

DOI: [10.18372/2225-5036.23.12122](https://doi.org/10.18372/2225-5036.23.12122)

ОСОБЛИВОСТІ НОВОГО ПІДХОДУ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕНЬ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ В РІЗНИХ ФОРМАТАХ ЗБЕРЕЖЕННЯ

Алла Кобозєва, Іван Бобок

Одеський національний політехнічний університет, Україна



КОБОЗЄВА Алла Анатоліївна, д.т.н.

Освіта: Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова.

Посада: завідувач кафедри інформатики і управління захистом інформаційних систем з 2009 року.

Наукові інтереси: інформаційна безпека, стеганографія, стеганоаналіз, обчислювальна та дискретна математика.

Публікації: більше 200 наукових публікацій, серед яких монографії, підручники, наукові статті, патенти.

E-mail: alla_kobozeva@ukr.net



БОБОК Іван Ігорович, к.т.н.

Рік та місце народження: 1987 рік, м. Одеса, Україна.

Освіта: Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова, 2009 рік.

Посада: старший викладач кафедри інформатики і управління захистом інформаційних систем з 2011 року.

Наукові інтереси: інформаційна безпека, стеганографія, стеганоаналіз.

Публікації: більше 20 наукових публікацій, серед яких монографії, статті у рецензованих вітчизняних та закордонних наукових журналах.

E-mail: onu_metal@ukr.net

Анотація. У даній роботі з урахуванням високого рівня розвитку електронно-обчислювальної техніки, інформаційних технологій актуальною є проблема забезпечення якісної перевірки цілісності, розробки ефективних методів виявлення її порушень у цифрових зображеннях (ЦЗ). Існуючі методи по тим або іншим причинам не забезпечують задовільного розв'язку згаданої проблеми, часто орієнтовані на особливості формату збереження аналізованого ЦЗ. Нещодавно авторами був запропонований принципово новий перспективний підхід до виявлення результатів несанкціонованих змін ЦЗ, заснований на аналізі сингулярних чисел і сингулярних векторів блоків його матриці. В даній роботі проведений аналіз особливостей запропонованого підходу до розв'язку проблеми, що розглядається, залежно від формату (з/без втрат) збереження ЦЗ. Встановлено, що основні положення підходу є універсальними в сенсі формату аналізованого ЦЗ; у випадку, якщо розглядаються відповідні зображення, що відрізняються лише форматом, більш чутливими до збурних дій є розглянуті формальні параметри блоків ЦЗ, збережених із втратами. Отримані результати для груп відповідних ЦЗ в різних форматах (з/ без втрат) можуть бути використані при розробці методу виявлення ЦЗ, Perezбережених з формату із втратами у формат без втрат, що є актуальним для процесу проведення стеганоаналізу.

Ключові слова: цифрове зображення, формат збереження, порушення цілісності, сингулярні числа, сингулярні вектори, чутливість, збурна дія.

Вступ

Особливістю сучасного інформаційного простору є широке використання цифрових контентів. Стрімкий розвиток електронно-обчислювальної техніки, інформаційних технологій привели до небувалої легкості здійснення неавторизованих модифікацій таких контентів, зокрема, цифрових зображень (ЦЗ).

Сучасні програмні інструменти, середовища, порівняно низька вартість апаратного й програмно-

го забезпечення, високий рівень кваліфікації фахівців в області комп'ютерних наук і просто користуваців дозволяють настільки якісно проводити зміни в ЦЗ, відео, що виявити їх часто стає неможливим [1-3]. При цьому високопрофесійні підробки цифрових контентів можуть привести до серйозних негативних наслідків при використанні їх у суді, пресі, науці як для окремо взятих людей, так і для груп людей, об'єднаних певними цілями, а також суспільства в цілому. В силу цього актуальною зараз є проблема забезпечення перевірки цілісності, розробки ефективних

методів і алгоритмів виявлення її порушень в цифрових контентах, зокрема ЦЗ, оскільки існуючі методи з тих чи інших причин не є задовільними, зокрема, вони часто мають різну ефективність в умовах різних форматів збереження (з/без втрат) досліджуваного зображення чи взагалі орієнтовані лише на конкретні формати [4-7].

Аналіз існуючих досліджень і постановка завдання

Усі методи виявлення порушень цілісності ЦЗ з урахуванням необхідності наявності інформації про оригінальне зображення можуть бути розділені на активні й пасивні (сліпі) [3,5], для організації роботи яких відповідно потрібна або не потрібна інформація про оригінальне зображення. Більшість з активних методів використовують цифровий підпис або цифрові водяні знаки (ЦВЗ), що є значимим недоліком і обмежує їхнє застосування [5], оскільки вбудова будь-якої додаткової інформації в ЦЗ вже порушує його цілісність, вимагає безпосереднього людського втручання або наявності фото-, відеокamera, оснащеної спеціальними технічними можливостями, які в багатьох камерах на сьогоднішній день відсутні. Крім того, для ЦВЗ можливі різні атаки, що приводять до їхнього руйнування (зміни), тим самим знищуючи необхідну для розв'язку задачі, що розглядається в роботі, інформацію про зображення.

