

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ В РЕЗУЛЬТАТІ НАКЛАДАННЯ ШУМУ

Задача забезпечення якісної експертизи цілісності інформаційних контентів, зокрема цифрових зображень, що розглядаються у роботі, є на сьогоднішній день актуальною, але такою, що не має остаточного розв'язку. Однією з найпоширеніших операцій при несанкціонованих змінах зображень є операція накладання шуму, реалізована у всіх графічних редакторах. Накладання шуму використовується в ході атаки проти вбудованого повідомлення при організації прихованого каналу зв'язку, накладання шуму на зображення-стеганоповідомлення може використовуватися для «маскування» наявності вбудованої в нього додаткової інформації, для того, щоб приховати результати клонування, фотомонтажу й т.д. Нещодавно на основі матричного аналізу й теорії збурень був розроблений новий підхід до розв'язку задачі виявлення порушення цілісності зображення, який добре зарекомендував себе при розв'язку основної задачі стеганоаналізу. Метою статті є подальший розвиток згаданого підходу для забезпечення можливості використання його для виявлення порушення цілісності цифрового зображення, що відбулося в результаті накладання на нього різних шумів. У ході роботи теоретично обґрунтовано й практично підтверджено, що для оригінальних зображень відносні кількості блоків малих розмірів їх матриць, для яких величина кута між лівим (правим) сингулярним вектором, що відповідає максимальному сингулярному числу, і нормованим вектором квадратів сингулярних чисел дорівнює куту між n -оптимальним вектором і першим вектором стандартного базису відповідного простору, незначно відрізняються одна від іншої, чого не можна сказати про зображення, що зазнали накладання різних шумів. Встановлення кількісних відмінностей зазначених параметрів дасть можливість для розробки відповідного методу виявлення результатів накладання на цифрове зображення шуму.

Ключові слова: цифрове зображення, порушення цілісності, сингулярний вектор, сингулярні числа, n -оптимальний вектор, накладання шуму.

Вступ та аналіз останніх досліджень. Цілісність будь-якого інформаційного контенту є одним з основних критеріїв його захисту, можливості його використання з метою, що відрізняється від розважальної [1-3]. Цифрові зображення (ЦЗ), які на сьогоднішній день мають значне поширення в різних областях людської діяльності, є такими об'єктами, зміни яких надзвичайно легко здійснити засобами існуючих численних графічних редакторів. І хоча будь-яке порушення цілісності в кожному разі є небажаним, оскільки змінює інформацію оригіналу, залежно від цілей проведених змін їх результат може приводити до різних наслідків: від умовно позитивних (наприклад, при ретушуванні ЦЗ для естетичних цілей [4]) до однозначно негативних (наприклад, коли несанкціоновані зміни проводяться на документах, що мають важливе значення [5,6]), роблячи задачу виявлення порушень цілісності *актуальною*.

Однією з самих поширених операцій при порушеннях цілісності ЦЗ є операція накладання шуму, реалізована у всіх графічних редакторах і програмних середовищах, що займаються обробкою зображень. Накладання шуму використовується в ході атаки проти вбудованого повідомлення на стеганоповідомлення [7,8] (у цьому випадку виявлення шуму дасть можливість організаторам прихованого (стеганографічного) каналу зв'язку виявити факт його моніторингу); накладання шуму на ЦЗ-стеганоповідомлення може використовуватися відправником для маскування наявності вбудованої додаткової інформації [9] (у цьому випадку стеганоалгоритм, що використовується, повинен бути стійким до атак проти вбудованого повідомлення, зокрема, до накладання шуму), для того, щоб завуалювати результати клонування, фотомонтажу [10] і т.д. Тому забезпечення ефективного виявлення

результатів накладання різних шумів має велике значення в процесі встановлення оригінальності/порушення цілісності ЦЗ.

Мета статті та постановка задач. В [11] був запропонований новий підхід до виявлення порушення цілісності ЦЗ, заснований на аналізі сингулярних чисел (СНЧ) і сингулярних векторів (СНВ) блоків матриці зображення, який дав можливість для розробки ефективного стеганоаналітичного методу [11], що говорить про перспективність згаданого підходу для розв'язку задач інформаційної безпеки. Цей підхід отримав свій подальший розвиток в [12], де було встановлено, що для оригінальних ЦЗ в більшості $l \times l$ -блоків, отриманих шляхом стандартної розбивки [13] матриці зображення, виконується співвідношення:

$$\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(v_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^o, e_1), \quad (1)$$

де $\angle(a, b)$ – кут між відповідними векторами a, b ; u_1 і v_1 – відповідно лівий і правий СНВ $l \times l$ -блока, що отримані шляхом його нормального сингулярного розкладання [11, 12], які відповідають максимальному сингулярному числу σ_1 цього блока, $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_l \geq 0$ – СНЧ блока,

$$\bar{\sigma} = (\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_l^2)^T / \|(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_l^2)^T\| \in R^l, \quad (2)$$

$n^o = (1/\sqrt{l}, 1/\sqrt{l}, \dots, 1/\sqrt{l})^T \in R^l$ – n -оптимальний вектор простору R^l , $e_1 = (1, 0, \dots, 0) \in R^l$ – перший вектор стандартного базису R^l .

В [11] показано, що найбільш прийнятними із практичної точки зору (тобто такими, для яких теоретичні положення розробленого там підходу виконуються найбільш точно на практиці) є блоки матриці ЦЗ розміром 4×4 пікселя. Блоки меншого розміру розглянуті не були. У даний момент для автора найбільший інтерес із погляду виконання встановленого їм співвідношення (1) представляють блоки розміру 4×4 і 2×2 , оскільки останні мають деякі особливості і переваги, зазначені нижче, з погляду використовуваного способу розв'язку задачі, що розглядається.

