

УДК 621.327:681.5

Метод групового кодування інфрачервоних зображень у спектрально-хвильовому просторі

Бараннік В. В.¹, Берчанов А. А.¹, Бараннік В. В.², Шейгас О. М.³, Перцев П. Д.², Вовк О. В.³,
Бабенко Ю. М.⁴, Прокопенко Р. О.², Ерошенко В. П.³

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

²Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

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

⁴Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

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

Розглянуто основні особливості побудови інтелектуалізованих сервісів обміну інфрачервоними зображеннями (ІЧЗ). А саме – можливість отримання інформаційних мета-відомостей. Серед такої інформації може бути: клас та стан об'єктів інтересу, ідентифікація фрагментів зображення за рівнем їх інформативності. Використання мета-відомостей, як результату інтелектуалізації, можливе у широкому колі прикладних задач. Зокрема у таких, які вирішуються із використанням безпілотних бортових комплексів. Одні з таких задач: супровід динамічних об'єктів інтересу, автономне наведення бортових комплексів. У процесі виконання зазначених задач бортовими комплексами можливе прийняття рішень у таких режимах: ручному, автономному, автоматизованому. Однак існують умови, за яких можливий гібридний варіант прийняття рішень. У такому режимі на одних етапах рішення бортовий комплекс може перебувати в автономному стані, а на інших – у автоматизованому. Серед умов, які мають вплив на вибір режиму: наявність інформаційного протиборства, кризові ситуації, використання роєвих технологій. Враховуючи режими використання та задачі, які виконують бортові комплекси, зростають вимоги до повноти інформації (збільшення кількості кадрів, обмеження спотворень, підвищення кількості пікселів для опису об'єктів). Наслідком їх дотримання буде збільшення інформаційного навантаження на інфокомунікаційні системи. Отже з'являється суперечність між вимогами до якісних характеристик: оперативність доставки інформації, цілісність ІЧ кадрів. Тому актуальною є **науково-прикладна задача**, яка стосується підвищення якісних характеристик надання інтелектуалізованих інформаційних сервісів на основі джерел ІЧЗ в прикладних задачах з використанням бортових комплексів. У результаті аналізу сучасних технологій для вирішення наведеної задачі, таких як PNG та JPEG 2000, були виявлені такі недоліки: висока обчислювальна складність, внесення суттєвих спотворень до семантики, низька ефективність у сегментах із високою кількістю неоднорідних об'єктів. Отже обґрунтована **мета досліджень статті**: розробка методу групового кодування даних у спектрально-хвильовому просторі. У статті описані етапи розробки методу, які починаються із декомпозиції ІЧЗ на ієрархічну структуру сегментів та мінісегментів. Це дозволяє локалізувати однорідні області зображення. До утворених сегментів у подальшому застосовується перетворення у спектральний домен та спектрально-групове кодування, що дозволяє зменшити бітовий об'єм. Була проведена експериментальна оцінка розробленого методу на базі набору зображень Open Turbulent Image Set (OTIS), який включає PNG зображення із різним рівнем інформативності. Бітовий об'єм зображень вдалося зменшити у середньому на 37%. Було показано, що розроблений метод має перевагу у коефіцієнті стиснення на 25% при однакових значеннях пікового співвідношення сигналу до шуму (peak signal-to-noise ratio, PSNR).

Ключові слова: оперативність доставки інфрачервоних зображень; спектрально-хвильовий домен; зменшення бітового об'єму; спектрально-групове кодування; семантична цілісність кадрів; сегментація кадрів

DOI: [10.20535/RADAP.2025.99.24-34](https://doi.org/10.20535/RADAP.2025.99.24-34)

Вступ. Постановка проблеми

Стан сучасних інфокомунікаційних технологій має тенденцію до інтелектуалізації. Це викликано розвитком теоретичної бази та продуктивністю об-

числювальних комплексів (апаратно-технологічної бази).

Такий характерний напрямок стосується також технологій, які пов'язані з наданням сервісів видової інформації. До видової інформації відносяться

інформаційні канали, які формуються такими джерелами: оптико-електронні, інфрачервоні (теплові), радіолокаційні, телевізійні. Кожен з таких інформаційних каналів має характерні особливості свого прикладного застосування. Саме комплексне використання різних типів джерел видової інформації створює умови для отримання найбільш ґрунтовної та достовірної інформації щодо об'єктів моніторингу або досліджень.

Останнім часом практичне застосування вказує на те, що одним з важливих каналів видової інформації є інфрачервоний. Це зумовлено такими характерними чинниками теплових каналів:

- виявлення об'єктів, які не мають радіолокаційного контрасту, і не виявляються приладами, що працюють у видимому діапазоні спектра (наприклад, в нічний час);

- виявлення об'єктів, замаскованих під камуфльованими сітками, у тому числі малорозмірних об'єктів, а також відмінність справжніх об'єктів від уявних за різницею інтенсивності випромінювання «об'єкт-фон»;

- розкриття та уточнення наявності техніки та транспортних засобів у місцях скупчення та в русі.

Відповідно в загальному випадку необхідно надати інформаційний ресурс з потрібним рівнем якісних властивостей за вимогою користувача. У разі інтелектуалізованих інформаційних сервісів створюється можливість додаткового надання метавідомостей. Мета-відомості формуються за результатами інтелектуального аналізу інфрачервоних зображень (ІЧЗ). Результатом інтелектуального аналізу ІЧЗ може бути [1–3]:

- ідентифікація фрагментів зображення за рівнем їх інформативності;
- ідентифікація об'єктів на зображенні;
- розпізнавання класу та стану об'єктів інтересу;
- кластеризація та/або типізація сукупності різнорідних об'єктів операційних районів;
- додаткова інформація, як компонент загального видового моніторингу.

Означені процеси використовуються в таких прикладних задачах [4–7]:

- виявлення об'єктів інтересу в процесі дистанційного моніторингу;

- створення баз даних теплових портретів цілей;

- прогнозування динаміки поведінки об'єктів;

- семантичний пошук об'єктів інтересу в базах ІЧЗ;

- селективний захист фрагментів інфрачервоних зображень;

- позиціонування динамічних об'єктів та їх супроводження з можливістю прив'язки до карти місцевості;

- автономне наведення (самонаведення) роботизованих бортових комплексів відносно об'єктів інтересу;

- системи штучного зору.

В свою чергу користувачами ІЧЗ можуть бути:

- особа, яка приймає рішення;

- інформаційна система (машинний комплекс).

В першому випадку процес обробки та аналізу ІЧЗ здійснюється в автоматизованому режимі. Для другого випадку створюються умови щодо автономної обробки та прийняття рішення.

На даний час в залежності від класу прикладних завдань використовуються обидва режими. Актуальним та значимим прикладом тут є рішення прикладних завдань з використанням бортових комплексів [1, 6, 7].

