

МЕТОД КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Цифрові зображення є одними з найбільш поширених типів даних, які циркулюють у комп'ютерних мережах. Природа їх формування та семантичне наповнення є різними, але усі вони володіють значною надлишковістю та через це є привабливими для стеганографії. Особливий інтерес представляють кольорові зображення. Стеганографічне приховування інформації спричиняє появу візуальних спотворень. Це вимагає сформувати метрику, яка б кількісно оцінювала внесені зміни для встановлення їх допустимого рівня. Більшість відомих алгоритмів для оцінювання візуальної якості вимагає наявності еталонного зображення, яке доволі часто є відсутнє. У роботі враховано цей недолік і розроблено метод кількісного оцінювання візуальної якості зображення, який не вимагає еталонного зображення. Відомо, що гістограма візуально досконалого зображення описується нормальним законом розподілу. Основна ідея запропонованого методу полягає в тому, що при обчисленні візуальної якості кольорового зображення проводиться порівняння гістограм досліджуваного та еталонного зображень. На підставі сформованих відмінностей приймається рішення про візуальну якість зображення. Гістограма кольорового зображення є тривимірною, тому для зручності обчислення характеристик запропоновано трансформувати її у двохвимірне представлення. Проведена перевірка роботи запропонованого методу на тестових зображеннях показала повне співпадіння отриманих результатів з експертними оцінками. Також наведено результати практичного застосування запропонованого методу у стеганографії. Показано, що збільшення кількості спотворених пікселів та збільшення рівнів мультиплексування призводить до збільшення візуальної якості на 10%. Пояснюється це тим, що зміна найменш значущих біт сприймається як підвищення високочастотної складової на зображенні. Цей момент має бути врахованим при проведенні подальших досліджень.

Ключові слова: кольорові зображення-стеганоконтейнер, метрики візуальної якості, тестові зображення, колірний простір, тривимірна гістограма.

Вступ і формулювання проблеми

Сучасний розвиток і поширення комп'ютерної техніки та мереж призвели до розроблення нових та вдосконалення існуючих методів і алгоритмів безпечної передачі даних по каналах зв'язку. Поряд з криптографічними методами в останні десятиліття активного розвитку набули стеганографічні методи. Вони, на відміну від криптографії, не лише роблять недоступним вміст інформації, але й приховують факт її передачі. Це є важливим при вирішенні низки прикладних задач.

У цій роботі об'єктом досліджень є цифрові кольорові зображення. Формат їх представлення не має значення, якщо приховування інформації відбувається безпосередньо в матрицю зображення. Застосування кольорових зображень в якості стеганоконтейнера обумовлено їх великою надлишковістю, що дає можливість надійно приховувати дані. Кожний стеганоалгоритм описується множиною характеристик, найбільш вагомими серед яких є його стійкість до зовнішнього впливу. Зовнішній вплив може бути зумисним чи випадковим. Наслідок дії такого впливу проявляється у наявності та рівні спотворень, яких зазнає стеганоконтейнер і прихована інформація зокрема.

Найбільш поширеним стеганографічним методом є вбудовування у найменш значущий біт. Його широке застосування обумовлене простотою реалізації та можливістю приховувати достатньо великі об'єми даних. Ідея методу ґрунтується на припущенні, що значення молодших бітів є випадковими величинами та їх можна інтерпретувати як шум матриці фотофіксуючого пристрою. Проте бітовий зріз зображення з глибиною кольору 8 біт показує кореляційні залежності між значеннями молодших біт та чітку зміну семантичного наповнення у випадку приховування даних. Факт приховування інформації є особливо виразним коли вбудовування відбувається в області зображень з однаковим рівнем інтенсивностей. Відомі модифікації методу вбудовування у найменш значущі біти, які реалізують приховування даних у високочастотні області, зменшуючи можливість виявлення на основі бітового зрізу зображення [1].

