

УДК 536.532

І.В. Рубан¹, В.Г. Худов¹, Р.Г. Худов²¹Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків²Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків**ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СЕГМЕНТУВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

Якість сегментування оптико-електронних зображень має суттєвий вплив на кінцеві результати розпізнавання зображення, що передбачає важливість вибору методу сегментування. У теперішній час запропонована велика кількість критеріїв і показників оцінки якості сегментування (аналітичних, емпіричних, кількісних і якісних). В роботі проведено аналіз відомих показників оцінки якості сегментування оптико-електронних зображень. Розглядаються показники, для обчислення яких необхідне еталонне сегментоване зображення, та показники оцінки якості без порівняння з еталоном. Зроблено висновок щодо необхідності розробки методики формування оптимального набору показників оцінки якості сегментування зображення, а також способу обчислення узагальненого показника якості на основі отриманого вектору значень показників якості сегментування зображення.

Ключові слова: оптико-електронне зображення, показник якості, сегментування, еталонне зображення, піксель, ознака, клас, помилка, емпірична відстань.

Вступ**Постановка проблеми у загальному вигляді.**

Відомо [1 – 5], що результат обробки зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, залежить від якості методу сегментування зображення. Саме цим зумовлена велика кількість публікацій, які присвячені розробці, модернізації та застосуванню багатьох методів сегментування зображення (оглядові статті [6, 7]). Так, за даними електронної науково-технічної бібліотеки Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ) [8] публікації, які включають у назву, анотацію або ключові слова термін image segmentation, розподіляються по роках таким чином:

- 1970-1979 рр. – 11 публікацій;
- 1980-1989 рр. – 314 публікацій;
- 1990-1999 рр. – 3066 публікацій;
- 2000-2010 рр. – 9938 публікацій.

Таким чином, перед розробниками систем обробки зображень стає непроста проблема вибору найбільш адекватних їх задачам методів з множини тих, що запропоновані у відомій літературі. Це, в свою чергу, зумовлює розробку методик та методів оцінки якості сегментування зображень.

Мета статті – проаналізувати основні показники якості сегментування оптико-електронних зображень та зроблено висновок щодо необхідності розробки методики формування оптимального набору показників оцінки якості сегментування зображення.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Основні відмінності методів оцінки якості сегментування оптико-електронних зображень наступні [6]:

- різні набори тестових зображень, які відрізняються як по типу зображення (реальні або синте-

зовані), так і по розміру, кількості, джерелам (оригінальні зображення або зображення з доступних баз даних) і т.і.;

- різні процедури вибору оптимальних параметрів методів обробки;

- різні критерії оцінки якості сегментування (кількісні або якісні; ті, що використовують еталонні сегментовані зображення або ні).

Основні методики сегментування зображень поділяються на [6, 9]:

1. Суб'єктивні.
2. Об'єктивні.
 - 2.1. Системні.
 - 2.2. Прямі.
 - 2.2.1. Аналітичні.
 - 2.2.2. Емпіричні.
 - 2.2.2.1. Контрольовані.
 - 2.2.2.2. Неконтрольовані (автоматичні).

Одним з ключових елементів методики порівняльного тестування є критерій оцінки якості сегментування зображення. На теперішній час основні критерії і показники розроблені для двох основних підходів до сегментування зображення [6]:

1) розділення зображення контурами на області зі схожими характеристиками (в англійській термінології – edge-based methods (boundary-based, contour-based));

2) об'єднання пікселів зображення в групи на основі близькості деяких кількісних ознак (region-based methods).

Для оцінки результатів роботи методів першої групи використовуються, в основному критерії і показники такі ж самі, що і для детекторів границь (такі показники наведені в [10]). Критерії оцінки якості методів сегментування зображення, що відносяться до другої групи наведені в [6].

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Основними ознаками якісного сегментування є [3, 11]: однорідність області по характеристикам (в першу чергу, по кольору та текстурі); відмінність значень обраних характеристик для суміжних областей зображення; гладкість границь кожного сегменту зображення; незначна кількість «дірок» у сегменті.

По відповідності указаним ознакам і класифікуються відомі показники якості сегментування зображення.

1. Перша група – це показники, які засновані на порівнянні з еталонним сегментуванням.

1.1. Кількість пікселів, що віднесені при сегментуванні не до свого сегменту. Оцінюється шляхом побудови матриці неточності (табл. 1) [6]. Стовбці матриці відповідають класу, до якого пікселі дійсно належать, а строки – класу, до якого пікселі віднесені при сегментуванні. Таким чином, правильно класифіковані пікселі відносяться до елементів матриці, що знаходяться на головній діагоналі, неправильно класифіковані – до всіх інших елементів матриці [6].