Метою дослідження є подальший розвиток підходу, запропонованого в [11] і вдосконаленого в [12], для можливості використання його при розробці методу виявлення порушення цілісності ЦЗ в результаті накладання на нього шуму.

Для досягнення мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Обґрунтувати теоретично якісну відповідність між відносними кількостями 4×4 – і 2×2 – блоків оригінальних/неоригінальних (отриманих у результаті накладання шуму) ЦЗ, для яких виконується співвідношення (1);

2. Знайти кількісне співвідношення між відносними кількостями 4×4 – і 2×2 – блоків оригінальних/неоригінальних (отриманих у результаті накладання шуму) ЦЗ, для яких виконується співвідношення (1).

Викладення основного матеріалу. Співвідношення (1), теоретично обґрунтоване в [12], говорить про аналогію властивостей лівого (u_1) і правого (v_1) СНВ блоків ЦЗ, отриманих шляхом стандартної розбивки його матриці. Тому скрізь нижче розглядаються тільки ліві СНВ блоків, що відповідають максимальних СНЧ.

Для того, щоб кількісно оцінити «ступінь наближення» у співвідношенні (1), був проведений обчислювальний експеримент, у якому були задіяні ЦЗ з баз, традиційно використовуваних при роботі із ЦЗ [14-16], а також зображення, зроблені непрофесійними відеокамерами:

- множина $M_1^{(1)}$: 400 ЦЗ в форматі Tif [14] розміром 1000×1000 пікселів;
- множина $M_2^{(1)}$: 150 ЦЗ в форматі Tif [15] розміром 500×500 пікселів;

- множина $M_3^{(1)}$: 160 ЦЗ в форматі Tif розміром 1000×1000 пікселів, зроблених непрофесійними відеокамерами;
- множина $M_4^{(1)}$: 450 ЦЗ в форматі Jpeg [16] розміром 500×500 пікселів;
- множини $M_{1,QF}^{(1)}$, де $QF \in Q = \{55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95\}$, отримані шляхом Perezбереження 100 ЦЗ, обраних довільно з $M_1^{(1)}$, в формат Jpeg з коефіцієнтами якості QF ;
- множини $M_{2,QF}^{(1)}$, отримані аналогічним шляхом, де Perezбереженню у формат із втратами піддавалися всі ЦЗ з $M_2^{(1)}$.

Таким чином, в експерименті було задіяно 710 ЦЗ у форматі без втрат і 2700 ЦЗ у форматі з втратами, при цьому для $\forall QF \in Q: |M_{1,QF}^{(1)}| = 100, |M_{2,QF}^{(1)}| = 150$. У ході експерименту більша увага навмисно приділялася ЦЗ у форматі із втратами в силу їх більшої поширеності й використанню в даний момент.

У ході обчислювального експерименту на цьому етапі для кожного ЦЗ з перерахованих вище множин будувалася гістограма значень кутів між векторами u_1 і $\bar{\sigma}$ 4×4 – блоків. Для гістограми знаходилася мода. Теоретично відповідно до (1) ця мода повинна дорівнювати 60° . У ході експерименту підраховувалася кількість ЦЗ, для яких мода гістограми відрізнялася від 60° . Результати наведені в табл.1.

Таблиця 1

Кількість ЦЗ, для яких мода гістограми значень кутів між векторами u_1 і $\bar{\sigma}$ 4×4 – блоків відрізняється від 60° , у різних множинах оригінальних ЦЗ (щодо загальної кількості ЦЗ в розглянутих множинах (%))

$M_1^{(1)}$	$M_2^{(1)}$	$M_3^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_{1,QF}^{(1)},$ $QF = 55 + 5(i-1), i = \overline{1,9}$									$M_{2,QF}^{(1)},$ $QF = 55 + 5(i-1), i = \overline{1,9}$								
				i									i								
				9	8	7	6	5	4	3	2	1	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	0	0	1.7	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ЦЗ у форматі без втрат (по всьому експерименту)										ЦЗ у форматі з втратами (по всьому експерименту)											
0.5										0.5											

Таблиця 1 дає наочне практичне підтвердження того, що для більшості блоків оригінального ЦЗ співвідношення $\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^o, e_1) = 60^\circ$ має місце, причому незалежно від його формату (з/без втрат).

Покажемо тепер, що для оригінального ЦЗ кількість 2×2 – блоків (у відсотковому відношенні до загальної кількості 2×2 – блоків), для яких кут між векторами u_1 і $\bar{\sigma}$ відповідно до (1) становить 45° , приблизно дорівнює кількості 4×4 – блоків (у відсотковому відношенні до загальної кількості 4×4 – блоків), для яких кут між векторами u_1 і $\bar{\sigma}$ становить 60° . Розглянемо блок ЦЗ B_l довільного розміру $l \times l$ з СНЧ $\sigma_1(B_l) \geq \sigma_2(B_l) \geq \dots \geq \sigma_l(B_l) \geq 0$. Виходячи з (1), отримуємо, що

$$\angle(u_1, \bar{\sigma}) = \angle(n^o, e_1) \quad (3)$$

у випадку, коли $u_1 = n^o$, а $\bar{\sigma} = e_1$. Очевидно, що друга рівність означає, що для вектора $\bar{\sigma}$, що визначається відповідно до (2), має місце співвідношення:

