

Метод визначення елементів об'єктів міської інфраструктури за результатами повітряного моніторингу

І. В. Рубан, Г. В. Худов, О. М. Маковейчук, І. А. Хижняк,
Н. В. Лукова-Чуйко, Г. В. Пєвцов, Ю. І. Шевяков, І. Ю. Юзова, Є. М. Дроб,
О. Б. Титаренко

Запропоновано двоетапний метод визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу. На першому етапі методу запропоновано на зображеннях визначати контури об'єктів. У якості методу визначення контурів обрано удосконалений метод Канні. Розглянуті основні етапи удосконаленого методу Канні щодо визначення контурів об'єктів на зображеннях з систем повітряного моніторингу. На другому етапі запропоновано використання перетворення Хафа.

Визначені особливості методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу. На відміну від відомих, у методі враховані особливості формування зображення з систем повітряного моніторингу, виділяються кольорові канали, у кожному кольоровому каналі виділяються контури та геометричні примітиви, проводиться зворотне об'єднання кольорових каналів та визначаються елементи об'єктів міської інфраструктури у просторі вихідного зображення.

Наведені результати застосування методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на типовому кольоровому зображенні з системи повітряного моніторингу. На результуючому зображенні для прикладу визначені елементи об'єктів міської інфраструктури: дороги, будинки, вулиці, елементи забудови тощо.

Проведена візуальна оцінка якості обробки типового кольорового зображення з системи повітряного моніторингу. Розраховані помилки першого та другого роду. Встановлено, що застосування двоетапного методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображенні з системи повітряного моніторингу дозволить підвищити якість обробки оптико-електронних зображень. При цьому помилки визначення елементів об'єктів міської інфраструктури першого та другого роду знижені в середньому на величину 13 %

Ключові слова: бортова система спостереження, елементи об'єктів міської інфраструктури, метод Канні, перетворення Хафа

1. Вступ

Відомо, що моніторинг об'єктів міської інфраструктури найбільш ефективно проводиться з використанням засобів повітряного базування – космічних систем, літаків, безпілотних літальних апаратів тощо [1–2]. Інформація з систем повітряного моніторингу використовується у різних областях [3–7]:

- землекористування (створення земельних кадастрів, інвентаризація земельних ділянок, межування ділянок);
- архітектура (проектування генеральних планів, ландшафтне проектування);
- картографія (створення карти міста);
- містобудування (планування розвитку міста, планування розвитку міської інфраструктури);
- проектування і будівництво (проектування автомобільних і залізних доріг, генеральних планів, електричних і трубопровідних мереж);
- військова справа (планування бойових дій у місті, ведення розвідки);
- демографія і статистика (демографічний і статистичний аналіз) тощо.

Об'єктами міської інфраструктури є вулиці, будівлі, забудови, мости, шосе, автомобільні дороги, транспортні розв'язки, залізничні шляхи, нафто та газопроводи, лінії електричних мереж тощо [6–8]. Інформація щодо об'єктів міської інфраструктури з систем повітряного моніторингу дозволяє оперативно оцінювати зміни, що відбуваються у місті та постійно проводити оновлення інформації для геоінформаційних систем [5]. Визначення елементів об'єктів міської інфраструктури важливо для картографування та державного кадастрового обліку об'єктів нерухомості, державного обліку зданій, споруд, приміщень, об'єктів незавершеного будівництва, муніципальних геоінформаційних систем тощо [3, 6–7]. Інформація засобів повітряного моніторингу широко використовується для управління залізничною інфраструктурою. При цьому актуальним є розробка методів моніторингу, оцінки та контролю стану наземних об'єктів, в тому числі і елементів об'єктів міської інфраструктури [5, 9]. Визначення елементів об'єктів міської інфраструктури актуально також при переводі паперових архівів топографічних планів територій у цифровий вигляд. Основні затрати часу приходяться на етап векторизації вибраних елементів об'єктів міської інфраструктури, географічної прив'язки їх до цифрової карти місцевості [7]. Векторизація зображень, що базується на визначенні елементів об'єктів міської інфраструктури, актуальна також при створенні мобільних роботизованих комплексів. Така задача виникає, коли необхідно передавати інформацію для її подальшого аналізу [1, 2, 10]. Векторизація контурів на зображеннях дозволяє передавати тільки характерну інформацію в компактному вигляді, а не все зображення. Це дозволяє суттєво підвищити швидкість передачі даних [1, 2, 10].

Отже, актуальним є розробка методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу з урахуванням контрастності та форми елементів. 1-51

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проведемо стислий аналіз відомих методів визначення контурів та границь об'єктів інтересу на різномірних зображеннях, в тому числі і на зображеннях з систем повітряного моніторингу.

В [7] запропоновані методи зв'язування (зшивки) контурів, порівняння з використанням шаблону. Недоліками методів є складність практичної реалізації, великий обчислювальні витрати, необхідність використанням апріорної інформації про вихідне зображення.

В [9] запропоновано методи цифрової обробки зображень, що засновані на використанні двовимірного диференціального скалярного оператора Лапласа. Основні недоліки – неможливість визначення напрямку границі, не виділення, а лише підкреслення перепаду яскравості.

В [10] для визначення границь запропоновані градієнтні методи, в яких обчислюється повний вектор градієнту зображення. Основні недоліки – складність вирішення байєсової задачі, необхідність апріорного знання умовних ймовірностей значень градієнту.

В [10] для визначення границь на зображенні використовуються різні методи просторового диференціювання (методи Собеля, Превіта, Робертса, Уолліса, послідовного маскування тощо). Основними недоліками методів є наявність розривів, точок та штрихів, які утворюють завадовий фон, необхідність знання початкового наближення до шуканої границі і значні обчислювальні витрати. Недоліком методів послідовного маскування є зниження контрастності зображення, розмитість зображення.

Недоліком методу лапласіана-гаусіана (LoG) [10] є ненаправленість операторів Лапласа та Гауса. Завдяки цьому метод чуттєво реагує на зміни яскравості у паралельному напрямку, що зменшує відношення сигнал-шум.

В [11] запропоновано використання методу активних контурів. Недоліками методу є: висока точність початкових наближень, значні обчислювальні витрати.

В [12] для визначення дорожніх мереж на зображеннях з систем повітряного моніторингу використовується багатозадачна згорткова нейронна мережа RoadNet (університет Уханя (Wuhan University), Китай). Однак застосування мережі RoadNet дозволяє визначати лише дорожні мережі. Виникають певні труднощі при визначенні інших елементів міської інфраструктури: мережа потребує навчання, точних початкових значень тощо.

В [13] запропоновано використання нейронних мереж для картографування та земельного кадастру з використанням зображень з системи World View-2 (компанія DigitalGlobe, Сполучені Штати Америки). Запропоновані в [13] методи вирішують завдання в умовах сільської місцевості. Застосування методів [13] до визначення елементів міської інфраструктури ускладнено.

