



МЕТОД СПЕКТРАЛЬНО-ГРУПОВОГО КОДУВАННЯ БІТОВИХ ШАРІВ ІНФРАЧЕРВОНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В. Бараннік [ORCID: 0000-0002-2848-4524], А. Берчанов [ORCID: 0009-0004-4301-6384]

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна

Відповідальний за рукопис: Володимир Бараннік (e-mail: vvbar.off@gmail.com).

(Подано 01 червня 2025)

Підвищення ефективності систем дистанційного теплового моніторингу вимагає розвитку методів кодування інфрачервоних зображень з урахуванням їхніх семантичних особливостей. Встановлено, що інфрачервоні зображення, як правило, мають велику глибину розрядності (до 16 бітів), що істотно ускладнює їх оброблення та передавання у режимі реального часу, особливо в умовах обмеженої пропускної здатності каналів зв'язку. Обґрунтовано, що використання традиційних алгоритмів кодування, зокрема JPEG, JPEG2000 або H.265, не дає змоги ефективно обробляти ІЧ-дані, оскільки такі підходи не враховують внутрішню бітову структуру, спектральну неоднорідність та локальні температурні особливості кадру. Підвищити ефективність стиснення можливо за рахунок подання ІЧ-зображення у вигляді старших та молодших бітових шарів із подальшою диференційованою обробкою. У статті обґрунтовано підхід, згідно з яким виконується попередній поділ зображення на сегменти розміром 8 на 8 пікселів та мінісегменти 4 на 4, для кожного з яких реалізується переведення у різницевий простір із відніманням локального мінімального значення. Запропоновано рекурсивне одновимірне вейвлет-перетворення на основі базису Хаара з глибиною декомпозиції до єдиного низькочастотного коефіцієнта, що забезпечує енергетичну концентрацію та ізоляцію багаторівневих частотних компонент. Показано, що така структура зручна для подальшого спектрального узагальнення та адаптивного кодування. Розроблено функціональну модель групового кодування, яка дає змогу подати кожен мінісегмент одним високочастотним кодовим значенням, а також об'єднати всі низькочастотні коефіцієнти сегмента в окрему групу, для якої також виконується групове кодування. У результаті кожен сегмент зображення подається п'ятьма кодовими значеннями, що дає можливість істотно зменшити обсяг даних зі збереженням термальної семантики. Запропонований метод придатний для застосування у реальному часі та в системах з обмеженими обчислювальними ресурсами, зокрема у безпілотних авіаційних комплексах і мобільних тепловізійних платформах.

Ключові слова: *інфрачервоні зображення, бітові шари, вейвлет-перетворення Хаара, групове кодування, стиснення зображень.*

УДК: 621.126

Вступ

Зростання потреб у моніторингу об'єктів у реальному часі, особливо в умовах обмеженої видимості, зумовлює активне впровадження інфрачервоних (ІЧ) камер у критично важливі сфери, такі як оборона, системи безпеки, дистанційний нагляд та пошуково-рятувальні операції. ІЧ-зображення

мають перевагу над традиційними оптичними методами візуалізації завдяки здатності фіксувати теплове випромінювання об'єктів, що забезпечує незалежність від зовнішнього освітлення, диму, туману та інших маскувальних факторів. Це робить ІЧ-канал інформації незамінним джерелом даних для безпілотних авіаційних комплексів, які діють у складних та кризових середовищах.

Водночас оброблення та передавання ІЧ-зображень пов'язані з низкою проблем. На відміну від звичайних візуальних зображень, розрядність інфрачервоних кадрів зазвичай 12–16 біт на піксель, що істотно збільшує їх бітовий об'єм. Передавання таких даних у режимі реального часу, особливо за умов обмеженої пропускної здатності бортових або мобільних телекомунікаційних систем, супроводжується затримками. Для їх зменшення використовують методи стиснення, орієнтовані на усунення психовізуальної надмірності. Однак такі методи, націлені на людське сприйняття, не враховують теплову семантику зображень, що призводить до втрати критично важливої інформації та появи спотворень.