Найчастіше бортові комплекси використовуються для:

- отримання інформації щодо дистанційних районів моніторингу (контролю);

- дистанційного виявлення, класифікації та аналізу об'єктів інтересу;

- виявлення та супроводження динамічних об'єктів.

Управління бортовими комплексами здійснюється в ручному, автоматизованому та автономному режимах. Водночас в умовах кризових ситуацій, наявності інформаційного протистояння та ройових (swarm) [8, 9] технологій зростає актуальність гібридного варіанту управління бортовим комплексом. В цьому разі на окремих етапах рішення прикладних завдань управління бортовим комплексом здійснюється в автономному режимі.

Тоді наряду з оперативністю доставки ІЧЗ значимим є забезпечення потрібного рівня їхньої повноти, цілісності та актуальності. Звідси зростають вимоги щодо:

- збільшення кількості оновлених кадрів ІЧЗ-ресурсу, що формуються та передаються в одиницю часу;

- обмеженості спотворень, які вносяться в процесі обробки ІЧЗ;

- підвищення кількості пікселів, які використовуються для описання об'єктів моніторингу.

Наслідками чого є значне зростання інформаційного навантаження на інфокомунікаційні системи щодо обробки та передачі даних.

Отже існує суперечність між вимогами щодо якісних характеристик, а саме:

- оперативності доставки потоку ІЧЗ, та відповідно потребою щодо їх компактного представлення;

- цілісності ІЧЗ, та відповідно обмеженістю використання технологічних процесів обробки, які пов'язано з внесенням спотворень.

Тому актуальною є **науково-прикладна задача**, яка стосується підвищення якісних характеристик надання інтелектуалізованих інформаційних сервісів на основі джерел ІЧЗ в прикладних задачах з використанням бортових комплексів.

На даний час для вирішення такої задачі розробляються та застосовуються технології обробки зо-

бражень з елементами інтелектуального аналізу. До них слід віднести такі: JPEG 2000, PNG. Основними напрямками технологічних розробок тут є [10–25]:

- 1) локалізації однорідних областей кадру;
- 2) застосування моделі описання імпульсної інформації, яка в загальному випадку може використовуватись для відокремлення шумової складової та інформації дрібних об'єктів;
- 3) визначення класу об'єктів та групового їхнього опису на ГЧЗ;
- 4) використання пакету типових об'єктів та технологій їхнього виявлення на кадрах;
- 5) технологій інтерполяційного опису фонових областей ГЧЗ.

Водночас такі технологічні механізми є [26–28]:

- 1) складними з позиції обчислювальної реалізації;
- 2) низькоефективними у разі обробки ГЧЗ: з нетиповим змістом, наприклад у разі попереднього моніторингу операційних районів з високим рівнем насиченості апріорно невизначених об'єктів; зі складною топологією взаємного розташування великої кількості неоднорідних об'єктів;
- 3) такими, що супроводжуються внесенням спотворень, які призводять до виключення можливості зворотнього відновлення семантичних складових кадрів.

Отже в сучасних технологіях кодування ГЧЗ необхідно використовувати методи кодування попередньо інтелектуально-локалізованих фрагментів інфрачервоних зображень з властивістю додаткового збільшення рівня стиснення локальних фрагментів кадрів в умовах збереження потрібного рівня їх цілісності.

Звідси *мета досліджень статті* полягає у розробці методу групового кодування даних у спектрально-хвильовому просторі.

1 Розробка методу групового кодування даних у спектрально-хвильовому просторі

Для зниження бітового об'єму пропонується використовувати кодування, яке дозволить представити однорідні сегменти зображення спектрально-груповими кодами.

Під однорідністю мається на увазі певна міра кореляції між сусідніми пікселями на зображенні. Отже кодування таких корельованих пікселів у вигляді сегментів надає можливість представлення їх у меншому бітовому обсязі.

Спектрально-групові коди будуть утворюватись у результаті кодування груп значень із спектрального домену зображення. Унаслідку заміни області

одним кодом, бітовий об'єм сегмента буде зменшений.

Розглянемо вхідне ГЧЗ як двомірну матрицю $A^{(K,L)}$. Тоді $A^{(k,l)}$ – це сегмент розміром 8 на 8 значень, де (k, l) представляють координати сегмента. Для кращої локалізації однорідних областей зображення пропонується розділити сегмент $A^{(k,l)}$ на чотири мінісегменти $A_{r,t}^{(k,l)}$ розміром 4 на 4, де (r, t) – координати мінісегмента у середині сегмента $A^{(k,l)}$. У свою чергу значення з мінісегмента $A_{r,t}^{(k,l)}$ адресуються як $A_{r,t}^{(k,l)}(q, s)$, де (q, s) – координати значення у мінісегменті $A_{r,t}^{(k,l)}$. Описану ієрархію сегментів можна зобразити схемою на Рис. 1.

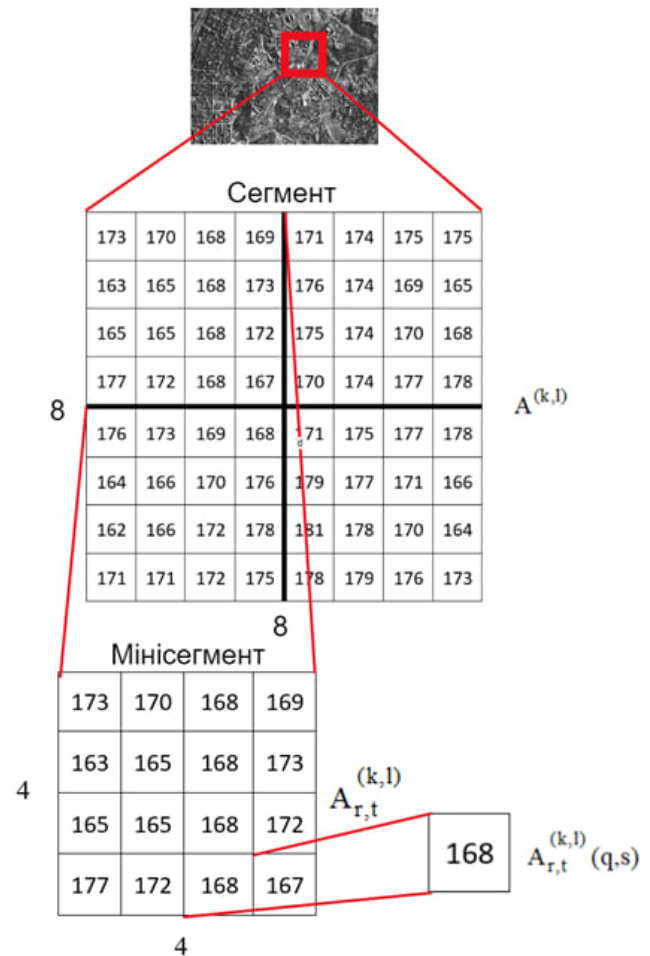


Рис. 1. Схема сегментації зображення

Для зменшення діапазону значень враховуємо кореляційні залежності елементів $A_{r,t}^{(k,l)}(q, s)$ у мінісегменті $A_{r,t}^{(k,l)}$. Перетворимо мінісегменти у різницевий простір. Для цього необхідно визначити мінімальний елемент у мінісегменті – $\mu_{r,t}^{(k,l)}$:

$$\mu_{r,t}^{(k,l)} = \min_{A_{r,t}^{(k,l)}(q,s) \in A_{r,t}^{(k,l)}} \{A_{r,t}^{(k,l)}(q, s)\}. \quad (1)$$

