

СИСТЕМИ ТА МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.056.5

І.І. Бобок,

старший викладач кафедри інформатики і управління
захистом інформаційних систем Одеського національного
політехнічного університету, м. Одеса

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОРМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ В УМОВАХ ПОРУШЕННЯ ЙОГО ЦІЛІСНОСТІ

У роботі розглянуто новий загальний підхід до вирішення проблеми виявлення порушень цілісності цифрового зображення (ЦЗ), заснований на аналізі сингулярних чисел (СНЧ) і сингулярних векторів (СНВ) блоків матриці зображення, отриманих шляхом стандартної розбивки його матриці. Показано теоретично й підтверджено практично, що вектор, складений з СНЧ блоку B матриці ЦЗ, є більш чутливим до збурних дій, ніж вектор, складений з власних значень BB^T (B^TB), наслідком чого є більша чутливість до збурень пари векторів блоку, складеної з нормованого вектора його СНЧ і лівого/правого СНВ, що відповідає максимальному СНЧ, у порівнянні з чутливістю пари, де перший з векторів складений із квадратів СНЧ блоку. Використання цього факту дасть можливість для розробки ефективних методів і алгоритмів, що здійснюють експертизу цілісності ЦЗ, заснованих на вдосконаленому підході.

Ключові слова: цифрове зображення, сингулярні числа, сингулярні вектори, чутливість до збурних дій, порушення цілісності

В работе рассмотрен новый общий подход к решению проблемы выявления нарушений целостности цифрового изображения (ЦИ), основанный на анализе сингулярных чисел (СНЧ) и сингулярных векторов (СНВ) блоков матрицы изображения, полученных путем стандартного разбиения его матрицы. Показано теоретически и подтверждено практически, что вектор, составленный из СНЧ блока B матрицы ЦИ является более чувствительным к возмущающим воздействиям, чем вектор, составленный из собственных значений BB^T (B^TB), следствием чего является большая чувствительность к возмущениям пары векторов блока, составленной из нормированного вектора его СНЧ и левого/правого СНВ, отвечающего максимальному СНЧ, по сравнению с чувствительностью пары, где первый из векторов составлен из квадратов СНЧ блока. Использование этого факта даст возможность для разработки эффективных методов и алгоритмов, осуществляющих экспертизу целостности ЦИ, основанных на усовершенствованном подходе.

Ключевые слова: цифровое изображение, сингулярные числа, сингулярные векторы, чувствительность к возмущающим воздействиям, нарушение целостности.

© Бобок І.І., 2017

In this paper, a new general approach to solving the problem of detecting unauthorized changes in digital content was obtained. Proposed approach is based on the analysis of singular numbers and singular vectors of blocks of their matrices, obtained by standard partitioning. It is shown theoretically and practically, that vector composed of singular values of matrices block of digital image is more sensitive to disturbances than vector composed of eigenvalues of BB^T (B^TB). The consequence of this is that the pair of block vectors composed of normalized vector of its singular values and left/right singular vector, that corresponded to maximal singular value, is more sensitive to disturbances than the pair, where first vector is made up of squares of singular block values. The use of this fact will provide an opportunity for the development of effective methods and algorithms for examination of the integrity of digital images based on an improved approach.

Keywords: digital image, singular value, singular vector, sensitivity to disturbing influences, integrity violation

Вступ

Цілісність інформації є одним з основних критеріїв її безпеки. З урахуванням того, що специфікою сьогодення є безперервний розвиток інформаційних технологій, комп'ютерних наук, інформація часто представляється в цифровому вигляді. Прикладами цього є цифрові зображення (ЦЗ), цифрові відео, аудіо. Разом із відомими перевагами цифрової інформації виникає низка проблем, ігнорування яких може привести до значних негативних наслідків. Сьогодні, зустрічаючись з, на перший погляд, цікавою, важливою, потрібною інформацією, наприклад, в Інтернеті, не можна бути впевненим у її автентичності. Використання такої інформації з метою, що відрізняється від розважальної, неможливе без експертизи її цілісності, що свідчить про актуальність і важливість цієї експертизи.

Виявленню несанкціонованих змін ЦЗ присвячена велика кількість сучасних наукових праць, однак запропоновані в них методи з тих або інших причин не є задовільними, тому що не пропонують ефективного й остаточного розв'язання задачі [1–3].