Стандартизовані алгоритми кодування, зокрема JPEG, JPEG2000 або H.265/HEVC, не адаптовані до специфіки інфрачервоних даних. Вони не враховують вигляду теплових сигнатур і спричиняють втрату температурної цілісності, яка є ключовою у багатьох прикладних задачах. Крім того, традиційні методи стиснення не враховують спектральну неоднорідність та нерівномірний розподіл інформативності між бітовими площинами, притаманні ІЧ-зображенням. Це суттєво обмежує можливості їх ефективного використання у задачах теплового аналізу, виявлення та ідентифікації об'єктів.

У зв'язку з цим постає **актуальна науково-прикладна задача** – підвищити ефективність обробки та передавання ІЧ-зображень у системах дистанційного нагляду та пошуку, забезпечивши підвищений рівень цілісності та оперативності передавання даних.

2. Аналіз та постановка задачі

Сучасні методи стиснення зображень, зокрема JPEG, JPEG2000, H.264/AVC та H.265/HEVC, широко застосовують для зменшення бітового об'єму цифрових зображень та відео. В основу таких методів покладено використання просторово-частотних перетворень (наприклад, DCT або DWT), подальшого квантування коефіцієнтів та ентропійного кодування. Ефективність цих стандартів ґрунтується на усуненні психовізуальної надмірності – інформації, малопомітної або незначущої для зорового сприйняття людини. Проте зазначені технології орієнтовані насамперед на візуальні (RGB) зображення і не враховують специфіку інфрачервоних (ІЧ) даних.

Для ІЧ-зображень, особливо з розширеним динамічним діапазоном, ключовим є збереження температурної семантики, тобто точного значення теплових сигнатур об'єктів. Для таких зображень навіть невелика зміна значень пікселів може призвести до втрати важливої інформації про фізичний стан сцени. Через це традиційні методи стиснення можуть спричинити спотворення температурного профілю, що є критичним для задач виявлення, ідентифікації та прийняття рішень у безпекових і оборонних системах.

Крім того, ІЧ-зображення мають певні статистичні особливості, які погано враховуються у класичних алгоритмах. По-перше, бітові площини ІЧ-кадру демонструють нерівномірний розподіл інформативності: старші біти відповідають за глобальні структури і контури об'єктів, тоді як молодші – за дрібні деталі або шум. По-друге, у спектральному просторі ІЧ-зображення характеризуються неоднорідним розподілом енергії, залежно від локальних характеристик теплового поля сцени. Жодна з вищенаведених властивостей не використовується у типових стандартах кодування.

Перспективним є підхід, який поєднує переваги спектрального подання зображень із груповим кодуванням бітових шарів, що дає змогу не лише адаптуватися до локальних особливостей кадру, але й мінімізувати структурну надмірність без втрати важливої температурної інформації. Отже, **мета статті** полягає у розробленні методу спектрально-групового кодування бітових шарів інфрачервоних зображень.

3. Розроблення методу спектрально-групового кодування бітових шарів інфрачервоних зображень

В інфрачервоних зображень, що формуються тепловізійними камерами, розрядність може становити 16 біт на піксель. Це зумовлює істотне зростання обсягу даних. Більшість традиційних алгоритмів кодування не адаптовані до такої глибини, що обмежує їхню ефективність з погляду як компресії, так і збереження інформативності. Зокрема, неврахування бітової структури призводить до рівномірного стискання усіх компонент, хоча їх значущість суттєво відрізняється.

У цьому контексті доцільно подати початкове 16-бітне ІЧ-зображення у вигляді двох окремих компонент – старшого бітового шару (MSB layer) та молодшого бітового шару (LSB layer). Така декомпозиція дає змогу диференційовано обробляти дані залежно від їх значущості. Старший шар містить у собі ключову семантику зображення – його структуру, форми об'єктів, межі та інші макроскопічні характеристики. Молодший шар, навпаки, відображає тонкі температурні флуктуації, високочастотні деталі або тепловий шум. Це дає змогу застосовувати агресивніше стискання до менш інформативних шарів без втрати температурної достовірності.

