



[DOI 10.28925/2663-4023.2026.33.1163](https://doi.org/10.28925/2663-4023.2026.33.1163)

УДК 004.056.5

Гончаров Микита Олександрович

аспірант кафедри кібербезпеки інформаційних систем, мереж і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна
ORCID: 0000-0002-9790-7260
m.honcharov@student.karazin.ua

Малахов Сергій Віталійович

к.т.н, доцент, доцент кафедри кібербезпеки інформаційних систем, мереж і технологій
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна
ORCID: 0000-0001-8826-1616
malakhov@karazin.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ЙМОВІРНІСНИХ КАРТ ГРАДІЄНТІВ ЯСКРАВІСТІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ КОРИГУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СТЕГАНОГРАФІЧНОЇ ВСТАВКИ ДАНИХ

Анотація. В умовах прискорення темпів появи та розширення спектру нових кіберзагроз, стеганографія залишається важливим інструментом захисту чутливої інформації. На відміну від напряму криптографічного захисту, вона приховує сам факт передачі інформації у цифрових масивах даних. Стійке зростання обсягів, швидкості та номенклатури циркулюючої інформації в сучасних інформаційних системах, зумовлюють необхідність створення відповідних технологій обробки даних. В цьому сенсі, розробки адаптивних малоресурсних стеганографічних алгоритмів, що враховують статистичні властивості контейнерів переносників інформації й контенту, набуває особливої актуальності. Їх впровадження має ціллю забезпечити баланс «інтересів» між низькою суперечливих умов, вимог і властивостей, що притаманні процесу стеганографічної вставки даних. За сукупністю вирішуваних завдань, розв'язання вказаних протиріч є безумовно актуальним та має яскраво виражений прикладний характер. В дослідженні проведено імітаційне моделювання процедур синтезу ймовірнісних карт перепадів яскравості для різних типів зображень (для умов глобальної й локальної – блочної статистики). У ході моделювання здійснено варіювання значеннями порогів «згладжування» й «подібності» (P_{Z1} та P_{Z2}) та розмірності опорних блоків зображень $N \times N$. Оцінка результатів проводилася: – за метрикою PSNR; – аналізом карт різниці; – кількістю та середньою довжиною формованих серій ОБ. Проведене моделювання підтвердило, що застосування адаптивного двоступового згладжування (P_{Z1} та P_{Z2}) в діапазоні їх значень від 7 до 14 градацій яскравості, дозволяє суттєво зменшити загальну кількість серій ОБ та збільшити їх середню довжину. Це покращує комбінаторику елементів масиву серій ОБ для цілей їх наступного мультиплексування та зменшує обчислювальну складність алгоритму. За результатами обробки, ключові структурні елементи зображень повністю зберігаються, а всі зміни локалізуються в їх малоінформативних областях. Отримувани значення PSNR у зазначеному діапазоні параметрів P_{Z1} та P_{Z2} , залишаються стабільно високими. Інтеграція ймовірнісних карт перепадів яскравості в процедурний цикл передобробки вихідних даних забезпечує можливість експрес оцінки вихідних даних та дозволяє ефективніше визначати потрібні статистичні співвідношення у взаємодіючій парі «контент ↔ контейнер». Завдяки цьому покращуються стартові умови формування масивів серій ОБ та комбінаторність мультиплексування параметрів серій. Розглянутий підхід забезпечує баланс між візуальною якістю, оперативністю і обчислювальною ефективністю дослідного алгоритму. Це робить його перспективним для реалізації в складі мобільних платформ та/чи як способу для нівелювання наслідків ресурсного дефіциту, використовуваних програмно-апаратних платформ. Отримані результати забезпечують основу для подальшої автоматизації вибору поточних параметрів обробки приховуваних даних, залежно від статистичних властивостей взаємодіючої пари «контент ↔ контейнер».

Ключові слова: кібербезпека; стеганографія; цифрові зображення; обчислювальна складність; PSNR; ймовірність перепадів яскравості; кодування довжин серій; кодування з перетворенням; опорний блок; інкапсуляція даних.



ВСТУП

Постановка проблеми. В умовах неперервного зростання обсягів циркулюючих цифрових даних та появи нових різновидів кіберзагроз, сучасні методи цифрової обробки зображень відіграють ключову роль у задачах аналізу, класифікації, обробки й захисту інформації [1-8]. Одним із специфічних показників, що дозволяє кількісно оцінювати неоднорідність структури зображень, є синтез ймовірнісних карт зміни яскравості між сусідніми елементами зображень. Результати проведеного комп'ютерного моделювання [9] свідчать про те, що використання ймовірнісних карт зміни яскравості (далі, «карт градієнтів») може сприяти покращенню виконання процедур стеганографічної вставки інформації. Перш за все, це стосується двох аспектів: 1 – прискоренню процедур попереднього аналізу структури вихідних даних; 2 – покращенню адаптивності алгоритму, стосовно можливостей використання найбільш вдалих (з точки зору стеганографії) статистичних комбінацій в системі «контент–контейнер» (звісно, за умови коли така парадигма дій є можливою). Цей механізм опосередковано характеризує особливості структури зображення, його текстурну складність та змістовну насиченість окремих ділянок. Використання «карт градієнтів» є ключовим інструментом експрес аналізу статистичних співвідношень вихідних даних в системі «контент – контейнер». Це дозволяє прискорити класифікацію даних і визначити оптимальні параметри передобробки для покращення умов стегановставки (в т.ч., залучені ресурси й час).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ймовірнісний розподіл перепадів яскравості активно застосовується для сегментації зображень на області/фрагменти зі схожими текстурними особливостями [9-10]. Завдяки точнішому виділенню зон з високою неоднорідністю та ділянок з низькою варіацією яскравості (фонових областей), вдається суттєво підвищити ефективність роботи стеганографічних алгоритмів [11-12], наприклад: – зменшити обсяг надлишкової інформації, оптимізувати параметри обробки під умовно «доступну» ємність прихованого каналу – переноснику прихованої інформації; – знизити ймовірність виявлення криптового контенту тощо [2-3].

В умовах сталого поширення концепції Інтернету речей і широкого залучення можливостей технологій штучного інтелекту та машинного навчання до виконання завдань аналізу мережевої активності й властивостей графіку, особливо актуальними стають питання створення та вдосконалення адаптивних стеганографічних алгоритмів, які [2, 3, 9, 10-12, 16]: – враховують особливості зорової системи людини (ЗСЛ); – гнучко використовують статистичні і текстурні властивості наявних контейнерів-переносників інформації; – реалізують парадигму багатопланового захисту [16], яка забезпечує (за потреби) адаптивну зміну внутрішньої логіки роботи, залежно від поточної комбінації умов функціонування та статистичних співвідношень у системі взаємопов'язаних пар «контейнер-контент»; – адаптуються до поточних умов роботи і пропускну здатності каналів передачі даних, що притаманні для умов функціонування використовуваних інформаційно-комунікаційних систем (ІКС); – забезпечують підтримку ресурсного компромісу між ємністю контейнерів переносників інформації, стійкістю до виявлення прихованого контенту та обчислювальною складністю реалізованих процедур обробки (поточного варіанту роботи); – адаптуються до поточних властивостей використовуваних програмно-апаратних платформ (від потужних серверів до енергоефективних мобільних гаджетів).

Мета статті. Основною метою цієї роботи є оцінка застосовності механізму «градієнтних карт» перепадів яскравості елементів зображень (в даному разі контейнеру й контенту) для цілей підвищення оперативності попередньої обробки вихідних даних та покращення гнучкості налаштувань основних/передбачених процедур дослідного стеганографічного алгоритму [11-12]. Це дозволить уточнити особливості застосування різних методик до формування градієнтних карт яскравості та оцінити результати двоетапної обробки вихідних даних в умовах зміни основних параметрів їх обробки: – значення порогу згладжування текстур (P_{z1}) та значення порогу подібності елементів сусідніх блоків (P_{z2}). Використання механізму «градієнтних карт» [9], є спробою пошуку потрібного компромісу у взаємозалежній системі факторів, умов та вимог, що були зазначено вище.

З практичної (прикладної) точки зору, забезпечення відповідного компромісу, потенційно дозволить: – покращити рівень непомітності наслідків інкапсуляції контенту; – покращити показники оперативності процесу стегановставки; – збільшити гнучкість обробки даних в залежності від поточних ресурсних обмежень; – оптимізувати параметри «завантаження» контейнерів переносників даних в залежності від поточних статистичних співвідношень в системі «контент-контейнер»; – підвищити стійкість алгоритму до сучасних методів стеганографічного аналізу та спроб неавторизованого вилучення контенту. Комплексне вирішення вказаних завдань, є критично важливим чинником для практичного застосування нових методів й способів стеганографічного захисту даних в сучасних й перспективних ІКС.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ



Структура дослідного алгоритму та його функціональних модулів. Концепція побудови досліджуваного стеганоалгоритму дозволяє позиціонувати його, як адаптивне малоресурсне рішення для забезпечення захисту даних в складі мобільних платформ. Процес стегановставки та вилучення інформації здійснюється з використанням відповідного ключа екстрактора даних. Інкапсуляція і захист контенту забезпечується впровадженням гібридної схеми мультиплексування на трьох незалежних рівнях захисту, налаштування яких визначаються поточним станом ключа екстрактору [11-12]. Порушення цілісності ключа призводить до незворотної втрати або суттєво викривлення прихованих даних (див. рис. 2-4, 6 в роботі [11]), що підвищує загальну стійкість контенту до спроб його неавторизованого вилучення.

Сучасні стеганографічні засоби, що орієнтовані на роботу в умовах спорадичних ресурсних обмежень та/або в складі мобільних комунікаційних платформ [12-14], мають гнучко забезпечувати відповідні внутрішні можливості. Відповідно, ключовим завданням для створення сучасних стеганографічних алгоритмів є, забезпечення компромісу між низкою суперечливих, на перший погляд, чинників й вимог: – високою скритністю приховування контенту, стійкістю до спроб його вилучення та низкою обчислювальною складністю використовуваних процедур обробки. На цьому шляху, саме адаптивна оптимізація процедур обробки даних, що враховує їх статистичні властивості, дозволяє досягти потрібного консенсусу інтересів. Перш за все, це стосується впровадження принципів кластеризації й масштабування умовно «легких» обчислювальних схем, що дозволяє реалізувати аналог ефекту апаратного прискорення.

