

А. А. Коваленко, В. О. Чхеїдзе, О. М. Севостьянова, О. О. Фомічов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ АНАЛІЗУ ТА ОБРОБКИ СКЛАДНОСТРУКТУРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. **Актуальність.** Складноструктурні зображення (ССЗ) тяжіють до консолідації графіків різного типу та гетерархічності семантичних планів, що призводить до того, що необхідно використовувати гібридні та ітеративні алгоритми, специфічні для такого типу зображень. **Об'єктом** дослідження є процес аналізу та обробки растрових ССЗ. **Предметом** дослідження є моделі та підвищення точності та продуктивності алгоритмів аналізу та обробки ССЗ. **Мета** дослідження полягає у підвищенні точності та продуктивності алгоритмів аналізу та обробки ССЗ. **Результати дослідження.** У ході роботи було проведено аналіз сучасного стану аналізу та обробки растрових складноструктурних зображень. Проведені дослідження підходів до локалізації та визначення типів сегментованих об'єктів. Проведені дослідження підходів до розпізнавання образів та їх угруповання. Удосконалений та досліджений метод підвищення точності аналізу та обробки ССЗ. **Висновок.** Запропонований підхід дозволив підвищити точність аналізу та обробки складноструктурних зображень за рахунок сегментації, локалізації, розпізнавання та групування точкових, лінійних і площинних об'єктів, що засновані на комплексному використанні відомих методів.

Ключові слова: складноструктурне зображення, точковий об'єкт, площинний об'єкт, сегментація.

Вступ

В даний час відбувається прискорений розвиток засобів обробки та аналізу інформації внаслідок накопичення великої кількості даних про різні об'єкти і процеси. Одними з важливих складових таких засобів є програмні комплекси аналізу та обробки растрових складноструктурних зображень, що поєднують у собі числові та графічні дані. Метою таких програмних комплексів є отримання інформації про просторово-розподілені об'єкти для подальшої обробки. Основними підходами є векторизація та розуміння семантичних зв'язків між об'єктами.

Прикладами (ССЗ) є діаграми, номограми, креслення, схеми, архітектурні проекти, карти місцевостей. У цілому нині дані зображення можна охарактеризувати наявністю багатьох семантичних верств, накладених друг на друга у візуальному плані. Наприклад, топографічні карти, які можна назвати типовим представником ССЗ, містять найбільш повну інформацію про місцевість, тому з них можна отримати інформацію для геоінформаційної системи (ГІС), які можна використовувати як підтримку прийняття рішення на етапі проектування для вирішення різних завдань, наприклад, оптимального розміщення станцій мобільного зв'язку, логістичних центрів, транспортних розв'язок і транспортних розв'язок. Також ГІС є корисним інструментом аналізу для здійснення, наприклад, кадастрових робіт, передбачення потенційних зон пожеж та затоплень. Згідно зі звітом «Geographic Information System (GIS) Market», опублікованому Allied Market Research, загальносвітовий ринок ГІС зростає до 25,5 млрд. дол.

При цьому ручна обробка великої кількості ССЗ стає економічно неефективною. Проблема розпізнавання та аналізу образів набула визначного значення в умовах інформаційних переваг, коли людина не справляється з розумінням вступників до нього все зростаючих обсягів даних. В результаті його мозок переключається на режим одночасного сприйняття і мислення, якому таке розпізнавання

властиво, але негативно впливає на якість роботи в умовах небажаності помилок. Тому сучасний період розвитку інформаційних технологій характеризується широким впровадженням інтелектуальних методів у процес обробки графічної інформації, а автоматична обробка та аналіз зображень, що володіють складною структурою, є одним з найбільш перспективних напрямів розвитку.

Метою дослідження є розробка підходів до підвищення точності та продуктивності алгоритмів аналізу та обробки складноструктурних зображень..

1. Аналіз та обробка складноструктурних зображень

Інформацію у вигляді цифрового зображення можна подати у вигляді такого відображення

$$f: E \rightarrow P, \quad (1)$$

де E – деякий опис зовнішнього світу; P – цифрове зображення, задане у вигляді матриці.