Основи принципово нового загального підходу до організації перевірки цілісності ЦЗ, кадрів ЦВ недавно були розроблені в [4; 5]. Аналіз цілісності ЦЗ тут базується на дослідженні особливостей формальних параметрів блоків матриці ЦЗ, отриманих шляхом її стандартної розбивки. Основними аналізованими параметрами є: нормований вектор сингулярних чисел (СНЧ) блоку і його лівий і/або правий сингулярний вектор (СНВ), що відповідає максимальному СНЧ. Перспективність запропонованого підходу підтверджена високою ефективністю розробленого на його основі в [5] стеганоаналітичного методу. Подальше, але не остаточне вдосконалення підходу проведено нами в [6], де частково доведена доцільність використання попереднього перетворення у вигляді: BB^T (B^TB) матриці B блоку для уточнення базового співвідношення, що зв'язує формальні параметри блоку оригінального ЦЗ. Ця робота має доповнити теоретичні основи підходу й підтвердити доцільність запропонованих доповнень на практиці.

Мета статті й постановка завдань

Метою роботи є подальший розвиток нового підходу виявлення порушень цілісності ЦЗ, запропонованого в [4; 5], шляхом дослідження властивостей формальних параметрів зображення в умовах збурних дій.

Для досягнення мети в роботі вирішуються такі задачі:

1. Показати, що вектор, складений з СНЧ блоку матриці ЦЗ є більш чутливим до збурних дій, ніж вектор, складений із власних значень BB^T (B^TB);
2. Знайти характерні особливості поведінки формальних параметрів, що визначають блок ЦЗ, в умовах збурних дій і їх відсутності.

Основна частина

В основі запропонованого в [4; 5] підходу лежить доведена нечутливість до збурних дій трьох векторів, які визначаються для кожного $l \times l$ -блоку ЦЗ, що отримуються шляхом стандартного розбиття [7] його матриці: нормованого вектора СНЧ $\bar{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l) / \|(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)\|$, де $\sigma_i, i = \overline{1, l}$, – СНЧ блоку, лівого u_i , правого v_i СНВ, що відповідають максимальному СНЧ σ_1 . Для блоків оригінального ЦЗ встановлене співвідношення:

$$\angle(u_i, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_i, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^o, e_1), \quad (1)$$

яке показує, що кут між векторами u_i і $\bar{\sigma}$ ($\angle(u_i, \bar{\sigma})$), v_i і $\bar{\sigma}$ ($\angle(v_i, \bar{\sigma})$) для більшості $l \times l$ -блоків оригінального ЦЗ близький до кута між n -оптимальним вектором $n^o = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l$ простору R^l і першим вектором стандартного базису $e_1 = (1, 0, \dots, 0) \in R^l$ ($\angle(n^o, e_1)$). У [4; 5] обґрунтований вибір розміру блоку для експертизи цілісності ЦЗ запропонованим способом: $l=4$.

У [6] у рамках розвитку нового підходу виявлення порушень цілісності ЦЗ було запропоновано після попередньої розбивки матриці ЦЗ на 4×4 -блоки аналізувати не тільки формальні параметри самого блоку B , але й симетричних матриць, отриманих у результаті його перетворень: BB^T , B^TB . У [6] показано, що якщо $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_4 \geq 0$ – СНЧ B , то $\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \geq \sigma_3^2 \geq \sigma_4^2 \geq 0$ – власні значення, що збігаються з СНЧ, матриць BB^T , B^TB .

Нечутливість аналізованих векторів блоку для розглянутого підходу відіграє ключову роль, зниження цієї чутливості дасть можливість для збільшення ефективності підходу. Покажемо, що нормований вектор $\bar{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4) / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}$, що відповідає 4×4 -блоку B , будучи нечутливим, все ж таки буде мати більшу чутливість до збурних дій, ніж нормований вектор $\bar{\bar{\sigma}} = (\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2, \sigma_4^2) / \sqrt{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \sigma_3^4 + \sigma_4^4}$ СНЧ матриці BB^T (B^TB).

Нехай у результаті збурної дії блок зазнав збурення :

$$B + \Delta B = \bar{B}, \quad (2)$$

яке приведе до адекватних змін СНЧ через співвідношення [8]:

$$\max_{1 \leq i \leq 4} |\sigma_i(B) - \sigma_i(B + \Delta B)| \leq \|\Delta B\|_2, \quad (3)$$

де $\sigma_i(B) = \sigma_i$, $\sigma_i(B + \Delta B) = \bar{\sigma}_i$, $i = \overline{1,4}$, – СНЧ B і $\bar{B}$ відповідно, $\|\bullet\|_2$ – спектральна матрична норма.

