

# АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ СТЕГАНОГРАФІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДО ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ У ЗОБРАЖЕННЯ

*Яремчук Ю.Є., Карпінець В.В.*

## Вступ

На сьогодні задача забезпечення захисту авторських прав у зображеннях може вирішуватись за допомогою стеганографічних методів, найбільш поширеними з яких є цифрові водяні знаки (ЦВЗ). Більшість існуючих стеганосистем, що вирішують цю задачу, потребують для виявлення ЦВЗ оригінал зображення, ЦВЗ чи іншу інформацію [1]. Перспективними є дослідження, спрямовані на розробку відкритих стеганосистем, які для витягнення ЦВЗ не потребують ніякої додаткової інформації. Основними проблемами [2] при реалізації методів для забезпечення захисту авторського права в зображеннях, що представляють відкриті стеганосистеми, є суттєве руйнування чи знищення ЦВЗ при високих коефіцієнтах ущільнення зображення та афінних перетвореннях, а також пов'язане з цим помітне погіршення якості зображення. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на розробку стеганографічних методів, в яких вирішувались би вказані проблеми.

При побудові стеганосистем важливим є стеганографічний аналіз, основною метою якого є моделювання стеганографічних систем та їх дослідження для отримання якісних та кількісних оцінок надійності використання стеганоперетворення.

У роботі [3] було запропоновано метод захисту авторського права в зображеннях за допомогою цифрових водяних знаків, в якому для забезпечення стійкості цифрових водяних знаків до різного роду спотворень і ущільнення зображень, при забезпеченні достатнього рівня їх візуальної якості, було запропоновано нові критерії вибору придатних для зміни низькочастотних коефіцієнтів дискретного косинус перетворення та критерії, за якими вбудовуються цифрові водяні знаки. Однак актуальними залишаються дослідження щодо отримання якісних та кількісних оцінок надійності використання запропонованого стеганоперетворення.

## Мета досліджень

Провести стеганографічний аналіз методу вбудовування цифрових водяних знаків у зображення та отримати оцінки стійкості використаного стеганоперетворення до впливу ЦВЗ на якість зображення.

## Постановка задачі

Провести дослідження методу та отримати показники відмінності і кореляційні показники для визначення впливу ЦВЗ на якість зображення. Проаналізувати отримані показники та порівняти з показниками відомих методів вбудовування ЦВЗ у зображення. Визначити стійкість ЦВЗ до спотворення зображення під час ущільнення.

## Метод вбудовування цифрових водяних знаків у зображення

Суть методу вбудовування ЦВЗ у зображення полягає в тому, що ЦВЗ вбудовується в частотну область зображення на основі використання дискретного косинус перетворення шляхом зміни значень коефіцієнтів ДКП. За допомогою ДКП відбувається перехід від представлення зображення у вигляді сукупності просторових хвиль до його спектральної інтерпретації.

На початковому етапі первинне зображення розбивається на блоки розміром  $8 \times 8$  пікселів. Для утворених блоків значень кожного каналу кольору простору RGB застосовується ДКП. В результаті ДКП отримується ряд матриць коефіцієнтів базисних функцій, які несуть інформацію про рівень зміни яскравості пікселів певної частоти зустрічаємості в блоці зображення, які позначаються  $F_b(u,v)$ , де  $b$  – номер блоку контейнера  $C$ , а  $(u,v)$  – позиція коефіцієнта в цьому блоці. В кожній матриці низькочастотні (НЧ) коефіцієнти будуть розміщуватись у верхньому лівому куті, високочастотні (ВЧ) коефіцієнти – в нижньому правому, а середньочастотні (СЧ) компоненти по діагоналі матриці. НЧ коефіцієнти носять основну енергію зображення, так як в основному всі зображення складаються з низькочастотних та середньочастотних компонентів, тому основна інформація розміщується в лівій верхній частині матриць коефіцієнтів.

