

УДК 629.391

Юдін О.К., д.т.н.  
Гулак Н.К.

## ТЕХНОЛОГІЯ УСУНЕННЯ НАДМІРНОСТІ У ТРАНСФОРМОВАНИХ ПОТОКАХ БІТОВОГО ПОДАННЯ ДАНИХ

Інститут інформаційно-діагностичних систем, НАУ e-mail: [kszi@ukr.net](mailto:kszi@ukr.net)

*Обґрунтовано підходи щодо скорочення надмірності в трансформованих зображеннях, що базується на кодуванні бітових плоскостей, сформованих для двійкового подання компонентів трансформант. Обґрунтовано принципи для створення методу кодування довжин двійкових серій, що забезпечує потенційні можливості для додаткового збільшення ступеня стиску й скорочення часу обробки трансформованих зображень.*

**Ключові слова:** ступень стиску, трансформовані зображення, довжина двійкових серій, бітова площа.

### Вступ

Сучасний розвиток науки й техніки характеризується помітним ростом ролі аерокосмічного моніторингу Землі в геоінформаційних системах для вирішення народногосподарських завдань і завдань спеціального призначення. Особливості аерокосмічного моніторингу складаються у: підвищенні цифрового обсягу сформованих на борту зображень (обсягом порядку 1 Гбит), що вимагає підвищення оперативності цифрової обробки зображень при обмежених енергетичних й обчислювальних можливостях бортової апаратури; обмеженому часі сеансу зв'язку; неможливості оперативно передати великий обсяг даних по існуючих бездротових системах передачі; швидкому переповненню пам'яті на відповідних пристроях при довгостроковому зберіганні зображень. Тому, актуальним науково-прикладним завданням є зменшення часу обробки й передачі відео даних при збереженні необхідного ступеня вірогідності передачі повідомлень в системах аерокосмічного моніторингу Землі.

Одним з ефективних напрямків підвищення оперативності доведення інформації до споживача, можливо на основі зменшення обсягів оброблюваних і переданих даних. У цьому випадку знижується час передачі даних по каналах зв'язку та час обробки даних в інформаційних системах. Для цього необхідно здійснювати компактне подання відео даних. Аналіз існуючих методів стиску показав, що найбільші ступені стиску й найменший час на обробку досягаються для методів компактного подання з контрольованою втратою якості, заснованих на використанні ортогональних перетворень. Це обумовлено скороченням психавізуальної і статистичної надмірності у двовимірних блоках зображень. Однак дані методам властиві деякі недоліки.

### Постановка задачі

**Метою статті** є обґрунтування підходів щодо скорочення надмірності в трансформованих зображеннях, що базується на кодуванні бітових плоскостей, сформованих для двійкового подання компонентів трансформант. Таке обґрунтування базується на: недоліках технології безпосереднього кодування компонент трансформант; перевагах технології кодування бітових площин трансформант щодо технології безпосереднього кодування компонентів трансформант. Будеться обґрунтування технології компактного подання трансформант зображень на основі кодування бітових площин. З інформаційно-кодових позицій обґрунтовуються принципи для створення методу кодування довжин двійкових серій, що забезпечує потенційні можливості для додаткового збільшення ступеня стиску й скорочення часу обробки.

### Обґрунтування підходу щодо скорочення надмірності в трансформованих зображеннях

Технологія стиску зображень на основі їхнього трансформування реалізована в таких форматах як JPEG, JPEG-LS, JPEG2000. Процес стиску полягає в проведенні комплексної обробки, що складає із двох основних технологічних етапів (рис. 1) [1]:

Етап 1 - підготовчий етап. Даний етап виконується для одержання проміжної структури подання вихідних відеоданих, що забезпечує потенційну можливість для:

- скорочення психовізуальної надмірності з урахуванням регулювання рівня якості відновлюваних зображень;
- реалізації технологій кодування, що дозволяють стиснути трансформанти без внесення втрат (рис. 1).