Збурення ΔB відібіється й на блоці BB^T (B^TB), який стане: $\bar{B}\bar{B}^T$ ($\bar{B}^T\bar{B}$). Відповідні нормовані вектори СНЧ для $\bar{B}$ і $\bar{B}\bar{B}^T$ ($\bar{B}^T\bar{B}$) позначимо:

$$\bar{\sigma}_B = (\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3, \bar{\sigma}_4) / \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2 + \bar{\sigma}_4^2},$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_B = (\bar{\sigma}_1^2, \bar{\sigma}_2^2, \bar{\sigma}_3^2, \bar{\sigma}_4^2) / \sqrt{\bar{\sigma}_1^4 + \bar{\sigma}_2^4 + \bar{\sigma}_3^4 + \bar{\sigma}_4^4}.$$

Чутливість нормованого вектора $\bar{\sigma}$ кількісно визначиться кутом його повороту в результаті збурної дії – кутом α між векторами $\bar{\sigma}$ і $\bar{\sigma}_B$. Аналогічно чутливість $\bar{\bar{\sigma}}$ визначиться кутом β між векторами $\bar{\bar{\sigma}}$ і $\bar{\bar{\sigma}}_B$.

Маємо:

$$\cos \alpha = \frac{(\bar{\sigma}, \bar{\sigma}_B)}{\|\bar{\sigma}\| \|\bar{\sigma}_B\|} = \frac{\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2 + \bar{\sigma}_4^2}},$$

$$\cos \beta = \frac{(\bar{\bar{\sigma}}, \bar{\bar{\sigma}}_B)}{\|\bar{\bar{\sigma}}\| \|\bar{\bar{\sigma}}_B\|} = \frac{\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2}{\sqrt{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \sigma_3^4 + \sigma_4^4} \sqrt{\bar{\sigma}_1^4 + \bar{\sigma}_2^4 + \bar{\sigma}_3^4 + \bar{\sigma}_4^4}},$$

де $(\bullet, \bullet)$ – скалярний добуток векторів-аргументів.

Знайдемо відношення $\frac{\cos \beta}{\cos \alpha}$ і покажемо, що $\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \geq 1$. Це буде означати, що

$$\beta \leq \alpha, \quad (4)$$

тобто реакція на збурну дію вектора $\bar{\bar{\sigma}}$ буде меншою, ніж реакція $\bar{\sigma}$, що і буде означати меншу чутливість $\bar{\bar{\sigma}}$, в порівнянні з $\bar{\sigma}$.

Маємо:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} = \frac{(\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2) \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2 + \bar{\sigma}_4^2}}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \sqrt{\sigma_1^4 + \sigma_2^4 + \sigma_3^4 + \sigma_4^4} \cdot \sqrt{\bar{\sigma}_1^4 + \bar{\sigma}_2^4 + \bar{\sigma}_3^4 + \bar{\sigma}_4^4}} \quad (5)$$

Показано в [9], що енергія E сигналу, формальним представленням якого є матриця F розміру $m \times n$, обчислюється за формулою:

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2, \quad (6)$$

де $f_{ij}, i=\overline{1,m}, j=\overline{1,n}$, – елементи F , а $\sigma_i, i=\overline{1,n}$, – її СНЧ. З (6) безпосередньо випливає, що

$$\|F\|_F = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

де $\|\bullet\|_F$ – матрична норма Фробеніуса.

Скориставшись формулою (7), перетворимо праву частину (5):

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} = \frac{(\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|BB^T\|_F \|\bar{B}\bar{B}^T\|_F}. \quad (8)$$

Оскільки для норми Фробеніуса існують співвідношення [8]:

$$\|BB^T\|_F \leq \|B\|_F \|B^T\|_F, \quad \|\bar{B}\bar{B}^T\|_F \leq \|\bar{B}\|_F \|\bar{B}^T\|_F,$$

а також

$$\|B^T\|_F = \|B\|_F, \quad \|\bar{B}^T\|_F = \|\bar{B}\|_F,$$

то для (8) отримаємо:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} = \frac{(\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|BB^T\|_F \|\bar{B}\bar{B}^T\|_F} \geq \frac{(\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|B\|_F^2 \|\bar{B}\|_F^2},$$

тобто

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \geq \frac{(\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2)}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F}. \quad (9)$$