В будь-якому випадку, стеганоалгоритм, який використовує в якості стегоконтейнера цифрові зображення, повинен володіти в першу чергу високою стійкістю до візуальних атак. Для цього алгоритм приховування даних має вносити мінімальні візуальні спотворення в стегоконтейнер. Отже, актуальною є задача кількісного оцінювання та аналізу спотворень, які привносить стеганоалгоритм [1].

Для оцінки спотворень використовують різноманітні метрики. Серед них слід виділити найбільш вживані традиційні методи PSNR та MSE [1]. PSNR - це міра якості зображень, яка використовується для порівняння оригінального зображення з його зміненою версією. PSNR обчислюється на основі середньоквадратичної похибки (MSE). Ці методи ґрунтуються на аналізі різниці інтенсивностей пікселів вхідного та зміненого зображень.

Окрім згаданих методів, до найбільш відомих оцінок відносяться – середня різниця, нормована кореляція, якість кореляції, максимальна різниця, достовірність зображення, різні види похибок (середньоквадратична лапласіанова, максимальна середньоквадратична, пронормована абсолютна та середньоквадратична, норма Мінковського тощо) [1].

Ці оцінки мають низьку обчислювальну складність, що є їх перевагою. Але разом з цим, вони не завжди добре корелюють з візуальним сприйняттям зображень людиною. Ще одним вагомим недоліком описаних вище методів є те, що вони вимагають наявності еталонного зображення. Оскільки еталонні зображення не завжди є доступними при вирішенні практичних задач, то ці методи оцінювання візуальної якості мають обмежене коло застосування.

Дещо більшою обчислювальною складністю та більшими можливостями щодо оцінювання якості зображень володіє метод SSIM. Це метрика для оцінки схожості двох зображень, яка дещо більше орієнтована на людське сприйняття, ніж PSNR. SSIM враховує структурні особливості зображень, такі як яскравість, контраст і кореляцію між пікселями. Завдяки цьому SSIM часто дає більш інформативну оцінку якості зображення, особливо в застосуваннях, де важливе сприйняття якості зображення [1].

Аналіз літератури. У роботі [2] встановлено, що підвищення ефективності оцінювання візуальної якості зображень можливе шляхом поєднання відомих метрик. Такий підхід доповнює переваги кожної з метрик. Також зазначено, що не існує універсальних метрик. Кожна з метрик чи їх поєднання мають бути адаптовані під певний клас зображень, тобто бути проблемно-орієнтованими.

Аналіз найбільш вживаних методів кількісного оцінювання якості зображень показав, що їх ефективність суттєво залежить від рівня врахування законів зорового сприйняття. Таке припущення підтверджується тим, що саме людина, в більшості випадків, є учасником прийняття рішень в автоматизованих системах обробки, аналізу та розпізнавання зображень. Одним з недоліків більшості методів кількісного оцінювання візуальної якості зображень є їх спрямованість на аналіз лише певного класу зображень. Відсутність універсальності теж в деякій мірі пояснюється тим, що у методі аналізу якості не враховано закони зорового сприйняття світла людиною.

В [1] розроблено метод комплексного кількісного оцінювання візуальної якості зображень. Метод ґрунтується на ймовірнісній моделі зображення. При його побудові враховано недоліки більшості відомих методів, серед яких слід виділити врахування законів зорового сприйняття та відсутність необхідності наявності еталонного зображення. Основна ідея запропонованого у [1] методу полягає у тому, що еталонне зображення не задається безпосередньо, а представляється опосередковано через гістограму, яка характерна для даних з найкращою візуальною якістю. За рівнем відхилення гістограми досліджуваного зображення від її еталонного представлення оцінюють візуальну якість графічних даних. Для кількісного аналізу гістограми використовують моментні функції різних порядків, які характеризують симетричність гістограми інтенсивностей, розкид їх значень навколо усередненого значення інтенсивності, гостро- та плосковершинність розподілу. Усі моментні функції обчислюються відносно середини діапазону, яка є оптимальною для зорового сприйняття.

