

К. т. н. А. В. САДЧЕНКО, О. А. КУШНІРЕНКО

Україна, Національний університет «Одеська політехніка»

E-mail: koa@op.edu.ua

НЕСПОТВОРЮЮЧИЙ АЛГОРИТМ ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКУ У МЕДИЧНІ ЗОБРАЖЕННЯ

Запропоновано адаптивний до впливу шумів та спотворень найменших значущих бітів алгоритм вбудовування цифрового водяного знаку в зображення, яке зберігатиметься на паперовому носії, без спотворень його вихідних параметрів. Водяним знаком може бути як графічна, так і текстова інформація, наприклад опис медичного зображення. Вбудовування цифрового водяного знаку здійснюється шляхом масштабування простору, що займає медичне зображення, та модифікації значень додаткових пікселів, утворених в процесі масштабування.

Ключові слова: зображення, цифровий водяний знак, паперовий носій, адаптивний алгоритм, масштабування простору, шум, спотворення інформації.

При зберіганні або передаванні через третіх осіб роздрукованих медичних зображень, таких як томограми, рентгенограми тощо, виникає необхідність забезпечення захисту додаткової інформації, такої як персональні дані пацієнта та скорочений анамнез, від несанкціонованого доступу. Можливий процес проходження медичного зображення — від його отримання, додавання цифрового водяного знаку (ЦВЗ, англійською **DWM** — digital watermark), друкування і до подальшого витягнення ЦВЗ — показано на **рис. 1**. До отриманого в процесі діагностики медичного зображення (будемо називати його контейнером) додається необхідна супутня інформація у вигляді ЦВЗ, яка при друкуванні залишається невидимою та не спотворює вихідне зображення. На такій роздрукованій конфіденційній інформації візуально немає, але за потреби її можна звідти отримати. Для цього необхідно отримати цифрову копію папе-

рового носія (шляхом його сканування або фотографування з необхідною роздільною здатністю), після чого розділити отримане зображення на контейнер та ЦВЗ з використанням відповідного програмного забезпечення.

Зазначимо основні властивості [1, 2], яким має відповідати ЦВЗ, що вбудовується у медичне зображення:

- непримітність: ЦВЗ має бути невидимим для ока людини;
- можливість виявлення: повідомлення з водяним знаком має бути доступним для отримання інформації відповідним фахівцем;
- надійність: ЦВЗ має бути стійким до шуму задля забезпечення можливості відновлення закладеної в ньому інформації навіть після дії на паперовий носій зовнішніх негативних факторів, що впливають на цілісність зображення;

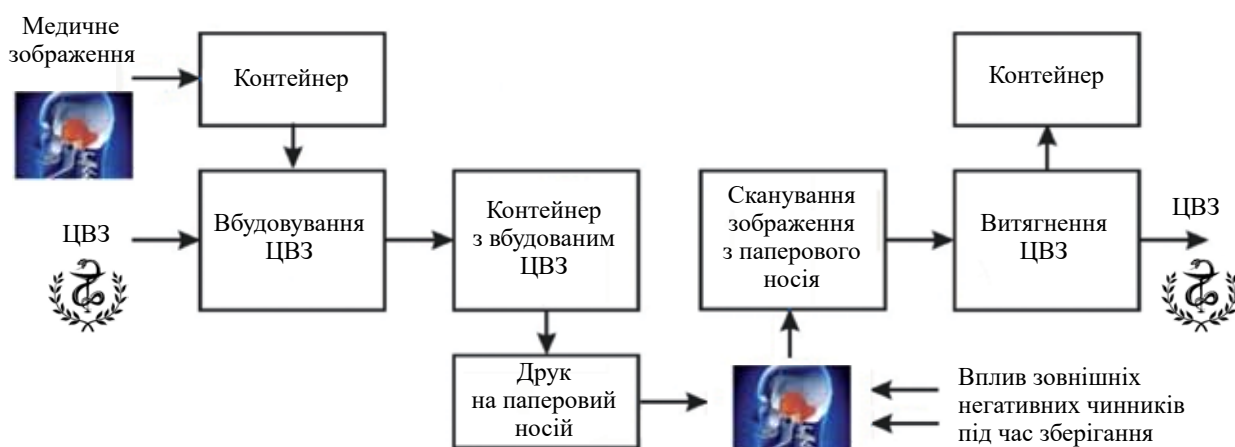


Рис. 1. Процес проходження медичного зображення від його отримання в процесі діагностики до витягнення у подальшому інформації, закладеної у ЦВЗ

- мінімізація спотворення вихідного зображення в процесі вбудовування ЦВЗ або ж навіть зведення його до нуля у випадках, коли будь-які зміни медичного зображення можуть призвести до постанови хибного діагнозу.

Очевидно, що такі вимоги передбачають пошук компромісного рішення між видимістю ЦВЗ та його яскравістю.

Існують різні методи розпізнавання зображення з оптичних сканерів, наприклад:

- метод фонтанної подібності, закладений в алгоритмі FineReader;
- кореляційний метод, в основі якого лежить порівняння отриманого зображення з існуючими шаблонами;
- методи, засновані на дискретному перетворенні Фур'є та дискретному вейвлет-перетворенні.

Всі ці методи вимагають наявності набору певних шаблонів з текстовими символами чи графічними об'єктами. Так, наприклад, для алгоритмів, заснованих на методі фонтанної подібності FineReader та кореляційних методах, дисперсія шуму не має перевищувати значення 0,001 для розпізнавання текстових символів з імовірністю не менше 0,9 [3, 4].

Існують методи вбудовування цифрових водяних знаків [5–8] у просторову та частотну область зображення. Для алгоритмів, які працюють з просторовою областю, найпростішим і найчастіше використовуваним є метод модифікації найменших значущих бітів — LSB (*least significant bit*) [9].

До алгоритмів, що використовують частотну область, належать методи модифікації високочастотних чи низькоамплітудних коефіцієнтів дискретного вейвлет-перетворення [10–12]. При цьому вбудовування цифрових водяних знаків у графічні об'єкти як у просторовій, так і в частотній областях призводить, як правило, до певних спотворень зображення. Але не завжди це може бути припустимим — наприклад, у медичних зображеннях спотворення можуть призвести до поставлення помилкового діагнозу. Крім того, алгоритми, що працюють з частотною областю, мають підвищену складність технічної реалізації [13, 14]. Також слід зазначити, що перелічені вище підходи до вбудовування ЦВЗ були запропоновані для оброблення зображень, що формуються та зберігаються виключно в електронному вигляді. А от у роздрукованих документах, які можуть піддаватися різного роду дії зовнішніх факторів під час зберігання, а потім скануватися, можливі спотворення контейнера та ЦВЗ. Результатами впливу зовнішніх факторів на роздруківку можуть бути такі:

- вицвітання або зменшення динамічного діапазону яскравості пікселів;
- певні спотворення в процесі друку через неідеальність як структури паперового носія, так і еле-

ментів друкувального пристрою внаслідок завад в мережі живлення;

- можливе забруднення роздруківки внаслідок недбалого зберігання.

