

[0000-0001-6213-7086]

В. О. Хорошко, д.т.н., професор,

Національний авіаційний університет

просп. Космонавта Комарова 1, м. Київ, 03680, Україна

[0000-0003-4548-0709]

І. І. Бобок, к.т.н.

Одеський національний політехнічний університет

просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КЛОНУВАННЯ В ЦИФРОВОМУ ЗОБРАЖЕННІ

Одним із найпоширеніших інструментів, що застосовується при неавторизованих змінах цифрових зображень, залишається клонування. Задача виявлення клонування привертає увагу фахівців у галузі захисту інформації, але остаточного розв'язку на сьогоднішній день не отримала. В роботі запропоновано модифікацію існуючого методу виявлення результатів клонування в цифровому зображенні, в тому числі в умовах додаткових до клонування збурних дій, що не відрізняються для клону/прообразу, та малих розмірів клону/прообразу. Модифікація методу має своєю метою забезпечення його ефективної роботи в умовах деяких геометричних перетворень, яких часто зазнає клон на практиці. Мета роботи досягається шляхом заміни принципу побудови матриці **G** мінімальних блокових відмінностей, що ставиться у співвідношення цифровому зображенню, яке піддається експертизі, і яка є основним предметом дослідження в методі. Елемент **G**, який відображає найменшу відмінність конкретного блока від будь-якого іншого блока зображення, отримується з урахуванням відмінностей сингулярних спектрів блоків, значення яких не змінюються при геометричних перетвореннях, що розглядаються. Запропонований удосконалений метод забезпечує при тестуванні абсолютне значення показника $TRP = 100\%$, унеможливаючи пропуск клонованого зображення в умовах відсутності його постобробки чи наявності геометричних перетворень клону, крім цього, він є ефективним в умовах мультиклонування, коли одному прообразу відповідає декілька клонів, які зазнали (різних) геометричних перетворень.

Ключові слова: цифрове зображення, порушення цілісності, клон, прообраз, геометричні перетворення, сингулярний спектр, матриця мінімальних блокових відмінностей.

Вступ. Для забезпечення ефективної перевірки цілісності цифрового зображення (ЦЗ) важливу роль відіграє питання виявлення результатів обробки зображення засобами графічних редакторів (Adobe Photoshop, Gimp та ін.), які на сьогоднішній день є загальнодоступними, забезпечують якісні перетворення зображень і часто використовуються не тільки з розважальними цілями.

Одним із найпоширеніших інструментів, що застосовується при неавторизованих змінах ЦЗ, залишається клонування, реалізоване в усіх сучасних графічних редакторах. При клонуванні відбувається заміна частини (частин) ЦЗ іншою частиною (частинами) того ж ЦЗ. В отриманому результаті області, що змінилися, називаються клонами, а оригінальні області, що послужили основою для клонів, називаються їх прообразами. Задача виявлення клонування привертає увагу багатьох су-

часних фахівців у галузі захисту інформації [1–3], але остаточного розв'язку на сьогоднішній день не отримала.

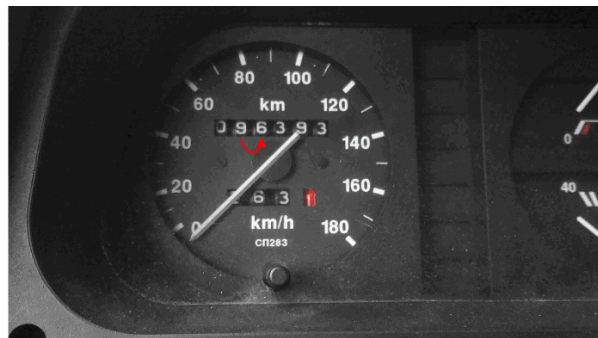
Нещодавно в [4, 5] було запропоновано метод **KL** виявлення результатів клонування в ЦЗ в умовах наявності/відсутності додаткової до клонування постобробки зображення (у тому числі за рахунок значних збурних дій (ЗД)), який за своєю ефективністю перевищує сучасні аналоги, зокрема, виявляючи області клону/прообразу, розміри яких значно менші, ніж ті, на які розраховані інші існуючі методи. Завдяки цьому саме **KL** заслуговує на додаткову увагу. Умовою застосування **KL** є відсутність відмінностей у постобробці клону й прообразу. Однак на практиці дуже часто клон піддається деяким перетворенням для його кращої «адаптації» в умовах нової області розташування в межах зображення, а також для навмисного ускладнення процесу його

виявлення, часто – геометричним перетворенням: він може бути повернутим на якийсь кут (порівняно з розташуванням прообразу), відбитий дзеркально відносно вертикальної або/і горизонтальної осі (рисунок 1) і т.д. Геометричні перетворення клону часто, крім значен-

нєвої необхідності (рисунок 1), мають на меті зменшення наочної схожості клону й прообразу на ЦЗ, що зменшує ймовірність виникнення підозри в наявності клонування з боку зацікавлених сторін.



а)



б)

а) оригінальне ЦЗ; б) результат проведеного клонування, у ході якого клон був підданий послідовному відбиттю відносно горизонтальної й вертикальної осей, після чого ЦЗ було збережено з втратами

Рисунок 1 – Клонування в ЦЗ з попередньою обробкою клону

Неспроможність методу *KL* у таких умовах є його значним недоліком поряд з перевагами, що мають місце, і потребує вдосконалення.