В спрощеному вигляді, структура дослідного алгоритму складається з 4-х основних функціональних модулів, які реалізують наступні Етапи обробки [11-12]:

1. Попередня підготовка вихідних даних. На цьому етапі виконується аналіз структури зображення з метою виявлення малоінформативних областей, які піддаються контрольованому згладжуванню текстури [12]. В цьому процесі ведучу роль відіграє оцінка ймовірності перепаду яскравості/кольору між сусідніми пікселями. Цей показник дозволяє локалізувати ділянки з низкою текстурною складністю та визначити оптимальні параметри згладжування (значення порогу закруглення (P_{z1})). Проведення умовного «згладжування» текстури вихідних зображень, дозволяє усунути надлишковий шум, оптимізувати локальний розподіл яскравості та забезпечити потрібні стартові умови для формування масиву серій опорних блоків (ОБ). Така передобробка вихідних даних (контенту й контейнеру) дозволяє знизити обчислювальну складність наступних етапів та зберегти потрібний рівень візуально помітних спотворень.

2. Формування масиву довжин серій ОБ. В залежності від поточної статистичних властивостей взаємодіючої пари «контент-контейнер», масиви вихідних даних поділяються на умовні блоки потрібної розмірності. Потім здійснюється сканування цих масивів за заданою схемою розгортки [11]. Застосована схема розгортки серій, формує окремий рівень захисту, стан налаштувань якого, визначає відповідний елемент в структурі ключа екстрактора даних. Формування масиву довжин серій [10] ОБ, здійснюється за результатом аналізу значень яскравості елементів/пікселів в умовно «сусідніх» блоках зображення. Порядок розташування «сусідніх» блоків, визначається обраною схемою розгортки (див. Рис.1 в роботі [11]). Оцінка подібності забезпечується за рахунок використання відповідного критерію – «значення порогу закруглення елементів сусідніх блоків» (P_{z2}). За результатами формування масиву серій ОБ, отримуємо послідовність серій блоків з різним вмістом [10]. Баланс між припустимим ступенем викривлень отриманого масиву ОБ та середньої кількістю сформованих серій (умовно кажучи, дилема «якість↔«швидкість»»), зумовлюється встановленими параметрами обробки, а саме: – розмірністю маски згладжування (Етап-1), значеннями P_{z1} та P_{z2} й розмірністю блоків. Зазначена логіка процесу дозволяє створити найбільш оптимальні для поточних обмежень, умови обробки та інкапсуляції контенту. Крім того, така модель дій, спрямована на максимально можливе використання наявного диспаритету поточних статистичних властивостей системи «контент-контейнер».

3. Кодування з перетворенням ОБ масивів серій. Реалізується як для контенту, так і для контейнеру. В обох випадках для першого блоку кожної серії ОБ, виконується дискретне косинусне перетворення (DCT) з подальшою селекцією та квантуванням для найбільш значущих коефіцієнтів [1]. Така процедура забезпечує зменшення обсягу вихідних даних без суттєвих втрат важливої інформації (з міні візуальними спотвореннями вихідних зображень).

4. Мультиплексування даних контенту. По факту, частково реалізується «до» та «після» проведення DCT для ОБ контенту (див. рис.1 в роботі [16]). Згідно з прийнятою концепцією алгоритму [11-12], інформація ОБ контенту монтується/інкапсулюється до структури ОБ контейнеру після проведення DCT. Відповідно, перед цим, пов'язані між собою елементи пар масиву серій контенту (ОБ та параметр довжини), піддаються процедурам спеціальної обробки. Основна мета спеціальних процедур - протидія спробам неавторизованого вилучення контенту. У діючому релізі алгоритму в якості таких процедур

виступають: – просторове обертання вихідних ОБ (реалізується «до» процедури ДКП); – двоетапне мультиплексування поточних параметрів масиву серій контенту (частково «до», частково «після» проведення ДКП) [15, 16].

Двоетапне мультиплексування поточних параметрів серій ОБ контенту, передбачає: – зсув ОБ між різними парами (ОБ + довжина) масиву серій контенту. Проводиться до процедур DCT (див. крок № 4 (Level1) на рис. 1 в роботі [16]); – перенесення значень середньої яскравості ОБ контенту. Проводиться вже після виконання DCT (крок № 6 (Level 2) на рис. 1 в [16]). Всі зазначені вище спеціальні процедури, складають сукупність незалежних рівнів (або шарів) захисту контенту. Вибір діючої комбінації рівнів захисту є результатом вирішення завдання, щодо забезпечення поточного ресурсного консенсусу (або, балансу можливостей та інтересів) для виконання головної задачі – стегановставки даних. Таким чином, до складу рівнів/шарів захисту входять такі складові (елементи ключа екстрактору [11-12]): – діюча розмірність ОБ (окремо для контенту й контейнеру); – застосована схема розгортки масиву серій контенту (є складовою Етапу 2); – просторове перетворення ОБ контенту; – зсув ОБ масиву серій контенту (тобто, міжблоковий мультиплекс); – перенос значень яскравості ОБ контенту (тобто, внутрішньоблоковий мультиплекс).

5. Інкапсуляція даних. Реалізує вбудовування контенту в ОБ зображення-контейнеру. Передбачає перенос частини даних з матриць DCT ОБ контенту, до структури відповідних матриць контейнеру – переноснику.

Особливості реалізації процедур першого Етапу є ключовим чинником, що визначає загальну ефективність більшості процедур наступних етапів [12]. Саме на 1-му етапі використовуються «градієнтні карти» яскравості, які забезпечують швидку сепарацію зон з різною текстурною складністю, дозволяючи оперативно визначати потрібні режими обробки вихідних даних. Завдяки такому підходу можна вибірково виконувати згладжування, наприклад, переважно в малоінформативних (гладких або низькочастотних) областях, тоді як деталізовані текстури, краї об'єктів та інші критичні структури зображення зазнають мінімальної або нульової модифікації.

Передумови та особливості використання «градієнтних карт» яскравості. Ймовірність перепаду яскравості/кольору між елементів зображень є однією ключових характеристик, яка відіграє важливу роль у задачах аналізу, класифікації та сегментації зображень [10]. Ця характеристика виражає ймовірність випадкової події, що відповідає зміні поточних станів відповідних елементів вихідного масиву (окремих пікселів чи цілих блоків), та залежить від статистичних особливостей оброблюваних зображень. За результатами обчислення ймовірності перепаду яскравості сусідніх елементів (в т.ч., подібних блоків зображень) можливо визначити/ідентифікувати умовні зони з високою та низькою контрастністю, які є важливими для подальшої обробки зображень різного типу, в тому числі, забезпечити вибір більш «вигідних (з точки зору диспаритету статистичних властивостей) взаємодіючих пар, в системі «контент-контейнер» [9].

Особливо виражені зони високої концентрації перепадів спостерігаються в локальних текстурах та контурах: межі між будівлями та небом, густе листя дерев, хвиляста або рябиста водна поверхня, дрібні деталі обличчя на портретах (волосся, пори шкіри, вії, брови), складні архітектурні елементи чи природні текстури (трава, каміння, гілки). Такі ділянки потребують спеціальних методів обробки, що забезпечують високу роздільну здатність виявлення перепадів, збереження дрібних деталей і запобігання втраті важливих контурів під час подальшої компресії, сегментації чи фільтрації [9].

У ході поточного циклу досліджень порівняно два альтернативні підходи до обчислення ймовірності перепадів яскравості (див. Рис. 1).

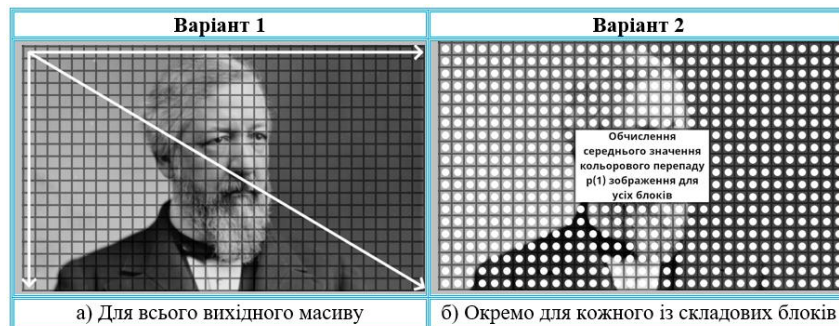


Рис. 1. Візуалізація різних концепцій обчислення ймовірності перепаду яскравості

Перший варіант (умовно позначений, як «р(0)») ґрунтується на обчисленні ймовірності перепаду яскравості для всього вихідного масиву зображення, яке подається у вигляді двовимірного масиву цілих



чисел, де кожен елемент відповідає яскравості конкретного пікселю, в діапазоні від 0 до 255 (градация сірого). Відповідний алгоритм розпочинається з ініціалізації значень параметрів, які характеризують довжину серій пікселів однакової яскравості та значення яскравості для кожної нової серії [10]. Після завершення сканування всього масиву зображення, виконується обчислення середньої довжини серій, яка відображає ймовірність перепаду яскравості. За наявності хоча б однієї серії визначається відношення загальної довжини серій до їх кількості, що дає змогу оцінити ймовірність того, що випадково вибраний піксель матиме таке саме значення яскравості, як і попередній відповідно до обраної схеми розгортки (порядку сканування). Важливо зазначити, що перед виконанням зазначених розрахунків, потрібне попереднє опрацювання зображення для врахування довжини наявних серій та їх загальної кількості, оскільки саме ці параметри безпосередньо впливають на точність оцінювання ймовірності перепадів яскравості.

