

УДК 621.327:681.5

Метод семантично-орієнтованої обробки бітових площин інфрачервоних зображень

Бараннік В. В.¹, Берчанов А. А.¹, Бараннік В. В.², Суханов О. Ю.³, Перцев П. Д.², Лиходеев О. С.³,
Юдін О. К.⁴, Прокопенко Р. О.², Чаун Ю. М.³

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна

²Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

³Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

⁴Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації, м. Київ, Україна

E-mail: v.v.barannik@karazin.ua

Розглянуто особливості побудови методу семантично-орієнтованої обробки бітових площин інфрачервоних (ІЧ) зображень, орієнтованого на підвищення ефективності систем дистанційного спостереження в умовах обмежених ресурсів. Розкрито підхід до зменшення бітового об'єму ІЧ даних без втрати критичної семантичної інформації, яка є вирішальною для задач виявлення та ідентифікації об'єктів інтересу. Розкрито переваги використання додаткового ІЧ інформаційного каналу, що забезпечує надійне функціонування систем в умовах обмеженої видимості, маскування об'єктів або несприятливого фону. Водночас зафіксовано проблему збільшення об'єму даних, які мають бути оброблені в реальному часі. З'ясовано, що традиційні методи (PNG, JPEG-LS, JPEG 2000, HEVC) або мають надто високу обчислювальну складність, або не забезпечують збереження термальної семантики. Отже, актуальною є науково-прикладна задача, що полягає у покращенні ефективності роботи систем дистанційного спостереження із застосуванням ІЧ інформаційних каналів. Задля розв'язання цієї задачі, у статті запропоновано метод, що ґрунтується на розділенні бітових площин зображення (виділення старших та молодших бітів) та подальшій семантично-орієнтованій обробці. Старші біти зберігають глобальну структуру та основну інформацію про сцену, тоді як молодші несуть залишковий шум або малопомітні деталі. Це дозволяє застосовувати адаптивні стратегії стиснення залежно від інформативності окремих сегментів. Метод включає ієрархічну декомпозицію зображення на сегменти та мінісегменти для локалізованого аналізу. Для утворених сегментів виконується оцінка інформативності у спектральному домені з використанням вейвлет-перетворення Хаара, подальша нормалізація метрик інформативності, а також селективне кодування: інформативні сегменти кодуються з мінімальними втратами, неінформативні – з агресивнішим стисненням. Оцінка метрики інформативності спирається на високочастотні складові, які репрезентують теплові контури об'єктів. Запропонована метрика інформативності ґрунтується на нормованій сумі модулів високочастотних коефіцієнтів після перетворення мінісегментів у різницевий простір. Для класифікації сегментів як інформативних або неінформативних використовуються порогові значення. У залежності від класу інформативності сегменту виконується подальше селективне кодування, яке зберігає точність реконструкції для ключових ділянок сцени. Особлива увага приділяється тому, щоб навіть при зменшенні бітової глибини до 8 біт зберігати ключову температурну структуру сцени. Проведено порівняльний експериментальний аналіз на наборі зображень з 16-бітною глибиною. За умов однакового значення PSNR, розроблений метод демонструє покращення коефіцієнта стиснення в середньому на 2.63. Візуальний аналіз показав, що у розробленому методі об'єкти інтересу зберігають термальну цілісність після декодування, на відміну від традиційного підходу. Отже, мета дослідження – розробити метод семантично-орієнтованої обробки бітових площин інфрачервоних зображень. Запропонований метод має практичну цінність для інтеграції в бортові системи безпілотних апаратів, систем моніторингу та інших мобільних платформ, де обмеження швидкості передачі й обчислювальних ресурсів є критичними.

Ключові слова: системи дистанційного спостереження; обробка інфрачервоних зображень; розділення бітових площин; метрика інформативності; вейвлет-перетворення Хаара; адаптивна сегментація зображень; збереження теплових сигнатур; стиснення зображень з низькою обчислювальною складністю; семантично-орієнтоване кодування; селективне стиснення зображень

DOI: [10.64915/RADAP.2025.102.15-24](https://doi.org/10.64915/RADAP.2025.102.15-24)

1 Вступ. Постановка проблеми

Сучасні інфокомунікаційні технології демонструють сталу тенденцію до розвитку та розповсюдження. Це зумовлено актуальними викликами та задачами у сферах безпеки та оборони.

Зокрема, підвищуються вимоги до ефективності роботи систем дистанційного моніторингу та роботизованих систем спостереження. Одними із ключових вимог є достовірність та оперативність передачі інформації [1–4].

Системи спостереження із високим рівнем достовірності дозволяють виявляти об'єкти інтересу у візуально-складних умовах:

- обмежена видимість через погодні умови чи нічний час;
- маскування об'єктів інтересу.

Для практичної реалізації таких систем часто застосовують додаткові джерела видової інформації, окрім оптичних. Інфрачервоний (ІЧ) інформаційний канал є одним з таких найбільш розповсюджених додаткових джерел.

Інфрачервоні камери дозволяють фіксувати інфрачервоне випромінювання середовища, що корелює із його тепловими показниками. Об'єкти, що мають підвищені теплові показники вирізняються на фоні середовища. Це дозволяє виявляти такі об'єкти у візуально-складних умовах.

Оскільки інфрачервоний інформаційний канал є додатковим до оптичного, це збільшує об'єм інформації, що необхідно передати та обробити у інфокомунікаційній системі. Через обмеження бітової швидкості каналів передачі інформації, збільшення бітового об'єму призводить до затримок під час передачі та обробки даних у реальному часі.

Отже, актуальною є **науково-прикладна задача**, що полягає у покращенні ефективності роботи систем дистанційного спостереження із застосуванням ІЧ інформаційних каналів.

Для вирішення цієї проблеми застосовують методи кодування даних, що дозволяють зменшити бітовий об'єм та водночас відновити дані до початкового стану на приймаючій стороні [5–10].

Існують спеціалізовані алгоритми для кодування ІЧ кадрів. Серед них — внутрішньо створені рішення, які пропонують виробники тепловізійних сенсорів, зокрема такі відомі компанії як Flir, Fluke та Ortrix. Ці методи кодування зазвичай адаптовані до унікальних теплових властивостей інфрачервоних зображень (ІЧЗ), що дає змогу ефективніше представляти інформацію, залежну від температури. Втім, попри свою функціональність, такі підходи мають низку істотних недоліків і обмежень:

- архітектура та внутрішній принцип роботи зазначених алгоритмів не є загальнодоступними, оскільки вони охороняються як об'єкти інтелектуальної власності й залишаються закритими;

- для доступу, декодування або обробки даних, що були стиснуті або закодовані з використанням цих пропріетарних рішень, користувач змушений застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення від конкретного виробника, що обмежує сумісність та підсилює залежність від певної екосистеми.