За еталонну форму гістограми в [1] прийнято нормальний розподіл. Відома велика кількість наукових публікацій, в яких розглядають нормальний розподіл інтенсивності зображень і його зв'язок із законами зорового сприйняття. В [3] досліджено функцію чутливості до контрасту (CSF), яка показує, що людське око найбільш чутливе до середніх рівнів інтенсивності. Нормальний розподіл у гістограмі зображення дозволяє зосередити інтенсивність у середніх тонах, де зір людини найбільш чутливий, що сприяє кращому сприйняттю зображення. В іншій роботі [4] досліджено метрику SSIM, яка використовується для оцінки якості зображень, враховуючи схожість із людським зоровим сприйняттям. Дослідження показує, що нормальний розподіл гістограми забезпечує високу оцінку якості за метрикою SSIM, оскільки краще відтворює природні сцени. При розгляді питання оптимальної гістограми слід згадати закон Вебера–Фехнера [5]. Це дослідження показує, як закон Вебера–Фехнера застосовується до контрастної чутливості людського ока. Оскільки людський зір краще сприймає зміни в середньому діапазоні інтенсивності, зображення з нормально розподіленою гістограмою здаються природнішими і легшими для сприйняття. У [6] автори досліджують статистику природних зображень і знаходять, що розподіл інтенсивності в природних сценах часто має нормальноподібний характер. Це означає, що зір людини еволюціонував для сприйняття таких сцен і тому зображення з нормальною гістограмою є візуально привабливими та зрозумілими. Відомою є технологія адаптивного вирівнювання гістограми [7]. Це техніка обробки зображень, яка допомагає покращити контраст у зображеннях, не втрачаючи природного вигляду. Використання нормального розподілу для гістограм дозволяє зберегти баланс між високим контрастом і природністю.

На рис. 1 наведено приклади тривимірних гістограм (*г-е*) для тестових зображень (*а-в*).