Виходячи з перерахованого вище, на сьогоднішній день перевагу для розв'язку задачі, що розглядається, мають сліпі методи, хоча організація «сліпого» детектування результатів порушення цілісності ЦЗ є більш складною. Існуючі на сьогодні методи мають низку неусунутих дотепер недоліків, серед яких часто виступає орієнтованість на формат, у якому збережені ЦЗ [5,8], що значно звужує область їх застосування.

Основи принципово нового «сліпого» загального підходу до організації перевірки цілісності ЦЗ, ЦВ, заснованого на аналізі сингулярних чисел (СНЧ) і сингулярних векторів (СНВ) $l \times l$ -блоків, що не перетинаються, матриці F цифрового контенту, отриманих за допомогою стандартного розбиття F , нещодавно були запропоновані в [9,10] та розвинуті в [11].

Основою підходу є встановлене для блоків оригінального ЦЗ співвідношення:

$$\angle(\mathbf{u}_1, \bar{\boldsymbol{\sigma}}) \approx \angle(\mathbf{v}_1, \bar{\boldsymbol{\sigma}}) \approx \angle(\mathbf{n}^0, \mathbf{e}_1), \quad (1)$$

де $\mathbf{u}_1, \mathbf{v}_1$ - відповідно лівий і правий нормовані лексикографічно додатні СНВ $l \times l$ -блоку \mathbf{B} матриці F , що відповідають його максимальному СНЧ σ_1 ; $\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \boldsymbol{\sigma} / \|\boldsymbol{\sigma}\|$, при цьому $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l)^T \in R^l$ - вектор, складений з l СНЧ \mathbf{B} $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$, $\mathbf{n}^0 = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l$ - n -оптимальний вектор простору R^l , $\mathbf{e}_1 = (1, 0, \dots, 0) \in R^l$ - перший вектор стандартного базису R^l .

Співвідношення (1) встановлює зв'язок величин кутів між векторами \mathbf{u}_1 і $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ ($\angle(\mathbf{u}_1, \bar{\boldsymbol{\sigma}})$), \mathbf{v}_1 і $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$

($\angle(\mathbf{v}_1, \bar{\boldsymbol{\sigma}})$), \mathbf{n}^0 і \mathbf{e}_1 ($\angle(\mathbf{n}^0, \mathbf{e}_1)$) блоку \mathbf{B} , показуючи, що для більшості $l \times l$ -блоків оригінального ЦЗ ці кути мало відрізняються один від одного. Наближена рівність (1) заснована на доведеній в [9,10] близькості нормованих векторів $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ і \mathbf{e}_1 , \mathbf{u}_1 і \mathbf{n}^0 , \mathbf{v}_1 і \mathbf{n}^0 : кути між відповідними векторами близькі до нуля в більшості блоків оригінального ЦЗ. Порушення (1) в результаті неавторизованих змін зображення (збурних дій) є показником порушення його цілісності в [9, 10].

Перспективність нового підходу підтверджена шляхом розробки на його основі нового стеганоаналітичного методу в [10], ефективність якого перевищує ефективність сучасних аналогів. Але до цього моменту не була детально досліджена наявність/відсутність залежності ефективності запропонованого підходу від формату досліджуваного ЦЗ, хоча результати обчислювальних експериментів, наведені в [10], говорять про загальність підходу в сенсі наявності/відсутності втрат при збереженні ЦЗ.

Метою роботи є детальний аналіз особливостей згаданого підходу до розв'язку проблеми виявлення порушень цілісності цифрових зображень у форматах з/без втрат (ФзВ/ФбВ). Результати такого дослідження дадуть можливість обмежити/не обмежувати область ефективного застосування підходу.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі: визначити залежність/незалежність від формату збереження (з/без втрат) чутливості формальних параметрів блоків ЦЗ, що фігурують в (1), до збурних дій (ЗД): правого й лівого СНВ, що відповідають максимальному СНЧ, нормованого вектора СНЧ; розв'язок поставленої задачі провести як для відповідних ЦЗ в різних форматах, так і для ЦЗ, які не є відповідними.

Основна частина дослідження

Не обмежуючи спільності міркувань, далі для визначеності як ФбВ використовується Tif, а як ФзВ Jpeg. Для Jpeg розглядаються коефіцієнти якості $QF \in \{65, 75, 85\}$ як найбільш часто й широко використовувані [12].

В [9,10] обґрунтований вибір розміру блоку, найбільш прийнятний з погляду точності (1): $l = 4$, який розглядається в даній роботі.