Другий – блочний варіант (позначається, як « $\rho(1)$ ») передбачає обчислення ймовірності перепадів яскравості не для всього зображення одразу, а для кожного з окремих блоків встановленої розмірності ($N \times N$). Інакше кажучи, ймовірність перепадів яскравості розраховується для кожного блоку окремо. Алгоритмічно, процедура обчислень є аналогічною тій, що використовується у 1-му варіанті. Після обробки всіх блоків, обчислюється середнє значення ймовірності для всіх блоків кадру. Вочевидь, що такий підхід забезпечує більш детальний аналіз локальних особливостей оброблюваних даних. Обчислення ймовірності перепаду яскравості для кожного з блоків, дозволяє відокремлювати області з різними текстурними властивостями, що надає більш ґрунтовні відомості, стосовно структурної складності оброблюваних зображень [9].

Як свідчать результати моделювання, обидва розглянуті варіанти мають свої переваги й недоліки. Так, перший варіант забезпечує швидке отримання узагальненого показника для всього зображення, тоді як другий – блочний варіант забезпечує глибший аналіз і більш точний результат, але потребує й більших обчислювальних витрат. В межах реалізованої концепції стеганоалгоритму [11-12], задача класифікації вихідних зображень за допомогою обчислення ймовірності перепаду яскравості складових елементів, є важливою процедурою. Її застосування дозволяє отримувати відомості, які дозволяють визначити оптимальні параметри послідувочої обробки даних у взаємопов'язаній системі «контент – контейнер». Це є критично важливим для наступних етапів обробки в межах досліджуваного алгоритму (Етапи 2-5).

Поєднання процедур попередньої класифікації ймовірності перепадів яскравості [9], «тонкого» згладжування текстур вихідних даних та кодування методом довжин серій [10], сприяє більш ефективному формуванню серій ОБ на 2-му етапі алгоритму [11]. В даному випадку, крім скорочення часу обробки та зменшення вимог до обсягів залучуваного ресурсного забезпечення, забезпечуються можливості для використання потрібної комбінації підтримуваних рівнів захисту контенту (розглядалися вище). Фактично, процес оцінки ймовірності перепадів яскравості масивів вхідних даних та аналізу їх структурних особливостей, забезпечує можливості для послідувочої реалізації різних стратегій дій алгоритму, наприклад: – підбір більш вигідного (для поточних умов й обмежень) диспаритету статистичних властивостей системи «контент-контейнер»; – забезпечення диспаритету розмірностей використовуваних ОБ в системі «контент-контейнер» [11-12], що, до певної міри, покращує можливості контейнерів-переносників; – прискорення виконання передбачених процедур за принципом «скорочення діючого ланцюжку» (як засіб забезпечення вимушеного ресурсного консенсусу); – розподіл окремих функцій (етапів) між різними апаратними платформами при збереженні загального контролю за конфіденційністю даних (первинна розгортка [11] тільки на базовому пристрої/платформі); – посилення складності схем застосованої розгортки, наприклад: – використання двопрхідних/кратних схем (див. Рис.1(е),(з) в роботі [11]).

Синтез й оперування множиною відповідних стратегій дій, надає змогу підтримувати потрібний або вимушений баланс інтересів і можливостей між: – стійкістю контенту до спроб його злому і швидкістю та/або ресурсомісткістю виконання окремих Етапів алгоритму. А, як вже було зазначено вище, саме можливість працювати за таких умов, є критично важливим чинником для підтримки роботи сучасних стеганографічних засобів захисту інформації.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Сутність моделювання та узагальнення результатів. У ході проведеного моделювання, особлива увага приділялася аналізу взаємозв'язку між окремими процедурами обробки зображень на 2-х перших Етапах алгоритму [11-12]. Схема на рис. 2 в спрощеному вигляді відображає логічну послідовність проведеного моделювання. Подана схема ілюструє загальний цикл обробки тестових зображень, починаючи від аналізу вихідного контенту за допомогою блочного підходу та формування «градієнтних карт» яскравості, й завершуючи оцінкою поточних параметрів масивів серій ОБ для: – вихідного й

перетвореного зображень (контенту). Така схема моделювання, дозволяє простежити вплив процедур попереднього згладжування, зміни розмірності блоків та схем розгортки (1-й рівень захисту) на кінцевий результат обробки (кроки № 5-6 на рис. 2). Такий підхід забезпечує цілісне сприйняття структури дослідного алгоритму, підкреслює внутрішні логічні зв'язки між його окремими етапами та створює необхідні передумови для коректної інтерпретації результатів імітаційного моделювання. Нижче наведено стислий опис кожного з етапів та уточнено їх роль у загальному процедурному ланцюжку з формування результуючого масиву довжин серій ОБ.

На першому кроці моделювання (крок № 1, рис. 2) здійснюється сканування вихідного тестового зображення (типу «Портрет» та «Пейзаж») за схемою розгортки «по Рядках» [11] та розмірності блоків ($N \times N$): – 8; 12; 16 та 20 ел. За результатами виконання цієї процедури формуємо 3 принципово різних масиву даних (це, точки № 1-3 на рис. 2):

Точка 1: – масив градієнтів ймовірності змін яскравості (тобто, «градієнтна карта») для вихідного зображення без будь-яких перетворень (див. Рис. 3 (а)) та, безпосередньо, параметри серій градієнта ймовірності (Рис. 3 (б)) перепаду яскравості елементів вихідного зображення;

Точка 2: – дані про параметри масиву серій ОБ вихідних зображень, БЕЗ їх попередньої обробки ($P_{Z1}=0$), але з реалізацією процедур закруглення текстур сусідніх блоків на Етапі № 2 ($P_{Z2} \rightarrow \text{var}$). Відповідні залежності представлені на рис. 4;

Точка 3: – масив даних про параметри серій ОБ зображення-контенту за умови його попереднього згладжування ($P_{Z1} \rightarrow \text{var}$) та наступного закруглення текстури сусідніх блоків ($P_{Z2} \rightarrow \text{var}$) на Етапі формування серій ОБ (надалі, це Рис.5). Формування та аналіз зазначених вище масивів даних дозволяє порівняти ефекти, одержувані за результатами застосування різних комбінацій обробки вихідних даних (Точки № 1-3 на рис. 2);

Точка 4 – за результатами реалізації процедур згладжування текстур одночасно на обох Етапах алгоритму (за умови ($P_{Z1}; P_{Z2}$) $\rightarrow \text{var}$), поєднує наступні масиви даних: – «градієнтна карта» ймовірності перепадів яскравості (Рис. 6 (а)); – параметри масиву серій градієнту ймовірностей перепадів яскравості між елементами блоків перетвореного зображення (гістограми на рис. 6 (б)); – згладжені зразки вихідних зображень та відповідні їм значення PSNR для різних комбінацій налаштування параметрів обробки ($(P_{Z1}; N) \rightarrow \text{var}$), див. на рис. 7(а-в).

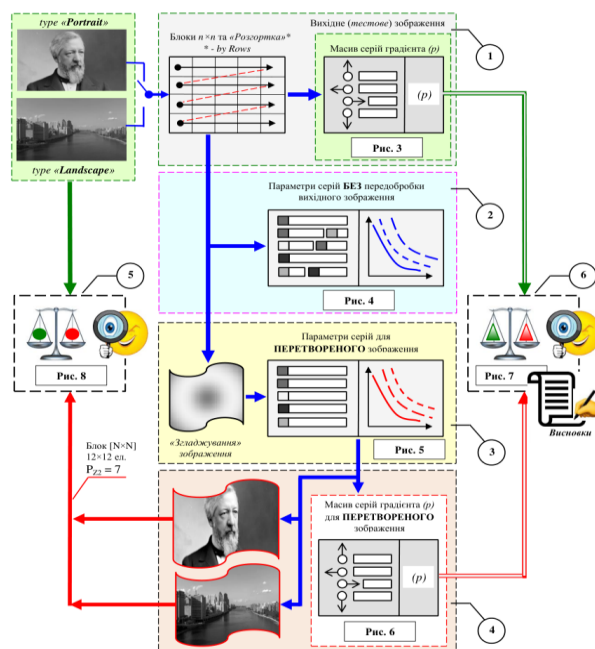


Рис. 2. Спрощена структурно-логічна схема моделювання та послідовності розгляду матеріалів дослідження

Точка 5: – представляє візуалізацію різниці значень яскравості вихідного та перетвореного зображень при $P_{Z2} = 7$ та $N = 12 \times 12$ ел. (див. рис. 7(г)).

Точка 6: – поєднує результати порівняння властивостей двох «градієнтних карт» ймовірності перепадів яскравості:



– «градієнтної карти» вихідного зображення (рис. 3(б));
– «градієнтної карти» перетвореного зображення, шляхом реалізації процедур згладжування текстур [12] водночас на обох перших Етапах алгоритму (див. рис. 6(а)).

Представлена послідовність етапів моделювання та отримувани в ході їх проведення масиви даних, забезпечують можливість комплексного оцінювання впливу процедур на якісні, структурні й статистичні характеристики отриманого цифрового зображення. Такий підхід дозволяє простежити вплив варіювання різних концепцій обробки та окремих параметрів алгоритму на формування потрібних стартових умов для реалізації всіх передбачених можливостей алгоритму [11, 16].

Отримані графічні та кількісні результати слугують основою для порівняльного аналізу властивостей вихідних і перетворених зображень та оцінювання ступеню застосовності різних стратегій й методів обробки даних на початкових Етапах алгоритму. Коректне визначення потрібної (для даних умов й обмежень) стратегії дій, дозволяє здійснити ґрунтовний вибір поточних параметрів роботи алгоритму.

Згідно запропонованої структурно-логічної схеми (рис. 2), коротко розглянемо основні результати проведеного моделювання. На рис. 3(а) представлена візуалізація масиву градієнтів ймовірності перепадів яскравості («градієнтна карта») вихідних тестових зображень («Portrait» та «Landscape» на Рис. 2) без застосування процедур згладжування. Такий режим відповідає значенню $P_{z1} = 0$ [12], що фактично еквівалентно виключенню будь-якої обробки вихідних масивів даних. Як вже було зазначено вище, в межах виконання процедур 1-го Етапу, вихідні зображення поділяються на блоки різної розмірності. Потім, за результатами застосування різних схем розгортки (в даному випадку «По рядках»), здійснюється формування відповідного масиву серій ОБ [10-12]. В межах виконання цієї процедури для кожного окремого блоку вихідного зображення, реалізується обчислення ймовірності перепадів яскравості з використанням механізму блочного аналізу (рис. 1(б)) [9]. Це дозволяє визначити особливості текстурної неоднорідності/складності в межах всього кадру, оскільки кожному блоку відповідає власне значення ймовірності перепаду яскравості складаючи його елементів.

