ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

УДК 004.94 DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.102

В. Поддубний, О. Сєвєрінов, Д. Непокритов

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ У СХЕМАХ НУЛЬОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА

Предметом дослідження є алгоритми перетворення цифрових зображень, що використовуються в нульових водяних знаках у процесі побудови алгоритмів автентифікації. **Мета роботи** – визначення ефективних алгоритмів перетворення цифрових зображень для застосування в нульових водяних знаках. У статті необхідно розв'язати такі **завдання:** дослідити спектр наявних алгоритмів перетворення цифрових зображень; висунути неформальні вимоги до алгоритмів перетворення цифрових зображень з метою їх використання в алгоритмах нульових водяних знаків у процесі побудови схем автентифікації; висунути припущення щодо можливості застосування кожного з розглянутих алгоритмів перетворення цифрових зображень. Для виконання окреслених завдань упроваджено такі **методи**: моделювання – здійснення програмної реалізації кожного з досліджуваних алгоритмів; емпіричні методи – використання алгоритмів і спостереження за результатами перетворень; математичні методи – обчислення показників нормальної кореляції та пікового значення сигнал / шум. **Досягнуті результати:** проаналізовано набір алгоритмів, що можуть бути потенційно придатні для використання в нульових водяних знаках у побудові алгоритмів автентифікації; сформовано методику перевірки алгоритмів, зважаючи на зменшення розмірності зображень унаслідок їх стискання; висунуто вимоги до алгоритмів оброблення цифрових зображень для їх використання в нульових водяних знаках під час побудови алгоритмів автентифікації. **Висновки.** У процесі дослідження потенційних алгоритмів перетворення цифрових зображень для використання нульових водяних знаків у побудові алгоритмів автентифікації виявлено найбільш вдалі алгоритми: *DWT, SVD, DCT, K-means*. Для зображень низької розмірності ймовірне застосування *DCT*. Найкращими поєднаннями запропонованих алгоритмів є комбінації: *DWT + DCT, DWT + K-means*. Поєднання цих алгоритмів може забезпечити оптимальну стійкість до шумів та чутливість, щоб розрізняти схожі зображення. Майбутні схеми автентифікації, основані на зазначених алгоритмах, корисні (якщо поєднати з IoT-пристроями), зокрема для автентифікації користувачів на підприємствах і в організаціях.

Ключові слова: зображення; нульовий водяний знак; алгоритм; автентифікація.

Вступ

Одним із методів забезпечення авторського права є використання цифрових водяних знаків (далі – ЦВЗ), що безпосередньо вбудовуються в зображення та слугують маркером для перевірки автора. Проте такі знаки мають декілька недоліків, зокрема: зміна оригінального зображення, можливість вилучення водяного знака, його пошкодження внаслідок зміни формату чи стискання зображення.

Альтернативою ЦВЗ є застосування нульових водяних знаків (інакше – методу сліпого цифрового водяного знака). Такі водяні знаки не вбудовуються безпосередньо в контейнер, а використовують його як "ключ" для створення підпису. Нульові водяні знаки зазвичай необхідні для перевірки авторства зображень та контролю його цілісності (перцептивний геш [1]). Вони також можуть бути застосовані в схемах автентифікації, що робить їх гнучким інструментом. Крім того однією з можливостей їх використання є створення схем автентифікації [2], зокрема для контейнерів у вигляді текстового документа [3].

Перспективним є застосування моделі автентифікації в індустріальних системах з використанням пристроїв IoT. З розвитком *Industry* 4.0 збільшується інтеграція технологій безпеки та автентифікації. Упровадження ЦВЗ в *Industry* 4.0 можливе в багатьох категоріях, а саме: автентифікація пристроїв на основі певних характеристик, підтвердження цілісності даних без їх зміни, автентифікація персоналу, доступ до обладнання тощо. Особливо необхідно наголосити на автентифікації персоналу. Контрольно-пропускні системи, що розгортаються на підприємствах, зазвичай містять засоби біометрії чи магнітні / електронні ключі, які видають персоналу. ЦВЗ за умови інтеграції з IoT-пристроями можуть бути заміною таких систем. На відміну від біометрії чи карток, ЦВЗ має такі переваги: дешевизна, можливість вибору користувачем ключа, непомітність (ЦВЗ не є маркером того, що певна інформація є ключовою).

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Проте однією з проблем застосування нульових водяних знаків є знаходження оптимальної комбінації алгоритмів для балансування характеристик нульового водяного знака. Зважаючи на новизну нульових водяних знаків та безліч комбінацій різноманітних схем і алгоритмів, розроблення нових нульових водяних знаків та їх застосування в схемах автентифікації є перспективним напрямом досліджень.

Аналіз проблеми й наявних методів

Нині існує безліч схем водяного знака, основаних на різних перетвореннях, зокрема: *DWT* [4], *SVD* [5], *LBP* [6], залишкові нейронні мережі [7], вихрові перетворення [8], *DCT* [9] тощо. Однією з проблем використання алгоритмів у нульових водяних знаках є знаходження балансу між стійкістю водяного знака та його крихкістю.

Стійкість – властивість, що описує, наскільки водяний знак є стійким (тобто не змінює характеристики) під час модифікації контейнера. Зазвичай вимірюється в максимально допустимому значенні шуму, коли є змога вилучати водяний знак.

Крихкість – це зворотна властивість, що описує, наскільки водяний знак є крихким (чутливим до змін контейнера).

Знаходження балансу необхідне для задоволення такий вимог (у цьому та в наступних випадках розглядається використання ЦВЗ для автентифікації):

– ЦВЗ має бути стійким для того, щоб відсіювати помилки та шуми, які виникають під час оброблення зображення (наприклад, його візуального зчитування);

– ЦВЗ має знаходити розбіжності між схожими зображеннями.

Одним із прикладів алгоритмів нульового водяного знака для автентифікації є запропонований у роботі алгоритм [10], оснований на *DCT* та *DWT*. Цей алгоритм, безперечно, стабільний до атак, спрямованих на пошкодження контейнера, та забезпечує значну стійкість, проте не усувається проблема використання ЦВЗ за наявності схожих зображень (як, наприклад, у медицині [11]). У застосуванні такого алгоритму ЦВЗ на схожих зображеннях він буде повертати безліч помилок.

