

УДК 004.[056.54:932.2]

Аналіз змін χ^2 -квадрат відстані між розподілами яскравості пікселів при фільтрації зображень-контейнерів та стеганограм

Проконов Д. О.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

E-mail: progonov@gmail.com

Забезпечення надійного захисту конфіденційних даних державних установ та приватних компаній є важливою та актуальною задачею. Особлива увага при вирішенні даної задачі приділяється попередженню витоку конфіденційних даних при передачі повідомлень з використанням глобальних інформаційно-комунікаційних систем. Виявлення прихованих повідомлень (стеганограм) потребує комплексного дослідження потоків даних в інформаційно-комунікаційних системах з використанням методів стегоаналізу. Забезпечення високої точності виявлення стеганограм (більше 95%) потребує використання апріорних даних щодо способу вбудовування повідомлень до файлу-контейнеру, зокрема цифрового зображення. Це суттєво обмежує застосування стандартних методів стегоаналізу для виявлення стеганограм, сформованих згідно невідомих стеганографічних методів. Тому становить інтерес розробка універсальних стегодетекторів, здатних надійно виявляти стеганограми в умовах обмеженості даних щодо особливостей застосованого стеганографічного методу. Для виявлення слабких змін зображення-контейнеру, обумовлених прихованням повідомлень згідно новітніх адаптивних стеганографічних методів, в роботі запропоновано проводити попередню обробку (фільтрацію) досліджуваних зображень. Досліджено зміни розподілів значень яскравості пікселів зображення-контейнеру та сформованих стеганограм при використанні медіанного та вінеровського фільтрів. За результатами проведених досліджень встановлено, що застосування зазначених фільтрів при стегоаналізі цифрових зображень дозволяє виявити слабкі відмінності в розподілі значень яскравості пікселів контейнерів та стеганограм, сформованих згідно адаптивних методів HUGO та WOW. Показано, що аналіз змін χ^2 -відстані між розподілами яскравості пікселів вихідних та оброблених зображень дозволяє підвищити імовірність виявлення стеганограм. Отримані результати дають можливість підвищити точність стегоаналізу навіть у слабкого заповнення контейнеру стегоданими (менше 10%), для якого застосування стандартних методів виявлення стеганограм є неефективним.

Ключові слова: цифрові зображення, стегоаналіз, χ^2 -квадрат відстань

DOI: [10.20535/RADAP.2018.75.54-60](https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.75.54-60)

Вступ

Забезпечення надійного захисту інформації з обмеженим доступом (ІЗОД) державних установ і приватних підприємств є важливою та актуальною задачею. Вирішення даної задачі потребує комплексного використання методів кібернетичного захисту інформаційних ресурсів установ та підприємств, зокрема для протидії прихованій передачі ІЗОД при обміні даними в інформаційно-комунікаційних системах. Виявлення в потоці даних стеганограм – файлів, що містять приховані повідомлення (стегодані) – з імовірністю більше 95% в загальному випадку потребує наявності апріорної інформації щодо способу вбудовування стегоданих до файлу-контейнеру, зокрема цифрового зображення (ЦЗ) [1]. Це суттєво обмежує використання стандартних

методів стегоаналізу для виявлення невідомих стеганографічних систем (проблема zero-day). Тому важливою та актуальною задачею є розробка методів універсального (сліпого) стегоаналізу, здатних надійно виявляти стеганограми в умовах обмеженості або відсутності апріорних даних щодо використаного стеганографічного методу.

1 Постановка задачі

Забезпечення високої точності виявлення стеганограм, сформованих згідно невідомих стеганографічних методів, потребує використання універсальних стегодетекторів (УСД) [1]. Для побудови УСД були запропоновані підходи, засновані, наприклад, на застосуванні статистичних моделей ЦЗ [2] та штучних нейронних мереж [3]. У порівнянні зі

стандартними стегодетекторами на основі моделей SPAM та CDF [2] запропоновані підходи дозволили суттєво (більше ніж на 10%) підвищити точність виявлення стеганограм у випадку слабкого заповнення зображення-контейнеру (ЗК) стегоданими (менше 10%). Проте висока складність налаштування УСД та підвищені вимоги щодо об'ємів тестових вибірок ЗК і стеганограм обмежують практичне використання даних підходів.

Для виявлення слабких змін ЗК внаслідок приховання повідомлень було запропоновано використовувати відмінності між розподілами значень яскравості пікселів зображення-контейнеру та сформованої стеганограми [4]. Це дозволило зменшити складність налаштування УСД при збереженні високої точності виявлення стеганограм, сформованих згідно поширених стеганографічних методів (СМ).