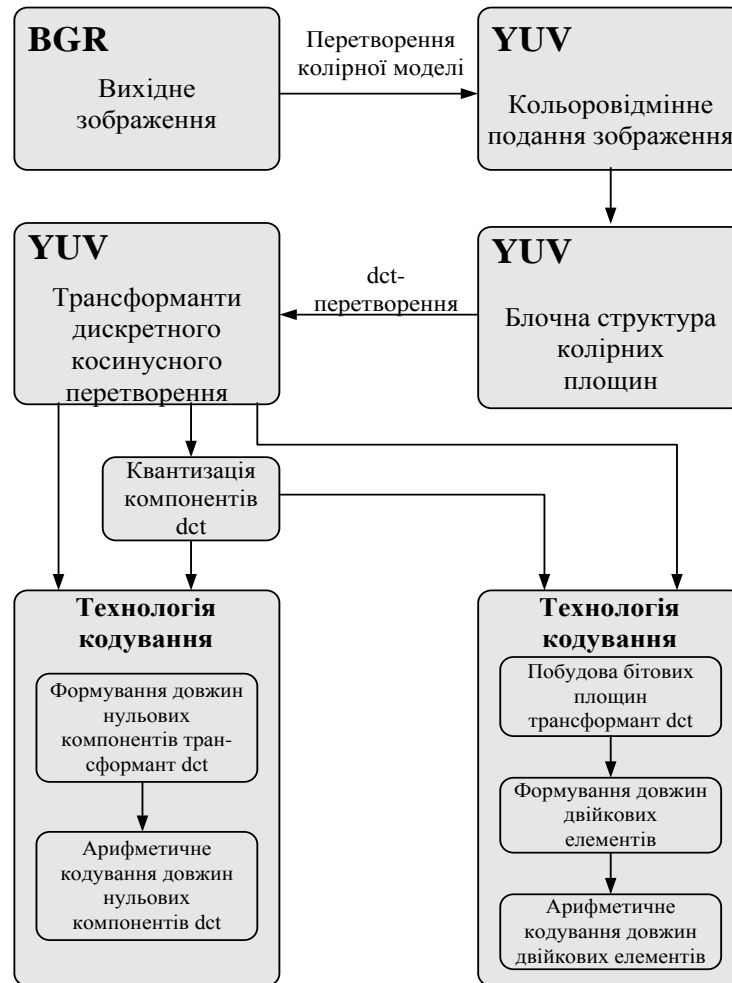


Рис. 1. Структурно-функціональна схема технології компресії трансформованих зображень.

Для цього над вихідними масивами зображень виконуються послідовно два види перетворень. У результаті чого досягається перетрансформування енергії вихідного сигналу і її скупчення в певних складових. Перший вид перетворення складається в зміні кольорового простору зображення. Вихідне зображення представляється в машинному виді триколірною моделлю RGB (червона, зелена й синя кольорові складові) [2,4]:

$$R=\{r_{ij}\}, G=\{g_{ij}\}, B=\{b_{ij}\}, i=1, Q_r, j=1, Q_c,$$

де  $r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}$  - елементи, розташовані на  $(i; j)$ -й позиції відповідно до кольорній площині R, G, і B;

$Q_r$  - кількість рядків у зображенні;

$Q_c$  - кількість стовпців у зображенні.

У випадку стиску із втратами якості відновлених відеоданих вихідне зображення описується моделлю YcCb [1]:

$$\begin{aligned} y_{ij} &= 0,299r_{ij} + 0,587g_{ij} + 0,114b_{ij}; \\ cr_{ij} &= 0,5r_{ij} - 0,4187g_{ij} + 0,0813b_{ij} + 128; \\ cb_{ij} &= -0,1687r_{ij} - 0,3313g_{ij} + 0,5b_{ij} + 128, \end{aligned}$$

де  $y_{ij}, cr_{ij}, cb_{ij}$  - елементи, розташовані на  $(i; j)$ -й позиції відповідно площині Y (яскрава складова), Cr (хроматичний червоний) і Cb (хроматичний синій).