Основним предметом аналізу в *KL* є матриця G мінімальних блокових відмінностей (ММБВ), що ставиться у відповідність ЦЗ з $n \times m$ -матрицею F (з елементами $f_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$) за наступним правилом [4, 5]. Нехай $B_{ij}, i = \overline{1, n-l+1}, j = \overline{1, m-l+1}$, – $l \times l$ -блок матриці ЦЗ F , для якого на місці (1,1) знаходиться елемент f_{ij} . Елементи $g_{ij} (n-l+1) \times (m-l+1)$ – матриці G відображають величину найменшої відмінності блока B_{ij} від будь-якого іншого блока B_{kq} матриці F (крім блоків, що є найближчими сусідами B_{ij} [4]) в сенсі:

$$\sum_{t,p=1}^l r_{tp}, \quad (1)$$

де $r_{tp}, t, p = \overline{1, l}$, – елементи $l \times l$ -матриці R , яка отримана наступним чином:

$$R = |B_{ij} - B_{kq}|, \quad (2)$$

де права частина рівності (2) розуміється в поелементному сенсі.

Відповідним блокам B_{ij} і B_{kq} клону і прообразу в матриці G відповідають

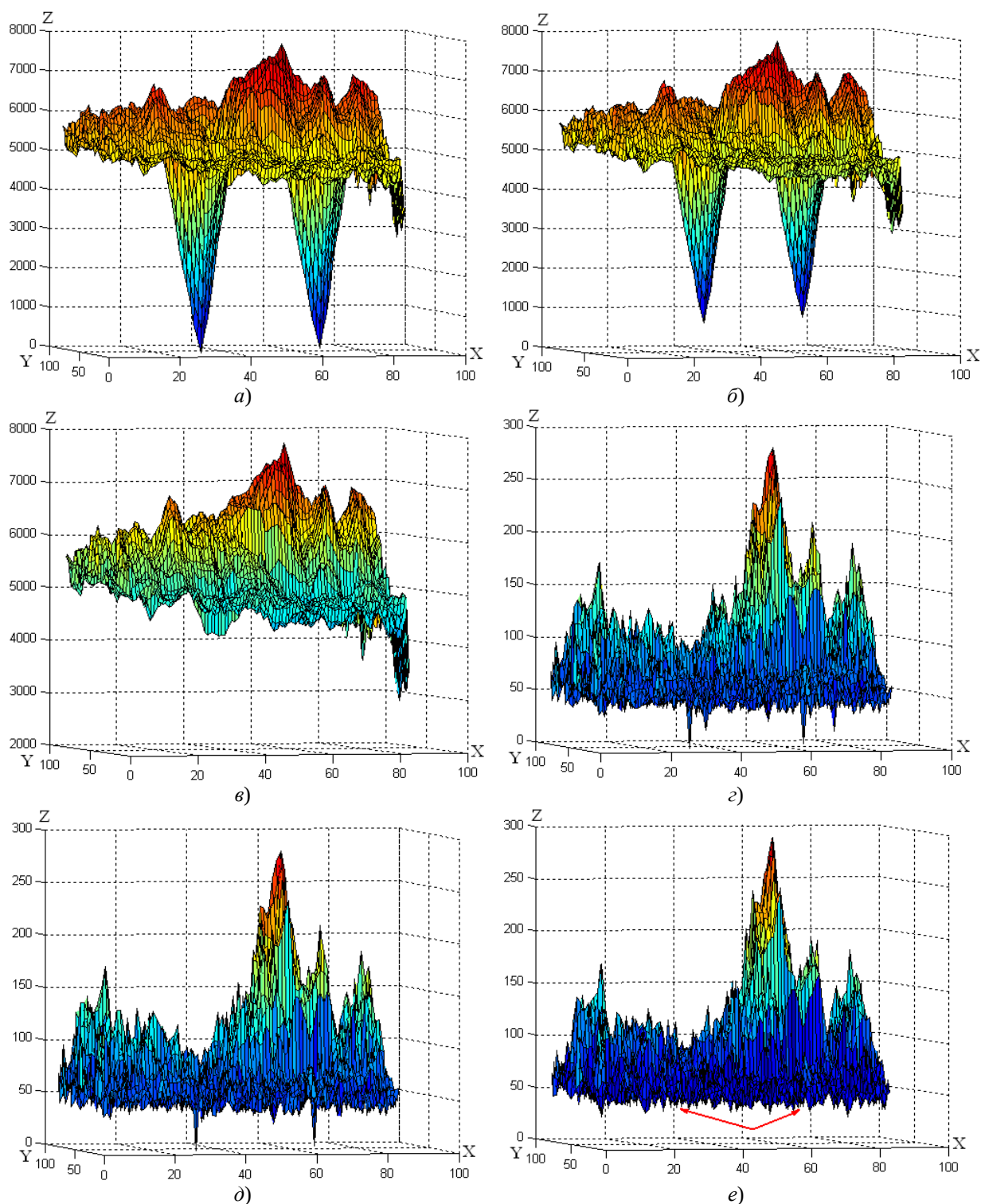
однакові за значенням глобальні (можливо, локальні) мінімуми функції, яка інтерполює елементи G :

$$g_{ij} = g_{kq}, \quad (3)$$

що є показником наявності клонування, вказує його місця розташування (рисунок 2, а, б). При цьому g_{tp} будемо називати глобальним мінімумом G , якщо $g_{tp} = \min_{1 \leq i \leq n-l+1, 1 \leq j \leq m-l+1} g_{ij}$, і локальним мінімумом, якщо в матриці G існує такий окіл $U(g_{tp})$ елемента g_{tp} , що для будь-якого елемента матриці $g_{ij} \in U(g_{tp})$, $g_{ij} \neq g_{tp}$ має місце співвідношення: $g_{ij} > g_{tp}$. Окіл $U(g_{tp})$ радіуса r утворюють елементи $g_{t+k, p+q}$, $k, q \in \{-r, \dots, 0, \dots, r\}$ матриці G [4, 5].