Для підвищення імовірності виявлення стеганограм, сформованих згідно сучасних адаптивних СМ, становить інтерес проведення попередньої обробки досліджуваних зображень, зокрема фільтрації ЦЗ з використанням медіанного та вінеровського фільтрів.

Метою роботи є дослідження змін розподілу значень яскравості пікселів ЗК та стеганограм внаслідок застосування медіанного та вінеровського фільтрів.

2 Адаптивні методи приховання повідомлень у цифрових зображеннях

Для зменшення спотворень ЗК, обумовлених прихованням повідомлень, використовують адаптивні стеганографічні методи (АСМ), зокрема HUGO, WOW [5, 6] та інші. Особливістю АСМ є представлення процесу вбудовування стегоданих \mathcal{M} до ЗК як вирішення оптимізаційної задачі [5]:

$$F(C, S) = \sum_{y_{\mathcal{M}} \in \mathcal{Y}} \pi(y_{\mathcal{M}}) \cdot D(y_{\mathcal{M}}) \rightarrow \min \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\begin{cases} \pi(y_{\mathcal{M}}) = \text{const}, \\ D(y_{\mathcal{M}}) \leq D_{\epsilon}, \end{cases} \quad (2)$$

де $F(C, S)$ – функція, яка характеризує зміни зображення-контейнеру C при формуванні стеганограми S ; $y_{\mathcal{M}} = \{y_1, y_2, \dots, y_d\}$ – послідовність змін яскравості пікселів ЗК, необхідних для приховання d біт повідомлення \mathcal{M} ; \mathcal{Y} – множина можливих змін значень яскравості пікселів ЗК; $\pi(y_{\mathcal{M}})$ – оцінка імовірності формування стеганограми при використанні $y_{\mathcal{M}}$; $D(y_{\mathcal{M}})$ – функція, що характеризує зміни параметрів ЗК внаслідок застосування $y_{\mathcal{M}}$; D_{ϵ} –

заданий рівень змін параметрів ЗК при формуванні стеганограми.

Стандартним підходом до вирішення задачі (1) є використання припущення щодо незалежності змін параметрів ЗК, обумовлених вбудовування кожного біту повідомлення. В цьому випадку функції $\pi(y_{\mathcal{M}})$ та $D(y_{\mathcal{M}})$ можливо представити з використанням розподілу Гіббса [5]:

$$\pi(y_{\mathcal{M}}) = \prod_{i=1}^d \frac{\exp(-\lambda \cdot D(y_i))}{\sum_{y_i \in y_{\mathcal{M}}} \exp(-\lambda \cdot D(y_i))}, \lambda \in [0, +\infty), \quad (3)$$

$$D(y_{\mathcal{M}}) = \sum_{i=1}^d \rho(y_i), \quad (4)$$

де d – кількість стегобіт; $\rho(y_i)$ – функція, що характеризує спотворення ЗК внаслідок застосування i -го елемента послідовності $y_{\mathcal{M}}$. Варіація параметру λ в розподілі Гіббса (3) дозволяє зменшити імовірність виявлення отримуваних стеганограм при проведенні стегоаналізу ($\lambda \rightarrow +\infty$), або ж збільшити об'єм приховуваних повідомлень ($\lambda \rightarrow 0$).

Одним з найбільш стійких до стегоаналізу АСМ є метод HUGO [5]. Його особливістю є використання математичного апарату теорії марківських ланцюгів для моделювання залежностей між значеннями яскравості суміжних пікселів ЗК.

Оцінка змін кореляції значень яскравості суміжних пікселів ЗК при вбудовуванні стегоданих в контейнер згідно методу HUGO проводиться в декілька етапів.

На першому етапі проводиться розрахунок матриць суміжності \mathbf{H}_{mn}^c для яскравості пікселів зображення-контейнеру C та сформованої стеганограми S . При цьому розглядаються випадки суміжності пікселів зображень по горизонталі ($\mathbf{H}_{mn}^{\rightarrow}$), вертикалі ($\mathbf{H}_{mn}^{\downarrow}$) та діагоналі ($\mathbf{H}_{mn}^{\nearrow}$, $\mathbf{H}_{mn}^{\nwarrow}$) [5]:

$$\mathbf{H}_{mn}^{\rightarrow}(I) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^{N-1} ([I_{x,y} == m] \cdot [I_{x,y+1} == n]),$$

$$\mathbf{H}_{mn}^{\downarrow}(I) = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^N ([I_{x,y} == m] \cdot [I_{x+1,y} == n]),$$

$$\mathbf{H}_{mn}^{\nearrow}(I) = \sum_{x=2}^M \sum_{y=1}^{N-1} ([I_{x,y} == m] \cdot [I_{x-1,y+1} == n]),$$

$$\mathbf{H}_{mn}^{\nwarrow}(I) = \sum_{x=2}^M \sum_{y=2}^N ([I_{x,y} == m] \cdot [I_{x-1,y-1} == n]),$$

$$[a] = \begin{cases} 1, & \text{if } a \text{ is True} \\ 0, & \text{if } a \text{ is False} \end{cases}$$

де I – досліджуване напівтонове зображення (ЗК або стеганограма) розмірами $M \times N$ пікселів та глибиною кольору k біт; $m, n \in \{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ – поточні значення яскравості пікселів зображення I ; $[\cdot]$ – символ Айверсона.

