

УДК 621.327:681.5

# Метод стиснення відеосегментів з забезпеченням їх достовірності в спектрально-кластерному просторі

Баранник В. В.<sup>1</sup>, Красноруцький А. О.<sup>3</sup>, Колесник В. О.<sup>2</sup>, Сушко А. Л.<sup>3</sup>,  
Єлісєєв Є. С.<sup>3</sup>, Федоровський О. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

<sup>3</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків Україна

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

Проводиться аналіз особливостей організації відеоінформаційного забезпечення для систем управління критичною інфраструктурою. Показано, що зростають вимоги щодо повноти, своєчасності та достовірності доставки відеоінформації. Показано зростання попиту на організацію дистанційних відеосервісів з використанням технологічних платформ на базі безпілотних авіаційних комплексів (БАК). Водночас це потребує дотримання вимог ряду міжнародних стандартів, які висуваються до якості надання відеоінформації. В свою чергу, такі вимоги спонукають використання телекомунікаційних систем (ТКС) з необхідним рівнем швидкості передачі інформації. Для систем надання дистанційних відеосервісів з використанням бездротових ТКС на авіаційних платформах існує дисбаланс. Він стосується відставання темпів зростання продуктивності ТКС за швидкістю передачі даних відносно темпів зростання бітової інтенсивності відеоінформаційних потоків, які формуються на борту БАК. В статті показано, що наслідками дисбалансу є поява значних часових затримок в процесі доставки відеоінформації. Відповідно виникають втрати: актуальності (адекватності) відеоінформації щодо поточного стану об'єктів моніторингу; достовірності відеоінформації. Наведені деструкції є причиною порушення процесу прийняття рішень в системах критичної інфраструктури. Отже існує нагальна потреба у вирішенні **науково-прикладної задачі**, яка стосується підвищення якості надання дистанційних відеосервісів з використанням телекомунікаційних технологій на платформі БАК. Для вирішення означеної задачі використовується комплекс технологічних рішень. Основною складовою тут є застосування технологій зменшення бітової інтенсивності відеопотоку. Водночас, як показано в статті, в процесі розробки таких технологій потрібно вирішувати суперечність. Вона полягає в тому, що кількість психовізуальної надмірності відеозображень використовується, як для локалізації деструктивного впливу каналних помилок на достовірність відеозображень, так і для скорочення їх бітового об'єму. Отже виникає протиріччя між вимогами щодо забезпечення достовірності відеозображень та їх своєчасною доставкою. Звідси реалізація дистанційних відеосервісів з використанням бортових ТКС в умовах дії завад висуває додаткові вимоги до технологій зменшення бітового об'єму відеоданих. Тому **мета статті** полягає у створенні методів стиснення відеозображень для зменшення їх бітового об'єму в умовах забезпечення потрібної достовірності. На основі всебічного аналізу обґрунтовано напрямки вдосконалення методів кодування. Вони стосуються таких аспектів. Перший. Виявлення нових закономірностей, врахування яких дозволить створити умови для додаткового зменшення бітового об'єму відеосегментів без внесення втрат щодо достовірності інформації. Дозволить локалізувати руйнівну дію каналних помилок в процесі реконструкції відеозображень з пошкодженими кодограмами їх компактного опису. Другий. Формувати кодові конструкції з використанням режиму рівномірного або локально-рівномірного кодоутворення. Відповідно до чого обґрунтовано ефективність кодування трансформованих відеосегментів в кластерному просторі. При цьому кластеризація здійснюється за такою ознакою, як кількість серій одиниць в двійковому описі їх компонент. Стверджується те, що для кластеризованої трансформанти створюються умови для додаткового скорочення кількості надмірності без втрат інформації. Розроблено метод стиснення відеосегментів з забезпеченням їх достовірності в спектрально-кластерному просторі. В основі такої технології лежить принцип дуальності компонент трансформанти. Він полягає в тому, що кластеризована компонента може одночасно розглядатись як: елемент статистичного простору кластеру; допустимий елемент структурного кластеру. Тобто як одна з допустимих перестановок з повтореннями з визначеною кількістю серій одиниць. За результатами експериментальних досліджень можна стверджувати те, що у разі використання створеного методу для заданих рівнів досягається збільшення рівня стиснення відносно існуючих методів в середньому на 40%.

*Ключові слова:* дистанційний відеосервіс; своєчасність та достовірність відеоінформації; стиснення аерофотозображень; структурні кластери; кількість серій одиниць; спектральний простір

DOI: [10.20535/RADAR.2023.92.41-53](https://doi.org/10.20535/RADAR.2023.92.41-53)

## Вступ. Постановка проблеми

Організація інформаційного забезпечення для систем управління критичною інфраструктурою (КІ) в сучасних умовах характеризується такими аспектами:

- 1) поширене використання відеоінформаційних ресурсів, в тому числі відеозображень та динамічних відеоданих, для аналізу та прийняття рішень про стан та переміщення об'єктів моніторингу [1];
- 2) застосування для збору та реєстрації відеоінформації дистанційних мобільних сенсорів, в тому числі безпілотних авіаційних комплексів (БАК) [2];
- 3) застосування для обміну інформацією бездротових телекомунікаційних систем (ТКС), в тому числі на базі бортових платформ [3].

Відповідно зростають вимоги щодо:

- а) повноти відеоінформаційних ресурсів [4]. Кількість пікселів у відеокадрі за останні декілька років зросла в середньому в 16 разів;
- б) своєчасності та достовірності відеоінформації [5]. Своєчасність визначається, як сумарні часові затримки на обробку та передачу інформації з бортових комплексів на пункт приймання. Достовірність встановлюється відповідністю відеозображення, що отримується на приймальній стороні, до його початкового представлення на борту або до відповідного об'єкту моніторингу.

Звідки постає питання відносно забезпечення потрібних якісних показників надання дистанційного відеосервісу [6]. Тут необхідно взяти до уваги особливості аналізу відеоінформації в системах КІ та критичність відеоінформації щодо впливу на процес прийняття рішень та рівень наслідків у разі його порушення. Існують рекомендації відносно якості надання відеоінформації в системах аеромоніторингу, які визначаються такими стандартами: STANAG 4671:2009 [7], STANAG 7023:2009 [8]. З врахуванням чого існують такі вимоги:

- 1) щодо визначення достовірності отриманої відеоінформації. Встановлено ієрархію рівнів для кількісного оцінювання достовірності, а саме:
  - для найвищої критичності інформації необхідно забезпечити режим обробки та передачі без втрат інформації. В цьому випадку кількість спотворених пікселів або показник – середнє квадратичне відхилення повинні дорівнювати нулю;
  - для найменшої критичності інформації допускаються спотворення пікселів відеокадрів. Допустимий рівень таких спотворень за показником пікового відношення сигнал/шум (PSNR) повинен становити не менш ніж 25–33 дБ в залежності від призначення відеокадрів;

- 2) щодо часових затримок в процесі обробки та передачі відеокадрів. Такий показник в залежності від критичності та часу актуальності (старіння) інформації має бути на рівні від декількох десятків мілісекунд до декількох секунд.

Означені тенденції вимагають використання ТКС з необхідним рівнем швидкості передачі інформації. В той же час для систем надання дистанційних відеосервісів з використанням бездротових ТКС на авіаційних платформах існує дисбаланс. Він стосується відставання темпів підвищення продуктивності ТКС за швидкістю передачі даних відносно темпів зростання бітової інтенсивності відеоінформаційних потоків, які формуються на борту БАК.

Такий дисбаланс спонукає виникненню значних часових затримок в процесі доставки відеоінформації та, як слідство, призводить до втрат [9]:

- актуальності (адекватності) відеоінформації щодо поточного стану об'єктів моніторингу;
- достовірності відеоінформації. Це зумовлено тим, що у разі обмеженого часу зв'язку з БАК відеокадр або їх група буде отримана не в повному обсязі.

Наведені деструкції є причиною порушення процесу прийняття рішень в системах критичної інфраструктури. Отже існує насущна потреба у вирішенні **науково-прикладної задачі**, яка стосується підвищення якості надання дистанційних відеосервісів з використанням телекомунікаційних технологій на платформі БАК.

Для вирішення означеної задачі використовується комплекс технологічних рішень. Основними складовими тут є:

- 1) збільшення пропускної спроможності бездротових телекомунікаційних мереж [10];
- 2) застосування технологій зменшення бітової інтенсивності відеопотоку [11–19].