$$\sigma_2(B_l) = \dots = \sigma_l(B_l) = 0, \quad (4)$$

тобто такий блок B_l визначається єдиною сингулярною трійкою: $(\sigma_1(B_l), u_1(B_l), v_1(B_l))$. Як відомо [17], така сингулярна трійка відповідає в ЦЗ, головним чином, низькочастотній складовій (тобто областям ЦЗ з малими перепадами значень яскравості – фоновим областям). Таким чином, блоки ЦЗ, для яких (3) виконується точно, належать, головним чином, областям зображення з малими перепадами значень яскравості. Однак умова малого перепаду яскравості в загальному випадку не гарантує в точності умову (4). Більш того, на практиці перевірено, що для блоків оригінального ЦЗ, для яких $l \geq 8$, умова (4) не буде виконуватися в точності практично ніколи навіть в областях з малими перепадами значень яскравості, оскільки малі перепади значень у загальному випадку не гарантують лінійну залежність стовпців (рядків), що містять достатньо велику кількість ($l \geq 8$) елементів, матриці (блоку матриці). Наприклад, для блоку B_8 (рис.1(б)) сингулярний спектр має вигляд:

$$1223.3, 3.1, 2.1, 1.6, 1.2, 1.0, 0.3, 0.1, \quad (5)$$

хоча сам блок очевидно належить фоновій частині ЦЗ (рис.1(а)). Однак з урахуванням кореляції значень яскравості пікселів, що знаходяться поряд, яка має місце в оригінальних ЦЗ [13], для блоків малого (і це принципово важливо) розміру ($l \leq 4$) в області з малими перепадами яскравості співвідношення (4) буде мати місце, причому, оскільки найближчі сусіди пікселя – це пікселі, що знаходяться від нього ліворуч, праворуч, зверху, знизу [13], то міра лінійної залежності стовпців (рядків) блоку 4×4 буде порівнянна з аналогічним показником для 2×2 –блоків, отриманих стандартною розбивкою блоку 4×4 . Так для приклада, представленого на рис.1, сингулярний спектр верхнього лівого 4×4 -блоку B_8 (рис.1(б)) визначається як

$$609.5, 0.9, 0.0, 0.0, \quad (6)$$

а для 2×2 –блоків, що його складають, сингулярні спектри будуть визначатися наступним чином:

$$305.5, 0.4; \quad 305.0, 0; \quad 304.5, 0.4; \quad 304, 0. \quad (7)$$

Якщо порівняти отримані результати (6) і (7) для B_4 і блоків B_2 , що його складають, то треба відзначити, що відповідності між ними не випадкові. Дійсно, в [17] показано, що для ЦЗ з $n \times n$ –матрицею F , елементи якої $f_{ij}, i, j = \overline{1, n}$, а СНЧ – $\sigma_i(F), i = \overline{1, n}$, має місце співвідношення:

$$\sum_{i,j=1}^n f_{ij}^2 = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2(F). \quad (8)$$

У силу значної корельованості у фоновій області значень яскравості пікселів у межах B_4 з (8) буде впливати, що для такого блоку

$$\sigma_1^2(B_4) = \sum_{i,j=1}^4 (b_{ij}^{(4)})^2, \quad (9)$$

де $b_{ij}^{(4)}, i, j = \overline{1, 4}$, – елементи матриці B_4 , що порівнянні між собою. Тоді (9) можна представити в вигляді:

$$\begin{aligned} \sigma_1^2(B_4) &\approx 4(b_{11}^{(4)})^2 + 4(b_{15}^{(4)})^2 + 4(b_{51}^{(4)})^2 + 4(b_{55}^{(4)})^2 \approx \sigma_1^2(B_2^{(1)}) + \sigma_1^2(B_2^{(2)}) + \sigma_1^2(B_2^{(3)}) + \sigma_1^2(B_2^{(4)}) \approx \\ &\approx 4\sigma_1^2(B_2^{(1)}) \approx 4\sigma_1^2(B_2^{(2)}) \approx 4\sigma_1^2(B_2^{(3)}) \approx 4\sigma_1^2(B_2^{(4)}), \end{aligned}$$

де $B_2^{(i)}, i = \overline{1,4}$ – 2×2 – блоки, які є результатом стандартної розбивки B_4 , звідки

$$2\sigma_1(B_2^{(1)}) \approx 2\sigma_1(B_2^{(2)}) \approx 2\sigma_1(B_2^{(3)}) \approx 2\sigma_1(B_2^{(4)}) \approx \sigma_1(B_4),$$

що й ілюструє приклад, наведений на рис. 1(б). Подібна ситуація очевидно буде мати місце для СНЧ блоків B_{2^k} і $B_{2^{k-1}}$ (на які блок B_{2^k} розбивається стандартним чином) у випадку, коли B_{2^k} належить області ЦЗ із малими перепадами значень яскравості (див. сингулярні спектри (5) і (6) для B_8 і B_4 відповідно).



а

$$B_8 = \begin{bmatrix} 152 & 152 & 152 & 152 & 153 & 154 & 153 & 153 \\ 153 & 154 & 153 & 153 & 154 & 154 & 154 & 153 \\ \hline 152 & 153 & 152 & 152 & 153 & 154 & 154 & 152 \\ 152 & 152 & 152 & 152 & 152 & 152 & 154 & 153 \\ \hline 153 & 153 & 153 & 153 & 153 & 152 & 153 & 154 \\ 153 & 153 & 153 & 153 & 153 & 152 & 153 & 153 \\ 154 & 153 & 153 & 153 & 153 & 153 & 153 & 153 \\ 153 & 152 & 152 & 154 & 154 & 153 & 153 & 153 \end{bmatrix}$$

б

Рисунок 1 – Приклад відповідності, що має місце між блоками різного розміру області оригінального ЦЗ із малими перепадами значень яскравості: а – вхідне ЦЗ із покажчиком на розглянутий блок; б – матриця 8×8 – блоку ЦЗ з вказаної області