Метою цієї роботи було розроблення стійкого до спотворень та шумів алгоритму вбудовування ЦВЗ у просторову область медичного зображення, призначеного для зберігання на паперовому носії у вигляді роздруківки.

Аналіз LSB-методу вбудовування ЦВЗ

Оскільки найбільш близьким до ідеології цієї роботи є вбудовування ЦВЗ за допомогою методу LSB, проведемо аналіз його стійкості до впливу зовнішніх факторів. Основа методу LSB полягає в модифікації молодших бітів, що продемонстровано на **рис. 2**. Слід зазначити, що яскравість окремих пікселів ЦВЗ може займати від одного до кількох бітів байту.

Розглянемо залежність видимості вбудованого у контейнер ЦВЗ від його яскравості при застосуванні LSB-методу. ЦВЗ буде представлено у вигляді монохромного зображення на тлі монохромного та кольорового контейнера. Вихідні зображення наведено на **рис 3**.

Еволюцію зображення контейнера з ЦВЗ при збільшенні відносної яскравості ЦВЗ від 0,5 до 20% від максимальної яскравості контейнера I_{\max} представлено на **рис. 4**. Тут видно, що максимальна яскравість ЦВЗ, яка гарантує його непомітність на тлі монохромного зображення контейнера, знаходиться на рівні 1–2%, а для кольорового зображення контейнера яскравість ЦВЗ може бути збільшена приблизно до 6%. Таку різницю у граничних рівнях яскравості ЦВЗ можна пояснити додатковим ефектом маскування каналів, наприклад, синього і зеленого кольорів при вбудовуванні у канал червоного кольору. На **рис. 4** можна побачити, що монохромне ЦВЗ на тлі монохромного зображення контейнера стає все більш помітним після досягнення відносної яскравості 6%, а на тлі кольорового зображення контейнера — після 10%.

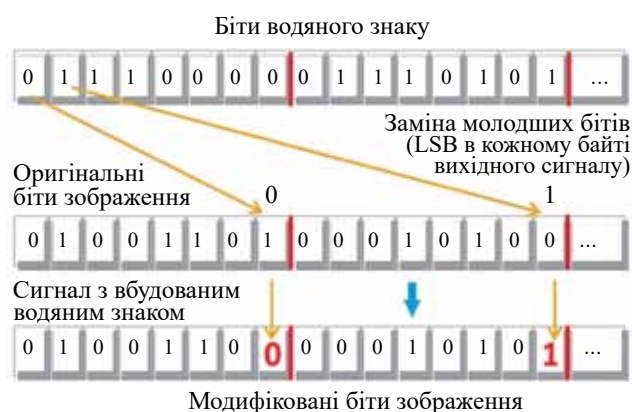


Рис. 2. Процес вбудовування ЦВЗ за допомогою методу LSB

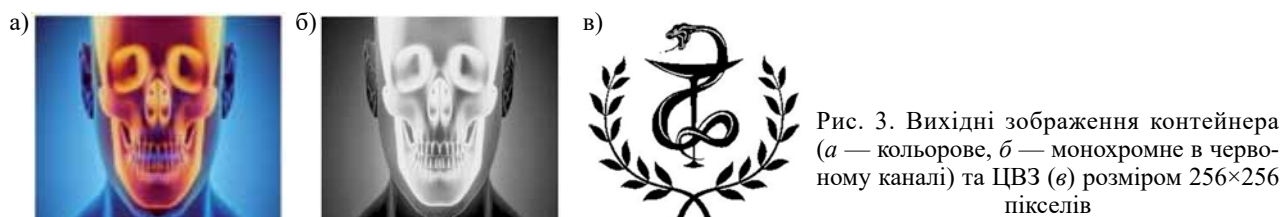


Рис. 3. Вихідні зображення контейнера (а — кольорове, б — монохромне в червоному каналі) та ЦВЗ (в) розміром 256×256 пікселів