Стосовно першого напрямку потрібно врахувати те, що для систем передачі інформації з борта БАК притаманні такі вразливості та дестабілізуючі фактори: наявність впливу цілого спектра завад, електромагнітних шумів та завад штучного походження; взаємні електромагнітні перешкоди пристроїв одного каналу (або сусідніх частот); затухання сигналу в навколишньому середовищі. Все це призводить до потенційного збільшення ймовірності виникнення помилок в кодограмах інформаційного потоку, що передається з використанням бортових телекомунікаційних технологій.

З іншого боку, існують вимоги для мереж передачі інформації в системах критичної інфраструктури, які стосуються того, що [20]:

– ймовірність  $P(\varepsilon)$  виникнення бітової помилки у разі передачі загального інформаційного потоку не повинна перевищувати рівень  $10^{-4}$ , тобто  $P(\varepsilon) \leq 10^{-4}$ ;

– у разі передачі відеоінформаційного потоку необхідно забезпечити: кількість  $\nu'_{px}$  спотворених пікселів не більше ніж 3–5%; кількість  $\nu'_{pac}$  втрачених пакетів не більш ніж 3%.

Для забезпечення наведених вимог для бортових ТКС використовуються методи завадостійкого кодування. Найбільш розповсюдженими є коди перевірки на парність, коди Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (БЧХ) [21], коди Ріда-Соломона [22].

Використання даних кодових систем створює можливість для виявлення та виправлення бітових помилок, які виникають в кодограмах під час їх передачі каналами зв'язку. Така можливість досягається за рахунок додаткового залучення надлишкових двійкових розрядів. Це збільшує початковий бітовий об'єм  $V_{beg}$  відеокадрів в середньому від 1,5 до 3 разів. Відповідно зростають часові  $t_{tr}$  затримки в процесі їх передачі телекомунікаційними мережами. Втрати щодо оперативності доставки інформації у разі додаткового використання завадостійкого кодування можуть сягати 10 разів.

Отже, можна стверджувати те, що залучення завадостійких кодів призводить до підвищення інформаційного навантаження на бортові засоби реєстрації відеоінформації, обчислювальні пристрої та технології передачі такої інформації. Виникають ризики щодо втрати достовірності та актуальності відеоінформації у випадку переповнення бортових носіїв інформації та обмеженого сеансу зв'язку.

Другий напрямок локалізації деструктивного впливу каналних помилок на достовірність відновлених відеозображень стосується врахування психовізуальних особливостей їх сприйняття зоровою системою [11]. Такий напрямок ґрунтується на тому, що деякі спотворення окремих пікселів та ділянок відеокадру не призводять до порушення загального їх візуального оцінювання. В цьому випадку помилки на синтаксичному рівні опису відеозображення не призводять до втрати достовірності на рівні його структурно-семантичного змісту [12].

В той же час означені психовізуальні особливості відеозображень використовуються в сучасних технологіях компресії для зменшення їх бітового об'єму [13]. При цьому, як показано в праці [14], саме за рахунок усунення кількості такої надмірності досягається найбільше скорочення бітового об'єму відеозображень.

Звідки виникає суперечність між забезпеченням достовірності відеозображень та їх своєчасною доставкою. Це стосується того, що кількість психовізуальної надмірності відеозображень використовується, як для локалізації деструктивного впливу каналних помилок на достовірність відеозображень, так й для скорочення їх бітового об'єму.

Отже, реалізація дистанційних відеосервісів з використанням бортових ТКС в умовах дії завад висуває додаткові вимоги до технологій зменшення бітового об'єму відеоданих.

Розробка методів кодування необхідна для можливості передачі більшої кількості інформації з використанням існуючої пропускної здатності сучасних каналів зв'язку. Це зумовлено тим, що існує дисбаланс між, з одного боку, об'ємами відеоданих, а з іншого – обмеженими пропускними здібностями сучасних мереж передачі інформації. Отже, до систем кодування висуваються такі вимоги:

– підвищення рівня стиснення в середньому не менше ніж на 10%;

– забезпечення потрібного рівня достовірності інформації.

Тому **мета статті** полягає у розробці методів кодування відеозображень для збільшення рівня їх стиснення в умовах забезпечення потрібної достовірності на основі скорочення структурно-статистичної надмірності в кластеризованих трансформантах.

## 1 Обґрунтування підходу для вдосконалення методів стиснення відеозображень в умовах збереження їх достовірності

Для забезпечення зменшення бітової інтенсивності відеоданих використовуються стандартизовані платформи, а саме: JPEG для кодування статичних відеозображень [15]; MPEG-4, H.264/AVC, H.265/HEVC – для кодування динамічного потоку відеокадрів [16]. В основі таких платформ лежить технологічне рішення, яке базується на усуненні кількості психовізуальної та статистичної надмірностей в частотно-спектральному представленні відеосегменту [17].

Скорочення кількості психовізуальної надмірності здійснюється на основі квантування компонент трансформант (масиву спектральних коефіцієнтів). Тут враховується те, що високочастотні компоненти трансформанти переважно містять інформацію щодо дрібних деталей початкового відеосегменту. Отже, мають менший вплив на візуальне сприйняття відеозображень [18].

Статистична надмірність в трансформантах зумовлена наявністю ймовірнісних особливостей, а саме тим, що [19]:

– трансформанти мають обмежену потужність (кількість компонент з різними значеннями);

– закон розподілу ймовірностей появи компонент трансформанти прагне до нерівномірного.

Виключення кількості такої надмірності відбувається за рахунок використання методів стати-

стичного кодування. Прикладами таких методів є різноманітні модифікації коду Хаффмана [23, 24] та арифметичного кодування [25, 26]. Для збільшення коефіцієнту стиснення в процесі побудови статистичної моделі додатково враховуються довжини серій компонент, які мають нульові значення [27].

Такі технологічні рішення мають найбільшу ефективність у разі кодування низько інформативних відеозображень без врахування наявності кодограм, які пошкоджено каналними помилками [28]. Навпаки, найменша ефективність означених методів з'являється у разі обробки достатньо інформативних відеозображень, до яких відносяться аерофотознімки, з врахуванням деструктивного впливу каналних помилок. Це обумовлено тим, що стандартизовані технологічні рішення в цьому випадку мають ряд системних недоліків. Вони стосуються:

1. Зниження значення коефіцієнту стиснення, що зумовлено:

а) зменшенням кількості психовізуальної та статистичної надмірностей трансформант, яка потенційно скорочується в процесі їх кодування;

б) збільшенням потужності трансформанти та відповідно в умовах, коли розподіл ймовірностей компонент наближається до рівномірного закону, відбувається значне збільшення довжини нерівномірно-префіксних (НП) кодограм;

в) збільшенням ступеня насиченості відеосегментів дрібними деталями. Підвищується інформативна вага високочастотних компонент трансформанти. В цих умовах додаткове усунення кількості психовізуальної надмірності супроводжується:

– значними втратами якості, роздільної здатності аерофотознімків або взагалі руйнацією окремих інформативних ділянок відеокадру;

– зниженням стійкості процесу декодування пошкоджених каналними помилками кодограм щодо збереження цілісності відеокадру.

2. Зниження стійкості процесу декодування пошкоджених каналними помилками кодограм компактного опису відеосегментів щодо збереження їх достовірності. Ці обставини зумовлені такими вразливими особливостями стандартизованих технологій:

– у разі використання НП кодограм помилка в одному біті неминуче призводить до неможливості декодування послідовних кодограм трансформанти. З'являється лавинний ефект щодо розповсюдження каналної помилки на процес декодування інших кодограм;

– ефект розповсюдження помилки значно посилюється у разі їх виникнення в коді, який містить інформацію про довжину серій компонент з нульовими значеннями. Спостерігається ефект зсуву або затирання значень інших компонент.

Оцінки негативного впливу каналних помилок на достовірність відеозображень наведені у вигляді діаграм на Рис. 1. Для отримання даних використо-

вується метод за технологією JPEG. Стиснення проводиться з внесенням контрольованих спотворень щодо якості відеозображень. Рівень достовірності відновлених відеозображень оцінюється за показником пікового відношення сигнал/шум  $PSNR_{\epsilon}$  при заданому рівні помилок ( $P(\epsilon) = 10^{-4}$  та  $P(\epsilon) = 10^{-5}$ ) в каналах передачі даних. Оцінювання проводиться без використання завадостійкого кодування.