Таким чином, для 4×4 – і 2×2 – блоків областей ЦЗ із малими перепадами значень яскравості співвідношення (3) буде виконуватися з дуже незначною похибкою за рахунок того, що співвідношення (4) буде виконуватися практично точно. Области ЦЗ із малими перепадами значень яскравості, що складаються з 4×4 – , 2×2 – блоків, у силу *малих розмірів блоків*, що розглядаються, будуть відрізнятися по площі дуже незначно (рис.2), а це означає, що відносні (стосовно загального числа блоків зображення) кількості 4×4 – , 2×2 – блоків у зазначених областях будуть порівнянні одна з іншою. Таким чином, кількості 4×4 – і 2×2 – блоків в ЦЗ, для яких $\angle(u_1, \bar{\sigma}) \approx \angle(n^o, e_1)$, будуть в оригінальному ЦЗ відрізнятися дуже незначно. Кількісно відмінності будуть залежати від формату ЦЗ. Можна стверджувати, що для оригінальних ЦЗ у форматі з втратами ця відмінність буде менше по абсолютній величині, ніж для ЦЗ у форматі без втрат. Це пов'язано з тим, що при збереженні ЦЗ із втратами, результатом чого є зменшення внеску високочастотної (і, можливо, середньочастотної) складової, найменші СНЧ блоків зменшуються в порівнянні з їхніми значеннями для цього ж ЦЗ, але збереженого спочатку у форматі без втрат. Найменші СНЧ блоків зображення із втратами можуть стати порівнянними з нулем навіть у тих блоках, які не відповідають областям з незначними перепадами яскравості.

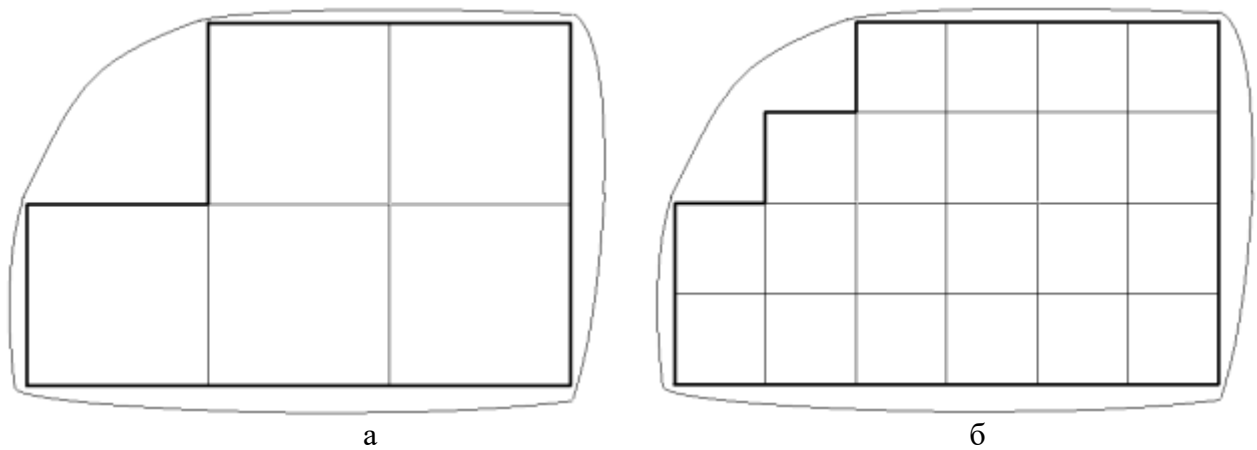


Рисунок 2 – Область ЦЗ із малими перепадами значень яскравості й блоки розбивки матриці зображення малих розмірів, що її складають: а – 4×4 – блоки; б – 2×2 – блоки

Для практичного підтвердження отриманого висновку був проведений обчислювальний експеримент, у якому були задіяні:

- множина M_1 : 200 ЦЗ розміром 1000×1000 пікселів в форматі Tif [14];
- множина M_2 : 300 ЦЗ розміром 500×500 пікселів в форматі Tif [15];
- множина M_3 : 500 ЦЗ розміром 1000×1000 пікселів в форматі Jpeg [16].

У ході експерименту матриця кожного ЦЗ розбивалася стандартним чином на блоки розміром 2×2 , для кожного блоку визначався кут між векторами u_1 і $\bar{\sigma}$, після чого будувалася гістограма значень таких кутів, для якої знаходилася мода m_2 і значення $KB2$ гістограми в моді. Потім ЦЗ розбивалося на блоки 4×4 пікселя, після чого виконувалися аналогічні дії й визначалося значення $KB4$ – кількість блоків розміром 4×4 в ЦЗ (у відсотковому відношенні до загального числа блоків), для яких кут між u_1 і $\bar{\sigma}$ дорівнює значенню моди m_4 відповідної гістограми. У ході експерименту для ЦЗ із $M_1 \cup M_2$ мода гістограми $m_2 \neq 45^\circ$ для 1 ЦЗ, $m_4 \neq 60^\circ$ для 4 ЦЗ (що складає 0.2% і 0.8% від загальної кількості розглянутих ЦЗ без втрат відповідно), для всіх інших ЦЗ, зокрема зображень із множини M_3 , $m_2 = 45^\circ$, $m_4 = 60^\circ$, що відповідає (3). Для кожного ЦЗ знаходилося значення $KB4 - KB2$. Для отриманої множини значень $|KB4 - KB2|$ по всім ЦЗ будувалася гістограма (рис.3). При цьому середнє значення для $|KB4 - KB2|$ по множині $M_1 \cup M_2$ склало 3.5%, по множині M_3 – 2.1%, по $M_1 \cup M_2 \cup M_3$ – 2.8%, що повністю відповідає отриманим вище теоретичним висновкам про незначну відмінність $KB1$ і $KB2$ для оригінальних ЦЗ.