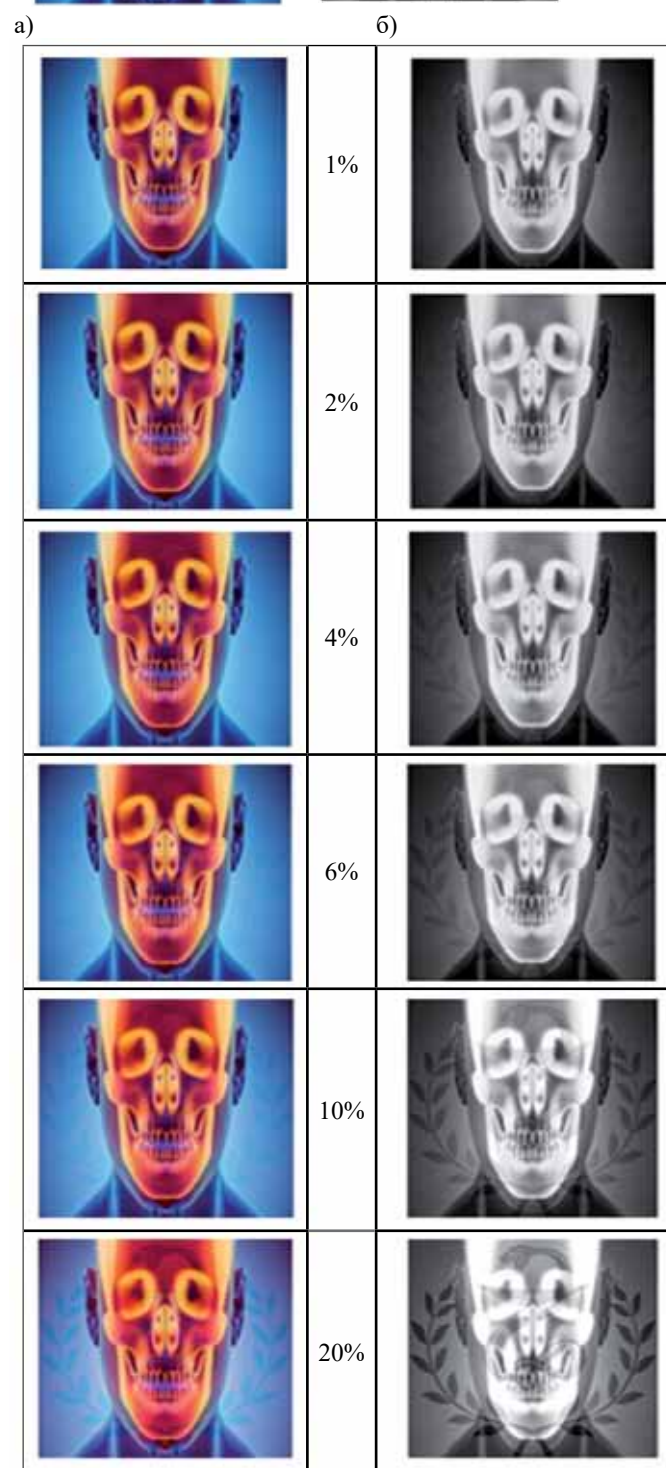


Рис. 4. Отримані за допомогою методу LSB кольорове (а) та монохромне (червоний канал; б) зображення контейнера (томограма) з вбудованим ЦВЗ різної яскравості (у відсотках від максимальної яскравості зображення контейнера)

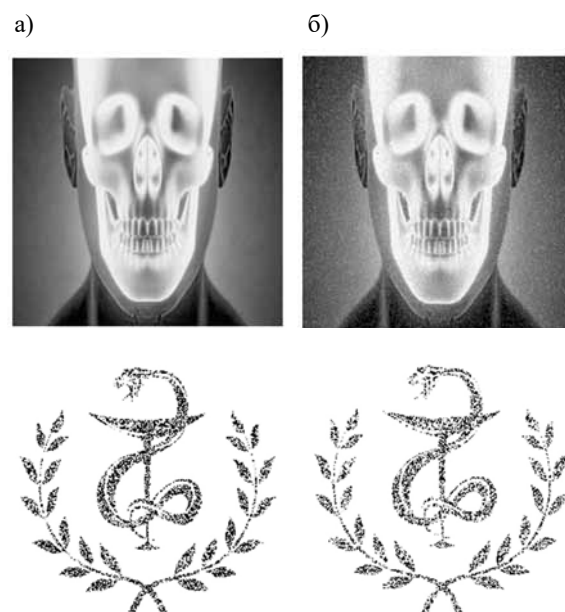


Рис. 5. Зображення контейнера з ЦВЗ яскравістю 1% від I_{\max} , вбудованим за методом LSB, та зображення витягнутого ЦВЗ при наявності білого шуму з дисперсією 0,0001 (а) та 0,005 (б)

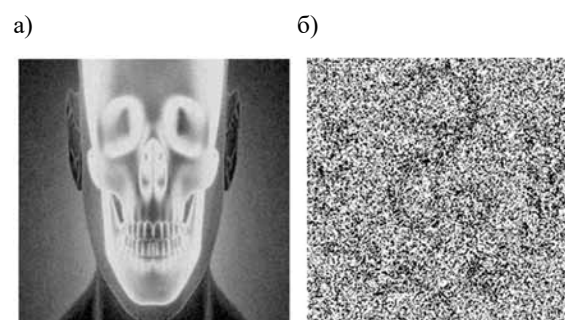


Рис. 6. Зображення контейнера з ЦВЗ яскравістю 1% від I_{\max} , вбудованим за методом LSB, при наявності білого шуму з дисперсією $\sigma^2 = 0,001$ (а) та зображення витягнутого ЦВЗ з коефіцієнтом кореляції 0,12 (б)

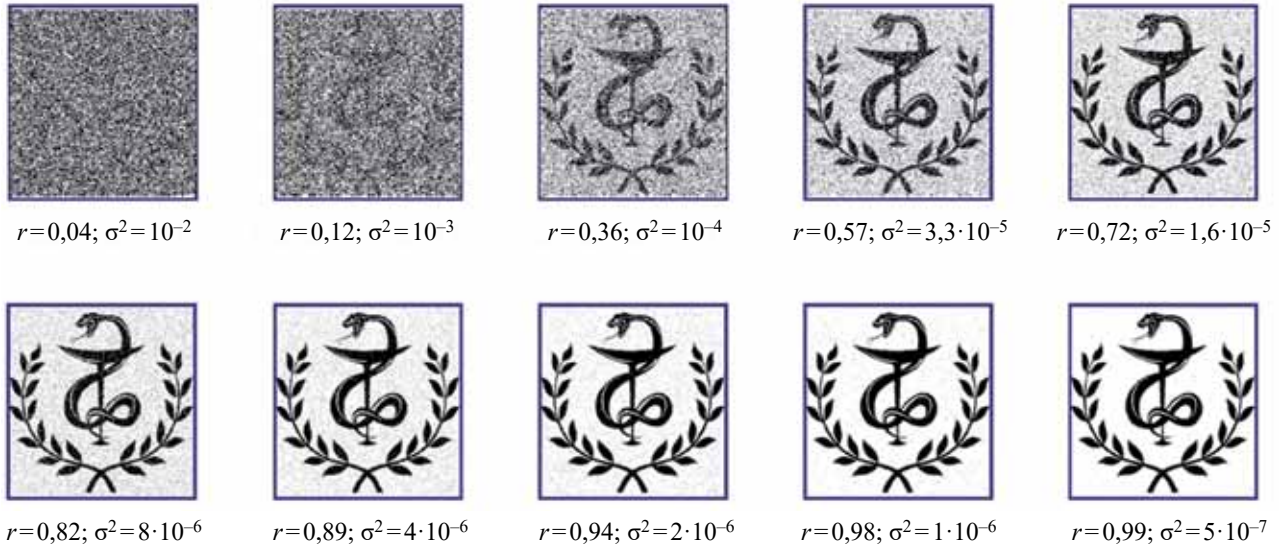


Рис. 7. Вигляд витягнутого ЦВЗ для методу LSB при збільшенні дисперсії білого шуму

Проведемо моделювання впливу шуму на якість витягнутого ЦВЗ. На **рис. 5, 6** показані зображення з вбудованим ЦВЗ, що має яскравість 1% від I_{\max} , в умовах наявності білого шуму з різним рівнем дисперсії σ^2 , а також витягнені ЦВЗ.