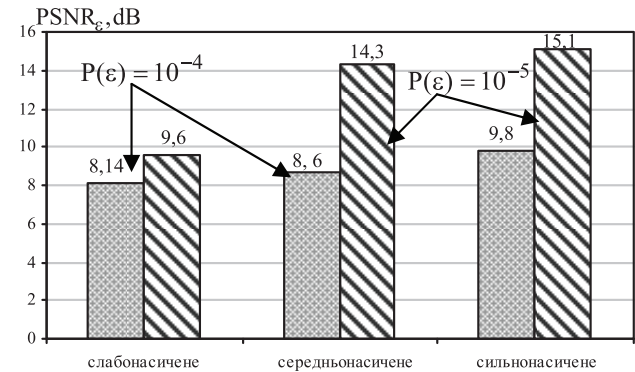


Рис. 1. Діаграма залежності пікового відношення сигнал/шум  $PSNR_{\epsilon}$  від  $P(\epsilon)$  в каналі зв'язку

Аналіз діаграм на Рис. 1 дозволяє стверджувати те, що в жодному разі не забезпечується потрібний рівень  $PSNR_{nes}$ . Спостерігається зменшення величини  $PSNR_{\epsilon}$  відносно необхідного рівня  $PSNR_{nes}$ , що в залежності від інформативності відеосегментів становить: 6–39% для  $P(\epsilon) = 10^{-5}$ ; 37–46% для  $P(\epsilon) = 10^{-4}$ .

Отже, стандартизовані технології стиснення не забезпечують потрібного рівня стійкості до впливу каналних помилок на процес декодування пошкоджених ними кодограм компактного опису.

Враховуючі недоліки стандартизованих методів у разі кодування достатньо інформативних відеозображень **пропонується** їх вдосконалення здійснювати за такими напрямками:

1) виявлення таких нових закономірностей, врахування яких дозволить створити умови для:

– додаткового зменшення бітового об'єму відеосегментів без внесення втрат щодо достовірності інформації;

– локалізації руйнівної дії каналних помилок в процесі реконструкції відеозображень на основі пошкоджених кодограм їх компактного опису;

2) формування кодових конструкцій з використанням режиму рівномірного або локально-рівномірного кодування.

## 2 Обґрунтування підходу щодо структурної кластеризації трансформанти

Для усунення недоліків необхідно створити нові системи кодування, що не пов'язані з можливою

втратаю інформації. Одним з напрямків є розробка технології реструктурування трансформанти для забезпечення:

1) перерозподілу їх компонент таким чином, щоб закон розподілу ймовірностей їх появи прагнув до нерівномірного;

2) зменшення потужності сукупностей (кластерів) даних;

3) скасування умови щодо забезпечення префіксності кодограм у разі збільшення потужності сукупностей даних або/та зменшення ймовірностей появи окремих компонент (використання рівномірного кодування);

4) використання рівномірних кодових конструкцій, в тому числі в якості інформаційних опорних маркерів. Тобто інформаційні кодограми окремих компонент можуть використовуватися як опорні маркери рівномірної довжини між послідовностями нерівномірних кодограм інших компонент;

5) зменшення бітових затрат на інформативну частину кодової конструкції трансформанти та створення умов для стабілізації зміни ймовірностей для трансформант сегменту (стаціонарність статистичної моделі для трансформант в межах сегменту).

Варіантом для створення відповідних умов є здійснення кластеризації трансформанти [29, 30].

Кластеризація створює умови для виявлення і скорочення більшої кількості надмірності. Це досягається на основі підвищення нерівномірності розподілу компонент в межах кожного кластеру. Кластеризація проводиться для трансформант. При цьому компоненти кожного кластеру відрізняються кількістю серій одиниць в своєму двійковому описі. Під трансформантою розуміється масив коефіцієнтів, що отримується після дискретно-косинусного перетворення (ДКП) сегменту.

Кластеризацію трансформанти **пропонується** здійснювати в двійковому просторі їх компонент. Створюється потенціал відносно додаткового скорочення кількості надмірності без втрат інформації з врахуванням залежностей в двійковому описі.

В основі кластеризації лежить підхід до розбиття загального простору двійкових послідовностей довжиною  $\ell$  біт [29]. Такий загальний простір визначається сукупністю можливих **перестановок з повторенням**, які утворюються з  $\ell$ -бітних двійкових послідовностей. Означені двійкові послідовності утворюють множину  $\Lambda_2(\ell)$ . Виходячи з визначення множини  $\Lambda_2(\ell)$  її об'єм  $|\Lambda_2(\ell)|$  визначається такою формулою:  $|\Lambda_2(\ell)| = 2^\ell$ . Отже, кластеризація множини (простору)  $\Lambda_2(\ell)$  двійкових послідовностей, довжиною  $\ell$  біт, полягає у формуванні окремих підмножин  $\Lambda_2(\ell; q)$  за структурною ознакою  $q$ . При цьому необхідно забезпечити умову, коли підмножини  $\Lambda_2(\ell; q)$  не перетинаються, тобто:

$$\Lambda_2(\ell; \gamma) \cap \Lambda_2(\ell; \chi) = \emptyset, \text{ для } \gamma \neq \chi \text{ та}$$

$$\Lambda_2(\ell; \gamma), \Lambda_2(\ell; \chi) \in \Lambda_2(\ell).$$

Кількість  $Q$  підмножин  $\Lambda_2(\ell; q)$  та їх об'єм  $|\Lambda_2(\ell; q)|$  (кількість допустимих двійкових послідовностей) залежить від вибору конкретної ознаки  $q$ . В якості такої ознаки  $q$  **пропонується** використовувати структурну характеристику двійкових послідовностей, а саме кількість  $q$  серій одиниць. Це зумовлено можливістю визначення: об'єму множини допустимих двійкових послідовностей; кількості інформації в двійкових послідовностях; потенційної кількості структурної надмірності, яка може бути скорочена в процесі кодування.

Відповідно для обраної ознаки маємо такі вирази для знаходження кількісних параметрів  $|\Lambda_2(\ell; q)|$ ,  $Q$  кластеризації, а саме [29]:

$$|\Lambda_2(\ell; q)| = \prod_{\phi=2 \cdot q+1}^{\ell+1} \phi / (\ell + 1 - 2 \cdot q)!;$$

$$Q = \left\lceil \frac{\ell + 1}{2} \right\rceil + 1.$$

Тут  $Q$  – номінальна кількість значень, яке приймає ознака  $q$ , тобто номінальна кількість підмножин  $\Lambda_2(\ell; q)$ , яке за ознакою  $q$  формується для множини  $\Lambda_2(\ell)$ . З врахуванням чого, маємо такий вираз щодо структури множини  $\Lambda_2(\ell)$  за обраною структурною ознакою  $q$ :

$$\Lambda_2(\ell) = \bigcup_{q=0}^{Q-1} \Lambda_2(\ell; q) = \bigcup_{q=0}^{\lceil \ell+1/2 \rceil} \Lambda_2(\ell; q).$$

Зрозуміло, що об'єм  $|\Lambda_2(\ell)|$  множини  $\Lambda_2(\ell)$  в структурному порядку через підмножини  $|\Lambda_2(\ell; q)|$  представляється співвідношенням [29]:

$$|\Lambda_2(\ell)| = \sum_{q=0}^{Q-1} |\Lambda_2(\ell; q)| = \sum_{q=0}^{\lceil \ell+1/2 \rceil} |\Lambda_2(\ell; q)|.$$

Звідки для заданого  $\ell$  між об'ємом  $|\Lambda_2(\ell)|$  загального двійкового простору  $\Lambda_2(\ell)$  та об'ємом  $|\Lambda_2(\ell; q)|$  підмножини  $\Lambda_2(\ell; q)$ , такої що  $\Lambda_2(\ell; q) \in \Lambda_2(\ell)$ , виконується співвідношення:

$$|\Lambda_2(\ell; q)| = \prod_{\phi=2 \cdot q+1}^{\ell+1} \phi / (\ell + 1 - 2 \cdot q)! < |\Lambda_2(\ell)| = 2^\ell,$$

$$q = \overline{0, Q-1}.$$

Відповідно, двійкові послідовності, що належать до підмножини  $\Lambda_2(\ell; q)$ , інтерпретуються як  $\ell$ -бітні перестановки з повтореннями, які містять  $q$  серій одиниць.

### 3 Розробка методу структурно-статистичного кодування трансформант в спектрально-кластерному просторі

Отже, **пропонується** здійснювати кластеризацію трансформанти  $Y_u$  на окремі кластери  $Y(q)_u$  шляхом розподілу компонент  $y_{u,i,j}$  на основі визначення та співставлення кількості  $q$  серій одиниць в їх двійкового опису  $[y_{u,i,j}]_2$ . Для цього використовується функціонал  $f_{cl}([y_{u,i,j}]_2; q)$  [30].