У режимі компресії без внесення втрати якості зображення з RGB опису переводиться в кольоровий простір YUV [1]:

$$y_{ij} = \lfloor (r_{ij} + 2g_{ij} + b_{ij}) / 4 \rfloor; \quad u_{ij} = r_{ij} - g_{ij}; \quad v_{ij} = b_{ij} - g_{ij}, \quad (1)$$

де  $Y = \{y_{ij}\}$ ,  $U = \{u_{ij}\}$ ,  $V = \{v_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, Q_\ell}$ ,  $j = \overline{1, Q_c}$ .

За рахунок того, що людське око менш чутливе до кольорів, чим до яскравості, з'являється можливість виключення додаткової психовізуальної надмірності в площинах Cr, Cb або U, V.

Другий вид перетворення, пов'язаний з перетрансформуванням енергії вихідного сигналу, полягає в апроксимації відеоданих базисами ортогональних або wavelet перетворень. Пропонується як базиси апроксимації відеоданих використати дискретне косинусне перетворення (dct) за наступними причинами:

1) dct-перетворення серед інших ортогональних перетворень є найбільш близьким до перетворень Корунена-Лоева (ПКЛ) у плані декореляції (для більшості сигналів);

2) стиск на основі dct забезпечує кращі характеристики при обробці оптичних зображень, текстурних ділянок зображень, плавних переходів, сигналів гауссової природи.

3) процеси стиску зображень на основі dct-перетворення й на основі wavelet-перетворення (dwt) забезпечують близькі в статистичному плані значення за коефіцієнтом стиску й по піковому відношенню сигнал/шум. У середньому різниця перебуває на рівні 10-15%. При зменшенні розмірів масивів відеоданих (наприклад, якщо буде потреба скоротити час компресії й декомпресії), для яких виконується апроксимація, вираш виявляється на боці dct обробки.

4) на обчислення dct затрачається менша кількість машинних операцій, чим на dwt (табл. 1,  $q_\ell$  - кількість рядків у масиві;  $q_c$  - кількість стовпців у масиві). Дана перевага є важливим для обробки зображень у системах реального часу.

Кількість арифметичних операцій  $v_k$  для двовимірних ортогональних перетворень (ОП)

Таблиця 1

Тип ОП	Кількість операцій		Тип операцій
	Додавання $v_{+;-}$	Множення $v_{\times;\div}$	
dct	$q_\ell q_c \log_2 q_\ell q_c$	$q_\ell q_c \log_2 q_\ell q_c$	речовинні
dwt	$\sum_{n=0}^{N-1} (\frac{q_\ell q_c}{2^N} - 1)$	$\sum_{n=0}^{N-1} (\frac{q_\ell q_c}{2^N} - 1)$	частково речовинні

5) вираш за часом виконання перетворення створює можливість для використання більше складної в обчислювальному плані технології кодування, що очевидно має додаткові потенційні переваги щодо скорочення надмірності.

Перед виконанням перетворення (трансформації) колірна площина зображення розділяється на масиви розміром  $q_\ell \times q_c$  [1]. Поділ на масиви проводиться для: зниження кількості операцій на обробку; підвищення ступеня когерентності (корельованості) оброблюваних даних.

Виконання dct-перетворення реалізується на основі наступного виразу:

$$C(k, \ell) = F(k) X(i, j)_{k, \ell} F^T(\ell); \quad (2)$$

де  $X(i, j)_{k, \ell}$  - масив відеоданих, утворений на базі однієї із площин кольороворазностной моделі зображення;

$k, \ell$  - відповідно індекс рядка й стовпця елемента масиву  $X(i, j)_{k, \ell}$ ,  $k = \overline{1, q_\ell}$ ;  $\ell = \overline{1, q_c}$ ;

$C(k, \ell)$  - матриця компонентів трансформанти dct-перетворення масиву відеоданих;

$F(k)$ ,  $F^T(\ell)$  - відповідно вектор дискретних значень базисних функцій dct і його транспонований вид.