Перетворимо елементи мінісегмента $A_{r,t}^{(k,l)}$ у різницевий простір $A'_{r,t}^{(k,l)}$, використовуючи таку формулу:

$$A'_{r,t}^{(k,l)}(q, s) = A_{r,t}^{(k,l)}(q, s) - \mu_{r,t}^{(k,l)}, \quad (2)$$

де:

- $A_{r,t}^{(k,l)}(q, s)$ – значення з мінісегмента, де q, s координати у мінісегменті;
- $A'_{r,t}^{(k,l)}(q, s)$ – отриманий різницевий елемент.

Враховуючи, що $A_{r,t}^{(k,l)}(q, s) \in A_{r,t}^{(k,l)}$, сформуємо мінісегмент у різницевому просторі з отриманих елементів:

$$A_{r,t}^{(k,l)}(q, s) \in A_{r,t}^{(k,l)} \Rightarrow A'_{r,t}^{(k,l)} = \left\{ A'_{r,t}^{(k,l)}(q, s) \right\}, \quad (3)$$

де $A'_{r,t}^{(k,l)}$ – це мінісегмент у різницевому просторі.

Завдяки різницевому кодуванню усувається надмірна енергія між мінімальним елементом у мінісегменті $\mu_{r,t}^{(k,l)}$ та 0. Однак лишається просторова надмірність, яку також треба усунути.

Для цього пропонується трансформувати різницевий мінісегмент $A'_{r,t}^{(k,l)}$ із просторового домену у спектрально-часовий. Цього можна досягти різними методами, однак буде використаний саме метод побудови вейвлетних перетворень з використанням бази Хаара [29–35]. Він має ряд переваг:

1. Низька обчислювальна складність дозволяє кодувати та декодувати дані із меншими часовими затримками.

2. Локальні властивості, на відміну від інтегральних, як в дискретно-косинусному перетворенні, дозволяють представити спектр низькими та високими частотами. Завдяки цьому можна врахувати додаткові кореляційні залежності.

Представимо застосування вейвлетних перетворень як функціонал WH :

$$WH \left(A'_{r,t}^{(k,l)} \right) = \left\{ L_{r,t}^{(k,l)}(I), H_{r,t}^{(k,l)} \right\},$$

де:

- $A'_{r,t}^{(k,l)}$ – різницевий мінісегмент, до якого застосовується WH ;
- $H_{r,t}^{(k,l)}$ – група високочастотних значень;
- $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$ – кінцеве низькочастотне значення.

Низькочастотні значеннями $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$ та високочастотні $H_{r,t}^{(k,l)}$ суттєво відрізняються між собою. Здебільшого значення $H_{r,t}^{(k,l)}$ менші за $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$. Це обґрунтовано тим, що високочастотні значення мають деталізуючі властивості та отримуються унаслідок операцій напіврізниць. А низькочастотні значення отримуються унаслідок напівсум. Відповідно динамічний діапазон більший для низькочастотних значень $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$, ніж для високочастотних $H_{r,t}^{(k,l)}$.

Відмінність низькочастотних значень $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$ проілюстрована на гістограмі (Рис. 2), побудованій на основі даних отриманих після застосування вейвлетного перетворення до різницевого мінісегмента.

На гістограмі представлений динамічний діапазон низьких та високих частот:

- стовпчики H1...H15 відповідають модулю високочастотних значень $|H_{r,t}^{(k,l)}|$;
- стовпчик L16 відповідає низькочастотному значенню $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$.

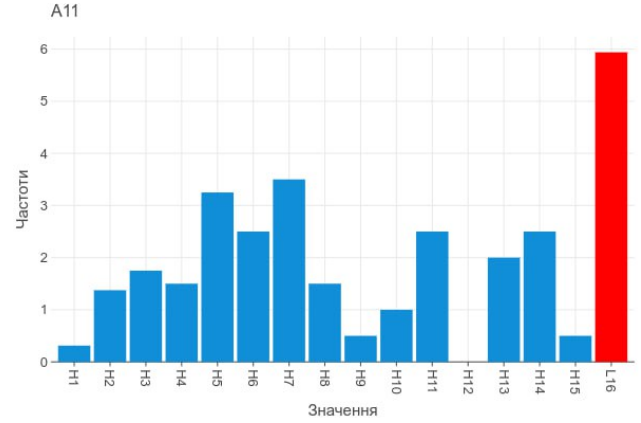


Рис. 2. Гістограма динамічного діапазону низьких та високих частот $L_{1,1}^{(1,1)}(I), |H_{1,1}^{(1,1)}|$

У наведеній гістограмі низькочастотне значення $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$ значно більше за максимальне високочастотне $|H_{r,t}^{(k,l)}|$.

Цю суттєву різницю необхідно врахувати, оскільки вона може впливати на ефективність подальшого кодування. Відповідно кодування необхідно проводити із врахуванням частотних динамічних діапазонів. Для цього відокремимо низькочастотні значення $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$ в окрему групу $L^{(k,l)}$ відповідно сегменту $A^{(k,l)}$. У результаті сегмент $A^{(k,l)}$ буде представлений групою кінцевих низькочастотних значень $L^{(k,l)}$ та групами високочастотних значень $H_{r,t}^{(k,l)}$.

Для відновлення різницевого мінісегмента $A'_{r,t}^{(k,l)}$ серед низьких частот необхідне лише кінцеве низькочастотне значення $L_{r,t}^{(k,l)}(I)$. Тому формування групи низькочастотних значень $L^{(k,l)}$ для сегмента включає тільки кінцеві низькочастотні значення:

$$L^{(k,l)} = \left\{ L_{1,1}^{(k,l)}(I), L_{1,2}^{(k,l)}(I), L_{2,1}^{(k,l)}(I), L_{2,2}^{(k,l)}(I) \right\}. \quad (4)$$

Групи низькочастотних значень $L^{(k,l)}$ та високочастотних значень $H_{r,t}^{(k,l)}$ з кожного сегмента $A^{(k,l)}$ необхідно трансформувати у компактнішу форму. Тобто зменшити їхній бітовий обсяг.