Таблиця 1
Приклад матриці неточності [6]

	BK	PA	RD	CY	NU	Total
BK	909	2		2		913
PA						
RD			111	10		121
CY	37	3	67	802	1	910
NU				87	419	506
Total	946	5	178	901	420	

Показники, що використовуються при цьому, наступні. Перший – процентне відношення неправильно класифікованих пікселів даного k -го класу до загальної кількості пікселів цього класу на еталонному зображенні (вираз (1)):

$$M_1^k = 100 \cdot \left(\sum_{i=1}^n C_{ik} - C_{kk} \right) / \sum_{i=1}^n C_{ik}, \quad (1)$$

де n - кількість класів; C_{kk} - кількість правильно класифікованих пікселів k -го класу; $\sum_{i=1}^n C_{ik}$ - кількість пікселів, що дійсно належать до k -го класу.

Другий показник – це процентне відношення пікселів, що помилково віднесені до k -го класу до загальної кількості пікселів других класів на еталонному зображенні (вираз (2)):

$$M_2^k = 100 \times \left(\left(\sum_{i=1}^n C_{ki} \right) - C_{kk} \right) / \left(\left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ik} \right) - \sum_{i=1}^n C_{ik} \right), \quad (2)$$

де кількість пікселів, що віднесені до k -го класу – це $\sum_{i=1}^n C_{ki}$; $\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ik}$ - загальна кількість пікселів на

зображенні k -го класу; C_{kk} - кількість правильно класифікованих пікселів k -го класу; $\sum_{i=1}^n C_{ik}$ - кількість пікселів, що дійсно належать до k -го класу.

Третій показник – імовірність помилки сегментування $p(erg)$. Імовірність того, що піксель вихідного зображення буде віднесений на сегментованому зображенні до об'єкту $p_s(o)$ дорівнює:

$$p_s(o) = p(o)p(o/o) + p(b)p(o/b), \quad (3)$$

де $p(o)$, $p(b)$ - імовірності того, що випадковим образом обраний піксель вихідного зображення належить об'єкту або фону, при цьому $p(o) + p(b) = 1$; $p(o/o)$ - імовірність того, що піксель, що належить об'єкту, при сегментуванні також буде віднесений до об'єкту; $p(o/b)$ - імовірність того, що піксель, що належить фону, при сегментуванні буде помилково віднесений до об'єкту.

Імовірність того, що піксель вихідного зображення буде віднесений на сегментованому зображенні до фону $p_s(b)$ може бути представлена так:

$$p_s(b) = p(b)p(b/b) + p(o)p(b/o), \quad (4)$$

де $p(b/b)$ - імовірність того, що піксель, що належить фону, при сегментуванні також буде віднесений до фону; $p(b/o)$ - імовірність того, що піксель, що належить об'єкту, при сегментуванні буде помилково віднесений до фону. Імовірність $p(erg)$ така:

$$p(erg) = p(o)p(b/o) + p(b)p(o/b). \quad (5)$$

В [6] наведено ще декілька узагальнень показника (5) на випадок довільної кількості сегментів.

1.2. Показники, що характеризують неправильне місце розташування класифікованих пікселів. Перший показник - ε :

$$\varepsilon = \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2} / A \right) \cdot 100, \quad (6)$$

де N - кількість помилково класифікованих пікселів; A - загальна кількість пікселів на зображенні; d_i - евклідова відстань між i -м помилково класифікованим пікселем, що дійсно відноситься до даного класу. Інтервал значень, що приймає ε : від 0 (при ідеальному сегментуванні) до ε_{\max} , яке залежить від розмірності зображення n , та розраховується для квадратного зображення розміром $(n \times n)$:

$$\varepsilon_{\max} = 100 \sqrt{\frac{7}{6} - \frac{3}{2n} + \frac{1}{3n^2}}, \text{ якщо } n - \text{чільне};$$

$$\varepsilon_{\max} = 100 \sqrt{\frac{7}{6} - \frac{3}{2n} - \frac{1}{6n^2} + \frac{1}{2n^2}}, \text{ інакше.} \quad (7)$$

Другий показник – FOM (figure of merit) [6] – емпірична відстань даного пікселя від його дійсного розташування. Існують дві різновиди показника FOM:

$$FOM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{1 + \gamma d_i^2}, \quad (8)$$

$$FOM_1 = \begin{cases} \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^N \frac{1}{1 + \gamma d_i^2}, & N_e > 0 \\ 1, & N_e = 0. \end{cases} \quad (9)$$

де N - кількість пікселів на зображенні; d_i - відстань i -го пікселя зображення до найближчого пікселя, що віднесений до того ж класу на еталонному зображенні; γ - масштабний множник; N_e - помилково класифіковані пікселі. Існують ще декілька емпіричних показників якості сегментування зображення, наприклад, - показник Хаусдорфа:

$$Hausdorff(I_t, I_s) = \max(h(I_t, I_s), h(I_s, I_t)), \quad (10)$$

де I_t, I_s - множини пікселів різних областей; $h(I_s, I_t)$ - відстань між відповідними областями;

$$h(I_t, I_s) = \max_{t_i \in I_t} \min_{s_i \in I_s} \|t_i - s_i\|. \quad (11)$$

Якщо $h(I_t, I_s) = d$, то це означає що всі пікселі множини I_t знаходяться не далі, ніж на відстані d від множини пікселів I_s .