В [14] запропоновано для визначення контурів на зображенні застосовувати мурашиний метод тематичного сегментування. Основним недоліком методу є пересегментування – наявність на результуючому зображенні великої кількості контурів об'єктів малого розміру ("сміттєвих" об'єктів).

В [15] запропоновано застосування багатомасштабної обробки зображень з систем повітряного моніторингу на основі мурашиного алгоритму. Основним недоліком методу є виділення не контурів, а областей, на яких можуть бути об'єкти інтересу.

В [16] запропоновано для тематичного сегментування оптико-електронних зображень метод штучної бджолиної колонії. Викладена сутність методу. Недоліком методу є значний обчислювальний ресурс.

В [17] розвинуті результати [16]. Сформульовано оптимізаційна задача сегментування зображень з бортових систем повітряного моніторингу методом

штучної бджолоїної колонії. Недоліком методу є визначення не контурів об'єктів інтересу, а областей, що є потенційними об'єктами інтересу.

Отже, розрізнявальна здатність сучасних систем повітряного моніторингу дозволяє визначати об'єкти міської інфраструктури відомими методами [9–17]. Більшість відомих методів [9–17] направлена на визначення контурів та границь об'єктів на різномірних зображеннях, в тому числі і на зображеннях з систем повітряного моніторингу. Робота методів заснована на визначенні контурів та границь за рахунок перепадів яскравості. Методи є ефективними при обробці тонових зображень, в умовах чітких нерозмитих границь. У випадку обробки кольорового зображення, наприклад у кольоровому просторі Red-Green-Blue (RGB), кольорове зображення перетворюється у тонове без урахування інформації в кожному кольоровому каналі. Після цього проводиться визначення контурів та границь. Інформація по кожному каналу кольорового простору може бути втрачена. До того ж відомі методи можуть не визначати напрямок границі, лише підкреслювати перепад яскравості, потребують апріорні знання значень градієнту, мають розриви під впливом завадового фону та розмитих границь, знижують контрастність зображення тощо.

Інша група відомих методів [18–21] базується на тому, що об'єкти міської інфраструктури складаються з геометричних примітивів (прямі лінії, окружності тощо). Робота таких методів заснована на інтегральному векторному перетворенні Радона [18] та перетворенні Хафа [19–21]. Указані методи забезпечують якісне визначення геометричних примітивів на зображеннях з безпілотних літальних апаратів, наприклад, при виявленні лінії електропередачі в умовах лісної місцевості [19].

В [18] для визначення геометричних примітивів на зображеннях запропоновано використання інтегрального векторного перетворення Радона. Недоліком перетворення Радона стосовно визначення елементів об'єктів міської інфраструктури є його обчислювальна складність. Кількість математичних операцій для геометричних примітивів та геометричних об'єктів складної форми не відрізняється.

В [19] для визначення геометричних примітивів на зображеннях з безпілотних літальних апаратів при виявленні лінії електропередачі в умовах лісної місцевості використовується частковий випадок перетворення Радона – перетворення Хафа [21]. Використання перетворення Хафа є доцільним у випадку визначення геометричних примітивів на простих, з точки зору розташування об'єктів, зображеннях. Це можуть бути зображення лісних масивів, сільськогосподарських полів, річок, морів та океанів тощо. В умовах складноструктурованих зображень міста перетворення Хафа визначає велику кількість "сміттєвих" об'єктів. Це суттєво впливає на якість подальшого дешифрування зображень міської інфраструктури.

В [20] запропоновано для визначення контурів на зображенні застосовувати метод виділення границь Канні. Метод Канні є найбільш ефективним методом визначення границь. Метод Канні забезпечує високу імовірність детектування, високу точність локалізації. Недоліком методу Канні є руйнування границь в точках з'єднань.

В технології комп'ютерного дешифрування даних дистанційного зондування Землі використовуються спеціалізовані програмні засоби [17]. Найбільш розповсюдженими 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. У деяких програмних засобах завдання виявлення елементів міської інфраструктури взагалі не вирішуються, в інших використовуються відомі методи визначення границь та контурів.

Проведений аналіз показав, що існуючі методи виділення границь та контурів об'єктів не можуть бути напряму застосовані до визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу. Не враховуються особливості формування зображень з систем повітряного моніторингу та їх складноструктурованість.

В [22] при обробці тонових медичних зображень при визначенні геометричних примітивів послідовно використовують методи визначення контурів, границь та перетворення Радона та Хафа. Результати [22] дозволяють якісно визначати геометричні примітиви на медичних зображеннях. Однак медичні зображення [22] є тільки тоновими та за своєю структурою суттєво відрізняються від зображень з систем повітряного моніторингу.

Зображення з систем повітряного моніторингу є складноструктурованими [17], містять велику кількість різномірних об'єктів. Отже, при застосуванні відомих методів визначення границь, контурів, перетворення Радона та Хафа для визначення елементів об'єктів міської інфраструктури необхідно враховувати особливості складноструктурованих зображень з систем повітряного моніторингу. Під визначенням елементів об'єктів міської інфраструктури розуміється визначення геометричних примітивів цих об'єктів. При цьому будемо враховувати той факт, що елементи об'єктів міської інфраструктури є контрастними та складаються з простих геометричних примітивів. Цей факт є суттєвою дешифрувальною ознакою елементів об'єктів міської інфраструктури. Для проведення подальшого дослідження поставимо задачу розробки методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на тонових та кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу з послідовним використанням методів визначення контурів, границь та перетворення Хафа.

3. Ціль та задачі дослідження

Ціллю дослідження є розробка методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на тонових та кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні задачі:

– викласти основні принципи та етапи методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на тонових зображеннях з систем повітряного моніторингу;

– визначити особливості методу, що розробляється, до визначення елементів об’єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу;

– провести обробку типового кольорового зображення з системи повітряного моніторингу для визначення елементів об’єктів міської інфраструктури;

– провести оцінку помилок першого та другого роду при визначенні елементів об’єктів міської інфраструктури на типовому кольоровому зображенні з системи повітряного моніторингу.

4. Матеріали дослідження визначення елементів об’єктів міської інфраструктури за результатами повітряного моніторингу

4.1. Основні принципи та етапи методу визначення елементів об’єктів міської інфраструктури на тонових зображеннях з систем повітряного моніторингу

Визначення елементів об’єктів міської інфраструктури на зображенні (1):

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{Col}), \quad (1)$$

де $\mathbf{X}=(x, y)$ – вектор координат пікселів зображення; \mathbf{Col} – кольоровий простір представлення зображення передбачає визначення контурів $\mathbf{Q}(\mathbf{X}, \mathbf{P})$ з вектором параметрів $\mathbf{P}(p_1, p_2, \dots, p_N)$.