Іншими словами, має розв’язуватися проблема мінімізації співвідношення помилок першого та другого роду.

У роботі [2] наведено схему автентифікації з використанням алгоритму нульового знака. У такій схемі ініціалізація відбувається в такий спосіб:

1) користувач обирає ключем довільне зображення (або генерує його засобами системи, в якій інтегрована схема);

2) користувач вигадує пароль доступу;

3) користувач реєструється в системі за допомогою обраного зображення та ключа;

4) під час реєстрації генерується нульовий водяний знак, де вхідні дані – це ключ (або його розгорнутий варіант) та обране зображення;

5) сформований нульовий водяний знак зберігається в системі як еталонна копія.

Процес надання доступу відбувається таким чином:

1) користувач вводить в систему власний пароль та засобами системи зчитує зображення, яке він обрав як ключ;

2) генерується нульовий водяний знак, де вхідні дані – це ключ (або його розгорнутий варіант) та обране зображення;

3) модуль автентифікації порівнює згенерований нульовий водяний знак з еталонним нульовим водяним знаком, повертаючи певне значення подібності x;

4) система порівнює коефіцієнт подібності водяного знака з еталонним нульовим знаком (x) зі встановленим значенням допустимої похибки (y); якщо $x \le y$, то користувачеві блокується доступ до системи, а якщо $x \ge y$, то користувачеві надається доступ до системи.

За умови застосування IoT-пристроїв ця схема може контролювати доступ до приміщень або певної інформації. Засобом зчитування зображення можуть бути відеокамери, для перетворення ЦВЗ можна використовувати мікроконтролери. Після обчислення ЦВЗ передається результат на сервер доступу організації, що перевіряє:

1) коректність введеної інформації;

2) чи має користувач з такими даними доступ до певного ресурсу.

Спрощена схема застосування алгоритму нульового водяного знака в запропонованій схемі [2] зображена на рис. 1.

Як бачимо, основним елементом роботи такої схеми автентифікації є нульовий водяний знак.

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

Також можуть існувати додаткові елементи, такі як центр сертифікації, алгоритми гешування, алгоритми розширення ключа, зчитування зображення, генерації зображення тощо.

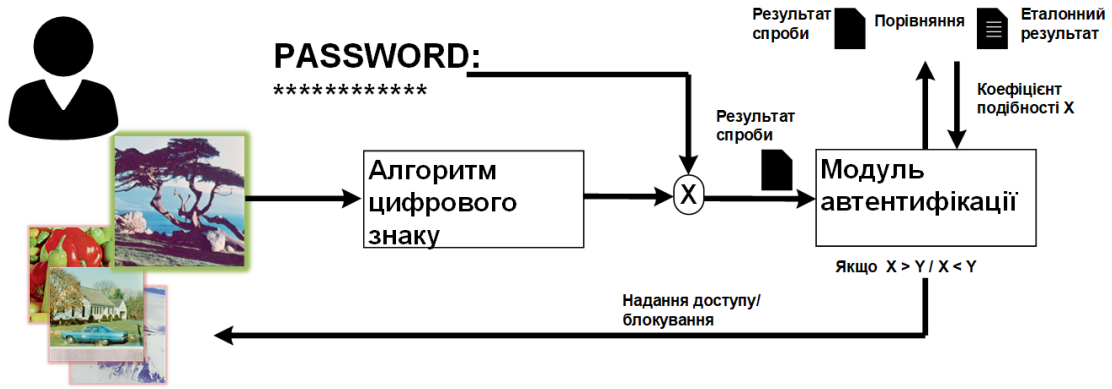

Рис. 1. Спрощена схема автентифікації користувача зображення за допомогою нульового водяного знака

У роботі [2] сформована одна з проблем досліджень таких схем: "знаходження балансу між стійкістю та чутливістю алгоритму водяного знака; алгоритм має бути досить стійким, щоб ігнорувати шуми та пошкодження зображення, та достатньо чутливим, щоб реагувати на зміну ключових параметрів".

Загалом схема алгоритму нульового водяного знака передбачає кілька кроків.

1) Оригінальне зображення перетворюється за допомогою першого алгоритму оброблення цифрових зображень (далі – перетворення № 1). Мета перетворення:

– відкинути помилки та шуми в оригінальному зображенні;

– зменшити обсяг інформації способом стискання зображення для пришвидшення перетворень.

Зазвичай на цьому етапі використовуються перетворення, основані на вейвлет-перетвореннях.

2) Перетворене зображення підлягає трансформації за допомогою другого алгоритму оброблення цифрових зображень (далі – перетворення № 2). Метою алгоритму є вилучення ключових параметрів зображення для подальшого створення водяного знака.

3) Формування водяного знака способом вилучення основної інформації щодо ключа користувача.

Загальна схема алгоритму формування нульового водяного знака продемонстрована на рис. 2 [12].

Тому висуваються цілі щодо знаходження оптимальних параметрів перетворень № 1 та № 2 за умови їх поєднання:

– мають бути досить стійкими (зокрема шумів та пошкоджень зображення) для вилучення водяного знака;

– мають бути досить чутливими для того, щоб розрізнити зображення *A*, яке схоже на зображення *Б*.

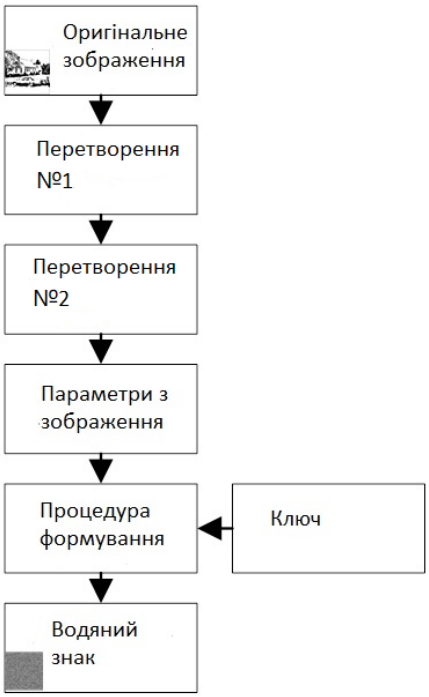

Рис. 2. Спрощена схема алгоритму нульового водяного знака

Додатковими вимогами є:

– швидкодія алгоритмів, оскільки під час кожної автентифікації користувача генерується водяний знак, тобто складність ініціалізації такої схеми дорівнює складності перевірки користувача;

– оборотність алгоритмів, оскільки для подальших схем, основаних на відкритих параметрах, необоротність алгоритмів буде додатковою перевагою, що підвищує надійність схеми.