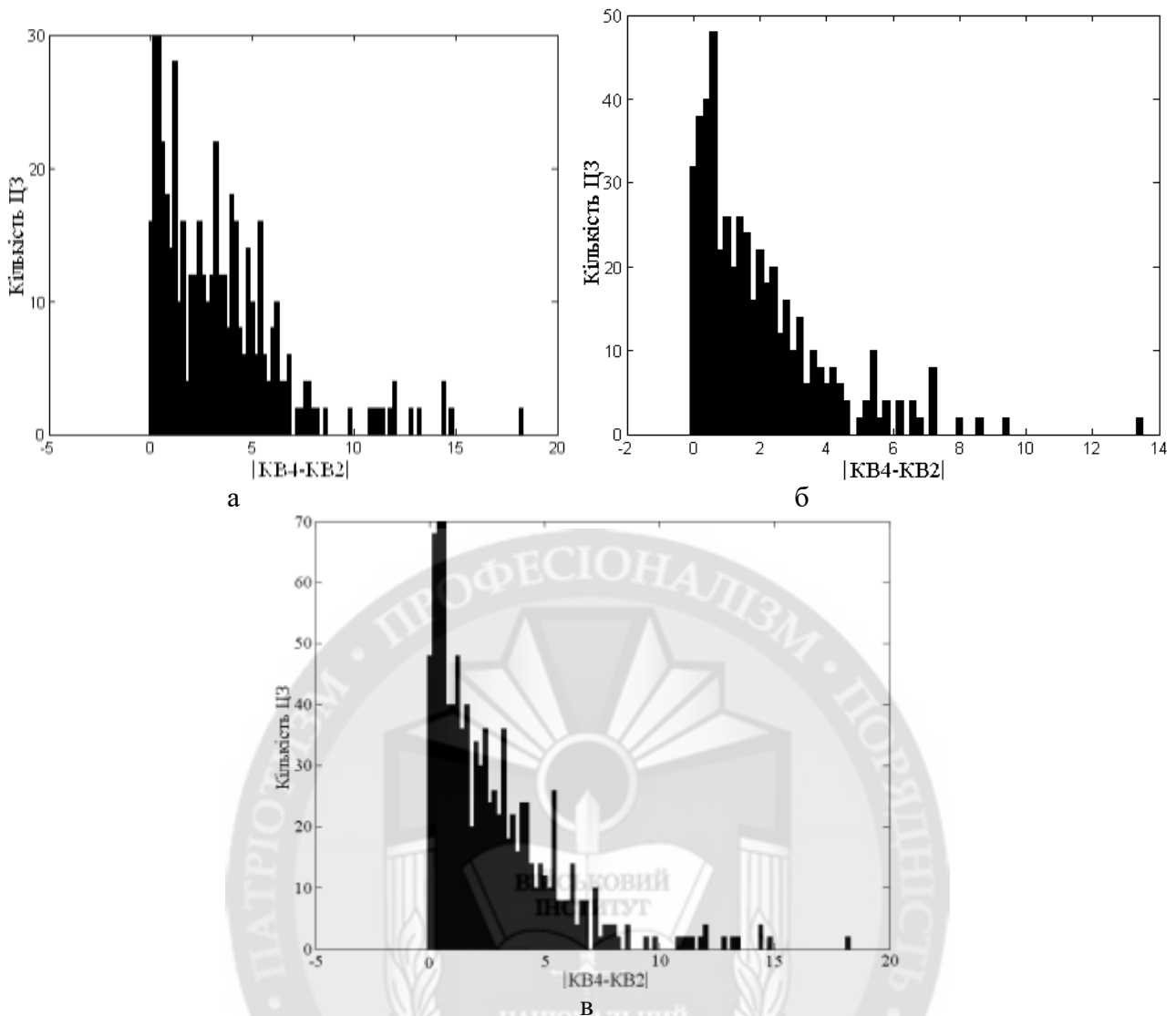


Рисунок 3 – Гістограми значень $|KB4 - KB2|$ для оригінальних ЦЗ: а – для ЦЗ в форматі без втрат (множина $M_1 \cup M_2$); б – для ЦЗ в форматі з втратами (множина M_3); в – для ЦЗ з $M_1 \cup M_2 \cup M_3$

Накладання шуму на оригінальне ЦЗ, змінюючи значення яскравості пікселів, змінює (частіше – зменшує) кореляцію між сусідніми пікселями, змінює в загальному випадку не тільки кількісно, але і якісно характеристики різних областей ЦЗ: на фонових областях оригінального зображення при накладанні шуму можуть виникнути перепади яскравості, більш значні, ніж у вхідному зображенні. Все це приводить до того, що 2×2 - і 4×4 -блоки навіть у межах фонові області ЦЗ будуть поводитися вже не настільки однаково, як в оригінальному зображенні. Поведінка молодших СНЧ (порівнянність із нулем) може бути порушена як для 4×4 - , так і для 2×2 - блоків. Очікуваним тут буде можливе порушення положення моди гістограми значень кутів між векторами u_1 і $\bar{\sigma}$ блоків відносно оригінального ЦЗ (це порушення однозначно буде трактуватися як показник порушення цілісності ЦЗ), а також більша відмінність в значеннях $KB2$ і $KB4$, що підтверджується результатами обчислювального експерименту, наведеними для $M_1 \cup M_2 \cup M_3$ на рис.4, в табл. 2.