На другому етапі проводиться розрахунок функції оцінки спотворень ЗК (4) при формуванні стеганограм [5]:

$$D(y_M) = \sum_{m,n} \sum_{c \in \mathbb{C}} \omega_{mn} |\mathbf{H}_{mn}^c(C) - \mathbf{H}_{mn}^c(S)|, \quad (5)$$

де $\mathbb{C} = \{\rightarrow, \downarrow, \nearrow, \nwarrow\}$ – множина розглянутих типів суміжності пікселів ЗК; $\omega_{mn} (\omega_{mn} > 0)$ – ваговий коефіцієнт; $\mathbf{H}_{mn}(C), \mathbf{H}_{mn}(S)$ – матриці суміжності пікселів ЗК та стеганограми відповідно. Вибір коефіцієнту ω_{mn} проводиться з врахуванням відмінностей у значеннях близьких пікселів ЗК: $\omega_{mn} \approx 1$ якщо $m \approx n$, та $\omega_{mn} \gg 1$ в інших випадках.

Обмеженням методу HUGO є мінімізація змін яскравості лише суміжних пікселів ЗК внаслідок приховання повідомлень [5]. Внаслідок цього при формуванні стеганограм не враховуються зміни статистичних та кореляційних характеристик ЗК в околі пікселів, обраних для приховання стегобіт. Поширеним підходом до врахування даних змін є використання модифікованих функції $D(y_M)$ (4), що засновані на застосуванні спектральних перетворень ЗК.

Одним з найбільш ефективних АСМ, що використовують спектральні перетворення ЗК, є адаптивний метод WOW [6]. Даний метод заснований на мінімізації відмінностей між коефіцієнтами розкладу ЗК та сформованої стеганограми в базисі вейвлет-функцій.

Функція спотворень $D(y_M)$ (4) для методу WOW визначається згідно виразу [6]:

$$D(y_M) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \rho_{x,y}(C, S) \cdot |C_{x,y} - S_{x,y}|, \quad (6)$$

$$\rho_{x,y}(C, S) = \left\| \sum_{l=1}^L \xi_{x,y}^{(l)} \right\|_p^{\mathbb{H}}, \quad (7)$$

$$\xi_{x,y}^{(l)} = |\mathbf{R}(l)| \otimes |\mathbf{R}(l) - \mathbf{R}_{x,y}(l)|,$$

де C, S – відповідно, напівтонові зображення контейнеру та стеганограми розмірами $M \times N$ пікселів; $\rho_{x,y}(C, S)$ – функція, яка характеризує зміни коефіцієнтів двовимірного дискретного вейвлет-перетворення (ДДВП) ЗК при зміні яскравості пікселю з координатами (x, y) ; $\|a\|_p^{\mathbb{H}} = (a^p)^{-\frac{1}{p}}$ – норма Гельдера порядку p для функції a ; $\xi_{x,y}^{(l)}$ – функція оцінки змін коефіцієнтів ДДВП зображення-контейнеру при використанні l -го вейвлету з базису перетворення $\mathbb{W} = \{w_1, w_2, \dots, w_L\}$; $\mathbf{R}(l) = w_l \otimes C$ – коефіцієнти вейвлет-перетворення ЗК при використанні l -го вейвлету; \otimes – операція згортки.

Вибір порядку p норми Гельдера у виразі (7) проводиться з огляду на наступні вимоги [6]:

1. При зростанні значень функції $\xi_{x,y}^{(l)}$, значення $\rho_{x,y}(C, S)$ повинно прямувати до нуля;

2. У випадку, якщо $\xi_{x,y}^{(l)} = 0$, значення $\rho_{x,y}(C, S)$ повинно прямувати до нескінченності.

При $p > 0$ порушується друга вимога [6] – зменшення значень функції $\rho_{x,y}(C, S)$ для областей ЗК з незначними коливаннями яскравості пікселів, що знижує стійкість отриманих стеганограм до стегоаналізу. Тому при формуванні стеганограм згідно методу WOW використовуються норма Гельдера $p < 0$.