З позначення контуру $\mathbf{Q}(\mathbf{X}, \mathbf{P})$ видно, що функція, що описує контур, залежить від двох параметрів – координат пікселів \mathbf{X} , які характеризуються яскравістю, та геометричних параметрів контуру \mathbf{P} . Як зазначалося вище, елементи об’єктів міської інфраструктури є контрастними та складаються з простих геометричних примітивів. Тому, метод визначення елементів об’єктів міської інфраструктури будемо розглядати як двохетапний метод. На першому етапі аналізується дешифрувальна ознака – яскравість. На другому етапі аналізується дешифрувальна ознака – геометрична форма та параметри \mathbf{P} елемента об’єкта міської інфраструктури.

Узагальнена схема методу визначення елементів об’єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу наведена на рис. 1. Схема представляє послідовність дій запропонованого методу.

На першому етапі аналізу яскравості та визначення контурів на тоновому зображенні функція $f(\mathbf{X}, \mathbf{Col})$ перетворюється в функцію $f(\mathbf{X})$, де $f(\mathbf{X})$ – яскравість тонового зображення, що змінюється в інтервалі $[0..255]$. В точці \mathbf{X} є точка контуру, коли абсолютне значення дискретного градієнту перевищує деякий пороговий рівень $m>0$ (вираз (2)):

$$|\Delta f(\mathbf{X})|=|f(\mathbf{X}+\mathbf{I})-f(\mathbf{X})|\geq m \Leftrightarrow \{\mathbf{X} \in \mathbf{Q}(\mathbf{X}, \mathbf{P})\}, \quad (2)$$

де \mathbf{I} – одинична матриця.

Для першого етапі будемо використовувати удосконалений метод Канні [17]. Перший етап методу визначення елементів об’єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу включає наступні блоки (рис. 1).

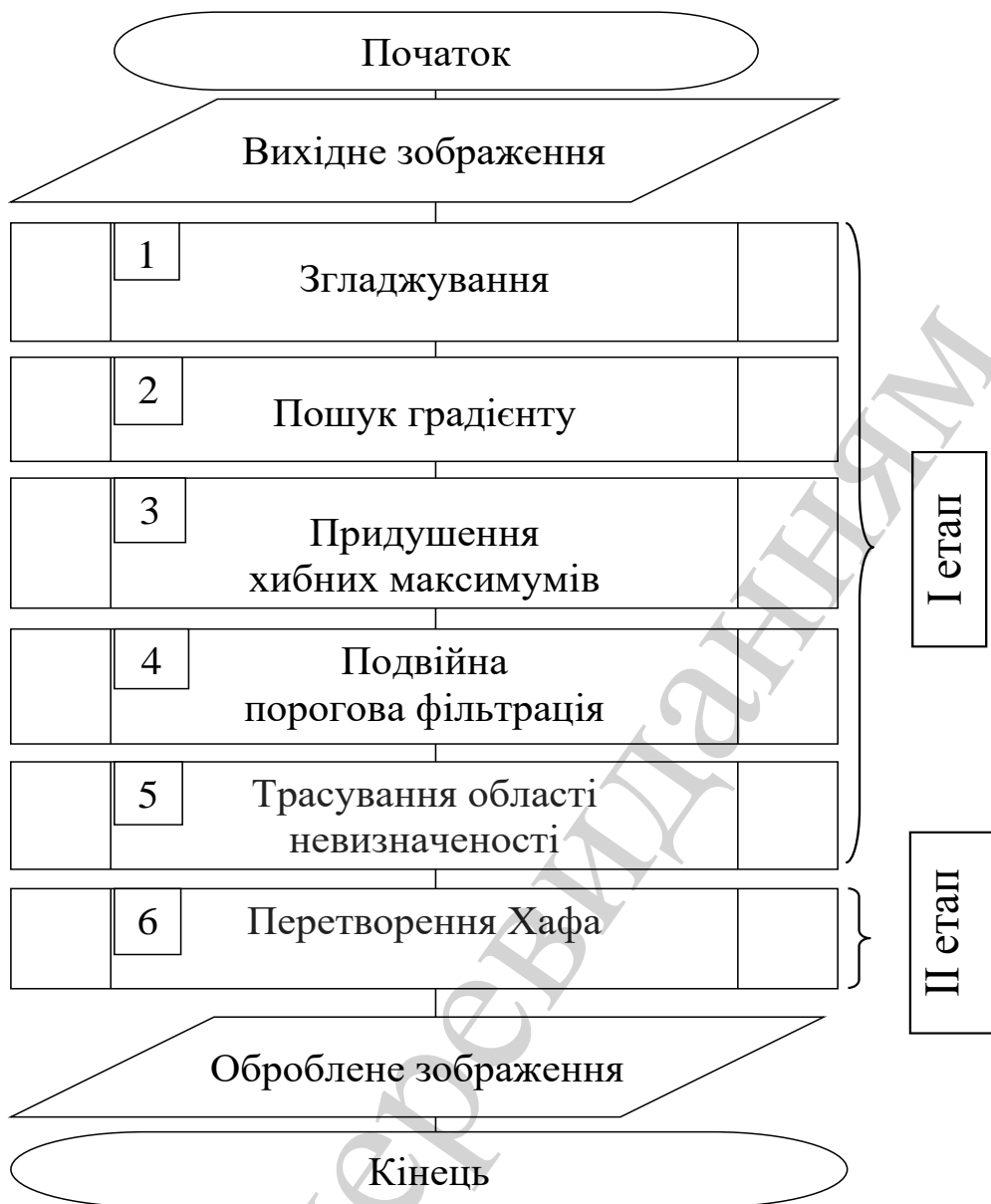


Рис. 1. Узагальнена схема методу визначення елементів міської об'єктів інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу

Блок 1. Згладжування. Проводиться з метою зменшення впливу шумів на визначення границь, для чого використовується фільтр Гауса (3):

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

де σ – параметр розмиття.

Значення параметру розмиття необхідно обрати таким, що забезпечує найбільше придушення шуму. Більше значення параметра використовується для виділення крупних контурів, менше – для виділення тонких контурів та дрібних деталей.

Блок 2. Пошук градієнту. Для визначення градієнту на зображенні після фільтру Гауса (3) використовується оператор Собеля. Основою перетворення Собеля є припущення, що функція розриву яскравості на гранях становиться значно більше. З цього припущення можна зробити висновок, що для знаходження граней достатньо здійснити диференціювання функції яскравості $f(x, y)$ (4), (5):

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = \Delta x = \frac{f(x + dx, y) - f(x, y)}{dx}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = \Delta y = \frac{f(x, y + dy) - f(x, y)}{dy}. \quad (5)$$

В дискретних зображеннях dx та dy можна вимірювати в кількості пікселів між двома точками за виразами (6), (7):

$$\Delta x = f(i+1, j) - f(i, j), \quad (6)$$

$$\Delta y = f(i, j+1) - f(i, j). \quad (7)$$

Вираз (8) визначає величину градієнту G :

$$G = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \quad (8)$$

а напрямок θ визначається за виразом (9):

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right). \quad (9)$$

У виразах (8), (9) оцінка градієнту проводиться з використанням масок:

$$\Delta x = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\Delta y = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Основний недолік використання масок (10) та (11) в класичному методі Канні [17] – велика кількість помилок з причини наявності шуму. Крім того, використання масок парного порядку в класичному методі Канні [17] не дає можливості проводити оцінку на основі пікселя, що розташований по центру маски.