Продовжуючи (9), маємо:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \geq \frac{(\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2 + \sigma_2^2 \bar{\sigma}_2^2 + \sigma_3^2 \bar{\sigma}_3^2 + \sigma_4^2 \bar{\sigma}_4^2)}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F} \geq \frac{\sigma_1^2 \bar{\sigma}_1^2}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F}. \quad (10)$$

З урахуванням визначення спектральної матричної норми [8]:

$$\sigma_1^2 = \|B\|_2^2, \quad \bar{\sigma}_1^2 = \|\bar{B}\|_2^2,$$

з (10) випливає:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \geq \frac{\|B\|_2^2 \|\bar{B}\|_2^2}{(\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4) \|B\|_F \|\bar{B}\|_F}. \quad (11)$$

У $l \times l$ -блоках матриці ЦЗ $\sigma_1 \gg \sigma_i, 1 < i \leq l$ [9], зокрема для 4×4 -блоків:

$$\sigma_1 \gg \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4, \quad (12)$$

а це означає, що величина значення $\sigma_1 \bar{\sigma}_1 + \sigma_2 \bar{\sigma}_2 + \sigma_3 \bar{\sigma}_3 + \sigma_4 \bar{\sigma}_4$ у знаменнику (11) для переважної більшості блоків ЦЗ порівнюється зі значенням $\sigma_1 \bar{\sigma}_1$.

З урахуванням (12) з (7) отримуємо, що $\|B\|_F$ порівнянна з σ_1 , тобто з $\|B\|_2$, а $\|\bar{B}\|_F$ порівнянна з $\bar{\sigma}_1$, тобто з $\|\bar{B}\|_2$. Тоді з (11) для більшості блоків ЦЗ отримуємо:

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \geq \frac{\|B\|_2^2 \|\bar{B}\|_2^2}{\sigma_1 \bar{\sigma}_1 \|B\|_2 \|\bar{B}\|_2} = 1.$$

Таким чином, виконується (4), і вектор $\bar{\sigma}$ для більшості блоків ЦЗ є менш чутливим до збурних дій, ніж вектор $\bar{\sigma}$.

Для практичного підтвердження співвідношення (4), отриманого теоретично, у середовищі Matlab був проведений обчислювальний експеримент, у якому було задіяно 400 ЦЗ з бази NRCS [10], що є традиційною при роботі з ЦЗ, а також зображення, отримані непрофесійними відеокамерами. Далі ця множина зображень називається експериментальною множиною (ЕМ). У ході експерименту оригінальні ЦЗ (розміром пікселів) зазнавали збурних дій: накладання гауссівського шуму (з нульовим 800×800 математичним очікуванням і $D \in \{0.00001, 0.0001, 0.0005, 0.005, 0.01\}$), мультиплікативного шуму ($D \in \{0.0001, 0.0001, 0.001, 0.01\}$), пуассонівського шуму. Після цього оригінальне й відповідне збурене ЦЗ розбивалися стандартним чином на 4×4 -блоки. Для кожної пари відповідних блоків будувалися вектори σ , σ (оригінальне ЦЗ) і σ_B , σ_B (збурене ЦЗ), знаходилися кути α (між σ і σ_B) і β (між σ і σ_B). Для кожної пари ЦЗ (оригінальне і збурене) обчислювалась кількість блоків t , для яких $\beta > \alpha$, тобто таких блоків, для яких не існувало співвідношення (4). У результаті експерименту встановлено, що для переважної більшості ЦЗ (83 %) $t = 0$. Для більшості із зображень, що залишилися, значення t змінювалося від 1 до 34, для 7 ЦЗ $t \in \{286, 311, 456, 461, 487, 491, 512\}$, що становить

лише 1 % від загальної кількості блоків ЦЗ. Значення $t \neq 0$ спостерігалось у випадках, коли збурене ЦЗ було результатом малої збурної дії ΔB .

Таким чином, у результаті обчислювального експерименту практично підтверджується співвідношення (4). Наявність ЦЗ, для яких $t \neq 0$, пояснюється особливостями машинної арифметики – наявністю округлень, які у випадку дуже незначної збурної дії і приводять до отриманих результатів. Дійсно, при малому ΔB в формулі (2), зміни СНЧ блоку B також виявляться дуже незначними через (3), тобто (5)

$$\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \approx 1. \quad (13)$$

Співвідношення (13) на практиці приведе до того, що $\alpha \approx \beta \approx 0$. У цих умовах похибки округлень відіграють істотну роль: у деяких блоках може виявитися $\beta > \alpha$, що не пов'язано з порушенням встановленої відносної картини чутливостей до збурень векторів σ і $\bar{\sigma}$, а є результатом особливостей машинної арифметики.