Нехай маємо інфрачервоне зображення $I \hat{=} N^{H' \times W}$, де кожне піксельне значення $I_{i,j} \hat{=} [0, 2^{16} - 1]$. Значення кожного пікселя можна розкласти у вигляді:

$$I_{i,j} = \sum_{k=0}^{15} b_k(i,j) \times 2^k,$$

де $b_k(i,j) \hat{=} \{0,1\}$ – значення k -го біта пікселя у позиції (i,j) . Далі вводимо пороговий індекс $m \hat{=} \{1, \dots, 15\}$, що розділяє старші та молодші біти. Наприклад, для $m=8$ формуються дві компоненти:

- старший бітовий шар: $I_H(i,j) = \sum_{k=m}^{15} b_k(i,j) \times 2^k$;
- молодший бітовий шар: $I_L(i,j) = \sum_{k=0}^{m-1} b_k(i,j) \times 2^k$.

Отже, з одного 16-бітного зображення утворюються два зображення I_H та I_L такого самого розміру $H' \times W$, із різною інформативною природою. Зображення I_H відповідальне за відтворення макроскопічної структури сцени, зокрема контури, форми, теплові аномалії – саме ті елементи, що мають ключове значення для ідентифікації об'єктів. Натомість зображення I_L характеризується більшою варіативністю, містить високочастотні компоненти та мікрофлуктуації температур, які можуть використовуватись для підвищення деталізації або як джерело ентропійного резерву під час стискання.

Щоб забезпечити адаптивний локальний аналіз інфрачервоного зображення, під час спектрально-групового кодування застосовується попередня просторово-структурна сегментація. Вона дає змогу локалізувати обробку в межах малих ділянок зображення, що істотно підвищує ефективність подальшого спектрального аналізу, зменшує структурну надмірність і дає змогу адаптувати ступінь компресії до локального рівня інформативності.

На першому етапі сегментації виконується поділ зображення I на неперекривні блоки фіксованого розміру 8×8 , що надалі розглядають як сегменти. Кількість сегментів по вертикалі та горизонталі визначається співвідношеннями:

$$N_v = \frac{H}{8}, \quad N_h = \frac{W}{8},$$

де N_v – кількість сегментів по висоті; N_h – по ширині. Загальна кількість сегментів у зображенні:

$$N_{seg} = N_v \times N_h.$$

Позначимо сегмент у позиції (i, j) , де $1 \leq i \leq N_v$, $1 \leq j \leq N_h$, як:

$$S_{i,j} \in N^{8 \times 8}.$$

Надалі виконується деталізоване розбиття кожного сегмента $S_{i,j}$ – мінісегментація, яка дає змогу ідентифікувати внутрішньосегментні неоднорідності. Зокрема, сегмент $S_{i,j}$ поділяється на чотири неперекривні мінісегменти розміром 4×4 пікселі – $S_{i,j}^{(k)} \in N^{4 \times 4}$, де $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ відповідає положенню: $S_{i,j}^{(1)}$ – верхній лівий; $S_{i,j}^{(2)}$ – верхній правий; $S_{i,j}^{(3)}$ – нижній лівий; $S_{i,j}^{(4)}$ – нижній правий.

Тобто просторове подання мінісегментів $S_{i,j}^{(k)}$ таке:

$$S_{i,j} = \begin{bmatrix} S_{i,j}^{(1)} & S_{i,j}^{(2)} \\ S_{i,j}^{(3)} & S_{i,j}^{(4)} \end{bmatrix}.$$

Для застосування описаної схеми сегментації до утворених бітових шарів I_H та I_L введемо таку систему позначень:

- $I_H S_{i,j}$ – сегмент старшої бітової площини;
- $I_H S_{i,j}^{(k)}$ – мінісегмент старшої бітової площини;
- $I_L S_{i,j}$ – сегмент молодшої бітової площини;
- $I_L S_{i,j}^{(k)}$ – мінісегмент молодшої бітової площини.

Під час побудови ефективного методу стискання інфрачервоних зображень особливу роль відіграє попередня трансформація локальних блоків у форму, яка підвищує виявлення структурних закономірностей та сприяє зменшенню ентропії. Одним із таких підходів є переведення кожного локального мінісегмента в різницевий простір. Мета цієї трансформації – усунення локальної постійної компоненти сигналу (фоновий рівень), зменшення середнього значення та варіації елементів блока, що безпосередньо сприяє підвищенню ефективності спектрального аналізу й подальшого стиснення.