На відміну від класичного методу Канні [17], для оцінки градієнту будемо використовувати оператор Собеля з масками (12), (13):

$$K_{G_x} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$K_{G_y} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

У виразах (12), (13) (у порівнянні з (10), (11)) для середніх елементів використовується коефіцієнт 2. На відміну від класичного методу Канні [17], це дозволяє зменшити ефект згладжування. Значення та напрямок величини градієнту G приймають вид (14), (15), відповідно:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (14)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{|G_x|}{|G_y|}\right). \quad (15)$$

В результаті використання оператора Собеля з масками (12), (13) інтенсивність кожного пікселя вихідного зображення дорівнює градієнту вектора яскравості.

Блок 3. Придушення хибних максимумів. Мета цього етапу – перетворити "розмиті" границі в "чіткі". Це досягається збереженням локальних максимумів та видаленням всього іншого. Для кожного пікселя виконуються наступні дії:

- напрямок градієнту округляється до найближчого значення, що кратне 45° (рис. 2, а);

- якщо у поточній точці досягається локальний максимум у напрямку градієнту, то вона є частиною границі;

- у протилежному випадку точка видаляється (рис. 2, б).

Принцип придушення проілюстрований на рис. 2, б. Всі пікселі на рис. 2, б мають орієнтацію вгору, тому значення градієнту в цих точках буде порівняно з нижче та вище розташованими пікселями. Пікселі, що обведені білим кольором на рис. 2, б, залишаться у вихідному зображенні, інші – будуть придушені.

Блок 4. Подвійна порогова фільтрація (рис. 3). Кожен піксель, що перевищує верхній поріг, відмічається як "сильний". Кожен піксель, що попадає між двома порогамі, – "слабкий". Яскравість "слабких" пікселів приймає фіксоване середнє значення та буде уточнюватися на наступному етапі. Пікселі, що менше нижнього порогу, видаляються.

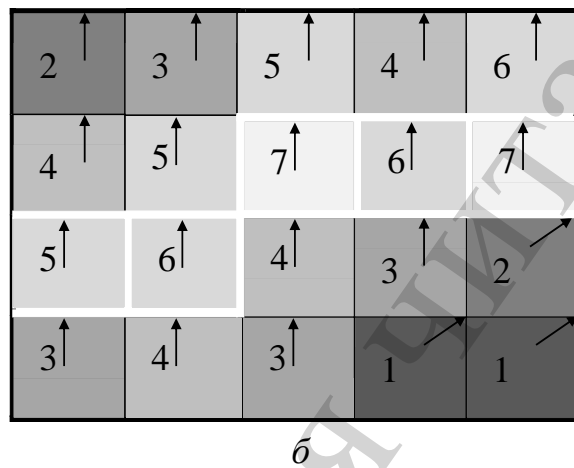
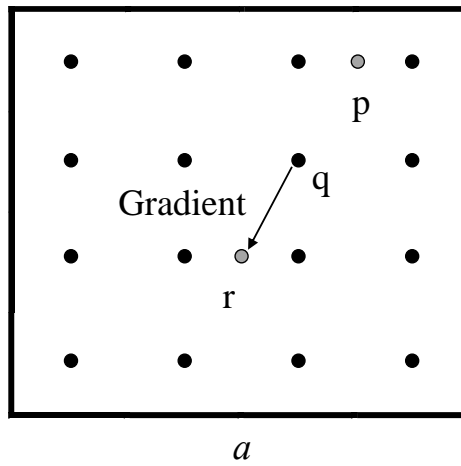


Рис. 2. Пошук локальних максимумів: *a* – максимуми *p* та *r* інтерполюються (видаляються); *b* – принцип придушення хибних максимумів



Рис. 3. Використання двох порогів

Використання подвійного порогу дозволяє зменшити вплив шуму (за рахунок верхнього порогу) та не втратити "хвости" (за рахунок нижнього порогу).

Блок 5. На відміну від класичного методу Канні [17], в блоці 5 будемо здійснювати трасування області невизначеності. Задача зводиться до виділення груп пікселів, що отримали на попередньому етапі проміжне значення, та віднесенню їх до границі (якщо з'єднанні з однією з встановлених границь) або їх

придушенню (в противному випадку). Введення даного блоку дозволяє зменшити пропуск пікселів при визначенні контурів об'єктів.

Таким чином, на першому етапі методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу проводиться визначення контурів об'єктів. Основною дешифрувальною ознакою є яскравість пікселів на зображенні. У якості методу обрано удосконалений метод Канні, в якому, на відміну від відомого, для оцінки градієнту використовується оператор Собеля з масками розміром (3×3) та додатково проводиться трасування області невизначеності, що дозволяє зменшити ефект згладжування та пропуск пікселів при визначенні контурів об'єктів.

На другому етапі аналізується дешифрувальна ознака – геометрична форма та параметри $\mathbf{P}=(p_1, p_2, \dots, p_N)$ елементів об'єкта міської інфраструктури. З метою визначення параметрів (p_1, p_2, \dots, p_N) на другому етапі будемо використовувати перетворення Хафа для прямих ліній [21]. Простір $\mathbf{P}=(p_1, p_2, \dots, p_N)$ будемо називати параметричним.

Для кожної контурної точки (x, y) проводиться процедура збільшення на одиницю значення усіх комірок параметричного простору $\mathbf{P}=(p_1, p_2, \dots, p_N)$, координати яких (p_1, p_2, \dots, p_N) задовольняють рівнянню (16):

$$P(p_1, p_2, \dots, p_N)=P^*(p_1, p_2, \dots, p_N)+1 \quad \forall (p_1, p_2, \dots, p_N): Q(\mathbf{X}, p_1, p_2, \dots, p_N)=0, \quad (19)$$

де $P(p_1, p_2, \dots, p_N)$ – нове значення комірки параметричного простору; $P^*(p_1, p_2, \dots, p_N)$ – попереднє значення комірки параметричного простору.

Після перерахунку для всіх точок контуру координати комірок у параметричному просторі будуть відповідати в загальному випадку фігурам на зображенні.

Елементів об'єктів міської інфраструктури в основному мають вигляд прямої лінії [6–8]. Тому рівняння прямої, що проходить через точку з координатами (x, y) можна представити у вигляді (20) (рис. 4):

$$x \cos(\varphi) + y \sin(\varphi) = \rho, \quad (20)$$

де ρ – відстань від початку координат до прямої лінії (траверз); φ – кут між віссю абсцис та траверзом.

У розглянутому випадку параметричний простір може бути представлений у вигляді (21):

$$\mathbf{P}(\rho, \varphi), \quad (21)$$

кожна комірка якого має координати (ρ, φ) .