СНЧ блоків ЦЗ, збереженого в ФбВ, мають певні особливості в порівнянні з СНЧ ЦЗ в ФзВ. Далі будемо називати ЦЗ, що відрізняються тільки форматом їх збереження, відповідними. Оскільки стиск ЦЗ відбувається за рахунок квантування й наступного округлення частотних коефіцієнтів, то це за рахунок особливостей матриць квантування [12] приводить до зменшення внеску високочастотної й (можливо) середньо-частотної складових у стисненому ЦЗ, у порівнянні з відповідним йому, але у ФбВ. Враховуючи зв'язок частотного й сингулярного спектрів матриці/блоку матриці, що відповідає ЦЗ [13], а саме, що сингулярні трійки з максимальними СНЧ відповідають, головним чином, низькочастотній складовій сигналу, а середньо- і високочастотним складовим відповідають, головним чином, сингулярні трійки з СНЧ, середніми й найменшими за значенням, то стиск ЦЗ у 4×4 -блоці очевидно буде при-

водити до зменшення сукупного внеску $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$, який виражається відповідно до формули [13]:

$$\sum_{u=0}^3 \sum_{v=0}^3 P(u, v) = \sum_{i=1}^4 \sigma_i^2,$$

де $P(u, v), u = \overline{0, 3}, v = \overline{0, 3}$, – енергетичний спектр блоку **B** [12], як $\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$, в блоці стиснутого ЦЗ, у порівнянні з їхнім внеском у відповідному

блоці відповідного ЦЗ в ФБВ, при цьому σ_1 змінюється незначно при використанні Jpeg з $QF \in \{65, 75, 85\}$. В табл. 1 наведені приклади сингулярних спектрів випадково обраних блоків у різних парах відповідних ЦЗ, які спочатку зберігалися у ФБВ, а потім були Perezбережені в ФЗВ (ФЗВ – Jpeg з $QF = 75$).

Сингулярні спектри 4×4-блоків ЦЗ в різних форматах збереження Таблиця 1

ЦЗ	Блок ЦЗ в ФБВ		Відповідний блок ЦЗ в ФЗВ	
	Сингулярний спектр	$\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$	Сингулярний спектр	$\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2$
1	992,7711; 1,4424; 0,6928; 0,0081	2,5606	992,0000; 0; 0; 0	0
2	732,2567; 3,8380; 0,8782; 0,2270	15,5530	733,2530; 1,0000; 0,6420; 0,3905	1,5647
3	206,0885; 9,6091; 1,7961; 0,9953	96,5514	204,0000; 0; 0; 0	0

Нехай **B** – 4×4-блок ЦЗ в ФБВ. Відповідний йому блок ЦЗ, Perezбереженого в ФЗВ, позначимо **B^J**. Відповідний **B^J** нормований вектор СНЧ позначимо $\bar{\sigma}^J$, СНЧ **B^J**: $\sigma_i^J, i = \overline{1, 4}$. Тоді:

$$\angle(\mathbf{e}_1, \bar{\sigma}) = \arccos \frac{\sigma_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}}, \quad (2)$$

$$\angle(\mathbf{e}_1, \bar{\sigma}^J) = \arccos \frac{\sigma_1^J}{\sqrt{(\sigma_1^J)^2 + (\sigma_2^J)^2 + (\sigma_3^J)^2 + (\sigma_4^J)^2}}. \quad (3)$$

З врахуванням того, що:

$$(\sigma_2^J)^2 + (\sigma_3^J)^2 + (\sigma_4^J)^2 < \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2, \text{ а } \sigma_1^J \approx \sigma_1,$$

маємо:

$$\frac{\sigma_1^J}{\sqrt{(\sigma_1^J)^2 + (\sigma_2^J)^2 + (\sigma_3^J)^2 + (\sigma_4^J)^2}} > \frac{\sigma_1}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}},$$

тоді з (2), (3):

$$\angle(\mathbf{e}_1, \bar{\sigma}^J) < \angle(\mathbf{e}_1, \bar{\sigma}). \quad (4)$$

Таким чином, кут між нормованим вектором СНЧ блоку в ЦЗ у ФЗВ менше аналогічного кута у відповідному блоці відповідного ЦЗ у ФБВ.

З врахуванням специфіки організації процесу стиску (формування елементів матриць квантування [12]) можна стверджувати, що чим нижче буде коефіцієнт якості QF , тобто чим сильніше буде стиск, тем менше буде сукупний енергетичний внесок другого, третього й четвертого СНЧ у відповідний блок ЦЗ, що приведе до зменшення кута між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 зі зменшенням QF .

Для практичної перевірки співвідношення (4) у середовищі Matlab був проведений обчислювальний експеримент, у якому були задіяні 300 ЦЗ розміром 800×800 пікселів, взятих як з бази NRCS [14], яка вважається традиційною при роботі з ЦЗ, так і отриманих непрофесійними фотокамерами. ЦЗ спочатку були збережені у форматі Tif, в ході експерименту Perezберігалися в Jpeg з $QF \in \{65, 75, 85\}$. Далі зазна-

чена множина ЦЗ називається експериментальною (ЕМ).

Для зручності викладу введемо наступні позначення: k – середнє по блоках значення величини кута між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 в блоці для зображення в ФБВ; $k_{(65)}, k_{(75)}, k_{(85)}$ – кількісні показники, аналогічні k , для ЦЗ в Jpeg з $QF \in \{65, 75, 85\}$ відповідно.