Для цього групи низькочастотних значень $L^{(k,l)}$ сегмента $A^{(k,l)}$, пропонується кодувати використовуючи таку формулу спектрально-групового ко-

дування:

$$CL^{(k,l)} = \sum_{g=1}^{\text{len}(L^{(k,l)})} \left[L^{(k,l)}(g) \right] \cdot [\lambda]^{\text{len}(L^{(k,l)})-g}; \quad (5)$$

$$\lambda = \max_{L^{(k,l)}(g) \in L^{(k,l)}} \left\{ L^{(k,l)}(g) \right\},$$

де:

- λ – максимальний елемент у групі низькочастотних значень $L^{(k,l)}$;
- $L^{(k,l)}(g)$ – елемент із групи низькочастотних значень $L^{(k,l)}$ з порядковим номером g ;
- $\text{len}(L^{(k,l)})$ – кількість елементів у групі низькочастотних значень $L^{(k,l)}$. Відповідає кількості мінісегментів у сегменті $A^{(k,l)}$;
- $CL^{(k,l)}$ – код із сукупності низькочастотних значень $L^{(k,l)}$.

Подібним чином застосуємо спектрально-групове кодування до кожної групи високочастотних значень $H_{r,t}^{(k,l)}$ з кожного мінісегмента $A_{r,t}^{(k,l)}$ за такою формулою:

$$CH_{r,t}^{(k,l)} = \sum_{g=1}^{\text{len}(H_{r,t}^{(k,l)})} \left[|H_{r,t}^{(k,l)}(g)| \right] \cdot [\gamma]^{\text{len}(H_{r,t}^{(k,l)})-g};$$

$$\gamma = \max_{H_{r,t}^{(k,l)}(g) \in H_{r,t}^{(k,l)}} \left\{ |H_{r,t}^{(k,l)}(g)| \right\};$$

$$\text{len}(H_{r,t}^{(k,l)}) = R \cdot T - 1, \quad (6)$$

де:

- γ – максимальний елемент у сукупності високочастотних значень $H_{r,t}^{(k,l)}$ по модулю;
- $H_{r,t}^{(k,l)}(g)$ – елемент у сукупності високочастотних значень $H_{r,t}^{(k,l)}$ з порядковим номером g ;
- $\text{len}(H_{r,t}^{(k,l)})$ – кількість елементів у групі високочастотних значень $H_{r,t}^{(k,l)}$ мінісегмента $A_{r,t}^{(k,l)}$;
- $CH_{r,t}^{(k,l)}$ – код із набору значень $H_{r,t}^{(k,l)}$.

У наведених вище формулах використовується вираз [...] для відокремлення цілого числа від залишку. Наприклад $[4.75] = 4$. Збереження залишку для відновлення даних без втрат буде розглянуто окремо.

В результаті кодування кожен сегмент $A^{(k,l)}$ буде представлений кодом низькочастотних значень $CL^{(k,l)}$ та кодами високочастотних значень $CH_{r,t}^{(k,l)}$ відповідно до кожного мінісегмента $A_{r,t}^{(k,l)}$.

2 Приклад застосування розробленого методу

Розглянемо сегментацію зображення на прикладах. У ролі сегмента візьмемо матрицю:

$$A^{(1,1)} = \begin{pmatrix} 173 & 170 & 168 & 169 & 171 & 174 & 175 & 175 \\ 163 & 165 & 168 & 173 & 176 & 174 & 169 & 165 \\ 165 & 165 & 168 & 172 & 175 & 174 & 170 & 167 \\ 177 & 172 & 168 & 167 & 170 & 174 & 177 & 178 \\ 176 & 173 & 169 & 168 & 171 & 175 & 177 & 178 \\ 164 & 166 & 170 & 176 & 179 & 177 & 171 & 166 \\ 162 & 166 & 172 & 178 & 181 & 178 & 170 & 164 \\ 171 & 171 & 172 & 175 & 178 & 179 & 176 & 173 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Відповідно у ролі мінісегмента $A_{1,1}^{(1,1)}$ виступатиме наступна матриця:

$$A_{1,1}^{(1,1)} = \begin{pmatrix} 173 & 170 & 168 & 169 \\ 163 & 165 & 168 & 173 \\ 165 & 165 & 168 & 172 \\ 177 & 172 & 168 & 167 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Значення з мінісегмента $A_{1,1}^{(1,1)}$ можна отримати таким чином:

$$A_{1,1}^{(1,1)}(1,1) = 173; \quad A_{1,1}^{(1,1)}(2,1) = 170;$$

$$A_{1,1}^{(1,1)}(1,2) = 163; \quad A_{1,1}^{(1,1)}(2,2) = 165.$$

Розглянемо приклад перетворення у різницевий простір мінісегмента $A_{1,1}^{(1,1)}$, формула (8). Мінімальним значенням мінісегмента $A_{1,1}^{(1,1)}$ буде $\mu_{1,1}^{(1,1)}(1,1) = 163$.

Із утворених різницевоїх значень формується мінісегмент у різницевому просторі $A_{1,1}'^{(1,1)}$ (Рис. 3).

$$A_{1,1}^{(1,1)} = \begin{pmatrix} 173 & 170 & 168 & 169 \\ 163 & 165 & 168 & 173 \\ 165 & 165 & 168 & 172 \\ 177 & 172 & 168 & 167 \end{pmatrix} \implies A_{1,1}'^{(1,1)} = \begin{pmatrix} 10 & 7 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \\ 12 & 7 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Утворення різницевого мінісегмента $A_{1,1}'^{(1,1)}$

Наступним кроком треба перетворити різницевий мінісегмент $A_{1,1}'^{(1,1)}$ у спектральний домен використовуючи вейвлет перетворення: $WH(A_{1,1}'^{(1,1)})$. Початкова група низькочастотних значень L_0 буде дорівнювати значенням мінісегмента:

$$A_{1,1}'^{(1,1)} = L_0 = \begin{pmatrix} 10 & 7 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \\ 12 & 7 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Розрахунок групи значень L_1 відбувається таким чином:

$$L_1 = \left\{ \begin{aligned} \ell_1^{(1)} &= \frac{L_0(1) + L_0(2)}{2} = \frac{10 + 7}{2} = 8.5; \\ \ell_2^{(1)} &= \frac{L_0(3) + L_0(4)}{2} = \frac{5 + 6}{2} = 5.5; \\ \ell_3^{(1)} &= \frac{L_0(5) + L_0(6)}{2} = \frac{0 + 2}{2} = 2; \\ \ell_4^{(1)} &= \frac{L_0(7) + L_0(8)}{2} = \frac{5 + 10}{2} = 7.5; \\ \ell_5^{(1)} &= \frac{L_0(9) + L_0(10)}{2} = \frac{2 + 2}{2} = 2; \\ \ell_6^{(1)} &= \frac{L_0(11) + L_0(12)}{2} = \frac{5 + 9}{2} = 7; \\ \ell_7^{(1)} &= \frac{L_0(13) + L_0(14)}{2} = \frac{14 + 9}{2} = 11.5; \\ \ell_8^{(1)} &= \frac{L_0(15) + L_0(16)}{2} = \frac{5 + 4}{2} = 4.5; \end{aligned} \right. \\ \} = \{8.5; 5.5; 1; 7.5; 2; 7; 11.5; 4.5\}.$$