З метою покращення візуального сприйняття та подальшої інтерпретації результатів блочного аналізу, на рис. 3(а) використано кольорове маркування різних діапазонів відображуваних ймовірностей. Такий підхід дозволяє наочно продемонструвати просторовий розподіл перепадів яскравості та виділити області з різним рівнем текстурної складності. В запропонованому варіанті маркування «градієнтних карт», використано наступні кольорові інтерпретації:

- Червоний, Low (L) – низький рівень ймовірності перепаду яскравості (мінімальне значення, близькі до 0). Відповідає мінімальним значенням градієнтних змін що характеризують фонові або структурно однорідні області зображення, у яких зміна яскравості відбувається дуже повільно (поступово), без різких переходів;
- Світло-сірий, Medium (M) – мало інтенсивний рівень текстурної складності. Позначає помірно виражені градієнти, що відповідають ділянкам із плавними, але вже помітними переходами кольору/яскравості, між сусідніми елементами зображення (в тому числі, між сусідніми блоками);
- Синій, Difference (Dif) – блоки із середнім рівнем ймовірності, котрі відображають локальні варіації градієнту. Відповідають межах й зонам переходів між «більш однорідними» та «текстурно-насиченими» фрагментами зображення;
- Зелений, High (H) – висока ймовірність перепаду яскравості (близькі до 1.0). Відповідають тах (для даного зображення) значенням градієнтів. Як правило, локалізуються на межах об'єктів, у зонах високого контрасту та у ділянках з багатьма дрібними деталями (текст, символи, елементи текстури різних об'єктів, мімічні деталі обличчя тощо).

Завершальним етапом аналізу (за параметром ймовірності перепаду яскравості), є формування масиву серій подібних блоків. Під терміном «подібних» слід розуміти факт співпадіння вмісту сусідніх, згідно реалізованої схеми розгортки, блоків [11-12].

В якості критерію «подібності» блоків, виступає значення порогу подібності елементів сусідніх блоків – параметр (P_{z2}). Він має визначальне значення на параметри результуючого масиву серій ОБ: – довжину серій та їх кількість. Фактично, величина значення « P_{z2} » й тип оброблюваного зображення, зумовлюють кінцевий результат і характеристики наступних процедур обробки [11, 12]: – обчислювальна складність; – доступна комбінаторика рівнів мультиплексування поточних параметрів масиву серій ОБ; – вимоги до ємності контейнеру-переноснику даних (з точки зору цільового балансу інтересів в системі «контент-контейнер»); – доступний параметричний «коридор» (як інструмент забезпечення ресурсного консенсусу); – можливість режиму розподіленої обробки процедур окремих етапів (в т.ч. с залученням можливостей штучного інтелекту (ШІ)) та ін.

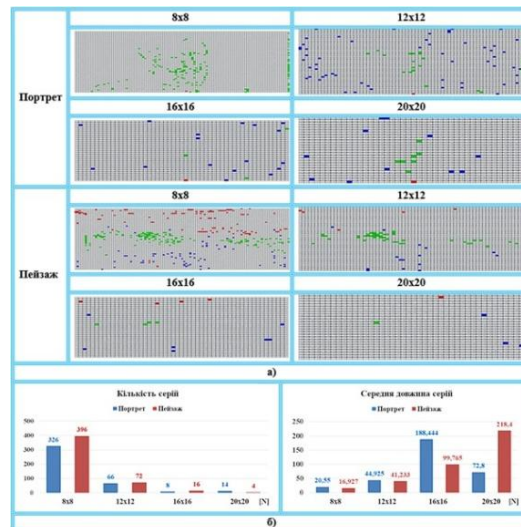


Рис. 3. Матриці градієнтів ймовірності (а) та параметри серії градієнта (б) ймовірності перепаду яскравості елементів блоків вихідного зображення (розгортка – «Рядки»)

Важливо розуміти, що в парадигмі синтезу градієнтних карт ймовірностей при використанні блочного варіанту їх обчислення (рис. 2(б)), сутність методу кодування довжин серій [10] дещо змінюється. Ця зміна зумовлена переходом від (традиційної для методу довжин серій) оцінки параметра «значень яскравості», до оцінки поточного стану параметра «ймовірність перепаду яскравості». Саме за результатом такої модифікації логіки аналізу вихідних даних, й здійснюється перехід до категорії «градієнтної карти» ймовірностей зміни яскравості [9].

Застосований підхід дозволяє виявити характерні властивості зображень та оцінити рівень їх структурної складності. Аналіз «градієнтних карт» надає можливість встановити характерні особливості розподілу градієнтів ймовірності у зображеннях різних типів. Так, для зображень із високою текстурною складністю спостерігається велика кількість серій малої довжини, що зумовлює значну варіативність локальних градієнтних станів. Для більш однорідних зображень, характерними є довші серії при меншій загальній кількості змін яскравості. Таким чином, «градієнтні карти» ймовірності змін яскравості, можуть бути використані для завдань оперативної класифікації й уточнення статистичних особливостей оброблюваних зображень, на основі аналізу відомостей, щодо їх градієнтної неоднорідності. Це в свою чергу, надає дієвий інструмент для реалізації двох стратегій дій з обробки даних:

1 – забезпечення більш вигідних (за критеріями обчислювальної складності, оперативності обробки та забезпечення ресурсного консенсусу) умов й параметрів стегаючої вставки даних;

2 – покращенню поточного рівню диспаритету у співвідношенні статистичних властивостей системи «контент-контейнер», звісно за умови існування дозволу вибору іншого контейнеру переноснику [2-3]. Дотримання логіки цієї стратегії дій, спрямоване на можливе розширення потенційної ємності контейнера – переносника даних, виходячи з особливостей контенту.

На рис. 3 представлено результати обробки (Етапи 1-2) обраних зразків тестових зображень в режимі без згладжування (тобто, як вони є) в умовах зміни розмірності блоків. Отримані результати свідчать про те, що у зображеннях типу «Портрет» зони з високими значеннями ймовірності перепадів (зелені блоки) очікувано концентруються в центральних областях, де розташовані основні структурні елементи обличчя. Ключові деталі (очі, губи, контури обличчя тощо) формують основні області «інтенсивних» градієнтів. Фонові ділянки, навпаки, характеризуються значно меншими значеннями утворюючих їх градієнтів (світло-сірі блоки на рис. 3(а)), а також поодинокими, синіми й червоними блоками.

Для умов зображення типу «Пейзаж» спостерігається більш інтенсивний (за кількістю зелених блоків) та більш рівномірний просторовий розподіл градієнтів, що пояснюється більш складною структурою відповідних сцен [10]. В цілому для пейзажу загальна кількість «градієнтно-контрастних» блоків є більшою, ніж для портрету, що підтверджує більшу текстурну складність природних сцен. При цьому, в реалістичних зображеннях типу пейзаж, різні ділянки (небо, дерева, будівлі тощо) мають власні, умовно близькі, градієнтні характеристики, що обумовлює наявність великої кількості світло-сірих та синіх блоків (висока варіативність текстурних особливостей). Як слід з рис. 3(а), для умов зображень типу «Пейзаж», характерно більш очевидне розосередження блоків з високою структурною складністю по всьому кадру зображення, що добре узгоджується з традиційним компонуванням подібних зображень (див. зразок «Landscape» на рис. 2).

При цьому, в обох типах зображень (портрет й пейзаж) збільшення розмірності блоків (від 8×8 до 20×20 ел.), призводить к однаковому результату: – суттєве вирівнювання статистичних властивостей утворюючих їх блоків [10]. Інакше кажучи, відбувається умовна втрата чутливості до існуючих структурних особливостей вихідного зображення, так як у кожному новому ОБ в рівних частках присутні всі можливі (для даного зображення) стани перепадів яскравості елементів, що їх утворюють (домінування блоків сірого кольору на рис. 3(а)). Тобто, в даному випадку можна констатувати, що вихідне зображення умовно поділяється на кілька великих фрагментів із практично однаковим значенням градієнта перепаду яскравості. Вказана тенденція наочно підтверджується динамікою зміни загальної кількості серій градієнта ймовірності та зростанням довжини серій при збільшенні розмірності ОБ (див. гістограми на рис. 3(б)).

Таким чином, використання розмірності блоків в діапазоні від 8 до 12 ел., дозволяє зберегти спроможність алгоритму, виявляти суттєві структурні ознаки (зелені блоки на рис. 3(а)), що притаманні для кожного зображення. Застосування вказаного діапазону розмірностей блоків, зберігає можливість оцінки складності текстур оброблюваних блоків. Це створює умови для врахування локальних статистичних властивостей вихідних даних та адаптації параметрів їх подальшої обробки (стратегії дій (див. вище)) виходячи з поточних вимог й обмежень. Представлені на рис. 3 результати підтверджують, що вибір розміру блоку є критично важливим параметром при аналізі градієнтних характеристик зображень та має суттєвий вплив на ефективність таких задач, як кодування, стискання, сегментація та класифікація зображень.