Наявність геометричного перетворення клону, очевидно, руйнує (3) (рисунок 2, в), отримане з використанням (1), (2).

В [6] було розроблено теоретичні основи для вдосконалення методу *KL*, метою якого є забезпечення працездатності методу при різних геометричних перетвореннях клону (відбиття відносно вертикальної або/і горизонтальної осі, поворот на кут, кратний 90° , відбиття відносно діагоналі (головної, побічної) відповідної матриці).



а) (1), (2) (без додаткових збурних дій);
 б) (1), (2) (в умовах накладання гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і $D=0.0001$);
 в) (1), (2) (в умовах симетричного відображення клону відносно головної діагоналі);
 г) (15) (без додаткових збурних дій);
 д) (15) (в умовах симетричного відображення клону відносно головної діагоналі);
 е) (15) (в умовах симетричного відображення клону відносно головної діагоналі з наступним накладанням гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і $D=0.0001$)
Рисунок 2 – Графік функції, що інтерполює елементи ММБВ, для конкретного ЦЗ, яке піддалося клонуванню

Доведено, що сингулярний спектр (множина сингулярних чисел (СНЧ)) квадратної матриці не змінюється при зазначених геометричних перетвореннях, що робить доцільним використання при формуванні ММБВ для кількісної характеристики відмінності між блоками матриці ЦЗ замість (1), (2), відмінності їх сингулярних спектрів (у деякому сенсі). Побудована за запропонованим принципом ММБВ теоретично має властивості, аналогічні тим, що були їй притаманні у первісному варіанті, однак її елементи тепер належать множині дійсних, а не цілих чисел. Це приведе до значного впливу округлень на результати обчислень у системі чисел з плаваючою точкою, зазначені локальні (глобальні) мінімуми G не будуть настільки вираженими, як у ММБВ, побудованої за первісним принципом (1), (2). Крім цього, не є тривіальним встановлення рівності значень локальних (глобальних) мінімумів G , що будуть дійсними числами.

Мета роботи та постановка задач.

Метою роботи є підвищення ефективності процесу виявлення порушень цілісності ЦЗ шляхом удосконалення методу KL виявлення результатів клонування, що забезпечить його працездатність в умовах геометричних перетворень клону, зазначених вище.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються наступні задачі:

- 1) визначити принцип відмінності блока B від будь-якого іншого блока B_1 матриці F з використанням сингулярних спектрів блоків;
- 2) показати, що для визначеного принципу відмінності для заданого блока B матриці ЦЗ мінімум відмінності від усіх інших блоків F буде досягатися в тому ж блоці, що і мінімум у сенсі (1), (2);
- 3) дослідити особливості функції, що інтерполює елементи ММБВ, побудованої за визначеним принципом відмінності блоків;
- 4) з урахуванням того, що СНЧ блока належать множині дійсних чисел, визначити практичний принцип встановлення рівності мінімальних відмінностей блоків матриці ЦЗ, що розраховуються за їх СНЧ;
- 5) провести оцінювання ефективності алгоритму, що реалізує удосконалений метод.

Основна частина. З урахуванням результатів, отриманих у [6], доцільною є заміна принципу (1), (2), який використовується при формуванні $(n-l+1) \times (m-l+1)$ -матриці G ММБВ в [4], на

$$g_{ij} = \min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)|, \quad (4)$$

де g_{ij} несе в собі інформацію про найменшу відмінність конкретного блока B , який відповідає елементу f_{ij} матриці F , від будь-якого іншого блока B_1 матриці F .

Покажемо, що для заданого $l \times l$ -блока B матриці ЦЗ мінімум відмінності від усіх інших блоків цієї матриці в сенсі (4) буде досягатися в тому ж блоці $\bar{B}$ (з елементами $\bar{b}_{ij}, i, j = \overline{1, l}$), що й мінімум по всіх блоках у

сенсі $\min_{B_1} \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(1)}|$ ((1), (2)), де $b_{ij}, b_{ij}^{(1)}, i, j = \overline{1, l}$, – елементи матриць B, B_1 відповідно.

Дійсно, нехай B_1, B_2 – два довільні блоки матриці ЦЗ: $B_1 \neq B_2$, при цьому: $B_1 \neq B, B_2 \neq B$. Будемо трактувати кожен з них як результат збурення блока B . Нехай має місце співвідношення

$$\sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(1)}| \leq \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(2)}|, \quad (5)$$

де $b_{ij}^{(2)}, i, j = \overline{1, l}$, – елементи матриці B_2 . Співвідношення (5) говорить про те, що при отриманні B_1 блок B зазнав менше збурення, ніж при отриманні B_2 . Оскільки СНЧ будь-якої матриці є добре обумовленими [7], збурення яких адекватні збуренню самої матриці, то з (5) на практиці буде впливати, що

$$\sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| \leq \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_2)|,$$

тобто чим менша відмінність блоків у сенсі

$$\sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(1)}|, \text{ тим меншою буде їх відмінність}$$

у сенсі $\sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)|$. Правильне й зворотне: збурення сингулярного спектра (незалежно від того, які саме СНЧ збурилися) приводять до адекватних збурень відповідної матриці [8]. Таким чином, якщо

$$\min_{B_1} \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(1)}| = \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - \bar{b}_{ij}|, \quad (6)$$

а B_2 – довільний блок такий, що $B_2 \neq \bar{B}$, то

$$\sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - \bar{b}_{ij}| \leq \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(2)}|, \quad \text{а} \quad \text{тому}$$

$$\sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(\bar{B})| \leq \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_2)|, \text{ отже}$$

$$\min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| = \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(\bar{B})| \text{ і}$$

якби знайшовся блок $\bar{\bar{B}}$ такий, що

$$\sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(\bar{\bar{B}})| < \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(\bar{B})|,$$

це б суперечило (6).

