

УДК: 004.056.5

**В.В. Карпінець,
Ю.Є. Яремчук,
К.В. Безпалий**

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ НА ЯКІСТЬ ВЕКТОРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО ЗЛОВМISНИХ АТАК

У роботі розглянуто метод захисту векторних зображень цифровими водяними знаками (ЦВЗ) із забезпеченням зменшення впливу його вбудовування на якість зображення. Також розглянуто метод, який забезпечує вбудовування бітів ЦВЗ лише в тій матриці коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення (ДКП), зміна яких не призводить до значних відхилень координат точок зображення. Було проведено аналіз стійкості запропонованого методу до найпоширеніших зловмисних атак, спрямованих на знищення чи підміну ЦВЗ, результати якого показали достатній рівень стійкості на рівні з відомими методами.

Ключові слова: стеганографія, цифровий водяний знак, захист авторського права, дискретне косинус-перетворення, векторні зображення.

В работе рассмотрен метод защиты векторных изображений цифровыми водяными знаками (ЦВЗ) с обеспечением уменьшения влияния его внедрения на качество изображения. Также рассмотрен метод, обеспечивающий внедрение битов ЦВЗ только в те матрицы коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП), изменение которых не приводит к значительным отклонениям координат точек изображения. Был проведен анализ устойчивости предложенного метода к распространенным вредоносным атакам, направленным на уничтожение или подмену ЦВЗ, результаты которого показали достаточный уровень устойчивости наравне с известными методами.

Ключевые слова: стеганография, цифровой водяной знак, защита авторского права, дискретное косинус-преобразование, векторные изображения.

Method for vector graphics of digital watermarks, ensuring the mitigation of its embedding image quality, is stated. The stability of the proposed method to the most common malicious attacks, aimed at the destruction or substitution of digital watermark, is analyzed.

Keywords: steganography, digital watermark, copyright protection, discrete cosine transform, vector image.

На сьогодні використання цифрових зображень векторного формату набуває все більшого поширення, оскільки вони використовуються для проектування архітектурних об'єктів, інтер'єрів, розробки приладів, реклами, логотипів, шрифтів, географічних карт тощо, на створення яких витрачається багато часу та коштів. У зв'язку з цим, виникає проблема, пов'язана з можливістю нелегального копіювання та розповсюдження векторних зображень, які мають свого правовласника.

Захист авторських прав цифрових векторних зображень забезпечується стеганографічними системами цифрових водяних знаків (ЦВЗ), що дають змогу

маркувати об'єкти захисту для подальшого виявлення неправомірного використання зображення [1]. Найбільш перспективними серед них є “відкриті” стеганосистеми, які для зчитування ЦВЗ, окрім секретного ключа, не вимагають ні знання оригінального зображення, ні вбудованого ЦВЗ, що полегшує процедуру підтвердження авторських прав.

Найбільшого поширення серед існуючих методів, що не потребують для витягнення ЦВЗ оригіналу зображення чи додаткової інформації, отримали методи, які базуються на частотних перетвореннях [2]. До таких методів належать методи Базіна-Барса-Маделана, Хе-Жу-Ванга, Солачідіса-Ніколаїдіса-Пітаса, Войта1-Янга-Буша [3] та ін. Проте основною проблемою цих методів при вбудовуванні ЦВЗ є погіршення якості зображення, яка проявляється у зміні контурів об'єктів, чи їх положення внаслідок зміни координат точок. Причому для векторних зображень, що відображають реальні об'єкти в масштабі (архітектурні споруди, механічні та електронні прилади, географічні карти тощо), ця проблема є дуже актуальною, бо суттєва зміна координат точок може спотворити інформацію про об'єкти чи вплинути на їх створення. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на розробку методів, що для витягнення ЦВЗ не потребують оригіналу векторного зображення, в яких вирішувалась б указана проблема.

