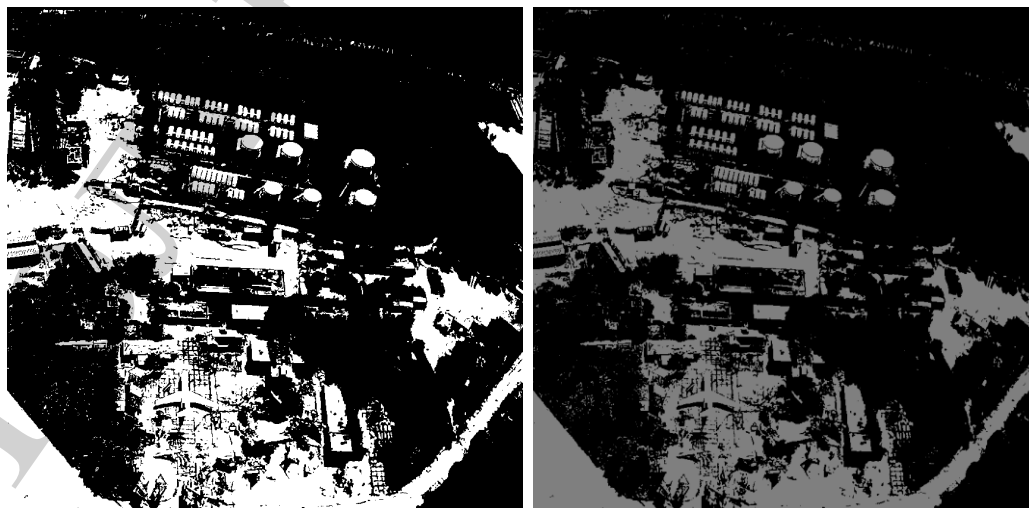
- велику кількість різномірних об'єктів;
- об'єкти на зображенні відносяться до різних структурно-просторових елементів;
- кожному виду об'єкта притаманні власні значимі характеристики;
- об'єкти є морфологічно складними структурами;
- об'єкти є компактними та мало контрастними у порівнянні з фоном.

Тому, в роботі експериментальні дослідження обмежені сегментуванням тільки одного типового зображення, що враховує усі особливості складноструктурованих оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі.



Рис. 6. Вихідне зображення [22]

Результати сегментування вихідного зображення (рис. 6) відомими методами (Otsu, k-means, Random forest, мурашиним) наведені на рис. 7.



а

б



Рис. 7. Результати сегментування вихідного зображення відомими методами: *а* – метод Otsu; *б* – метод k -means ($k=2$); *в* – метод Random forest; *г* – мурашиний метод

Результат сегментування вихідного зображення (рис. 6) розробленим методом сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі, в основу якого покладений метод штучної бджолиної колонії, наведений на рис. 8.

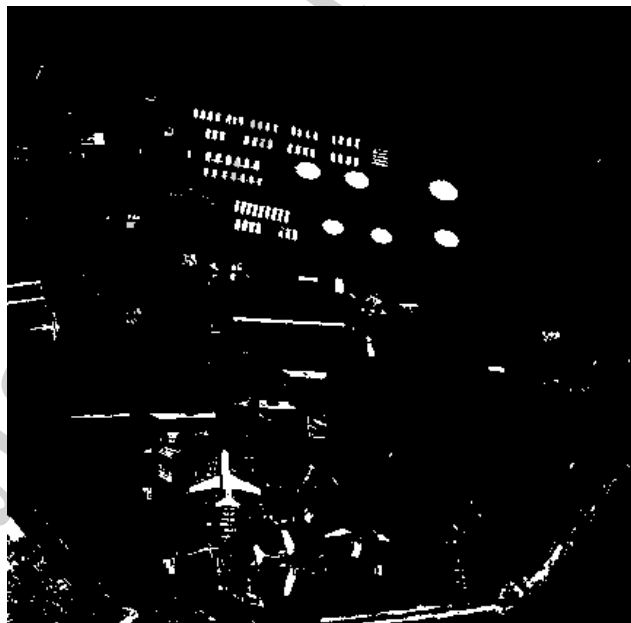


Рис. 8. Результат сегментування вихідного зображення (рис. 6) розробленим методом

Порівняння результатів сегментування відомими методами (рис. 7) та розробленим (рис. 8) показують, що візуально об'єкти інтересу краще визначаються на рис. 8. У якості об'єктів інтересу визначені вцілілий та

пошкоджений літаки, ємності з нафтою або паливом для літаків, аеродромні споруди та інші.