Як показав обчислювальний експеримент, для тих блоків $\bar{B}$, на яких досягається

$$\min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| \text{ для заданого блока } B,$$

найбільшу відмінність мають максимальні СНЧ, а відмінності всіх інших значно менші:

$$|\sigma_1(B) - \sigma_1(\bar{B})| \gg |\sigma_i(B) - \sigma_i(\bar{B})|, \quad (7)$$

$$i = 2, \dots, l$$

З урахуванням (7),

$$\min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| \approx$$

$$|\sigma_1(B) - \sigma_1(\bar{B})| = \|B\|_2 - \|\bar{B}\|_2,$$

де $\|\cdot\|_2$ – спектральна матрична норма [7].

З урахуванням того, що для будь-якої матричної норми має місце властивість [9]:

$$\|M_1\| - \|M_2\| \leq \|M_1 - M_2\|, \text{ а також співвідношення [7]: } \|M\|_2 \leq \|M\|_F,$$

що пов'язує спектральну й норму Фробеніуса матриці (тут M, M_1, M_2 – довільні матриці), співвідношення (8) набуває вигляду

$$\min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| \leq \|B - \bar{B}\|_2 \quad (9)$$

$$\|B - \bar{B}\|_2 \leq \|B - \bar{B}\|_F.$$

Покажемо, що для довільної матриці M з елементами $m_{ij}, i, j = \overline{1, n}$, норми $\|M\|_F$ і

$$\|M\|_{l_1} = \sum_{i,j=1}^n |m_{ij}| \text{ пов'язані співвідношенням}$$

$$\|M\|_F \leq \|M\|_{l_1}. \quad (10)$$

З урахуванням визначення l_1 -норми:

$$\begin{aligned} \|M\|_{l_1}^2 &= \left(\sum_{i,j=1}^n |m_{ij}| \right)^2 = \\ &= \sum_{i,j=1}^n |m_{ij}|^2 + P = \|M\|_F^2 + P, \end{aligned} \quad (11)$$

де P – сума всіх можливих попарних добутоків елементів матриці M виду $|m_{ij}| |m_{kl}|$, для яких $\langle i, j \rangle \neq \langle k, l \rangle$, де $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – впорядкована пара. Таким чином, $P \geq 0$, і з (11) випливає, що

$$\|M\|_{l_1}^2 \geq \|M\|_F^2. \quad (12)$$

Співвідношення (10) безпосередньо випливає з (12).

З урахуванням (10) повернемося до (9):

$$\begin{aligned} \min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| &\leq \|B - \bar{B}\|_{l_1} = \\ &= \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - \bar{b}_{ij}| = \min_{B_1} \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(1)}|. \end{aligned} \quad (13)$$

З (13) випливає, що елементи ММБВ у випадку (4) не перевищують елементи ММБВ у випадку (1), (2). На практиці

$$\begin{aligned} \min_{B_1} \sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| &<< \\ &<< \min_{B_1} \sum_{i,j=1}^l |b_{ij} - b_{ij}^{(1)}|. \end{aligned} \quad (14)$$

У випадку обчислення елементів ММБВ відповідно до (4) для визначення глобальних (локальних) мінімумів функції, що збігаються за значенням, що інтерполює елементи ММБВ, порівняння дійсних чисел вкрай утрудняє цей процес. У зв'язку з цим пропонується для визначення елементів ММБВ співвідношення (4) уточнити наступним чином:

$$g_{ij} = \min_{B_1} \left(\text{round} \left(\sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)| \right) \right), \quad (15)$$

де функція $\text{round}(\cdot)$ округлює аргумент до найближчого цілого значення.

Удосконалення методу KL полягає в заміні принципу побудови матриці G ММБВ з (1), (2) на (15). З погляду теорії не виникає

ніяких питань: побудована за запропонованим принципом (15) ММБВ має властивості, аналогічні тим, що були їй притаманні у методі *KL*; відповідним блокам клону (включаючи випадки його геометричних перетворень, перерахованих вище) і прообразу відповідають її локальні (глобальні) мінімуми, однакові за значенням. Однак практична реалізація має свої особливості, пов'язані з особливостями машинної арифметики.

Результати роботи вдосконаленого *KL* (який далі позначається *UKL*) у різних умовах для конкретного ЦЗ представлені на рисунку 2 (г-е), де області клону й прообразу були виявлені правильно в усіх випадках. За представленими графіками очевидні висновки, які мають загальний характер і нижче підтверджуються результатами обчислювального експерименту: запропонований *UKL* є ефективним в умовах відсутності додаткових до клонування збурних дій, в умовах наявності додаткових геометричних перетворень (перерахованих вище), яких зазнає клон. В умовах додаткових збурень, відмінних від геометричних перетворень клону, що змінюють значення матриць як клону, так і прообразу, умова локального мінімуму для відповідних блоків клону й прообразу може незначно порушуватися (на рисунку 3 зображено приклад околів радіуса 1 для відповідних блоків клону й прообразу в матриці *G*, де значення елементів *G* для клону й прообразу збігаються й дорівнюють 45, але в околі клону є елемент 44, який не дасть можливості визначити цей блок клону за допомогою *UKL*, оскільки значення матриці *G*, що відповідає клону, не є локальним мінімумом по околу радіуса 1 через наявність округлень, і не тільки в результаті використання функції *round(.)* в (15): ця функція в (15) працює з СНЧ, при безпосередньому обчисленні яких округлення в системі чисел із