Значення пікселів у мінісегменті $S_{i,j}^{(k)}$ позначимо як $S_{i,j}^{(k)}(u, v)$, де $u, v \in \{1, 2, 3, 4\}$. Для кожного мінісегмента необхідно знайти його мінімальне значення:

$$m_{i,j}^{(k)} = \min \{ S_{i,j}^{(k)} \}.$$

Відтак від кожного елемента мінісегмента $S_{i,j}^{(k)}$ необхідно віднімати визначене мінімальне значення $m_{i,j}^{(k)}$:

$$DS_{i,j}^{(k)}(u, v) = S_{i,j}^{(k)}(u, v) - m_{i,j}^{(k)}, \quad u, v.$$

Ця операція інваріантна до абсолютного зсуву рівня інтенсивності. Тобто різниця між будь-якими двома елементами мінісегмента залишається незмінною:

$$DS_{i,j}^{(k)}(u, v) - DS_{i,j}^{(k)}(p, q) = S_{i,j}^{(k)}(u, v) - S_{i,j}^{(k)}(p, q),$$

що означає збереження локальних градієнтів та структурних характеристик зображення.

Оскільки результатом є подання локальних відхилень, відносно мінімального значення, трансформація у різницевий простір виконує функцію видалення постійної складової, яка не містить корисної структурної інформації, але істотно впливає на амплітуду сигналу.

Додатковою перевагою є зменшення діапазону значень у мінісегменті, що визначається як:

$$\text{range}(\text{DS}_{i,j}^{(k)}) = \max(S_{i,j}^{(k)}) - \min(S_{i,j}^{(k)}).$$

Зменшення діапазону приводить до зменшення дисперсії та середнього значення, а це знижує ентропію блока, підвищує ефективність спектрального перетворення та зменшує обсяг закодованої інформації. Це особливо важливо в інфрачервоних зображеннях, де температура сцени змінюється незначно, але відносні градієнти між сусідніми пікселями дають важливу семантичну інформацію.

Застосувавши різницеве перетворення до мінісегментів бітових шарів I_H та I_L , отримаємо такі позначення:

- $I_H \text{DS}_{i,j}^{(k)}$ – різницевий мінісегмент старшого бітового шару I_H ;
- $I_L \text{DS}_{i,j}^{(k)}$ – різницевий мінісегмент молодшого бітового шару I_L .

Після переведення мінісегментів у різницевий простір доцільно виконати спектральне перетворення, що дає змогу подати локальні температурні градієнти в частотному домені. Серед можливих спектральних підходів, таких як DCT (дискретне косинусне перетворення) або DFT (дискретне фур'є-перетворення), запропоновано застосувати дискретне вейвлет-перетворення на основі базису Хаара, переваги якого такі:

- обчислювальна простота – обчислювальна складність алгоритму низька, оскільки він реалізується через прості додавання, віднімання та ділення, що критично важливо для реалізації на вбудованих системах або обмежених обчислювальних платформах
- декомпозиція частот – після вейвлет-перетворення більшість енергії локалізується у низькочастотному коефіцієнті, тоді як високочастотні коефіцієнти мають тенденцію до малих значень, що відкриває можливість адаптивної агресивної компресії.

Розглянемо мінісегмент $\text{DS}_{i,j}^{(k)}$ у вигляді одновимірного вектора:

$$\mathbf{x}^{(0)} = \{x_1, x_2, \dots, x_{16}\} \hat{=} N^{1 \times 16}.$$

На першому кроці виконується згортка пар сусідніх елементів для побудови:

- апроксимаційних коефіцієнтів: $a_k^{(1)} = \frac{x_{2k-1}^{(0)} + x_{2k}^{(0)}}{2}$, $k = \{1, \dots, 8\}$;
- деталізувальних коефіцієнтів: $d_k^{(1)} = \frac{x_{2k-1}^{(0)} - x_{2k}^{(0)}}{2}$, $k = \{1, \dots, 8\}$.

Отже, отримаємо два вектори:

- $\mathbf{a}^{(1)} \hat{=} R^8$ – перший рівень низькочастотних коефіцієнтів;
- $\mathbf{d}^{(1)} \hat{=} R^8$ – перший рівень високочастотних коефіцієнтів.