Перед приховуванням проводиться аналіз блоків коефіцієнтів зображення на придатність для вбудовування. При цьому враховується те, що блоки не повинні мати різких перепадів яскравості та не бути монотонними. При чому блоки, які не відповідають першій умові, характеризуються великими

значеннями НЧ коефіцієнтів, а значення більшості високочастотних коефіцієнтів блоків, які не відповідають другій умові, дорівнюють нулю. Гранічні значення коефіцієнтів  $P_L$  та  $P_H$ , які задовольняють першій та другій умовам відповідно, визначаються за формулами:

$$\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} |F_b(u, v)| < P_L, \quad (1)$$

$$\sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} |F_b(u, v)| > P_H, \quad (2)$$

де  $P_L$  – граничне значення для забезпечення першої умови,  $P_H$  – граничне значення для забезпечення другої умови.

Також перед вбудовуванням обумовлюється граничне значення параметра  $P$ , який визначає на скільки може бути змінений коефіцієнт. Це здійснюється для запобігання суттєвої деградації зображення у випадку значної зміни коефіцієнтів ДКП.

Вибір коефіцієнтів блоку зображення для приховування повідомлення відбувається таким чином. Псевдовипадково вибираються два НЧ коефіцієнти  $F_b(u_2, v_2)$  та  $F_b(u_3, v_3)$ , при чому значення позицій  $(u_2, v_2)$  та  $(u_3, v_3)$  генеруються на основі секретного ключа  $k$ . Далі відбувається визначення придатності до зміни вибраної пари коефіцієнтів, використовуючи граничне значення  $P$ . При цьому різниця між значеннями коефіцієнтів не повинна перевищувати  $P$ , тобто:

$$F_b(u_2, v_2) - F_b(u_3, v_3) \leq p \in \{-P, P\}. \quad (3)$$

Якщо умова (3) не виконується, генеруються інші позиції коефіцієнтів до повного перебору всіх значень серед діапазону позицій НЧ компонентів. Якщо блок не задовольняє умовам (1) та (2) або коефіцієнти блоку не відповідають умові (3), блок відкидається і не використовується для приховування інформації.

Після цього вибираються ще два коефіцієнти  $F_b(u_1, v_1)$  та  $F_b(u_4, v_4)$  шляхом накладання умови з граничним значенням  $P$  на сусідні коефіцієнти відносно  $F_b(u_2, v_2)$  та  $F_b(u_3, v_3)$ , таким чином:

$$F_b(u_1, v_1) - F_b(u_2, v_2) \leq p \in \{-P, P\}, \quad (4)$$

$$F_b(u_3, v_3) - F_b(u_4, v_4) \leq p \in \{-P, P\}. \quad (5)$$

У випадку, коли серед сусідніх коефіцієнтів знаходиться тільки один коефіцієнт, який відповідає умові (4) чи (5), блок вважається прийнятним для вбудовування тільки одного біту ЦВЗ. Блок зображення відкидається, коли не виявлено жодного коефіцієнта, який би відповідав вищевказаній умові.

Згідно методу, в кожен блок коефіцієнтів розміром  $8 \times 8$  можна приховати 2 біти приховуваної інформації. Інформація вбудовується шляхом зміни НЧ коефіцієнтів за такою умовою: якщо потрібно вбудувати «0», то коефіцієнт  $F_b(u_1, v_1)$  або  $F_b(u_4, v_4)$  змінюється таким чином, щоб він був менший від середнього арифметичного значення з коефіцієнтом  $F_b(u_2, v_2)$  та  $F_b(u_3, v_3)$ . При вбудовуванні «1» коефіцієнт повинен бути більшим від середнього арифметичного значення з цими коефіцієнтами. Умови для вбудовування двобітних комбінацій  $m_b$  мають такий вигляд:

$$\left. \begin{cases} F_b(u_1, v_1) < \frac{F_b(u_1, v_1) + F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3)}{3} \\ F_b(u_4, v_4) < \frac{F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3) + F_b(u_4, v_4)}{3} \end{cases} \right\}, \text{іде } m_b = 00$$

$$\left. \begin{cases} F_b(u_1, v_1) < \frac{F_b(u_1, v_1) + F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3)}{3} \\ F_b(u_4, v_4) > \frac{F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3) + F_b(u_4, v_4)}{3} \end{cases} \right\}, \text{іде } m_b = 01$$