Для оцінки стійкості ЦВЗ до впливу шуму використаємо критерій максимуму коефіцієнта кореляції r яскравості пікселів зображення до та після впливу білого шуму [15–18]:

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2 \right) \left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2 \right)}}; \quad (1)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{MN} \sum_m \sum_n (A_{mn});$$

$$\bar{B} = \frac{1}{MN} \sum_m \sum_n (B_{mn})$$

де A_{mn}, B_{mn} — елементи масивів A і B розміром $m \times n$, що описують зображення (контейнера або ЦВЗ) до та після впливу білого шуму відповідно;

\bar{A}, \bar{B} — усереднені по двомірним масивам A і B значення яскравості пікселів;

M, N — розміри зображень A і B по горизонталі та вертикалі у пікселях відповідно.

З **рис. 5, а** можна побачити, що шум впливає на зображення контейнера менше, ніж на зображення ЦВЗ: у випадку наявності білого шуму з дисперсією 0,0001 візуально зображення контейнера залишається без змін, на відміну від спотвореного зображення

ЦВЗ. При збільшенні дисперсії до 0,005 (**рис. 5, б**) шум стає помітним також і на зображенні контейнера, а ЦВЗ спотворюється ще більше.

На **рис. 6** наведено граничний випадок, коли на зображення впливає шум з дисперсією $\sigma^2 = 0,001$, на тлі якого витягнений ЦВЗ стає практично нерозбірливим, а зображення контейнера завдяки істотно більшій яскравості має цілком прийнятний вигляд.

На **рис. 7** наведено низку зображень витягнутого ЦВЗ з відносною яскравістю 1% від яскравості контейнера I_{\max} при збільшенні дисперсії білого шуму, які демонструють залежність коефіцієнта кореляції r між витягненим та вихідним ЦВЗ від дисперсії σ^2 . З аналізу цих даних можна зробити висновок, що для отримання коефіцієнта кореляції 0,9 максимальна дисперсія шуму не повинна перевищувати $4 \cdot 10^{-4}$.

Завдостійкий алгоритм вбудовування ЦВЗ у просторову область

У разі використання розглянутого алгоритму на основі LSB-методу після вилучення ЦВЗ відбувається деяке спотворення вихідного зображення контейнера навіть за повної відсутності шуму, причому спотворення тим помітніше, чим вище яскравість вбудованого ЦВЗ. Спотворення можуть проявитися, наприклад, у вигляді плям, які при подальшому розшифруванні медичних зображень можуть призвести до постанови хибного діагнозу. Нами пропонується завдостійкий алгоритм (*noise immune algorithm, NIA*) вбудовування ЦВЗ у субпікселі основного зображення, які після вилучення ЦВЗ не використовуються для побудови зображення контейнера. У разі відсутності

шуму отримане зображення буде повністю відповідати вихідному, тобто не матиме спотворень.

Розглянемо випадок вбудовування монохромного ЦВЗ, що являє собою двовимірний масив такого ж розміру, як і масив I , що описує контейнер: $m \times n$, де кожен піксель має свою яскравість. Для визначеності приймемо, що зображення контейнера має 256 градацій яскравості, тобто кожен елемент масиву I є числом з діапазону $0 \dots 255$. Також визначимо граничне значення яскравості ЦВЗ. При його вбудовуванні у контейнер потрібно буде забезпечити результуючий рівень яскравості зображення в тому самому динамічному діапазоні, тобто від 0 до 255, при цьому максимальне значення яскравості елемента не має перевищувати 255. Тобто, якщо максимальна яскравість контейнера I_{\max} складає 240 з діапазону $0 \dots 255$, тоді яскравість ЦВЗ не може перевищувати $255 - 240 = 15$.

Крок 1.

На основі масиву для вихідного зображення I формуємо у 4 рази більший новий масив Y , використовуючи правило

$$Y(i, j) = I \left[\text{int} \left(\frac{i+1}{2} \right), \text{int} \left(\frac{j+1}{2} \right) \right] (i+j-1) \bmod 2, \quad (2)$$

$$i = \overline{1, 2n}, j = \overline{1, 2m}.$$

Для прикладу представимо вихідне зображення у вигляді двовимірного масиву $I[m \times n] = I[3 \times 3]$:

$$I_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 45 & 15 & 120 \\ 240 & 22 & 155 \\ 7 & 140 & 90 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Згідно з (2), новий масив Y матиме вигляд $Y[2m \times 2n] = Y[6 \times 6]$:

$$Y_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 45 & 0 & 15 & 0 & 120 & 0 \\ 0 & 45 & 0 & 15 & 0 & 120 \\ 240 & 0 & 22 & 0 & 155 & 0 \\ 0 & 240 & 0 & 22 & 0 & 155 \\ 7 & 0 & 140 & 0 & 90 & 0 \\ 0 & 7 & 0 & 140 & 0 & 90 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Крок 2.

Замінюємо отримані на попередньому кроці нульові елементи масиву Y на середнє арифметичне сусідніх з ними у рядку елементів, поділене на коефіцієнт запасу $K_3 = 1$, фізичний зміст якого полягає в можливості зміни яскравості вбудованого ЦВЗ (тоб-

то коефіцієнт запасу $K_3 = 1$ означає, що яскравість ЦВЗ дорівнює вихідному значенню):

$$Y_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 45 & \frac{30}{K_3} & 15 & \frac{67}{K_3} & 120 & \frac{120}{K_3} \\ \frac{45}{K_3} & 45 & \frac{30}{K_3} & 15 & \frac{67}{K_3} & 120 \\ 240 & \frac{131}{K_3} & 22 & \frac{89}{K_3} & 155 & \frac{155}{K_3} \\ \frac{240}{K_3} & 240 & \frac{131}{K_3} & 22 & \frac{89}{K_3} & 155 \\ 7 & \frac{73}{K_3} & 140 & \frac{115}{K_3} & 90 & \frac{90}{K_3} \\ \frac{7}{K_3} & 7 & \frac{73}{K_3} & 140 & \frac{115}{K_3} & 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 45 & 30 & 15 & 67 & 120 & 120 \\ 45 & 45 & 30 & 15 & 67 & 120 \\ 240 & 131 & 22 & 89 & 155 & 155 \\ 240 & 240 & 131 & 22 & 89 & 155 \\ 7 & 73 & 140 & 115 & 90 & 90 \\ 7 & 7 & 73 & 140 & 115 & 90 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Крок 3.