Таким чином, для кожної контурної точки (x, y) проводиться процедура збільшення на одиницю значення усіх комірок параметричного простору (21), координати яких рівнянню (22):

$$P(\rho, \varphi) = P^*(\rho, \varphi) + 1 \quad \forall (\rho, \varphi): Q(\mathbf{X}, \rho, \varphi) = 0, \quad (22)$$

де $P(\rho, \varphi)$ – нове значення комірки параметричного простору; $P^*(\rho, \varphi)$ – попереднє значення комірки параметричного простору.

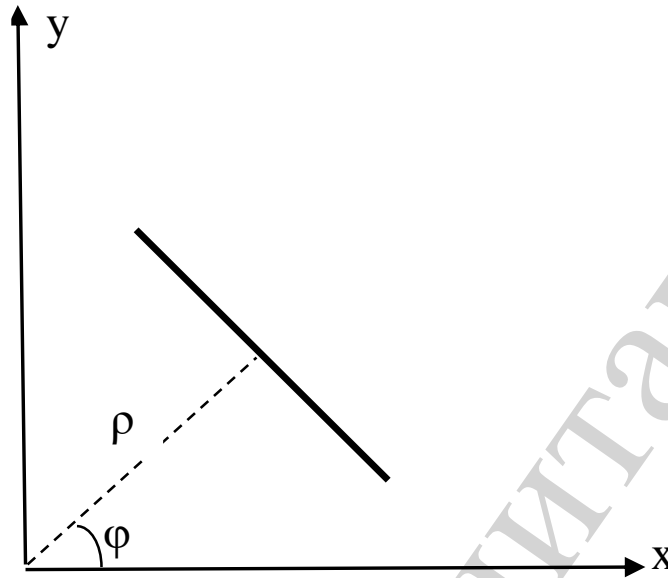


Рис. 4. Параметри прямого елемента об'єктів міської інфраструктури

Таким чином, метод визначення елементів об'єктів міської інфраструктури розглядається як двоетапний метод. На першому етапі аналізується дешифрувальна ознака – яскравість. Для проведення аналізу обрано удосконалений метод Канні, в якому, на відміну від відомого, для оцінки градієнту використовується оператор Собеля з масками розміром (3×3) та додатково проводиться трасування області невизначеності, що дозволяє зменшити ефект згладжування та пропуск пікселів при визначенні контурів об'єктів.

На другому етапі аналізується дешифрувальна ознака – геометрична форма елемента об'єкта міської інфраструктури. На цьому етапі для аналізу обрано метод Хафа.

Необхідно зазначити, що розглянутий метод може бути використаний для тонових зображень. Тому для проведення подальших досліджень розглянемо особливості методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу.

4. 2. Особливості методу, що розробляється, до визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу

Кольорове зображення з систем повітряного моніторингу представлені у кольоровому просторі Red-Green-Blue (RGB). Будемо враховувати цей факт в методі визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу. На відміну від відомих методів [9–11] визначення контурів, при обробці кольорових зображень пропонується відразу не переходити до тонового зображення, а потім – до бінарізованого. Це обумовлено тим, що елементи об'єктів міської інфраструктури знаходяться в усіх трьох кольорових

каналах RGB одночасно. Якщо елементи об'єктів знаходяться тільки в одному кольоровому каналі – елемент може мати природне походження (наприклад, річка), якщо об'єктів знаходяться одночасно в двох кольорових каналах – класифікація елементу ускладнена (це може бути, наприклад, польова дорога тощо). Зазначене вище вважається додатковою дешифрувальною ознакою елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу.

З урахуванням викладеного вище, послідовність дій методу представлена на рис. 5.

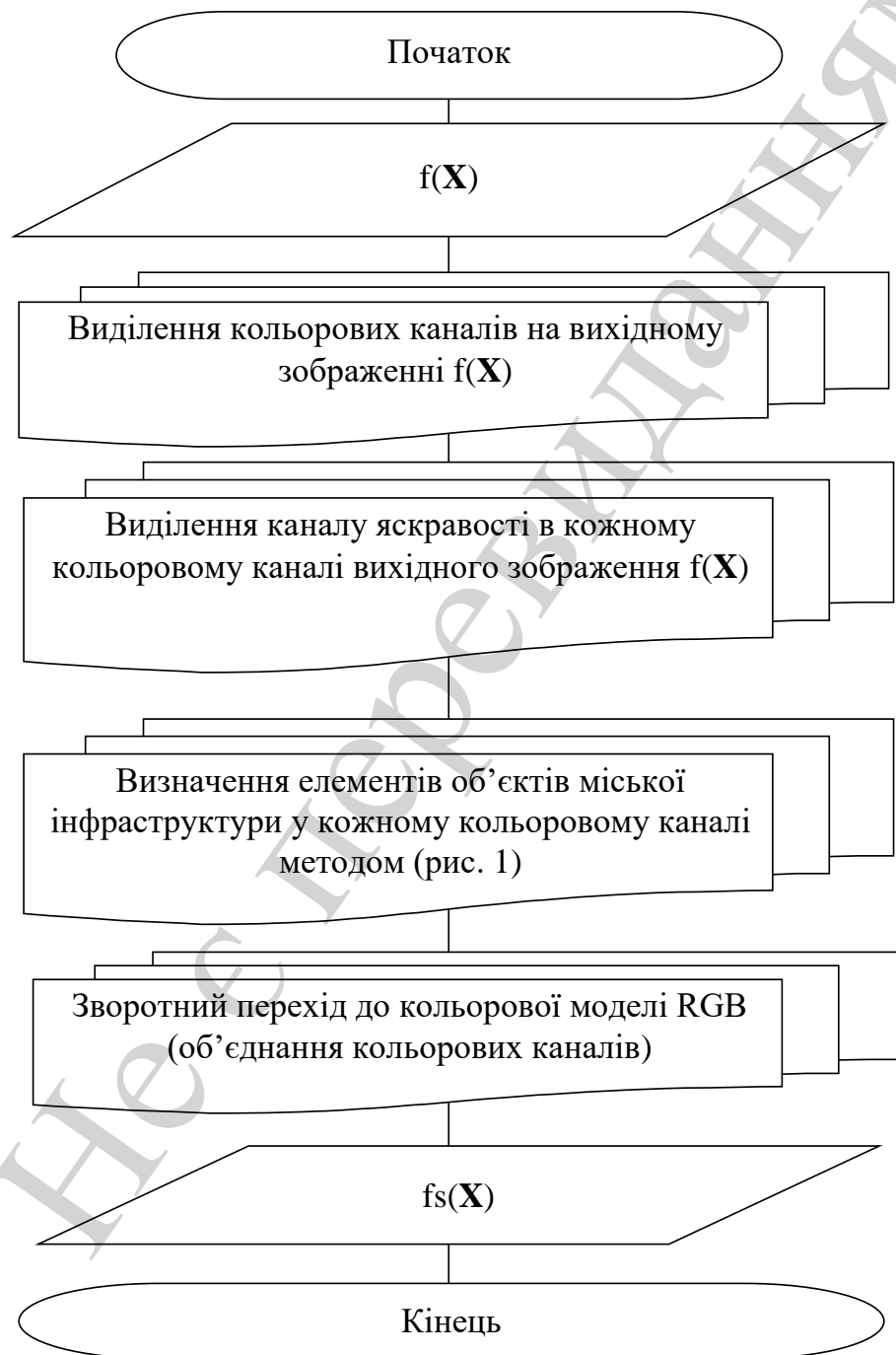


Рис. 5. Метод визначення елементів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу

Метод передбачає:

- введення вихідного кольорового зображення: $f(\mathbf{X})$ ($\mathbf{X}=(x, y)$);
- виділення кольорових каналів на вихідному кольоровому зображенні $f(\mathbf{X})$: $f_R(\mathbf{X}), f_G(\mathbf{X}), f_B(\mathbf{X})$ (де $f_R(\mathbf{X}), f_G(\mathbf{X}), f_B(\mathbf{X})$ – зображення по кольоровим каналам Red, Green, Blue, відповідно);
- виділення каналу яскравості в кожному кольоровому каналі вихідного зображення: $f_R(\mathbf{X}), f_G(\mathbf{X}), f_B(\mathbf{X})$;
- визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу в кожному кольоровому каналі методом (рис. 1) та отримання зображень по кожному кольоровому каналу: $fs_R(\mathbf{X}), fs_G(\mathbf{X}), fs_B(\mathbf{X})$ (де $fs_R(\mathbf{X}), fs_G(\mathbf{X}), fs_B(\mathbf{X})$ – зображення з виділеними елементами міської інфраструктури у кольорових каналах Red, Green, Blue, відповідно);
- зворотній перехід до кольорової моделі RGB (об'єднання кольорових каналів);
- отримання обробленого зображення $fs(\mathbf{X})$.

Отже, особливостями методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу є наступне. На відміну від відомих, у методі враховані особливості формування зображення з систем повітряного моніторингу, виділяються кольорові канали, у кожному кольоровому каналі виділяються контури та геометричні примітиви, проводиться зворотне об'єднання кольорових каналів та визначаються елементи об'єктів міської інфраструктури у просторі вихідного зображення.

4. 3. Результати обробки типового кольорового зображення з системи повітряного моніторингу для визначення елементів об'єктів міської інфраструктури

На рис. 6 наведено зображення з системи повітряного моніторингу на базі космічного апарату Ikonos (компанія DigitalGlobe, Сполучені Штати Америки) [14]. Зображення представлено в кольоровому просторі RGB. Розмір зображення – (3000×4000) пікселів. Зображення (рис. 6) є типовим зображенням міста, на якому представлені елементи об'єктів міської інфраструктури. Тому, в роботі експериментальні дослідження обмежені обробкою тільки одного типового зображення, що враховує усі особливості зображень міста з систем повітряного моніторингу.

На рис. 7 наведено зображення після реалізації першого етапу методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури за результатами повітряного моніторингу.

На першому етапі проаналізована дешифрувальна ознака – яскравість – та використано удосконалений метод Канні.

На рис. 8 наведено зображення після другого етапу методу визначення об'єктів елементів міської інфраструктури за результатами повітряного моніторингу.



Рис. 6. Зображення з системи повітряного моніторингу на базі космічного апарату Ikonos (компанія DigitalGlobe, Сполучені Штати Америки) [14]

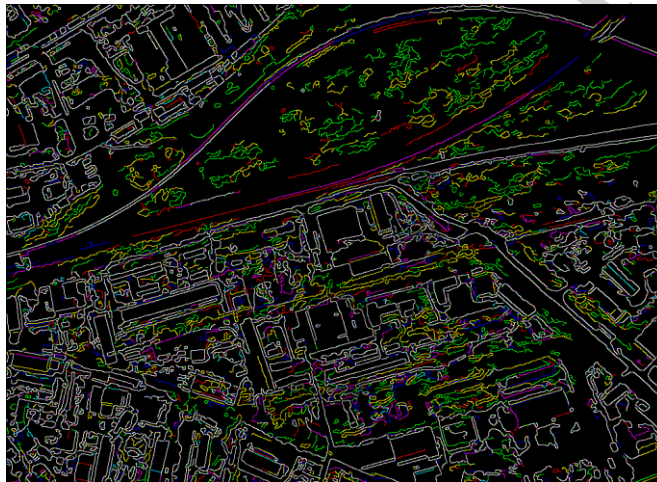


Рис. 7. Зображення після першого етапу методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури за результатами повітряного моніторингу

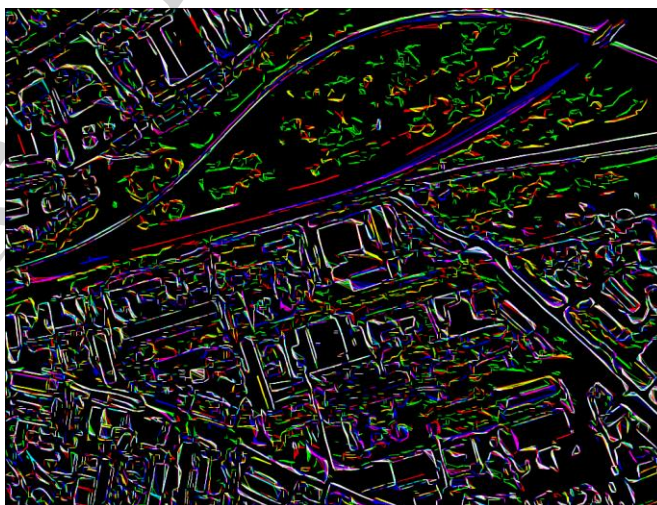


Рис. 8. Зображення після другого етапу методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури за результатами повітряного моніторингу

На рис. 7, 8 зображення для наочності демонстрації роботи методу представлені в псевдокольорах після об'єднання кольорових каналів. Правила об'єднання кольорових каналів наступні:

- при віднесенні пікселя зображення до границі в усіх трьох каналах кольорового простору Red-Green-Blue одночасно – даний піксель позначається білим кольором;

- при віднесенні пікселя зображення до границі в каналі Red та при не визначені границі у каналах Green та Blue – даний піксель позначається червоним кольором;

- при віднесенні пікселя зображення до границі в каналі Blue та при не визначені границі у каналах Green та Red – даний піксель позначається синім кольором;

- при віднесенні пікселя зображення до границі в каналі Green та при не визначені границі у каналах Red та Blue – даний піксель позначається зеленим кольором;

- при віднесенні пікселя зображення до границі в каналах Green та Blue одночасно та при не визначені границі у каналі Red – даний піксель позначається голубим кольором;

- при віднесенні пікселя зображення до границі в каналах Red та Blue одночасно та при не визначені границі у каналі Green – даний піксель позначається пурпурним кольором;

- при віднесенні пікселя зображення до границі в каналах Red та Green одночасно та при не визначені границі у каналі Blue – даний піксель позначається жовтим кольором;

- при не визначені границі в усіх трьох каналах Red-Green-Blue одночасно – даний піксель позначається чорним кольором.