Результати обчислювального експерименту знаходяться у повній відповідності з (4): для всіх ЦЗ при Perezбереженні їх з Tif в Jpeg було зафіксовано зменшення середнього значення по блоках ЦЗ кута між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 :

$$k > k_{(85)} > k_{(75)} > k_{(65)}. \quad (5)$$

Мінімальне, максимальне, середнє значення $k, k_{(85)}, k_{(75)}, k_{(65)}$ по всім розглянутим ЦЗ, що позначаються відповідно $k_{\min}, k_{(i)\min}, k_{\max}, k_{(i)\max}, k_{sr}, k_{(i)sr}, i \in \{65, 75, 85\}$, наведені в табл. 2.

У ході експерименту для кожного конкретного ЦЗ у ФЗВ обчислювалося: $K_{(i)} = \frac{k}{k_{(i)}}$, $i \in \{65, 75, 85\}$, ви-

значалися мінімальне, максимальне, середнє значення $K_{(i)}, i \in \{65, 75, 85\}$, по ЦЗ з ЕМ, що позначаються відповідно: $K_{(i)\min}, K_{(i)\max}, K_{(i)sr}, i \in \{65, 75, 85\}$.

Результати проведеного експерименту (табл. 3), практично підтверджують (4), (5):

$$\begin{aligned} K_{(85)\min} &< K_{(75)\min} < K_{(65)\min}, \\ K_{(85)\max} &< K_{(75)\max} < K_{(65)\max}, \\ K_{(85)sr} &< K_{(75)sr} < K_{(65)sr}. \end{aligned}$$

Черговим практичним підтвердженням (4), (5) є систематичне незбільшення моди гістограми значень розглянутих кутів з одночасним збільшенням значення гістограми в моді при порівнянні цих гістограм для відповідних ЦЗ в форматі Tif і Jpeg (із зменшенням QF) (табл. 4). Типовий вид гістограм представлений на рис. 1.

Таким чином, співвідношення (1) буде виконуватися точніше для оригінального ЦЗ у ФЗВ, ніж для відповідного йому ЦЗ у ФБВ, у тому розумінні,

що в блоці ЦЗ у ФзВ кут між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 буде ближче до 0. Такий висновок знаходить підтвердження на практиці: у розглянутих ЦЗ з ЕМ у форматі Tif у середньому $\approx 32\%$ блоків мають $\angle(\mathbf{u}_1, \sigma) = 60^\circ$, у той час, як для відпо-

відних ЦЗ в Jpeg аналогічний параметр дорівнює $\approx 39,5\%$, $\approx 40,4\%$, $\approx 41,7\%$ для $QF \in \{65, 75, 85\}$ відповідно, збільшуючись, як і слід було очікувати, зі зменшенням значення QF.

Параметри, що характеризують значення кута (у градусах) між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 в 4×4-блоках ЦЗ з ЕМ Таблица 2

Формат ЦЗ	Tif	Jpeg, QF = 85	Jpeg, QF = 75	Jpeg, QF = 65
$k_{(i)_{\min}}$ (k_{\min} для Tif)	0,239	0,09	0,035	0,011
$k_{(i)_{\max}}$ (k_{\max} для Tif)	6,40	2,78	2,56	2,32
$k_{(i)_{sr}}$ (k_{sr} для Tif)	1,87	1,01	0,907	0,818

Параметри, що характеризують зменшення середнього значення по блоках ЦЗ кута між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 при Perezбереженні ЦЗ з Tif в Jpeg з $QF \in \{65, 75, 85\}$ Таблица 3

	Jpeg, QF = 85	Jpeg, QF = 75	Jpeg, QF = 65
$K_{(i)_{\min}}$	1,095596	1,102703	1,114754
$K_{(i)_{\max}}$	2,87472	7,118644	21,72727
$K_{(i)_{sr}}$	1,933565	2,507044	3,8571

Характер зміни моди гістограми значень кутів між нормованим вектором СНЧ і вектором \mathbf{e}_1 в 4×4-блоках ЦЗ з ЕМ при Perezбереженні зображення з Tif в Jpeg з $QF \in \{65, 75, 85\}$ Таблица 4

Значення моди гістограми (в градусах) (по ЦЗ з ЕМ)	Tif	Jpeg, QF = 85	Jpeg, QF = 75	Jpeg, QF = 65
Мінімальне	0	0	0	0
Максимальне	4,67	1,45	1,06	1,14
Середнє	0,96	0,45	0,22	0,11

Однак, необхідно зауважити, що при проведенні обчислювального експерименту, у якому були задіяні 600 ЦЗ у ФзВ і ФбВ, що не були відповідними, а обиралися випадковим чином, при цьому ЦЗ в Jpeg мали різні коефіцієнти якості від 65 до 100, розглянутий кількісний параметр практично не відрізнявся для ЦЗ в ФзВ і ФбВ: $\approx 33,2\%$, $\approx 32,7\%$ відповідно. Таким чином, отримані вище результати актуальні в тому випадку, коли експертизі піддаються ЦЗ, що зберігаються в різних форматах, але відповідні одне одному. При відсутності такої умови формат конкретного ЦЗ не впливає в загальному випадку на точність співвідношення (1).