Таким чином, основною метою аналізу та обробки ССЗ є розробка зворотного відображення

$$f^{-1}: P \rightarrow E_1, \quad E_1 \subseteq E, \quad (2)$$

де E_1 – необхідна частина опису зовнішнього світу, наприклад, властивості та розташування певних об'єктів на зображенні.

Вхідне відображення f не є оборотним у загальному випадку, оскільки, по-перше, є функцією згортки, що перетворює вхідні дані довільного розміру на матрицю встановленого. Тим не менш, для подальшої роботи (наприклад, прийняття рішень) отримання повної та точної інформації про зовнішній світ часто не потрібно: достатньо знати її з певною похибкою. По-друге, правила відображення f можуть мати як явний, так і неявний характер. Під явними правилами мається на увазі однозначне відображення об'єктів зовнішнього світу та їх властивостей візуального плану, наприклад, зображення будинку на карті у вигляді умовної піктограми або спрощеного кадастрового плану. Під

неявними правилами маємо на увазі як багатозначні відносини, коли елементи зображення не мають конкретної прив'язки в просторі растру, або виражені у вигляді неявних функцій, що зв'язують частини

$$P : R(p_1, \dots, p_k) = 0, \quad (3)$$

де p_i – елемент зображення (ЕЗ), або його частини;

$$E : R(e_1, \dots, e_k) = 0, \quad (4)$$

де e_i – об'єкт або система об'єктів зовнішнього світу, або складного відношення $R(p_1, \dots, p_k, e_1, \dots, e_k) = 0$.

Чим більше відношення явних правил у відображенні f над неявними, тим простіше виконати зворотне відображення. Неявні правила можуть залежати від багатьох речей. Наприклад, ці правила можуть бути залежними від переваг оператора, що відповідає за створення зображення P або від складності зовнішнього світу, що відображається (як приклад, вирішення завдань ідентифікації по фото паспорту та ідентифікації по камерах відеоспостереження в метрополітені).

Для мінімізації неявних правил і спрощення їх вирішення необхідно нівелювати вплив ЕЗ одне на одного, що досягається зменшенням їх розмірів, які розглядаються, за допомогою декомпозиції. Для цього використовуватимемо висхідний підхід до створення загальної методики обробки ССЗ: аналіз та обробка відбуватиметься від окремих пікселів до зображення в цілому. Узагальнену методику показано нарис. 1.

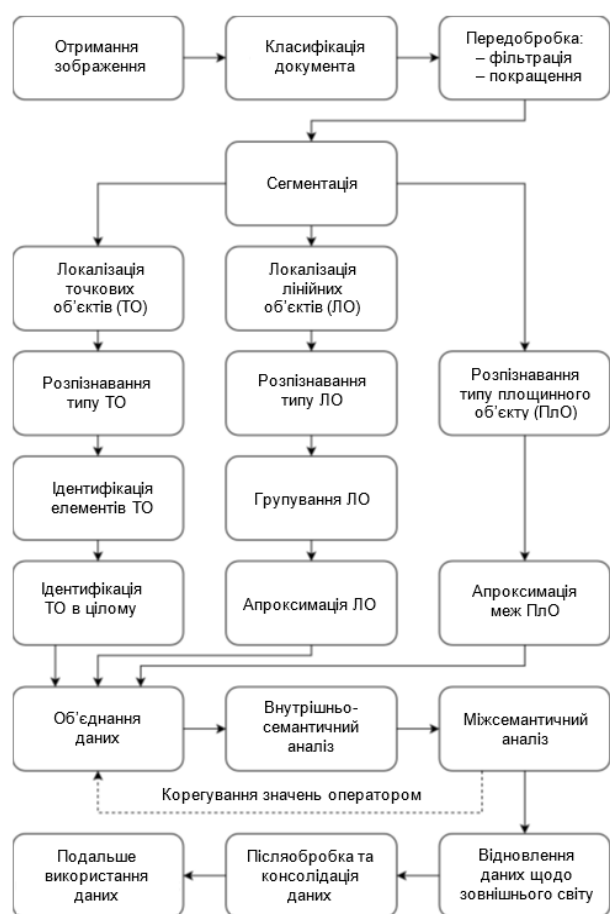


Рис. 1. Узагальнена методика програмного аналізу та обробки складноструктурних зображень

2. Метод багатометкової сегментації складноструктурних зображень

При обробці складноструктурних зображень потрібно перейти до отримання та аналізу об'єктів. Історично склалися два підходи до реалізації такої «об'єктною» сегментації:

- екземплярна, що заснована на поділі об'єктів,
- семантична, що заснована на поділі класів об'єктів.