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Порядок тестування алгоритмів і метрики

Основною властивістю, за якою порівнюватимуться алгоритми, є їх стійкість до шумів (спотворень зображення). Для вимірювання зазначеної властивості використовуються дві метрики визначення шуму:

– *NCC* ;

– *PSTR* .

Термін "пікове відношення сигнал / шум $(PSNR)$" – це вираження співвідношення між максимально можливим значенням (потужністю) сигналу та потужністю спотворювального шуму, що впливає на якість його подання. Оскільки чимало сигналів мають дуже широкий динамічний діапазон (співвідношення між найбільшим і найменшим імовірними значеннями змінної величини), *PSNR* зазвичай виражається в термінах логарифмічної шкали децибелів [13].

Покращення зображення або візуальної якості цифрового зображення може бути суб'єктивним. З цієї причини необхідно встановити кількісні / емпіричні вимірювання для порівняння впливу алгоритмів покращення на якість зображення.

Використовуючи той самий набір тестових зображень, можна систематично порівнювати різні алгоритми покращення зображення, щоб визначити, чи дає певний алгоритм вищі результати. Показником, що досліджується, є пікове відношення сигнал / шум. Якщо можемо показати, що алгоритм або набір алгоритмів покращує деформоване зображення, щоб воно було більш схоже на оригінал, тоді зможемо зробити висновок, що це стійкіший алгоритм.

Математичне подання *PSNR* має вигляд

$$PSNR = 20\log_{10}\left(\frac{MAX_f}{\sqrt{MSE}}\right), \qquad (1)$$

де MAX_f – максимальне значення сигналу, яке існує у вихідному зображенні;

MSE – середня квадратична помилка:

$$MSE = \frac{1}{mn}\sum_0^{m-1}\sum_0^{n-1}\left\| f(i,j) - g(i,j)\right\|^2, \qquad (2)$$

де f – подає дані матриці нашого оригінального зображення;

g – подає дані матриці нашого погіршеного зображення, про яке йдеться;

m – подає кількість рядків пікселів зображень, а i – індекс цього рядка;

n – подає кількість стовпців пікселів зображення, а j – індекс цього стовпця.

Середня квадратична помилка (MSE) для практичних цілей дає змогу порівняти "справжні" значення пікселів вихідного зображення з погіршеним зображенням. *MSE* подає середнє значення квадратів "помилок" між нашим фактичним зображенням і нашим шумовим зображенням. Похибка – це величина, на яку значення вихідного зображення різняться від погіршеного зображення.

Сутність метрики: що вищий *PSNR*, то краще було реконструйовано погіршене зображення, щоб відповідати оригінальному зображенню, і кращим є алгоритм реконструкції. Це сталося тому, що відбувається мінімізація *MSE* між зображеннями щодо максимального значення сигналу зображення.

Значення *NCC* має такий вигляд:

$$NCC = \frac{\sum_{i1}^{n}\left(A_i - \bar{A}\right)\left(B_i - \bar{B}\right)}{\sqrt{\sum_{i1}^{n}\left(A_i - \bar{A}\right)^2 \sum_{i1}^{n}\left(B_i - \bar{B}\right)^2}}. \qquad (3)$$

Значення *NCC* визначає нормальну кореляцію між зображенням A та B.

Значення $\bar{A}$ та $\bar{B}$ становлять середні значення пікселів зображення A та B.

Тестування обраних алгоритмів відбувається в такому порядку:

1) обираються зображення для тестування $[O_1, O_2 \ldots - O_n]$;

2) обрані зображення спотворюються, додаючи шуми та графічні артефакти, унаслідок чого отримуємо $[D_1, D_2 \ldots - D_n]$;

3) вимірюються параметри *PSTR*, *NCC* між оригінальними $[O_1, O_2 \ldots - O_n]$ та деформованими зображеннями $[D_1, D_2 \ldots - D_n]$, що становлять $[K_1, K_2 \ldots - K_n]$;

4) оригінальні зображення $[O_1, O_2 \ldots - O_n]$ підпадають під перетворення, формуючи набір даних (фото або коефіцієнтів) $[\grave{O}_1, \grave{O}_2 \ldots - \grave{O}_n]$;

5) деформовані зображення $[D_1, D_2 \ldots - D_n]$ підпадають під перетворення, формуючи набір даних (фото або коефіцієнтів) $[\grave{D}_1, \grave{D}_2 \ldots - \grave{D}_n]$;

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)
Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

6) вимірюються параметри *PSTR*, *NCC* між $[`O_1, `O_2 \dots - `O_n]$ та $[`D_1, `D_2 \dots - `D_n]$, що становлять $[S_1, S_2 \dots - S_n]$;

7) значення $[K_1, K_2 \dots - K_n]$ та $[S_1, S_2 \dots - S_n]$ порівнюються між собою, внаслідок чого отримуємо коефіцієнт стійкості алгоритму до шуму.

Після тестування для кожного алгоритму буде сформовано розбіжність оцінки та *PSTR*, *NCC*, що вказуватиме на стійкість алгоритму до різних видів шумів. Що більша позитивна різниця, то стійкіший алгоритм до шумів, тобто він "відкинув" частину шумів, наблизивши спотворене фото до оригінального. Що вища негативна різниця, то більш чутливий алгоритм; це значить, що шуми суттєво вплинули на зображення, віддаливши подібність від оригінального зображення.

Для тестування обрано чотири зображення [14, 15] (див. рис. 3).

Рис. 3. Зображення, відібрані для тестування (за часовою стрілкою: *Female, Lake, Galaxy, Jet*)

Зображення обрано з метою тестування алгоритмів на різних розмірностях. Параметри зображень наведено в табл. 1. У таблиці вказані розширення зображення та R_c, G_c, B_c – середня яскравість пікселів кожного спектра (R_c – для червоного спектра, G_c – зеленого спектра, B_c – синього спектра).