Серед відкритих методів кодування інфрачервоних кадрів є дві групи методів. Методи, що дозволяють кодувати дані без втрат, за рахунок зменшення статистичної надмірності. Серед них: PNG, TIFF, JPEG-LS. Однак вони мають низьку ефективність зменшення бітового об'єму. Тому інша група методів дозволяє кодувати дані більш компактно за рахунок зменшення психовізуальної надмірності [11–18]. Однак у наслідок цього зображення зазнають спотворень. Серед таких методів: JPEG 2000, HEVC. Основні підходи, що застосовуються у цих методах:

- 1) виявлення зон з однорідною просторовою структурою в межах зображення [19];
- 2) трансформація просторового представлення кадру у спектрально-хвильове, що дозволяє відокремити деталізуючу інформаційну складову [20];
- 3) інтерполяція міжблокових та фонових областей кадру [21].

Разом з тим, зазначені підходи мають низку істотних недоліків [22–25]:

- 1) суттєва обчислювальна складність;
- 2) недостатня ефективність у ситуаціях з невизначеною структурою сцени, зокрема при аналізі просторово перевантажених ділянок із високою щільністю дрібних і нетипових елементів;
- 3) можливе спотворення критично важливої семантичної інформації, що робить неможливим її відтворення після декодування.

Отже, існує потреба у методі кодування ІЧЗ, що дозволить зберегти критично важливу семантичну інформацію та при цьому забезпечити низьку обчислювальну складність для ефективного виконання на дистанційному та роботизованому обладнанні.

Метод повинен враховувати специфіку ІЧЗ, яка полягає у підвищеній бітній глибині кадрів. Кожне піксельне значення може займати 16 біт. Кодування зображень із таким широким динамічним діапазоном пов'язане із рядом технічних складнощів, а саме підвищення складності програмної та апаратної обробки, що негативно впливає на швидкість кодування.

Отже, для забезпечення ефективної обробки потоку зображень з широким динамічним діапазоном необхідно розробити програмний метод зменшення глибини бітності даних. Основною метою такого підходу є забезпечення сумісності з типовими, широко поширеними та ресурсно обмеженими апаратними платформами, які, як правило, оптимізовані для обробки 8-бітної інформації. У контексті аналізу інфрачервоних зображень, запропонований метод зниження бітності повинен відповідати низці кри-

тично важливих технічних вимог, аби вважатися ефективним і придатним до практичного застосування:

- після трансформації вихідні зображення мають бути закодовані у 8-бітному представленні, що забезпечує їхню сумісність зі стандартними конвеєрами обробки зображень і апаратними декодерами;
- алгоритмічна структура методу повинна мати низьку обчислювальну складність, що робить його придатним для використання в реальному часі та на пристроях із обмеженими обчислювальними ресурсами;
- процес перетворення повинен зберігати цілісність вихідного сигналу, не створюючи спотворень, особливо тих, що можуть змінити термальну семантику, закладену в інфрачервоних даних.

Пропонується розробити метод розділення бітових площин, що дозволить виконати операції кодування даних із меншою бітовою розрядністю та відповідатиме сформованим вимогам.

Для збереження цілісності та достовірності семантично важливої інформації, що міститься у бітових площинах ІЧ зображень, необхідно враховувати характеристики, притаманні цьому типу візуальних даних. Семантична специфіка ІЧ зображень включає:

- наявність областей зі слабо вираженою текстурою, нечіткими або згладженими межами об'єктів, а також різноманітними видами шуму, які за структурою та походженням істотно відрізняються від шумових компонентів, характерних для зображень у видимому (оптичному) діапазоні;
- розподіл інтенсивності на ІЧ зображеннях часто не збігається з характерним для оптичних зображень;
- контрастність може бути низькою або локалізованою в межах вузького температурного інтервалу, що ускладнює візуалізацію об'єктів і знижує ефективність стандартних методів кодування зображення;
- інфрачервоні камери, зазвичай мають нижчу просторову роздільну здатність порівняно з оптичними сенсорами. Це обмеження призводить до втрати структурної деталізації та ускладнює виявлення й розпізнавання дрібних об'єктів або елементів сцени.

З метою досягнення балансу між обчислювальною ефективністю та потребою адаптації методів обробки до предметно-орієнтованих особливостей ІЧ зображень, доцільно застосовувати підхід із урахуванням семантики кадру шляхом аналізу у спектральному домені. Такий підхід дозволяє декомпозувати просторовий вміст зображення на низько- та високочастотні компоненти, що, у свою чергу, сприяє вибірковій обробці інформативних областей із мінімізацією загального обчислювального навантаження.

Частотне представлення дозволить виявити сегменти кадру із більшими високочастотними показниками [26–29]. Що означатиме зосередження у сегменті теплових контурів. Такі сегменти можна вважати високоінформативними і кодувати їх із мінімальним рівнем спотворень. Це дозволить забезпечити цілісність теплових сигнатур. Тоді як сегменти кадру із меншими високочастотними показниками представляють фон [30–36], та можуть бути закодованими із більшими втратами. Такий підхід дозволить забезпечити семантично-орієнтовану обробку бітових площин, збільшити ефективність стиснення, при цьому забезпечуючи низький рівень обчислювальної складності.

Отже, **мета статті** полягає у розробці методу семантично-орієнтованої обробки бітових площин інфрачервоних зображень.

2 Розробка методу семантично-орієнтованої обробки інфрачервоних зображень

З метою реалізації локалізованої обробки, оригінальне інфрачервоне зображення I , яке підлягає кодуванню, пропонується декомпозувати на сегменти $I^{(m,n)}$. Індeksi (m, n) відповідають горизонтальній та вертикальній позиції сегмента в матриці зображення.

Для виявлення семантичних показників сформованих сегментів $I^{(m,n)}$ необхідно оцінити метрику інформативності $I_M^{(m,n)}$:

$$I_M^{(m,n)} = \text{Metr} \left(I^{(m,n)} \right),$$

де $\text{Metr} \left(I^{(m,n)} \right)$ – функція визначення метрики інформативності.

На основі метрики інформативності $I_M^{(m,n)}$ можна здійснювати класифікацію сегментів зображення за їхньою семантичною або інформаційною значущістю. Ця метрика кількісно відображає густину інформації чи варіативність теплового вмісту сегмента. Для класифікації використовується порогове значення Thr . Якщо $I_M^{(m,n)} > \text{Thr}$, сегмент $I^{(m,n)}$ вважається інформативним; інакше — менш інформативним, що зазвичай відповідає фоновим або однорідним ділянкам. У подальшій обробці інформативні сегменти кодуються з підвищеною точністю для збереження важливої інформації, тоді як менш інформативні — із застосуванням агресивнішого стиснення для досягнення високої компресії. Назвемо такий підхід семантично-орієнтованою обробкою та позначимо оператором $\text{SAP} \left(I^{(m,n)} \right)$. Схема процесу класифікації сегментів $I^{(m,n)}$ за значенням $I_M^{(m,n)}$ зображена на Рисунку 1.