Відповідно, як показано в наукових працях [31–35], реалізація статистичного кодування в **спектрально-кластерному** (СК) просторі має такі особливості:

1. З одного боку досягаються переваги відносно випадку формування статистичної моделі та кодування поточних трансформант. Такі переваги стосуються:

1.1. Збільшення кількості  $H(q)_u$  статистичної надмірності, яку потенційно можна скоротити в процесі кодування компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$  СК  $Y(q)_u$ . Таке досягається за рахунок створення умов щодо підвищення рівня нерівномірності розподілу кластеризованих компонент.

1.2. Створення умов для скорочення довжини кодограм кластеризованих компонент відносно довжин їх кодограм у разі обробки в складі всієї трансформанти. Це досягається за рахунок того, що кластеризовані компоненти в кластері  $Y(q)_u$  будуть мати більшу ймовірність ніж в трансформанті. Відповідно до цього, створюються умови для синтаксичного опису кластеризованих компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$  кодограмою  $c_v(q; g)_{u,i,j}$  меншої довжини  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  ніж довжина  $v_{v,i,j}^{(u)}$  у випадку формування кодограми  $c_{v,i,j}^{(u)}$  у складі всієї трансформанти, а саме

$$v_v(q; g)_{u,i,j} \leq v_{v,i,j}^{(u)}.$$

2. З іншого боку залишаються системні недоліки, які пов'язано зі статистичним кодуванням трансформант для достатньо інформативних відеозображень. Це проявляється у зростанні довжини  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  НП кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$  у разі збільшення потужності  $D_q^{(u)}$  СК  $Y(q)_u$ , тобто:

$$v_v(q; g)_{u,i,j} \rightarrow v_{v,i,j}^{(u)} \text{ або } v_v(q; g)_{u,i,j} \rightarrow \ell \\ \text{для } D_q^{(u)} \rightarrow D^{(u)}.$$

Для локалізації або усунення означених недоліків **пропонується** розробляти процес кодування кластеризованих компонент з додатковим врахуванням структурних залежностей. Відповідно **необхідно** розробити технологічний механізм обмеження росту довжин НП кодограм, особливо у випадку збільшення потужності кластеру або якщо розподіл

ймовірностей появи компонент у кластері наближається до рівномірного закону.

В основі такого технологічного механізму **пропонується** використовувати **принцип дуальності** компонент трансформанти. Він полягає в тому, що кластеризована компонента може одночасно розглядатись як:

- елемент статистичного простору кластеру;
- допустимий елемент структурного кластеру, тобто як одна з допустимих перестановок з повтореннями з визначеною кількістю серій одиниць.

Отже, кластеризовані компоненти є допустимими комбінаціями структурного кластерного простору за визначеною ознакою  $q$ . В цьому випадку сукупність компонент в межах СК розглядається за структурним підходом.

В той же час можливі випадки, коли потенційна кількість  $H_{sr}(q)_u$  надмірності, яка скорочується з врахуванням структурних обмежень, буде перевищувати кількість  $H_{st}(q)_u$  надмірності в СК з обліком статистичних залежностей. Для такого випадку виконується нерівність:  $H_{sr}(q)_u \geq H_{st}(q)_u$ .

В цьому разі для додаткового зменшення бітового об'єму СК потрібно кодувати кластеризовані компоненти з врахуванням структурних особливостей їх двійкового опису.

Для цього **пропонується** використовувати властивість структурних кластерів, яка полягає в тому, що реалістична потужність  $D_q^{(u)}$  для  $q$ -СК буде обмежена зверху його номінальною потужністю  $D_{q,\ell}$ , тобто  $D_q^{(u)} \leq D_{q,\ell}$ . Під номінальною потужністю  $D_{q,\ell}$  СК розуміється максимально можлива кількість двійкових послідовностей  $[y'(q; d)_{u,i,j}]_2$ ,  $d = \overline{1, D_{q,\ell}}$ , які містять  $q$  серій одиниць, та для значень  $y'(q; d)_{u,i,j}$  їх десяткового опису виконується умова нерівності, тобто:

$$[y'(q; \chi)_{u,i,j}]_2, [y'(q; \gamma)_{u,i,j}]_2 \in Y(q)_u \text{ та}$$

$$y''(q; \chi)_{u,i,j} \neq y'(q; \gamma)_{u,i,j}.$$

В той же час за таких умов означені двійкові послідовності є допустимими перестановками з повтореннями, які можна скласти з  $\ell$ -бітних комбінацій в умовах наявності в їх змісту  $q$  серій одиниць. Вся сукупність таких допустимих  $\ell$ -бітних комбінацій складає підмножину  $\Lambda_2(\ell; q)$ . Звідки величина  $D_{q,\ell}$  дорівнює об'єму  $|\Lambda_2(\ell; q)|$  підмножини  $\Lambda_2(\ell; q)$  за структурною ознакою  $q$ . Отже  $Y'(q)_u \in \Lambda_2(\ell; q) \in \Lambda_2(\ell)$ , та

$$D_q^{(u)} \leq D_{q,\ell} = |\Lambda_2(\ell; q)| = \prod_{\phi=2 \cdot q+1}^{\ell+1} \phi! / (\ell+1-2 \cdot q)! < 2^\ell.$$

З іншого боку для допустимих двійкових послідовностей  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  в межах визначеного СК та в умовах врахування структурних особливостей їх

підмножин, можна використовувати принцип формування локально-рівномірних (ЛР) кодограм. Рівномірність обумовлено тим, що довжина локально-рівномірної кодограми  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  для двійкового опису  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  компоненти  $y(q; g)_{u,i,j}$ , яка належить до  $q$ -го СК, буде обмежено величиною  $V_{q,\ell}$ , тобто:  $v_f(q; g)_{u,i,j} < V_{q,\ell}$ .

Локальність такої рівномірності зумовлена тим, що для різних СК величини  $V_{q,\ell}$  можуть мати різні значення.

Використання такої стратегії кодоутворення обумовлено тим, що кодові значення  $N(q; g)_{u,i,j}$  двійкових послідовностей  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  будуть обмеженими номінальною потужністю  $D_{q,\ell}$  даного кластеру. Тому виконується нерівність:

$$N(q; g)_{u,i,j} \leq D_{q,\ell} - 1.$$

Це зумовлено тим, що номінальна потужність  $D_{q,\ell}$  СК  $Y(q)_u$  є кількістю  $|\Lambda_2(\ell; q)|$  допустимих двійкових послідовностей  $[y'(q; g)_{u,i,j}]_2$ , які мають різні значення  $N(q; g)_{u,i,j}$  та однакову кількість  $q$  серій одиниць.

Отже у разі збільшення довжини  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  НП кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$  **пропонується** відповідні двійкові послідовності  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  кодувати з врахуванням структурних особливостей кластеру  $Y(q)_u$  та формуванням ЛР кодограми  $v_f(q; g)_{u,i,j}$ .

Це дозволить:

- обмежити зріст довжин  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  НП кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$ ;
- створити **опорні кодограми**  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  в загальному бітовому потоці для локалізації руйнівної дії каналних завад у разі декодування пошкоджених ними НП кодограм  $c''_v(q; g)_{u,i,j}$ .

Розглянемо метод кодування двійкового синтаксичного опису  $[y(\theta; g)_{u,i,j}]_2$  кластеризованих компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$  з врахуванням структурно-статистичних закономірностей  $\{P'(q)_u; q\}$  кластеру  $Y(\theta)_u$ , тобто в структурно-статистичному просторі (описі) кластеру.

**Етап 1.** Перший технологічний етап пов'язаний з оцінкою кількості надмірності в поточному кластері  $Y(q)_u$  з використанням двох підходів, а саме виявлення:

- ймовірностей  $p'(q; d)_{u,i,j}$  появи компонент  $y'(q; d)_{u,i,j}$  та реалістичної потужності  $D_q^{(u)}$ ;
- кількості  $q$  серій одиниць для  $\ell$  бітного двійкового опису  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$ .