Можливість використання співвідношення (1) для відокремлення оригінального ЦЗ від того, цілісність якого порушена, оцінюється ступенем чутливості до ЗД формальних параметрів блоків ЦЗ, що там фігурують.

З'ясуємо, як формати відповідних ЦЗ впливають на чутливість нормованого вектора СНЧ блоку. У результаті обчислювального експерименту встановлено, що чутливість згаданого вектора, що оцінюється кутом його повороту в результаті ЗД, буде більше для ЦЗ у ФзВ, у порівнянні з чутливістю у відповідному ЦЗ у ФбВ. Так середнє значення кута повороту, отримане в процесі усереднення по всім розглянутим ЦЗ середніх значень по блоках для окремих зображень, для ЦЗ в форматі Jpeg ($QF = 85$), коли як ЗД використовувалося накладання гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і

$d = 0,0001$, на 29% більше відповідного параметра для відповідних ЦЗ в форматі Tif. У випадку, коли як ЗД використовувалося накладання мультиплікативного шуму з $d = 0,0001$, середнє значення розглянутого кута для Jpeg-ЦЗ виявилось більше на 9,7%.

Необхідно відзначити, що якщо аналізу піддаються ЦЗ, що не є відповідними, а обрані випадковим чином, у різних форматах (з/без втрат), то чутливість вектора СНЧ для ЦЗ у ФзВ виявляється порівнянню з чутливістю вектора СНЧ для ЦЗ в ФбВ.

Важливими для розглянутого підходу формальними параметрами, властивості яких є визначальними для базового співвідношення (1), зокрема, чутливість до ЗД, є СНВ \mathbf{u}_1 , \mathbf{v}_1 , що відповідають максимальному СНЧ σ_1 блока. Оскільки поведінка цих СНВ у процесі збурень ЦЗ аналогічна [9,10], далі розглядається лівий СНВ \mathbf{u}_1 . Встановлено, що чутливість \mathbf{u}_1 , яка для нормованого вектора кількісно визначається кутом його повороту в результаті ЗД, не залежить від формату ЦЗ (з/ без втрат), більше того, вона не залежить і від значення QF, з яким зберігалось ЦЗ в ФзВ (табл.5). У ході експерименту оригінальне ЦЗ (в форматі Tif, Jpeg ($QF \in \{65, 75, 85\}$)) і відповідне йому збурене за рахунок накладання різних шумів з різними параметрами ЦЗ розбивалися на 4×4-блоки. Для кожної пари відповідних блоків у цих парах ЦЗ обчислювалося значення кута між СНВ, що відповідають максимальному СНЧ. Для

кожного оригінального ЦЗ визначався середній по блоках кут при кожній конкретній ЗД. Потім визначалися середні значення кута по всіх зображеннях при кожній конкретній ЗД, які представлені в

табл. 5. Незначні відмінності значень, що мають місце в межах рядка таблиці, очевидно є наслідком особливостей машинної арифметики.