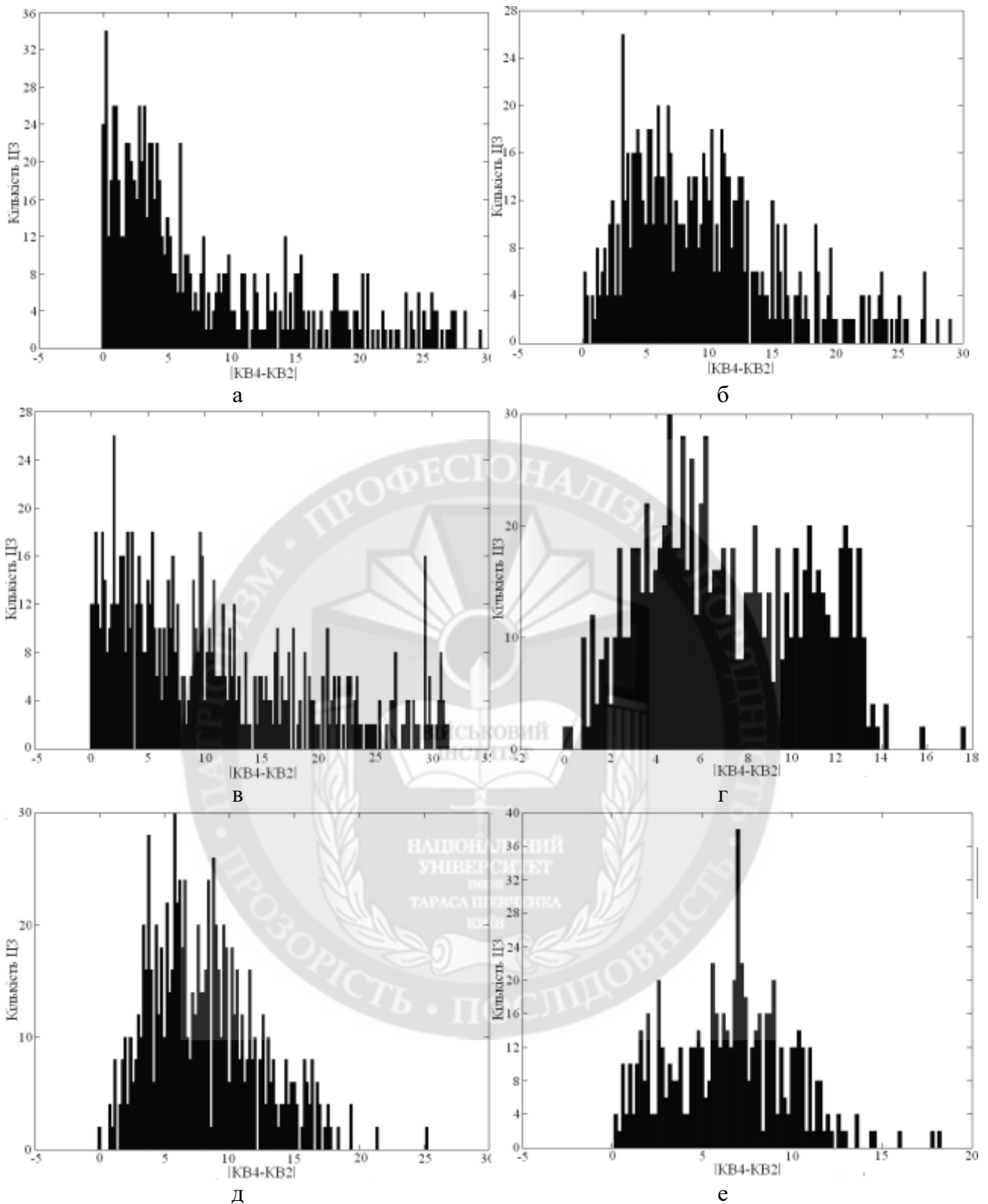


Рисунок 4 – Гістограми значень $|KB4 - KB2|$ в умовах накладання на ЦЗ: а – гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і $D=0.0001$; б – гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і $D=0.001$; в – мультиплікативного шуму з $D=0.001$; г – мультиплікативного шуму з $D=0.01$; д – пуассонівського шуму; е – шуму «сіль-перець» з $D=0.01$

Таблиця 2

Середні значення $|KB4 - KB2|$ при накладанні шумів на ЦЗ з $M_1 \cup M_2 \cup M_3$ (%)

Гауссівський шум з нульовим математичним очікуванням		Мультиплікативний шум		Пуассонівський шум	Шум «сіль-перець» з $D=0.01$
$D=0.0001$	$D=0.001$	$D=0.001$	$D=0.01$		
7.9	9.7	10.7	7.2	8.1	6.5

Параметри шумів, що накладалися, вибиралися таким чином, щоб уникнути (значних) візуальних спотворень зображень, які кількісно оцінювалися за допомогою різницевого показника $PSNR$ – «пікового відношення сигнал-шум» [18] (табл.3).

Таблиця 3

Середні значення $PSNR$ при накладанні шумів на ЦЗ з $M_1 \cup M_2 \cup M_3$ (dB)

Гауссівський шум з нульовим математичним очікуванням		Мультиплікативний шум		Пуассонівський шум	Шум «сіль-перець» з $D=0.01$
$D=0.0001$	$D=0.001$	$D=0.001$	$D=0.01$		
40	32	36	29	31	26

Як видно з отриманих результатів, середні по експерименту значення $|KB4 - KB2|$ значно відрізняються для оригінальних ЦЗ і ЦЗ, що зазнали накладання шуму, як і якісний вид гістограм значень $|KB4 - KB2|$: для оригінальних ЦЗ мода гістограм близька до нуля й для множини $M_1 \cup M_2$, і для M_3 , і для $M_1 \cup M_2 \cup M_3$, причому кількість ЦЗ, для яких $|KB4 - KB2|$ далеко від нуля, очевидно значно менше тих, для яких $|KB4 - KB2|$ близько до нуля (рис.3), чого не можна сказати про ЦЗ, що зазнали накладання шуму (рис.4).