Таблиця 1. *Параметри зображень, обраних для тестування*

Фото / Параметр	***Female***	***Lake***	***Jet***	***Galaxy***
Розширення	256×256	512×512	512×512	4080×4080
R_c	129,2	131	177,6	71,2
G_c	99,3	124,3	177,9	65,7
B_c	125,2	114,9	190,2	64,6

Зображення для тестування деформувалися засобами графічного редактора.

Були застосовані засоби з такими параметрами:

– шум;
– вм’ятини;
– накладання текстового напису;
– гауссове розмиття;
– кристалізація.

Приклад деформації зображення наведено на рис. 4.

Між оригінальним і деформованим зображеннями виміряно параметри *NCC* та *PSTR* (результати подано в табл. 2). Вимірювання проводились для кожного спектра (значення R, G, B в таблиці). Значення *PSTR* та *NCC* вказують на стійкість перетворень до пошкоджень, якщо значення позитивні, то обране перетворення здатне нівелювати значну частку шуму (оскільки що вище значення *PSTR* та *NCC*, то більша подібність до оригінального неспотвореного зображення, якщо значення *PSTR* в безкінечність та *NCC* в 1 – зображення ідентичні).

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Рис. 4. Спотворення зображення (за часовою стрілкою: "шум", "вм'ятини", "накладання текстового напису", "гауссове розмиття", "кристалізація")

Таблиця 2. *Параметри між оригінальним і деформованим зображенням*

Фото / Спотворення	***Female***	***Jet***	***Lake***	***Galaxy***
1	**2**	**3**	**4**	**5**
Шум		*PSTR*		
	R 11,902 *G* 11,887 *B* 11,884	*R* 11,855 *G* 11,845 *B* 11,873	*R* 11,86 *G* 11,929 *B* 11,94	*R* 10,349 *G* 10,328 *B* 10,317
		NCC		
	R 0,967 *G* 0,955 *B* 0,921	*R* 0,937 *G* 0,952 *B* 0,89	*R* 0,932 *G* 0,978 *B* 0,978	*R* 0,909 *G* 0,879 *B* В 0,87
Вм'ятини		*PSTR*		
	R 11,575 *G* 11,267 *B* 12,012	*R* 9,593 *G* 9,022 *B* 10,947	*R* 10,681 *G* 8,07 *B* 8,466	*R* 11,516 *G* 11,833 *B* 11,212
		NCC		
	R 0,959 *G* 0,936 *B* 0,915	*R* 0,797 *G* 0,804 *B* 0,791	*R* 0,868 *G* 0,866 *B* 0,887	*R* 0,941 *G* 0,93 *B* 0,898
Додавання тексту		*PSTR*		
	R 8,875 *G* 9,205 *B* 9,873	*R* 9,316 *G* 8,717 *B* 8,503	*R* 9,21 *G* 8,882 *B* 9,664	*R* 9,222 *G* 11,562 *B* 10,375
		NCC		
	R 0,868 *G* 0,851 *B* 0,834	*R* 0,83 *G* 0,82 *B* 0,664	*R* 0,783 *G* 0,913 *B* 0,939	*R* 0,837 *G* 0,933 *B* 0,874
Гауссове розмиття		*PSTR*		
	R 11,822 *G* 11,37 *B* 12,429	*R* 11,603 *G* 10,857 *B* 12,852	*R* 12,564 *G* 9,832 *B* 10,223	*R* 16,863 *G* 17,007 *B* 16,769
		NCC		
	R 0,965 *G* 0,942 *B* 0,932	*R* 0,926 *G* 0,923 *B* 0,917	*R* 0,946 *G* 0,945 *B* 0,953	*R* 0,995 *G* 0,994 *B* 0,992

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
Кристалізація	*PSTR*			
	R 12,013 *G* 11,722 *B* 12,455	*R* 11,799 *G* 11,172 *B* 12,834	*R* 12,48 *G* 10,124 *B* 10,426	*R* 17,214 *G* 17,36 *B* 17,116
	NCC			
	R 0,967 *G* 0,948 *B* 0,932	*R* 0,927 *G* 0,928 *B* 0,913	*R* 0,942 *G* 0,948 *B* 0,954	*R* 0,996 *G* 0,994 *B* 0,993

Алгоритми перетворення цифрових зображень, обраних для тестування

Основні умови, що бралися до уваги у виборі алгоритмів:

– алгоритми мають бути детерміновані, оскільки в процесі застосування в алгоритмі нульового водяного знака користувач має автентифікуватися без впливу випадковостей. Тобто за наявності однакових атрибутів доступу ЦВЗ має виводити однаковий результат;

– алгоритми не мають базуватися на нейронних мережах, оскільки такі алгоритми зазвичай стохастичні (або мають стохастичну частину, що потребує ініціації); крім того, такі алгоритми потенційно вразливі до атак, спрямованих на нейронні мережі (що потребує іншої схеми використання цих алгоритмів);

– реалізація наявних алгоритмів публічна;

– результатом роботи алгоритмів є набір коефіцієнтів або зображення (матриця / матриці значень пікселів), оскільки для роботи нульового водяного знака необхідне формування "знімка" (набору характеристик, сформованих за ключем) зображення.

Унаслідок аналізу наявних алгоритмів обрано такі алгоритми:

– *DWT* (*Discrete wavelet transform*);
– *SVD* (*Singular-value decomposition*);
– *DCT* (T*he Discrete Cosine Transform*);
– *SIFT*;
– *PCA*;
– *CDF97* (*Cohen-Daubechies-Feauveau wavelet*);
– *K-means*;
– *Sobel*;
– *Waterhed*;
– *LBP*;
– *Gabor*;
– *HOG*.

Необхідно зауважити, що це не вичерпний перелік алгоритмів роботи з цифровими зображеннями, оскільки їх кількість є доволі велика.

Стислий опис кожного з обраних алгоритмів подано в табл. 3.