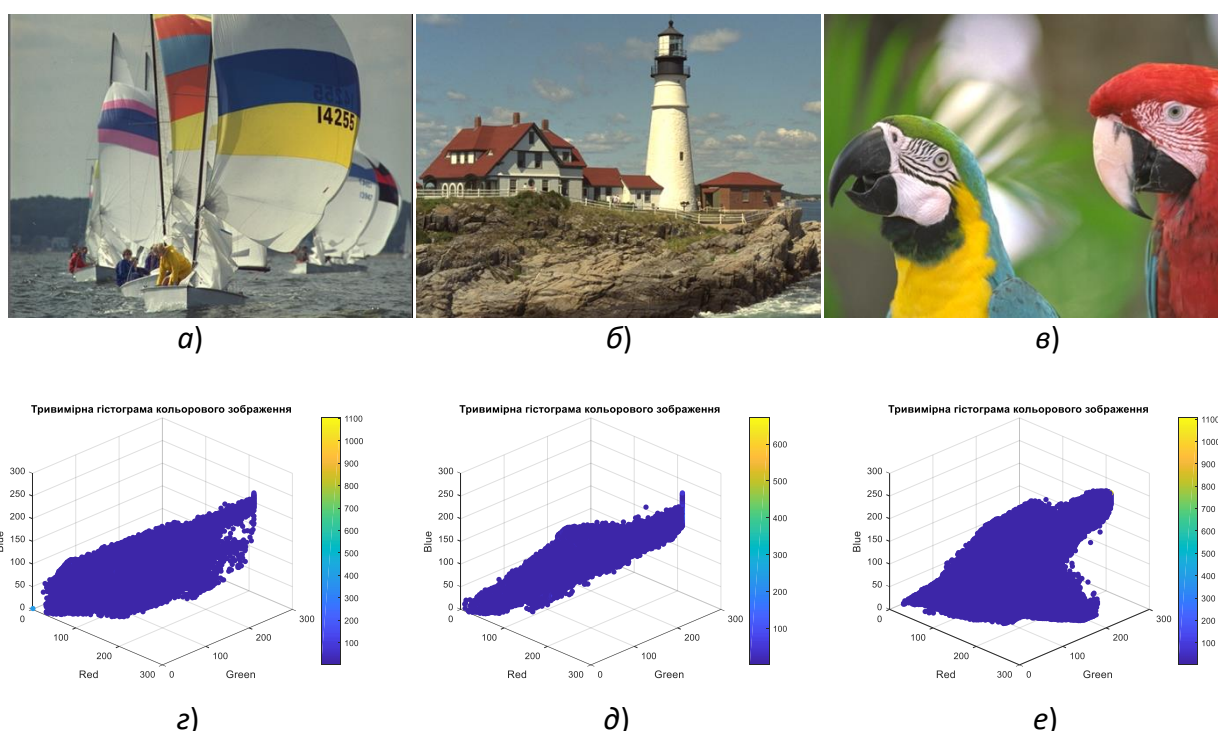


Рис. 1. Тестові зображення (*а-в*) та відповідні їм тривимірні гістограми (*г-е*).

Проведений аналіз публікацій засвідчує, що нормальний розподіл гістограми узгоджується з законами зорового сприйняття [8]. Він забезпечує кращу передачу контрасту та чутливість до середніх рівнів інтенсивностей, що відповідає зоровим особливостям людини і робить зображення більш природними та привабливими для глядача. Зазначимо, що наведені вище дослідження та отримані результати стосуються, у більшості випадків, напівтонових

зображень [1]. Для природних кольорових зображень часто оптимальним є нормальний розподіл інтенсивностей у кожному колірному каналі (Red, Green, Blue — RGB), де пік розподілу припадає на середні значення. Це наближено відтворює розподіл кольорів у реальних сценах і забезпечує природність зображення. Зважаючи на це, застосуємо аналогічний підхід для випадку кольорових зображень [9, 10].

Тривимірні гістограми (*z-e*) тестових зображень (*a-e*) на рисунку 1 займають лише певну частину об'єму куба і суттєво відрізняються від описаної вище еталонної форми гістограми.

Мета та завдання дослідження. Проведений аналіз літературних джерел надає підстави стверджувати, що актуальною є задача побудови методики кількісного оцінювання візуальної якості кольорових зображень на основі аналізу відмінностей тривимірної гістограми досліджуваного зображення та еталонної гістограми.

Для досягнення поставленої мети необхідно представити тривимірну гістограму в зручному для дослідження вигляді; сформувати гістограму еталонного зображення; розробити метрику оцінювання різниці досліджуваного та еталонного зображень.

Запропонований метод. Еталонна гістограма характеризується просторовим нормальним розподілом. Для оцінювання відхилень реальної тривимірної гістограми від еталонної пропонується наступний алгоритм.

На першому етапі пропонується трансформувати тривимірний розподіл у двохвимірний для порівняння його з нормальним розподілом інтенсивностей зображення. Для цього обчислено відстань d (рис. 2) від центру куба RGB з координатами $(R/2, R/2, R/2)$, де $R = 256$ – діапазон інтенсивностей для випадку восьмибітних зображень, до поточного пікселя $L(i, j, k)$ за виразом

$$d = \sqrt{(L(i, j, 1) - R/2)^2 + (L(i, j, 2) - R/2)^2 + (L(i, j, 3) - R/2)^2}, \quad (1)$$

де $L(i, j, k)$ – значення інтенсивності k -го колірного шару пікселя з координатами (i, j) .

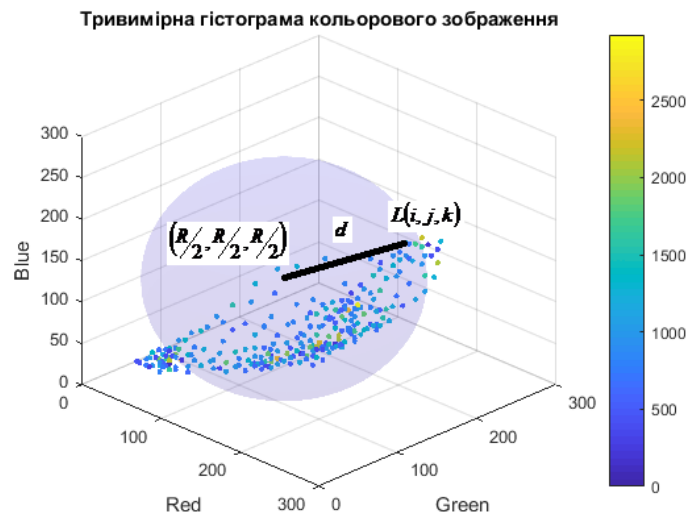


Рис. 2. Відстань d від центру куба RGB до поточного пікселя $L(i, j, k)$ за виразом (1).