Метод вбудовування ЦВЗ у векторні зображення зі зменшеним рівнем спотворень внаслідок вбудовування

У роботі [4] запропоновано стеганографічний метод вбудовування ЦВЗ у векторні зображення зі зменшеннем рівня спотворень зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ, який для витягування ЦВЗ не потребує оригіналу зображення чи самого ЦВЗ. Особливістю методу є використання двовимірного ДКП для матриць розміром 8×8 та зміна в них високочастотних коефіцієнтів залежно від біту ЦВЗ та двох додаткових ВЧ-коефіцієнтів на середньоарифметичне значення цих коефіцієнтів збільшено або зменшено на величину P , яка забезпечує ідентифікацію бітів при витягуванні ЦВЗ.

Згідно з запропонованим методом зображення представляється у вигляді одновимірного масиву V , в якому елементами є точки векторного зображення V_p , де $p=1..N$, N – кількість точок в масиві. $V_p = (X_p, Y_p)$, де X_p, Y_p – значення координати точки V_p векторного зображення. Далі формуються матриці розміром 8×8 з кожних 64 координат точок масиву V , які позначено як $C_i(x,y)$, де $i=1..t$, t – кількість сформованих матриць, x, y – позиції координат в цій матриці. Для кожної матриці $C_i(x,y)$ проводиться пряме двовимірне ДКП, в результаті чого отримуються матриці коефіцієнтів $F(u, v)$, де u, v – позиції цих коефіцієнтів в матриці.

Було запропоновано умови для вбудовування ЦВЗ, що дозволяють незначно змінювати координати точок зображення. При цьому для вбудовування одного біту ЦВЗ змінюється значення одного високочастотного (ВЧ) коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ матриці ДКП залежно від значень двох ВЧ-коефіцієнтів $F_i(u_2, v_2)$ та $F_i(u_3, v_3)$. Вбудовування бітів ЦВЗ m_j , де $j = 1..q$, q – кількість біт ЦВЗ, здійснюється певним чином. Якщо біт $m_j=0$, то перевіряється умова:

$$F_i(u_1, v_1) < \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2}. \quad (1)$$

Якщо умова (1) виконується, значення коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$ залишається без змін, інакше значення коефіцієнта $F'_i(u_1, v_1)$ у матриці $F'_i(u, v)$ з вбудованим бітом ЦВЗ отримується таким чином:

$$F'_i(u_1, v_1) = \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2} - P. \quad (2)$$

Величина P використовується для забезпечення чіткої ідентифікації бітів ЦВЗ при витягуванні.

Якщо при вбудовуванні біт ЦВЗ $m_j=1$, то перевіряється виконання такої умови:

$$F_i(u_1, v_1) > \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2}. \quad (3)$$

Якщо умова (3) виконується, то коефіцієнт $F'_i(u_1, v_1)$ буде дорівнювати значенню коефіцієнта $F_i(u_1, v_1)$, інакше:

$$F'_i(u_1, v_1) = \frac{F_i(u_2, v_2) + F_i(u_3, v_3)}{2} + P. \quad (4)$$

Після зміни коефіцієнтів проводиться обернене дискретне косинус-перетворення над матрицями змінених коефіцієнтів $F'(u, v)$ і отримані змінені координати записуються у файл векторного зображення з вбудованим ЦВЗ.

Витягування ЦВЗ з векторного зображення проводиться без наявності оригіналу зображення чи самого ЦВЗ таким чином. Спочатку з масиву точок векторного зображення з вбудованим ЦВЗ V' формуються матриці $C'_{i'}(x, y)$ розміром 8×8 , де $i' = 1..t'$, t' – кількість сформованих матриць. Далі над матрицями $C'_{i'}(x, y)$ проводиться пряме двовимірне ДКП.

Після вибору позицій трьох ВЧ-коефіцієнтів $F'_{i'}(u'_1, v'_1)$, $F'_{i'}(u'_2, v'_2)$ та $F'_{i'}(u'_3, v'_3)$ перевіряється виконання умов та визначається відповідне значення біту ЦВЗ $m'_{j'}$:

$$\begin{cases} m'_{j'} = 0, \text{ якщо } F'_{i'}(u'_1, v'_1) < \frac{F'_{i'}(u'_2, v'_2) + F'_{i'}(u'_3, v'_3)}{2} \\ m'_{j'} = 1, \text{ якщо } F'_{i'}(u'_1, v'_1) > \frac{F'_{i'}(u'_2, v'_2) + F'_{i'}(u'_3, v'_3)}{2} \end{cases} \quad (5)$$

Далі витягнуті біти $m'_{j'}$, $j' = 1..q'$, перетворюються у формат представлення ЦВЗ.