Двухпрохідна реалізація двовимірного dct має вигляд:

1) на першому проході виконується одномірне дискретне косинусне перетворення стовпців масиву відеоданих. Формується проміжний масив  $H(k, \ell)$ :

$$H(k, \ell) = F(k) X(i, j)_{k, \ell}, \quad (3)$$

де  $H(k, \ell)$  - проміжний масив розмірності  $q_\ell \times q_c$ .

2) другий прохід пов'язаний з виконанням одномірного dct для рядків проміжного масиву  $H(k, \ell)$ :

$$C(k, \ell) = H(k, \ell) F^T(\ell). \quad (4)$$

Трансформоване подання  $C(k, \ell)$  зображень формується на основі двох прохідної схеми виконання ортогонального перетворення. Трансформанта  $C$  компонент dct-перетворень має вигляд

$$C = \begin{pmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,\ell} & \dots & c_{1,q_c} \\ & & & \dots & & \\ c_{k,1} & c_{k,2} & \dots & c_{k,\ell} & \dots & c_{k,q_c} \\ & & & \dots & & \\ c_{q_\ell,1} & c_{q_\ell,2} & \dots & c_{q_\ell,\beta} & \dots & c_{q_\ell,q_c} \end{pmatrix}, \quad q_\ell = q_c = 1, (Q_\ell Q_c / q_\ell q_c),$$

де  $c_{k\ell}$  - компонента розташована в трансформанті на перетинанні  $k$ -ого рядка й  $\ell$ -го стовпця;  
( $Q_\ell Q_c / q_\ell q_c$ ) - кількість трансформант розміром  $q_\ell \times q_c$ , що формується для зображення, що містить  $Q_\ell \times Q_c$  елементів.

Технологія кодування для виключення надмірності з трансформант формується з урахуванням їх особливостей.

Етап 2 - стиск відеоданих пов'язаний з побудовою методів кодування, що забезпечують скорочення надмірності в трансформантах дискретного косинусного перетворення. Головною відмінною рисою процесу усунення надмірності в трансформованих зображеннях складається в врахуванні концентрації основної енергії вихідного сигналу в низькочастотних компонентах. Це дозволяє організувати обробку у двох режимах.

Перший - режим стиску без втрат. У цьому випадку постає завдання, не спотворюючи інформації, що міститься в зображенні, знайти спосіб закодувати його меншим числом біт. Для другого режиму допускається можливість пожертвування частиною інформації, що «не істотна» для подання даних. Такий підхід є суттю режиму стиску із втратами. Значить допускається можливість вибору між ступенем стиску і якістю відновленої інформації. Найбільший ступінь стиску при обробці трансформованих зображень досягається в режимі стиску із втратами якості. У цьому випадку враховується особливість зорової системи, що складає в тому, що основна інформація в зображеннях міститься у великих деталях, контурах. Основна частина такої інформації міститься в низькочастотних компонентах трансформанти, що мають більші значення (використовується властивість когерентності). Ідея когерентності областей полягає в малій зміні кольорів і структури на невеликій ділянці зображення. Всі алгоритми, про які мова йтиме нижче, були створені пізніше спеціально для стиску графіки й використовують цю ідею.

Інформація про дрібні деталі формується у високочастотних компонентах трансформанти дискретного косинусного перетворення, значення яких найчастіше близькі до нульового. Для виключення надмірності в трансформанті dct-перетворення на основі використання такої її особливості пропонується здійснювати нерівномірне кодування компонентів  $c_{k\ell}$ . На подання низькочастотних компонентів (розташованих у верхньому лівому куті трансформанти) приділяється найбільша кількість розрядів  $q_{bp}^{(\ell)}$ :

$$q_{bp}^{(\ell)} \rightarrow \log_2 c_{k_\ell, \psi_\ell}, \quad (5)$$

де  $q_{bp}^{(\ell)}$  - кількість розрядів для низькочастотних (low frequency) компонент трансформант dct-перетворення;  $k_\ell, \psi_\ell$  - координати низькочастотних компонентів у трансформанті.