Дешифрування указаних об'єктів інтересу, розпізнавання, тематична класифікація та інше є предметом подальших досліджень і залишається за межами даного дослідження.

4. 4. Оцінка якості сегментування типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі розробленим та відомими методами сегментування

Показниками оцінки якості сегментування типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі розробленим та відомими методами сегментування оберемо помилки сегментування першого та другого роду. Помилки сегментування першого (α_1) та другого (β_2) роду визначаються за критерієм максимальної правдоподібності, що витікає з узагальненого критерію мінімуму середнього ризику [8–10]. Помилки сегментування першого роду α_1 та другого роду β_2 розраховуються за виразами (21), (22) відповідно [8–10]:

$$\alpha_1 = \frac{S_1(fs(\mathbf{X}))}{S_2(f(\mathbf{X}))}, \quad (21)$$

$$\beta_2 = 1 - \frac{S_3(fs(\mathbf{X}))}{S_4(f(\mathbf{X}))}, \quad (22)$$

де $S_1(fs(\mathbf{X}))$ – площа ділянок фону, що помилково віднесена до об'єктів інтересу на сегментованому зображенні $fs(\mathbf{X})$; $S_2(f(\mathbf{X}))$ – площа ділянок фону вихідного зображення $f(\mathbf{X})$; $S_3(fs(\mathbf{X}))$ – площа правильно сегментованих об'єктів інтересу на сегментованому зображенні $fs(\mathbf{X})$; $S_4(f(\mathbf{X}))$ – площа об'єктів інтересу на вихідному зображенні $f(\mathbf{X})$.

Розраховані за виразами (21)–(22) значення помилок першого та другого роду для різних методів сегментування наведено у табл. 1. У якості відомих методів обрано методи Otsu, Canny, k -means ($k=2, 3, 4$), Random forest, мурашиний.

Таблиця 1
Оцінка помилок першого та другого роду сегментування оптико-електронного зображення різними методами

Методи сегментування	Otsu	Canny	k -means ($k=2$)	k -means ($k=3$)	k -means ($k=4$)	Random forest	Мурашиний	Розроблений метод
$\alpha_1, \%$	18,30	10,50	18,50	17,30	15,50	15,90	4,15	3,70
$\beta_2, \%$	25,70	14,30	25,80	23,70	20,30	17,76	6,84	6,35

Аналіз даних табл. 1 свідчить про підвищення якості сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі при використанні розробленого методу сегментування на основі методу штучної бджолоїної колонії. Помилки сегментування першого та другого роду в середньому знижені на величину від 7 % до 33 %.

5. Обговорення результатів сегментування оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі з застосуванням методу штучної бджолоїної колонії

В роботі розроблений метод сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі. Формалізована задача сегментування оптико-електронного зображення – вираз (1). Встановлено, що результатом сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі є розділення зображення на об'єкти інтересу та фон. Для визначення порогу сегментування запропоновано застосування методу штучної бджолоїної колонії (4)–(6). Сутність методу штучної бджолоїної колонії полягає у визначенні початкових положень агентів, їх міграції, визначенні умов зупинки ітераційного процесу за критерієм мінімуму цільової функції та визначенні оптимального значення порогового рівня. Наведена узагальнена схема методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі, в основу якого покладений метод штучної бджолоїної колонії (рис. 2).

Обґрунтовано вибір цільової функції для сегментування оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі. Розглянуті типові модельні зображення, коли об'єкт та фон розділяються (рис. 3, а), об'єкт та фон не розділяються (рис. 3, б). Встановлено, що у якості цільової функції доцільно обрати суму дисперсії яскравості сегментів сегментованого зображення. Наведено вигляд цільової функції для типових модельних зображень (рис. 5). Сформульована оптимізаційна задача вибору порогу сегментування оптико-електронного зображення (вирази (15)–(20)). Оптимізаційна задача вирішується методом ітераційних розрахунків.