плаваючою точкою вже дали свій додатковий внесок в обчислювальну похибку. Однак ця причина негативних наслідків використання (15), що (необов'язково) можуть мати місце, не єдина. Значення елементів матриці *G* при використанні (15) внаслідок (14) значно менші за відповідні значення *G* при використанні (1), (2) (рисунк 2). Через це значення матриці *G* (15) часто дуже незначно відрізняються одне від одного (рисунк 4, б) порівняно з рисунком 4, а), що може зробити для них накопичення обчислювальної похибки критичним, змінюючи лише незначно (при округленні – на одиницю) значення принципово важливих елементів (рисунк 3). Крім того, близькість значень *G* дає змогу на практиці використовувати при виявленні локальних мінімумів околи лише одиничного радіуса, а з урахуванням близькості значень *G* локальних мінімумів по околу такого радіуса в ній знайдеться значна кількість. Однак це могло б саме по собі лише збільшити обчислювальну складність *UKL* порівняно з *KL* (що хоча і є небажаним, але не є критичним з точки зору задачі, що розв'язується), але наявність обчислювальної похибки при роботі з дійсними числами й необхідність введення округлення в (15) приводять до таких можливих негативних наслідків:

- два локальні (глобальні) мінімуми *G*, що збігаються за значенням у реалії, можуть бути не виявлені, оскільки не будуть такими при обчисленні в системі чисел із плаваючою точкою з наступним застосуванням (15);
- два близькі (але не рівні) дійсні значення $\sum_{i=1}^l |\sigma_i(B) - \sigma_i(B_1)|$, які в реаліях не відають клону й прообразу, можуть в (15) дати однакові результати й виявитися локальними мінімумами в околі радіуса 1.

59	61	67
58	45	52
53	57	67

а)

64	49	53
55	45	44
60	51	52

б)

а) окол прообразу, б) окол клону

Рисунок 3 – Околи радіуса 1 для відповідних блоків клону й прообразу в матриці *G*

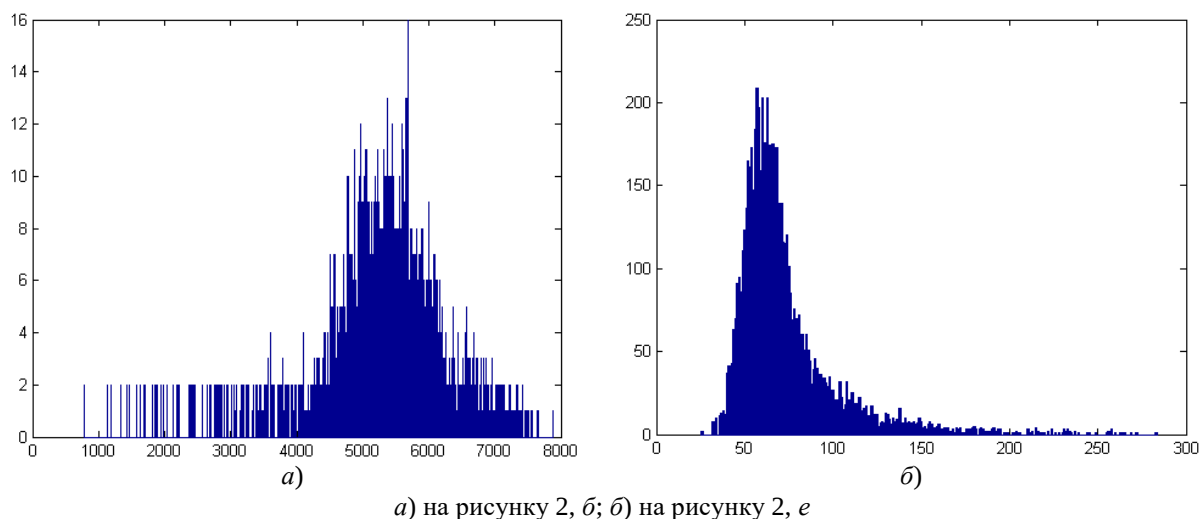


Рисунок 4 – Гістограми значень ММБВ для випадків, представлених на рисунках

Ці негативні наслідки будуть тим меншими, чим менше будуть змінюватися в процесі збурних дій елементи матриці клонованого ЦЗ (а тому й СНЧ блоків).

Таким чином, рекомендованими умовами для ефективного використання *UKL* є умови відсутності додаткових до клонування збурних дій на ЦЗ або наявності геометричних перетворень клону (і, як випливає з особливостей використовуваного математичного апарату (незмінюваність СНЧ блоків при перерахованих вище геометричних перетвореннях), то, можливо, й прообразу), додаткових до клонування. В цьому випадку умова (3) клону-прообразу для матриці G буде мати вигляд:

$$g_{ij} = g_{kq} = 0.$$

Для оцінювання ефективності *UKL* було проведено обчислювальний експеримент, у якому були задіяні 200 оригінальних ЦЗ і 200 ЦЗ, підданих клонуванню з наступними геометричними перетвореннями клону. Як клон/прообраз використовувалася область, розміри якої часто були порівнянні з 16×16 -блоком. При експертизі ЦЗ за допомогою алгоритмічної реалізації *UKL* задіявалися 16×16 -, 8×8 -блоки (що не є принциповим).