Отриманий результат приводить до такого висновку. Для блоку зображення пара векторів u_1, σ виявиться більш стійкою до збурних дій, ніж пара $u_1, \bar{\sigma}$, тому що в результаті збурної дії кут між u_1, σ , який далі позначається як $\angle(u_1, \sigma)$, і який в більшості блоків оригінального ЦЗ дорівнює 60 градусам відповідно з (1)

(оскільки в просторі R^4 n -оптимальний вектор має вигляд: $n^0 = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)^T$, а

$$\angle(n^0, e_1) = 60^\circ [4-6], \text{ зміниться менше, ніж кут між } u_1, \bar{\sigma} \text{ (} \angle(u_1, \bar{\sigma}) \text{)}.$$

Таким чином, стає очевидним, що розпізнавання оригінального ЦЗ доцільніше проводити, аналізуючи величини кутів $\angle(u_1, \bar{\sigma})$ в блоках його матриці, замість $\angle(u_1, \sigma)$. Дійсно, якщо позначити через $\bar{k}$ – кількість блоків ЦЗ, для яких $\angle(u_1, \bar{\sigma}) = 60^\circ$, а через $\bar{\bar{k}}$ – кількість блоків, для яких $\angle(u_1, \sigma) = 60^\circ$, то із зазначеного вище випливає, що відношення між цими кількостями для модифікованого ЦЗ повинно бути більше, ніж для оригінального. Для практичної перевірки отриманого твердження був проведений обчислювальний експеримент, у ході якого оригінальні ЦЗ з ЕМ зазнавали різних збурних дій, які визначені вище, після чого оригінальне й відповідне збурене ЦЗ розбивалися стандартним чином на 4×4 – блоки. Для кожного блоку обчислювалися $\angle(u_1, \sigma)$, $\angle(u_1, \bar{\sigma})$, після чого будувалися гістограми з кроком 1 градус значень кутів, з яких і визначалися значення $\bar{k}$ і $\bar{\bar{k}}$. Для кожного ЦЗ обчислювалося значення $K = \frac{\bar{\bar{k}} - \bar{k}}{\bar{k}} \cdot 100\%$, після чого знаходились:

$K_{\max}$, $K_{\min}$, K_s – максимальне, мінімальне, середнє значення K по ЦЗ в групі оригінальних, а також у кожній групі ЦЗ, підданих конкретній збурній дії

(конкретному виду шуму з певними параметрами). Для оригінальних ЦЗ було отримано: $K_{\min} = 1.9\%$, $K_{\max} = 192.0\%$, $K_s = 23.0\%$. Результати експерименту для збурених ЦЗ з використанням гауссівського й мультиплікативного шуму наведені в табл. 1, 2. Для пуассонівського шуму були отримані такі результати: $K_{\min} = 71.1\%$, $K_{\max} = 704.9\%$, $K_s = 325.1\%$.

Таблиця 1

Значення параметру K для збурених ЦЗ, що зазнали накладання гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і різними значеннями D (%)

	$D=0.000001$	$D=0.00001$	$D=0.0001$	$D=0.001$	$D=0.005$	$D=0.01$
$K_{\max}$	193.1	198.0	324.7	515.2	782.0	769.2
$K_{\min}$	2.0	2.1	4.0	52.6	78.7	63.0
K_s	23.8	30.4	73.3	269.6	389.3	401.9

Таблиця 2

Значення параметру K для збурених ЦЗ, що зазнали накладання мультиплікативного шуму з різними значеннями D (%)

	$D=0.00001$	$D=0.0001$	$D=0.001$	$D=0.01$	$D=0.05$	$D=0.1$
$K_{\max}$	196.0	227.3	446.9	585.6	648.4	572.6
$K_{\min}$	3.9	14.2	27.9	91.8	162.2	183.9
K_s	24.2	46.8	185.6	289.1	362.3	359.6