За обчисленими для кожного пікселя відстанями d формують гістограму (рис. 3 а). Вона, як і її тривимірне представлення в кубі RGB , є важливою характеристикою зображення та більш наочно відображає розподіл значень інтенсивностей пікселів. Для випадку еталонного зображення гістограма характеризується нормальним розподілом (рис. 3 б) [1].

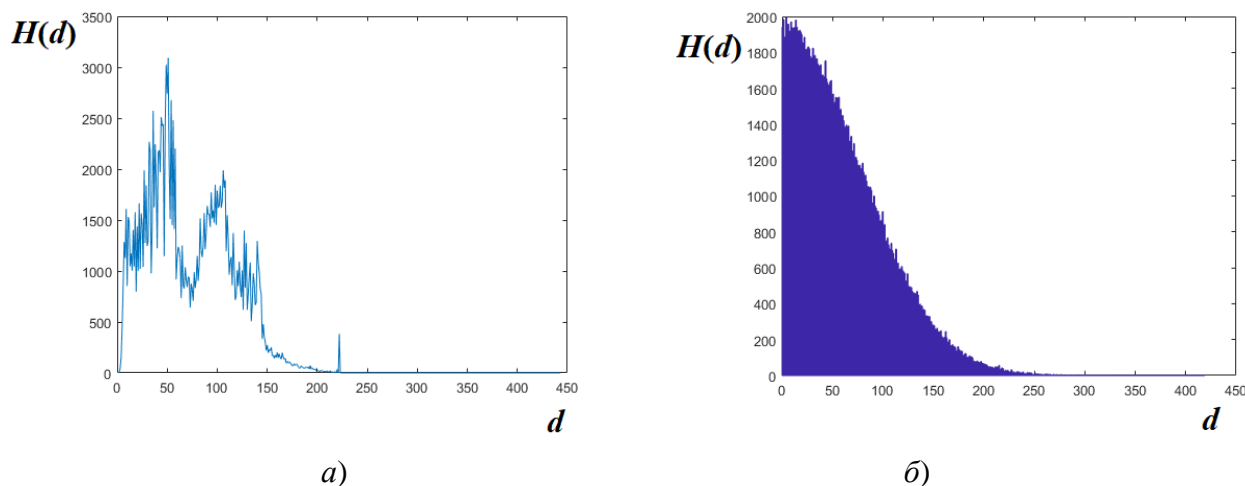


Рис. 3. Гістограма розподілу віддалей d від пікселів до центру куба RGB для реального *a)* та еталонного *б)* зображень.

З рисунку 3 видно, що між гістограмами еталонного та реального зображень є відмінності. Для кількісного оцінювання цих відмінностей використано кореляційну функцію. Зображення з вищим рівнем візуальної якості зображення характеризується показником ближчим до 1 і навпаки.

Верифікація запропонованого методу. Проведено апробацію запропонованого методу кількісного оцінювання візуальної якості зображень. Для цього застосовано базу тестових зображень TID2013 [2]. Ця база містить 25 різних зображень. Кожне з цих зображень містить 24 типи спотворень, кожне з яких має 5 рівнів впливу на зображення.

Тестові зображення цієї бази використовуються при дослідженні в галузі комп'ютерного зору для оцінювання роботи методів обробки зображень; при тестуванні алгоритмів IQA для перевірки їх відповідності сприйняттю людини; в машинному навчанні як навчальна база для моделей, що оцінюють якість зображень.