Варто зазначити, що застосування АСМ дозволяє суттєво зменшити зміни лише окремих характеристик ЗК при формуванні стеганограм, зокрема кореляції значень яскравості сусідніх пікселів (метод HUGO), змін коефіцієнтів розкладу зображення-контейнеру в обраному базисі перетворення (метод WOW). Для підвищення точності виявлення сформованих стеганограм в роботі пропонується проводити комплексний аналіз змін статистичних, структурних та спектральних характеристик ЗК, обумовлених прихованням повідомлень згідно АСМ.

В роботі [4] було запропоновано при проведенні стегоаналізу враховувати зміни розподілу значень яскравості пікселів ЗК при застосуванні СМ. За результатами аналізу відмінностей між розподілами значень яскравості пікселів ЗК та сформованих стеганограм було показано, що можливе надійне виявлення характерних змін розподілу значень яскравості з використанням таких показників, як χ^2 -відстань [4].

Представляє інтерес аналіз змін χ^2 -відстані у випадку формування стеганограм згідно АСМ.

3 Аналіз відмінностей між розподілами значень яскравості пікселів контейнерів та стеганограм з використанням χ^2 -відстані

χ^2 -відстань D_{χ^2} широко використовується для оцінки відстаней між імовірнісними розподілами [7]. Розрахунок χ^2 -відстані між розподілами значень яскравості пікселів ЗК – P_C та сформованої стеганограми – P_S проводиться згідно формули [7]:

$$D_{\chi^2}(P_C, P_S) = \sum_{q \in Q} \frac{(P_C(q) - P_S(q))^2}{P_S(q)}, \quad (8)$$

де q – поточне значення яскравості пікселів; $Q = \{0, 1, \dots, (2^k - 1)\}$ – діапазон значень яскравості для досліджуваних зображень з глибиною кольору k біт.

Відмітимо, що $D_{\chi^2}(P_C, P_S) \neq D_{\chi^2}(P_S, P_C)$ [7]. Тому представляє інтерес проведення досліджень для випадку розрахунку D_{χ^2} для розподілів значень яскравості пікселів зображення-контейнеру ($D_{\chi^2}^C$)

та стегограми ($D_{\chi^2}^S$), а також відносно χ^2 -відстані ($D_{\chi^2}^{rel}$):

$$\begin{aligned} D_{\chi^2}^C &= D_{\chi^2}(P_S, P_C); \\ D_{\chi^2}^S &= D_{\chi^2}(P_C, P_S); \\ D_{\chi^2}^{rel} &= D_{\chi^2}^C / D_{\chi^2}^S. \end{aligned} \quad (9)$$

Типові значення χ^2 -відстані, розраховані згідно (9), для напівтонових ЗК, розміром 640×480 пікселів і глибиною кольору $k = 8$ (біт), та стегограм, сформованих згідно методів HUGO та WOW, при слабкому ($\Delta_C = 10\%$), середньому ($\Delta_C = 20\%$) і сильному ($\Delta_C = 50\%$) заповненні ЗК стегограмними наведено у табл. 1.

Табл. 1 Типові значення χ^2 -відстані для розподілів яскравостей пікселів контейнерів і стегограм, сформованих згідно методів HUGO та WOW, при варіації ступеня заповнення ЗК стегограмними Δ_C

Метод HUGO	$D_{\chi^2}^C$	$D_{\chi^2}^S$	$D_{\chi^2}^{rel}$
$\Delta_C = 10\%$	$3.937 \cdot 10^{-5}$	$3.954 \cdot 10^{-5}$	0.996
$\Delta_C = 20\%$	$6.885 \cdot 10^{-5}$	$6.872 \cdot 10^{-5}$	1.002
$\Delta_C = 50\%$	$1.272 \cdot 10^{-4}$	$1.279 \cdot 10^{-4}$	0.994
Метод WOW	$D_{\chi^2}^C$	$D_{\chi^2}^S$	$D_{\chi^2}^{rel}$
$\Delta_C = 10\%$	$4.025 \cdot 10^{-5}$	$3.997 \cdot 10^{-5}$	1.007
$\Delta_C = 20\%$	$1.256 \cdot 10^{-4}$	$1.224 \cdot 10^{-4}$	1.026
$\Delta_C = 50\%$	$5.701 \cdot 10^{-4}$	$5.217 \cdot 10^{-4}$	1.093

Як видно з табл. 1, зміни $D_{\chi^2}^C$ та $D_{\chi^2}^S$ не перевищують 10^{-4} навіть у випадку сильного заповнення ЗК стегограмними $\delta_C = 50\%$. Для випадку $D_{\chi^2}^{rel}$ виявлено зростання даного показника при збільшенні ступеня заповнення ЗК стегограмними, що демаскує наявність прихованих повідомлень.