Ні той, ні інший підхід не може надати достатньої якості при аналізі ССЗ. Перший підхід спирається на ідею обробки об'єктів - речей (things), які можуть в значному ступені накладатися друг на друга (немає строгого відокремлення). Другий підхід спирається на ідею обробки об'єктів - регіонів, які на ССЗ можуть виявлятися з великою варіативністю.

Відтепер активно формується паноптичний підхід, який не поділяє два вищезазначених поняття і тому є більш гнучким. Основна його ідея полягає в використанні найпростіших обчислювачів для формування непересічних суперпікселів. При цьому все одно вважається, що окремий піксель може належати тільки одному класу, що не відповідає властивості гетерархічності ССЗ, тому пропонується метод багатометкової сегментації, при якому піксель відповідає класам об'єктів з деякою мірою.

Для опису окремого пікселя на зображенні у випадку, коли кожен об'єкт визначається одним кольором, використовується така формула:

$$p = \sum_{i=1}^n w_i \cdot C_i + E, \quad (5)$$

де p – вектор кольору пікселя у просторі RGB, координати якого приймають дискретні значення, наприклад, $[0, 255]$; n – кількість класів об'єктів зображення; C_i – вектор кольору i -го класу об'єкта; E – вектор зашумленості (може мати від'ємні координати); w_i – вагові коефіцієнти при векторах кольорів.

Хоча даний випадок і є найпростішим, але на ССЗ з великим числом перетинів його можна використовувати в якості основи, так як навіть складні об'єкти часто представляються у вигляді набору одноколірних об'єктів. Завданням багатометкової сегментації є визначення вагових коефіцієнтів для кожного типу об'єкта. Працюючи з кольоровими зображеннями це завдання можна розв'язати загалом за допомогою формальних математичних методів не більше, ніж для трьох класів об'єктів.

Якщо об'єкт не можна представити у вигляді сукупності об'єктів одного кольору, то можна висунути більш загальну формулу, в якій враховується різниця координат між пікселем, що розглядається, і центром об'єкта та інші властивості об'єкта, наприклад, кут нахилу і масштаб:

$$p = g \left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot C_i (\Delta x_i, \Delta y_i, a_i, s_i) + E \right), \quad (6)$$

де g – загальна функція.

З аналізу формули (6) можна зробити висновок щодо неможливості проведення сегментації без

знання інформації про розташування об'єктів. Хоча ця інформація згідно розробленої методики (рис. 1) виходить при наступних етапах обробки, але вона може бути отримана і без проведення етапу сегментації. Це підтверджується використанням алгоритмів R-CNN і YOLO при обробці фото- і відеоматеріалів. Проблема даних алгоритмів полягає в їх локальності: вони можуть бути застосовані тільки для знаходження ТО, але не для ЛО або ПЛО.

Враховуючи попередні зауваження щодо якості ССЗ, наявності на них об'єктів певних типів та дослідження методів сегментації, було зроблено висновок про необхідність використання інтелектуальних методів для сегментації, що є класифікацією окремих пікселів. Так як для визначення, чи є даний піксель частиною деякого об'єкта, необхідно знати оточення даного пікселя, то для аналізу можна використовувати метод ковзного вікна. Вікно розміром $a \times a$ ($a \in \mathbb{N}$, $a > 1$) пікселів призведе до створення $3a^2$ значень вхідних даних, які необхідно проаналізувати з урахуванням різних напрямків. Квадратне вікно вибрано, виходячи з можливості зображення об'єктів під будь-яким кутом.

Оскільки необхідно визначити, чи належить цей піксель деякому i -му типу об'єктів, то вихідний шар моделі має бути функцією активації *softmax*:

$$\sigma_i = e^{z_i} / \sum_{k=1}^K e^{z_k}, \quad (7)$$

де K – кількість класів, z – дектор розмірності K .