Перевага цієї бази полягає в тому, що, на відміну від більшості інших баз тестових зображень, для кожного зображення є експертна оцінка візуальної якості зображень. Приймаючи експертні оцінки за еталонні можна порівнювати ефективність методів оцінки візуальної якості зображень.

Для перевірки запропонованого у роботі методу кількісного оцінювання візуальної якості вибрано зображення, яке наведено на рис. 1 *a*. На його основі сформовано серію зображень з різними типами спотворень. Типи спотворень є характерними для стеганографічного приховування інформації – це квантування кольорів зображення зі змішуванням, високочастотний шум, адитивний шум Гауса, зміна насиченості кольору. Результати роботи запропонованого методу представлені в таблиці 1.

Для порівняння результатів оцінювання візуальної якості кольорових зображень за запропонованим методом з експертними оцінками застосовується метод Спірмена. Це статистичний метод, який використовується для виявлення залежності між двома змінними, ґрунтуючись на їх рангах, а не на абсолютних значеннях.


Якщо значення коефіцієнта Спірмена рівне $r_s = 1$, це свідчить про те, що між наборами даних повна кореляція та ранги ідеально співпадають. При $r_s = -1$ – між наборами даних спостерігається від'ємна кореляція, тобто вони обернено пропорційні, а при $r_s = 0$ – будь який зв'язок є відсутній.

Таким чином, для виявлення взаємозв'язку між результатами, які отримані за запропонованим методом та експертними результатами застосовано метод Спірмена.

Коефіцієнти Спірмена для усіх зображень з різними типами та силою спотворень рівні 1, що свідчить про їх повне співпадіння.

Таблиця 1

Аналіз результатів оцінювання візуальної якості кольорових зображень за запропонованим методом

Зображення	Тип спотворень	Рівень спотворень	Кількісна оцінка візуальної якості зображення за запропонованим методом, Q	Експертна оцінка візуальної якості зображення	Коефіцієнт Спірмена, r_s
	квантування кольорів зображення зі змішуванням	1	0,4581	5,78788	1
		2	0,3578	5,71875	
		3	0,2044	5,50000	
		4	0,1681	4,09375	
		5	0,1287	2,71875	
	висоочастотний шум	1	0,8915	5,93548	1
		2	0,8895	5,50000	
		3	0,8575	4,96875	
		4	0,8058	4,09091	
		5	0,6558	3,59375	
	адитивний шум Гауса	1	0,8902	5,36364	1
		2	0,8894	5,00000	
		3	0,8701	4,54545	
		4	0,8613	4,03226	
		5	0,8340	3,63636	
	зміна насиченості кольору	1	0,8289	4,81818	1
		2	0,8281	4,30303	
		3	0,8179	4,06452	
		4	0,7722	3,31250	
		5	0,8089	3,15625	

Проведемо дослідження зміни візуальної якості заповненого зображення-стегоконтейнера від кількості спотворених пікселів та рівня мультиплексування. Спочатку на основі деякого зображення-стегоконтейнера (рис. 4) сформували набір заповнених стеганоконтейнерів з різною кількістю спотворених пікселів та різним рівнем мультиплексування, тобто кількістю біт, які використані для приховування даних (табл. 2).

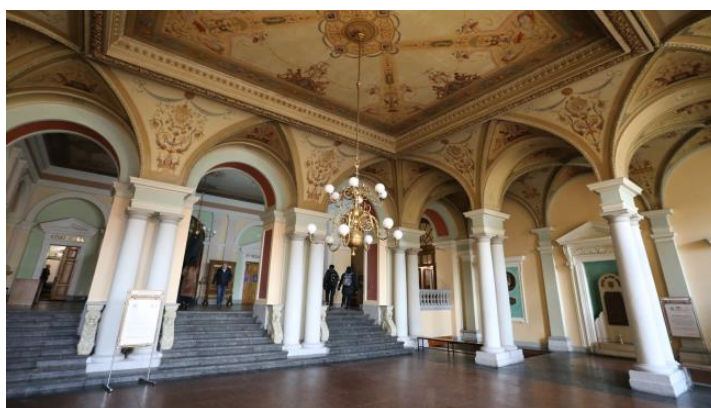


Рис. 4. Порожнє зображення-стеганоконтейгер

Таблиця 2

Результати оцінювання візуальної якості заповнених стегоконтейнерів
запропонованим методом