Тому по-перше, здійснюється оцінка кількості  $H_{st}(q)_u$  статистичної надмірності в СК  $Y(q)_u$ , яку потенційно можна усунути в процесі кодування (формування нерівномірно-префіксних кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$ ). **Тобто встановлюється потенційна спроможність статистичних методів щодо усунення максимальної кількості надмірності в поточному кластері.** Для цього обчислюється ентропія  $R(q)_u$  розподілу  $P'(q)_u$  кластеризованих

компонент  $y'(q; d)_{u,i,j}$  (компонент в межах окремого  $\theta$ -го кластеру). Використовується вираз:

$$R(q)_u = - \sum_{d=1}^{D_q^{(u)}} p'(q; d)_{u,i,j} \cdot \log_2 p'(q; d)_{u,i,j}.$$

По-друге, проводиться оцінка мінімальної кількості  $H_{str}(q)_u$  структурної надмірності в  $q$ -му кластері. Використовується формула для визначення кількості  $|\Lambda_2(\ell; \theta)|$  допустимих двійкових послідовностей  $[y'(q; d)_{u,i,j}]_2$  (номінальної потужності  $D_{q,\ell}$ ) в структурній множині  $\Lambda_2(\ell; q)$  за ознакою  $q$ :

$$|\Lambda_2(\ell; q)| = D_{q,\ell} = \frac{\prod_{\phi=2 \cdot q+1}^{\ell+1} \phi!}{(\ell+1-2 \cdot q)!}.$$

Тут:  $D_{q,\ell}$  – кількість допустимих двійкових послідовностей в структурному кластері  $Y(q)_u$ , тобто номінальна потужність структурного кластеру або об'єм множини  $\Lambda_2(\ell; q)$ , що містить двійкові послідовності  $[y'(q; d)_{u,i,j}]_2$ , які задовольняють умовам:

– їх десятиковий опис  $y'(\alpha; d)_{u,i,j}$  має різні значення, тобто:

$$y'(\alpha; d)_{u,i,j} \neq y'(\beta; \gamma)_{u,i,j};$$

- кількість  $\alpha, \beta$  серій одиниць дорівнює  $q, \alpha = \beta = q, \gamma \neq d, \gamma, d = \overline{1, D_{q,\ell}}$ ;
- довжини  $\ell(\theta; d)_{u,i,j}$  та  $\ell(\theta; \gamma)_{u,i,j}$  двійкових послідовностей  $[y'(q; d)_{u,i,j}]_2$  та  $[y'(q; \gamma)_{u,i,j}]_2$  дорівнюють величині  $\ell$ .

Звідки верхня межа  $V_{q,\ell}$  щодо кількості інформації структурного опису означеного кластеру знаходиться таким шляхом:

$$V_{q,\ell} = [\log_2 D_{q,\ell}] + 1 \approx \sum_{\phi=2 \cdot q+1}^{\ell+1} \log_2 \phi - \sum_{\phi=2}^{\ell+2-2 \cdot q} \log_2 \phi \text{ (біт)}.$$

**Етап 2.** Призначення другого технологічного етапу полягає у порівнянні оцінок щодо **потенційної спроможності усунення різних видів надмірності** в поточному кластері  $Y(q)_u$  у разі **застосування методів кодування**, які відповідно враховують його **статистичні та структурні** особливості.

Перевіряється умова щодо перевищення нижньої межі кількості  $R(q)_u$  інформації статистичного опису  $q$ -го структурного кластеру трансформанти  $Y_u$  відносно максимальної межі  $V_{q,\ell}$  кількості інформації структурного опису означеного кластеру за встановленою структурною ознакою  $q$ .

Для цього порівнюються дві величини  $R(q)_u$  та  $V_{q,\ell}$ . Можливі два варіанти.

**Перший варіант**, якщо виконується нерівність:

$$R(q)_u \geq V_{q,\ell}. \quad (1)$$

В цьому виразі використовуються такі величини:  $R(q)_u$  – нижня межа кількості інформації, що в середньому міститься в одному елементі  $y'(q; d)_{u,i,j}$

поточного  $q$ -го кластеру, з врахуванням його статистичних особливостей, що описуються законом розподілу  $P(q)_u$ ;

$V_{q,\ell}$  – верхня межа кількості інформації, що приходить на один двійковий елемент  $[y'(q; d)_{u,i,j}]_2$  кластеру з врахуванням структурних особливостей, а саме встановлення кількості  $q$  серій одиниць в двійкових послідовностях.

У разі, коли нерівність (1) виконується, то:

1) потенційні можливості щодо скорочення кількості структурної надмірності в  $q$ -му кластері перевищують потенційні можливості відносно усунення кількості статистичної надмірності;

2) **найчастіше** для довжин  $v_v(q; g)_{u,i,j}$ ,  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$  та  $c_f(q; g)_{u,i,j}$  синтаксичного опису компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$ , які у вигляді двійкових послідовностей  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  входять до кластеру  $Y(q)_u$ , відповідно у разі їх статистичного та структурного кодування виконується нерівність:

$$v_f(q; g)_{u,i,j} = V_{q,\ell} < v_v(q; g)_{u,i,j}, \quad g = 1, \overline{G_\theta^{(u)}}. \quad (2)$$

Тут  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  – довжина НП кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$  для кластеризованих компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$ ;  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  – довжина ЛР синтаксичного опису кодових значень  $E(q; g)_{u,i,j}$  двійкових елементів  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  кластерів  $Y(q)_u$  у разі врахування їх структурних особливостей  $q$ .

В цьому випадку для кластеризованих компонент більш ефективний (з позиції зменшення бітового об'єму та потенціалу відносно стійкості процесу декодування в умовах наявності кодових помилок) синтаксичний опис будується у разі їх кодування в структурно-кластерному просторі (застосування структурного кодування).

Отже, для означеного варіанту **пропонується** здійснювати структурне кодування двійкового опису  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  всіх кластеризованих компонент  $y(q; g)_{u,i,j}^{(u)}$  для  $q$ -го СК за ознакою  $q$ .

**Другий варіант.** Навпаки якщо між величинами  $R(q)_u$  та  $V_{q,\ell}$  виконується така нерівність:

$$R(q)_u < V_{q,\ell}, \quad (3)$$

то можливі дві ситуації, а саме коли:

а) довжина  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  НП кодограм  $c_v(q; g)_{u,i,j}$  для всіх компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$  в кластері  $Y(q)_u$  буде меншою ніж довжина  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  ЛР кодограми  $c_f(q; g)_{u,i,j}$  їх кодового значення  $N(q; g)_{u,i,j}$  в структурному просторі, тобто:

$$v_f(q; g)_{u,i,j} = V_{q,\ell} > v_v(q; g)_{u,i,j}, \quad g = 1, \overline{G_q^{(u)}}, \quad (4)$$

б) навпаки, коли між величинами  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  та  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  виконується нерівність (3).

Для варіанту коли виконується умова, що задана нерівністю (4), можна стверджувати таке. За

рахунок кластеризації трансформанти створюються умови для скорочення потенційно більшої кількості статистичної надмірності в порівнянні з потенціалом щодо зменшення кількості структурної надмірності. Отже, в цьому випадку **пропонується** для двійкового опису  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  всіх кластеризованих компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$ , які належать до  $q$ -го СК, здійснювати поелементне статистичне кодування. Таке кодування можна організувати на базі використання однієї з модифікацій статистичного коду.

Інакше, в умовах виконання нерівностей (1) та (3) можливі змішані результати порівняння довжин  $v_f(q; g)_{u,i,j}$  та  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  кодограм компактного представлення двійкового синтаксичного опису  $[y(q; g)_{u,i,j}]_2$  кластеризованої компоненти  $y(q; g)_{u,i,j}$ . В означених умовах виконання нерівності (2) зумовлено тим, що величина ентропії  $R(\theta)_u$  є нижньою межею довжин  $v_v(q; g)_{u,i,j}$  НП кодограм, тобто  $R(q)_u < v_v(q; g)_{u,i,j}$ ,  $g = 1, \overline{G_q^{(u)}}$ . В той час, коли величина  $V_{q,\ell}$  є рівномірною (номінальною) в межах поточного кластеру  $Y(q)_u$ , тобто  $v_f(q; g)_{u,i,j} = V_{q,\ell} = const$ .

В цьому випадку **пропонується** організувати попередню **селекцію** компонент  $y(q; g)_{u,i,j}$  для оцінювання їх довжини щодо виконання однієї з нерівностей (2) або (4).

В подальшому таку селекцію будемо визначати, як **структурна селекція в просторі статистичних кодів або структурно-статистична (СС) селекція компонент кластеру**.

Відповідно за результатами такої селекції до двійкових послідовностей  $y'(q; d)_{u,i,j}$  буде запроваджуватись один з підходів щодо їх кодування.