Проведений аналіз запропонованого методу з точки зору впливу ЦВЗ на якість зображення на прикладі векторної географічної карти показав, що використання двовимірного ДКП та умов зміни коефіцієнтів ДКП (1)–(4) вбудування ЦВЗ забезпечує зменшення рівня спотворень векторних зображень внаслідок вбудування ЦВЗ порівняно з існуючими методами, однак можливі випадки значних відхилень окремих точок [5].

Для усунення таких випадків у роботі [6] запропоновано метод відбору придатних для вбудування ЦВЗ матриць коефіцієнтів ДКП, особливістю якого є те, що вбудування бітів ЦВЗ пропонується здійснювати лише у ті матриці коефіцієнтів ДКП, зміна яких не призводить до значних відхилень координат точок зображення. При цьому визначення придатних для вбудування матриць пропонується здійснювати на основі запропонованих умов їх відбору з використанням граничного значення P_h величини зміни коефіцієнтів внаслідок вбудування ЦВЗ. Тобто після проведення ДКП перевіряються такі умови:

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_2, v_2)| \leq P_h, \quad (6)$$

$$|F_i(u_1, v_1) - F_i(u_3, v_3)| \leq P_h. \quad (7)$$

Якщо хоч одна з умов (6)–(7) не буде виконуватись, вибрані коефіцієнти не будуть використовуватись для вбудування, а відповідна їм матриця $F_i(u, v)$ буде вважатися не придатною для вбудування.

Проведений аналіз показав, що запропонований метод з використанням методу відбору придатних матриць ДКП забезпечує зменшення максимального відхилення значень координат точок векторних зображень внаслідок вбудування ЦВЗ до 20 разів, а також їх рівномірне відхилення відносно точок оригіналу векторного зображення.

Аналіз запропонованого методу вбудування ЦВЗ у векторні зображення щодо рівня спотворень векторних зображень

У роботі [7] проведено аналіз запропонованого методу вбудування ЦВЗ у векторні зображення щодо рівня спотворення зображень внаслідок вбудування ЦВЗ та порівняння його з відомим методом Войта-Янга-Буша, який базується на одновимірному ДКП. Аналіз проведено для декількох типів векторних географічних карт (рис. 1), різних ЦВЗ за розміром і форматом, який показав, що запропонований метод забезпечує середнє відхилення координат точок менше до 30 разів, а середню похибку відхилень координат точок до 4 разів порівняно з відомим методом.

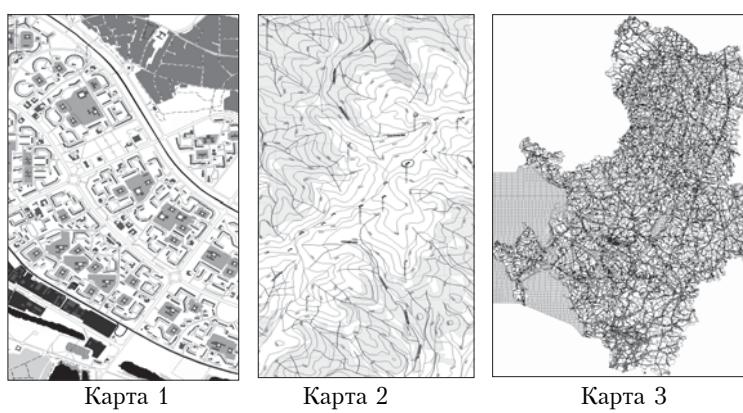


Рис. 1. Фрагменти трьох векторних географічних карт для вбудування ЦВЗ

Також проведено аналіз запропонованого методу для вбудовування ЦВЗ при використанні відбору придатних матриць коефіцієнтів ДКП та порівняння його, коли відбір придатних матриць не проводиться, а також у порівнянні з відомим методом Войта-Янга-Буша, результати якого наведені у таблиці 1. Аналіз показав, що використання умов відбору придатних матриць ДКП забезпечує зменшення максимального відхилення координат точок до 20 разів, ніж без використання, та до 70 разів порівняно з відомим методом Войта-Янга-Буша. При цьому сумарна похибка та середнє відхилення координат точок менші до 15 разів.