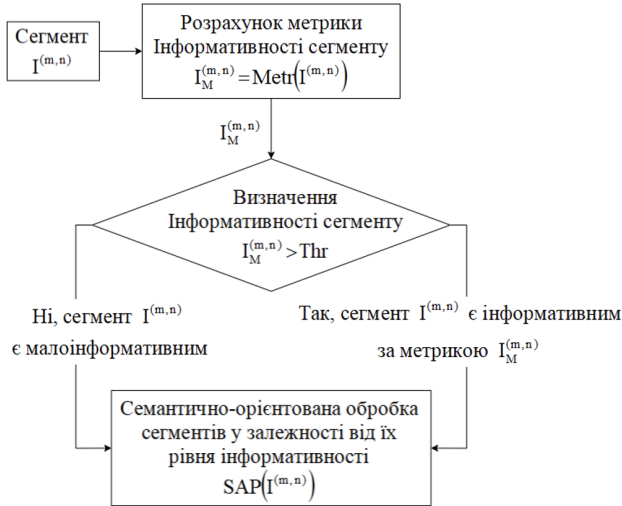


Рис. 1. Процес визначення інформативності сегмента $I^{(m,n)}$

Для підвищення просторової точності оцінки інформативності метрики $I_M^{(m,n)}$ пропонується деталізувати сегмент $I^{(m,n)}$, поділивши його на чотири мінісегменти $I_{r,t}^{(m,n)}$, де r, t – координати мінісегмента у середині сегмента. Тобто:

$$I^{(m,n)} \in \{I_{1,1}^{(m,n)}, I_{1,2}^{(m,n)}, I_{2,1}^{(m,n)}, I_{2,2}^{(m,n)}\}.$$

Така ієрархічна декомпозиція дозволяє виявити внутрішню сегментну неоднорідність і краще відображати локальні варіації. Завдяки цьому забезпечується більш точна, просторово чутлива оцінка інформативності, що враховує як загальний вміст сегмента, так і структуру його підобластей.

Обмеження декомпозиції двома рівнями обумовлено необхідністю балансу між точністю кодування та кількістю операцій на обробку. Двох рівнів достатньо для ефективної сегментації ІЧ зображень, тоді як подальше збільшення кількості рівнів декомпозиції призводить до збільшення складності обробки і, як наслідок, до більших часових затримок на виконання.

Виконаємо перетворення мінісегментів $I_{r,t}^{(m,n)}$ у різницевий простір, що передбачає обчислення різниці між пікселями та локальним мінімумом. Це зменшує динамічний діапазон значень, зменшуючи вплив абсолютної яскравості та підсилюючи локальні варіації. Такий підхід зберігає семантичну структуру мінісегментів, забезпечуючи чіткість важливих температурних градієнтів:

$$I'_{r,t}^{(m,n)} = \text{subtr}(I_{r,t}^{(m,n)}),$$

де:

- $\text{subtr}(I_{r,t}^{(m,n)})$ – функція перетворення $I_{r,t}^{(m,n)}$ у різницевий простір;
- $I'_{r,t}^{(m,n)}$ – утворений різницевий мінісегмент.

У різницевих мінісегментах $I'_{r,t}^{(m,n)}$ необхідно виявити теплові сигнатури – області з підвищеним

локальним контрастом, що свідчить про наявність температурних градієнтів. Для виявлення таких ознак, дані необхідно перетворити у спектральний домен.

Для цього пропонується використовувати вейвлет-перетворення на базисі Хаара. Цей метод дозволить виокремити високочастотні компоненти, пов'язані з краями та різкими переходами, зберігаючи просторову локальність. Метод має низьку обчислювальну складність і забезпечує ефективне виділення семантично значущих структур.

Позначимо таку трансформацію як:

$$\{ \text{LFreq}_{r,t}^{(m,n)}(I), \text{HFreq}_{r,t}^{(m,n)} \} = \text{WH}(I'_{r,t}^{(m,n)}),$$

де:

- $\text{WH}(I'_{r,t}^{(m,n)})$ – функція вейвлет перетворення;
- $\text{LFreq}_{r,t}^{(m,n)}(I)$ – кінцеве низькочастотне значення;
- $\text{HFreq}_{r,t}^{(m,n)}$ – група високочастотних значень.

Для виконання $\text{WH}(I'_{r,t}^{(m,n)})$ застосовується одновимірне вейвлет перетворення, результатом якого є послідовність спектральних складових. Серед них одне низькочастотне значення $\text{LFreq}_{r,t}^{(m,n)}(I)$ та решта високочастотні $\text{HFreq}_{r,t}^{(m,n)}$.

Для обчислення метрики інформативності сегмента $I^{(m,n)}$ необхідно врахувати значення високочастотних компонент $\text{HFreq}_{r,t}^{(m,n)}$ кожного мінісегмента $I'_{r,t}^{(m,n)}$. Для уникнення взаємного згасання через знаковість високочастотних коефіцієнтів, підсумовуються їхні модулі:

$$\text{HFreqSum}_{r,t}^{(m,n)} = \sum |\text{HFreq}|,$$

$$\text{HFreq} \in \text{HFreq}_{r,t}^{(m,n)},$$

де:

- $|\text{HFreq}|$ – модуль високочастотного значення;
- $\text{HFreqSum}_{r,t}^{(m,n)}$ – сума високочастотних значень для мінісегмента $I'_{r,t}^{(m,n)}$ за модулем.

Розрахуємо суму високочастотних значень $\text{HFreqSum}^{(m,n)}$ для сегмента $I^{(m,n)}$:

$$\begin{aligned} \text{HFreqSum}^{(m,n)} &= \text{HFreqSum}_{1,1}^{(m,n)} + \text{HFreqSum}_{1,2}^{(m,n)} + \\ &+ \text{HFreqSum}_{2,1}^{(m,n)} + \text{HFreqSum}_{2,2}^{(m,n)}. \end{aligned}$$

Для уніфікації значень метрики інформативності між сегментами та кадрами виконаємо нормалізацію до інтервалу $[0,1]$:

$$\text{Norm}(\text{HFreqSum}^{(m,n)}) =$$

$$= \frac{\text{HFreqSum}^{(m,n)} - \text{HFreqSum}_{\min}^{(m,n)}}{\text{HFreqSum}_{\max}^{(m,n)} - \text{HFreqSum}_{\min}^{(m,n)}},$$

де:

- $\text{HFreqSum}_{\min}^{(m,n)}$ – мінімальне значення суми ви-

соких частот сегмента $I^{(m,n)}$ у зображенні I ;
 - $\text{HFreqSum}_{\max}^{(m,n)}$ – максимальне значення суми високих частот сегмента $I^{(m,n)}$ у зображенні I .
 Результатом нормалізації є метрика інформативності $I_M^{(m,n)}$:

$$I_M^{(m,n)} = \text{Metr} \left(I^{(m,n)} \right) = \text{Norm} \left(\text{HFreqSum}^{(m,n)} \right).$$

На Рисунок 2 зображена схема розрахунку метрики інформативності $I_M^{(m,n)}$ для сегмента $I^{(m,n)}$.