Висновки. У роботі проведений подальший розвиток підходу, запропонованого в [11] і розвиненого в [12], для можливості використання його при розробці методу виявлення порушення цілісності ЦЗ шляхом накладання на нього шуму, у ході чого теоретично обґрунтовано й практично підтверджено, що для оригінальних ЦЗ відносні кількості 4×4 – і 2×2 – блоків, отриманих у результаті стандартної розбивки матриці зображення, для яких величина кута між лівим СНВ, що відповідає максимальному СНЧ, і нормованим вектором квадратів СНЧ дорівнює куту між n -оптимальним вектором і першим вектором стандартного базису відповідного простору, незначно відрізняються одна від іншої (у середньому менш, ніж на 3%). Для ЦЗ, підданих накладанню різних шумів, така відмінність є значною (у середньому перевищує 6.5%). Врахування встановлених відмінностей кількісно дасть можливість для розробки відповідного методу виявлення результатів накладання на ЦЗ шуму, над чим зараз працює автор.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Farid, H. A survey of image forgery detection / H.Farid // IEEE Signal Processing Magazine. – 2009. – Vol. 2, No. 26. – Pp. 16–25.
2. Redi, J. A. Digital image forensics: a booklet for beginners / J.A. Redi, W. Taktak, J.L. Dugelay // Multimedia Tools and Applications. – 2011. – Vol. 51, No.1. – Pp. 133–162.
3. Хорошко, В.А. Методы и средства защиты информации [Текст]: научное издание / В.А. Хорошко, А.А. Чекатков; Ред. Ю.С. Ковтанюк. – К. : ЮНИОР, 2003. – 505 с.

4. Rani, S. A Survey of Copy-Move Forgery Detection Techniques for Digital Images / S.Rani, M.Jayamohan, S.Sruthy // *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*. – 2015. – Vol.5, Iss.2. – Pp.419–426.
5. He, Z. Digital image splicing detection based on markov features in DCT and DWT domain / Z. He, W. Lu, W. Sun, J. Huang // *Pattern Recognition Letters*. – 2012. – Vol. 45, No. 12. – Pp. 4292–4299.
6. Ali Qureshi, M.A. review on copy move image forgery detection techniques / M. Ali Qureshi, M. Deriche // *IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. – 2014. – Pp. 1–5.
7. Fang, H. Robust Watermarking Scheme for Multispectral Images Using Discrete Wavelet Transform and Tucker Decomposition / H.Fang, Q.Zhou, K.Li // *Journal of Computers*. – 2013. – Vol. 8, No. 11. – P. 2844-2850.
8. Rawat, H. Robust Digital Image Watermarking Scheme for Copyright Protection / H.Rawat, A.Kumar, S.Kumar // *International Journal of Computer Applications*. – 2013. – Vol.75, No.18. – P.27-32.
9. Jiang, J. An Image Watermarking Algorithm with Adaptively Determining the Number of Information Bits to Be Embedded / J.Jiang, Y.Zhu, Q.Su // *Journal of Information & Computational Science*. – 2013. – Vol. 10, No. 14. – P. 4555–4562.
10. Daa M. Uliyan. Image Region Duplication Forgery Detection Based on Angular Radial Partitioning and Harris Key-Points / Daa M. Uliyan, Hamid A. Jalab, Ainuddin W. Abdul Wahab, Somayeh Sadeghi // *Symmetry*. – 2016. – Vol. 8, Iss. 7. – Pp. 56–65.
11. Kobozeva, A.A. General Principles of Integrity Checking of Digital Images and Application for Steganalysis / A.A. Kobozeva, I.I. Bobok, A.I. Garbuz // *Transport and Telecommunication*. - 2016. - Vol. 17, Issue 2. - PP. 128-137.
12. Бобок, И.И. Теоретическое развитие общего подхода к проблеме выявления нарушений целостности цифровых контентов, основанного на анализе полного набора формальных параметров / И.И.Бобок // *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. – 2017. – Т.7, №3. – С. 170-177.
13. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. П.А. Чочиа. – М. : Техносфера, 2006. – 1070 с.
14. Gloe T., Böhme R. (2010). The ‘Dresden Image Database’ for benchmarking digital image forensics. *Proceedings of the 25th Symposium on Applied Computing (ACM SAC 2010)*. Sierre, 2010, vol. 2, pp. 1585–1591.
15. Hsu Y.-F., Chang S.-F. Detecting image splicing using geometry invariants and camera characteristics consistency. *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME'06)*. Toronto, 2006, pp. 549-552.
16. NRCS Photo Gallery: [Електронний ресурс] // United States Department of Agriculture. Washington, USA. Режим доступа: <http://photogallery.nrcs.usda.gov> (Дата обращения: 26.07.2012).
17. Кобозева, А.А. Анализ информационной безопасности: монография / А.А. Кобозева, В.А. Хорошко. – К.: ГУИКТ, 2009. – 251 с.
18. Конахович, Г.Ф. Компьютерная стеганография [Текст]: теория и практика / Г.Ф. Конахович, А.Ю. Пузыренко. – Киев : МК-Пресс, 2006. – 288 с.

REFERENCES:

1. Farid H. (2009), “A survey of image forgery detection”, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 2, no. 26, pp. 16–25.
2. Redi J.A., Taktak W., Dugelay J.L. (2011), “Digital image forensics: a booklet for beginners”, *Multimedia Tools and Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 133–162.
3. Khoroshko V.A., Chekatkov A.A. (2003), “Methods and Applications of Information Security”, Kyiv, YUNIOR.
4. Rani S., Jayamohan M, Sruthy S. (2015), “A Survey of Copy-Move Forgery Detection Techniques for Digital Images”, *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, vol.5, no. 2, pp. 419–426.
5. He Z. et al. (2012), “Digital image splicing detection based on Markov features in DCT and DWT domain”, *Pattern Recognition Letters*, vol. 45, no. 12, pp. 4292–4299.
6. Ali Qureshi M., Deriche M. (2014), “A review on copy move image forgery detection techniques”, *Proceedings of the 11th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 1–5.
7. Fang H. et al. (2013), “Robust watermarking scheme for multispectral images using discrete wavelet transform and tucker decomposition”, *Journal of Computers*, vol. 8, no. 11. pp. 2844-2850.
8. Rawat H., Kumar A., Kumar S. (2013), “Robust digital image watermarking scheme for copyright protection”, *International Journal of Computer Applications*, vol.75, no.18. pp. 27-32.