Таблиця 3. *Параметри між оригінальним і деформованим зображенням*

Алгоритм	Стислий опис	Тип виведення	Робота в спектрі RGB	Оборотність
1	2	3	4	5
DWT	перетворення сигналу (зображення) у частотну ділянку, збереження деталей на різних масштабах	зображення	кожен канал окремо	оборотний / необоротний
SVD	матричне розкладання, що дає змогу виділяти важливі особливості та стискати зображення	набір коефіцієнтів	кожен канал окремо	оборотний
DCT	розкладання зображення на частотні компоненти, широко використовується в JPEG-компресії	набір коефіцієнтів	кожен канал окремо	оборотний
SIFT	алгоритм виявлення та опису ключових точок, інваріантний до масштабу та обертання	набір коефіцієнтів, зображення з контрольними точками	градації сірого	необоротний
PCA	метод зменшення розмірності даних, що виділяє основні компоненти зображення	зображення	так	необоротний

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
CDF97	біортогональне вейвлет-перетворення, що використовується в компресії JPEG2000	зображення	кожен канал окремо	оборотний
K-means	алгоритм кластеризації, що групує пікселі на основі схожості кольорів або текстур	зображення	так	необоротний
Sobel	оператор градієнта для виділення країв у зображенні	зображення	градації сірого	необоротний
Waterhed	алгоритм сегментації зображень, оснований на імітації заповнення водою заглиблень у градієнтному зображенні	набір коефіцієнтів, зображення з відтвореними зонами	градації сірого	необоротний
LBP	метод текстурного аналізу, що кодує локальні структури пікселів у бінарний вектор	зображення	градації сірого	необоротний
Gabor	фільтр для аналізу частотних і орієнтаційних компонентів зображення, використовується для текстурного аналізу	зображення	градації сірого	необоротний
HOG	метод опису форми об'єктів за допомогою гістограми градієнтів, широко використовується для розпізнавання об'єктів	набір коефіцієнтів	градації сірого	необоротний

Тестування

Після вибору алгоритмів проведено тестування за методикою, поданою вище (результати наведені в табл. 4). Значення в таблиці показують різницю між оригінальним (недеформованим зображенням) та деформованим (зображенням, що підлягало додаванню шуму) для кожного алгоритму порівняно з еталонним показником шуму (табл. 1). Тобто, якщо значення більше ніж 0, тоді алгоритм відкинув певну кількість шумів (показники подібності зображення + шум + алгоритм, кращий, ніж типове зображення, + шум), якщо значення менше ніж 0, тоді алгоритм накопичив певну кількість шумів (показники подібності зображення + шум + алгоритм гірший, ніж типове зображення, + шум), за умови значення в 0 алгоритм не змінив загальну кількість шумів. У таблиці наведено середні показники для всіх зображень і типів виведення алгоритмів (якщо їх декілька).

Таблиця 4. Результати тестування алгоритмів

	DWT	***SVD***	***DCT***	***SIFT***	***PCA***	***CDF97***	***K-means***	***LBP***	***HOG***	***Gabor***	***Sobel***	***Watershed***
Шум	*PSTR*											
	+2,9	+1,4	+0,1	–3,1	+1,4	+1,5	–1,6	–8,5	–1,7	–3,5	–4,4	–4
	NCC											
	+0,03	+0,04	+0,04	–0,14	+0,01	+0,04	–0,07	–0,76	–0,43	–0,05	–0,14	–0,25
Вм'ятини	*PSTR*											
	+1	+3,17	+0,01	–3,7	+0,1	+0,3	–1,5	–8,24	–1,26	–5,26	–2,3	–2,2
	NCC											
	+0,02	+0,06	+0,06	–0,25	+0,01	+0,02	–0,07	–0,8	–0,35	–0,22	–0,35	–0,14
Додавання тексту	*PSTR*											
	+0,13	+1,34	+0,01	+0,14	+0,8	–0,3	–0,3	–0,46	+2	–1,53	+1,52	–1
	NCC											
	+0,01	+0,13	+0,11	–0,01	+0,1	+0,1	–0,07	+0,07	+0,06	+0	–0,08	+0
Гауссове розмиття	*PSTR*											
	+0,5	+3,2	–0,12	–2,14	+0,1	+0,2	–1,6	–7,71	–2,18	–5,28	–5,41	–1,89
	NCC											
	+0,01	+0,05	+0,05	+0,05	+0,01	+0,02	–0,08	–0,66	–0,29	–0,25	–0,38	–0,25
Кристалізація	*PSTR*											
	+1	+2,9	+0,05	–3,1	+0,4	+0,4	–1,5	–8,73	–2	–5,2	–2,7	–2,2
	NCC											
	+0,02	+0,04	+0,02	–0,15	+0,01	+0,01	–0,06	–0,7	–0,4	–0,17	–0,36	–0,15

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)
Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

За поданою таблицею побудовано графіки (див. рис. 5 та 6) (алгоритм *LBP* був пропущений у зв'язку з критично низькими значеннями для нормалізації зображення).