Ефективність алгоритмічної реалізації оцінювалася стандартним чином [10] за допомогою двох кількісних показників: TRP (true positive rate) і FRP (false positive rate):

$$TRP = \frac{\text{кількість ЦЗ, що зазнали клонування, виявлених як клоновані}}{\text{загальна кількість ЦЗ, що зазнали клонування}} \cdot 100\%,$$

$$FRP = \frac{\text{кількість оригінальних ЦЗ, виявлених як такі, що зазнали клонування}}{\text{загальна кількість оригінальних ЦЗ}} \cdot 100\%.$$

Будемо вважати, що ЦЗ, що зазнало клонування, виявлене як клоноване, якщо визначені області клону і прообразу мають непусте перетинання з реальними клоном і прообразом. В результаті експерименту глобальний мінімум відповідної ММБВ G в умовах геометричних перетворень, перерахованих вище, мав нульове значення для відповідних блоків клону/прообразу (як у випадку відсутності додаткових збурних дій для клонованого ЦЗ у методі *KL*), що взагалі виключало необхідність проведення додаткових досліджень

матриці G . Показник *TPR* у цих умовах дав максимально можливе значення: $TPR=100\%$. В ході експерименту ЦЗ воно вважалося оригінальним, якщо при його експертизі не була виявлена парна кількість глобальних мінімумів відповідної G , що дорівнювали нулю. Показник $FRP=5\%$.

Результати порівняльного аналізу ефективності *UKL* і сучасних аналогів (Pan Xunyu (2010) [11], Amerini (2011) [12], Amerini (2013) [10], Mishra (2013) [13], Hashmi et al. (2014) [14], Diaa et al. (2015)

[15], Dīaa et al. (2016) [16]) в умовах відсутності постобробки клонованого ЦЗ (а для *UKL* – в умовах відсутності будь-якої обробки або геометричних перетворень клону) представлено в таблиці 1.

Результати експертизи конкретного ЦЗ зображено на рисунку 5.

Завдяки використаному математичному апарату *UKL* ефективно працює в умовах мультиклонування (коли одному прообразу відповідає декілька клонів). Приклад наведено на рисунку 6, де клоноване ЦЗ (рисунок 6, а) отримано таким чином: прообраз повернуто на кут 90° у від'ємному напрямі (що створює на-

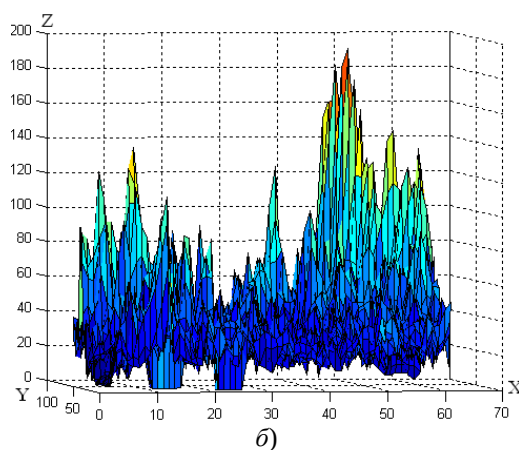
ступний клон), один з клонів повернуто на 180° , інший на 90° в додатному напрямі. Якщо розмір блоків, за допомогою яких відбувається експертиза цілісності ЦЗ, є меншим за розмір клону/прообразу, то за результатами *UKL* наявність геометричних перетворень, що зазнали клони (прообраз), може бути виявленою, як, наприклад, для ЦЗ, зображеного на рисунку 6, а. Ці перетворення відображаються в геометричній різниці між проекціями частин поверхні, що визначається графіком функції, яка інтерполює G , які (частини поверхні) відповідають клонам, прообразу (рисунок 6, в).

Таблиця 1 – Результати порівняльного аналізу ефективності *UKL* і сучасних аналогів

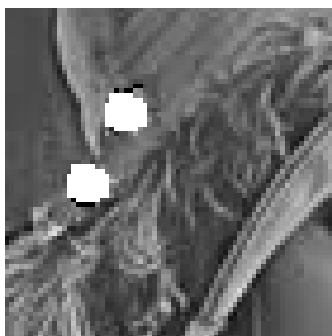
Метод	Pan Xunyu (2010)	Amerini (2011)	Amerini (2013)	Mishra (2013)	Hashmi et al. (2014)	Dīaa et al. (2015)	Dīaa et al. (2016)	<i>KL</i> (2016)	<i>UKL</i> (2019)
<i>TPR</i> , %	89.96	100	94.9	73.6	80	92	96	100	100
<i>FPR</i> , %	1.25	8	9.2	3.6	10	8	2.9	4.8	5



а)



б)