Проведені експериментальні дослідження щодо сегментування розробленим методом типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі. У якості типового зображення обрано зображення з космічного апарату Ikonos. Це зображення є типовим складноструктурованим зображенням бортових систем дистанційного зондування Землі. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленого методу сегментування, в основу якого покладений метод штучної бджолоїної колонії (рис. 8). На сегментованому зображенні (рис. 8) для прикладу визначені можливі об'єкти інтересу, а саме: ємності з нафтою або паливом для літаків, літаки, що вціліли після завдання удару, літаки, що були пошкоджені або знищені, аеродромні споруди тощо.

Проведена оцінка якості сегментування типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі розробленим та відомими методами сегментування. У якості відомих методів сегментування

обрано методи Otsu, Canny, k -means ($k=2, 3, 4$), Random forest, мурашиний. Проведена візуальна оцінка якості сегментування (порівняння рис. 7, 8). Встановлено, що візуально об'єкти інтересу (ємності з нафтою або паливом для літаків, літаки, що вціліли після завдання удару, літаки, що були пошкоджені або знищені, аеродромні споруди) краще визначаються на рис. 8. Для кількісної оцінки якості сегментування розробленим методом проведено розрахунок та розраховані помилок першого та другого роду (21), (22). Встановлено, що застосування розробленого методу сегментування зображення бортових систем дистанційного зондування Землі дозволить знизити значення помилок сегментування першого та другого роду в середньому на величину від 7 % до 33 % (табл. 1).

Основним недоліком розробленого методу сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі є потреба у значному обчислювальному ресурсі.

Напрямами подальших досліджень є:

- обробка багатомасштабної послідовності зображень бортових систем дистанційного зондування Землі;
- дослідження роботи методу в умовах впливу основних спотворюючих факторів (поворот зображення на різні кути, зміна масштабу та вплив шумів різного походження).

6. Висновки

1. Розроблений метод сегментування оптико-електронних зображень бортових систем дистанційного зондування Землі. Для визначення порогу сегментування запропоновано застосування методу штучної бджолиної колонії. Сутність методу штучної бджолиної колонії полягає у визначенні початкових положень агентів, їх міграції, визначенні умов зупинки ітераційного процесу за критерієм мінімуму цільової функції та визначенні оптимального значення порогового рівня.

2. Обґрунтовано вибір цільової функції для сегментування оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі. Встановлено, що у якості цільової функції доцільно обрати суму дисперсії яскравості сегментів сегментованого зображення. Сформульована оптимізаційна задача вибору порогу сегментування оптико-електронного зображення

3. Проведені експериментальні дослідження щодо сегментування розробленим методом типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленого методу сегментування. На сегментованому зображенні для прикладу визначені можливі об'єкти інтересу (ємності з нафтою або паливом для літаків, літаки, що вціліли після завдання удару, літаки, що були пошкоджені або знищені, аеродромні споруди тощо).

4. Проведена оцінка якості сегментування типового оптико-електронного зображення бортової системи дистанційного зондування Землі розробленим та відомими методами сегментування. Встановлено, що застосування

розробленого методу сегментування зображення бортових систем дистанційного зондування Землі дозволить підвищити візуальну якість виявлення об'єктів інтересу та знизити значення помилок сегментування першого та другого роду в середньому на величину від 7 % до 33 %.