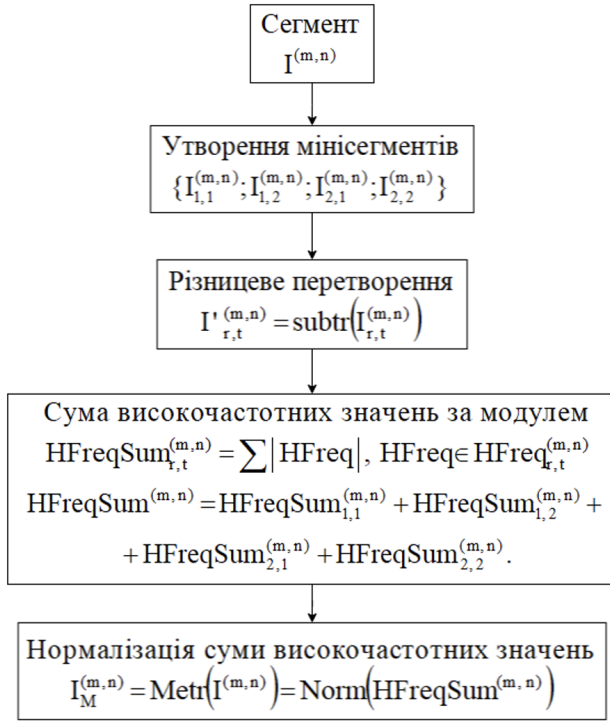


Рис. 2. Метод розрахунку метрики інформативності $I_M^{(m,n)}$ сегмента $I^{(m,n)}$

3 Розробка методу розділення бітових площин

Для ефективного зменшення бітової глибини початкового інфрачервоного зображення пропонується розробити метод розділення бітових площин. Цей підхід ґрунтується на спостереженні, що різні підмножини бітових площин по-різному впливають на семантичний вміст зображення. Зокрема, старші біти зазвичай містять грубу структурну інформацію та основний контраст, тоді як молодші біти містять дрібні деталі або шумові компоненти.

Метод розділення бітових площин включає виокремлення старших бітових значень $\text{Lb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$ та молодших $\text{IRb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$, називатимемо це виділення бітових значень.

Виділення старших біт полягає в побітовому зсуві праворуч кожного піксельного значення. Зокрема, кожне 16-бітне ціле значення $I_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$ зсувається праворуч на 8 позицій. Ця операція фактично

відкидає 8 молодших бітів і зберігає лише верхні 8 бітів, які відповідають найзначущій частині сигналу.

Це зображено у такому виразі:

$$\text{Lb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y) = \text{Lb} \left(I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \right) = I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \gg 8,$$

де:

- $\text{Lb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$ – результат виділення старших біт;
- Lb – процедура виділення старших біт;
- $\gg$ – операція побітового зсуву вправо.

Для того щоб отримати сегмент старших бітових значень $\text{Lb}^{(m,n)}$, необхідно застосувати Lb до усіх значень з сегмента $I^{(m,n)}$:

$$\begin{aligned} \text{Lb}^{(m,n)} &= \text{Lb} \left(I^{(m,n)} \right) = \\ &= \left\{ \text{Lb} \left(I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \right), I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \in I^{(m,n)} \right\}. \end{aligned}$$

Для виділення молодших бітів з 16-бітного піксельного значення у вхідному зображенні необхідно видалити внесок старших бітів і залишити лише нижню частину бінарного представлення. Це досягається за допомогою побітової кон'юнкції значення $I_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$ з попередньо визначеною бітовою маскою Rb_M , яка зберігає лише необхідні біти:

$$\text{Rb}_M = 0000000011111111;$$

$$\text{IRb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y) = \text{Rb} \left(I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \right) = I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \& \text{Rb}_M,$$

де:

- $\text{IRb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$ – результат виділення молодших біт;
- Rb – процедура виділення молодших біт;
- Rb_M – молодша бітова маска;
- $\&$ – операція кон'юнкції.

Для того щоб отримати сегмент молодших бітових значень $\text{IRb}^{(m,n)}$ застосуємо Rb до усіх значень з сегмента $I^{(m,n)}$:

$$\begin{aligned} \text{IRb}^{(m,n)} &= \text{Rb} \left(I^{(m,n)} \right) = \\ &= \left\{ \text{Rb} \left(I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \right), I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) \in I^{(m,n)} \right\}. \end{aligned}$$

Алгоритм застосування бітового розділення можна побачити на схемі на Рисунок 3, де для значення $I_{r,t}^{(m,n)}(x, y) = 33123$ виконується виділення значень $\text{Lb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y) = 129$ та $\text{IRb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y) = 99$.

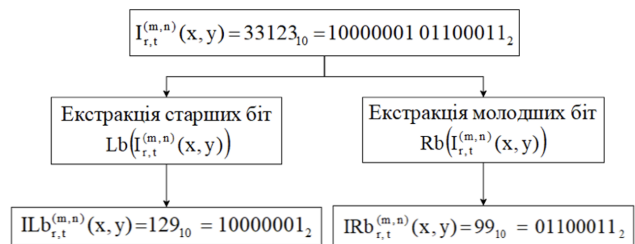


Рис. 3. Приклад виділення значень $\text{Lb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$ та $\text{IRb}_{r,t}^{(m,n)}(x, y)$

Коли процедура розділення бітових площин систематично застосовується до кожного сегмента $I^{(m,n)}$ початкового 16-бітного зображення I , стає можливим побудувати два похідні 8-бітні зображення:

— зображення, сформоване зі старших бітів усіх пікселів, що зберігає домінантні структурні та теплові характеристики початкового зображення;

— зображення, яке містить молодші біти і відображає тонкі деталі, залишкові текстури або тепловий шум.

Формування ILb та IRb можна виразити такими формулами:

$$ILb = Lb(I^{(m,n)}), I^{(m,n)} \in I;$$

$$IRb = Rb(I^{(m,n)}), I^{(m,n)} \in I.$$

Візуалізація зображень бітових площин ILb та IRb зображена на Рис. 4.