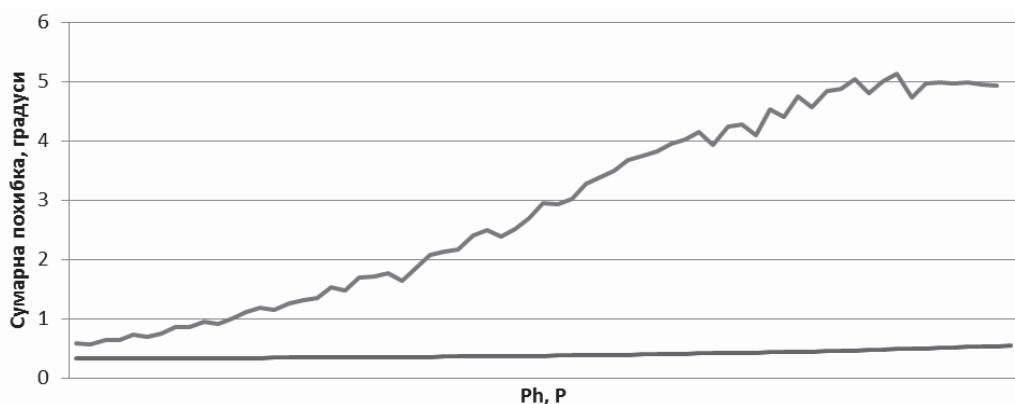
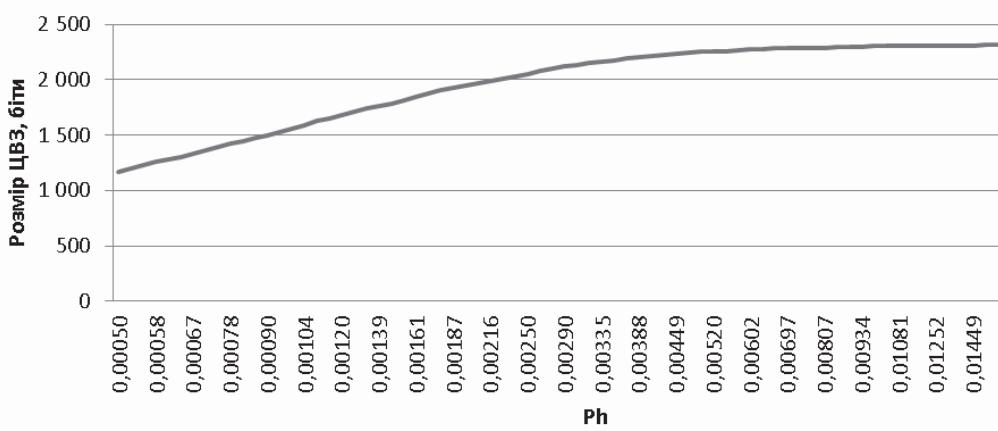
Таблиця 1.