Для демонстрації наочності використання додаткової дешифрувальної ознаки при визначенні елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях на рис. 9 наведено оброблене зображення.

При цьому кольори на рис. 9 отримані за наступними правилами:

- при наявності геометричного примітиву в усіх трьох каналах одночасно кольорового простору представлення зображення RGB (Red-Green-Blue) – піксель має синій колір;

- при наявності геометричного примітиву в одному з трьох каналів кольорового простору представлення зображення RGB (Red-Green-Blue) – піксель має зелений колір;

- при наявності геометричного примітиву одночасно у двох каналах та відсутності його у іншому каналі кольорового простору представлення зображення RGB (Red-Green-Blue) – піксель має жовтий колір.

На рис. 10 наведено зображення з позначенням лише виділених елементів об'єктів міської інфраструктури, які мають штучне походження. Такі елементи позначені на рис. 9 синім кольором.

Дешифрування визначених елементів об'єктів міської інфраструктури, їх розпізнавання, тематична класифікація та інше є предметом подальших досліджень і залишається за межами даної роботи.

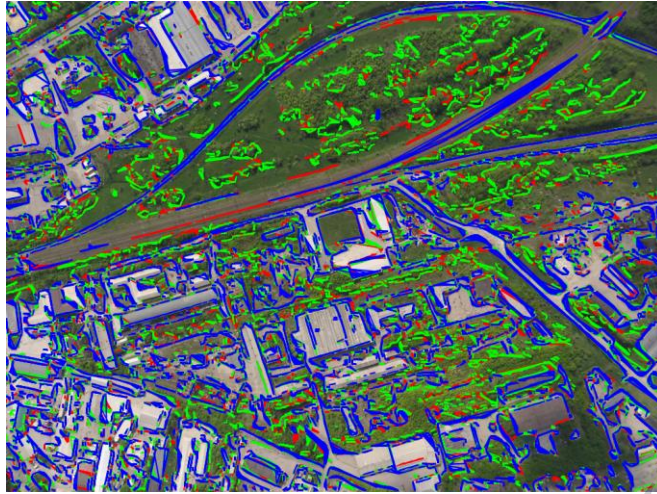


Рис. 9. Зображення з позначеними елементами об'єктів міської інфраструктури з урахуванням їх наявності в каналах обробки



Рис. 10. Визначені елементи об'єктів міської інфраструктури

4. 4. Оцінка помилок першого та другого роду при визначенні елементів об'єктів міської інфраструктури на типовому кольоровому зображенні з системи повітряного моніторингу

Показниками оцінки якості визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на типовому кольоровому зображенні з системи повітряного моніторингу оберемо помилки першого та другого роду. Помилки визначення елементів об'єктів міської інфраструктури першого (α_1) та другого (β_2) роду визначаються за критерієм максимальної правдоподібності, що витікає з узагальненого критерію мінімуму середнього ризику [23]. Помилки визначення елементів міської інфраструктури першого роду α_1 та другого роду β_2 розраховуються за виразами (23), (24) відповідно [23]:

$$\alpha_1 = \frac{S_1(f_s(\mathbf{X}))}{S_2(f(\mathbf{X}))}, \quad (23)$$

$$\beta_2 = 1 - \frac{S_3(fs(\mathbf{X}))}{S_4(f(\mathbf{X}))}, \quad (24)$$

де $S_1(fs(\mathbf{X}))$ – площа ділянок фону, що помилково віднесена до елементів міської інфраструктури на зображенні $fs(\mathbf{X})$; $S_2(f(\mathbf{X}))$ – площа ділянок фону вихідного зображення $f(\mathbf{X})$; $S_3(fs(\mathbf{X}))$ – площа правильно визначених елементів міської інфраструктури на зображенні $fs(\mathbf{X})$; $S_4(f(\mathbf{X}))$ – площа елементів міської інфраструктури на вихідному зображенні $f(\mathbf{X})$.

Розрахунки за виразами (23), (24) будемо проводити при однакових умовах, однаковому відношенні сигнал/шум для методів визначення елементів об'єктів міської інфраструктури тільки удосконаленим методом Канні (рис. 7) та двоетапним методом (рис. 10). Для оцінки помилок першого та другого роду на рис. 7, 10 розраховувалися величини $S_1(fs(\mathbf{X}))$, $S_3(fs(\mathbf{X}))$. На вихідному зображенні (рис. 6) розраховані величини $S_2(f(\mathbf{X}))$, $S_4(f(\mathbf{X}))$.

Розраховані за виразами (23), (24) значення помилок першого та другого роду для методу Канні (рис. 7) та розробленого методу (рис. 10) наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Оцінка помилок першого та другого роду визначення елементів об'єктів міської інфраструктури різними методами

Методи визначення елементів об'єктів міської інфраструктури	Канні	Розроблений метод
α_1 , %	22,19	9,30
β_2 , %	26,71	13,22

Аналіз даних табл. 1 свідчить про підвищення якості обробки зображень з систем повітряного моніторингу при використанні розробленого методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури. Помилки визначення елементів об'єктів міської інфраструктури першого та другого роду в середньому зменшені на величину 13 %.

5. Обговорення результатів розробки методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу

Викладена сутність методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу. Метод складається з двох етапів. На першому етапі аналізується дешифрувальна ознака – яскравість. Для проведення аналізу обрано удосконалений метод Канні, в якому, на відміну від відомого, для оцінки градієнту використовується оператор Собеля з масками розміром (3×3) та додатково проводиться трасування області невизначеності, що дозволяє зменшити ефект згладжування та пропуск пікселів при визначенні контурів об'єктів. На другому етапі аналізується дешифрувальна озна-

ка – геометрична форма елемента об'єкта міської інфраструктури. На цьому етапі для аналізу обрано метод Хафа.

Особливостями методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу є наступне. На відміну від відомих, у методі враховані особливості формування зображення з систем повітряного моніторингу, виділяються кольорові канали, у кожному кольоровому каналі виділяються контури та геометричні примітиви, проводиться зворотне об'єднання кольорових каналів та визначаються елементи об'єктів міської інфраструктури у просторі вихідного зображення. Враховується додаткова дешифрувальна ознака елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях в кольоровому просторі RGB. Елементи об'єктів міської інфраструктури знаходяться в усіх трьох кольорових каналах RGB одночасно. Якщо елементи об'єктів знаходяться тільки в одному кольоровому каналі – елемент може мати природне походження, якщо об'єктів знаходяться одночасно в двох кольорових каналах – класифікація елемента ускладнена.