Для визначеності представимо ЦВЗ у вигляді двовимірного масиву такої ж розмірності: $DWM[m \times n] = DWM[3 \times 3]$ і коефіцієнтом запасу $K_3 = 1$. Для прикладу розглянемо ЦВЗ з бінарними елементами масиву $DWM_{3 \times 3} = [1 \ 0 \ 1, 0 \ 1 \ 0, 1 \ 1 \ 1]$:

$$DWM_{3 \times 3} = K_3 \cdot \begin{bmatrix} DWM_{1,1} & DWM_{1,2} & DWM_{1,3} \\ DWM_{2,1} & DWM_{2,2} & DWM_{2,3} \\ DWM_{3,1} & DWM_{3,2} & DWM_{3,3} \end{bmatrix} = 1 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Додаємо ЦВЗ шляхом поелементного підсумовування яскравості пікселів зображення, що знаходяться на додаткових позиціях, з масивом яскравостей пікселів ЦВЗ згідно з виразом

$$I_{DWM}(i, j) = Y(i, j) + DWM \left[\text{int} \left(\frac{i+1}{2} \right), \text{int} \left(\frac{j+1}{2} \right) \right] (i+j) \bmod 2, \quad (7)$$

$$i = \overline{1, 2n}, j = \overline{1, 2m}.$$

Виконаємо додавання ЦВЗ згідно з (5) та (6):

$$I_{DWM_{6 \times 6}} = \begin{bmatrix} 45 & \frac{30}{K_3} + DWM_{1,1} & 15 & \frac{67}{K_3} + DWM_{1,2} & 120 & \frac{120}{K_3} + DWM_{1,3} \\ \frac{45}{K_3} + DWM_{1,1} & 45 & \frac{30}{K_3} + DWM_{1,2} & 15 & \frac{67}{K_3} + DWM_{1,3} & 120 \\ 240 & \frac{131}{K_3} + DWM_{2,1} & 22 & \frac{89}{K_3} + DWM_{2,2} & 155 & \frac{155}{K_3} + DWM_{2,3} \\ \frac{240}{K_3} + DWM_{2,1} & 240 & \frac{131}{K_3} + DWM_{2,2} & 22 & \frac{89}{K_3} + DWM_{2,3} & 155 \\ 7 & \frac{73}{K_3} + DWM_{3,1} & 140 & \frac{115}{K_3} + DWM_{3,2} & 90 & \frac{90}{K_3} + DWM_{3,3} \\ \frac{7}{K_3} + DWM_{3,1} & 7 & \frac{73}{K_3} + DWM_{3,2} & 140 & \frac{115}{K_3} + DWM_{3,3} & 90 \end{bmatrix} = \\
 = \begin{bmatrix} 45 & 30+1 & 15 & 67+0 & 120 & 120+1 \\ 45+1 & 45 & 30+0 & 15 & 67+1 & 120 \\ 240 & 131+0 & 22 & 89+1 & 155 & 155+0 \\ 240+0 & 240 & 131+1 & 22 & 89+0 & 155 \\ 7 & 73+1 & 140 & 115+1 & 90 & 90+1 \\ 7+1 & 7 & 73+1 & 140 & 115+1 & 90 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 45 & 31 & 15 & 67 & 120 & 121 \\ 46 & 45 & 30 & 15 & 68 & 120 \\ 240 & 131 & 22 & 90 & 155 & 155 \\ 240 & 240 & 132 & 22 & 89 & 155 \\ 7 & 74 & 140 & 116 & 90 & 91 \\ 8 & 7 & 74 & 140 & 116 & 90 \end{bmatrix} \cdot \quad (8)$$

Зазначимо, що у разі роботи з кольоровими зображеннями ЦВЗ може бути вбудований як в один, так і у всі три колірні канали.

Приклад роботи алгоритму за відсутності впливу шуму, тобто при $K_3 = 1$, наведено на **рис. 8, 9**.

Як можна побачити з приведених результатів моделювання, вбудовування ЦВЗ відбулося без візуальних змін зображення контейнера, а після відновлення в умовах відсутності шуму зображення як контейнера, так і ЦВЗ залишилися не спотвореними.



Крок 1

Крок 2

Крок 3

Рис. 8. Зображення розміром 512×512 пікселів після масштабування за алгоритмом NIA (крок 1), після заміни нульових значень масиву усередненими значеннями (крок 2) і після додавання ЦВЗ (крок 3)

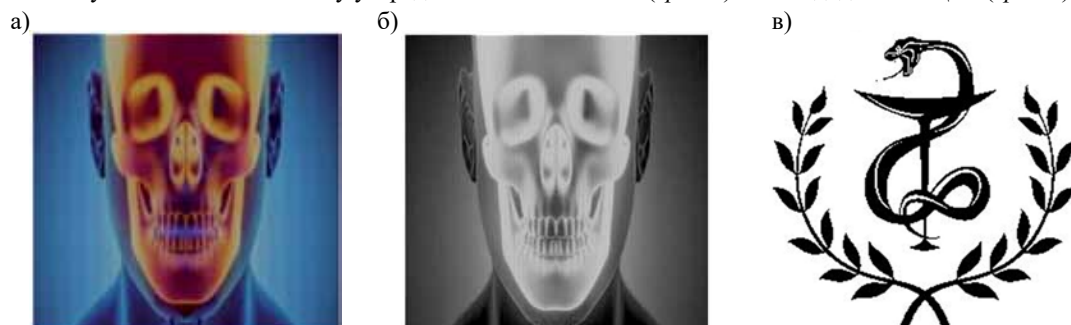


Рис. 9. Відновлені зображення контейнера (а — кольорове, б — монохромне в червоному каналі) та ЦВЗ (в) розміром 256×256 пікселів при використанні алгоритму NIA

Проведемо моделювання зображення контейнера з вбудованим ЦВЗ при різних значеннях його яскравості (коефіцієнті запасу).

На **рис. 10** показано візуальні зміни зображення томограми при збільшенні відносної яскравості ЦВЗ від 1 до 20% від I_{\max} . Як і для методу LSB (див.