Наступний крок – рекурсивне застосування тієї самої процедури лише до низькочастотного вектора $\mathbf{a}^{(1)}$:

$$a_k^{(2)} = \frac{a_{2k-1}^{(1)} + a_{2k}^{(1)}}{2}, \quad k = \{1, \dots, 4\};$$

$$d_k^{(2)} = \frac{a_{2k-1}^{(1)} - a_{2k}^{(1)}}{2}, \quad k = \{1, \dots, 4\}.$$

Після цього виконується ще один рівень перетворення:

$$a_k^{(3)} = \frac{a_{2k-1}^{(2)} + a_{2k}^{(2)}}{2}, \quad k = \{1, 2\};$$

$$d_k^{(3)} = \frac{a_{2k-1}^{(2)} - a_{2k}^{(2)}}{2}, \quad k = \{1, 2\}.$$

На фінальному рівні:

$$a_1^{(4)} = \frac{a_1^{(3)} + a_2^{(3)}}{2}; \quad d_1^{(4)} = \frac{a_1^{(3)} - a_2^{(3)}}{2}.$$

Отже, у результаті рекурсивного вейвлет-перетворення маємо:

$$W(x) = \{a_1^{(4)}, d_1^{(4)}, d_1^{(3)}, d_2^{(3)}, d_1^{(2)}, \dots, d_4^{(2)}, d_1^{(1)}, \dots, d_8^{(1)}\} \hat{\in} R^{16},$$

де $a_1^{(4)}$ – єдиний залишений низькочастотний коефіцієнт, що містить глобальну середню інформацію мінісегмента; всі $d_k^{(1)}$ – високочастотні коефіцієнти на рівнях $\mathbf{I} \hat{\in} \{1, 2, 3, 4\}$, упорядковані за рівнем частотної деталізації (від грубої до найдетальнішої).

Описану трансформацію у спектральний простір необхідно застосувати до різницевого мінісегментів зі старшого бітового шару та молодшого: $W(I_H DS_{i,j}^{(k)}); W(I_L DS_{i,j}^{(k)})$.

Для зменшення бітового об'єму утворених спектральних коефіцієнтів їх необхідно закодувати, застосовуючи групове кодування:

$$x_{code} = C(\{x_1, \dots, x_n\}),$$

де $\{x_1, \dots, x_n\}$ – набір значень, які необхідно закодувати; x_{code} – утворене кодове значення.

Для кожного мінісегмента $S_{i,j}^{(k)}$ сформуємо вектор високочастотних коефіцієнтів:

$$d_{i,j}^{(k)} = \{d_1^{(4)}, d_1^{(3)}, d_2^{(3)}, d_1^{(2)}, \dots, d_4^{(2)}, d_1^{(1)}, \dots, d_8^{(1)}\} \hat{\in} R^{15}.$$

Застосуємо групове кодування до $d_{i,j}^{(k)}: C_{i,j}^{(k)} = C(d_{i,j}^{(k)})$.

Отже, кожен мінісегмент $S_{i,j}^{(k)}$ подається одним високочастотним кодовим значенням $C_{i,j}^{(k)}$. Оскільки сегмент $S_{i,j} \hat{\in} N^{8 \times 8}$ складається із чотирьох мінісегментів $S_{i,j}^{(k)}$, якщо $k = \{1, \dots, 4\}$, то він матиме чотири високочастотні групові коди, по одному на кожен мінісегмент: $\{C_{i,j}^{(1)}, C_{i,j}^{(2)}, C_{i,j}^{(3)}, C_{i,j}^{(4)}\}$.

Низькочастотні коефіцієнти з усіх чотирьох мінісегментів $S_{i,j}^{(k)}$ необхідно об'єднати у групу:

$$a_{i,j} = \{a_1^{(4,k)}\} \text{ " } k.$$

До цієї групи $a_{i,j}$ також застосовується групове кодування:

$$C_{i,j}^{(L)} = C(a_{i,j}),$$

де $C_{i,j}^{(L)} \hat{\in} R$ – груповий код низькочастотної області всього сегмента.

У результаті сегмент $S_{i,j}$ буде подано у вигляді набору з п'яти групових кодів:

$$C_{i,j} = \{C_{i,j}^{(1)}, C_{i,j}^{(2)}, C_{i,j}^{(3)}, C_{i,j}^{(4)}, C_{i,j}^{(L)}\};$$

Отже, завдяки спектрально-груповому кодуванню, замість оперування 64 піксельними значеннями сегмента або 64 спектральними коефіцієнтами, вся інформація стискається до п'яти скалярних кодів, що істотно зменшує обсяг даних.