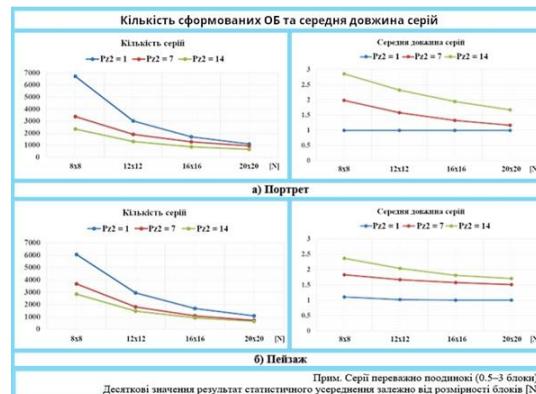


Рис. 4. Параметри серій вихідних зображень БЕЗ попередньої обробки, АЛЕ зі згладжуванням (P_{22}) на етапі формування серій ОБ для різних розмірностей блоків $[N]$ (розгортка – «Рядки»)

Для демонстрації результатів формування масиву серій ОБ в умовах використання різних розмірностей блоків та значень «порогу подібності» $P_{22}=1,7,14$, на рис. 4 представлені відомості, щодо кількості та середньої довжини отримуваних серій ОБ. Важливо, підкреслити, що в даному разі ніякі операції зі згладжування текстури вихідних зображень, не виконувалися. Таким чином, представлені дані демонструють ефект від реалізації процедур тільки 2-го Етапу алгоритму, тобто результати формування масиву серій ОБ. Добре видно, що збільшення розмірності блоків призводить до суттєвого зменшення кількості серій та менш «різким» зменшенням їх середньої довжини (правий стовпець на рис.4).

Найбільш істотні зміни обох параметрів, що спостерігаються, відбуваються в діапазоні розмірностей ОБ від 8 до 12 ел. При цьому в умовно «щадному» режимі формування серій ($P_{22}=1-7$ градацій), обробка різних типів вихідних даних, дає практично однакові результати (див. сині та червоні залежності для $N=8-12$ ел.). А це означає, що реалізований механізм формування серій ОБ, у вказаному діапазоні налаштувань (P_{22} та N), є універсальним по відношенню до представлених типів тестових зображень. Такий ефект дозволяє зменшити час обробки й зменшити обчислювальну складність алгоритму, що є особливо важливим для умов роботи, при яких необхідно досягти балансу між ресурсоемістю стегановставки та обмеженими енергетичними й обчислювальними можливостями використовуваних апаратних платформ.

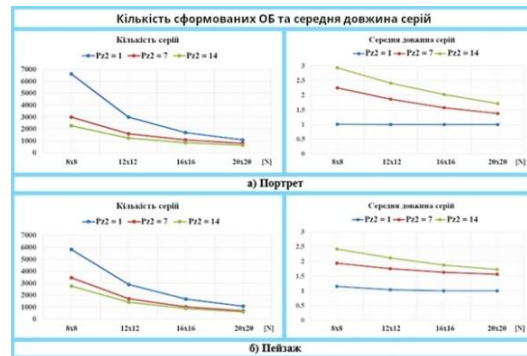


Рис. 5. Параметри масиву серій за результатами передобробки та згладжування яскравості блоків на етапі формування серій ОБ (для різних розмірностей $N \times N$)

На рис.5 представлені залежності, які отримані в процесі одночасного згладжування вихідних даних (за параметрами P_{z1} та P_{z2}) відразу на двох Етапах алгоритму, тобто: – попереднє згладжування вихідних текстур (P_{z1}) та формування масиву довжин серій ОБ (параметр P_{z2}). Попереднє згладжування текстур виконано з наступними параметрами: – розмірність матриць згладжування 3×3 ел, порогове значення згладжування $P_{z1}=7$, процедура згладжування – згідно варіанту № 3 [12].

Порівняння результатів представлених на рис. 4-5 показує, що застосування процедури попереднього згладжування текстури вихідних зображень, призводить до загального зменшення кількості формованих серій у порівнянні з результатами, отриманими без відповідної передобробки (рис. 4). Причина полягає в зменшенні загальної кількості малопомітних для зору людини (не більш 7 градацій при 256 рівнях) перепадів яскравості, між сусідніми елементами вихідних зображень, в межах умовно створюваних матриць згладжування поєднання в єдиний процедурний ланцюжок, операцій відразу двох Етапів алгоритму [16], сприяє формуванню більш довших серій ОБ (червоні залежності на рис. 5) при збереженні щадних параметрів обробки (P_{z1} та P_{z2} не більше 7). Це, в свою чергу, створює необхідні умови (сині та червоні залежності при $N=8-12$ ел. на Рис. 5) для зменшення обчислювальної складності алгоритму, особливо при виконанні етапу кодування з перетворенням (DCT), що є суттєвим внеском в можливість забезпечення ресурсного консенсусу використовуваних апаратних платформ [11-12, 15]. Як слід з рис.4-5, найбільша кількість серій спостерігається при $P_{z2} = 1$ (синя крива), а найменша при $P_{z2} = 14$ (зелена), що підтверджує визначальний вплив критерію подібності вмісту блоків (параметр P_{z2}) на структуру результуючого масиву серій ОБ [11]. Крім того, портретні зображення демонструють дещо більші значення середньої довжини серій порівняно з пейзажними, що свідчить про вищу ефективність згладжування для сцен з відносно однорідними областями, характерними для зображень типу портрет. На рис.6(а) наведено візуалізацію «градієнтних карт ймовірностей» вихідних зображень, отриманих при використанні однакових значень параметрів закруглення ($P_{z1} = P_{z2} = 7$) на двох Етапах алгоритму (точка №4 на рис. 2): – попереднього згладжування [12] та формування масиву серій ОБ [11]. Фактично, відомості представлені на рис.6 є умовним «контрастним антиподом» для випадку обробки даних, представленого на рис.3 (відсутність згладжування). Таким чином, представлені на рис. 6 дані, відображають отриманий сукупний ефект за підсумком реалізації всіх передбачених можливостей, щодо оптимізації структури вихідних даних.

Як зазначалося раніше, основна мета таких можливостей полягає у: – зменшенні обчислювальної складності алгоритму за рахунок скорочення обсягу обчислень на Етапі кодування з перетворенням; – створенні необхідних умов для протидії спробам несанкціонованого вилучення контенту [11-12, 16].

Наведені на рис.6 результати безпосередньо корелюють із режимом обробки даних, реалізованим на рис. 5, де виконувалося послідовне застосування двох етапів: – попереднього згладжування з параметром P_{z1} та формування серій ОБ при фіксованому значенні $P_{z2}=7$ для всіх розмірів блоків. Отже, рис.6 демонструє результати двоетапної обробки вихідних даних та створює переконливу фактуру для порівняння з відповідними результатами на рис. 3 (оригінал).

За результатами узагальнення даних (це, точка № 6 на рис. 2) градієнтних карт вихідного та перетвореного зображень (рис. 3 та рис. 6), можна стверджувати наступне:

1 – збільшення розмірності блоків на етапі формування масиву серій ОБ, зберігає всі важливі ділянки з високою деталістю (зелені блоки). При цьому очікувано, спостерігається зменшення загальної кількості блоків, що несуть у собі інформацію про локальні варіації (синій колір) текстурних змін. Іншими словами оперування з параметром яскравості елементів у діапазоні значень низької чутливості ЗСЛ (до 7 градацій при 256 рівнях яскравості), не несе загрози втрати інформативності вихідних даних, в частині

втрата найбільш важливої інформації. Так, наприклад, на рис. 7 всі «зелені» блоки залишилися на «своїх місцях», що в контексті сюжетної сцени зображень типу «Портрет» (рис. 1-2, «Portrait»), означає розміщення в області обличчя;

2 – зі збільшенням розмірності ОБ у перетвореному зображенні (рис. 6) спостерігається повільний перехід частини початково «синіх» блоків (локально-контрастних), у їх більш збалансований Medium-стан (світло-сірі). Така метаморфоза є наслідком обліку більшої кількості взаємних кореляційних зв'язків між елементами вихідного зображення саме при переході до обробки більших блоків (у динаміці зростання розмірностей: 8→12→16→20 сл.);

3 – використання ОБ малої розмірності (у даному разі 8×8 сл.) посилює тенденцію збільшення кількості локально-контрастних (синіх) блоків (рис. 6). Блоки малої розмірності в меншій мірі враховують «глибину» кореляційних зв'язків між його елементами. Це, у свою чергу, зумовлює тенденцію до прояву більшого дисонансу між оригінальними та умовно «новоствореними» блоками сусідніх серій, у частині середньої ймовірності перепаду яскравості утворюючих їх елементів (див. рис. 1(б)). Очевидно, що такий ефект є наслідком уніфікації (за критерієм P_{z1}) та наступної кластеризації (за критерієм P_{z2}) вмісту «новостворених» ОБ в перетвореному зображенні. Візуально, такі зміни залишаються непомітними (проявляється у збільшенні серій градієнту ймовірності, на рис. 6(б)) та не порушують загального сприйняття найбільш важливих елементів зображення. Причина очевидна, всі ці «локально-контрастні» зміни знаходяться в зоні малої чутливості [5] зорової системи людини (Рис. 8, зразки (в) та (г));

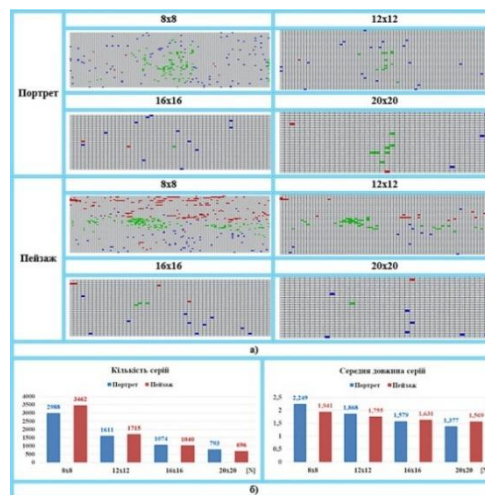


Рис. 6. Матриця градієнта ймовірності (а) і параметри серій градієнта (б) ймовірностей перепаду яскравості елементів блоків ПЕРЕТВОРЮВАНИХ тестових зображень (розгортка – «Рядки»)

4 – виокремлення зон та подальша оцінка обсягу умовно «зелених» блоків (див. чорний пунктир на рис. 7), дозволяє якісно оцінити різні комбінації пар в системі «контент-контейнер». Реалізація цієї можливості дозволяє підібрати таку комбінацію взаємодіючих елементів цієї системи, яка забезпечує таку диспаритет їх статистичних характеристик. Зрозуміло, що така процедурна особливість відкриває вкрай корисні перспективи з точки зору можливостей врахування поточних властивостей обраного контейнера-переносника даних, де складність його структури є головною передумовою для успішного маскуванню факту інкапсуляції контенту. Така можливість зберігається і в разі обліку властивостей локальних областей зображень в межах створеної пари «контент-контейнер» (за умови прямої заборони або неможливості заміни наявного контейнера [3]).