Структурну селекцію статистичних кодів технологічно можна реалізувати шляхом безпосереднього порівняння довжин  $v_v(q; d)_{u,i,j}$  НП кодограм  $c_v(q; d)_{u,i,j}$  з номінальною довжиною  $V_{q,\ell}$  ЛР кодограм  $c_f(q; d)_{u,i,j}$  поточного кластеру. Тут типова селекція кодограм проводиться на основі співвідношення:

$$\begin{aligned} c(q; d)_{u,i,j} &= c_v(q; d)_{u,i,j} \times \\ &\times (1 - \text{sign}(1 - \text{sign}(v_v(q; d)_{u,i,j} - V_{q,\ell}))) + \\ &+ c_f(q; d)_{u,i,j} \cdot \text{sign}(1 - \text{sign}(v_v(q; d)_{u,i,j} - V_{q,\ell})). \end{aligned}$$

В основу даного селекційного співвідношення входить знаковий функціонал  $\text{sign}$ , за допомогою якого досягається ідентифікація випадків щодо виконання однієї з нерівностей (2) або (4).

Величина  $c(q; d)_{u,i,j}$  є указником на клас технологічного процесу (статистичний або структурний), який реалізовує кодове представлення для послідовностей  $[y(q; d)_{u,i,j}]_2$  в залежності від результату порівняння між величинами  $v_v(q; d)_{u,i,j}$  та  $V_{q,\ell}$ ,  $d = 1, \overline{D_q^{(u)}}$ .



Очевидно, що в цьому випадку досягається більша адаптація структурної селекції до особливостей статистичних кодів поточного кластеру.

Такий підхід потребує залучення відомостей, а саме: порогу  $p'(q)_{u,i,j}$  ймовірностей, який вказує на те, що у разі коли його значення перевищує ймовірність  $p'(q; d)_{u,i,j}$ , тобто:

$$p'(q; d)_{u,i,j} > p'(q)_{u,i,j},$$

то відповідна НП кодограма  $c_v(q; d)_{u,i,j}$  буде мати більшу довжину  $v_v(q; d)_{u,i,j}$  ніж номінальна довжина  $V_{q,\ell}$  ЛР кодограм  $c_f(q; d)_{u,i,j}$  поточного  $q$ -го кластеру. Значення порогу  $p'(q)_{u,i,j}$  обирається емпіричним шляхом на основі обробки трансформованих сегментів для достатньо інформативних відеозображень.

#### 4 Порівняльне оцінювання ефективності методів кодування трансформованих відеосегментів

Порівняльне оцінювання створеного методу кодування з стандартизованим підходом, що реалізовано в платформі JPEG, проводиться за показниками PSNR (Рис. 2) та коефіцієнтом стиснення  $k_{comp}$  (Рис. 3). Величина PSNR оцінюється в умовах ймовірності виникнення бітових помилок на рівні  $P(\varepsilon) = 10^{-4}$ . Модель виникнення помилок відповідає дискретному симетричному каналу без пам'яті.

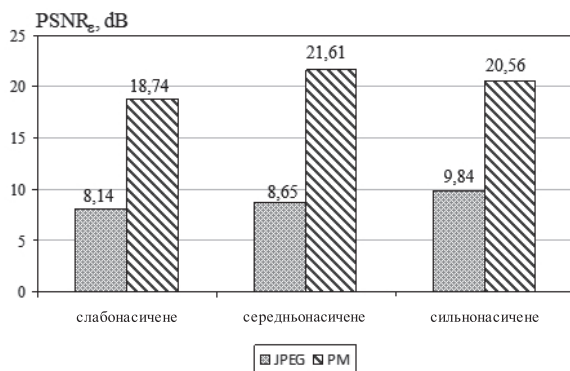


Рис. 2. Діаграма залежності величини PSNR від ступеня насиченості відеозображень для різних методів кодування

За результатами аналізу діаграм на Рис. 2 можна зробити висновок, що створений метод кодування трансформант дозволяє підвищити рівень достовірності відеозображень за показником пікового відношення сигнал/шум в середньому від 30 до 70%. Величина виграшу залежить від рівня інформативності відеосегментів. Визначення PSNR проводилось з врахуванням не тільки спотворень, що виникають в процесі стиснення трансформанти,

але й з обліком деструктивного впливу каналних помилок. Означена перевага для створеного методу зумовлена тим, що:

1) з одного боку, технологія формування кодограм для платформ JPEG характеризується низькою стійкістю до впливу каналних помилок на процес відновлення відеозображень. Так помилка одного біту прийнятої кодограми за технологією JPEG сприяє порушенню префіксності, а отже веде до лавиноподібного руйнування зображення, що підлягає відновлюванню на приймальній стороні (префіксність є розмежувачем кінця однієї і початку наступної кодограми компонент трансформанти);

2) з іншого боку, розроблений метод кодування має властивість щодо стійкості до каналних помилок. Це пов'язане з тим, що жоден із кластерів не пов'язаний з іншими. Тому помилка буде розповсюджуватись тільки в одному з кластерів. В подальшому ця помилка (після декодування кластера) не буде впливати на відновлення наступних кодограм кластеризованої трансформанти.

Відповідно створюються умови для забезпечення величини на рівні від 18,7–21,6 дБ. Отже створюються умови для забезпечення вимог щодо рівня достовірності відеозображень.

За результатами аналізу діаграм на Рис. 3 є можливість зробити такий висновок. Експеримент показав, що створений метод кодування достатньо інформативних сегментів зображення забезпечує значення коефіцієнтів стиску від 2,2 до 5,5 при рівні PSNR від 23 до 43 дБ.

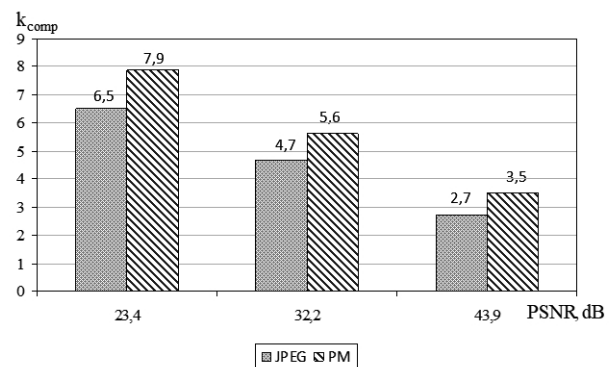


Рис. 3. Діаграма залежності величини  $k_{comp}$  від обраного значення PSNR для різних методів кодування

В порівнянні з JPEG, розроблений метод кодування дозволяє підвищити рівень стиску для достатньо інформативних сегментів зображення в залежності від рівня PSNR, а саме:

- а) PSNR = 23,4 дБ – виграш 17%;
- б) PSNR = 32,2 дБ – виграш 16%;
- в) PSNR = 43,1 дБ – виграш 23%.

Водночас для розробленого методу існують режими кодування, що дозволяють досягти переваги за коефіцієнтом стиску на рівні 40%. Це залежить від семантичної насиченості сегментів відеозобра-

ження та рівня PSNR. Оцінювання проводилось за результатами обробки окремих сегментів у складі відеозображення. Наприклад, така перевага досягається у разі обробки слабонасичених зображень з рівнем PSNR ≥ 50 дБ. Тут для існуючого та розробленого методів значення коефіцієнту стиску досягають рівня  $k_{comp} = 2,1$  та  $k_{comp} = 3,5$  відповідно. Це створює позитивні умови для зменшення об'єму кодограми всього зображення. При цьому забезпечується рівень PSNR від 23 до 43 дБ.

## 5 Приклад кодування трансформованих відеозображень розробленим методом

Пропонується розглянути кодування компонент  $y'(\alpha, \beta)_{i,j}^{(k,\ell)}$  трансформанти  $Y'(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  достатньо інформативного сегменту зображення розмірністю  $8 \times 8$  розробленим методом (Рис. 4).

На початку в трансформанті виконується підрахунок кількості серій одиниць в двійковій структурі  $[y'(\alpha, \beta)_{i,j}^{(k,\ell)}]_2$  її компонент  $y'(\alpha, \beta)_{i,j}^{(k,\ell)}$  (Таблиця 1).

-26	-3	-6	2	2	0	0	0
1	-2	-4	0	0	0	0	0
-3	1	5	-1	-1	0	0	0
-4	1	2	-1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 4. Представлення коефіцієнтів ДКП достатньо інформативного сегменту зображення розмірністю  $8 \times 8$

Табл. 1 Відповідність компонент трансформанти значенню кількості серій одиниць їх двійкової структури

Значення компоненти	Значення компоненти в двійковому вигляді	Кількість серій одиниць в двійковій структурі компонент (номер структурного кластера)	Частота повторення компоненти в трансформанті
26	00011010	II	1
6	00000110	I	2
5	00000101	II	1
4	00000100	I	4
3	00000011	I	2
2	00000010	I	1
1	00000001	I	7
0	00000000	0	46

Номер кластера відповідає кількості серій одиниць в двійковій структурі компонент трансформанти. В подальшому виконується кластеризація компонент  $[y'(\alpha, \beta)_{i,j}^{(k,\ell)}]_2$  трансформанти  $Y'(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  згідно значенню кількості серій одиниць їх двійкової структури. В даному випадку утворюється три кластера.