$$\left. \begin{cases} F_b(u_1, v_1) > \frac{F_b(u_1, v_1) + F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3)}{3} \\ F_b(u_4, v_4) < \frac{F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3) + F_b(u_4, v_4)}{3} \end{cases} \right\}, \text{іде } m_b = 10$$

$$\left. \begin{cases} F_b(u_1, v_1) > \frac{F_b(u_1, v_1) + F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3)}{3} \\ F_b(u_4, v_4) > \frac{F_b(u_2, v_2) + F_b(u_3, v_3) + F_b(u_4, v_4)}{3} \end{cases} \right\}, \text{іде } m_b = 11 \quad (6)$$

Після зміни коефіцієнтів проводиться обернене дискретне косинус-перетворення над матрицями коефіцієнтів для перетворення зображення з частотного представлення в просторове. В результаті оберненого ДКП отримується набір матриць зі значеннями кольорів RGB простору.

Для виявлення ЦВЗ не потрібно наявності оригіналу зображення чи самого ЦВЗ. Перед вилученням інформації проводиться дискретне косинус-перетворення та аналогічний аналіз на придатність блоків та коефіцієнтів шляхом перевірки умов (1)-(5). Для прийняття рішення про наявність в блоці зображення конкретних двобітових комбінацій чи окремих бітів цифрового водяного знаку проводиться порівняння коефіцієнтів згідно умови (6).

### Стеганографічний аналіз методу вбудовування ЦВЗ у зображення

Проведемо стеганографічний аналіз, взявши в якості контейнера для вбудовування ЦВЗ зображення – фотознімок природи розміром 195 Кбайт з середньою кількістю структурованих і монотонних областей та середньою кольоровою гамою. В якості ЦВЗ візьмемо зображення розміром 6 Кбайт. Зображення, що взяті в якості контейнера та ЦВЗ представлені на рис.1.

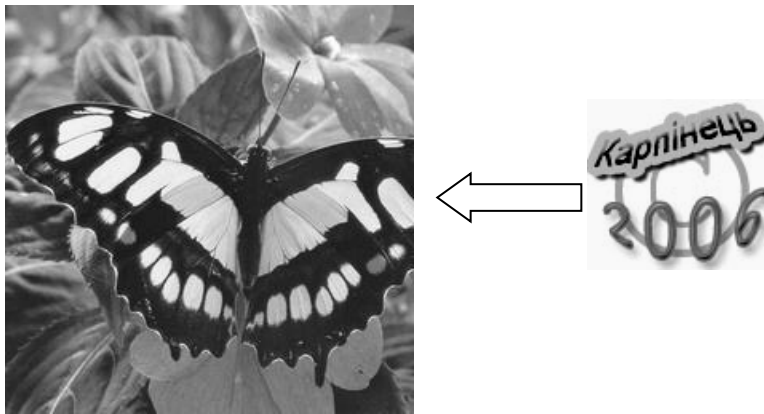


Рис. 1. Приклад зображення та ЦВЗ, взятих для оцінювання

Під час вбудовування ЦВЗ будемо вважати, що граничне значення  $P$  дорівнює 20.

Кількісне оцінювання стійкості стеганографічної системи захисту до зовнішніх впливів являє собою складну задачу, яка зазвичай на практиці реалізується методами системного аналізу, математичного моделювання або експериментального дослідження [4].

У більшості випадків досить ефективним є метод оцінювання рівня скритності стегозасобів на основі аналізу їхніх статистичних характеристик [5]. Статистична теорія дає кількісні критерії випадковості, які дозволяють виявляти розбіжності між послідовностями.

Спочатку проаналізуємо спотворення зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ з точки зору візуального сприйняття.

На рис. 2 показано зображення до вбудовування (рис.2.а) та після вбудовування ЦВЗ (рис.2.б).



Рис. 2. Зображення до вбудовування (а) та зображення з вбудованим ЦВЗ (б)

Візуальний аналіз показує, що після вбудовування ЦВЗ зображення змінилося незначно. Для того, щоб побачити різницю між оригіналом зображення та зображенням з вбудованим ЦВЗ отримуємо

гістограми, що відображають частотний розподіл значень компонентів RGB простору. Гістограми зображення до та після вбудовування ЦВЗ зображено на рис.3.а та рис.3.б відповідно.