Малі значення χ^2 -відстаней $D_{\chi^2}^C$ та $D_{\chi^2}^S$ (табл. 1) обумовлені мінімізацією змін компонент ЗК, зокрема шумів, при формуванні стегограм згідно АСМ. Для підвищення точності виявлення даних змін в роботі запропоновано проводити попередню фільтрацію досліджуваних зображень з використанням медіанного та вінеровського фільтрів. Врахування даних відмінностей дозволить підвищити ефективність стегоаналізу з використанням χ^2 -відстані $D_{\chi^2}^{rel}$.

4 Експериментальні дослідження

4.1 Методика обробки зображень

Дослідження проводилося з використанням псевдовипадкової вибірки 10000 зображень зі стандартного тестового пакету MIRFlickr-1M [8]. Тестові зображення були приведені до однакового розміру 640×480 (пікселів) та представлені в градаціях сірого кольору з глибиною кольору $k = 8$ (біт). Формування стегограм проводилося згідно методів

HUGO та WOW. Ступінь заповнення ЗК стегограмними варіювалася від 5% до 65% з кроком 5%.

Фільтрація ЗК і стегограм з використанням медіанного та вінеровського фільтрів проводилася ітеративно із застосуванням ковзного вікна (КВ) розміром $a \times a$, $a \in \mathbb{N}_{odd}$ (пікселів), де \mathbb{N}_{odd} – множина натуральних непарних чисел. Розміри КВ були обрані рівними 7×7 (пікселів), згідно рекомендацій [9].

Для зменшення впливу крайових ефектів проводилося дзеркальне відображення $(a+1)/2$ рядків та стовпчиків, розташованих біля границь ЦЗ. Обробка зображень починалася з верхнього лівого кута та ітеративно продовжувалася при зсуві КВ на 1 піксель вправо. При досягненні останнього пікселя рядка ЦЗ, проводився перехід КВ на наступний рядок.

У випадку застосування медіанного фільтру вихідне (незашумлене) значення центрального пікселя $v_c^m = v_{(a+1)/2, (a+1)/2}$ КВ визначалося як медіана розподілу значень яскравості пікселів в межах поточного положення ковзного вікна.

При використанні фільтру Вінера прийнято стандартне припущення, що завадою є адитивний білий гаусовий шум (АБГШ). Оцінка вихідного значення яскравості пікселю v_c розраховувалася згідно [10]:

$$v_c^w = \mu + \frac{\sigma^2 - \nu^2}{\sigma^2} (v_c - \mu), \quad (10)$$

де $\mu = \mathbb{E}[I]$, $\sigma^2 = \mathbb{E}[I^2] - \mu^2$ – відповідно, оцінки математичного очікування μ та дисперсії σ^2 значень яскравості пікселів зображення I для поточного положення КВ; $\mathbb{E}[\cdot]$ – оператор усереднення; $\nu^2 = \mathbb{E}[\sigma^2]$ – оцінка дисперсії АБГШ [10].

Обчислення χ^2 -відстані $D_{\chi^2}^{rel}$ для розподілів яскравості пікселів вихідних та оброблених ЗК і стегограм проводилося згідно виразу (9).

4.2 Отримані результати

Використовуючи тестовий пакет ЦЗ, були сформовані стегограми згідно адаптивних методів HUGO та WOW при варіації ступеня заповнення ЗК стегограмними. Приклад вихідного (незаповненого) зображення-контейнеру та стегограм, сформованих згідно методів HUGO та WOW, при середньому ступені заповнення ЗК стегограмними ($\Delta_C = 20\%$) наведено на рис. 1.

Незважаючи на значний ступінь заповнення ЗК стегограмними (20% від загальної кількості пікселів зображення були модифіковані для приховання тестового повідомлення), візуально розрізнити вихідне зображення-контейнер та сформовані стегограми практично неможливо (рис. 1).



(а)



(б)



(в)

Рис. 1. Приклад зображення-контейнеру (а) та стеганограм, сформованих згідно адаптивних методів HUGO (б) та WOW (в), при середньому ступені заповнення ЗК стегоданими ($\Delta_C = 20\%$)

За результатами обробки ЦЗ із використанням медіанного та вінеровського фільтрів сформовано пакети фільтрованих ЗК та стеганограм. Для вихідних та оброблених контейнерів і стеганограм були розраховані значення χ^2 -відстані $D_{\chi^2}^{rel}$. Залежності значень $D_{\chi^2}^{rel}$ для розподілів яскравості пікселів вихідних та фільтрованих ЗК і стеганограм, сформованих згідно методів HUGO та WOW, від ступеня заповнення ЗК стегоданими наведені на рис. 2.