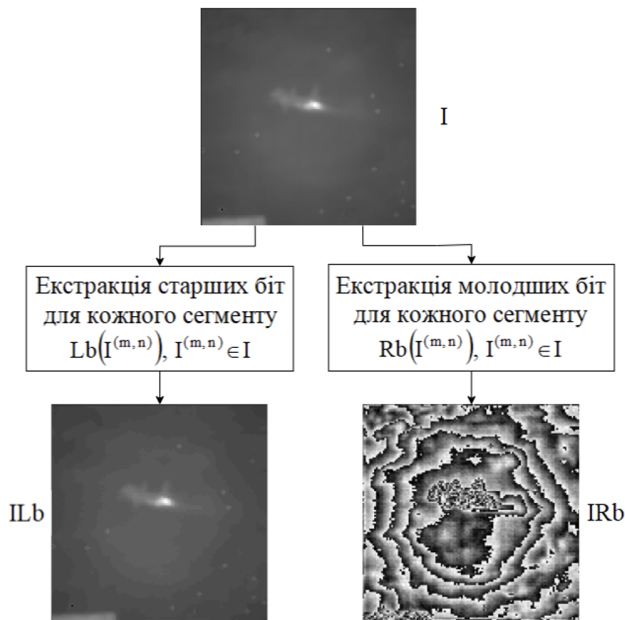


Рис. 4. Приклади утворених зображень ILb та IRb після застосування бітового розділення

Під час аналізу візуальних представлень початкового інфрачервоного зображення I , а також його бітових площин ILb та IRb можна спостерігати виражені структурні відмінності.

Зображення I та ILb демонструють високий ступінь візуальної подібності. Це пояснюється базовими принципами двійкового кодування: найстарші біти визначають більшу частину числового значення пікселя і, відповідно, несуть основну інформацію про структуру, контраст та морфологію сцени. Ці біти кодують глобальний розподіл інтенсивності, формують контури об'єктів і зберігають семантично важливі ознаки. Унаслідок цього, навіть після відкидання молодших бітів, зображення залишається структурно близьким до оригінального зображення I .

На відміну від цього, площа молодших бітів IRb , яка містить залишкову інформацію, при візуалізації нагадує шум. Це зумовлено тим, що молодші біти переважно кодують низькоамплітудні варіації, зокрема шум сенсора, артефакти квантування та малі теплові флуктуації. Однак, завдяки такій інформації можуть бути виявлені малопомітні корисні ознаки при інтелектуальній чи статичній обробці.

Таким чином, при кодуванні важливо зберегти достовірність як старших бітових значень, так і молодших. Однак розуміння їхніх структурних відмінностей дозволяє селективно застосовувати відповідні методи обробки для підвищення ефективності кодування.

4 Застосування семантично-орієнтованої обробки до бітових площин

Оскільки утворені бітові площини мають структурні відмінності, необхідно врахувати це при семантично-орієнтованій обробці.

Для цього необхідно розрахувати метрику інформативності $ILb_M^{(m,n)}$ для сегментів $ILb^{(m,n)}$ зі старшої бітової площини:

$$ILb_M^{(m,n)} = \text{Metr}(ILb^{(m,n)}).$$

Щоб визначити, чи є сегмент $ILb^{(m,n)}$ інформативним, необхідно використовувати порогове значення ThrL , що сформоване на основі старших бітових значень. Якщо $ILb_M^{(m,n)} > \text{ThrL}$, то сегмент старших бітових значень $ILb^{(m,n)}$ та сегмент молодших бітових значень $IRb^{(m,n)}$ вважатимуться інформативними.

В іншому випадку необхідно розрахувати метрику інформативності $IRb_M^{(m,n)}$ для сегментів $IRb^{(m,n)}$ з молодшої бітової площини:

$$IRb_M^{(m,n)} = \text{Metr}(IRb^{(m,n)}).$$

Щоб визначити, чи є сегмент $IRb^{(m,n)}$ інформативним, необхідно використовувати порогове значення ThrR , що сформоване на основі молодших бітових значень. Якщо $IRb_M^{(m,n)} > \text{ThrR}$, то сегмент старших бітових значень $ILb^{(m,n)}$ та сегмент молодших бітових значень $IRb^{(m,n)}$ вважатимуться інформативними.

Врахування метрики інформативності $IRb_M^{(m,n)}$ при кодуванні сегментів молодшої бітової площини дозволяє забезпечити цілісність важливої інформації. Така інформація може бути корисною для задач виявлення об'єктів на великій відстані або пошук замаскованих об'єктів.

Якщо жодна умова інформативності невиконана, то сегменти $ILb^{(m,n)}$ та $IRb^{(m,n)}$ вважатимуться неінформативними.

Подальша обробка сегментів повинна здійснюватися враховуючи визначений рівень інформативності. На Рисунку 5 зображена загальна схема застосування семантично-орієнтованої обробки до бітових площин.

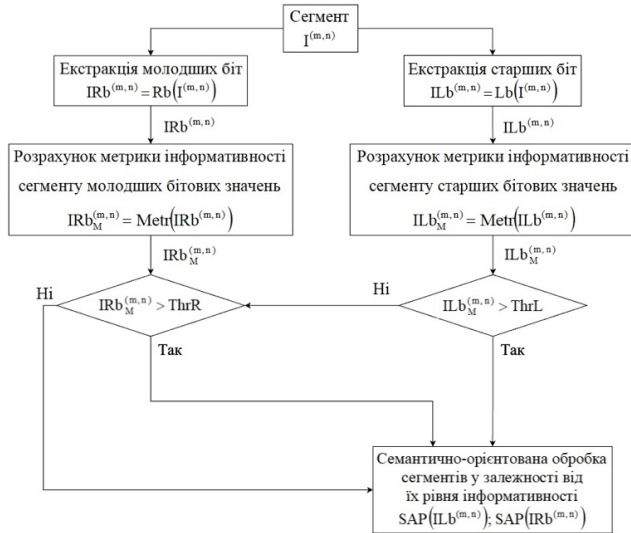


Рис. 5. Схема процесу семантично-орієнтованої обробки бітових площин

Обчислювальна складність запропонованого методу стиснення визначається кількістю операцій над блоком даних і є лінійно пропорційною кількості елементів у блоці. Метод характеризується однопрохідною обробкою даних без використання складних ітеративних процедур, багатопрохідних алгоритмів чи підходів з високою обчислювальною складністю, таких як методи на основі штучного інтелекту.

Архітектура методу передбачає можливість гнучкого балансування між ступенем стиснення та обчислювальними витратами. Зокрема, сегменти з меншою інформативністю можуть бути закодовані спрощеними методами без застосування вейвлет-перетворення, що додатково знижує обчислювальну складність для таких фрагментів зображення.

Поєднання лінійної залежності складності від обсягу даних та відсутності потреби у комплексних обчисленнях робить запропонований метод придатним для реалізації на бортових та мобільних платформах з обмеженими обчислювальними ресурсами.

5 Експериментальна оцінка

Експериментальна оцінка розробленого методу проводилась на ІЧ зображеннях із глибиною пікселів 16 біт. На Рисунку 6 зображена карта метрики інформативності $ILb_M^{(m,n)}$ для одного з ІЧ зображень. Для побудови карти була розрахована метрика інформативності $ILb_M^{(m,n)}$ для кожного сегмента.