У результаті експерименту було встановлено, що хоча більшість блоків у більшості ЦЗ мають $\angle(u_1, \bar{\sigma}) = 60^\circ$ і $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}}) = 60^\circ$ (моди відповідних гістограм значень кутів дорівнюють 60 градусів), але, як і передбачалося, у ЦЗ блоків, для яких $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}}) = 60^\circ$ значно більше. Типовий вид гістограм значень $\angle(u_1, \bar{\sigma})$ і $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}})$ для конкретного оригінального ЦЗ представлений на рис. 1. Моді обох гістограм досягаються в 60 градусах, але значення гістограм у модах суттєво відрізняються: 11909 і 16489 для $\angle(u_1, \bar{\sigma})$ і $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}})$ відповідно, $K = 38\%$. У випадку неоригінального ЦЗ якісна картина гістограм не змінюється: хоча кількість блоків, для яких $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}}) = 60^\circ$, при збуренні ЦЗ зменшиться, як і кількість блоків, для яких $\angle(u_1, \bar{\sigma}) = 60^\circ$, але це зменшення у відносному плані в першому випадку буде набагато меншим, ніж в другому, що є очікуваним і приводить до збільшення параметра K для збуреного ЦЗ, в порівнянні з оригінальним (див. рис. 2, де кількість блоків ЦЗ після збурної дії, для яких $\angle(u_1, \bar{\sigma}) = 60^\circ$, зменшилась з 11909 до 8428, а кількість блоків, для яких $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}}) = 60^\circ$, з 16487 до 15334; при цьому значення K зросло з 38 % до 82 %).

СИСТЕМИ ТА МЕТОДИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

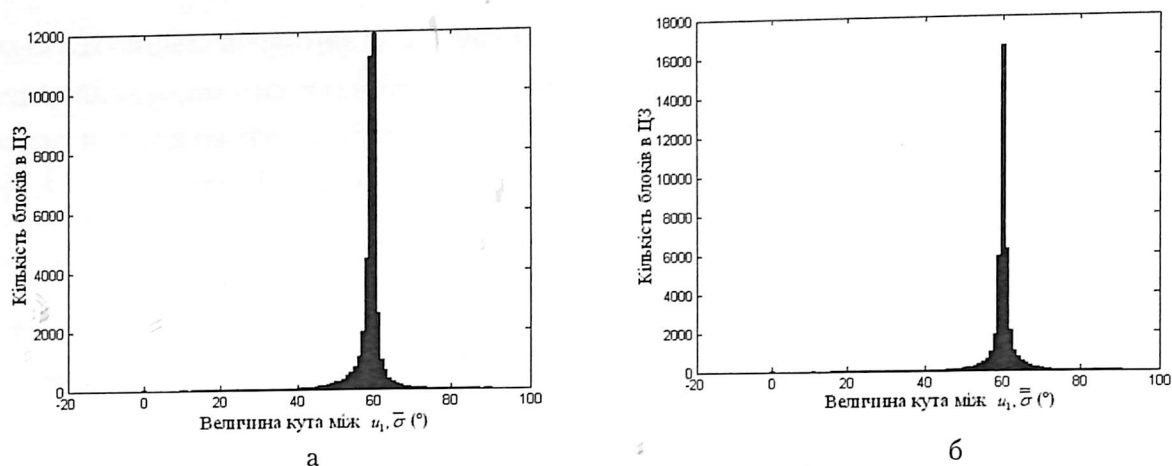


Рис. 1. Гістограми значень кутів в 4×4 – блоках оригінального ЦЗ:
а – $\angle(u_1, \bar{\sigma})$; б – $\angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}})$