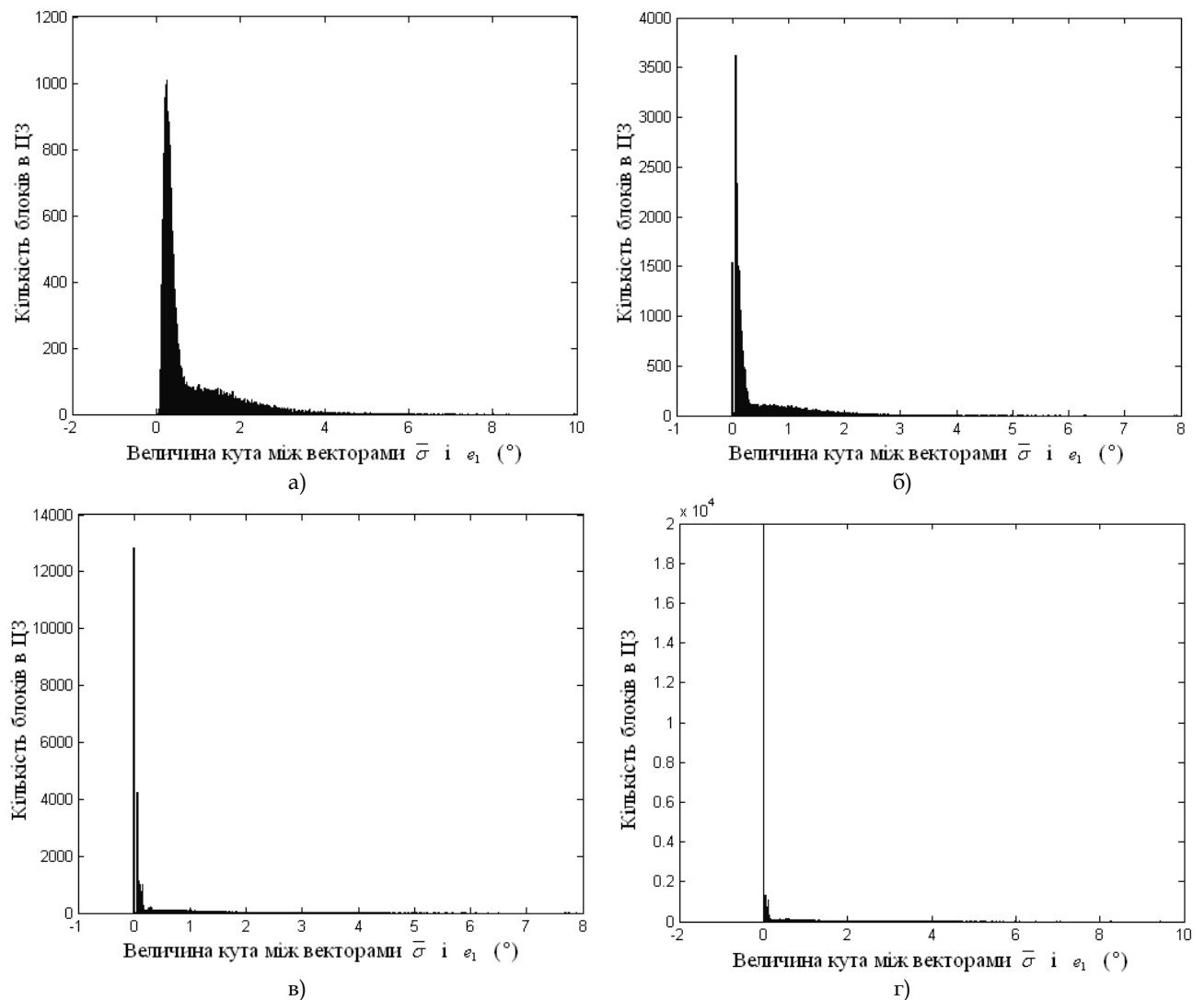


Рис. 1. Гістограми кутів між векторами $\bar{\sigma}$ і e_1 4×4-блоків для: а – ЦЗ в форматі Tif (мода – 0,26°, значення в моді – 1009 блоків; середнє значення кута по ЦЗ – 0,76°); б – відповідне ЦЗ в форматі Jpeg (QF = 85) (мода – 0,06°, значення в моді – 3618 блоків; середнє значення кута – 0,46°); в – відповідне ЦЗ в форматі Jpeg (QF = 75) (мода – 0°, значення в моді – 12837 блоків; середнє значення кута – 0,42°); г – відповідне ЦЗ в форматі Jpeg (QF = 65) (мода – 0°, значення в моді – 19744 блоків; середнє значення кута – 0,38)

Отримані результати чутливості вектора u_1 , що не залежать від формату збереження ЦЗ, можуть бути пояснені наступним чином. Чутливість СНВ u_1 визначається відповідно до формули [15]:

$$\frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \leq \frac{\|\Delta B\|_2}{svdgap(\sigma_1)},$$

де ΔB - матриця збурення блоку B в результаті ЗД, що зазнало ЦЗ, $\|\bullet\|_2$ - спектральна матрична норма, θ_1 - кут повороту вектора u_1 , $svdgap(\sigma_1) = \min_{j \neq 1} |\sigma_1 - \sigma_j|$ - відокремленість СНЧ σ_1 в блоці B .

При одній ЗД чутливість u_1 може відрізнятися тільки тоді, коли для різних форматів збереження ЦЗ (Tif, Jpeg (QF ∈ {65, 75, 85})) буде відрізнятися відокремленість $svdgap(\sigma_1) = \sigma_1 - \sigma_2$ в від-

повідних блоках зображень. В блоках оригінальних ЦЗ, незалежно від формату (з/без втрат) $\sigma_1 \gg \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_4$ (див. табл. 1), тому $\sigma_1 - \sigma_2 \approx \sigma_1$. Це приводить до того, що з врахуванням нечутливості СНЧ [15], відокремленості максимального СНЧ σ_1 в відповідних блоках зображень, що зберігаються в форматі Tif, Jpeg (QF ∈ {65, 75, 85}), порівнянні між собою. Крім того, враховуючи добру обумовленість СНЧ, оцінку чутливості u_1 можна також проводити відповідно до формули [15]:

$$\frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \leq \frac{\|\Delta B\|_2}{svdgap(\sigma_1 + \Delta\sigma_1)},$$

де $\Delta\sigma_1$ - збурення σ_1 в результаті ЗД ΔB . Якщо як ЗД для зображення в ФБВ розглянути процес стиску ЦЗ з втратами, то з останньої формули безпосеред-