З аналізу залежностей значень χ^2 -відстані $D_{\chi^2}^{rel}$ від ступеня заповнення ЗК стегоданими (рис. 2), можна зробити висновок, що приховання повідомлень до ЗК призводить до зменшення $D_{\chi^2}^{rel}$. Отримані результати можливо пояснити малими змінами шумових складових стеганограм при проведенні фільтрації, що призводить до зростання “подібності” роз-

поділів яскравості пікселів вихідних і оброблених стеганограм.

Варто зазначити, що зменшення $D_{\chi^2}^{rel}$ зберігається навіть при слабкому заповненні ЗК стегоданими (менше 10%) та характеризується малими значеннями дисперсії (не перевищує 0.6). Це дозволяє використовувати прості порогові методи виявлення стеганограм, засновані на порівнянні отриманих та “очікуваних” (для зображень-контейнерів) значень $D_{\chi^2}^{rel}$ у випадку медіанної ($D_{\chi^2}^{rel} = 46.28$) та вінеровської ($D_{\chi^2}^{rel} = 22.38$) фільтрації досліджуваних ЦЗ (рис. 2).

Для порівняння змін статистичних та кореляційних характеристик зображень-контейнерів C і стеганограм S при проведенні фільтрації були також розраховані стандартні метрики якості ЦЗ [9]:

- PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) – визначається відношенням максимального значення яскравості пікселів зображення до потужності завад (власних шумів ЗК та спотворень, обумовлених прихованням повідомлень):

$$PSNR = 10 \times \lg \left[\frac{(2^k - 1)^2}{\mathbb{E}[(C - S)^2]} \right], \quad (11)$$

де k (біт) – глибина кольору зображення;

- SSIM (Structural Similarity Index) – інтегральний показник, що характеризує відмінності в яскравості, контрасті та ступені кореляції зображень:

$$SSIM = \left(\frac{2 \cdot \sigma_{C,S}}{\sigma_C^2 + \sigma_S^2} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \mathbb{E}[C] \cdot \mathbb{E}[S]}{\mathbb{E}[C]^2 + \mathbb{E}[S]^2} \right), \quad (12)$$

де $\sigma_I^2 = \mathbb{E}[I - \mathbb{E}[I]]^2$ – дисперсія значень яскравості пікселів зображення I ; $\sigma_{C,S} = \mathbb{E}[(C - \mathbb{E}[C]) \cdot (S - \mathbb{E}[S])]$ – коваріація значень яскравості пікселів ЗК та стеганограм;

- CD (Czenakowski Distance) – є оцінкою попіксельної кореляції кольорових зображень:

$$CD = \mathbb{E} \left[1 - \frac{2 \cdot \sum_z \min_{x,y} (C_{x,y}^z, S_{x,y}^z)}{\sum_z (C_{x,y}^z + S_{x,y}^z)} \right], \quad (13)$$

де $C_{x,y}^z, S_{x,y}^z$ – відповідно, значення яскравості пікселя з координатами (x, y) для кожного каналу кольору ЗК та стеганограми.

Типові оцінки значень метрик якості зображень, розраховані згідно (11)-(13) для ЗК C і стеганограм, сформованих згідно методів HUGO S_{HUGO} та WOW S_{WOW} , при використанні медіанної та вінеровської фільтрації наведені у табл. 2.

Для зручності, результати у табл. 2 наведені у наступному форматі – порівняння вихідного зображення I (ЗК або стеганограми) із зображеннями, отриманими після застосування медіанного (I, I^{median}) та вінеровського (I, I^{wiener}) фільтрів.

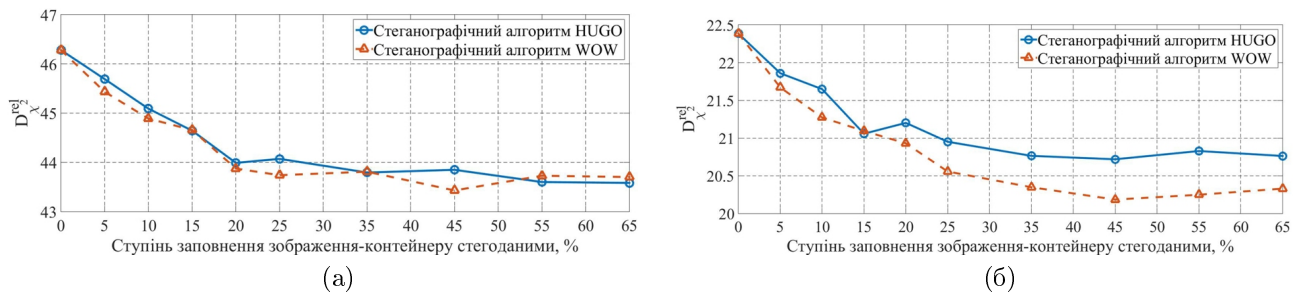


Рис. 2. Залежності значень χ^2 -відстані $D_{\chi^2}^{rel}$ для розподілів яскравості пікселів ЗК і стеганограм, сформованих згідно методів HUGO та WOW, від ступеня заповнення ЗК стегоданими при використанні медіанної (а) та вінеровської (б) фільтрації