Навпаки на подання високочастотних компонентів (розташованих у нижньому правому куті трансформанти) затрачається найменша кількість двійкових розрядів  $q_{bp}^{(h)}$ :

$$q_{bp}^{(h)} < \log_2 c_{k_h, \psi_h}, \quad (6)$$

де  $q_{bp}^{(h)}$  - кількість розрядів для високочастотних (high-frequency) компонент трансформант;

$k_h, \psi_h$  - координати високочастотних компонентів у трансформанті.

Зрозуміло, що за рахунок нерівномірних витрат кількості розрядів на компоненти трансформант забезпечується скорочення первісного  $W$  цифрового обсягу трансформанти

$$\eta_c^{(1)} = \frac{w}{w_c} = \frac{q_\ell q_c q_{bp}}{\sum_{k=1}^{q_\ell} \sum_{\psi=1}^{q_c} q(c_{k,\psi})_{bp}} > 1, \quad (7)$$

де  $\eta_c^{(1)}$  - коеф. стиску трансформанти за рахунок нерівномірного бітового розподілу її компонент;

$w, w_c$  - сумарна кількість розрядів, що відводить на подання трансформанти до й після їхньої класифікації по частотній ознаці.

Існують різні стратегії реалізації нерівномірного бітового розподілу компонент трансформанти [3,4]. Серед них найбільш проробленими є:

1) зональне й граничне кодування компонентів трансформант. У першому випадку величина  $q(c_{k,\psi})_{bp}$  вибирається по зонному принципу, тобто залежно від позиції компонента в трансформанті. У другому випадку компонента класифікуються граничним рівнем. У крайньому випадку, якщо для деяких зон (зонне кодування) і значень нижніх порогів (граничне кодування) проводити обнуління компонентів, тобто  $q(c_{k,\psi})_{bp}=0$ , те одержимо стратегії відповідно зонного й порогового відбору;

2) стратегія діагональної квантизації компонент. У принципі це просто заелементний розподіл компонентів трансформанти на матрицю квантування. Розрахунок елементів матриці квантування проводиться по формулі на базі функції  $\varphi$  - значення фактора яскравості.

Для зниження динамічного діапазону компонент та збільшенню нульових компонент трансформанти задаватимуть матрицю квантування з більшими коефіцієнтами.

Однієї з можливих реалізацій етапу квантування є відкидання молодших бітів компонент трансформанти. Значить розглянута обробка трансформант супроводжується внесенням втрат якості зображень. Режим стиску без втрати якості реалізується без квантування компонент трансформант. Існує два основних підходи до побудови процесу кодування для виключення надмірності в трансформантах (рис. 1).

Перший підхід ґрунтується на виявленні залежностей у самих компонентах трансформанти. Використовується нерівномірність значень компонент трансформанти й наявність нульових компонентів. Набір точок, що ідуть підряд, зображення одного кольорів називається серією. Довжина цього набору точок називається довжиною серії.

Для збільшення довжини серії  $\ell_\alpha$  нульових компонентів пропонується розвертати трансформанту в  $q_\ell q_c$ -компонентний вектор за допомогою "зиг-заг"-сканування. Стиск компонентів і довжин нульових серій досягається в результаті арифметичного кодування. У цьому випадку скорочується статистична надмірність у компонентах трансформанти й у довжинах серій нульових компонентів. Коефіцієнт стиску  $\eta_c^{(2)}$  знаходиться по формулі

$$\eta_c^{(2)} = \frac{w}{w_c^{(2)}} = \frac{q_\ell q_c q_{bp}}{w_{ct} + w_{ls}}, \quad (8)$$

де  $\eta_c^{(2)}$  - коефіцієнт стиску трансформанти за рахунок арифметичного кодування компонент і довжин серій нульових компонентів;

$w_{ct}, w_{ls}$  - сумарна кількість розрядів в арифметичних кодових конструкціях сформованих відповідно для компонентів трансформанти й довжин серій нульових компонентів.