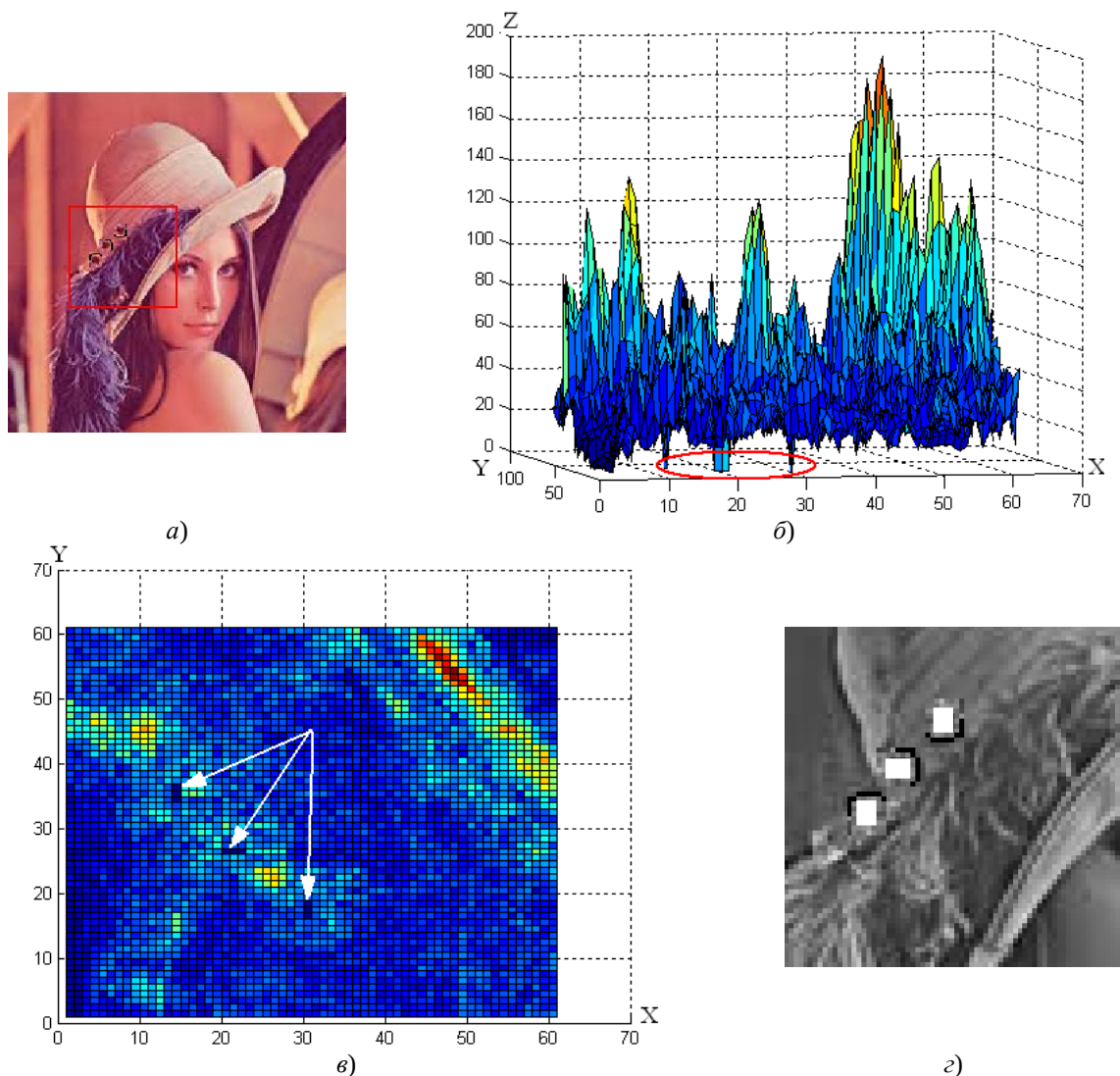
в)

а) ЦЗ Lenna, яке зазнало клонування з наступним поворотом клону на 90 градусів у від'ємному напрямку;

б) графік функції, що інтерполює елементи ММБВ для виділеної частини ЦЗ;

в) результат виявлення клону і прообразу *UKL*

Рисунок 5 – Результат експертизи ЦЗ Lenna методом *UKL* з використанням 8×8 -блоків



а) клоноване ЦЗ; б) графік функції, що інтерполює елементи ММБВ; в) проекція поверхні, що відповідає G для клонованого ЦЗ, на площину XOY (проекції областей, що відповідають клону й прообразу, відмічені стрілками); г) виявлені клони і прообраз

Рисунок 6 – Результат роботи UKL при виявленні мультиклонування

Висновки. В роботі запропоновано модифікацію методу *KL* виявлення результатів клонування в ЦЗ, який нині є одним із найефективніших серед аналогів. Запропонована модифікація, що полягає в заміні принципу побудови ММБВ, дала змогу забезпечити абсолютну ефективність ($TPR=100\%$) удосконаленого методу *UKL* в умовах геометричних перетворень клону: відбиття відносно верти-кальної або/і горизонтальної осі, поворот на кут, кратний 90° , відбиття відносно діагоналі (головної, побічної) відповідної матриці, що не входило до можливих умов застосування *KL*.

Як показали результати порівняльного аналізу ефективностей сучасних методів, що

виявляють результати клонування, *UKL* в умовах відсутності додаткових до клонування збурних дій, а також при наявності для нього геометричних перетворень клону, вказаних вище, є таким, що перевищує аналоги в сенсі *TPR*, є ефективним при виявленні мультиклонування.

Список літератури

- [1] B. L. Shivakumar, and S. S. Baboo, "Detecting copy-move forgery in digital images: a survey and analysis of current methods", *Global Journal of Computer Science and Technology*, 10 (7), pp. 61-65, 2010.
- [2] R. Singh, and M. Kaur, "Copy move tampering detection techniques: a review", *In-*

- ternational Journal of Applied Engineering Research*, 11 (5), pp. 3610-3615, 2016.
- [3] E. Silva, T. Carvalho, A. Ferreira, and A. Rocha, "Going deeper into copy-move forgery detection: exploring image telltales via multi-scale analysis and voting processes", *J. Vis. Commun. Image Represent*, 29, pp. 16-32, 2015.
- [4] С. М. Григоренко, "Розвиток методу виявлення клонування в цифровому зображенні в умовах додаткових збурних дій", *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*, 1 (31), с. 85-98, 2016.
- [5] A. A. Kobozeva, I. I. Bobok, and S. M. Grygorenko, "Method for detecting of clone areas in a digital image under conditions of additional attacks", *Journal of Signal Processing Systems*, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11265-019-01449-6>
- [6] І. І. Бобок, та А. А. Кобозєва, "Теоретичні основи вдосконалення методу виявлення результатів клонування в цифровому зображенні в умовах додаткових збурних дій", *Сучасна спеціальна техніка*, 1, с. 29-39, 2018.
- [7] Д. Деммель, *Вычислительная линейная алгебра: теория и приложения*. Москва: Мир, 2001.
- [8] А. А. Кобозєва, и В. А. Хорошко, *Анализ информационной безопасности*. Киев: ГУИКТ, 2009.
- [9] Ф. Р. Гантмахер, *Теория матриц*. 5-е изд. Москва: Физматлит, 2004.
- [10] I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. del Bimbo, L. del Tongo, and G. Serra, "Copy-move forgery detection and localization by means of robust clustering with J-linkage", *Signal Processing*, 28 (6), pp. 659-669, 2013.
- [11] X. Pan, and S. Lyu, "Detecting image region duplication using SIFT features", in *Proc. IEEE Internat. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Dallas, 2010, pp. 1706-1709.
- [12] I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. del Bimbo, and G. Serra, "A SIFT-based forensic method for copy move attack detection and transformation recovery", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 6 (3), pp. 1099-1110, 2011.
- [13] P. Mishra, N. Mishra, S. Sharma, and R. Patel, "Region duplication forgery detection technique based on SURF and HAC", *The Scientific World Journal*, 6, pp. 1-8, 2013.
- [14] M. F. Hashmi, V. Anand, and A. G. Keskar, "Copy-move image forgery detection using efficient and robust method combining undecimated wavelet transform and scale invariant feature transform", in *AASRI Conf. on Circuit and Signal Processing*, 2014, pp. 84-91.
- [15] Diao M. Uliyan, Hamid A. Jalab, and Wahab Ainuddin W. Abdul, "Copy move image forgery detection using Hessian and center symmetric local binary pattern", *Proc. IEEE Conf. on Open Systems (ICOS)*, 2015, pp. 7-11.
- [16] Diao M. Uliyan, Hamid A. Jalab, Wahab Ainuddin W. Abdul, and Sadeghi Somayeh, "Image region duplication forgery detection based on angular radial partitioning and Harris key-points", *Symmetry*, 8 (7), pp. 56-65, 2016.