Використовують також показники:

- RMS (root mean squared error) – середньоквадратична похибка (вираз (12)):

$$RMS(I_1, I_2) = \left[\frac{1}{\text{card}(X)} \sum_{x \in X} (I_1(x) - I_2(x))^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де $\text{card}(X)$ - кількість пікселів в множині X ; $I_1(x)$ - інтенсивність пікселя x в I_1 ; X - множина пікселів на сегментованому зображенні;

- показник Баддели (вираз (13)):

$$\begin{aligned} \text{Baddeley}(I_1, I_2) &= \\ &= \left[\sum_{x \in X} |d(x, I_1) - d(x, I_2)|^p / \text{card}(X) \right]^{1/p}, \quad (13) \end{aligned}$$

де $d(x, I) = \min_{y \in I} d(x, y)$; $p \geq 1$,

та інші. Показники за виразами (8)-(13) також називають супервізорними показниками оцінки якості сегментування зображення [12].

1.3. Показники, що характеризують ступінь фрагментації зображення (вираз (14)):

$$FRAG = 1 / \left(1 + |\alpha(n_R - n_1)|^\beta \right), \quad (14)$$

де n_R - кількість сегментів на сегментованому зображенні; n_1 - кількість сегментів на еталонному зображенні; α, β - масштабні коефіцієнти.

1.4. Показники, що характеризують значення характеристик вихідного зображення, що використовуються для сегментування (вираз (15)):

$$FOC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1 / \left(1 + |\psi(f_i - \mu_j)|^\delta \right), \quad (15)$$

де N - кількість пікселів на зображенні; f_i - значення інтенсивності пікселя i вихідного зображення; μ_j - репрезентативне значення інтенсивності j -го сегменту, до i -й піксель був віднесений при сегментуванні; ψ, δ - масштабні параметри.

2. Друга група – показники, які не потребують наявності еталонного сегментування.

2.1. Показник, що враховує однорідність сегментів, який заснований на обчисленні дисперсії величини відповідної ознаки зображення, що використовується для сегментування. Нехай f_i - значення ознаки F в пікселі i . Тоді дисперсія ознаки F для сегменту зображення R_j дорівнює

$$\sigma_j^2 = \sum_{i \in R_j} (f_i - \bar{f}_j)^2 / A_j, \quad (16)$$

де $\bar{f}_j = \sum_{i \in R_j} f_i / A_j$; A_j - площа сегменту R_j .

Міра однорідності області Ω , яка складається з сегментів R_j , визначається виразом (17):

$$U_\Omega = 1 - \sum_{R_j \in \Omega} \frac{w_j \sigma_j^2}{N}, \quad (17)$$

де w_j - вага, що визначає вклад сегменту R_j в U_Ω ;

$N = \sigma_{\max}^2 \sum_{R_j \in \Omega} w_j$ - нормуючий коефіцієнт;

f_{\max}, f_{\min} - максимальне та мінімальне значення ознаки F в області Ω ; $\sigma_{\max}^2 = \frac{1}{2} (f_{\max} - f_{\min})^2$.

2.2. Показник, що враховує контраст між сегментами:

$$c_{ij} = \left| \bar{f}_i - \bar{f}_j \right| / \left(\bar{f}_i + \bar{f}_j \right), \quad (18)$$

де \bar{f}_i, \bar{f}_j - середні значення ознаки F в сегментах R_i та R_j відповідно.

2.3. Комплексний показник, який, наприклад, враховує як однорідність сегментів, так і їх кількість (вираз (19)):

$$F = \frac{1}{1000N} \sqrt{R} \sum_{i=1}^R \frac{e_i^2}{\sqrt{A_i}}, \quad (19)$$

де N - кількість пікселів на зображенні; R - кількість сегментів; A_i - площа i -го сегмента; e_i - величина, що характеризує ступінь однорідності i -го сегмента.

Однак, наведені вище показники оцінки якості сегментування зображення мають такі недоліки:

- іноді результати сегментування, які є найкращими з точки зору експертів, мають більш високий відсоток помилково класифікованих пікселів;

- не враховується розташування помилкових пікселів відносно відповідного сегменту – тому по-

милка на границі та помилка в центрі сегменту повинні штрафуватися по різному;

- не враховується різниця у важності окремих ділянок зображення для сегментування – помилки для різних сегментів зображення повинні мати різну вагу;

- відсутня інформація по клас пікселів, що вносить найбільшу помилку.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Таким чином, встановлено, що якість методів сегментування впливає велика кількість факторів, тому важко визначити один універсальний показник якості сегментування зображення, який однаково враховує результати всіх методів сегментування. Найбільш перспективним є підхід, який передбачає використання декількох показників для оцінки якості сегментування. При цьому ці показники повинні доповнювати один одного.