Застосовуючи групове кодування до спектральних коефіцієнтів, утворених зі старшого бітового шару I_H та молодшого I_L , отримуємо окремі кодові значення для кожного бітового шару:

- групові коди сегмента старшого бітового шару $I_H S_{i,j}$:

$$I_H C_{i,j} = \{I_H C_{i,j}^{(1)}, I_H C_{i,j}^{(2)}, I_H C_{i,j}^{(3)}, I_H C_{i,j}^{(4)}, I_H C_{i,j}^{(L)}\};$$

- групові коди сегмента молодшого бітового шару $I_L S_{i,j}$:

$$I_L C_{i,j} = \{I_L C_{i,j}^{(1)}, I_L C_{i,j}^{(2)}, I_L C_{i,j}^{(3)}, I_L C_{i,j}^{(4)}, I_L C_{i,j}^{(L)}\}.$$

Висновки

1. Обґрунтовано підхід до стискання інфрачервоних зображень на основі спектрально-групової обробки бітових шарів. Запропоноване подання 16-бітних ІЧ зображень у вигляді старших та молодших бітових шарів дає змогу враховувати специфіку розподілу інформативності в бітовій структурі та адаптувати методи опрацювання до семантичного навантаження кожного шару. Доведено доцільність відокремлення структурно значущих компонент на рівні бітових площин.

2. Розроблено і формалізовано процедуру багаторівневої сегментації, що передбачає поділ зображення на сегменти розміром 8×8 та мінісегменти розміром 4×4 . Такий підхід дає можливість локалізувати аналіз, адаптуватися до просторової неоднорідності та зменшити статистичну надмірність у межах кожного блока.

3. Запропоновано метод перетворення мінісегментів у різницевий простір локальним вирівнюванням відносно мінімального значення. Така трансформація дає змогу усунути постійну складову, зменшити ентропію та підвищити ефективність подальшої спектральної обробки, зберігаючи локальні температурні градієнти.

4. Розроблено багаторівневе одновимірне вейвлет-перетворення Хаара для обробки мінісегментів у лінійному поданні. Запропоновано рекурсивну реалізацію перетворення до залишення одного низькочастотного коефіцієнта та 15 високочастотних. Такий підхід дає змогу виконувати частотну декомпозицію зі збереженням порядку компонент і сприяє енергетичній концентрації в апроксимації.

5. Запропоновано функціональну модель групового кодування, яка передбачає стискання спектральних коефіцієнтів кожного мінісегмента в одне кодове значення. Високочастотні коефіцієнти кожного мінісегмента обробляються окремо, а низькочастотні коефіцієнти всіх мінісегментів сегмента – спільно. У результаті кожен сегмент подається п'ятьма груповими кодами, що забезпечує високий ступінь стиснення зі збереженням теплової структури сцени.

Список використаних літературних джерел

- [1] D. Barannik and V. Barannik, "Steganographic Coding Technology for Hiding Information in Infocommunication Systems of Critical Infrastructure", 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, pp. 88–91, 2022. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024185.