Значення цієї функції (що може лежати в інтервалі $[0, 1]$) для кожного i визначає міру того, що піксель належатиме класу об'єктів i . Сума всіх значень σ дорівнює одиниці. Таким чином, зображення після проведення даної багатометкової сегментації перетворюється на напівтонових зображень, що пред'являє підвищені вимоги до пам'яті системи за наявності великої кількості класів. Зберігання даних растрів можна скоротити, якщо використовувати розряджені матриці, до яких можна перейти, якщо переніціалізувати низькі значення нуля.

На рис. 2 приклад роботи алгоритму проведення багатометкової сегментації, який використовує раніше навчену модель.

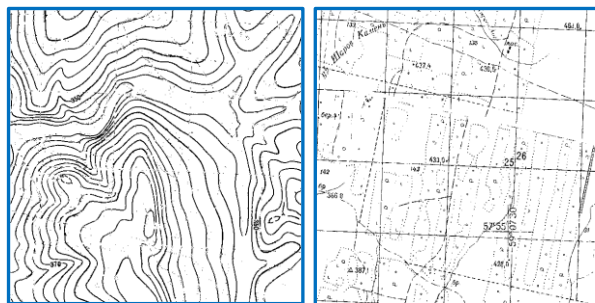


Рис. 2. Приклад багатометкової сегментації різних типів об'єктів під час обробки топографічних карт

3 Алгоритм для класифікації площинних об'єктів

Однією із ознак ССЗ є нерегулярність, тому розпізнавання великих площинних об'єктів (ПЛО) стає

проблемою, так як вони можуть бути представлені великою різноманітністю форм та текстур.

Існує підхід до розпізнавання площинних об'єктів як точкових при достатньо великих по розміром навчальних зображення, використовуючи згорткові нейронні мережі (CNN)

Головним недоліком використання CNN є необхідність тривалого навчання і швидкість роботи вже навченої моделі. Видно, що результати розпізнавання ПЛО далекі від аналогічних результатів при розпізнавання ТО. Одним з підходів є використання гістограм: при ньому по ковзаючому вікну обчислюється гістограма (наприклад, яскравості для напівтонового зображення) і далі робляться висновки щодо знаходження об'єкту. Недоліком даного підходу є те, що такі гістограми по суті є інтегральними характеристиками, і в них можуть проявитися власні особливості, якщо об'єкти розташовані під різними кутами.

Хоча при відображенні ПЛО на ССЗ можуть з'явитися значущі шуми, але в цілому слід відзначити статистичну сталість в варіативності відхилення кольору і її частоті навіть в невеликих областях, що дозволяє значно обмежити розмір ковзаючих вікон на відмінність від, наприклад, CNN, для яких розмір вікон для точкової класифікації часто перевищує сотні пікселів. Для вирішення задачі визначення ПЛО на ССЗ потрібно очистити її від об'єктів, знайдених на етапі обробки ТО і ЛО, які зображуються поверх ПЛО, що є для них тілом. Для таких пікселів неможливо в принципі визначити, що знаходилося під образами переднього візуального плану, але можна припустити деяку континуальність і протяжність об'єктів заднього фону. Дана властивість можна назвати принципом локальності, який можна виразити в існуванні такої функції, що визначає клас пікселя за класами пікселів його сусідів і задовольняє наступній умові для майже кожного пікселя (під майже кожним пікселем тут розуміється, що ця умова може виконуватися для $O(1)$ пікселів кожного площинного об'єкта):

$$class(p) = f_{local}(\{class(p') | d(p,p') \leq dmax\}), \quad (8)$$

де $class(p)$ – клас фонового зображення поточного пікселя p , що визначається через свої координати растру, p' – пікселі, для яких виконується умова сусідства, d – метрика, за якою розраховується відстань між двома пікселями, $dmax$ – максимальне значення даної метрики. Приклад реалізації розробленого алгоритму класифікації площинних об'єктів представлений на рис. 3.