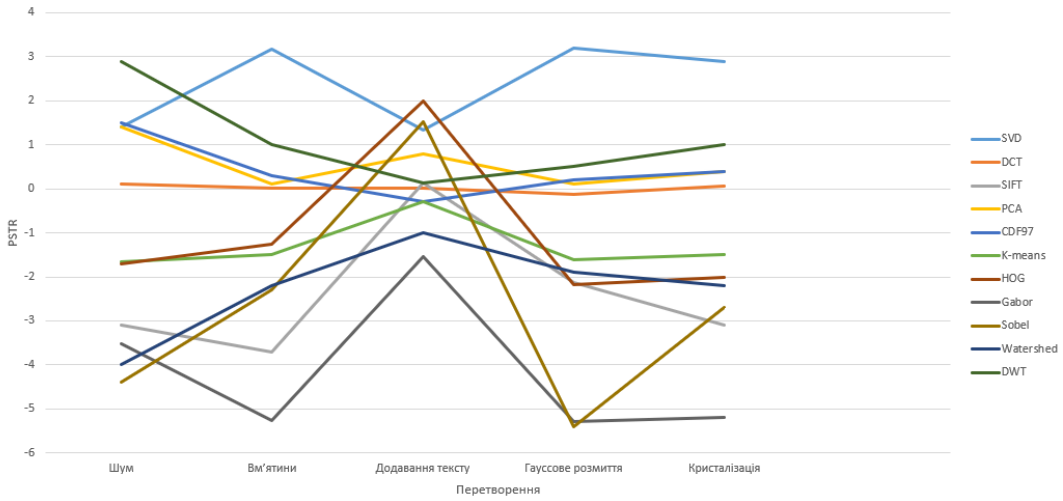

Рис. 5. Результати тестування, значення *PSTR*

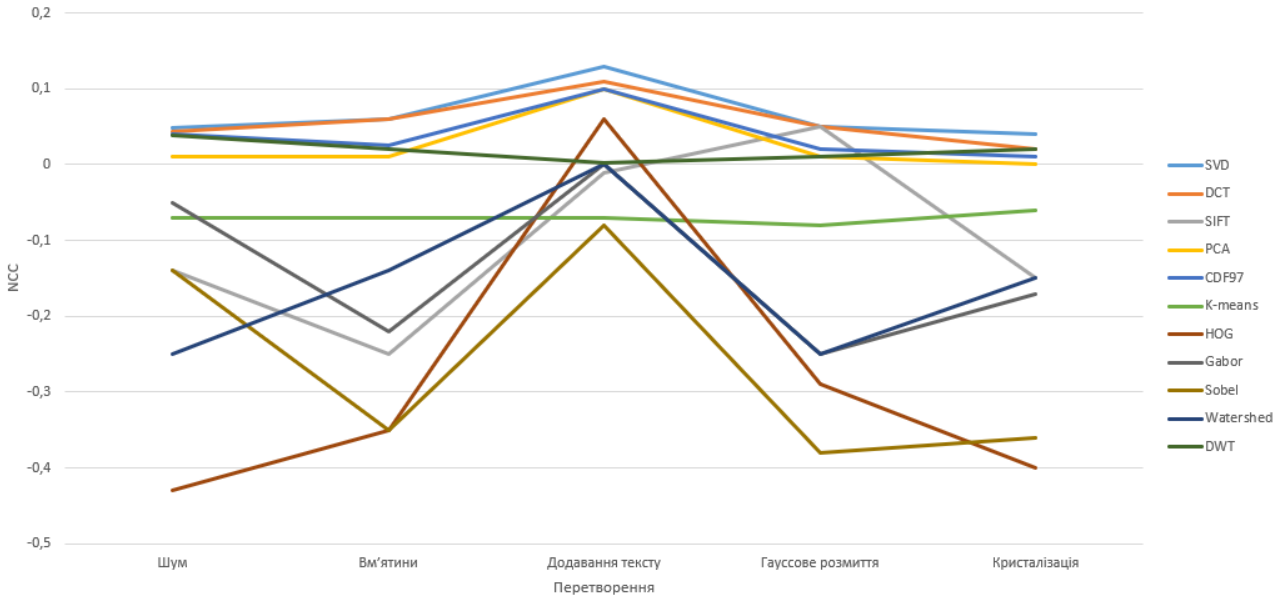

Рис. 6. Результати тестування, значення *NCC*

Показники швидкодії алгоритмів не наведені в роботі, оскільки під час тестування була відсутня стандартизація кодування та використовувалися різні бібліотеки, зокрема *Accort.NET* [16], *Emgu.CV* [17], *MathNet.Numerics* [18]. Проте під час тестування вимірювалася швидкодія способом визначення часу виконання кожної функції.

Аналізуючи досягнуті результати, можна зробити висновок щодо можливості використання наведених перетворень для побудови алгоритму нульового знака.

1) *DWT*

– перетворення показало високі результати подібності до шумів і позитивні результати для інших пошкоджень;

– базове перетворення *DWT* довело ефективність та є гарним перетворенням для першого рівня алгоритму. На практиці найбільш часто застосовується в алгоритмах нульового знака.

2) *SVD*

– високі параметри подібності для всіх перетворень;

ISSN 2522-9818 (print)
Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31) ISSN 2524-2296 (online)

– алгоритм формує набір коефіцієнтів, що не робить його ефективним рішенням для перетворення першого рівня, коефіцієнти мають високу подібність (зокрема внаслідок частого формування нульових коефіцієнтів). Перетворення доволі часто використовується як алгоритм другого рівня для формування нульового водяного знака, проте внаслідок високої стійкості алгоритму це створює типові недоліки водяного знака: неможливість розрізнити подібні зображення та зображення одного автора. Зважаючи на надвисоку стійкість перетворення, застосування його в майбутньому алгоритмі нульового водяного знака для підтвердження автентифікації сумнівне, проте може бути використане як додатковий алгоритм під час перетворень за наявності високого параметра шуму.

3) *DCT*

– високі результати для *NCC*, стабільні, приблизно нульові результати для *PSTR*;

– перетворення має схожу природу з *SVD*, проте є більш перспективним завдяки вищій чутливості.

4) *SIFT*

– унаслідок використання виявлення ключових точок зображення нестабільні результати, що залежать від типу змін зображення. Результати погіршуються за умови додавання коефіцієнтів (у роботі вимірювалася лише однакова кількість коефіцієнтів);

– перетворення слабко підходить для використання в нульових водяних знаках, оскільки дуже чутливий до шумів. Проте в системах із нульовим (або низьким) пошкодженням інформації може бути ефективним алгоритмом другого рівня.

5) *PCA*

– стабільний алгоритм, що демонстрував характеристики на рівні *CDF97*;

– перетворення надто складне та потребує оптимізації ресурсів. Можливе використання для зображення низьких розмірностей, оскільки на зображенні розміром 512x512 час обчислення досягає декількох секунд.

6) *CDF97*

– результати аналогічні *DWT*, оскільки природа перетворень подібна. Для додавання тексту продемонстрував кращі результати, за умови інших пошкоджень – гірші;

– можливість використання *CDF97* аналогічне *DWT*.

7) *K-means*

– доволі чутливий до пошкоджень алгоритм, що демонстрував стабільні показники;

– чутливість *K-means* робить його можливим для використання як алгоритму другого рівня.

8) *LBP*

– продемонстрував критично низькі показники, що робить алгоритм надчутливим;

– у зв'язку з високою чутливістю є недоцільним для використання як алгоритму першого та другого рівня.

9) *HOG*

– продемонстрував посередні показники *PSTR* та низькі *NCC*;

– алгоритм працює із зображеннями в монохромному спектрі, що в поєднанні з не надто високими показниками робить його використання недоцільним.

10) *Gabor*

– чутливий, але нестабільний алгоритм; можливе використання як алгоритму другого рівня, проте застосування в монохромному спектрі створює додаткову специфіку роботи.