Результати спотворення векторних карт після вбудовування ЦВЗ за трьома методами

Показники	Метод Войта-Янга-Буша $A_4 \dots A_6$		Запропонований метод вбудовування ЦВЗ $P = 0,00003$ $P_h = 0,00003$		Запр. метод з методом відбору придатних матриць $P = 0,00003$ $P_h = 0,00005$	
	Y	X	Y	X	Y	X
Карта: 1, К-сть точок карти: 272848, К-сть бітів ЦВЗ: 384, Розмір карти: 41,37 на 40,92 км						
Сумарна похибка, км	681,14	484,36	262,97	170,84	14,06	9,19
Середнє відхилення точок, м	221,72	157,67	10,70	6,95	0,572	0,374
Максимальне відхилення точок, м	26173	11889	6438	3318	247	155
Карта: 1, К-сть точок карти: 272848, К-сть бітів ЦВЗ: 8512, Розмір карти: 41,37 на 40,92 км						
Сумарна похибка, км	8049,76	8811,00	1508,23	1233,79	1140,75	902,36
Середнє відхилення точок, м	118,21	129,39	2,77	2,26	2,09	1,66
Максимальне відхилення точок, м	73136	37879	11609	6497	5212	4883
Карта: 2, К-сть точок карти: 14966, К-сть бітів ЦВЗ: 384, Розмір карти: 17,06 на 15,67 км						
Сумарна похибка, км	220,59	270,43	217,02	83,81	122,98	73,85
Середнє відхилення точок, м	106,98	93,44	8,83	3,41	5,004	3,005
Максимальне відхилення точок, м	11964	4104	6145	1645	2790	1545
Карта: 3, К-сть точок карти: 74157, К-сть бітів ЦВЗ: 384, Розмір карти: 6,49 на 10,32 км						
Сумарна похибка, км	220,59	270,43	65,76	41,03	4,3	2,71
Середнє відхилення точок, м	71,81	88,03	2,68	1,67	0,17	0,11
Максимальне відхилення точок, м	6378	4382	1902	1202	83	49
Карта: 3, К-сть точок карти: 74157, К-сть бітів ЦВЗ: 1952, Розмір карти: 6,49 на 10,32 км						
Сумарна похибка, км	901,47	1167,00	254,07	145,51	212,97	134,3
Середнє відхилення точок, м	57,73	74,73	2,03	1,16	1,705	1,075
Максимальне відхилення точок, м	11413	9401	3357	1767	1682	1104

Також було проведено аналіз візуального рівня сторення зображень на основі суміщених зображень оригіналу векторної карти та з вбудованим ЦВЗ згідно з запропонованим методом, з використанням відбору придатних матриць та методом Войта-Янга-Буша.

Проведено аналіз впливу величин P_h та P на спотворення зображення та розмір ЦВЗ, який показав, що при збільшенні величини P_h збільшується можливий для вбудовування розмір ЦВЗ, сумарна похибка та максимальне відхилення координат точок, а величина P незначно впливає на ці показники, оскільки згідно з запропонованим методом її значення у десятки чи сотні разів менші від P_h (рис. 2, 3).

Рис. 2. Графік залежності сумарної похибки координат точок від P та Ph Рис. 3. Залежність розміру ЦВЗ від Ph

Аналіз стійкості запропонованого методу вбудовування ЦВЗ до зловмисних активних та пасивних атак

Проведений аналіз стійкості запропонованого методу до активних зловмисних атак, спрямованих на ускладнення витягнення ЦВЗ правовласником, показав достатньо високий рівень стійкості методу, зокрема до повороту зображення (при повороті на 15 градусів похибка розпізнавання бітів склада 16 %), до масштабування зображення (при масштабуванні на 3 % і 100 % помилка розпізнавання склада 0 % та 55 % бітів відповідно), а також абсолютну стійкість до зміщення векторного зображення (рис. 4, 5).