Проведені експериментальні дослідження щодо визначення елементів об'єктів міської інфраструктури. Наведені результати роботи методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури після кожного етапу. На результатуючому зображенні для прикладу визначені об'єкти міської інфраструктури, а саме: будинки, дороги, забудови, мости тощо.

Проведена оцінка якості визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольоровому зображенні з системи повітряного моніторингу запропонованим методом та методом Канні. Для кількісної оцінки якості обробки проведено розрахунок помилок визначення елементів об'єктів міської інфраструктури першого та другого роду. Встановлено, що застосування розробленого методу визначення елементів міської інфраструктури дозволить знизити значення помилок визначення елементів об'єктів міської інфраструктури першого та другого роду в середньому на величину 13 %.

Основним недоліком розробленого методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу є потреба у значному обчислювальному ресурсі.

При проведенні подальших досліджень необхідно:

- розробити метод багатомасштабної обробки зображень з систем повітряного моніторингу;
- розрахувати інформаційні показники визначення елементів об'єктів міської інфраструктури.

6. Висновки

1. Наведені основні принципи та етапи методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на тонових зображеннях з систем повітряного моніторингу. Сутність методу полягає у послідовному аналізі на першому етапі дешифрувальної ознаки – яскравості та на аналізі на другому етапі дешифрувальної ознаки – геометричної форми елемента об'єкта міської інфраструктури.

2. Особливостями методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на кольорових зображеннях з систем повітряного моніторингу є на-

ступне. На відміну від відомих, у методі враховані особливості формування зображення з систем повітряного моніторингу, виділяються кольорові канали, у кожному кольоровому каналі виділяються контури та геометричні примітиви, проводиться зворотне об'єднання кольорових каналів та визначаються елементи об'єктів міської інфраструктури у просторі вихідного зображення.

3. Проведені експериментальні дослідження щодо визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на типовому кольоровому зображенні з системи повітряного моніторингу розробленим методом. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленого методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури. Для наочності наведені результати обробки зображення після кожного етапу роботи методу. На обробленому зображенні визначені можливі елементи об'єктів міської інфраструктури – дороги, будинки, забудови, мости тощо.

4. Проведена оцінка якості роботи методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на зображеннях з систем повітряного моніторингу. Встановлено, що застосування розробленого методу визначення елементів об'єктів міської інфраструктури на типовому зображенні з системи повітряного моніторингу дозволить знизити значення помилок першого та другого роду в середньому на величину 13 %.

Література

1. Chemin, Y. (Ed.) (2012). Remote Sensing of Planet Earth. Rijeka. doi: <https://doi.org/10.5772/2291>
2. Richards, J. (2013). Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Springer. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2>
3. Vysotska, V., Lytvyn, V., Burov, Y., Gozhyj, A., Makara, S. (2018). The consolidated information web-resource about pharmacy networks in city. CEUR Workshop Proceedings (Computational linguistics and intelligent systems), 2255, 239–255.
4. Lytvyn, V., Vysotska, V. (2015). Designing architecture of electronic content commerce system. 2015 Xth International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT). doi: <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2015.7325446>
5. Stryzhak, O., Prychodniuk, V., Podlipaiev, V. (2019). Model of Transdisciplinary Representation of GEOspatial Information. Advances in Information and Communication Technologies, 34–75. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16770-7_3
6. Yang, X. (Ed.) (2011). Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470979563>
7. Saito, S., Aoki, Y. (2015). Building and road detection from large aerial imagery. Image Processing: Machine Vision Applications VIII. doi: <https://doi.org/10.1117/12.2083273>
8. Dempsey, N., Brown, C., Raman, S., Porta, S., Jenks, M., Jones, C., Bramley, G. (2008). Elements of Urban Form. Sustainable City Form, 21–51. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8647-2_2

9. Gonzalez R. C., Woods R. E. (2017). *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 1192.
10. Gupta, V., Singh, D., Sharma, P. (2016). Image Segmentation Using Various Edge Detection Operators: A Comparative Study. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 4 (8), 14819–14824.
11. Sum, K., S. Cheung, P. (2006). A Fast Parametric Snake Model with Enhanced Concave Object Extraction Capability. *2006 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*. doi: <https://doi.org/10.1109/isspit.2006.270844>
12. Liu, Y., Yao, J., Lu, X., Xia, M., Wang, X., Liu, Y. (2019). RoadNet: Learning to Comprehensively Analyze Road Networks in Complex Urban Scenes From High-Resolution Remotely Sensed Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57 (4), 2043–2056. doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2870871>
13. Nyandwi, E., Koeva, M., Kohli, D., Bennett, R. (2019). Comparing Human Versus Machine-Driven Cadastral Boundary Feature Extraction. *Remote Sens*, 11, 1662. doi: <https://doi.org/10.20944/preprints201905.0342.v1>
14. Ruban, I., Khudov, H., Khudov, V., Khizhnyak, I., Makoveichuk, O. (2017). Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (89)), 49–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109904>
15. Ruban, I., Khudov, V., Khudov, H., Khizhnyak, I. (2017). An improved method for segmentation of a multiscale sequence of optoelectronic images. *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. doi: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2017.8246367>
16. Ruban, I., Khudov, V., Makoveichuk, O., Khudov, H., Khizhnyak, I. (2018). A Swarm Method for Segmentation of Images Obtained from On-Board Optoelectronic Surveillance Systems. *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. doi: <https://doi.org/10.1109/infocommst.2018.8632045>
17. Ruban, I., Khudov, H., Makoveichuk, O., Khizhnyak, I., Khudov, V., Podlipaiev, V. et. al. (2019). Segmentation of optical-electronic images from on-board systems of remote sensing of the earth by the artificial bee colony method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (98)), 37–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161860>
18. Ramlau, R., Scherzer, O. (Eds.) (2019). *The Radon Transform*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH. doi: <https://doi.org/10.1515/9783110560855>
19. Li, Z., Liu, Y., Walker, R., Hayward, R., Zhang, J. (2009). Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform. *Machine Vision and Applications*, 21 (5), 677–686. doi: <https://doi.org/10.1007/s00138-009-0206-y>
20. Kabade, A., Sangam, V. (2016). Canny edge detection algorithm. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 5 (5), 1292–1295.

21. Manzanera, A., Nguyen, T. P., Xu, X. (2016). Line and circle detection using dense one-to-one Hough transforms on greyscale images. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2016 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s13640-016-0149-y>
22. El-Baz, A., Jiang, X., Jasjit, S. (Eds.) (2016). Biomedical image segmentation: advances and trends. CRC Press, 546. doi: <https://doi.org/10.4324/9781315372273>
23. Choudhary, R., Gupta, R. (2017). Recent Trends and Techniques in Image Enhancement using Differential Evolution- A Survey. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 7 (4), 106–112. doi: <https://doi.org/10.23956/ijarcse/v7i4/0108>

ТІЛЬКИ ДЛЯ ЧИТАННЯ