А розрахунок групи значень H_1 :

$$H_1 = \left\{ \begin{aligned} h_1^{(1)} &= \frac{L_0(2) - L_0(1)}{2} = \frac{7 - 10}{2} = -1.5; \\ h_2^{(1)} &= \frac{L_0(4) - L_0(3)}{2} = \frac{6 - 5}{2} = 0.5; \\ h_3^{(1)} &= \frac{L_0(6) - L_0(5)}{2} = \frac{2 - 0}{2} = 1; \\ h_4^{(1)} &= \frac{L_0(8) - L_0(7)}{2} = \frac{10 - 5}{2} = 2.5; \\ h_5^{(1)} &= \frac{L_0(10) - L_0(9)}{2} = \frac{2 - 2}{2} = 0; \\ h_6^{(1)} &= \frac{L_0(12) - L_0(11)}{2} = \frac{9 - 5}{2} = 2; \\ h_7^{(1)} &= \frac{L_0(14) - L_0(13)}{2} = \frac{9 - 14}{2} = -2.5; \\ h_8^{(1)} &= \frac{L_0(16) - L_0(15)}{2} = \frac{4 - 5}{2} = -0.5; \end{aligned} \right. \\ \} = \{-1.5; 0.5; 1; 2.5; 0; 2; -2.5; -0.5\}.$$

Отримавши значення L_1 та H_1 , можна переходити до наступної ітерації, коли $i = 2$. Вона полягає у розрахунку L_2 та H_2 на основі отриманих низькочастотних значень L_1 . Таким чином розрахунок напівсум (10) та напіврізниць (11) варто повторювати, доки не буде отримано кінцеве низькочастотне значення.

Результат застосування вейвлетного перетворення із базисом Хаара до різницевого мінісегмента

$$WH \left(A'_{1,1}{}^{(1,1)} \right) = \left\{ \begin{aligned} L_{1,1}^{(1,1)}(I) &= 3.1875; \\ H_{1,1}^{(1,1)} &= \{ \\ &0.3125; -1.375; 1.75; -1.5; \\ &3.25; 2.5; -3.5; -1.5; 0.5; \\ &1.0; 2.5; 0.0; 2.0; -2.5; -0.5; \\ &\}. \end{aligned} \right.$$

Де:

- $L_{1,1}^{(1,1)}(I)$ – крайнє низькочастотне значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A'_{1,1}{}^{(1,1)}$;
- $H_{1,1}^{(1,1)}$ – набір високочастотних значень після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A'_{1,1}{}^{(1,1)}$.

Розглянемо отримані значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегментів з сегмента $A^{(1,1)}$ (Рис. 4).

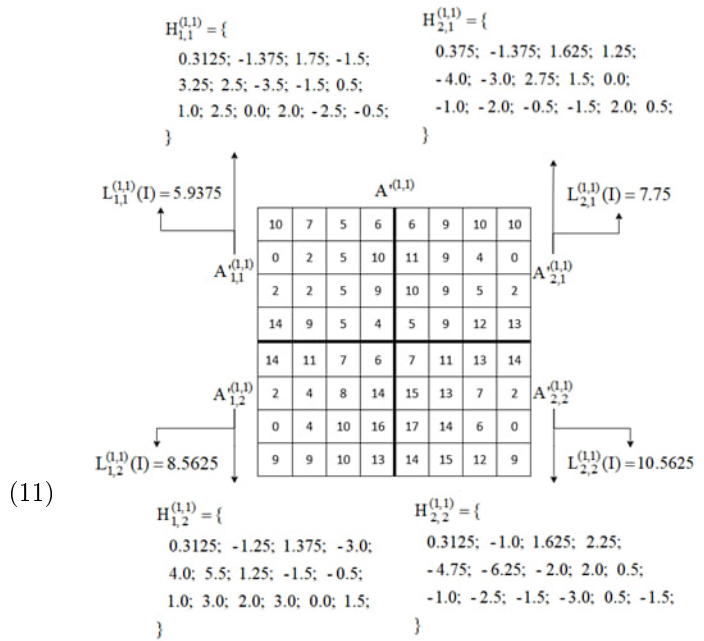


Рис. 4. Результат застосування вейвлет перетворення до різницевого сегмента $A^{(1,1)}$

На Рисунок 4 зображені:

- $A'_{1,1}{}^{(1,1)}$, $A'_{1,2}{}^{(1,1)}$, $A'_{2,1}{}^{(1,1)}$, $A'_{2,2}{}^{(1,1)}$ – різницеві мінісегменти утворені із сегмента $A^{(1,1)}$;
- $H_{1,1}^{(1,1)}$ – отримані високочастотні значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A'_{1,1}{}^{(1,1)}$;
- $H_{1,2}^{(1,1)}$ – отримані високочастотні значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A'_{1,2}{}^{(1,1)}$;
- $H_{2,1}^{(1,1)}$ – отримані високочастотні значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A'_{2,1}{}^{(1,1)}$;

- $H_{2,2}^{(1,1)}$ – отримані високочастотні значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A_{2,2}'^{(1,1)}$;
- $L_{1,1}^{(1,1)}(I)$ – отримане низькочастотне значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A_{1,1}'^{(1,1)}$;
- $L_{1,2}^{(1,1)}(I)$ – отримане низькочастотне значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A_{1,2}'^{(1,1)}$;
- $L_{2,1}^{(1,1)}(I)$ – отримане низькочастотне значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A_{2,1}'^{(1,1)}$;
- $L_{2,2}^{(1,1)}(I)$ – отримане низькочастотне значення після застосування вейвлет перетворення до різницевого мінісегмента $A_{2,2}'^{(1,1)}$.

Розглянемо приклад формування сукупності низькочастотних значень $L^{(1,1)}$ для сегмента $A^{(1,1)}$ з Рис. 3. На наступному рисунку (Рис. 5) зображена схема формування $L^{(1,1)}$ із різницевого сегмента $A'^{(1,1)}$. $L^{(1,1)}$ утворюється із кожного низькочастотного значення отриманого із відповідного мінісегмента, в рамках сегмента $A'^{(1,1)}$.