Табл. 2 Типові оцінки значень метрик якості зображень для ЗК C і стеганограм, сформованих згідно методів HUGO S_{HUGO} та WOW S_{WOW} , при використанні медіанної та вінеровської фільтрації

	PSNR	SSIM	CD
(C, C^{median})	29.74	0.993	1.89e-2
$(S_{HUGO}, S_{HUGO}^{median})$	29.74	0.993	1.90e-2
$(S_{WOW}, S_{WOW}^{median})$	29.74	0.993	1.90e-2
(C, C^{wiener})	33.40	0.997	1.78e-2
$(S_{HUGO}, S_{HUGO}^{wiener})$	33.40	0.997	1.78e-2
$(S_{WOW}, S_{WOW}^{wiener})$	33.40	0.997	1.78e-2

Зміни значень метрик якості PSNR, SSIM та CD не перевищують 1% та практично не залежать від методу фільтрації ЦЗ (табл. 2), що обмежує практичне застосування даних метрик якості в задачах стегоаналізу ЦЗ. Отримані результати пояснюються мінімізацією змін ЗК при вбудовуванні повідомлень згідно методів HUGO та WOW.

Висновки

За результатами досліджень змін розподілу значень яскравості пікселів зображень-контейнерів та стеганограм, сформованих згідно адаптивних методів HUGO та WOW, внаслідок використання медіанного та вінеровського фільтрів встановлено:

1. Проведення попередньої фільтрації стеганограм дозволяє виявити слабкі зміни характеристик ЗК, обумовлені прихованням повідомлень згідно адаптивних стеганографічних алгоритмів, незалежно від ступеня заповнення ЗК стегоданими.

2. Використання χ^2 -відстані $D_{\chi^2}^{rel}$ при аналізі змін розподілів значень яскравостей пікселів ЗК та стеганограм внаслідок проведення фільтрації дозволяє підвищити ефективність стегоаналізу навіть у випадку слабого заповнення зображення-контейнеру стегоданими (менше 10%).

3. Застосування стандартних метрик якості цифрових зображень для виявлення стеганограм, сформованих згідно адаптивних стеганографічних методів, має суттєві обмеження, обумовлені мінімізацією змін параметрів ЗК при вбудовуванні повідомлень.

Перелік посилань

1. Fridrich J. Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications / J. Fridrich. – Cambridge University Press. – 2009. – 437 p.
2. Kodovsky J. Steganalysis of JPEG Images Using Rich Models / J. Kodovsky, J. Fridrich // XIV Proc. SPIE, Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics. – 2012.
3. Chen M. et al. JPEG-Phase-Aware Convolutional Neural Network for Steganalysis of JPEG Images / M. Chen, V. Sedighi, M. Boroumand, J. Fridrich // 5th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security. – 2017. – pp. 75-84.
4. Progonov D. Information-Theoretic Estimations of Cover Distortion by Adaptive Message Embedding / D. Progonov // Int. J. "Information Theories and Applications". – 2018. – Vol. 25, Iss. 1. – pp. 47-62.
5. Filler T. Gibbs Construction in Steganography / T. Filler, J. Fridrich // IEEE Trans. Inf. Forensics Security. – 2010. – Vol. 5, Iss. 4. – pp. 705-720.
6. Holub V. Designing Steganographic Distortion Using Directional Filters / V. Holub, J. Fridrich // Proc. of IEEE Workshop on Information Forensic and Security. – 2012.
7. Nielsen F. On the Chi square and higher-order Chi distances for approximating f-divergences / F. Nielsen, R. Nock // Cornell University Library. Electronic Archive. – 2013.
8. Huiskes M.J. The MIR Flickr Retrieval Evaluation / M.J. Huiskes, M.S. Lew // Proc. of ACM Int. Conf. on Multimedia Information Retrieval. – 2008.
9. Avcibas I. et al. Steganalysis using image quality metrics / I. Avcibas, N. Memon, B. Sankur // IEEE Trans. Image Process. – 2003. – Vol. 12, Iss. 2. – pp. 221-229.
10. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера. – 2012. – 1104 с.