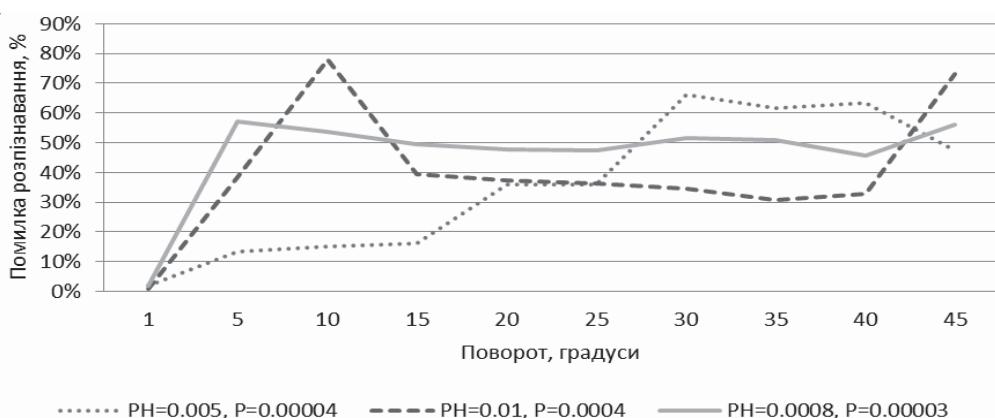


Рис. 4. Залежність помилок розпізнавання ЦВЗ від повороту зображення

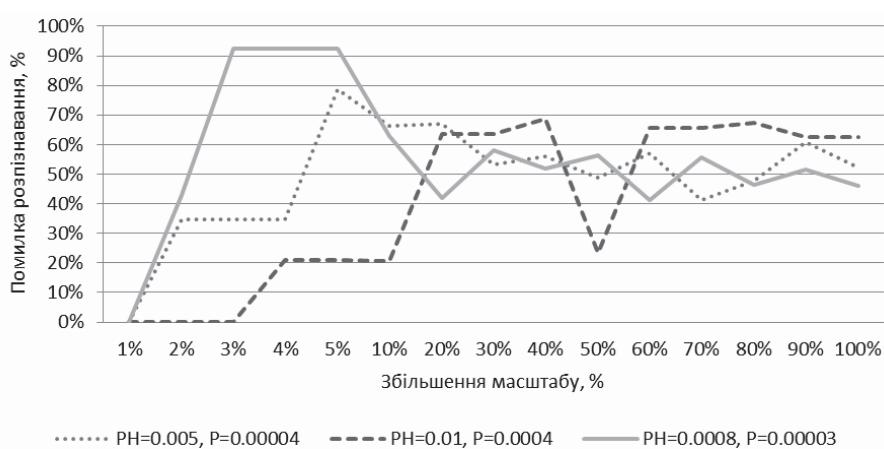


Рис. 5. Залежність помилок розпізнавання ЦВЗ від масштабування зображення

Аналіз стійкості запропонованого методу до атаки внесення додаткового шуму показав, що при внесенні шуму зі збільшенням сумарної похибки відхилень координат від початкової у 5,7 разів (повна деградація зображення) помилка розпізнавання складає усього 33,46 % неправильно розпізнаних бітів (рис. 6).

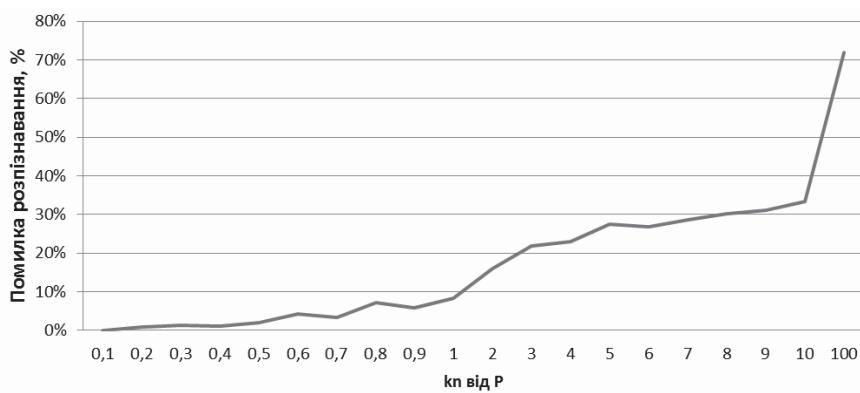


Рис. 6. Залежність помилок розпізнавання ЦВЗ від рівня шуму

Проведено оцінювання стійкості запропонованого методу до пасивних атак, спрямованих на визначення місця розташування ЦВЗ. Результати оцінювання показали забезпечення достатнього рівня стійкості, наприклад для типової векторної географічної карти, яка складається з 64 тис. точок розміром близько 1,5 Мб, кількість комбінацій розміщення бітів ЦВЗ становить приблизно 2^{1010} , що є достатньо складною задачею.