З отриманих значень була побудована матриця, де утворені метрики інформативності позиційно відповідають сегменту, для якого вони були розраховані. Можна побачити, що більші значення метрики інформативності відповідають розташуванню об'єкта інтересу на кадрі.

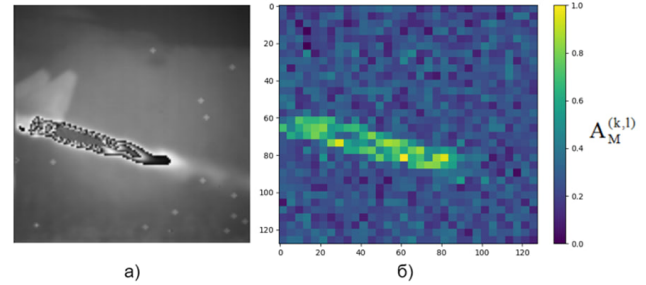


Рис. 6. Карта метрики інформативності $A_M^{(k,l)}$: а) початкове ІЧ зображення; б) значення метрики інформативності $A_M^{(k,l)}$

Оскільки сегменти з високим значенням метрики інформативності $ILb_M^{(m,n)}$ позиційно відповідають розташуванню об'єкта інтересу у кадрі, це можна застосувати для підвищення цілісності таких сегментів. Для цього використовуємо метод спектрально-групового кодування (СГК). Застосуємо до нього семантично-орієнтовану обробку, назовемо такий метод семантично-орієнтованим кодуванням (СОК).

На Рисунку 7 представлено декодоване зображення, що було закодовано методами СГК та СОК із однаковими конфігураціями квантування. Оскільки після застосування бітового розділення були утворені сегменти старших біт $ILb^{(m,n)}$ та молодших біт $IRb^{(m,n)}$, до них обох було застосоване квантування у процесі подальшого кодування. Однак до інформативних сегментів у методі СОК квантування не було застосоване. Тому об'єкт інтересу на Рис. 7, а зберіг семантичну цілісність. Тоді як кадр на Рис. 7, б втратив інформативність.

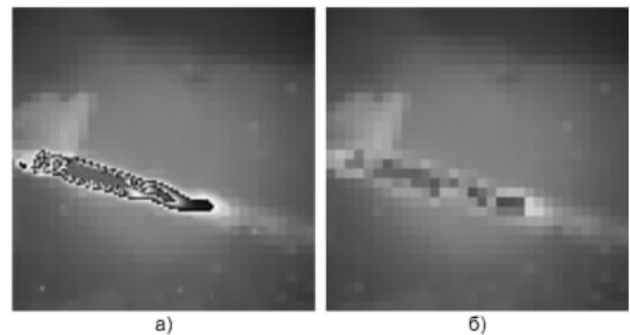


Рис. 7. Декодоване ІЧ зображення: а) після кодування методом СОК; б) після кодування методом СГК

Для порівняльного аналізу було закодовано набір ІЧ зображень за допомогою двох методів СОК та СГК. Конфігурації були налаштовані таким чином, щоб значення пікового співвідношення сигналу до шуму (peak signal-to-noise ratio, PSNR) збігалися,

забезпечуючи статистично однакову якість кодування. Метод СОК продемонстрував вищі коефіцієнти стиснення — в середньому на 2.63 одиниці більше, ніж SGK. Результати зображені на Рисунку 8.

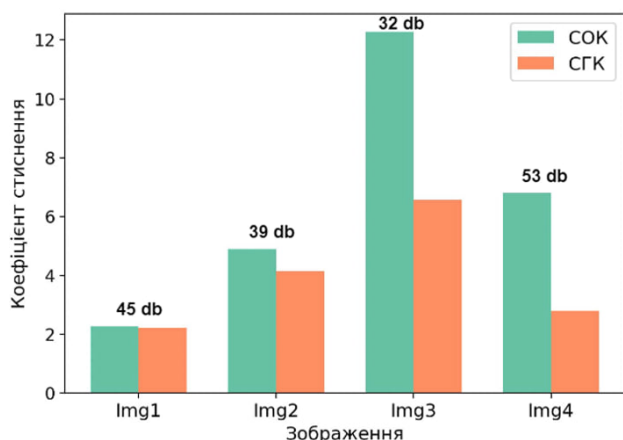


Рис. 8. Коефіцієнти стиснення після кодування методами СОК та SGK при однакових значеннях PSNR у децибелах (db)

Отримані результати свідчать про здатність СОК агресивніше стискати фонові ділянки кадру. Таким чином, розроблений метод дозволяє отримати компактніше представлення ІЧ зображень без втрати якості об'єктів інтересу.

Було проведено оцінку коефіцієнта стиснення семантично-орієнтованого кодування у порівнянні з JPEG 2000. Як і в попередньому експерименті, обидва способи кодування було налаштовано таким чином, щоб показники PSNR були однаковими. Результати зображені на Рисунку 9.

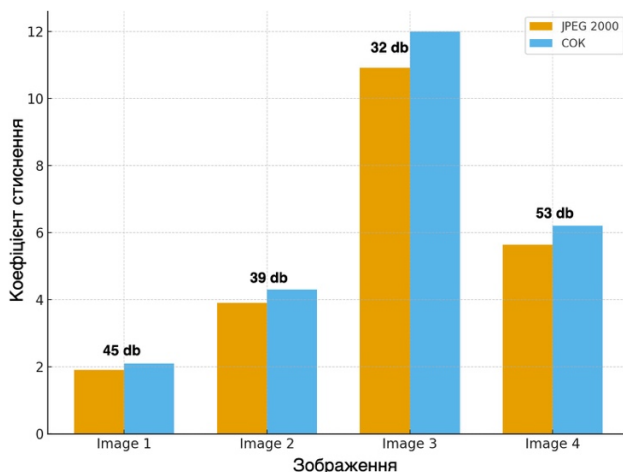


Рис. 9. Коефіцієнти стиснення після кодування методами JPEG 2000 та СОК при однакових значеннях PSNR у децибелах (db)

З отриманих результатів можна зробити висновок, що запропонований метод СОК у середньому має більший коефіцієнт стиснення на 9%.

Висновки

1. Створено метод семантично-орієнтованої обробки бітових площин інфрачервоних зображень. Метод заснований на:

- 1) розділенні бітових площин, що включає виділення старших та молодших бітових значень;
- 2) застосуванні семантично-орієнтованої обробки, для виявлення сегментів із підвищеною інформативністю;
- 3) врахуванні семантичних відмінностей бітових площин при їх семантичному аналізі (Рис. 5).

2. Отримані експериментальні результати дозволяють підтвердити ефективність роботи розробленого методу.