- [2] Barannik V., Stepanko O., Nikodem J., Jancarczyk D., Babenko Yu., Zawislak S. A Model for Representing Significant Segments of a Video Image Based on Locally Positional Coding on a Structural Basis. *Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IEEE IDAACS-SWS 2020): proceedings of IEEE 5nd International Symposium*, pp. 1–5, 2020. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS50031.2020.9297068.
- [3] Алімпієв А. М. Теоретичні основи створення технологій протидії прихованим інформаційним атакам в сучасній гібридній війні / А. М. Алімпієв, В. В. Баранник, Т. В. Белікова, С. О. Сідченко // Системи обробки інформації. Харків: ХНУПС, 2017. Вип. 4(150). С. 113–121.
- [4] Баранник В. В., Шульгін С. С., Бабенко Ю. М., Онищенко Р. С., Ревва К. В., Белікова Т. В. and Ігнат'єв О. О. “Technology of Sliding Coding of Uneven Diagonal Sequences in Two-Dimensional Spectral Space of Transformants”, *Visnyk NTUU KPI. Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, 94, pp. 13–23(2023). DOI: 10.20535/RADAP.2023.94.13-23.
- [5] Barannik, D., Kulitsa, O., Barannik, V. V., Tarasenko, D., Podlesny, S., The video stream encoding method in infocommunication systems. *IEEE 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (IEEE TCSET 2018)*, pp. 538–541, 2018. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336259.
- [6] Wen, H., Ma, L., Liu, L. et al. High-quality restoration image encryption using DCT frequency-domain compression coding and chaos. *Sci. Rep.*, 12, 16523 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20145-3>.
- [7] A. Krasnorutsky, R. Onyshchenko, D. Barannik and V. Barannik, “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)*, Kyiv, Ukraine, pp. 53–56, 2022. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024208.
- [8] V. Skouroliakou, A. M. Molaei, M. García-Fernández, G. Álvarez-Narciandi and O. Yurduseven, “Frequency Domain Image Reconstruction for Imaging With Multistatic Dynamic Metasurface Antennas”, in *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 124728–124737, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3225091.
- [9] Баранник В. В., Берчанов А. “Метод групового кодування інфрачервоних зображень у спектрально-хвильовому просторі” *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, 99, pp. 24–34, 2025. DOI: 10.20535/RADAP.2025.99.24-34.
- [10] J. Xu, J. Yang, F. Kimishima, I. Taniguchi and J. Zhou, “Compressive Sensing Based Image Codec With Partial Pre-Calculation”, in *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 26, pp. 4871–4883, 2024. DOI: 10.1109/TMM.2023.3327534.
- [11] Vladimir Barannik, Sergii Shulgin, Valerii Kozlovskiy, Roman Onyshchenko, Tatyana Belikova, Oleksandr Ihnatiev, Viacheslav Khlopiachyi. Method of recurrent truncated-positional coding video segments in uneven diagonal space. – *Radioelectronic and computer systems*, 2023, Vol. 2, pp. 129–142. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.11>.
- [12] V. Ďuriš, S. G. Chumarov, G. M. Mikheev, K. G. Mikheev and V. I. Semenov, “The Orthogonal Wavelets in the Frequency Domain Used for the Images Filtering”, in *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 211125–211134, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3039373.
- [13] Barannik, V. et al. (2023). Processing Marker Arrays of Clustered Transformants for Image Segments. In: Klymash, M., Luntovskyy, A., Beshley, M., Melnyk, I., Schill, A. (eds) *Emerging Networking in the Digital Transformation Age. TCSET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 965. Springer, Switzerland, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_25.
- [14] Barannik, V., Barannik, N., Sidchenko, S., Khimenko, A. The method of masking overhead compaction in video compression systems, *Radioelectronic and Computer Systems*, No. 2, pp. 51–63, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.2.05>.
- [15] Nicodemus Songose Awarayi, Obed Appiah, Benjamin Asubam Weyori, Christopher Bombie Ninfaakang, “A Digital Image Watermarking Using Dwt and L-shaped Tromino Fractal Encryption”, *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP)*, Vol. 13, No. 3, pp. 33–43, 2021. DOI: 10.5815/ijigsp.2021.03.03
- [16] Mahalingam, H., Veeramalai, T., Menon, A. R., S., S., & Amirtharajan, R. (2023). Dual-Domain Image Encryption in Unsecure Medium – A Secure Communication Perspective. *Mathematics*, 11(2), 457. <https://doi.org/10.3390/math11020457>.