Аналіз структури градієнтних карт перетворених зображень (рис. 6(а)), свідчить про загальне зростання кількості градієнтів після згладжування вихідного зображення, особливо у зонах (діапазонах ймовірності) маркованих синім й червоним кольорами (див. рис. 3(а)). Це вказує на появу нових, локальних перепадів яскравості, що є проявом чутливості алгоритму до локалізації умовних меж між початково плавними й протяжними (за площею) переходами яскравості. Це свідчить про зміну внутрішньої структури відповідних блоків, внаслідок усереднення значень та перерозподілу локальних перепадів яскравості. Червоні зони часто локалізуються на межах між ділянками з плавними кольорними переходами, що свідчить про локальне підсилення контрасту після виконання процедур згладжування. Таким чином, згладжування не лише зменшує вплив шумових флуктуацій яскравості, але й виділяє важливі структурні особливості зображення, роблячи ключові контури та градієнтні переходи більш вираженими. Зелені блоки на рис. 7, які відповідають тах значенням ймовірності градієнтних переходів,

практично не зазнають змін після процедур згладжування (точка б на рис. 2). Тобто, реалізований механізм обробки не порушує ключові структурні особливості відображуваної сцени й в більшій мірі впливає на області з менш помітними для ЗСЛ деталями. За результатами проведених процедур обробки спостерігається певне збільшення чисельності блоків із середнім рівнем їх текстурної різноманітності (синіх блоків), особливо для ОБ більш менших розмірностей (в даному разі, 8×8 ел. на рис. 7). Це свідчить про зміну характеру градієнтного розподілу: – межа переходів між різними умовно «новими» ділянками зображень (в даному разі – серіями ОБ), стає більш різкою, дискретно розділяючи протяжні зони з неявно вираженими текстурними тенденціями, на кілька більш компактних областей, з однаковим текстурним складом (тобто нові серії ОБ). Наприклад, така тенденція характерна (рис. 6(а)) для ділянок зображень, де межі між тінями та освітленими ділянками, стають більш помітними для ЗСЛ. І нарешті, світло-сірі блоки відповідають ділянкам з проміжними значеннями ймовірності перепадів яскравості. Зрозуміло, що після згладжування, діапазон їх зміни «звужується», що свідчить про своєрідну обмеженість наявних текстурних варіацій та усунення флуктуацій яскравості на рівнях менш, ніж встановлює параметр « P_{Z2} ».

Важливо розуміти, що застосування різних параметрів обробки, зумовлюють різний вміст градієнтних карт ймовірностей (рис. 6(а)). Так, одні налаштування прискорюють усунення дрібних градієнтних переходів (наприклад, використання більш крупних ОБ для зображень типу «портрет»), а інші навпаки, підсилюють прояв дрібних деталей на межах об'єктів (застосування малих блоків для зображень типу «Пейзаж» (див. рис. 6(а))). Також, на їх вміст впливають (хоча й у меншій мірі) такі параметри, як розмірність матриць згладжування [12] та використовувана схема розгортки серій [11, 16]. Причина такої залежності полягає в тому, що обидва ці параметри безпосередньо впливають на ступінь (за амплітудою яскравості) та характер (за просторовим розподілом елементів) змін, наявних кореляційних взаємозв'язків між елементами вихідних зображень.

Залежності на рис. 6(б), характеризують кількість серій градієнтів ймовірності та їх середню довжину, що притаманні для двоетапної обробки даних з однаковими параметрами порогів ($P_{Z1} = P_{Z2}$). Добре видно, що для обох типів зображень, спостерігається значне зростання кількості серій (майже у 7 й 9 разів порівняно з рис. 3(б)), що по факту означає посилення кластеризації перетвореного зображення. Такий ефект має подвійну природу: – по-перше це є наслідком реплікації самоподібних блоків в межах утворюваних серій ОБ; – по-друге, більш детальним врахування текстурних відмінностей оброблюваних блоків (згідно параметру P_{Z2}). Як наслідок, забезпечується більш точніша локалізація (за критеріями P_{Z1} та P_{Z2}) границь «контрастуючих» між собою ділянок, що й підтверджується зростанням чисельності утворюваних серій градієнтів для перетвореного зображення. Інакше кажучи, перетворене – умовно нове зображення (Рис. 8(в)), демонструє більшу «чутливість» до змін станів елементів на межах/ділянках суттєво важливих переходів яскравості, утворюючих їх елементів.

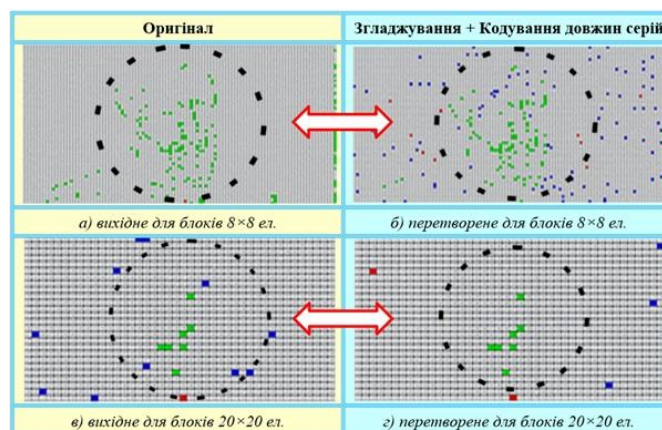


Рис. 7. Градієнтні карти ймовірності перепаду яскравості блоків вихідного та перетворюваного тестового зображення типу «Портрет» (відповідні зразки див. на Рис. 1 та Рис. 8)

Це добре підтверджується абсолютним домінуванням чорних ділянок в найбільш важливих (високодетальних) фрагментах зображень на рис. 8(г), де: – чорний колір відповідає повній подібності відновлених елементів, а білий колір – мах помилки (невідповідності) значень яскравості вихідних пікселів. При цьому для обох зразків градієнтних карт (Рис. 3 та Рис. 6), тенденція зростання розмірності блоків, призводить до зменшення загальної кількості утворюваних серій градієнтів. Такий результат є підтвердженням процесу звуження одержуваного набору «статистичного розмаїття», між наявними ОБ



перетворених зображень. Простіше кажучи, блоки більшої розмірності, прагнуть до взаємної схожості утворюючих їх структур, що добре узгоджується з відомими положеннями теорії обробки зображень [10].

Результати моделювання дозволяють стверджувати, що: 1 – навіть після попереднього згладжування вихідних даних (в діапазоні візуально малопомітних значень), градієнтна карта перетвореного зображення зберігає свою подібність до градієнтної карти вихідного зображення в усіх ключових ділянках (рис. 7), де зосереджена найбільш значуща інформація; 2 – використання градієнтних карт ймовірностей на початкових етапах алгоритму, забезпечує можливість оцінки ступеню наявного диспаритету статистичних властивостей даних в системі «контент – контейнер». В практичному сенсі, це дозволяє визначити найбільш вдалі комбінації взаємодіючої цієї пари (безумовно, при санкціонуванні такої можливості) або локалізувати такі ділянки в структурі контейнера, котрі найбільшою мірою сприяють реалізації стегановставки, з урахуванням особливостей контенту (при умові заборони заміни наявного контейнеру). За сукупністю отримуваних можливостей, такий підхід забезпечує більш ефективний (з точки зору помітності проведеного втручання, рис. 8(а-в)) та більш гнучкий (з точки зору залучених обчислювальних ресурсів) процес стегановставки [12-14].

На рис. 8 представлені відновлення тестових зображень (відповідає точці № 5 на рис. 2) після виконання повного циклу процедур попередньої обробки та формування серій ОБ у рамках заявленої концепції дослідного алгоритму [11-12]. Так, на рис. 8(а) представлена залежність значень PSNR (пікове співвідношення С/Ш) від параметра попереднього згладжування текстур (P_{Z1}) для різних розмірностей ОБ формованих серій (при незмінному $P_{Z2}=7$). Отримані результати свідчать, що на Етапі формування серій ОБ, значення PSNR практично не залежить від обраної розмірності блоків (N). При цьому, помітні зміни (від 46 до 53 dB) відбуваються при зміні порогу згладжування (P_{Z1}). Це вказує на те, що параметр (P_{Z1}), самим суттєвим чином впливає на кінцевий результат (якість відновлення перетвореного зображення) для всіх розмірностей ОБ!

На противагу попередньому варіанту налаштувань, на рис. 8(б) представлена залежність значення PSNR для різних розмірностей ОБ в умовах зміни параметра порогу P_{Z2} . Як й у попередньому разі, PSNR практично не залежить від обраної розмірності ОБ, а всі зміни обумовлені варіюванням параметру порогу подібності (P_{Z2}).

На рис. 8(в) представлені зразки тестових зображень, отримані за результатами виконання 2-х Етапів обробки: – попереднього згладжування та формування масиву серій ОБ ОБ ($P_{Z1}=P_{Z2}=7$, $N=12$). Порівняння (точка 5 на рис. 2) вихідного й перетвореного (рис. 8) зображень, підтверджують збереження всіх основних структурних елементів вихідних сцен, що добре узгоджується з результатами кількісної оцінки за метрикою PSNR. На рис. 8(г) наведено візуалізація піксельної різниці (т.з. «дельти»), вихідного й відновленого зображень, де тах помилка відповідає білому кольору (яскравість 255), тоді як міні помилка (повний збіг) відображається чорним кольором (яскравість 0). Аналіз наведеної «дельти» показує, що області з тах відхиленнями яскравості не формують будь-яких нових хибних структур, а основні елементи високодетальних ділянок, повністю зберігаються. Тобто, внесені зміни зосереджені переважно у малоінформативних областях зображень, що підтверджує коректність і стабільність роботи алгоритму при різних комбінаціях розглянутих параметрів обробки.