ньо впливає порівнянність чутливостей \mathbf{u}_1 в відповідних блоках ЦЗ, збережених в форматі Tif, Jpeg ($QF \in \{65, 75, 85\}$), при однаковій ЗД. Кут повороту \mathbf{u}_1 буде залежити лише від величини ЗД $\|\Delta\mathbf{B}\|_2$, що діє на конкретний блок зображення, а не від формату ЦЗ. Таким чином, чутливість СНВ \mathbf{u}_1 блоку (як якісно, так і кількісно) не залежить від формату збереження ЦЗ. Установлені особливості параметрів блоків ЦЗ приводять до того, що для відповідних ЦЗ у форматах із втратами й без більш чутливою до ЗД (за рахунок нормованого вектора СНЧ) виявиться пара векторів \mathbf{u}_1 і $\bar{\sigma}$ в блоках ЦЗ в ФзВ. Підтвердженням цьому є результати наступного обчислюва-

льного експерименту. Відповідні ЦЗ в форматах Tif, Jpeg ($QF \in \{65, 75, 85\}$) піддавалися ЗД, у якості яких використовувалися: накладання гауссівського, мультиплікативного шуму з різними параметрами. Для кожної групи зображень виду: ЦЗ в певному форматі, вони ж після конкретної ЗД, підраховувалася середня по зображеннях кількість блоків (далі позначається T_{60}), для яких кут між \mathbf{u}_1 і $\bar{\sigma}$ дорівнював 60° , окремо для оригінальних і окремо для збурених ЦЗ. Результати експерименту, коли як ЗД використовувалося накладання гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і $d = 0,0001$, представлені в табл. 6.

Середнє по всім ЦЗ з ЕМ значення збурення (в градусах) \mathbf{u}_1 в 4x4-блоці зображення при різних ЗД Таблиця 5

ЗД \ Формат ЦЗ	Tif	Jpeg, $QF = 85$	Jpeg, $QF = 75$	Jpeg, $QF = 65$
Гауссівський шум ($d = 0,0001$)	1,146	1,147	1,151	1,151
Гауссівський шум ($d = 0,001$)	3,475	3,478	3,480	3,478
Мультиплікативний шум ($d = 0,0001$)	0,220	0,219	0,220	0,219
Мультиплікативний шум ($d = 0,001$)	0,736	0,735	0,736	0,736

Середнє значення кількості 4x4-блоків в ЦЗ, для яких кут між нормованим вектором СНЧ і \mathbf{u}_1 дорівнює 60° Таблиця 6

	Tif	Jpeg, $QF = 85$	Jpeg, $QF = 75$	Jpeg, $QF = 65$
Без ЗД	12776	15816	16161	16675
Після ЗД	8931	9720	9895	10029
Відносне зменшення T_{60} в результаті ЗД (%)	30,1	38,5	38,8	39,9

Отримані результати практично підтверджують більш високу чутливість до ЗД пари векторів \mathbf{u}_1 і $\bar{\sigma}$ в блоках ЦЗ в ФзВ, у порівнянні з відповідним ЦЗ в ФбВ.

Висновки

У роботі проведений аналіз особливостей запропонованого авторами раніше загального підходу до розв'язку проблеми виявлення порушень цілісності цифрових зображень, залежно від формату (з/без втрат) їх збереження.

В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Основні співвідношення нового підходу не залежать від формату (з/без втрат) аналізованого ЦЗ, що ніяк не обмежує область застосування підходу.

2. Для відповідних ЦЗ: співвідношення (1) буде виконуватися з більшою точністю для ЦЗ у ФзВ за рахунок меншої відмінності в блоках нормованого вектора СНЧ від вектора \mathbf{e}_1 , ніж для ЦЗ в ФбВ; нормований вектор СНЧ у блоках ЦЗ у ФбВ є менш чутливим до ЗД, ніж у відповідних блоках ЦЗ в ФзВ; чутливість лівого (правого) СНВ \mathbf{u}_1 (\mathbf{v}_1), що відповідають максимальному СНЧ блоків не залежить від формату збереження ЦЗ; менш чутливою до ЗД є пара векторів \mathbf{u}_1 і $\bar{\sigma}$ в блоках ЦЗ в ФбВ, ніж в відповідному ЦЗ в ФзВ.

Отримані результати для груп відповідних ЦЗ в різних форматах (з/без втрат) можуть бути використані при розробці методу виявлення ЦЗ, перезбережених із ФзВ у формат без втрат, що є актуальним для процесу проведення стеганоаналізу [16], надчим зараз працюють автори.

Література

[1] H. Farid, «A survey of image forgery detection», *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 2, No. 26, pp. 16–25, 2009.

[2] J. Redi, W. Taktak, J. Dugelay, «Digital image forensics: a booklet for beginners», *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 51, No. 1, pp. 133–162, 2011.

[3] N. Joglekar, P. Chatur, «A compressive survey on active and passive methods for image forgery detection», *International Journal of Engineering and Computer Science*, Vol. 4, Iss. 1, pp. 10187–10190, 2015.

[4] C. Rey, J.-L. Dugelay, «A survey of watermarking algorithms for image authentication», *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, No. 1, pp. 613–621, 2002.