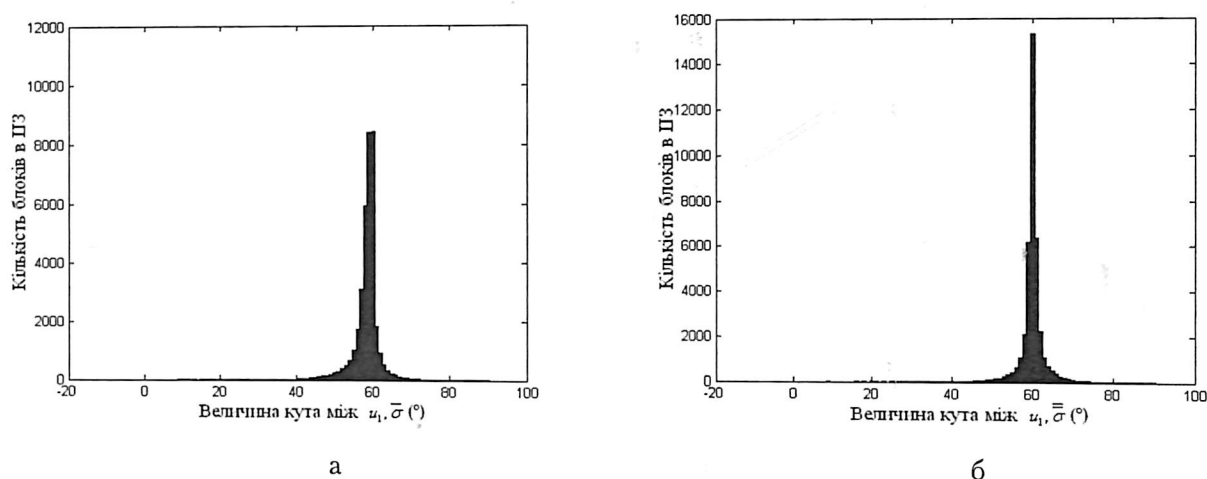


Рис. 2. Гістограми значень кутів в 4×4 – блоках збуреного шляхом накладання гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і $D=0.000001$ ЦЗ:

$$\text{а} - \angle(u_1, \bar{\sigma}); \text{б} - \angle(u_1, \bar{\bar{\sigma}})$$

У ході експерименту встановлено, що практично для всіх збурених ЦЗ значення параметра K було більше, ніж для відповідних оригінальних, що перебуває в повній відповідності з теоретичними висновками, отриманими вище. Виняток склали: 12 % ЦЗ, що зазнали накладання гауссівського шуму з $D=0.000001$ (тут максимальне зменшення значення K в результаті збурної дії склало менше 1 %); 3 % ЦЗ, що зазнали накладання мультиплікативного шуму з $D=0.000001$ (максимальне зменшення значення K тут також склало менше 1 %). Для переважної більшості ЦЗ відбувалося збільшення параметра K зі зростанням величини збурної дії. Типова картина для конкретного ЦЗ представлена на рис. 3, де значення $D=0$ відповідає оригінальному ЦЗ.

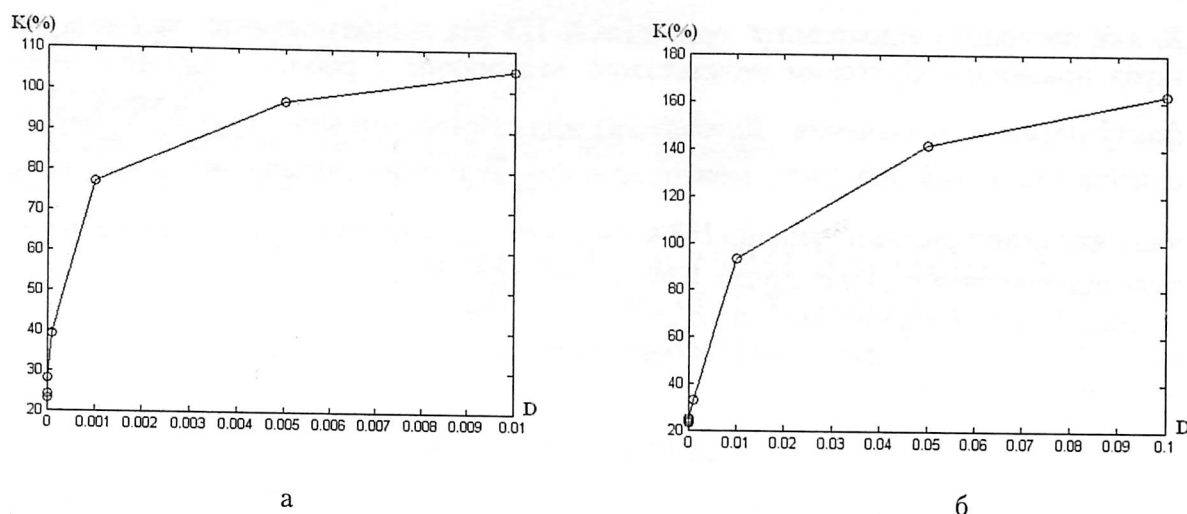


Рис. 3. Залежність для конкретного ЦЗ значення K від параметра D збурної дії, в якості якої використовується: а – гауссівський шум; б – мультиплікативний шум