Таким чином, проведене моделювання (рис. 2) підтвердило можливість використання градієнтних карт ймовірності перепадів яскравості, як ефективного інформативного параметра для попереднього аналізу структурних властивостей вихідних зображень з метою подальшого корегування параметрів їх обробки. Їх використання дає змогу врахувати статистичні особливості взаємодіючих масивів в системі «контент-контейнер», диференціювати окремі області за характером їх текстурної складності та контролювати ступінь модифікації вихідних масивів, відповідно до рівнів візуально помітних втручань.

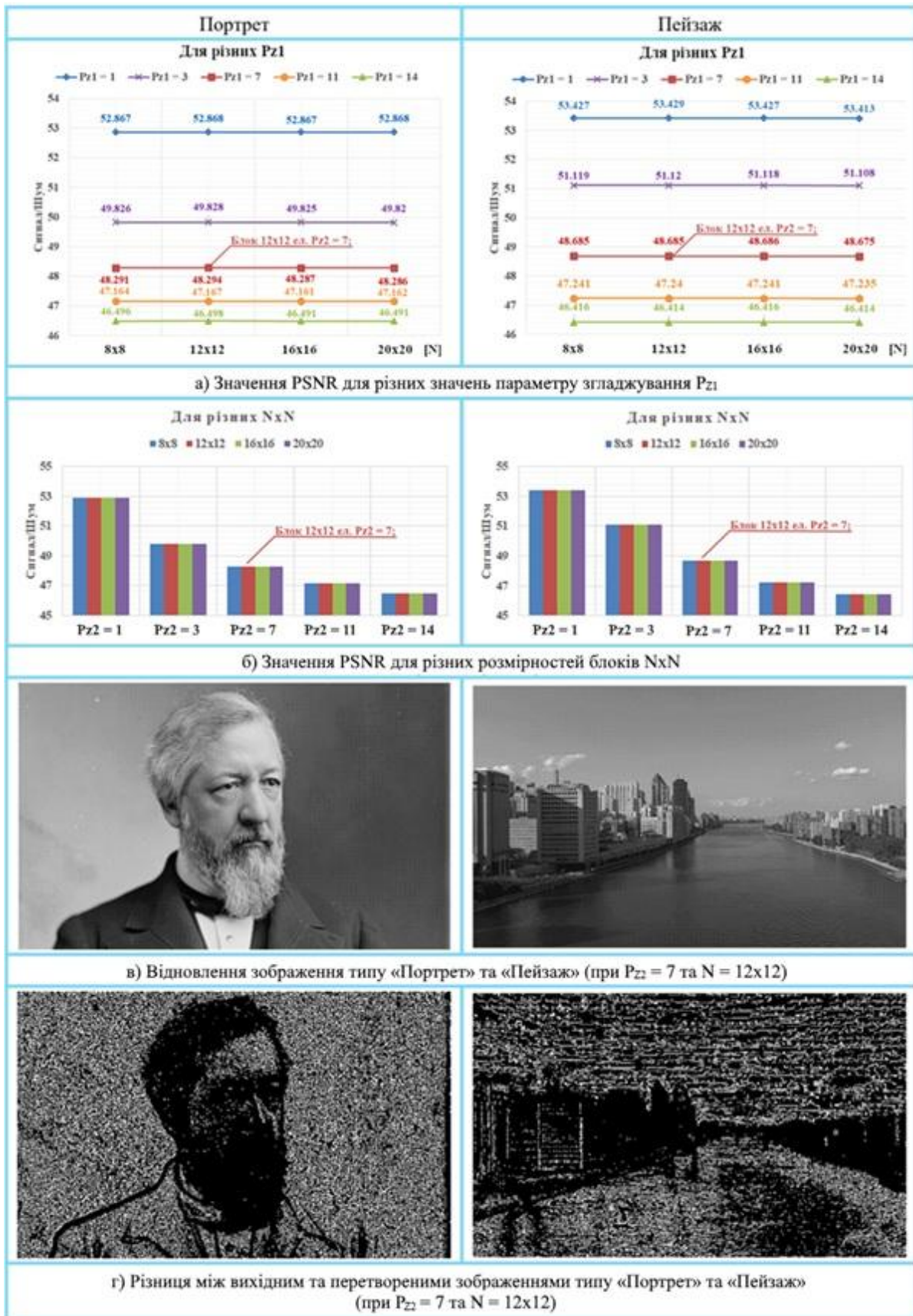


Рис. 8. Значення PSNR та візуалізація різниці вихідного і перетвореного зображень ($Pz_2 = 7$; $N = 12$)



Інтеграція процедур оцінки градієнтних характеристик із процедурами попереднього згладжування та формування серій ОБ, забезпечує узгоджений характер локальних змін і дозволяє впливати на структуру отриманого зображення без порушення його цілісного сприйняття. Це сприяє зменшенню текстурних варіацій у малоінформативних областях та збереженню вихідних властивостей зон/ділянок підвищеної структурної складності, де потенційна модифікація даних (внаслідок стегановставки), є менш помітною. Обґрунтований вибір параметрів обробки даних контейнеру й контенту, забезпечує баланс між: – збереженням локальних деталей, стабільністю вихідних градієнтних переходів та мінімізацією їх візуальних спотворень. Такі можливості є вкрай важливими для завдань стеганографії. Супутнім важливим результатом є підтримка необхідних стартових умов для реалізації мультиплексування діючих параметрів серій ОБ [16], як інструменту з протидії спробам несанкціонованого доступу до контенту.

Отримані результати моделювання підтверджують можливість використання розглянутої методики для посилення диспаритету статистичних властивостей взаємодіючої пари елементів системи «контент – контейнер» та забезпечення оптимальних параметрів попередньої обробки вихідних даних. Градієнтні карти ймовірнісні перепадів яскравості, можуть слугувати критерієм узгодження структурних характеристик вихідних даних із діючими параметрами обробки (P_{Z1} й P_{Z2}) та розміром ОБ. Це забезпечує можливість з адаптації параметрів обробки до різних типів зображень і зменшення обчислювальних витрат на подальших етапах алгоритму. За сукупністю можливостей, розглянутий підхід підтвердив перспективність використання ймовірнісних градієнтних карт, як цінного інструменту при вирішенні завдань адаптивної стегановставки, котра реалізується в умовах впливу спорадичних ресурсних обмежень та/або необхідності балансування низки суперечливих вимог.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Ймовірність перепаду яскравості сусідніх елементів зображення є ефективним статистичним критерієм, який характеризує текстурну складність, цифрових зображень [9]. Її використання на етапі попередньої оцінки й обробки вихідних даних дозволяє застосовувати контрольоване згладжування текстури зображень лише там, де воно не призведе до втрати візуально значущої інформації. Проведення таких процедур забезпечує створення оптимальних стартових умов для реалізації кодування довжин серій ОБ, а широка варіативності параметрів обробки контейнеру й контенту, забезпечують можливість підтримки ресурсного консенсусу в умовах існування спорадичних обмежень на використовуваних ресурси [11-12].

2. Результати моделювання підтвердили, що впровадження процедур згладжування текстури вихідних даних на етапі передобробки (за критерієм P_{Z1}) та на етапі формування масиву серій ОБ (за критерієм P_{Z2}), призводить до суттєвого зменшення кількості серій ОБ (до 5-9 разів залежно від типу зображень й розмірності блоку). Найбільш виражений ефект досягається при використанні середніх (7-14 градацій) та «м'яких» (3-7 градацій) значень подібності P_{Z2} . Це дозволяє знизити обчислювальну складність алгоритму на етапі кодування з перетворенням (DCT) та етапі мультиплексування параметрів серій ОБ контенту, зберігаючи при цьому прийнятний рівень візуальної якості контейнера [10, 12].

3. Використання різних способів розрахунку ймовірності перепадів яскравості (рис. 1), зумовлює отримання різних переваг. Оцінка всього масиву (глобальний підхід) забезпечує швидке отримання узагальненої характеристики всього зображення, що робить його зручним для завдань попередньої класифікації типу зображень та емпіричної оцінки статистичних співвідношень взаємодіючих пар в системі «контент – контейнер». Локальний (блочний) підхід демонструє вищу чутливість у виявленні внутрішньої текстурної неоднорідності зображень, що є критично важливим для адаптивної передобробки вихідних даних та максимального врахування їх статистичних властивостей. Вибір між цими способами або їх комбінація залежить від доступних/вільних обчислювальних ресурсів використовуваних апаратних платформ, а також умовами й обмеженнями поточних пріоритетів в межах діючого сценарію використання алгоритму [9, 11-14].

4. Візуалізація градієнтних карт ймовірності перепадів яскравості для вихідних та перетворених (при $P_{Z1} = P_{Z2}$) зображень показала, що за результатами двоетапного згладжування та кодування довжин серій, ключові структурно значущі елементи вихідних зображень практично не зазнають деградації (рис. 8(в-г)). Водночас, низькоінформативні фонові ділянки та області з плавними градієнтними змінами, стають помітно більш одноріднішими. Такий характер змін свідчить про те, що запропонована двоетапна схема передобробки зберігає візуально важливу інформацію, одночасно створюючи потрібні умови для кодування довжин серій ОБ та наступного мультиплексування їх поточних параметрів, як інструменту з протидії спробам неавторизованого вилучення контенту [11-12, 16].



5. Використання ймовірнісних карт перепадів яскравості для оцінки статистичних властивостей вихідних зображень, забезпечує можливість створення більш вдалих (з погляду завдання стегановставки) комбінацій пар в системі «контент – контейнер». У загальній постановці, застосування градієнтних карт ймовірностей, має два корисних продовження: – посилення статистичного диспаритету в системі «контент – контейнер» для покращення умов стегановставки; – адаптація діючих параметри обробки відповідно до поточних статистичних характеристик вихідних даних. В кінцевому підсумку, це збільшує потенційну сміливість контейнеру-переноснику та одночасно знижує ймовірність виявлення внесених змін, як візуально, так і статистичними методами аналізу.