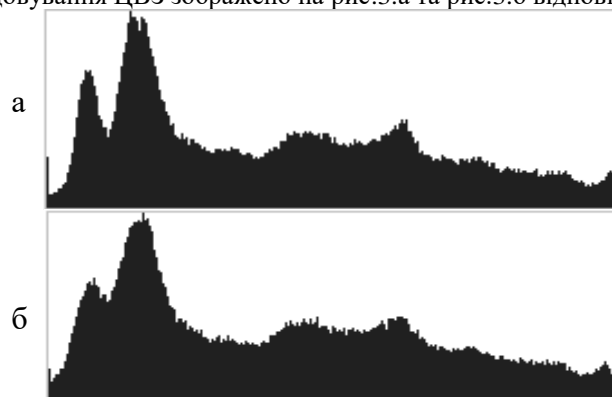


Рис. 3. Гістограми зображення до вбудовування (а) та зображення з вбудованим ЦВЗ (б)

Аналіз наведених гістограм показує, що з точки зору аналізу на наявність в зображенні ЦВЗ, немає присутності “корисного шуму”, який би виділявся статичними характеристиками. Це говорить про досить надійний захист ЦВЗ до атак зловмисника, спрямованих на виявлення його присутності, місця розташування ЦВЗ в зображенні або взагалі знищення ЦВЗ.

Далі проведемо оцінювання якості запропонованого методу з точки зору спотворень, які вносять стеганоперетворення в зображення. Для цього використаємо критерії якості [6]. Ці критерії поділяють на дві групи. До першої групи, що складається з більшості показників, відносяться показники відмінності, які використовуються при візуальній обробці. Ці показники базуються на відмінності між контейнером-оригіналом і контейнером-результатом. До іншої групи відносяться показники, що базуються на кореляції між оригінальним зображенням і зображенням з вбудованим ЦВЗ (кореляційні показники). При цьому  $C_{x,y}$  - піксель вхідного зображення з координатами  $(x,y)$ ,  $S_{x,y}$  - відповідний піксель зображення з вбудованим ЦВЗ.

В таблиці 1 наведено результати оцінювання за показниками відмінності та кореляційними показниками запропонованого методу та відомих методів [7], які вбудовують ЦВЗ в частотну область зображення, а саме: Коха-Жао, Бенгама-Мемона-Ео-Юнг, Хсу-Ву та Фрідріха.

Таблиця 1

Показники візуального спотворення зображення після вбудовування ЦВЗ

Назва показника	Методи вбудовування ЦВЗ в частотну область зображення				
	Коха-Жао	Бенгама-Мемона	Хсу-Ву	Фрідріх	Запропонований метод
Максимальна відмінність	51	60	129	101	42
Середня абсолютна відмінність	12.451	4.392	38.712	27.639	3.582
Нормована середня абсолютна відмінність	0.081	0.033	0.347	0.198	0.021
Середньоквадратична помилка	186.342	37.193	970.873	950.593	32.127
Нормована середньоквадратична помилка	$5.343 \cdot 10^{-3}$	$2.213 \cdot 10^{-3}$	0.032	0.015	$8.056 \cdot 10^{-4}$
Відношення “сигнал-шум”	187.127	634.605	24.098	43.639	806.321
$L^p$ -норма	14.454	6.059	44.793	32.231	5.799
Лапласова середньоквадратична помилка	0.041	0.057	0.531	1.045	0.055







Максимальне відношення “сигнал-шум”	370.294	1934.65	38.875	73.342	2013.431
Нормована взаємна кореляція	0.98751	0.99372	0.92372	0.95986	0.99438
Норма якості кореляції	178.367	183.029	134.975	165.313	194.047
Подібність гістограм	1.0123	1.0157	1.5395	1.3842	1.0145
Загальне сигма-відношення “сигнал-шум”	64.845	2045.86	17.674	18.927	2093.326
Сигма відношення “сигнал-шум”	67.8	70.3	45.3	160.3	69.2
Нормоване відношення “сигма-помилка”	102	113	120	198	115

Аналіз отриманих результатів показує, що запропонований метод забезпечує найменший негативний вплив ЦВЗ на візуальну якість зображення у порівнянні з існуючими методами, що вбудовують ЦВЗ в частотну зону зображення.