Отже, напрямком подальших досліджень є розробка методики формування оптимального набору показників оцінки якості сегментування зображення, а також способу обчислення узагальненого показника якості на основі отриманого вектору значень показників якості сегментування зображення.

Список літератури

1. Малогабаритные беспилотные авиационные комплексы (Mini UAVS) / Башинский В.Г., Бзот В.Б. и др. / Монография. – Запорожье: Мотор-Сич, 2014. – 261 с.
2. Застосування БпЛА в конфліктах сучасності / Під ред. С.П. Мосова. – К.: 2013. – 248 с.
3. Барталев С.А. Анализ возможностей применения методов сегментации спутниковых изображений для выявления изменений в лесах / С.А. Барталев, Т.С. Ховра-

тович // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011. – Т. 8, № 1. – С. 44-62.

4. Смеляков К.С. Модели и методы сегментации границ изображений нерегулярного вида на основе адаптивных масок: дис. ... канд. техн. наук: 09.03.05 / Смеляков Кирилл Сергеевич – Харьков, 2005. – 162 с.

5. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений / Н.Н.Красильников. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.

6. Критерии оценки качества сегментации изображений / А.В. Захаров, П.П. Кольцов, Н.В. Котович и др. // *Труды НИИСИ РАН*, 2012. – Том 2, № 2. – С. 87-99.

7. Методы сегментации изображений объектов нерегулярного вида, особенности их применения и перспективы развития / К.С. Смеляков, И.А. Романенко, И.В. Рубан, Н.И. Кириллова, О.В. Шитова // *Збірник наукових праць ХУПС*, 2010. – Вип. 2 (24). – С. 92-97.

8. <http://ieeexplore.ieee.org>.

9. Zhang H. Image segmentation evaluation: A survey of unsupervised methods / H. Zhang, J.E. Fritts, S.A. Goldman // *Computer Vision and Image Understanding*, 2008. – Vol. 110, issue 2. – P. 260-280.

10. Некоторые методы сравнительного исследования детекторов границ / А.В. Захаров и др. // *Труды НИИСИ РАН*, 2012. – Том 2. - № 1. – С. 4-13.

11. Анализ відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // *Системи обробки інформації*, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.

12. Левашкина А.О. Исследование супервизорных критериев оценки качества сегментации изображений / А.О.Левашкина, С.В.Поршнев // *Известия ТПУ*, 2008. – Т. 313, № 5. – С. 28-33.

Надійшла до редколегії 9.02.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С.Васюта, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СЕГМЕНТАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

I.V. Ruban, V.G. Khudov, R.G. Khudov

Качество сегментации оптико-электронных изображений существенно влияет на конечный результат распознавания изображения, что предусматривает важность выбора метода сегментации. В настоящее время предложено большое количество критериев и показателей оценки качества сегментации (аналитических, эмпирических, количественных и качественных). В работе проведено анализ известных показателей оценки качества сегментации оптико-электронных изображений. Рассматриваются показатели, для вычисления которых необходимо сегментированное эталонное изображение, и показатели оценки качества без сравнения с эталоном. Сделан вывод о необходимости разработки методики формирования оптимального набора показателей оценки качества сегментации изображения, а также способа вычисления обобщенного показателя качества на основе полученного вектора значений показателей качества сегментации изображения.

Ключевые слова: оптико-электронное изображение, показатель качества, сегментация, эталонное изображение, пиксель, признак, класс, ошибка, эмпирическое расстояние.

INDICATORS OF THE QUALITY OF SEGMENTATION OF OPTICAL-ELECTRONIC IMAGES

I.V. Ruban, V.G. Khudov, R.G. Khudov

The quality of the segmentation of optic-electronic images significantly influences the final result of image recognition, which implies the importance of choosing the segmentation method. Currently, a large number of criteria and indicators for assessing the quality of segmentation (analytical, empirical, quantitative and qualitative) have been proposed. In the work, an analysis is made of known indexes for assessing the quality of segmentation of optic-electronic images. We consider indicators for the calculation of which a segmented reference image is necessary, and quality indicators without comparison with the standard. It was concluded that it is necessary to develop a methodology for the formation of an optimal set of indicators for assessing the quality of image segmentation, as well as a method for calculating the generalized quality index based on the obtained vector of the quality values of image segmentation.

Keywords: optic-electronic image, quality index, segmentation, reference image, pixel, feature, class, error, empirical distance.