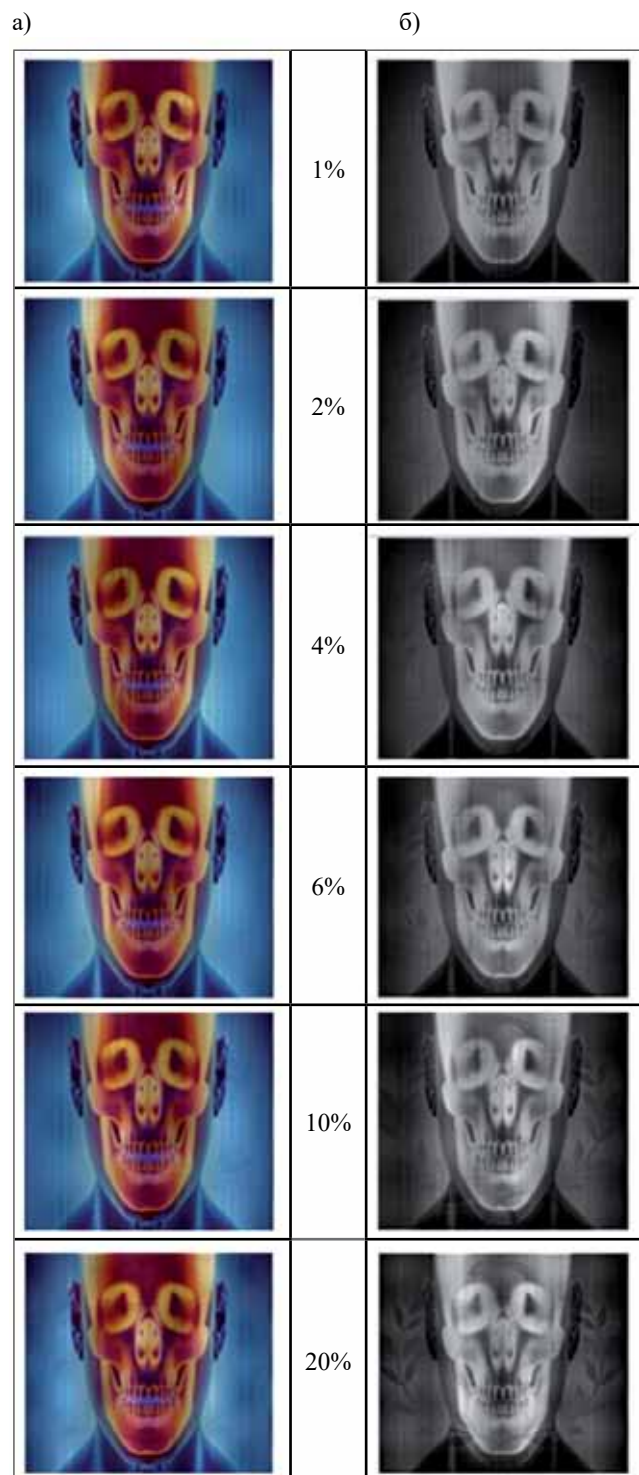


Рис. 10. Отримані за допомогою алгоритму NIA кольорове (а) та монохромне (червоний канал; б) зображення контейнера (томограма) з вбудованим ЦВЗ різної яскравості (у відсотках від максимальної яскравості зображення контейнера)

рис. 4), ЦВЗ у випадку кольорового зображення додавали до каналу червоного кольору. Для цього алгоритму максимальна яскравість ЦВЗ, що гарантує його непомітність на тлі монохромного зображення контейнера, становить приблизно 5%, а для кольорового зображення — 15%, що суттєво перевищує відповідні значення (1–2 та 6%), отримані при застосуванні алгоритму, заснованому на LSB-методі. Такий результат пояснюється маскувальним ефектом немодифікованих пікселів зображення контейнера при загальному збільшенні розміру зображення в чотири рази при використанні NIA.

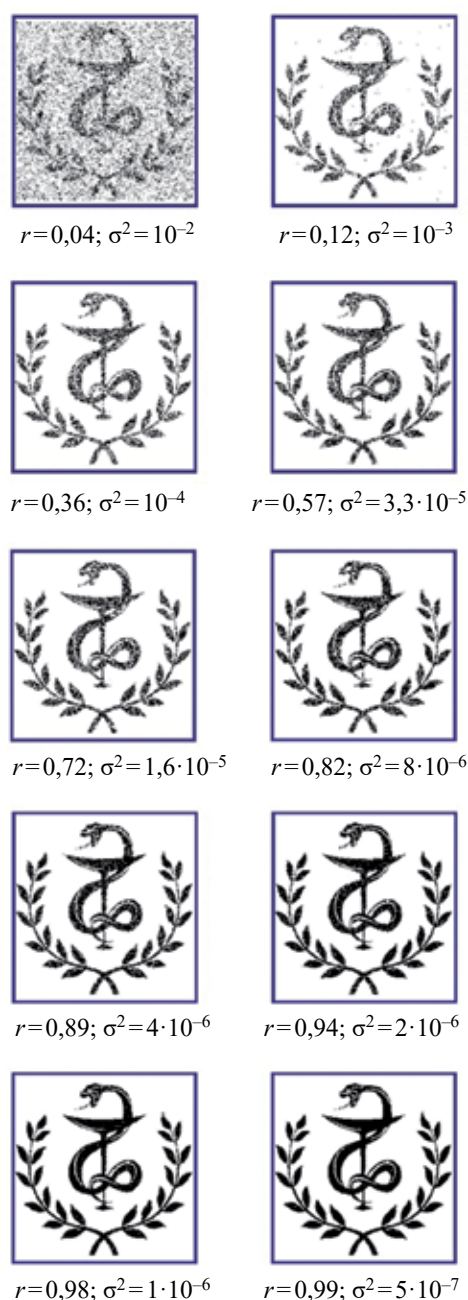


Рис. 11. Вигляд витягнутого ЦВЗ для алгоритму NIA при збільшенні дисперсії білого шуму

Дослідимо стійкість запропонованого алгоритму NIA вбудовування ЦВЗ до впливу шуму.

На рис. 11 продемонстровано залежність коефіцієнта кореляції r між витягненим та вихідним ЦВЗ при збільшенні дисперсії білого шуму. Відносна яскравість ЦВЗ складає 10% від яскравості контейнера I_{\max} . У цьому випадку при дисперсії шуму $\sigma^2 = 1 \cdot 10^{-4}$ значення коефіцієнта кореляції складає $r = 0,95$ проти $r = 0,9$ при $\sigma^2 = 4 \cdot 10^{-4}$ для методу LSB.

Порівняння характеристик методів LSB та NIA вбудовування ЦВЗ

Результати порівняльного аналізу завадостійкості методів LSB та NIA, що використовувалися в алгоритмах вбудовування ЦВЗ — монохромного зображення розміром 256×256 пікселів, наведено у таблиці. Значення коефіцієнтів кореляції обчислювалися за однакових значень дисперсії білого шуму.