Проведемо дослідження запропонованого методу щодо стійкості цифрових водяних знаків до спотворення зображення під час ущільнення. Для цього зображення з вбудованим ЦВЗ ущільнено алгоритмом JPEG з різними ступенями збереження якості зображення  $q$ . Згідно алгоритму JPEG ступінь збереження якості зображення є оберненою величиною до коефіцієнта ущільнення зображення. Тобто при зменшенні значення ступеня збереження якості зображення збільшується рівень ущільнення. Результати оцінювання наведено в таблиці 2, де  $k$  – кількість неправильно розпізнаних пікселів ЦВЗ та співвідношення до загальної кількості пікселів ЦВЗ у відсотках.

Таблиця 2

Витягнуті ЦВЗ з ущільнених зображень згідно алгоритму JPEG

Зображення		$k$	ЦВЗ	Зображення		$k$	ЦВЗ
Формат	$q$			Формат	$q$		
ВМР	100%	0 (0%)		JPEG	50%	102 (1,1%)	
JPEG	100%	0 (0%)		JPEG	25%	364 (3,9%)	
JPEG	75%	38 (0,4%)		JPEG	0%	1269 (12,8%)	

Як показують результати дослідження, в зображеннях з вбудованим ЦВЗ, навіть під час ущільнення за алгоритмом JPEG із значенням ступеня збереження якості 0%, ЦВЗ не зруйнувався цілком і залишилася можливість розпізнати його інформативний вміст.

### **Висновки**

Проведено аналіз стійкості стеганографічного перетворення до вбудовування цифрових водяних знаків у зображення. Визначено зміну зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ за допомогою гістограм, що відображають частотний розподіл значень компонентів RGB простору.

Отримано показники відмінності, кореляційні показники для визначення спотворення візуальної якості зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ згідно запропонованого методу та відомих методів. Результати аналізу показали збереження достатньої візуальної якості зображення після вбудовування ЦВЗ.

Проведено дослідження стійкості ЦВЗ до спотворень внаслідок ущільнення. Дослідження проводились на прикладі ущільнення за алгоритмом JPEG з різними ступенями збереження якості зображення. Результати аналізу показали високу стійкість захисту ЦВЗ до ущільнення зображень.

### **Література**

1. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 288с.
2. Клопов В.А., Мотуз О.В. Основы компьютерной стеганографии // Информационно-методический журнал «Защита информации. Конфидент» 1997. №4. С.43-48.
3. Яремчук Ю.Є, Карпинець В.В. Використання цифрових водяних знаків для захисту авторського права в зображеннях // Науково-технічний збірник «Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні». – 2006 . - №13. – С. 53-58.
4. Основы компьютерной стеганографии / В.О. Хорошко, О.Д. Азаров, М.Є. Шелест, Ю.Є. Яремчук.– Вінниця: ВДТУ, 2003. – 143 с.
5. Langelaar G., Lagendijk R., Biemond J. Robust labeling methods for copy protection of images // Proc. of the SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases V. 1997. Vol. 3022.
6. Трубей А.И., Шелест М.Е. Обзор современных представлений о цифровой стеганографии // Научно-технический журнал «Проблемы защиты информации». – Минск: БГУ. 2001. – №3. С. 515.
7. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Цифровая стеганография. СПб.: ВУС, 2002. – 272 с.

**Яремчук Юрій Євгенович** – кандидат технічних наук, доцент, директор Інституту прогресивних освітніх технологій Вінницького національного технічного університету, тел. (0432) 598-497, 51-32-61, e-mail: yey@bigmir.net

**Карпинець Василь Васильович** – аспірант Вінницького національного технічного університету, тел. 80979053800, e-mail: karpinets@gmail.com