2.1. Метод дозволяє забезпечити високу якість сегментів, що позиційно відповідають розташуванню об'єктів інтересу (Рис. 7).

2.2. Метод показав покращення коефіцієнта стиснення при його застосуванні до спектрально-групового кодування (SGK) на 2.63 одиниці (Рис. 8).

Наукова новизна.

Удосконалено метод семантично-орієнтованої обробки ІЧ зображень. Особливістю методу є врахування локалізованих високочастотних показників зображення у його бітових площинах, що дозволяє виявляти теплові сигнатури об'єктів із високою ефективністю з точки зору обчислювальних витрат та забезпечити селективне кодування сегментів у залежності від їх інформативності. Таким чином можна підвищити ефективність роботи систем дистанційного спостереження із застосуванням ІЧ інформаційних каналів.

Для покращення точності визначення метрики інформативності сегментів кадру, у подальшому планується враховувати параметри ІЧ камери, такі як рівень шумів у вихідному сигналі, просторову роздільну здатність, оптичне наближення, та інші показники, що мають вплив на формування кадрів.

Також у подальшому важливо враховувати рівень шумів ІЧ камери при розділенні сегментів на бітові площини.

References

- [1] Naga Lakshmi, T., Jyothi, S. (2020). Performing Image Compression and Decompression Using Matrix Substitution Technique. In: Jyothi, S., Mamatha, D., Satapathy, S., Raju, K., Favorskaya, M. (eds) *Advances in Computational and Bio-Engineering. CBE 2019*. Learning and Analytics in Intelligent Systems, Vol. 15, pp. 25–36, Springer, Cham., doi: 10.1007/978-3-030-46939-9_3.
- [2] Bausys R. and Kazakeviciute-Januskeviciene G. (2021). Qualitative Rating of Lossy Compression for Aerial Imagery by Neutrosophic WASPAS Method. *Symmetry*, Vol. 13, Iss. 2, 273, DOI: 10.3390/sym13020273.
- [3] Putra A. B. W., Supriadi S., Wibawa A., Pranolo A. and Gaffar A. F. O. (2020). Modification of a gray-level dynamic range based on a number of binary bit representation for image compression. *Science in*

- Information Technology Letters*, Vol. 1, No. 1, pp. 9–16, doi: 10.31763/sitech.v1i1.17.
- [4] Zhang X., Chu F. (2022). Multimedia Real-Time Transmission Protocol and Its Application in Video Transmission System. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2022, Article ID 8654756, 7 p., DOI: 10.1155/2022/8654756.
 - [5] Omar H. M., Morsli M. and Yaichi S. (2020). Image Compression using Principal Component Analysis. *Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Mathematics and Information Technology (ICMIT)*, pp. 226–231, doi: 10.1109/ICMIT47780.2020.9047014.
 - [6] Zhang L., Yang W., Li C. (2024). Enhanced High-Definition Video Transmission for Unmanned Driving in Mining Environments. *Applied Sciences*, Vol. 14, Iss. 10, DOI: 10.3390/app14104296.
 - [7] Garg G. and Kumar R. (2022). Analysis of image types, compression techniques and performance assessment metrics: A review. *Journal of Information and Optimization Sciences*, Vol. 43, No. 3, pp. 429–436, doi: 10.1080/02522667.2022.2037282.
 - [8] Qin C., Pournaras E. (2023). Coordination of drones at scale: Decentralized energy-aware swarm intelligence for spatio-temporal sensing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 157, 104387, DOI: 10.1016/j.trc.2023.104387.
 - [9] Uthayakumar J., Elhoseny M. and Shankar K. (2020). Highly Reliable and Low-Complexity Image Compression Scheme Using Neighborhood Correlation Sequence Algorithm in WSN. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 69, No. 4, pp. 1398–1423, doi: 10.1109/TR.2020.2972567.
 - [10] Descampe A. et al. (2021). JPEG XS—A New Standard for Visually Lossless Low-Latency Lightweight Image Coding. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 109, Iss. 9, pp. 1559–1577, DOI: 10.1109/jproc.2021.3080916.
 - [11] Resdiansyah, Darmawan J., Wijaya A. H., Hakim L. and Tannady H. (2021). Comparing Freeman Chain Code 4 Adjacency Algorithm and LZMA Algorithm in Binary Image Compression. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1783, 012045, doi: 10.1088/1742-6596/1783/1/012045.
 - [12] Li C., et. al. (2024). MISC: Ultra-low Bitrate Image Semantic Compression Driven by Large Multimodal Model. *JOURNAL OF LATEX CLASS FILES*, Vol. 1, Iss. 1, pp. 1–13, DOI: arxiv-2402.16749.
 - [13] Qasim A., Din R. and Alyousuf F. Q. A. (2020). Review on techniques and file formats of image compression. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 9, No. 2, pp. 602–610, doi: 10.11591/eei.v9i2.2085.
 - [14] Brahimi T., Khelifi F., Kacha A. (2021). An efficient JPEG-2000 based multimodal compression scheme. *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 80, Iss. 14, pp. 21241–21260, DOI: 10.1007/s11042-021-10776-5.
 - [15] Lang H., Beischl A., Leis V., Boncz P., Neumann T. and Kemper A. (2020). Tree-Encoded Bitmaps. *Proceedings of the 2020 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 937–967, doi: 10.1145/3318464.3380588.
 - [16] Dua Y., Kumar V., Singh R. S. (2020). Comprehensive review of hyperspectral image compression algorithms. *SPIE, Optical Engineering*, Vol. 59, Iss. 9, 090902, DOI: 10.1117/1.OE.59.9.090902.
 - [17] Barannik V., Hahanova A., Slobodyanyuk A. (2009). Architectural presentation of isotopic levels of relief of images. *2009 IEEE 10th International Conference — The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, pp. 385–387.
 - [18] Chi, X., Zhang, Y., Di Maio, D., Lieven, N. A. J. (2021). Viability of Image Compression in Vibrothermography. *Experimental Techniques*, Vol. 45, pp. 345–362, doi: 10.1007/s40799-020-00395-4.
 - [19] Barannik D. and Barannik V. (2022). Steganographic Coding Technology for Hiding Information in Infocommunication Systems of Critical Infrastructure. *2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, pp. 88–91, doi: 10.1109/ATIT58178.2022.10024185.
 - [20] Son, D.-M., Kwon H.-J., and Lee S.-H. (2022). Visible and Near Infrared Image Fusion Using Base Tone Compression and Detail Transform Fusion. *Chemosensors*, Vol. 10, No. 4: 124, doi :10.3390/chemosensors10040124.
 - [21] Barannik V., Barannik N., Ignatiev O., Khimenko V. (2021). Method of indirect information hiding in the process of video compression. *Radioelectronic and Computer Systems*, №. 4, pp. 119–131, doi: 10.32620/reks.2021.4.
 - [22] Zhang X., Sanjie J., Bakhtiari S. and Heifetz A. (2022). Compression of Pulsed Infrared Thermography Data With Unsupervised Learning for Nondestructive Evaluation of Additively Manufactured Metals. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 9094–9107, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3141654.
 - [23] Barannik V., Babenko Y., Barannik V., Khimenko A., Kulitsa O., Matviichuk-Yudina O. (2020). Significant Microsegment Transformants Encoding Method to Increase the Availability of Video Information Resource. *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, pp. 52–56, DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349256.
 - [24] Li S., Li Y., Li Y., Li M. and Xu X. (2021). YOLO-FIRI: Improved YOLOv5 for Infrared Image Object Detection. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 141861–141875, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120870.
 - [25] Mentzer F., Toderici G., Tschannen M., Agustsson E. (2020). High-Fidelity Generative Image Compression. *34th Conference on Neural Information Processing Systems*, DOI: 10.48550/arXiv.2006.09965.
 - [26] Fan, K., Hong, K., and Li F. (2021). Infrared Image Super-Resolution via Progressive Compact Distillation Network. *Electronics*, Vol. 10, No. 24: 3107, doi :10.3390/electronics10243107.
 - [27] Krasnorutsky A.; Onyshchenko R.; Barannik D.; Barannik V. (2022). The Methods of Intellectual Processing of Video Frames in Coding Systems in Progress Aeromonitor to Increase Efficiency and Semantic Integrity. *2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, pp. 53–56, doi: 10.1109/ATIT58178.2022.10024208.
 - [28] Huang Y., Jiang Z., Lan R., Zhang S. and Pi K. (2021). Infrared Image Super-Resolution via Transfer Learning and PSRGAN. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 28, pp. 982–986, doi: 10.1109/LSP.2021.3077801.
 - [29] Umam, A. K., Ngastiti, P. T. B., Alfian A., Shahadah Z., & Muamalah A. F. (2024). The Application of Discrete Wavelet Transform for Digital Image Compression. *Jurnal Matematika Sains dan Teknologi*, Vol. 25, Iss. 1, pp. 01–08, doi: 10.33830/jmst.v25i1.3955.2024.