- [17] Баранник В. В., Шульгін С. С., Онищенко Р. С., Бабенко М. В., Єлісєєв Є. С. Концепція інтегрування інфокомунікаційної технології кодування відеосегментів до стандартизованих платформ. *Наукоємні технології*. 2023. № 4. С. 13–22.
- [18] Dong, Y., & Pan, W. D. (2022). Image Classification in JPEG Compression Domain for Malaria Infection Detection. *Journal of Imaging*, 8(5), 129. <https://doi.org/10.3390/jimaging8050129>.
- [19] H. Ma, D. Liu, R. Xiong and F. Wu, “iWave: CNN-Based Wavelet-Like Transform for Image Compression”, in *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 22, No. 7, pp. 1667–1679, July 2020. DOI: 10.1109/TMM.2019.2957990.
- [20] B. A. Lungisani, C. K. Lebekwe, A. M. Zungeru and A. Yahya, “Image Compression Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey and Comparison”, in *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 82511–82530, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3195891.
- [21] V. Barannik, N. Kharchenko, O. Kulitsa, V. Tverdokhle, “The issue of timely delivery of video traffic with controlled loss of quality”, in *13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, pp. 902–904, 2016. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452220.
- [22] Barannik V., Barannik D. Barannik N., Indirect Steganographic Embedding Method Based On Modifications of The Basis of the Polyadic System. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2020): proceedings of 15 th IEEE International Conference*, pp. 699–702. 2020. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235522.
- [23] Баранник Володимир, Шульгін Сергій, Баранник Дмитро, Онищенко Роман, Рєва К. Метод усічено-позиційного декодування трансформант за нерівномірно-діагональним форматом. *Наукоємні технології*. 2023. № 3. С. 280–288.
- [24] A. Shafique, M. M. Hazzazi, A. R. Alharbi and I. Hussain, “Integration of Spatial and Frequency Domain Encryption for Digital Images”, in *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 149943–149954, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3125961.
- [25] Баранник В., Шульгін С., Ігнат'єв О., Онищенко Р., Бабенко Ю., Баранник В. Концепція функціональних перетворень для формування синтаксичного опису діагоналей трансформанти. *Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія*. 2023. Вип. 3, № 1, С. 24–34.
- [26] Xu, S., Chang, C. C., & Liu, Y. (2020). A novel image compression technology based on vector quantisation and linear regression prediction. *Connection Science*, 33(2), 219–236. <https://doi.org/10.1080/09540091.2020.1806206>.
- [27] Баранник Володимир, Шульгін Сергій, Онищенко Роман, Рєва К., Ігнат'єв Олександр. Метод формування інформативно-позиційної ваги для усічено-позиційної кодової системи представлення трансформованих відео сегментів. *Наукоємні технології*. 2023. № 2. С. 156–163.
- [28] Barannik V. V., Karpenko S. Method of the 3-D image processing. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE TCSET 2008): proceedings of IEEE International Conference*, pp. 378–380, 2008.
- [29] Barannik, V. et al. (2023). A Method of Scrambling for the System of Cryptocompression of Codograms Service Components. In: Klymash, M., Luntovskyy, A., Beshley, M., Melnyk, I., Schill, A. (eds) *Emerging Networking in the Digital Transformation Age. TCSET 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 965. Springer, Switzerland, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24963-1_26.
- [30] Баранник В. В., Шульгін С. С., Онищенко Р. С., Ігнат'єв О. О. Методологія кодування трансформованих відеосегментів в усічено-позиційному просторі. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34 (73). № 1. С. 38–42.

BIT LAYERS SPECTRAL-GROUP CODING METHOD OF INFRARED IMAGES

Volodymyr Barannik, Anatolii Berchanov

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Improving the efficiency of remote thermal monitoring systems requires the development of coding methods for infrared (IR) images that account for their semantic characteristics. It is established that infrared images typically have high bit-depth (up to 16 bits), which significantly

complicates their processing and transmission in real-time, especially under limited channel bandwidth conditions. It is substantiated that traditional coding algorithms, such as JPEG, JPEG2000, or H.265, do not provide efficient handling of IR data since they fail to consider the internal bit structure, spectral non-uniformity, and local temperature characteristics of the scene. Compression efficiency can be improved by representing an IR image as separate higher and lower bit layers with subsequent differentiated processing. The paper presents an approach that involves preliminary division of the image into 8×8 pixel segments and 4×4 mini-segments, each of which is transformed into a residual domain by subtracting its local minimum. A recursive one-dimensional Haar wavelet transform is proposed, with decomposition depth up to a single low-frequency coefficient, enabling energy concentration and isolation of multilevel frequency components. It is shown that such a representation is convenient for further spectral generalization and adaptive encoding. A functional model of group coding is developed, allowing each mini-segment to be represented by a single high-frequency code value, while all low-frequency coefficients of a segment are combined into a separate group that is also group-encoded. As a result, each image segment is represented by five code values, which significantly reduces data volume while preserving thermal semantics. The proposed method is suitable for real-time applications and systems with limited computational resources, particularly in unmanned aerial platforms and mobile thermal imaging systems.

Keywords: *infrared images, bit layers, Haar wavelet transform, group coding, image compression.*