References

- Available: <https://doi.org/10.1007/s11265-019-01449-6>
- [6] A. A. Kobozieva, I. I. Bobok, "Theoretical bases for the improvement of the method of detection of the results of cloning in a digital image in conditions of additional perturbation actions", *Modern Special Technics*, 1, pp. 29-39, 2018 [in Ukrainian].
- [7] J. W. Demmel, *Applied numerical linear algebra*. Moscow: Mir, 2001 [in Russian].
- [8] A. A. Kobozieva, V. A. Khoroshko, *Analysis of information protection*. Kyiv: GUIKT, 2009 [in Russian].
- [9] F. R. Gantmacher, *Theory of matrices*. 5th ed. Moscow: Fismatlit, 2004 [in Russian].
- [10] I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. del Bimbo, L. del Tongo, and G. Serra, "Copy-move forgery detection and localization by means of robust clustering with J-linkage", *Signal Processing*, 28 (6), pp. 659-669, 2013.
- [11] Pan, X., Lyu, S. (2010). "Detecting image region duplication using SIFT features", in *Proc. 2010 IEEE Internat. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-2010)*. Dallas, pp. 1706-1709.
- [12] I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. del Bimbo, and G. Serra, "A SIFT-based forensic method for copy move attack detection and transformation recovery", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 6 (3), pp. 1099-1110, 2011.
- [13] P. Mishra, N. Mishra, S. Sharma, and R. Patel, "Region duplication forgery detection technique based on SURF and HAC", *The Scientific World Journal*, 6, pp. 1-8, 2013.
- [14] M. F. Hashmi, V. Anand, and A. G. Keskar, "Copy-move image forgery detection using efficient and robust method combining undecimated wavelet transform and scale invariant feature transform", in *AASRI Conf. on Circuit and Signal Processing*, 2014, pp. 84-91.
- [15] Diaa M. Uliyan, Hamid A. Jalab, and Wahab Ainuddin W. Abdul, "Copy move image forgery detection using Hessian and center symmetric local binary pattern", *Proc. IEEE Conf. on Open Systems (ICOS)*. Bandar Melaka, 2015, pp. 7-11.
- [16] Diaa M. Uliyan, Hamid A. Jalab, Wahab Ainuddin W. Abdul, and Somayeh Sadeghi, "Image region duplication forgery detection based on angular radial partitioning and Harris key-points", *Symmetry*, 8 (7), pp. 56-65, 2016.

V. O. Khoroshko, *D. Tech. Sc., professor,*

National Aviation University

Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

I. I. Bobok, *Ph. D.,*

Odesa National Polytechnic University

Shevchenko ave., 1, Odesa, 65044, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR IDENTIFYING OF CLONING RESULTS IN A DIGITAL IMAGE

Cloning remains one of the most common tools used for unauthorized changes to digital images. Cloning is implemented in all modern graphic editors. Many experts in the field of information security are engaged in solving the problem of cloning detection, but this task has no final solution to date. A modification of the method for identifying cloning results in a digital image is proposed in the paper. The effectiveness of this method exceeds the efficiency of modern analogues. It remains effective when the cloned image is subjected to additional disturbing influences. These disturbing influences do not differ for the clone and prototype. Also, the method is effective when the size of the clone / prototype is small. The purpose of the modification of the method is to ensure its effectiveness under the conditions of certain geometric transformations to which the clone is subjected. These transformations are: reflection relative to the vertical and/or horizontal axis, rotation through an angle multiple of 90°, reflection relative to the diagonal (main, secondary) of the corresponding matrix. In this paper, the principle of constructing a matrix of minimal block differences is changing. This matrix is mapped to a digital image. It is the main subject of research in the method. The element of the matrix of minimal block differences reflects the smallest difference of a particular block from any other block of the

image. The difference between the blocks is calculated as the difference of their singular spectra. The singular spectrum of the matrix does not change during the geometric transformation. Advanced method has high efficiency. A value of TRP = 100 % indicates that when the method is running, skipping of cloned images does not occur. The improved method is also effective in identifying several clones that correspond to one prototype. Several clones experience different geometric transformations.

Keywords: *digital image, integrity violation, clone, prototype, geometric transformations, singular spectrum, matrix of minimal block differences.*