11) *Sobel*

– чутливий, але нестабільний алгоритм; застосування в монохромному спектрі створює додаткову специфіку роботи.

12) *Watershed*

– доволі чутливий до пошкоджень алгоритм, що продемонстрував стабільні показники;

– чутливість *Watershed* уможливлює його використання як алгоритму другого рівня, проте досить проблематична інтерпретація результатів його роботи.

Висновки

Вивчення нульових водяних знаків досить перспективна галузь у зв'язку з їх новизною та гнучкістю, а широкий спектр можливостей цього методу створює потенціал для подальших досліджень. У роботі сформовано вимоги до алгоритмів оброблення цифрових зображень з метою їх використання в нульових водяних знаках для схем автентифікації. Серед досліджених алгоритмів перспективними є *DWT, SVD, DCT, K-means*. Для зображень низької розмірності доцільне використання *DCT* у зв'язку з обчислювальною складністю цього алгоритму. Найкращими поєднаннями запропонованих алгоритмів є такі комбінації: *DWT+ DCT, DWT+ K-means. SVD* та *DCT* формують вектор як результат, тому їх упровадження

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)

можливе лише в поєднанні з іншим алгоритмом векторного оброблення сигналу, що не розглядалося в межах цієї статті.

Досягнуті результати можуть бути застосовані для побудови алгоритму нульового знака. Цей алгоритм може використовуватися в схемах автентифікації (зокрема на підприємствах і в організаціях). Перспективні напрями подальших досліджень: побудова алгоритму нульового водяного знака з використанням описаних алгоритмів, побудова схеми багатофакторної автентифікації із застосуванням розробленого алгоритму нульового водяного знака, розроблення схеми автентифікації з публічними (відкритими) даними з використанням цього алгоритму, дослідження оборотності та стійкості алгоритму.

Список літератури

1. Tang Z., Dai Y., Zhang X. Perceptual Hashing for Color Images Using Invariant Moments. *Applied Mathematics & Information Sciences*. 2012. Vol. 6, No. 2S. P. 643S–650S. URL: https://surl.li/tvhbjz
2. Поддубний В. О., Сєвєрінов О. В., Гвоздьов Р. Ю. Використання нульових водяних знаків для підтвердження авторства зображень та багатофакторної автентифікації. *Радіотехніка*. 2024. Вип. 218. С. 35–43. DOI: https://doi.org/10.30837/rt.2024.3.218.02
3. Jalil Z., Mirza A. M., Sabir M. Content based Zero-Watermarking Algorithm for Authentication of Text Documents. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2010. Vol. 7, No. 2. DOI:10.48550/arXiv.1003.1796
4. Rani A., Bhullar A. K., Dangwal D., Kumar S. A Zero-Watermarking Scheme using Discrete Wavelet Transform. *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 70. P. 603–609. ISSN 1877-0509. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.046
5. Zhou Y., Jin W. A novel image zero-watermarking scheme based on DWT-SVD. *Proceedings of the 2011 International Conference on Multimedia Technology*. Hangzhou, China, 2011. P. 2873–2876. DOI: 10.1109/ICMT.2011.6002066
6. Liu X., Lou J., Wang Y., Du J., Zou B., Chen Y. Discriminative and robust zero-watermarking scheme based on completed local binary pattern for authentication and copyright identification of medical images, *Proceedings of the SPIE*, 2018, Volume 10579. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2292852
7. Xiang R., Liu G., Li K., Liu J., Zhang Z., Dang M. Zero-watermark scheme for medical image protection based on style feature and ResNet. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2023. Vol. 86, Part A. Article 105127. ISSN 1746-8094. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105127
8. Li F., Wang Z. A Zero-Watermarking Algorithm Based on Vortex-like Texture Feature Descriptors. *Electronics*. 2024. Vol. 13. Article 3906. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics13193906
9. Yuan Z., Yang B., Zhao W., Liu Y. A Robust Zero Watermarking Algorithm based on NSCT DCT. *Advances in Engineering Research*. 2017. Vol. 61. DOI:10.1155/2021/4944797
10. Rajkumar M., Babu G. Zero Watermarking and Data Authentication. *Big Data Innovation for Sustainable Cognitive Computing*. May 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54696-9_6
11. Roček A., Javorník M., Slavíček K. et al. Zero Watermarking: Critical Analysis of Its Role in Current Medical Imaging. *Journal of Digital Imaging*. 2021. Vol. 34. P. 204–211. DOI:10.1007/s10278-020-00396-0
12. Poddubnyi V., Gvozdov R., Sievierinov O., Sukhoteplyi V., Bulba S., Lysytsia D. A Zero-Watermarking Algorithm for Use in RGB and Monochrome Images. 2024 *IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878081
13. Nadipally M. Optimization of Methods for Image-Texture Segmentation Using Ant Colony Optimization. *Intelligent Data-Centric Systems: Intelligent Data Analysis for Biomedical Applications*. Academic Press, 2019. Ch. 2. P. 21–47. DOI:10.1016/B978-0-12-815553-0.00002-1
14. The USC-SIPI Image Database. URL: https://sipi.usc.edu/database/
15. Nasa Image and Video Library. URL: https://images.nasa.gov/
16. Accord Framework. URL: http://accord-framework.net
17. Emgu CV. Main Page. URL: https://www.emgu.com/
18. Math.NET Numerics. URL: https://numerics.mathdotnet.com/

References

1. Tang, Z., Dai, Y. & Zhang, X. (2012), "Perceptual hashing for color images using invariant moments", *Applied Mathematics & Information Sciences*, 6(2S), P. 643S-650S. available at: https://surl.li/tvhbjz

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2025. № 1 (31)
ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online)