Дисперсія білого шуму σ^2	Коефіцієнт кореляції r	
	LSB	NIA
$1 \cdot 10^{-2}$	0,04	0,32
$1 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,76
$1 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,95
$3 \cdot 10^{-5}$	0,57	0,97
$8 \cdot 10^{-6}$	0,82	0,975
$4 \cdot 10^{-6}$	0,89	0,975
$1 \cdot 10^{-6}$	0,98	0,9761
$5 \cdot 10^{-7}$	0,99	0,9763

Аналіз наведених у таблиці даних вказує на те, що за відсутності або досить малих значеннях дисперсії шуму є сенс використовувати алгоритм, заснований на методі LSB, через високий коефіцієнт кореляції та меншу обчислювальну складність, при цьому отримані закодовані зображення при роздрукуванні дозволяють економніше використовувати тонер. Однак вже при незначному зростанні дисперсії шуму, навіть до значення $\sigma^2 = 4 \cdot 10^{-6}$, метод LSB використовувати вже не можна, оскільки коефіцієнт кореляції падає нижче 0,9. Натомість алгоритм NIA демонструє завадостійкість аж до значення дисперсії шуму $\sigma^2 = 5 \cdot 10^{-3}$.

Висновки

Таким чином, в результаті моделювання було встановлено, що при використанні широко розповсюдженого для вбудовування ЦВЗ в просторову область зображення методу LSB для забезпечення невидимості ЦВЗ максимальна яскравість монохромного водяного знаку на тлі монохромного контейнера не повинна перевищувати 2% від яскравості останнього і 6% у випадку кольорового зображення контейнера. При ви-

користанні ж запропонованого алгоритму NIA значення відносної яскравості складають, відповідно, 5 та 15%. Щодо завадостійкості ЦВЗ до впливу білого шуму, то дисперсія шуму, за якої коефіцієнт кореляції знаходиться на рівні 0,9, для NIA виявилася вищою на два порядки, ніж для LSB, завдяки вищій відносній яскравості ЦВЗ.

Таким чином, запропонований алгоритм дозволяє адаптувати зображення ЦВЗ до впливу шумів та забезпечити його неушкоджений вигляд, при цьому сам процес вбудовування додаткової інформації в контейнер не призводить до змін його параметрів після витягнення ЦВЗ.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Mohanty S. P., Sengupta A., Guturu P., Koungianos E. Everything you want to know about watermarking: from paper marks to hardware protection. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 83–91, <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684980>
- Chandramouli R., Memon N., Rabhani M. Digital watermarking. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. Ed. by J. P. Hornak. Hoboken, NJ, Wiley, 2002.
- Наріманова О.В., Семенченко Д.М. Метод захисту QR-коду з використанням цифрового водяного знаку. *Інформатика та мат. методи в моделюванні*, 2013, т. 3, № 4, с. 361–368.
- Кушніренко О.А., Садченко А.В., Троянський А.В. Повышение помехоустойчивости “скользящего” корреляционного алгоритма распознавания печатных символов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2014, vol. 4, no. 2 (70), с. 32–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26303> (Rus)
- Wang X., Zhang S., Wang L. et al. Locally optimum image watermark decoder by modeling NSCT domain difference coefficients with vector based Cauchy distribution. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, vol. 62, pp. 309–329, <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.05.012>
- Li H., Guo X. Embedding and extracting digital watermark based on DCT algorithm. *Journal of Computer and Communications*, vol. 6, no.11, pp. 287–298. <https://doi.org/10.4236/jcc.2018.611026>
- Niu P., Wang X., Yang H. et al. A blind watermark algorithm in SWT domain using bivariate generalized Gaussian distributions. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, pp. 13351–13377, <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08504-1>
- Садченко А. В, Кушніренко О. А., Кушніренко Н. П. та ін. Модифікований адитивний метод вбудови цифрового водяного знаку. *Труди XXI МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Україна, м. Одеса, 2020, с. 21–23.
- Sinha Roy S., Basu A., Chattopadhyay A. et al. Hardware execution of a saliency map based digital image watermarking framework. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, pp. 27245–27258, <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11046-0>
- Яремчук Ю. С., Карпінєць В. В., Зоря І. С., Козак Д. О. Підвищення стійкості цифрових водяних знаків у потокових відеозаписах на основі диференціального вбудовування енергії (DEW). *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2023, № 1, с. 55–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-55-64>
- Yongqiang Ma, Wei Sun, Jing Bian et al. Embedding and extraction of color image digital watermark based on quaternion fourier transform. *International Journal of Frontiers in Sociology*, 2021, vol. 3, iss. 17, pp. 1–7. <https://doi.org/10.25236/IJFS.2021.031701>
- Wang H. Research on digital image blind watermarking algorithm based on DCT domain. *Modern Vocational Education*, 2016, no. 14, pp. 76–77.
- Sadchenko A., Kushnirenko O., Plachinda O. Fast lossy compression algorithm for medical images. *Proc. of the 2016 International Conference on Electronics and Information Technology*

(EIT 2016). Ukraine, Odessa, 2016, <https://doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500995>

14. Gonzalez-Lee M., Vazquez-Leal H., Gomez-Aguilar J.F. et al. Exploring the cross-correlation as a means for detecting digital watermarks and its reformulation into the fractional calculus framework. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 71699–71718, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2882405>

15. Садченко А. В., Кушниренко О. А., Троянський А. В., Савчук Ю. А. Адаптивний алгоритм зниження рівня імпульсного шуму на зображеннях с камер відеонаблюдення. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 1–2, с. 21–27. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2021.1-2.21>

16. Hemdan E. E.-D. An efficient and robust watermarking approach based on single value decompression, multi-level DWT, and wavelet fusion with scrambled medical images. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 1749–1777. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09769-7>

17. Veni M., Meyyappan T. Digital image watermark embedding and extraction using oppositional fruit fly algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, vol. 78, no. 19, pp. 27491–27510. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-7650-0>

18. Sharma S. S., Chandrasekaran V. A robust hybrid digital watermarking technique against a powerful CNN-based adversarial attack. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, no. 43, pp. 32769–32790. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09555-5>

19. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A. Adaptive algorithm for reducing the level of impulse noise in video images. *Technologies and Construction in Electronic Equipment*, 2021, no. 1–2, pp. 21–27. <https://doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.21>

Дата надходження рукопису
до редакції 15.05 2024 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2024.1-2.33
UDC 004.056.55

A. V. SADCHENKO, O. A. KUSHNIRENKO

Ukraine, Odessa, Odessa Polytechnic National University
E-mail: koa@opu.edu.ua

NOISE IMMUNITY ALGORITHM FOR EMBEDDING A DIGITAL WATERMARK IN MEDICAL IMAGES

When storing and transferring printed medical materials, such as tomograms or radiographs, there is a need to protect additional information from unauthorized access. This information includes personal data of the patient and a summary of the medical history, and it can be added to the medical image (container) in the form of a watermark. Existing algorithms for embedding digital watermarks (DWM) in graphic objects distort the initial characteristics of the container image, which in the case of medical images can lead to a misdiagnosis. This study aimed to develop a distortion- and noise-resistant algorithm for embedding the DWM in the spatial domain of a medical image intended for storage on paper (as a printout).