Так до першого  $ClS^{(I)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  кластера надходять компоненти з кількістю серій одиниць, що відповідають значенню 1:

$$ClS^{(I)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)} = \{3; 6; 2; 2; 1; 2; 4; 3; 1; 1; 1; 4; 1; 2; 1; 1\}.$$

До другого  $ClS^{(II)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  кластера надходять компоненти з кількістю серій одиниць, що відповідають значенню 2:

$$ClS^{(II)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)} = \{26; 5\}.$$

До нульового  $ClS^{(0)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  кластера надходять компоненти з кількістю серій одиниць, що відповідають значенню 0:

$$ClS^{(0)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)} = \{00\ 00000000000000000000000000000000\}.$$

На третьому етапі виконується кодування кластеризованих компонент трансформанти, що входять до кластерів.

За умови однозначності ідентифікації кластеризованих компонент нульового  $ClS^{(0)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  кластера, втрачає необхідність його кодування і передавання.

Кодування кластеризованих компонент трансформанти, що входять до інших кластерів, відбувається одним із статистичних кодів (наприклад, кодом Хаффмана). Кожен кластер кодується окремо.

Кодова конструкція послідовності кластеризованих компонент трансформанти, що увійшли до першого  $ClS^{(I)}(\alpha, \beta)^{(k,\ell)}$  кластера розробленим методом, буде виглядати так:

$$\underbrace{0000\ 1000\ 10\ 10\ 1\ 10\ 100\ 0000\ 1\ 1\ 1\ 100\ 1\ 10\ 1\ 1}_{33\ \text{біт}}$$

Рис. 5. Кодова конструкція кластеризованих компонент трансформанти першого кластера

Довжина  $l^{(PM)}(Cls^{(I)}(\alpha, \beta)^{(k, \ell)})$  кодової конструкції першого кластера буде дорівнювати 33 біт:

$$l^{(PM)}(Cls^{(I)}(\alpha, \beta)^{(k, \ell)}) = 33\ \text{біт}.$$

Кодова конструкція послідовності кластеризованих компонент трансформанти, що увійшли до другого  $Cls^{(II)}(\alpha, \beta)^{(k, \ell)}$  кластера розробленим методом, буде виглядати так:

$$\underbrace{1\ 0}_{2\ \text{біт}}$$

Рис. 6. Кодова конструкція кластеризованих компонент трансформанти другого кластера

Довжина  $l^{(PM)}(Cls^{(II)}(\alpha, \beta)^{(k, \ell)})$  кодової конструкції другого кластеру буде дорівнювати 2 біт:

$$l^{(PM)}(Cls^{(II)}(\alpha, \beta)^{(k, \ell)}) = 2\ \text{біт}.$$

Загальна довжина  $l^{(PM)}(Y'(\alpha, \beta)^{(k, \ell)})$  кодової конструкції кластеризованих компонент трансформанти (у трьох кластерах разом) розробленим методом буде складати 35 біт:

$$l^{(PM)}(Y'(\alpha, \beta)^{(k, \ell)}) = 33 + 2 = 35\ \text{біт}.$$

Відомо, що початковий сегмент зображення розмірністю  $8 \times 8$  має об'єм, що дорівнює 512 біт. Отже, коефіцієнт стиску, за умови застосування розробленого методу, дорівнює:  $k_{comp} = 14, 6$ .

## Висновки

1. Обґрунтовано потенційну ефективність представлення трансформанти в кластеризованому просторі за кількістю серій одиниць в двійковому описі їх компонент. Для кластеризованої трансформанти створюються умови для додаткового скорочення кількості надмірності без втрат інформації, в тому числі кількості надмірності з врахуванням залежностей в двійковому описі.

2. Створено метод структурно-статистичного кодування в спектрально-кластерному просторі. В основі такої технології лежить **принцип дуальності** компонент трансформанти. Він полягає в тому, що кластеризована компонента може одночасно розглядатись як: елемент статистичного простору кластера; у разі двійкового опису, як допустимий елемент структурного кластеру, тобто як одна з

допустимих перестановок з повтореннями з визначеною кількістю серій одиниць.

Базовими складовими даного технологічного підходу є такі:

– визначення та порівняння оцінок щодо **потенційної спроможності усунення різних видів надмірності** в поточному кластері **у разі застосування методів кодування**, які відповідно враховують його **статистичні та структурні** особливості;

– структурно-статистична селекція компонент, довжини нерівномірно-префіксних кодограм яких перевищують номінальну локально-рівномірну довжину кластера.

**Наукова новизна.** Вперше створено метод структурно-статистичного кодування відеосегментів в спектральному просторі на основі їх кластеризації. Відмінності методу полягають:

1) у використанні **принципу дуальності** компонент трансформанти, стосовно їх одночасної інтерпретації як: елемент статистичного простору кластера; одна з допустимих перестановок з повтореннями з визначеною кількістю серій одиниць;

2) у визначенні та порівнянні оцінок щодо **потенційної спроможності усунення різних видів надмірності** в поточному кластері **у разі застосування методів кодування**, які відповідно враховують його **статистичні та структурні** особливості.

## References

- [1] JPEG Privacy & Security Abstract and Executive Summary, 2015. [JPEG.org](http://JPEG.org), accessed 7.04.2021.
- [2] Barannik, V., Sidchenko S., Barannik N., Barannik V. (2021). Development of the method for encoding service data in cryptocompression image representation systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 9(111), pp. 112-124. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235521.
- [3] DSTU 7624:2014: Information Technology. Cryptographic protection of information. Symmetric block transformation algorithm [DSTU 7624:2014: Informatsiini tekhnolohii. Kryptohrafichniy zakhyst informatsii. Alhorytm symetrychnoho blokovocho peretvorennya]. Ministry of Economic Development of Ukraine, 2015. 39 p.
- [4] Data Encryption Standard (DES), Federal Information Processing Standards Publication 46-3, 1999. 26 p.
- [5] Barannik V., Barannik N., Ignatyev 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.2021.4.10.
- [6] Rivest, R., Shamir, A., Adleman, L. (1978). A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, Vol. 21, Iss. 2, pp. 120-126. DOI: 10.1145/359340.359342.
- [7] Chen, T.-H., Wu, Ch.-S. (2011). Efficient multi-secret image sharing based on Boolean operation. *Signal Processing*, Vol. 91, Iss. 1, pp. 90-97. DOI: 10.1016/j.sigpro.2010.06.012.