9. Jiang J., Zhu Y., Su Q. (2013), "An image watermarking algorithm with adaptively determining the number of information bits to be embedded", *Journal of Information & Computational Science*, vol. 10, no. 14. pp. 4555–4562.
10. Diao M., Uliyan et al. (2016), "Image region duplication forgery detection based on angular radial partitioning and Harris key-points", *Symmetry*, vol. 8, no. 7. PP. 56–65.
11. Kobozeva A.A., Bobok I.I., Garbuz A.I. (2016), "General principles of integrity checking of digital images and application for steganalysis", *Transport and Telecommunication*, vol. 17, no. 2. pp. 128-137.
12. Bobok I.I. (2017), "Theoretical development of the general approach to solving the problem of detecting the integrity violations of digital content based on the analysis of a complete set of formal parameters", *Informatyka i matematychni metody v modelyuvanni, [Informatics and mathematical methods in simulation]*, vol. 7, no. 3, pp. 170-177.
13. Gonzalez R., Woods R. (2006), "Digital image processing", Moscow, Tekhnosfera.
14. Gloe T., Böhme R. (2010), "The 'Dresden Image Database' for benchmarking digital image forensics", *Proceedings of the 25th Symposium on Applied Computing (ACM SAC 2010)*, vol. 2, pp. 1585–1591.
15. Hsu Y.-F., Chang S.-F. (2006), "Detecting image splicing using geometry invariants and camera characteristics consistency", *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME'06)*. pp. 549-552.
16. NRCS Photo Gallery: United States Department of Agriculture. Washington, USA. URL: <http://photogallery.nrcs.usda.gov> (Date of reference: 26.07.2012).
17. Kobozeva A.A., Khoroshko V.A. (2009), "Analysis of Information Security", Kyiv, DUT.
18. Khonakhovich G.F., Puzyrenko A.Yu. (2006), "Computer Steganography: Theory and Practice", Kyiv, MK-Press.

к.т.н. Бобок И.И.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ НАЛОЖЕНИЯ ШУМА

Задача обеспечения качественной экспертизы целостности информационных контентов, в частности цифровых изображений, рассматриваемых в настоящей работе, является на сегодняшний день актуальной, не имеющей окончательного решения. Одной из самых распространенных операций при несанкционированных изменениях изображений является операция наложения шума, реализованная во всех графических редакторах. Наложение шума используется в ходе атаки против встроенного сообщения при организации скрытого канала связи, наложение шума на изображение-стеганосообщение может использоваться для «маскировки» наличия погруженной в него дополнительной информации, для того, чтобы скрыть результаты клонирования, фотомонтажа и т.д. Недавно на основе матричного анализа и теории возмущений был разработан новый подход к решению задачи выявления нарушения целостности изображения, который хорошо зарекомендовал себя при решении основной задачи стеганоанализа. Целью статьи является дальнейшее развитие упомянутого подхода для обеспечения возможности использования его для выявления нарушения целостности цифрового изображения, произошедшего в результате наложения на него различных шумов. В ходе работы теоретически обосновано и практически подтверждено, что для оригинальных изображений относительные количества блоков малых размеров их матриц, для которых величина угла между левым (правым) сингулярным вектором, отвечающим максимальному сингулярному числу, и нормированным вектором квадратов сингулярных чисел равна углу между n -оптимальным вектором и первым вектором стандартного базиса соответствующего пространства, незначительно отличаются друг от друга, чего нельзя сказать об изображениях, подвергнутых наложению различных шумов. Установление количественных отличий указанных параметров даст возможность для разработки соответствующего метода выявления результатов наложения на цифровое изображение шума.

Ключевые слова: цифровое изображение, нарушение целостности, сингулярный вектор, сингулярные числа, n -оптимальный вектор, наложение шума.

Ph.D. Bobok I.I.

THEORETICAL BASES OF THE METHOD OF DETECTING THE DISTURBANCE OF INTEGRITY OF THE DIGITAL IMAGE AS A RESULT OF NOISE IMPACT

Checking the integrity of information content is today an urgent task. This task has no final decision. This article discusses digital images. The operation of the imposition of noise is one of the most common operations for unauthorized changes of images. This operation is implemented in all graphic editors and software environments involved in image processing. Noise overlay is used during an attack against an embedded message when a hidden communication channel is established, noise overlay on an image-stegano message can be used to mask the presence of additional information immersed in it, to hide the results of cloning, photomontage, etc. Moreover, any perturbation of the image matrix can be considered as a superposition of noise. Recently, a new approach to solving the problem of detecting an image integrity violation has been developed and improved. This approach was developed based on matrix analysis and perturbation theory. He has proven himself in solving the main problem of steganalysis. The purpose of the article is to further develop this approach to identify various noises superimposed on a digital image. The main formal parameter to be analyzed is the number of blocks in the image in which the angle between the singular vector and the vector of squares of singular numbers is equal to the angle between the n -optimal vector and the first vector of the standard basis. The paper shows that for original images the number of such 2×2 - and 4×4 -blocks is slightly different from each other, which is not the case for images subjected to the imposition of various noises. The establishment of quantitative differences between these parameters will enable the development of an appropriate method for detecting the results of overlaying a digital image of noise.

Keywords: digital image, integrity violation, singular vector, singular numbers, n -optimal vector, noise overlay