2. Poddubnyi, V.O., Sievierinov, O.V., Gvozdov, R.Y. (2024), "Using zero-based watermarks to verify image authorship and multi-factor authentication" ["Vykorystannia nulovykh vodyanykh znakiv dlia pidtverdzhennia avtorstva zobrazhen ta bahatofaktornoi autentifikatsii"], *Radiotekhnika*, (218), P. 35-43. DOI: https://doi.org/10.30837/rt.2024.3.218.02
3. Jalil, Z., Mirza, A. M., Sabir, M. (2010), "Content based Zero-Watermarking Algorithm for Authentication of Text Documents, International Journal of Computer Science and Information Security", *International Journal of Computer Science and Information Security*, Vol. 7, No. 2. DOI:10.48550/arXiv.1003.1796
4. Rani, A., Bhullar, A.K., Dangwal, D. Kumar, S. (2015), "A zero-watermarking scheme using discrete wavelet transform", *Procedia Computer Science*, 70, P. 603-609. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.046
5. Zhou, Y. Jin, W. (2011), "A novel image zero-watermarking scheme based on DWT-SVD", *2011 International Conference on Multimedia Technology*, Hangzhou, China, P. 2873-2876. DOI: https://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6002066
6. Liu, X., Lou, J., Wang, Y., Du, J., Zou, B. Chen, Y. (2018), "Discriminative and robust zero-watermarking scheme based on completed local binary pattern for authentication and copyright identification of medical images". *Proceedings of the SPIE*, Volume 10579, DOI: https://doi.org/10.1117/12.2292852
7. Xiang, R., Liu, G., Li, K., Liu, J., Zhang, Z. Dang, M. (2023), "Zero-watermark scheme for medical image protection based on style feature and ResNet", *Biomedical Signal Processing and Control*, 86(A), 105127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105127
8. Li, F. Wang, Z. (2024), "A zero-watermarking algorithm based on vortex-like texture feature descriptors", Electronics, 13, 3906. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics13193906
9. Yuan, Z., Yang, B., Zhao, W. Liu, Y. (2017), "A robust zero watermarking algorithm based on NSCT DCT", International Conference on Mechanical, Electronic, *Advances in Engineering Research*, 61. DOI:10.1155/2021/4944797
10. Rajku, M., Babu, G. (2024), Zero Watermarking and Data Authentication", *Big Data Innovation for Sustainable Cognitive Computing*, May, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54696-9_6
11. Roček, A., Javorník, M., Slavíček, K. (2021), "Zero watermarking: Critical analysis of its role in current medical imaging", *Journal of Digital Imaging*, 34, P. 204–211. DOI:10.1007/s10278-020-00396-0
12. Poddubnyi, V., Gvozdov, R., Sievierinov, O., Sukhoteplyi, V., Bulba, S. Lysytsia, D. (2024), "A zero-watermarking algorithm for use in RGB and monochrome images", *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, P. 1-5. DOI: https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878081
13. Nadipally, M. (2019), "Optimization of methods for image-texture segmentation using ant colony optimization", *Intelligent Data-Centric Systems: Intelligent Data Analysis for Biomedical Applications*, Academic Press, P. 21-47. DOI:10.1016/B978-0-12-815553-0.00002-1
14. "The USC-SIPI Image Database". available at: https://sipi.usc.edu/database/
15. "NASA Image and Video Library". available at: https://images.nasa.gov/
16. "Accord Framework". available at: http://accord-framework.net
17. "Emgu CV. Main Page". available at: https://www.emgu.com/
18. "Math.NET Numerics". available at: https://numerics.mathdotnet.com/

Надійшла (Received) 01.03.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Поддубний Вадим Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри безпеки інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: vadym.poddubnyi@nure.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4380-491X

Сєвєрінов Олександр Васильович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.sievierinov@nure.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6327-6405

Непокритов Дмитро Миколайович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, доцент кафедри радіоелектронних систем пунктів управління факультету автоматизованих систем управління та наземного забезпечення польотів авіації, Харків, Україна; e-mail: ndn_ndn@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/ 0000-0003-1752-8496

ISSN 2522-9818 (print)
ISSN 2524-2296 (online) *Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2025. No. 1 (31)*

Poddubnyi Vadym – Kharkiv National University of Radio Electronic, PhD Student at the Department of Information Technology Security, Kharkiv, Ukraine.

Sievierinov Oleksandr – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronic, Associate Professor at the Department of Information Technology Security, Kharkiv, Ukraine.

Nepokrytov Dmytro – PhD (Engineering Sciences), Air Forces of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Department of Radioelectronic Systems of Control Points of Air Forces, Associate Professor at the Department of Radioelectronic Systems of Control Points, Kharkiv, Ukraine.

RESEARCH THE EFFICIENCY OF IMAGE PROCESSING ALGORITHMS IN ZERO WATERMARK SCHEMES

Subject matter: image transformation algorithms used in zero-watermarking techniques for development authentication algorithm. **Objectives:** identify effective image transformation algorithms for use in zero-watermarking schemes. The study addresses the following **tasks**: examining the range of existing image transformation algorithms, formulating informal requirements for image transformation algorithms to be used in zero-watermarking-based authentication schemes, and making assumptions about the feasibility of using each analyzed image transformation algorithm. To achieve these objectives, the following **methods** are employed: modeling – software implementation of each studied algorithm, empirical methods – application of algorithms and observation of transformation results, mathematical methods – calculation of normal correlation metrics and peak signal-to-noise ratio (PSNR). **Results:** an analysis was conducted on a set of algorithms that could potentially be used in zero-watermarking schemes for authentication purposes. A methodology was developed to evaluate algorithms while considering image dimensionality reduction due to compression. Additionally, requirements for image processing algorithms in zero-watermarking-based authentication were established. **Conclusions:** the study identified the most effective image transformation algorithms for use in zero-watermarking authentication schemes: DWT (Discrete Wavelet Transform), SVD (Singular Value Decomposition), DCT (Discrete Cosine Transform), and K-means clustering. For low-resolution images, DCT is a viable option. The most effective algorithm combinations are DWT + DCT and DWT + K-means, as these combinations ensure optimal robustness to noise while maintaining sensitivity to distinguish similar images. Future authentication schemes based on these algorithms may be useful (in combination with IoT devices), including for user authentication in enterprises and organizations.

Keywords: image; zero watermark; algorithm; authentication.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Поддубний В. О., Сєвєрінов О. В., Непокритов Д. М. Дослідження ефективності алгоритмів оброблення зображень у схемах нульового водяного знака. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 102–114. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.102

Poddubnyi, V., Sievierinov, O., Nepokrytov, D. (2025), "Research the efficiency of image processing algorithms in zero watermark schemes", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (31), P. 102–114. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.102