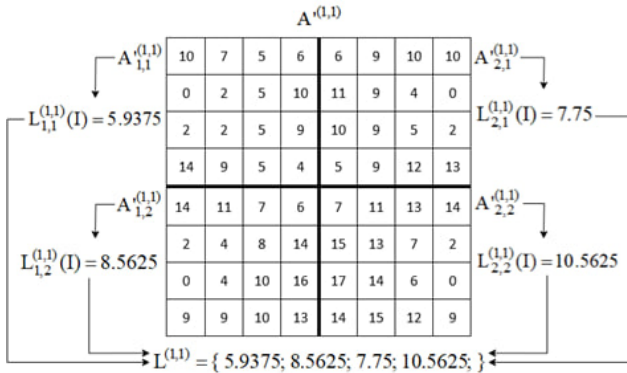


Рис. 5. Схема утворення групи низькочастотних значень

Утворена група низьких частот:

$$L^{(1,1)} = \{ 5.9375; 8.5625; 7.75; 10.5625; \}. \quad (12)$$

Застосуємо до неї спектрально-групове кодування. Розрахунок коду $CL^{(1,1)}$ для низькочастотних значень $L^{(1,1)}$ з сегмента $A^{(1,1)}$ виглядатиме так:

$$\begin{aligned} \lambda &= 10.5625; \\ CL^{(1,1)} &= \text{floor}(5.9375) \cdot \text{floor}(10.5625)^3 + \\ &+ \text{floor}(8.5625) \cdot \text{floor}(10.5625)^2 + \\ &+ \text{floor}(7.75) \cdot \text{floor}(10.5625)^1 + \\ &+ \text{floor}(10.5625) \cdot \text{floor}(10.5625)^0 = \\ &= 5 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^2 + 7 \cdot 10^1 + 10 \cdot 1 = 5880. \end{aligned} \quad (13)$$

На наступному рисунку (Рис. 6) кодування зображене схематичним способом:

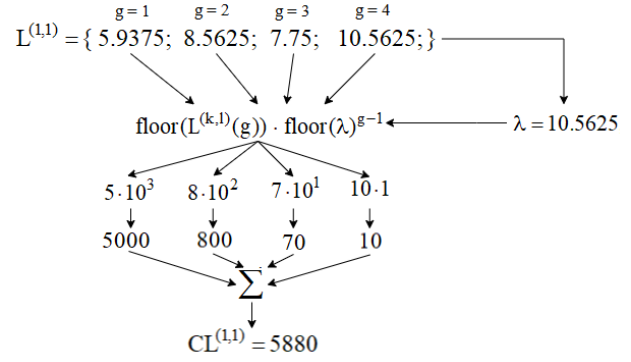


Рис. 6. Схема утворення спектрально-групового коду $CL^{(1,1)}$ з групи низькочастотних значень $L^{(1,1)}$

Застосуємо аналогічну формулу кодування для високих частот, формула (6), до груп високочастотних значень $H_{1,1}^{(1,1)}$, $H_{1,2}^{(1,1)}$, $H_{2,1}^{(1,1)}$, $H_{2,2}^{(1,1)}$ з прикладу з Рисунку 4. Будуть отримані наступні коди:

- $CH_{1,1}^{(1,1)} = 2\ 541\ 723$;
- $CH_{1,2}^{(1,1)} = 1\ 660\ 630\ 326$;
- $CH_{2,1}^{(1,1)} = 93\ 210\ 136$;
- $CH_{2,2}^{(1,1)} = 16\ 269\ 331\ 141$.

У результаті кодування сегмент $A^{(1,1)}$ може бути представлений п'ятьма кодовими значеннями: $CL^{(1,1)}$, $CH_{1,1}^{(1,1)}$, $CH_{1,2}^{(1,1)}$, $CH_{2,1}^{(1,1)}$, $CH_{2,2}^{(1,1)}$.

3 Проведення експериментальної порівняльної оцінки методу групового кодування даних у спектрально-хвильовому просторі із сучасними аналогами

Розглянемо ефективність розробленого методу групового кодування даних у спектрально-хвильовому просторі. Ефективність кодування будемо оцінювати на основі бітового об'єму закодованих даних. Закодовані дані представляють отримані коди для кожної спектральної групи, а саме значення:

$$\{ CL^{(k,l)}, CH_{1,1}^{(k,l)}, CH_{2,1}^{(k,l)}, CH_{1,2}^{(k,l)}, CH_{2,2}^{(k,l)} \}. \quad (14)$$

Для розрахунку бітового об'єму кожного окремого коду використаємо формулу:

$$\text{bits}(c) = \lceil \log_2 c \rceil, \quad (15)$$

де: $\text{bits}(c)$ – кількість біт для значення c ; c – значення коду, бітовий об'єм якого отримується; $\lceil \dots \rceil$ – округлення до наступного цілого значення. Наприклад, $\lceil 3.1 \rceil = 4$.

Застосуємо формулу (15) до кодових значень (14) і таким чином визначимо бітовий об'єм сегмента $A^{(k,l)}$:

$$\begin{aligned} bits(A^{(k,l)}) &= bits(CL^{(k,l)}) + bits(CH_{1,1}^{(k,l)}) + \\ &+ bits(CH_{2,1}^{(k,l)}) + bits(CH_{1,2}^{(k,l)}) + bits(CH_{2,2}^{(k,l)}). \end{aligned} \quad (16)$$

Для того щоб визначити бітовий об'єм для усього зображення $A^{(K,L)}$ необхідно розрахувати суму бітових об'ємів для кожного сегмента $A^{(k,l)}$, тобто:

$$bits(A^{(K,L)}) = \sum bits(A^{(k,l)}). \quad (17)$$

Порівняємо оцінку бітового об'єму із розповсюдженим кодеком PNG, який представляє стиснення без втрат. Для цього буде використаний набір зображень Open Turbulent Image Set (OTIS). У ньому знаходяться монохромні PNG зображення із різним рівнем інформативності. Результати оцінювання бітового об'єму представлені на Рис. 7.

Проаналізувавши наведену діаграму можна зробити висновок: зображення, закодовані розробленим методом групового кодування у спектрально-хвильовому просторі, мають бітовий об'єм у середньому на 37% менший, за зображення закодовані методом PNG.

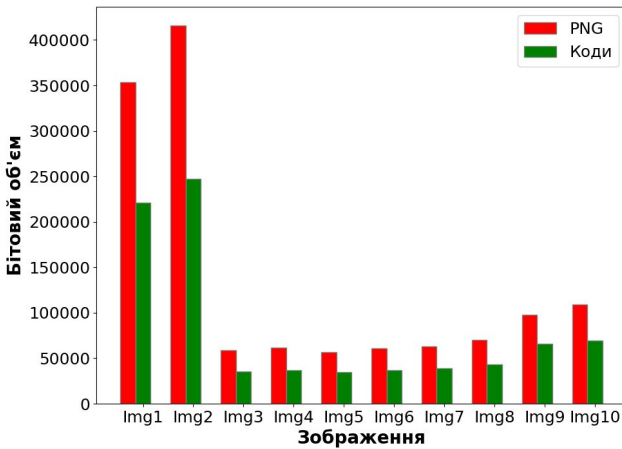


Рис. 7. Бітовий об'єм PNG зображень та відповідних кодів

Варто зазначити, що оскільки набір зображень OTIS представляє зображення видимого діапазону, то можна стверджувати, що розроблений метод можна застосовувати не тільки до ІЧЗ. Однак, оскільки була обґрунтована необхідність покращення кодування саме ІЧЗ, дана робота та метод сфокусовані на саме такому застосуванні.