The article initially considered the possibilities of using the method of modifying the least significant bits of image pixel brightness or the LSB algorithm. Mathematical modeling in Matlab showed that the maximum brightness of the DWM guaranteeing its invisibility cannot exceed 2% of the maximum brightness of the container image for monochrome images, and 6% for color images. The maximum value of the white noise dispersion, at which it is possible to single out a DWM with a correlation coefficient of at least 0.9 was 0.0001.

We propose a new noise immune algorithm (NIA) for embedding the DWM in the subpixels of the main image, which, after extracting the DWM, are not used to build the container image. In the absence of noise, there are no distortions of the original medical image whatsoever. The essence of the NIA is as follows. The size of the original image in the form of a two-dimensional array is quadrupled by adding a subpixel in each row and column with a brightness equal to the average arithmetic brightness of neighboring pixels. A DWM with the same size as the original image is added to the resulting subpixels. Matlab modeling showed that the DWM would remain invisible at a relative brightness of approximately 5% for monochrome container images and 15% for color images. For the NIA algorithm, the maximum value of the white noise dispersion to obtain a correlation coefficient of 0.9 is 0.005, which means that the noise immunity of the proposed method is significantly higher than that of the LSB-based algorithm.

Keywords: digital watermark, paper carrier, image, adaptive algorithm, space scaling, noise, information distortion.

REFERENCES

1. Mohanty S. P., Sengupta A., Guturu P., Kougianos E. Everything you want to know about watermarking: from paper marks to hardware protection. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017, vol. 6, no. 3, pp. 83–91, <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684980>

2. Chandramouli R., Memon N., Rabbani M. Digital watermarking. *Encyclopedia of Imaging Science and Technology*. Ed. by J. P. Hornak. Hoboken, NJ, Wiley, 2002.

3. Narimanova O.V., Semenchko D.M. Digital watermarking approach for QR-code protection. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2013, vol. 3, iss. 4, pp. 361–368. (Ukr)

4. Kushnirenko O.A., Sadchenko A.V., Trojanskij A.V. Improving noise immunity of “sliding” correlation algorithm for printable characters recognition. *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies, 2014, vol. 4, no. 2 (70), pp. 32–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26303> (Rus)

5. Wang X., Zhang S., Wang L. et al. Locally optimum image watermark decoder by modeling NSCT domain difference coefficients with vector based Cauchy distribution. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2019, vol. 62, pp. 309–329, <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.05.012>

6. Li H., Guo X. Embedding and extracting digital watermark based on DCT algorithm. *Journal of Computer and Communications*, vol. 6, no.11, pp. 287–298. <https://doi.org/10.4236/jcc.2018.611026>

7. Niu P., Wang X., Yang H. et al. A blind watermark algorithm in SWT domain using bivariate generalized Gaussian distributions. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, pp. 13351–13377, <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08504-1>

8. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Kushnirenko N. P. et al. Modified additive method of embedding a digital watermark. *Proc. of the XXI International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odesa, 2020, pp. 21–23. (Ukr)
9. Sinha Roy S., Basu A., Chattopadhyay A. et al. Hardware execution of a saliency map based digital image watermarking framework. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, pp. 27245–27258, <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11046-0>
10. Yaremchuk Y. Y., Karpinets V. V., Zoria I. S., Kozak D. O. Improving the resistance of digital watermarks in streaming videos based on differential energy watermarking (DEW), *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2023, no. 1, pp. 55–64, <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-55-64> (Ukr)
11. Yongqiang Ma, Wei Sun, Jing Bian et al. Embedding and extraction of color image digital watermark based on quaternion fourier transform. *International Journal of Frontiers in Sociology*, 2021, vol. 3, iss. 17, pp. 1–7. <https://doi.org/10.25236/IJFS.2021.031701>
12. Wang H. Research on digital image blind watermarking algorithm based on DCT domain. *Modern Vocational Education*, 2016, no. 14, pp. 76–77.
13. Sadchenko A., Kushnirenko O., Plachinda O. Fast lossy compression algorithm for medical images. *Proc. of the 2016 International Conference on Electronics and Information Technology (EIT 2016)*. Ukraine, Odesa, 2016, <https://doi.org/10.1109/ICEAIT.2016.7500995>
14. Gonzalez-Lee M., Vazquez-Leal H., Gomez-Aguilar J.F. et al. Exploring the cross-correlation as a means for detecting digital watermarks and its reformulation into the fractional calculus framework. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 71699–71718, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2882405>
15. Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A., Troyanskiy A. V., Savchuk Yu. A. Adaptive algorithm for reducing pulse noise level in images from CCTV cameras. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 21–27. <https://doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.21> (Rus)
16. Hemdan E. E.-D. An efficient and robust watermarking approach based on single value decompression, multi-level DWT, and wavelet fusion with scrambled medical images. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, vol. 80, no. 2, pp. 1749–1777. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09769-7>
17. Veni M., Meyyappan T. Digital image watermark embedding and extraction using oppositional fruit fly algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, vol. 78, no. 19, pp. 27491–27510. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-7650-0>
18. Sharma S. S., Chandrasekaran V. A robust hybrid digital watermarking technique against a powerful CNN-based adversarial attack. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, no. 43, pp. 32769–32790. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09555-5>

Опис статті для цитування:

Садченко А. В., Кушніренко О. А. Неспотворюючий алгоритм вбудовування цифрового водяного знаку у медичні зображення. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2024, № 1–2, с. 33–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.1-2.33>

Cite the article as:

Sadchenko A. V., Kushnirenko O. A. Noise immunity algorithm for embedding a digital watermark in medical images. *Technology and design in electronic equipment*, 2024, no. 1–2, pp. 33–42. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.1-2.33>

Пархомей І., Козловський В., Гнатюк С., Рябий М. Методи безпечної обробки інформації у багатопозиційних системах радіолокації. — Київ : Видавництво «Центр навчальної літератури», 2018. 232 с.

У монографії розглянуто проблеми формування, обробки та захисту радіолокаційної інформації в системах радіобачення авіаційно-наземного базування зі змінною відносною просторовою конфігурацією при дистанційному зондуванні радіопомітних об'єктів та об'єктів спостереження з радіопоглинальною поверхнею. Матеріал враховує останні досягнення в галузі радіолокації та безпечних телекомунікаційних технологій.

Розрахована на широке коло читачів: наукових працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерів.