Нижньою границею величин  $w_{ct}$  й  $w_{ls}$  як довжин арифметичних кодів буде кількість інформації для відповідної статистичної моделі.

З урахуванням нижніх границь величин  $w_{ct}$  й  $w_{ls}$  максимальне значення коефіцієнта стиску буде дорівнює  $\eta_c^{(2)}$  (max):

$$\eta(\max)_c^{(2)} = \frac{q_l q_c q_{bp}}{n_\alpha (H_{ct} + H_{ls})}. \quad (9)$$

Як закон розподілу довжин серій пропонується використати геометричний закон. Для геометричного закону розподілу відповідають наступні обмеження:

- виявлення початку серії нульових компонентів є події взаємозалежні й рівноймовірні. Імовірність появи серії нульових компонентів є величиною постійної й рівної  $p$ ;

- у межах локальних областей зображень статистичні характеристики не змінюються.

При обробці трансформант значення довжини серії нульових компонентів не буде перевищувати величини  $q_l q_c$ ,  $\ell_\alpha < q_l q_c$ . У загальному випадку максимальне значення величини  $\ell_\alpha$  буде обмежено значенням  $L$  [4].

Коефіцієнт максимального стиску  $\eta(\max)_c^{(2)}$  буде обчислюватися:

$$\eta(\max)_c^{(2)} = \frac{q_l q_c q_{bp}}{-n_\alpha \left( \sum_{\alpha_1=1}^{m_c} \sum_{\alpha_2=1}^{m_c} P(c_{\alpha_1}; c_{\alpha_2}) \log_2 P(c_{\alpha_1} | c_{\alpha_2}) \right) + \frac{(1-q)^{L-1}}{p} (\log_2 p + \frac{q}{p} \log_2 q)}. \quad (10)$$

Проведений аналіз недоліків технології кодування компонент трансформант dct-перетворення показує, що величина коефіцієнта стиску  $\eta(\max)_c^{(2)}$  залежить від:

- 1) кількості серій нульових компонентів і значень їхніх довжин;
- 2) статистичних характеристик послідовності ненульових компонентів і довжин ланцюжків нульових компонентів;
- 3) точності вибору статистичної моделі ненульових компонентів і довжин серій нульових компонентів;
- 4) особливостей статистичних кодів.

При такому підході збільшується ступінь нерівномірності розподілу компонент трансформант і збільшується середня довжина серії. Однак більший ступінь стиску досягається в основному за рахунок скорочення психовізуальної надмірності, що приводить до втрати контролю за якістю відновлених зображень.

Для виходу з такої ситуації пропонується використати другий напрямок технологічної реалізації процесу скорочення надмірності в трансформантах dct й dwt перетворень (рис. 1). Другий підхід базується на організації кодування бітових площин. У цьому випадку враховуються такі особливості компонентів трансформант для широкого класу зображень (для різного ступеня насиченості дрібними деталями) як ті, що бітове подання компонентів трансформант містить зони нульових елементів. Для компонентів відповідним низькочастотним складовим нульові зони розміщуються в середині й наприкінці двійкового подання. Навпаки для високочастотних компонентів характерне розміщення нульових зон на початку двійкового подання. Причому компоненти трансформанти з більшими значеннями сконцентровані у відносно малій області трансформанти, навпаки компоненти з мінімальними значеннями займають більшу площу трансформанти. Значить для бітових площин трансформант буде характерно наявність областей, що містять велику кількість нульових двійкових елементів.