Висновки

У роботі розглянуто метод захисту векторних зображень цифровими водяними знаками із забезпеченням зменшення впливу його вбудовування на якість зображення. Особливістю методу є те, що використання в ньому двовимірного ДКП для матриць розміром 8×8 та вбудовування бітів ЦВЗ шляхом незначної зміни в них високочастотних коефіцієнтів дозволяють забезпечити зменшення рівня спотворення зображення внаслідок вбудовування ЦВЗ порівняно з відомими методами.

Також розглянуто метод, який забезпечує вбудовування бітів ЦВЗ лише у ті матриці коефіцієнтів ДКП, зміна яких не призводить до значних відхилень

координат точок зображення. Для визначення придатних для вбудовування матриць запропоновано умови відбору з використанням граничного значення величини зміни коефіцієнтів внаслідок вбудовування ЦВЗ. Також було розглянуто метод для збільшення кількості придатних матриць при однаковому граничному значенні. Метод дозволив збільшувати кількість придатних матриць зміною не більше двох коефіцієнтів, причому у більшості випадків лише одного.

Результати проведених досліджень рівня спотворення векторних зображень внаслідок вбудовування ЦВЗ показали, що запропонований метод забезпечує менші значення сумарної похибки відхилень координат точок, максимального відхилення координат точок, а також ряду показників відмінності та кореляційних показників у порівнянні з аналогами.

Проведено аналіз стійкості запропонованого методу до активних зловмисних атак, спрямованих на ускладнення витягнення ЦВЗ правовласником, зокрема до атак на основі афінних перетворень та атаки внесенням шуму. Результати дослідження показали, що запропонований метод забезпечує абсолютну стійкість до зміщення векторного зображення. Також метод забезпечує достатньо високий рівень стійкості до повороту та масштабування зображення. Аналіз стійкості запропонованого методу до атаки шляхом внесення додаткового шуму показав, що при внесенні шуму такого рівня, при якому сумарна похибка відхилень координат є більшою від початкової у 5,7 разів, що призводить до повної деградації зображення, помилка розпізнавання складає усього 33,46 % неправильно розпізнаних бітів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хорошко В.О. Основи комп’ютерної стеганографії : навч. посіб. / В.О. Хорошко, О.Д. Азаров, М.Є. Шелест, Ю.Є. Яремчук. – Вінниця : ВДТУ. – 2003. – 143 с.
2. Liangbin Zheng. Research on Vector Map Digital Watermarking Technology / Liangbin Zheng, Yulu Jia, Qun Wang // First International Workshop on Education Technology and Computer Science. – 2009. – Р. 303–307.
3. M. Voigt B. Reversible watermarking of 2D vector data / M. Voigt, B. Yang and C. Busch. / / ACM Multimedia and Security Workshop. – 2004. – Р. 160–165.
4. Карпінець В.В., Яремчук Ю.Є. Вирішення проблеми погіршення якості векторних зображень при вбудовуванні цифрових водяних знаків / В.В. Карпінець, Ю.Є. Яремчук // Правове, нормативне, та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2010. – № 1 (20). – С. 73–83.
5. Карпінець В.В. Аналіз впливу цифрових водяних знаків на якість векторних зображень / В.В. Карпінець, Ю.Є. Яремчук // Сучасний захист інформації. – 2011. – № 1. – С. 72–82.
6. Карпінець В.В. Зменшення відхилень координат точок внаслідок вбудовування цифрових водяних знаків у векторні зображення / В.В. Карпінець, Ю.Є. Яремчук // Правове, нормативне, та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – 2010. – № 2 (21). – С. 69–78.
7. Карпінець В.В. Аналіз рівня спотворень векторних зображень внаслідок вбудовування цифрових водяних знаків / В.В. Карпінець, Ю.Є. Яремчук // Сучасний захист інформації. – 2011. – № 2. – С. 94–99.

Отримано 28.02.2013