- [30] Manda, M. P., and Kim, H. S. (2020). A Fast Image Thresholding Algorithm for Infrared Images Based on Histogram Approximation and Circuit Theory. *Algorithms*, Vol. 13, No. 9: 207, doi: 10.3390/a13090207.
- [31] Starosolski R. (2020). Hybrid Adaptive Lossless Image Compression Based on Discrete Wavelet Transform. *Entropy*, Vol. 22, Iss. 7, 751, DOI: 10.3390/e22070751.
- [32] Uthayakumar J., Elhoseny M. and Shankar K. (2020). Highly Reliable and Low-Complexity Image Compression Scheme Using Neighborhood Correlation Sequence Algorithm in WSN. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 69, No. 4, pp. 1398-1423, doi: 10.1109/TR.2020.2972567.
- [33] Ma H., Liu D., Yan N., Li H. and Wu F. (2022). End-to-End Optimized Versatile Image Compression With Wavelet-Like Transform. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 44, No. 3, pp. 1247-1263, doi: 10.1109/TPAMI.2020.3026003.
- [34] Hou, F., Zhang, Y., Zhou, Y., Zhang, M., Lv B., and Wu J. (2022). Review on Infrared Imaging Technology. *Sustainability*, Vol. 14, No. 18: 11161, doi: 10.3390/su141811161.
- [35] Abdulazeez A. M., Zeebaree D. Q., Zebari D. A., Zebari G. M., Adeen I. M. N. (2020). The Applications of Discrete Wavelet Transform in Image Processing: A Review. *Journal of Soft Computing and Data Mining*, Vol. 1, No. 2, doi: 10.30880/jscdm.2020.01.02.004.
- [36] Hou R. et al. (2020). VIF-Net: An Unsupervised Framework for Infrared and Visible Image Fusion. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, Vol. 6, pp. 640-651, doi: 10.1109/TCI.2020.2965304.

Method of Bit Plates Semantic-Oriented Processing of Infrared Images

Barannik V. V., Berchanov A. A., Barannik V. V., Sukhanov O. Yu., Pertsev P. D., Lykholdiev O. S., Yudin O. K., Prokopenko R. O., Chaun Yu. M.

The paper considers the features of developing a semantic-oriented bit-plane processing method for infrared (IR) images, aimed at enhancing the efficiency of remote surveillance systems under resource-constrained conditions. The article presents an approach to reducing the bit volume of IR data without losing critical semantic information, which is essential for object detection and identification tasks. The advantages of employing an additional IR information channel are revealed, as it ensures reliable system operation under limited visibility, object camouflage, or adverse backgrounds. At the same time, the challenge of increasing the data volume for real-time

processing is noted. It is found that traditional methods (PNG, JPEG-LS, JPEG 2000, HEVC) either have excessive computational complexity or fail to preserve thermal semantics. Thus, the paper defines an **applied scientific task** — to improve the efficiency of remote surveillance systems using IR information channels. To address this, the article proposes a method based on bit-plane bifurcation (extraction of most and least significant bits) followed by semantic-oriented processing. The most significant bits retain the global structure and primary scene information, while the least significant bits carry residual noise or imperceptible details. This allows for adaptive compression strategies depending on the informativeness of individual segments. The method includes hierarchical decomposition of the image into segments and subsegments for localized analysis. For each segment, informativeness is evaluated in the spectral domain using the Haar wavelet transform, followed by normalization of informativeness metrics and selective encoding: informative segments are encoded with minimal loss, non-informative ones with more aggressive compression. The informativeness metric is based on high-frequency components that represent thermal contours of objects. Specifically, it is computed as the normalized sum of the absolute values of high-frequency coefficients after transforming the subsegments into the difference domain. Threshold values are used to classify segments as informative or non-informative. Depending on the informativeness class, further selective encoding is performed to preserve the reconstruction accuracy of key scene areas. Special attention is given to preserving the key thermal structure of the scene even when reducing bit depth to 8 bits. A comparative experimental analysis was carried out on a dataset of 16-bit images. Under conditions of equal PSNR, the proposed method demonstrates an average compression ratio improvement of 2.63. Visual analysis showed that, unlike the traditional approach, the proposed method preserves the thermal integrity of objects of interest after decoding. Hence, the **goal of the study** is to develop a semantic-oriented bit-plane processing method for infrared images. The proposed method has practical value for integration into onboard systems of unmanned aerial vehicles (UAVs), monitoring systems, and other mobile platforms, where transmission speed and computational constraints are critical.

Keywords: remote sensing systems; infrared image processing; bit plane bifurcation; information content metric; Haar wavelet transform; adaptive image segmentation; thermal signature preservation; low computational complexity image compression; semantic-oriented coding; selective image compression