Кількість спотворених пікселів	Рівні мультиплексування, m			
	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
200	0,7058	0,7077	0,7102	0,6972
500	0,7231	0,7108	0,7279	0,70047
1000	0,7214	0,7153	0,7224	0,7280
2000	0,7220	0,7376	0,7218	0,7821

З таблиці 2 видно, що кількісна оцінка візуальної якості заповнених стегоконтейнерів зростає зі збільшенням кількості пікселів, які використовуються для приховування даних та кількості бітів, у які ці дані приховуються. Кількісно зростання візуальної якості відповідно до вказаних у таблиці параметрів складає близько 10%. Зростання візуальної якості пояснюється тим, що зміна значень випадкових пікселів інтерпретується як додавання високочастотного шуму на зображення, а збільшення частки високочастотних складових враховується як зростання візуальної якості зображення.

Висновки. Розроблено метод кількісного оцінювання візуальної якості цифрових кольорових зображень. Перевагою методу є це, він на відміну від більшості відомих аналогів, не вимагає наявності еталонного зображення. Проведено верифікацію запропонованого методу на тестових зображеннях з різними типами спотворень, які характерні для стеганографічних систем. Проведені обчислення показали повне співпадіння отриманих результатів з експертними оцінками. Також у роботі досліджено один з прикладних аспектів застосування запропонованого методу для оцінювання візуальної якості заповнених стегоконтейнерів у стеганографічних системах приховування інформації. При збільшенні кількості спотворених пікселів від 200 до 2000 і зміні рівнів мультиплексування m від 1 до 4 оцінка візуальної якості зросла на 10%, що спричинено зростанням частки високочастотної складової на зображенні.

Перелік посилань

- Zhuravel, I. M., Onyshko, V. R., Zhuravel, Yu. I., & Ambroziak, K. A. (2024). Quantitative assessment of the visual quality of digital images based on the laws of human visual perception. *Ukrainian Journal of Information Technology, 6(1), 17–25. <https://doi.org/10.23939/ujit2024.01.017>
- Ponomarenko, N., Jin, L., Ieremeiev, O., Lukin, V., Egiazarian, K., Astola, J., Vozel, B., Chehdi, K., Carli, M., Battisti, F., & Jay Kuo, C.-C. (2015). Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives. *Signal Processing: Image Communication, 30, 57–77.*
- Daly, S. J. (1993). Visible differences predictor: An algorithm for the assessment of image fidelity. In *Proceedings of SPIE: Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV (Vol. 1666, pp. 2–15).*
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing, 13(4), 600–612.*
- Peli, E. (1990). Contrast in complex images. *Journal of the Optical Society of America A, 7(10), 2032–2040.*
- Ruderman, D. L., Cronin, T. W., & Chiao, C. C. (1998). Statistics of cone responses to natural images: Implications for visual coding. **Journal of the Optical Society of America A, 15(8), 2036–2045.*
- Zuiderveld, K. (1994). Contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE). In P. S. Heckbert (Ed.), *Graphics Gems IV (pp. 474–485).* Academic Press.
- Boutros, F., Fang, M., Klemt, M., Fu, B., & Damer, N. (2023). CR-FIQA: Face image quality assessment by learning sample relative classifiability. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2023).* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.06592>
- Madhusudana, P. C., Birkbeck, N., Wang, Y., Adsumilli, B., & Bovik, A. C. (2022). Image quality assessment using contrastive learning. *IEEE Transactions on Image Processing, 31, 4149–4161.* <https://doi.org/10.1109/TIP.2022.3181496>
- Zhang, W., Ma, K., Zhai, G., & Yang, X. (2021). Uncertainty-aware blind image quality assessment in the laboratory and wild. *IEEE Transactions on Image Processing, 30, 3474–3486.* <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3061932>

Надійшла 30.11.2024