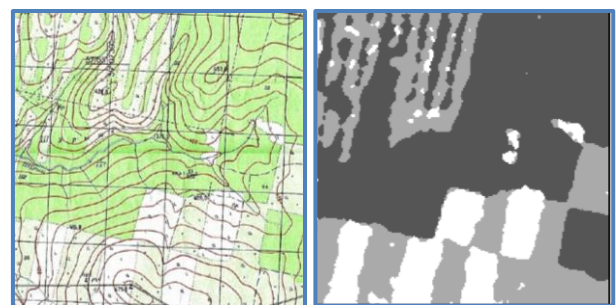


Рис. 3. Приклад класифікації площинних об'єктів

Висновки

У ході роботи було проведено аналіз сучасного стану аналізу та обробки растрових ССЗ. Проведені дослідження підходів до локалізації та визначення типів сегментованих об'єктів. Проведені дослідження підходів до розпізнавання образів та їх угруповання.

Удосконалений та досліджений метод підвищення точності аналізу та обробки ССЗ. Запропонований підхід дозволив підвищити точність аналізу та обробки складноструктурних зображень за рахунок сегментації, локалізації, розпізнавання та групування точкових, лінійних і площинних об'єктів, що засновані на комплексному використанні відомих методів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang, Zh. MKANet: An Efficient Network with Sobel Boundary Loss for Land-Cover Classification of Satellite Remote Sensing Imagery. *Remote Sens.* 2022. No. 18:4514. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14184514>
2. Li, H. Intelligent Map Reader: A Framework for Topographic Map Understanding With Deep Learning and Gazetteer. *IEEE Access.* 2018. V. 6. P. 25363-25376. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2823501>
3. Petrovska, I., Kuchuk, H. (2023). Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment. *Advanced Information Systems*, 7(3), 67–73. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
4. Zakharchenko, A., Stepanets, O. (2023). Digital twin value in intelligent building development. *Advanced Information Systems*, 7(2), 75–86. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.11>
5. Li, G., Liu, Y., Wu, J., Lin, D., Zhao, Sh. (2019). Methods of Resource Scheduling Based on Optimized Fuzzy Clustering in Fog Computing. *Sensors*, MDPI, 19(9). doi: <https://doi.org/10.3390/s19092122>
6. Кучук Н. Г., Мерлак В. Ю., Скороделов В. В. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 1. С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
7. Zuev, A., Karaman, D., Olshevskiy, A. (2023). Wireless sensor synchronization method for monitoring short-term events. *Advanced Information Systems*, 7(4), 33–40. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.04>
8. Moreno-Garcia C. F., Elyan E., Jayne C. New trends on digitisation of complex engineering drawings. *Neural Computing and Applications*. 2019. V. 31(6). P. 1695-1712. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3583-1>

Received (Надійшла) 27.02.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Коваленко Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Andriy Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: andriy.kovalenko@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9036>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56423229200>.

Чхеїдзе Важа Олександрович – магістрант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Vazha Chkheidze – master's student of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of radio electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Vazha.Chkheidze@khp.edu.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0004-3424-481X>.

Севостьянова Олена Миколаївна – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Olena Sevostianova – Senior lecturer of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: olena.sevostianova@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0008-2595-5133>.

Фомічов Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна;

Oleksandr Fomichov – Candidate of Technical Sciences, lead lecturer of the Department of electronic computers, Kharkiv National University of radio electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksandr.fomichov@nure.ua; ORCID author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9273-9862>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219773778>.

Improving the accuracy of analysis and processing of complex structured images

Andriy Kovalenko, Vazha Chkheidze, Olena Sevostianova, Oleksandr Fomichov

Abstract. Topicality. Complex-structured images (CSI) tend to consolidate graphs of various types and hetero-hierarchy of semantic plans, which leads to the need to use hybrid and iterative algorithms specific to this type of images. **The object** of the study is the process of analyzing and processing raster CSI. **The subject** of the study is models and increasing the accuracy and productivity of CSI analysis and processing algorithms. **The purpose of the study** is to increase the accuracy and productivity of CSI analysis and processing algorithms. **Research results.** In the course of the work, an analysis of the current state of analysis and processing of raster complex-structured images was conducted. Research was conducted on approaches to localization and determination of types of segmented objects. Research was conducted on approaches to pattern recognition and their grouping. An improved and researched method for increasing the accuracy of analysis and processing of CSI. **Conclusion.** The proposed approach allowed to increase the accuracy of analysis and processing of complex structural images due to segmentation, localization, recognition and grouping of point, linear and planar objects, which are based on the integrated use of known methods.

Keywords: complex structural image, point object, planar object, segmentation.