Порівняємо ефективність кодування розробленого методу спектрально-групового кодування (СГК) з існуючим методом кодування (ІМК). ІМК базується на застосуванні вейвлет перетворення із використанням базису Хаара та кодуванні Хафмана, що є кодеком, який застосовується в сучасному

форматі JPEG 2000. Для цього використаємо набір 16-бітних зображень lmg1_16...lmg5_16. Це зображення із різним ступенем насиченості та структурно-візуальними особливостями.

На Рис. 8 приведені показники коефіцієнта стиснення СГК та ІМК для відповідних зображень. Показники на графіку відрізняються для різних зображень, що обумовлено різноманітними структурними особливостями.

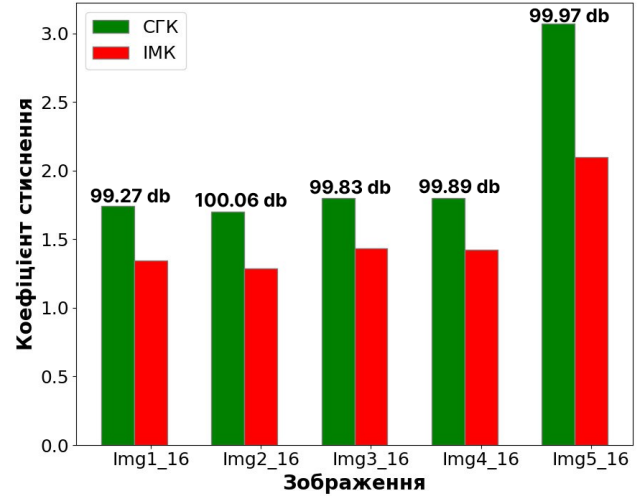


Рис. 8. Коефіцієнт стиснення розробленого методу кодування СГК та ІМК для 16-бітних зображень

Однак у середньому коефіцієнт стиснення СГК на 25% вищий за ІМК. Усі порівняльні оцінки здійснені при однакових попередніх налаштуваннях. Тобто обидва підходи застосовані із рівнем стиснення, що забезпечує однакові значення пікового співвідношення сигналу до шуму (peak signal-to-noise ratio, PSNR) [36], які відображені на Рисунку 8. Наприклад, для зображення lmg1_16 значення PSNR дорівнює 99.27 db для обох методів кодування: СГК та ІМК. Можливість корегувати рівень стиснення досягається завдяки використанню квантування височастотних компонент. Регулюючи значення коефіцієнтів квантування, височастотні компоненти можуть обнулятися або втрачати точність. Це впливає на рівень стиснення, міру спотворень, а отже і PSNR.

PSNR розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} PSNR &= 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right), \\ MSE &= \frac{1}{m n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I(i, j) - K(i, j))^2, \end{aligned} \quad (18)$$

де: MAX_I – максимально можливе значення пікселя у зображенні; I – оригінальне зображення розміром m на n ; K – відновлене зображення.

Підсумовуючи наведені на рисунках 3 та 4 показники, можна зазначити, що розроблений метод спектрально-групового кодування має коефіцієнт стиснення на 25% вищий за існуючий підхід, при однакових значеннях PSNR.

Висновки

1. Створено метод групового кодування інфрачервоних зображень у спектрально-хвильовому просторі. Метод заснований на:

- 1) ієрархічній декомпозиції ІЧЗ на сегменти та мінісегменти для локалізації однорідних областей;
- 2) перетворенні інформації у різницевий простір для зменшення динамічного діапазону значень із врахуванням кореляційних залежностей;
- 3) перетворенні просторового домену інформації у спектрально-хвильовий домен із використанням вейвлет перетворення на базисі Хаара;
- 4) групуванні високих та низьких частот для врахування їх структурних закономірностей;
- 5) застосуванні спектрально-групового кодування до утворених сукупностей для їх ефективного бітового представлення.

2. Отримані результати експериментальних порівнянь розробленого методу кодування дозволяють підтвердити його перевагу над сучасними рішеннями.

2.1. У порівнянні із сучасним методом стиснення без втрат PNG, метод спектрально-групового кодування дозволяє представити закодоване зображення із меншим бітовим об'ємом на 37% (Рис. 7).

2.2. При порівнянні методу кодування з формату JPEG 2000, який включає у себе застосування вейвлет перетворення та кодування Хафмана, розроблений метод кодування має коефіцієнт стиснення на 25% вищий (Рис. 8). Порівняння проведено при однакових показниках PSNR.

Наукова новизна.

Проведено удосконалення методу кодування сегментів ІЧЗ з використанням вейвлет перетворення на основі базису Хаара. Особливістю методу є групування кодування у спектрально-хвильовому просторі на основі врахування локальних кореляційних залежностей. В результаті чого групи спектральних значень представляються у вигляді відповідних кодів. Це дозволяє підвищити якісні характеристики надання інтелектуалізованих сервісів передачі ІЧЗ в прикладних задачах з використанням бортових комплексів.

References

- [1] Kang X., Song B., Guo J., Qin Z., Yu F. R. (2022). Task-Oriented Image Transmission for Scene Classification in Unmanned Aerial Systems. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 70, DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3182325.
- [2] Bausys R. and Kazakeviciute-Januskeviciene G. (2021). Qualitative Rating of Lossy Compression for Aerial Imagery by Neutrosophic WASPAS Method. *Symmetry, Symmetric and Asymmetric Data in Solution Models*, Vol. 13, Iss. 2, 273. DOI: 10.3390/sym13020273.
- [3] Bilal Al-Hayani, Hacı İlhan. (2020). Efficient cooperative image transmission in one-way multi-hop sensor network. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, Vol. 57, Iss. 4. DOI: 10.1177/0020720918816009.
- [4] Zhang X., Chu F. (2022). Multimedia Real-Time Transmission Protocol and Its Application in Video Transmission System. *Comput Intell Neurosci*, DOI: 10.1155/2022/8654756.
- [5] Yang S.-H., Liu T.-W. (2020). Quality Control for Hybrid Unicast and Multicast Video Transmission Systems. *2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Taiwan*, DOI: 10.1109/ICCE-Taiwan49838.2020.9258044.
- [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] Yang Q., Yang J. H. (2020). HD video transmission of multi-rotor Unmanned Aerial Vehicle based on 5G cellular communication network. *Computer Communications*, Vol. 160, pp. 688-696. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.07.024.
- [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] Linsdemedeiros I., Boukerche A., Cerqueira E. (2021). Swarm-Based and Energy-Aware Unmanned Aerial Vehicle System for Video Delivery of Mobile Objects. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 71, DOI: 10.1109/TVT.2021.3126229.
- [10] Descampe A., Richter T., Ebrahimi T., Foessel S. 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] Y. Tang, T. Xiang, Y. Yang and Z. Shu (2020). JPEG-XR-GCP: Promoting JPEG-XR Compression by Gradient-Based Coefficient Prediction. *12th International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, pp. 51-58. DOI: 10.1109/ICACI49185.2020.9177623.
- [12] Chunyi Li, 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] Mentzer F., Van Gool L., Tschannen M. (2020). Learning Better Lossless Compression Using Lossy Compression. *Proceedings of the IEEE/CVF CVPR*, pp. 6638-6647. DOI: 10.48550/arXiv.2003.10184.
- [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] Liu X., An P., Chen Y., Huang X. (2021). An improved lossless image compression algorithm based on Huffman coding. *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 81, Iss. 4, pp. 4781-4795. DOI: 10.1007/s11042-021-11017-5.
- [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)*, Lviv, Ukraine, pp. 385-387.