Література

1. Remote Sensing of Planet Earth / Y. Chemin (Ed.). Rijeka, 2012. doi: <https://doi.org/10.5772/2291>
2. Gonzalez R., Woods R. E. Digital Image Processing. 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
3. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method / Ruban I., Khudov H., Khudov V., Khizhnyak I., Makoveichuk O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, Issue 9 (89). P. 49–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904>
4. Dhanachandra N., Manglem K., Chanu Y. J. Image Segmentation Using K -means Clustering Algorithm and Subtractive Clustering Algorithm // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 54. P. 764–771. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.090>
5. Makkar H., Pundir A. Image Analysis Using Improved Otsu's Thresholding Method // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2014. Vol. 2, Issue 8. P. 2122–2126.
6. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. Vol. PAMI-8, Issue 6. P. 679–698. doi: <https://doi.org/10.1109/tpami.1986.4767851>
7. Farooque M. Y., Raen M. S. Latest trends on image segmentation schemes // International journal of advanced research in computer science and software engineering. 2014. Vol. 4, Issue 10. P. 792–795.
8. Biomedical image segmentation: advances and trends / A. El-Baz, X. Jiang, S. Jasjit (Eds.). CRC Press, 2016. 546 p. doi: <https://doi.org/10.4324/9781315372273>
9. Choudhary R., Gupta R. Recent Trends and Techniques in Image Enhancement using Differential Evolution – A Survey // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2017. Vol. 7, Issue 4. P. 106–112. doi: <https://doi.org/10.23956/ijarcsse/v7i4/0108>
10. Wang Y. A New Image Threshold Segmentation based on Fuzzy Entropy and Improved Intelligent Optimization Algorithm // Journal of Multimedia. 2014. Vol. 9, Issue 4. doi: <https://doi.org/10.4304/jmm.9.4.499-505>
11. Dey V., Zhang Y., Zhong M. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective // Proceedings ISPRS TC VII Symposium, IAPRS. 2010. Vol. XXXVII. P. 31–42.
12. Michel J., Youssefi D., Grizonnet M. Stable Mean-Shift Algorithm and Its Application to the Segmentation of Arbitrarily Large Remote Sensing Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol. 53, Issue 2. P. 952–964. doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2014.2330857>

13. Tasdemir K., Moazzen Y., Yildirim I. An Approximate Spectral Clustering Ensemble for High Spatial Resolution Remote-Sensing Images // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8, Issue 5. P. 1996–2004. doi: <https://doi.org/10.1109/jstars.2015.2424292>
14. Hachouf F., Zeggari A. Genetic optimization for unsupervised fuzzy classification // 17 Congres Mondial IMACS. 2005. P. 27–32.
15. Choi T.-M., Kim S. Y. Fuzzy Types Clustering for Microarray Data // Proceedings of world academy of science, engineering and technology. 2005. Vol. 4. P. 12–15.
16. OpenCV library. URL: <https://opencv.org>
17. Передовые технологии в обработке ДДЗ. URL: <http://www.mapinfo.ru/product/erdas>
18. Пакет ArcView. Система ArcInfo. URL: <http://geoknigi.com/book/view.php?id=629>
19. Scanex – лидер в сфере спутникового мониторинга. URL: <http://scanex.ru>
20. TNTmips. URL: <http://www.microimages.com/products/tntmips.htm>
21. An improved method for segmentation of a multiscale sequence of optoelectronic images / Ruban I., Khudov V., Khudov H., Khizhnyak I. // 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2017.8246367>
22. A Swarm Method for Segmentation of Images Obtained from On-Board Optoelectronic Surveillance Systems / Ruban I., Khudov V., Makoveichuk O., Khudov H., Khizhnyak I. // 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045>
23. Artificial bee colony algorithm, its variants and applications: a survey / Bolaji A. L., Khader A. T., Al-Betar M. A., Awadallah M. A. // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 47, Issue 2. P. 434–459.
24. Kumar A., Kumar D., Jarial S. K. A Review on Artificial Bee Colony Algorithms and Their Applications to Data Clustering // Cybernetics and Information Technologies. 2017. Vol. 17, Issue 3. P. 3–28. doi: <https://doi.org/10.1515/cait-2017-0027>
25. Karaboga D., Akay B. A survey: algorithms simulating bee swarm intelligence // Artificial Intelligence Review. 2009. Vol. 31, Issue 1-4. P. 61–85. doi: <https://doi.org/10.1007/s10462-009-9127-4>
26. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications / Karaboga D., Gorkemli B., Ozturk C., Karaboga N. // Artificial Intelligence Review. 2014. Vol. 42, Issue 1. P. 21–57. doi: <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9328-0>
27. Bansal J. C., Sharma H., Jadon S. S. Artificial bee colony algorithm: a survey // International Journal of Advanced Intelligence Paradigms. 2013. Vol. 5, Issue 1/2. P. 123. doi: <https://doi.org/10.1504/ijaip.2013.054681>

28. Balasubramani K., Marcus K. A Comprehensive review of Artificial Bee Colony Algorithm // INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS & TECHNOLOGY. 2006. Vol. 5, Issue 1. P. 15–28. doi: <https://doi.org/10.24297/ijct.v5i1.4382>

Не является переизданием