Переваги технології кодування бітових площин трансформант щодо технології безпосереднього кодування компонент трансформант (ураховується абсолютне значення компонента) полягають у тому, що:

1) така схема є реалізованою в технологічному плані. Отже, її модифікація, що дозволяє істотно поліпшити характеристики технології стиску не викликає необхідності корінних (а значить і дорогих) змін у технологічному процесі (нових апаратно-конструктивних, програмних рішень, нової елементної бази);

2) така обробка найцікавіша з позиції обробки сильнонасичених реалістичних зображень. Тому що в цьому випадку існує можливість виявлення більшої кількості закономірностей. Це у свою чергу створює потенційні можливості для підвищення ступеня стиску щодо обробки з урахуванням абсолютних значень компонент;

3) формат JPEG-LS працює без етапу виконання ортогонального перетворення. І там використовується бітова обробка. Значить розвиток методів бітової обробки трансформант

дозволяє забезпечити свою інтеграцію для різних форматів стиску так і для різних режимів стиску. Отже, забезпечується інструмент для розширення можливостей форматів подання зображень;

4) велика кількість нульових областей розподілених на різних позиціях бітових площин;

5) можливість реалізації технології прогресивного JPEG. Обробці й передачі на початку піддаються старші розрядні площини трансформанти, а потім поетапно молодші бітові площини. Це забезпечує можливість швидкої передачі грубих форм зображень із поступовим додаванням уточнюючої інформації;

6) можливістю кодування гіперспектральних зображень (масивів зображень отриманих для різних спектральних діапазонів). Спектрально-зональне зображення представляється двійковим кубом. При цьому виникає проблема великого бітового обсягу;

7) забезпечується реалізація режиму квантизації компонент трансформанти за рахунок обнуління або відкидання бітових площин, що містять молодші розряди.

### Висновки

1. Обґрунтовано підхід щодо скорочення надмірності в трансформованих зображеннях, що базується на кодуванні бітових площин, сформованих для двійкового подання компонентів трансформант. Таке обґрунтування базується на:

1) недоліках технології безпосередньо кодування компонент трансформант, пов'язаних з:

- неефективністю розглянутої технології кодування компонент трансформант у випадку забезпечення необхідного ступеня вірогідності відновлюваних зображень;

- тим, що ступінь стиску в режимі регульованих втрат якості сильно залежить від класу зображень (ступеня насиченості зображення дрібними деталями різних кольорів).

2) перевагах технології кодування бітових площин трансформант щодо технології безпосереднього кодування компонент трансформант, які полягають у тому, що вона:

- є реалізованою в технологічному плані. Отже, її модифікація, що дозволяє істотно поліпшити характеристики технології стиску не викликає необхідності корінних змін у технологічному процесі;

- у цьому випадку існує можливість виявлення більшої кількості закономірностей. Це у свою чергу створює потенційні можливості для підвищення ступеня стиску щодо обробки з урахуванням абсолютних значень компонент;

- допускає свою інтеграцію як для різних форматів стиску, так і для різних режимів стиску.

Отже, забезпечується інструмент для розширення можливостей форматів подання зображень;

- урахує наявність великої кількості нульових областей розподілених на різних позиціях бітових площин;

- забезпечує можливість швидкої передачі грубих форм зображень із поступовим додаванням уточнюючої інформації;

- має можливість кодування гіперспектральних зображень;

- забезпечується реалізація режиму квантизації компонент трансформанти за рахунок обнуління або відкидання бітових площин, що містять молодші розряди.

### Список літературних джерел

1. Юдін О.К. Кодування в інформаційно-комунікаційних мережах:-Монографія. - К.: НАУ, 2007.-308с.

2. Скляр Б. Цифровий зв'язок. Теоретичні основи й практичне застосування / Пер. с англ. - М.: Изд. будинок Вільямс, 2004. - 1104 с.

3. Юдин А.К. Баранник В.В. Гулак Н.К. Информационная технология декомпрессии изображений с регулируемой достоверностью. Системы обработки информации. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вып. 3(77). – С. 67 – 74.

4. Udin A., Gulak N. Information Technology of Compression of Images in Infocommunications Systems.- IEEE East-West Design & Test International Symposium/ Moscow, Russia, September 18 – 21, 2009/ - P. 495 – 498.

5. Гулак Н.К. Неравновесное позиционное представление битовых плоскостей трансформант Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вып. 1 (19). – С. 76 – 82.