- [18] He D., Yang Z., Peng W., Ma R., Qin H., Wang Y. (2022). ELIC: Efficient Learned Image Compression With Unevenly Grouped Space-Channel Contextual Adaptive Coding. *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 5718-5727. DOI: 10.48550/arXiv.2203.10886.
- [19] D. Barannik and V. Barannik (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] Ballé J.; Chou P. A.; Minnen D.; Singh S.; Johnston N. et al. (2021). Nonlinear Transform Coding. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Vol. 15, Iss. 2, pp. 339-353. DOI: 10.1109/JSTSP.2020.3034501.
- [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] H. Qiu, Q. Zheng, G. Memmi, J. Lu, M. Qiu and B. Thuraisingham (2020). Deep Residual Learning-Based Enhanced JPEG Compression in the Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 17, Iss. 3, pp. 2124-2133. DOI: 10.1109/TII.2020.2994743.
- [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. *IEEE Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, pp. 52-56. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349256.
- [24] W. Xiao; N. Wan; A. Hong; X. Chen (2020). A Fast JPEG Image Compression Algorithm Based on DCT. *2020 IEEE International Conference on Smart Cloud*. DOI: 10.1109/SmartCloud49737.2020.00028.
- [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] S. Naveen Kumar, M. V. Vamshi Bharadwaj, Shreyanka Subbarayappa (2021). Performance Comparison of Jpeg, Jpeg XT, Jpeg LS, Jpeg 2000, Jpeg XR, HEVC, EVC and VVC for Images. *International Conference for Convergence in Technology*. DOI: 10.1109/i2ct51068.2021.9418160.
- [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] Trac D. Tran, Lijie Liu, Pankaj Topiwala (2007). Performance comparison of leading image codecs: H.264/AVC Intra, JPEG2000, and Microsoft HD Photo. *Proc. SPIE 6696, Applications of Digital Image Processing XXX*, 66960B; doi: 10.1117/12.775472.
- [29] Ahmad Khairul Umam, Pukky Tetralian Bantining Ngastiti, Aris Alfian, Zaqiyatus Shahadah, & Amanda Fatma Muamalah. (2024). The Application of Dcrete 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] Ranjan, R. (2020). Canonical Huffman Coding Based Image Compression using Wavelet. *Wireless Pers Commun*, Vol. 117, pp. 2193–2206. DOI: 10.1007/s11277-020-07967-y.
- [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] D. Mishra, et al. (2020). Wavelet-based Deep Auto Encoder-Decoder (WDAED) based Image Compression. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 31, Iss. 4, pp. 1452-1462. DOI: 10.1109/TCSVT.2020.3010627.
- [33] H. Ma, D. Liu, N. Yan, H. Li and F. Wu (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] H. Kanagaraj and V. Muneeswaran (2020). Image compression using HAAR discrete wavelet transform. *5th ICDCS*. DOI: 10.1109/ICDCS48716.2020.243596.
- [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, pp. 31-43. DOI: 10.30880/jscdm.2020.01.02.004.
- [36] O. Keleş, M. A. Yilmaz, A. M. Tekalp, C. Korkmaz and Z. Doğan (2021). On the Computation of PSNR for a Set of Images or Video. *2021 Picture Coding Symposium (PCS)*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/PCS50896.2021.9477470.

Method of Group Coding of Infrared Images in Spectral-Wave Space

Barannik V. V., Berchanov A. A., Barannik V. V., Shaigas O. M., Pertsev P. D., Vouk O. V., Babenko Y. M., Prokopenko R. O., Yroshenko V. P.

The main features of the construction of intellectualized services for the exchange of infrared images (IRI) are considered. Namely, the possibility of obtaining informative meta-information. Such information may include: class and state of objects of interest, identification of image fragments by their level of informativeness.

The use of meta-information as a result of intellectualization is possible in a wide range of applied tasks. In particular, those that are solved using unmanned on-board systems. Some of these tasks are: monitoring of dynamic objects of interest, autonomous guidance of on-board complexes. In the process of performing the specified tasks by on-board complexes, decision-making is possible in the following modes: manual, autonomous, automated. However, there are conditions in which a hybrid variant of decision-making is possible. In this mode, at some stages of the decision, the on-board complex can be in an autonomous state, and at others in an automated state. Among the conditions that have an impact on the choice of mode: the presence of information conflict, crisis situations, the use of swarm technologies.

Taking into account the modes of use and tasks performed by on-board complexes, the requirements for the completeness of information are increasing (increasing the number of frames, limiting distortions, increasing the number of pixels for describing objects). The consequence of their compliance will be an increase in the information load on information and communication systems. Therefore, a

contradiction appears between the requirements for quality characteristics: speed of information delivery, integrity of IR frames. Therefore, **a scientific and applied task** is relevant, which concerns the improvement of the quality characteristics of the provision of intellectualized information services based on the sources of IRI in applied tasks using on-board complexes. As a result of the analysis of modern technologies for solving the given problem, such as PNG and JPEG 2000, the following shortcomings were revealed: high computational complexity, introduction of significant distortions to the semantics, low efficiency in segments with a high number of heterogeneous objects. Therefore, the **objective of the article's research** is justified: the development of a method of group coding of data in the spectral-wave space.

The article describes the stages of method development, which begin with the decomposition of the IRI into a hi-

erarchical structure of segments and minisegments. This allows to localize the homogeneous areas of the image. The resulting segments are further transformed into the spectral domain and spectral-group coding is applied, which allows to reduce the bit volume. An experimental evaluation of the developed method was carried out on the basis of the Open Turbulent Image Set (OTIS), which includes PNG images with different levels of informativeness. It was possible to reduce the bit volume of images by an average of 37%. In addition, a comparative analysis of the coding of 16-bit images with the existing coding method, which is used in the modern JPEG 2000 format, was conducted. Where it was shown that the developed method has an advantage in the compression ratio by 25%.

Keywords: speed of delivery of infrared images; spectral-wave domain; bit volume reduction; spectral group coding; semantic frame integrity; frame segmentation