[5] B. Mahdian, S. Saic, «A bibliography on blind methods for identifying image forgery», *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 25, No. 6, pp. 389–399, 2010.

[6] M. Ansari, S. Ghrera, V. Tyagi, «Pixel-based image forgery detection: A review», *IETE Journal of Education*, Vol. 55, No. 1, pp. 40–46, 2014.

[7] Y.-L. Chen, C.-T. Hsu, «Detecting recompression of JPEG images via periodicity analysis of compression»

sion artifacts for tampering detection», *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, Vol. 6, pp. 396-406, 2011.

[8] И. Бобок, «Стеганоаналитический алгоритм для основного сообщения, хранимого в форматах с потерями», *Вісник НТУ «ХПІ»*, № 29, С. 41-49, 2012.

[9] А. Кобозева, «Основы общего подхода к разработке универсальных стеганоаналитических методов для цифровых изображений», *Праці Одеського політехнічного університету*, Вып. 2(44), С. 136-146, 2014.

[10] A. Kobozeva, I. Bobok, A. Garbuz, «General principles of integrity checking of digital images and application for steganalysis», *Transport and Telecommunication*, Vol. 17, Iss. 2, pp. 128-137, 2016.

[11] И. Бобок, «Теоретическое развитие общего подхода к проблеме выявления нарушений целостности цифровых контентов, основанного на анализе пол-

ного набора формальных параметров», *Інформатика та математичні методи в моделюванні*, Т. 7, № 3, С. 211-219, 2017.

[12] Р. Гонсалес, Р. Вудс, *Цифровая обработка изображений*, М.: Техносфера, 1070 с., 2006.

[13] А. Кобозева, В. Хорошко, *Анализ информационной безопасности*, К.: ГУИКТ, 251 с., 2009.

[14] United States Department of Agriculture NRCS Photo Gallery. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://photogallery.nrcs.usda.gov>

[15] Д. Деммель, *Вычислительная линейная алгебра: теория и приложения*, М.: Мир, 430 с., 2001.

[16] И. Бобок, «Выявление цифровых изображений, пересохраненных в формат без потерь из формата с потерями, как составная часть стеганоанализа», *Сучасна спеціальна техніка*, № 3, С. 64-70, 2013.

УДК 004.056.5 (045)

Кобозева А.А., Бобок И.И. Особенности нового подхода к решению проблемы выявления нарушений целостности цифровых изображений в различных форматах хранения

Аннотация. В настоящий момент с учетом высокого уровня развития электронно-вычислительной техники, информационных технологий актуальной является проблема обеспечения качественной проверки целостности, разработки эффективных методов выявления ее нарушений в цифровых изображениях (ЦИ). Существующие методы по тем или иным причинам не обеспечивают удовлетворительного решения упомянутой проблемы, часто ориентированы на особенности формата хранения анализируемого ЦИ. Недавно авторами был предложен принципиально новый перспективный подход к выявлению результатов несанкционированных изменений ЦИ, основанный на анализе сингулярных чисел и сингулярных векторов блоков матрицы изображения. В данной работе проведен анализ особенностей предложенного подхода к решению рассматриваемой проблемы в зависимости от формата (с/без потерь) хранения ЦИ. Установлено, что основные положения подхода являются универсальными в смысле формата анализируемого ЦИ; в случае, если рассматриваются соответствующие изображения (отличающиеся друг от друга лишь форматом), то более чувствительными к возмущающим воздействиям являются рассматриваемые формальные параметры блоков ЦИ, хранимых с потерями. Полученные результаты для групп соответствующих ЦИ в различных форматах (с/без потерь) могут быть использованы при разработке метода выявления ЦИ, пересохраненных из формата с потерями в формат без потерь, что является актуальным для процесса проведения стеганоанализа.

Ключевые слова: цифровое изображение, формат хранения, нарушение целостности, сингулярные числа, сингулярные векторы, чувствительность, возмущающее воздействие.

Kobozeva A., Bobok I. Features of the new approach to solving the problem of detecting the integrity violations of digital images in various storage formats

Abstract. At the moment, given the high level of development of computer technology, and information technology, the problem of quality checking the integrity, and development of effective methods of detecting the integrity violations of the digital images are very urgent. Existing methods do not provide a satisfactory solution to this problem, and often are focused on the specific storage format of the analyzed digital image. Recently, a new general approach to the organization of the examination the integrity violations of digital images was developed. Proposed approach is based on the analysis of singular numbers and singular vectors of blocks of their matrices, that obtained by standard partitioning. In this paper, we consider the features of the proposed approach depending on the storage format (lossy or losses) of the digital image. It is established that the main provisions of the approach are universal, regardless of the format of the analyzed image; the formal parameters of the images' blocks stored in lossy are more sensitive to disturbing effects. The obtained results for the groups of corresponding digital images in various formats (lossy or losses) can be used to develop a method for detecting CIs that have been re-saved from lossy format to lossless format, which is relevant for the process of performing a steganalysis.

Key words: digital image, storage format, integrity violation, singular value, singular vector, sensitivity, disturbance.