References

- [1] Fridrich J. (2009) *Steganography in Digital Media*. DOI: 10.1017/cbo9781139192903
- [2] Kodovsky J. and Fridrich J. (2012) Steganalysis of JPEG images using rich models. *Media Watermarking, Security, and Forensics 2012*. DOI: 10.1117/12.907495

- [3] Chen M., Sedighi V., Boroumand M. and Fridrich J. (2017) JPEG-Phase-Aware Convolutional Neural Network for Steganalysis of JPEG Images. *Proceedings of the 5th ACM Workshop on Information Hiding and Multimedia Security - IHMMSec '17*. DOI: 10.1145/3082031.3083248
- [4] Progonov D. (2018) Information-Theoretic Estimations of Cover Distortion by Adaptive Message Embedding. *Information Theories and Applications*, Vol. 25, No 1, pp. 47-62.
- [5] Filler T. and Fridrich J. (2010) Gibbs Construction in Steganography. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, Vol. 5, Iss. 4, pp. 705-720. DOI: 10.1109/tifs.2010.2077629
- [6] Holub V. and Fridrich J. (2012) Designing steganographic distortion using directional filters. *2012 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS)*. DOI: 10.1109/wifs.2012.6412655
- [7] Nielsen F. and Nock R. (2014) On the chi square and higher-order chi distances for approximating f-divergences. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 21, Iss. 1, pp. 10-13. DOI: 10.1109/lsp.2013.2288355
- [8] Huiskes M.J. and Lew M.S. (2008) The MIR flickr retrieval evaluation. *Proceeding of the 1st ACM international conference on Multimedia information retrieval - MIR '08*. DOI: 10.1145/1460096.1460104
- [9] Avcibas I., Memon N. and Sankur B. (2003) Steganalysis using image quality metrics. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 12, Iss. 2, pp. 221-229. DOI: 10.1109/tip.2002.807363
- [10] Gonzalez R.C and Woods R. E. (2007) *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 976 p.

Анализ изменений хи-квадрат расстояния между распределениями яркости пикселей при фильтрации изображений-контейнеров и стеганограмм

Прогионов Д. А.

В работе исследованы изменения распределения значений яркости пикселей при фильтрации изображений-контейнеров и стеганограмм. Установлено, что применение медианного и винеровского фильтров при стегоанализе цифровых изображений позволяет выявлять слабые различия в распределениях яркости пикселей контейнера и стеганограмм, сформированных согласно адаптивным методам HUGO и WOW. Показано, что анализ изменений χ^2 -расстояния между распределениями яркости пикселей исходных и обработанных изображений

позволяет повысить вероятность обнаружения стеганограмм. Полученные результаты дают возможность повысить точность стегоанализа даже в случае слабого заполнения контейнера стегоданными (менее 10%), для которого использование стандартных методов обнаружения стеганограмм является неэффективным.

Ключевые слова: цифровые изображения, стегоанализ, хи-квадрат расстояние

Analysis of alteration the chi-squared divergence for pixels brightness distributions by cover and stego images filtering

Progonov D. O.

Information protection of government agencies, organizations as well as private corporations is topical task today. Great attention is given to prevention of confidential information leakage by data transmission in global and local communication systems. Revealing and destruction of covert channels require investigation of information flows in communication systems with usage of steganalysis methods. Providing a high detection accuracy (more than 95%) of formed stego files requires a priory information about features of steganographic methods, used for message embedding into cover files, such as digital images. It leads to significantly decrease the performance of widespread steganalysis in case of stego image formation according to unknown embedding methods. Therefore, it is required a development of universal (blind) stegdetectors, that allow reliable revealing stego images even in case of limited a priory information about used steganographic algorithm. One of the toughest challenges for known universal stegdetectors is revealing of stego images, formed according to advanced adaptive embedding methods. Feature of these methods is minimization of cover image parameters distortions by message hiding. The work is devoted to investigation the effectiveness of preliminary processing (filtering) of cover as well as stego images for improving the accuracy of blind stegdetectors. The case of usage the median and wiener filters for cover/stego image processing is analyzed. Based on the results of research it is revealed that preliminary processing of analyzed images with median and wiener filters gives opportunity to detect weak alterations of cover image's pixels brightness distributions, caused by stego data embedding according to HUGO and WOW adaptive methods. It is shown that analysis of χ^2 -divergences between distributions for initial and processed cover as well as stego images allows increasing detection accuracy of universal stegdetectors. Obtained results allow improve stegdetector's performance even in case of low payload a cover image (less than 10%), when standard detection methods are inefficient.

Key words: digital image, steganalysis, chi-squared divergence