6. Наукова новизна отриманих результатів полягає в експериментальному підтвердженні можливостей застосування градієнтних карт перепадів яскравості в якості інструменту оперативного аналізу статистичних характеристик вихідних зображень з метою адаптації параметрів їх обробки до поточних умов стегановставки та посилення диспаритету статистичних властивостей взаємодіючих елементів в системі «контент-контейнер» (за умови існування такої можливості [3]). Розглянутий механізм дій дозволяє кількісно враховувати локальні текстурні особливості зображення на ранніх етапах обробки, що раніше не розглядалося в контексті даного класу алгоритмів з акцентом на мобільні та енергоефективні платформи. Прикладне значення проведеного моделювання полягає в уточненні передумов й механізмів підвищення стійкості до спроб стеганоаналізу, та зниження обчислювальної складності алгоритму в умовах збереження високої якості відновлення обох взаємодіючих складових в системі «контент-контейнер». Отримані результати вирішують наукове завдання оптимізації параметрів передобробки (P_{z1} , P_{z2} , N) вихідних даних взаємодіючої пари елементів системи «контент-контейнер», в залежності від їх статистичних властивостей та з урахуванням наявних ресурсних обмежень й умов обробки.

7. Візуалізація градієнтних карт перепадів яскравості надає можливість якісно оцінити текстурну складність оброблюваних зображень та оперативно локалізувати ділянки з високим рівнем змін. З точки зору процедурних особливостей алгоритму, використання таких відомостей дозволяє покращити часові параметри обробки та оптимізувати умови стегановставки за рахунок розширення комбінаторики налаштувань та покращення статистичних співвідношень взаємодіючих елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fridrich, J. (2009). *Steganography in digital media: Principles, algorithms, and applications*. Cambridge University Press.
2. Конахович, Г., Прогонов, Д., & Пузиренко, О. (2018). *Комп'ютерна стеганографічна обробка й аналіз мультимедійних даних: Підручник*. Центр навчальної літератури.
3. Кузнецов, О. О., Євсєєв, С. П., & Король, О. Г. (2011). *Стеганогія: Навчальний посібник*. Вид-во ХНЕУ.
4. Cox, I., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., & Kalker, T. (2007). *Digital watermarking and steganography* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
5. Yahya, A. (2019). *Steganography techniques for digital images*. Springer International Publishing.
6. Hassaballah, M. (2020). *Digital media steganography: Principles, algorithms, and advances*. Academic Press.
7. Shih, F. Y. (2020). *Digital watermarking and steganography*. CRC Press.
8. Pílanía, U., & Kumar, M. (2026). *Unveiling the art of steganography: A modern approach*. CRC Press.
9. Малахов, С., & Гончаров, М. (2024). Синтез ймовірнісних карт переходів яскравості (градієнтів) зображень для покращення процедур стегановставки. *Graill of Science*, (47), 545-554. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.12.2024>
10. Pratt, W. K. (1978). *Digital image processing*. John Wiley & Sons.
11. Гончаров, М. О., Малахов, С. В., & Жилєнков, Д. В. (2025). Дослідження складності та властивостей різних схем розгортки вихідних даних стеганокоменту в умовах зміни сценаріїв атак. *Сучасний захист інформації*, (4), 44-58. <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/3352>
12. Honcharov, M. O., Narietzhni, O. P., & Malakhov, S. V. (2025). Analysis of prerequisites for ensuring resource consensus when performing steganographic data insertion procedures. *Modern Information Security*, (3), 44-58. <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/3302>
13. Akinwumi, A. O., Ogbide, O. L., & Folorunso, D. F. (2023). Implementing image steganography techniques for secure data hiding in the development of an Android application. *Communications on Applied Electronics*, 7(39), 26-33. <https://doi.org/10.5120/cae2023652902>
14. Jadhao, Y. B., Kalamkar, P. V., Wadode, K. S., Ganbas, S. R., & Borle, S. V. (2025). An Android application for digital image steganography techniques. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 10(3). <https://www.ijrti.org/papers/IJRTI2503212.pdf>



15. Fuad, M., & Ernawan, F. (2020). Video steganography based on DCT psychovisual and object motion. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(3), 1015-1023. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i3.1859>
16. Лесная, Ю., Гончаров, М., & Малахов, С. (2023). Результати моделювання спроб несанкціонованого вилучення стеганокоменту для різних комбінацій атаки дослідного стегаалгоритму. *Scientific Collection "InterConf"*, (141), 338-345. <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/2319>

**Mykyta Honcharov**

Ph.D student of the Department of Cybersecurity of Information Systems,
Networks and Technologies, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-9790-7260
m.honcharov@student.karazin.ua

Serhii Malakhov

Ph.D, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Cybersecurity of Information Systems,
Networks and Technologies, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-8826-1616
malakhov@karazin.ua

APPLICATION OF PROBABILISTIC CARDS OF BRIGHTNESS GRADIENTS IN DIGITAL IMAGES FOR ADJUSTING PARAMETERS OF STEGANOGRAPHIC DATA INSERTION

Abstract. In the context of the accelerating pace of emergence and the expanding spectrum of new cyber threats, steganography remains an important tool for protecting sensitive information. Unlike cryptographic protection, it conceals the very fact of information transmission in digital data arrays. The steady growth in the volume, speed, and range of information circulating in modern information systems necessitates the creation of appropriate data processing technologies. In this sense, the development of adaptive, low-resource steganographic algorithms that take into consideration the statistical properties of information carrier containers and content becomes particularly relevant. Their implementation aims to ensure a balance of «interests» between the controversial conditions, requirements, and properties inherent in the process of steganographic data embedding. Given the totality of the tasks at hand, resolving the specified contradictions is undoubtedly relevant and has a pronounced applied character. The research conducted simulation modeling of procedures for synthesizing probability cards of brightness differences for different types of images (under conditions of global and local - block statistics). During the modeling, the threshold values for «smoothing» and «similarity» (P_{Z1} and P_{Z2}) and the dimensions of the $N \times N$ image Basic Blocks (BBs) were varied. The evaluation of the results was performed: – the PSNR metric; difference card analysis; the number and average length of the formed series of BBs. The modeling confirmed that the use of adaptive two-stage smoothing (P_{Z1} and P_{Z2}) in the range of their values from 7 to 14 brightness gradations allows to significantly reduce the total amount of series of BBs and increase their average length. This improves the combinatorics of elements in the array series of BBs for the purpose of their subsequent multiplexing and reduces the computational complexity of the algorithm. According to the processing results, the key structural elements of the images are fully preserved, while all changes are localized in their low-information areas. The obtained PSNR values in the specified range of P_{Z1} and P_{Z2} parameter adjustments remain consistently high. Integrating probabilistic cards of brightness differences into the cycle preprocessing for source data ensures the possibility of express evaluation of the source data and allows for more efficient determining of the necessary statistical correlations in the interacting pair of «content ↔ container». Thanks to this, the initial conditions for forming arrays series of BBs and the combinatorics multiplexing of series parameter are improved. The considered approach ensures a balance between visual quality, speed, and computational efficiency of the investigated algorithm. This makes it a promising for implementation as part of mobile platforms and/or as a way to mitigate the effects of resource constraints in the hardware and software platforms used. The results obtained provide a basis for further automation of the selection of current processing parameters for concealed data, depending on the statistical properties of the «content ↔ container» interaction pair.

Keywords: cybersecurity; steganography; digital images; computational complexity; PSNR; probability of brightness differences; run-length encoding; transform coding; basic block; data encapsulation.



REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Fridrich, J. (2009). *Steganography in digital media: Principles, algorithms, and applications*. Cambridge University Press.
2. Konakhovych, H., Prohonov, D., & Puzyrenko, O. (2018). *Computer steganographic processing and analysis of multimedia data: Textbook*. Center for Educational Literature.
3. Kuznetsov, O. O., Yevseiev, S. P., & Korol, O. H. (2011). *Steganography: Study guide*. KhNEU Publishing.
4. Cox, I., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., & Kalker, T. (2007). *Digital watermarking and steganography* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
5. Yahya, A. (2019). *Steganography techniques for digital images*. Springer International Publishing.
6. Hassaballah, M. (2020). *Digital media steganography: Principles, algorithms, and advances*. Academic Press.
7. Shih, F. Y. (2020). *Digital watermarking and steganography*. CRC Press.
8. Pilania, U., & Kumar, M. (2026). *Unveiling the art of steganography: A modern approach*. CRC Press.
9. Malakhov, S., & Honcharov, M. (2024). Synthesis of probabilistic maps of brightness transitions (gradients) of images to improve steganographic embedding procedures. *Grail of Science*, 47, 545–554. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.20.12.2024>
10. Pratt, W. K. (1978). *Digital image processing*. John Wiley & Sons.
11. Honcharov, M. O., Malakhov, S. V., & Zhylienkov, D. V. (2025). Study of complexity and properties of different deployment schemes of output steganographic data under changing attack scenarios. *Modern Information Security*, 4, 44–58. <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/3352>
12. Honcharov, M. O., Nariiezhnii, O. P., & Malakhov, S. V. (2025). Analysis of prerequisites for ensuring resource consensus when performing steganographic data insertion procedures. *Modern Information Security*, 3, 44–58. <https://journals.dut.edu.ua/index.php/dataprotect/article/view/3302>
13. Akinwumi, A. O., Ogbeide, O. L., & Folorunso, D. F. (2023). Implementing image steganography techniques for secure data hiding in the development of an Android application. *Communications on Applied Electronics*, 7(39), 26–33. <https://doi.org/10.5120/cae2023652902>
14. Jadhao, Y. B., Kalamkar, P. V., Wadode, K. S., Ganbas, S. R., & Borle, S. V. (2025). An Android application for digital image steganography techniques. *International Journal for Research Trends and Innovation*, 10(3). <https://www.ijrti.org/papers/IJRTI2503212.pdf>
15. Fuad, M., & Ernawan, F. (2020). Video steganography based on DCT psychovisual and object motion. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 9(3), 1015–1023. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i3.1859>
16. Lesna, Y., Honcharov, M., & Malakhov, S. (2023). Results of modeling attempts of unauthorized extraction of steganographic content for different combinations of attacks on the experimental stego-algorithm. *Scientific Collection "InterConf"*, 141, 338–345. <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/2319>

Отримано редакцією журналу / Received: 09.02.26

Прорецензовано / Revised: 25.02.26

Схвалено до друку / Accepted: 25.06.26



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.