Проведений обчислювальний експеримент на практиці підтвердив отриманий теоретичним шляхом висновок про більшу стійкість до збурних дій пари векторів u_1, σ , в порівнянні з парою $u_1, \bar{\sigma}$ блоку. Наслідком цього є наступний очікуваний у зв'язку із зазначеним вище встановлений факт. Для оригінальних ЦЗ мода гістограми значень кутів $\angle(u_1, \bar{\sigma})$ для 4×4 -блоків приймала тільки одне значення – 60 градусів, тоді як мода гістограми кутів $\angle(u_1, \sigma)$ належала множині $\{56, 57, 58, 59, 60\}$. У результаті збурної дії для окремих ЦЗ мода гістограми $\angle(u_1, \bar{\sigma})$ змінювалась, часто залишаючись у межах тої ж множини $\{56, 57, 58, 59, 60\}$, що не дає принципової можливості розділити оригінальне й збурене ЦЗ з врахуванням тільки згаданого параметра. Тут потрібні додаткові дослідження із залученням додаткових параметрів і характеристик зображення. Водночас зміна моди гістограми $\angle(u_1, \bar{\sigma})$, її відміна від 60 градусів, однозначно свідчить про порушення цілісності розглянутого ЦЗ. У проведеному обчислювальному експерименті таких ЦЗ виявилось понад 20 %.

Висновки

У роботі отримав подальший розвиток новий загальний підхід до вирішення проблеми виявлення порушень цілісності ЦЗ, заснований на аналізі СНЧ і СНВ блоків матриці зображення.

Показано теоретично й підтверджено практично, що вектор, складений з СНЧ блоку матриці ЦЗ, є більш чутливим до збурних дій, ніж вектор, складений із власних значень BB^T (B^TB), наслідком чого є більша чутливість до збурень пари векторів блоку, складеної з нормованого вектора його СНЧ і лівого/правого СНВ, що відповідає максимальному СНЧ, у порівнянні з чутливістю пари, де перший з векторів складений із квадратів СНЧ блоку. Встановлено, що для ЦЗ відбувається збільшення параметра, що відображає відносну перевагу кількості блоків, для яких $\angle(u_1, \bar{\sigma}) = 60^\circ$, над блоками, для яких $\angle(u_1, \sigma) = 60^\circ$, зі зростанням сили збурної дії, що може бути використане при розробці методу виявлення порушення цілісності ЦЗ після встановлення порогового значення для величини

К, яке дозволить відокремити оригінальні ЦЗ від неоригінальних, над чим ми зараз працюємо. Суттєвим результатом, отриманим у роботі, є встановлення факту незмінного значення (60 градусів) моди гістограми значень $\angle(u_1, \sigma)$ блоків оригінального ЦЗ, що дасть можливість без будь-яких додаткових досліджень виділяти неавторизовано змінені ЦЗ в тому випадку, якщо мода гістограми $\angle(u_1, \sigma)$ буде відрізнятися від 60 градусів. При проведенні обчислювального експерименту таких зображень виявилось більше 20 % серед усіх, цілісність яких була порушена, що свідчить про значимість встановленого факту для його практичного використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rey C., Dugelay J.-L. A survey of watermarking algorithms for image authentication / C. Rey. EURASIP J. Appl. Signal Process. 2002. № 1. С. 613–621.
2. Amerini I., Ballan L., Caldelli R., A. del Bimbo, L. del Tongo, Serra G. Copy-move forgery detection and localization by means of robust clustering with J-linkage. Signal Processing. 2013. Т. 28. № 6. С. 659–669.
3. Farid H. Image Forgery Detection. IEEE Signal processing magazine. 2009. С. 16–25.
4. Кобозева А.А. Основы общего подхода к разработке универсальных стеганоаналитических методов для цифровых изображений. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. Вип. 2(44). С. 136–146.
5. Kobozeva A.A., Bobok I.I., Garbuz A.I. General Principles of Integrity Checking of Digital Images and Application for Steganalysis. Transport and Telecommunication. 2016. Vol. 17, Issue 2. PP. 128–137.
6. Бобок, И.И. Теоретическое развитие общего подхода к проблеме выявления нарушений целостности цифровых контентов, основанного на анализе полного набора формальных параметров. Информатика та математичні методи в моделюванні. 2017. № 3. С. 156–163.
7. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений; пер. с англ. П.А. Чочиа. Москва: Техносфера, 2006. 1070 с.
8. Деммель Д. Вычислительная линейная алгебра: теория и приложения; пер. с англ. Х.Д. Икрамова. Москва: Мир, 2001. 430 с.
9. Кобозева А.А., Хорошко В.А. Анализ информационной безопасности: монография. Киев: ГУИКТ, 2009. 251 с.
10. NRCS Photo Gallery: United States Department of Agriculture. Washington, USA. URL: <http://photogallery.nrcs.usda.gov> (дата звернення: 26.07.2017).

Отримано 06.11.2017

Рецензент Єрохін В.Ф., д.т.н., проф.