- [8] Barannik, V., Shulgin, S., Krasnorutsky, A., Slobodyanyuk, O., Gurzhiy, P., Korolyova, N. (2020). Methodological Fundamentals of Deciphering Coding of Aerophotography Segments on Special Equipment of Unmanned Complex. *IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (IEEE ATIT 2020)*, pp. 38-43. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349257.
- [9] Li, F., Krivenko, S., Lukin, V. (2020). Two-step providing of desired quality in lossy image compression by SPIHT. *Radioelectronic and computer systems*, No. 2(94), pp. 22-32. DOI: 10.32620/reks.2020.2.02.
- [10] Ji, Sh., Tong, X., Zhang, M. (2012). Image encryption schemes for JPEG and GIF formats based on 3D baker with compound chaotic sequence generator. *Cornell University arXiv*. doi: 10.48550/arXiv.1208.0999.
- [11] Belikova N., Lekakh A., Dovbenko O., Dodukh O. (2019). Method of Increasing the Capacity of Information Threat Detection Filters in Modern Information and Communication Systems. *3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, pp 426-429. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847754.
- [12] Naor, M., Shamir, A. (1994). Visual Cryptography. *Proceedings of the Advances in Cryptology. EUROCRYPT'94. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 950, pp. 1-12. DOI: 10.1007/bfb0053419.
- [13] Wu, Yu., Agaian, S., Noonan, J. (2012). Sudoku Associated Two Dimensional Bijections for Image Scrambling. *IEEE Transactions on multimedia*, available at: Cornell University arXiv, 30 p. doi: 10.48550/arXiv.1207.5856.
- [14] Tsai, Ch.-L., Chen, Ch.-J., Hsu, W.-L. (2012). Multimorphological image data hiding based on the application of Rubik's cubic algorithm. *IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*, pp. 135-139. DOI: 10.1109/CCST.2012.6393548.
- [15] Wong K. W. (2009). Image encryption using chaotic maps. In: Kocarev, L., Galias, Z., Lian, S. (eds) *Intelligent Computing Based on Chaos*, Studies in Computational Intelligence, Vol. 184, pp. 333-354, Springer. DOI: 10.1007/978-3-540-95972-4\_16.
- [16] Cheng, P., Yang, H., Wei, P., Zhang, W. (2015). A fast image encryption algorithm based on chaotic map and lookup table. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 79, Iss. 3, pp. 2121-2131. DOI: 10.1007/s11071-014-1798-y.
- [17] Guesmi, R., Farah, M. A. B., Kachouri, A., Samet, M. (2016). A novel chaos-based image encryption using DNA sequence operation and Secure Hash Algorithm SHA-2. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 83, Iss. 3, pp. 1123-1136. DOI: 10.1007/s11071-015-2392-7.
- [18] Kurihara, K., Watanabe O., Kiya, H. (2016). An encryption-then-compression system for JPEG XR standard. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/BMSB.2016.7521997.
- [19] Sharma, R., Bollavarapu, S. (2015). Data Security using Compression and Cryptography Techniques. *International Journal of Computer Applications*, Vol. 117, No. 14, pp. 15-18. DOI: 10.5120/20621-3342.
- [20] Zhou, J., Liu, X., Au, O. C., Tang, Y. Y. (2014). Designing an Efficient Image Encryption-Then-Compression System via Prediction Error Clustering and Random Permutation. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, Vol. 9, No. 1, pp. 39-50. DOI: 10.1109/TIFS.2013.2291625.
- [21] Dufaux, F., Ebrahimi, T. (2006). Toward a Secure JPEG. *Applications of Digital Image Processing XXIX*, Vol. 6312, pp. 1-8. DOI: 10.1117/12.686963.
- [22] Information technology – JPEG 2000 image coding system: Secure JPEG 2000, International Standard ISO/IEC 15444-8, ITU-T Recommendation T.807, 2007. 108 p.
- [23] Wu, Y., Noonan, J. P., Agaian, S. (2011). NPCR and UACI Randomness Tests for Image Encryption. *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)*, Vol. 2, pp. 31-38. DOI: 10.4236/jss.2015.33005.
- [24] Farajallah, M. (2015). Chaos-based crypto and joint crypto-compression systems for images and videos. *HAL science ouverte*.
- [25] Wong, K., Tanaka, K. (2010). DCT based scalable scrambling method with reversible data hiding functionality. *4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ISCCSP.2010.5463307.
- [26] Yang, Y., Zhu, B., Li, S., Yu, N. (2008). Efficient and Syntax-Compliant JPEG 2000 Encryption Preserving Original Fine Granularity of Scalability. *EURASIP Journal on Information Security*, Vol. 2007, pp. 126-139. DOI: 10.1155/2007/56365.
- [27] Watanabe, O., Uchida, A., Fukuhara, T., Kiya, H. (2015). An Encryption-then-Compression system for JPEG 2000 standard. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 1226-1230, DOI: 10.1109/ICASSP.2015.7178165.
- [28] Minemura, K., Moayed, Z., Wong, K., Qi, X., Tanaka, K. (2012). JPEG image scrambling without expansion in bitstream size. *19th IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 261-264. DOI: 10.1109/ICIP.2012.6466845.
- [29] Phatak, A. A. (2016). Non-format Compliant Scalable RSA-based JPEG Encryption Algorithm. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, Vol. 8, No. 6, pp. 64-71. DOI: 10.5815/ijigsp.2016.06.08.
- [30] Belikova, T. (2020). Decoding Method of Information-Psychological Destructions in the Phonetic Space of Information Resources. *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, pp. 87-91. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349300.
- [31] Komolov, D., Zhurbynskyy, D., Kulitsa, O. (2015). Selective Method For Hiding Of Video Information Resource In Telecommunication Systems Based On Encryption Of Energy-Significant Blocks Of Reference I-Frame. *1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT'2015)*, pp. 80-83.
- [32] Rippel O. and Bourdev L. (2017). Real-Time Adaptive Image Compression. *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, Vol. 70, pages 2922-2930.
- [33] Barannik, V., Krasnorutsky, A., Kolesnik, V., Barannik, V., Pchelnicov, S., Zeleny, P. (2022). Method of compression and ensuring the fidelity of video images in infocommunication networks. *Radioelectronic and Computer Systems*, No. 4(104), pp. 129-142. DOI: 10.32620/reks.2022.4.10.

- [34] Barannik, V., Krasnorutsky, A., Ryabukha, Y., Onyshchenko, R., Shulgin, S., Slobodyanyuk, O. (2021). Marker Information Coding for Structural Clustering of Spectral Space. *IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT 2021)*, pp. 46-51. DOI: 10.1109/ATIT54053.2021.9678538.
- [35] Barannik V. V., Krasnorutsky A. O., Kolesnyk V. O., Pchelnykov S. I., Babenko Yu. M., Sheigas O. M. (2022). A Method of Coding Video Segments in Spectral-Cluster Space with Detection of Structural Features. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparato buduvannia*, Vol. 90, pp. 21-30. DOI: 10.20535/RADAP.2022.90.21-30.

## Video Segments Stamping Method Saving Their Reliability in the Spectral-Cluster Space

*Barannik V. V., Krasnorutsky A. O., Kolesnyk V. O., Sushko A. L., Eliseev E. S., Fedorovskiy O. V.*

An analysis of the peculiarities of the organization of video information support for critical infrastructure management systems is carried out. It is shown that the requirements for the completeness, timeliness and reliability of the delivery of video information are growing. The growth of demand for the organization of remote video services using technological platforms based on unmanned aerial systems (UAVs) is shown. At the same time, it requires compliance with the requirements of a number of international standards, which are put forward for the quality of providing video information. In turn, such requirements encourage the use of telecommunication systems (TCS) with the necessary level of information transmission speed. There is an imbalance for systems providing remote video services using wireless TCS on aviation platforms. It refers to the lagging of the rate of growth of TCS productivity in terms of data transfer rate relative to the rate of growth of the bit intensity of video information streams that are formed on board the UAVs. The article shows that the consequences of imbalance are the appearance of significant time delays in the process of video information delivery. Accordingly, there are losses: relevance (adequacy) of video information regarding the current state of monitoring objects; the reliability of video information. These destructions are the reason for the disruption of the decision-making process in critical infrastructure systems. Therefore, there is an urgent need to solve a scientific and applied problem, which concerns the improvement of the quality of providing remote video services using telecommunication technologies on the platform UAVs. A set of technological solutions is used

to solve this problem. The main component here is the application of technologies for reducing the bit intensity of the video stream. At the same time, as shown in the article, in the process of developing such technologies, it is necessary to resolve the contradiction. It consists in the fact that the amount of psychovisual redundancy of video images is used both to localize the destructive effect of channel errors on the reliability of video images and to reduce their bit volume. Therefore, there is a contradiction between the requirements for ensuring the authenticity of video images and their timely delivery. Therefore, the implementation of remote video services using onboard TCS in the presence of interference puts forward additional requirements for technologies to reduce the bit volume of video data. Therefore, the purpose of the article is to create methods for compressing video images to reduce their bit volume while ensuring the required reliability. On the basis of a comprehensive analysis, directions for improvement of coding methods are substantiated. They concern the following aspects. First. Identification of new regularities, the consideration of which will create conditions for additional reduction of the bit volume of video segments without introducing losses regarding the reliability of the information. It will allow us to localize the destructive effect of channel errors in the process of reconstruction of video images with damaged codegrams of their compact description. Second. Form code constructions using the mode of uniform or locally uniform code formation. In accordance with this, the efficiency of encoding transformed video segments in the cluster space is substantiated. At the same time, clustering is carried out according to such a feature as the number of series of units in the binary description of their components. It is claimed that conditions are created for the clustered transformant to further reduce the amount of redundancy without a loss of information. A method of video segment compression has been developed to ensure their reliability in the spectral-cluster space. This technology is based on the principle of the duality of transformant components. It consists in the fact that the clustered component can simultaneously be considered as an element of the statistical space of the cluster and a valid structural cluster element. That is, as one of the permissible permutations with repetitions with a certain number of series of units. According to the results of experimental studies, it can be stated that when using the created method for the given levels, an increase in the level of compression compared to existing methods is achieved by an average of 40%.

*Keywords:* remote video service; timeliness and reliability of video information; compression of aerial images; structural clusters; number of series of units; spectral space