

## ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ RS-СТЕГАОНАЛІЗУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОБРАЖЕНЬ

*Представлено результати дослідження статистичних властивостей кольорових зображень за методом RS-стегааналізу. Показано, що RS-стегааналіз має перспективи стати методологічною базою для побудови нових алгоритмів ідентифікації особливостей зображень і створення концептуально нових підходів до цифрової обробки образів.*

*The results of research statistical features for color images by RS-stegoanalysis are presented. In paper it was shown that RS-stegoanalysis has perspectives to become the methodological base for building the new images' features identification algorithms and for creating the new concepts for digital image processing.*

Ключові слова: Кольорові зображення, RS-стегааналіз, оцінка дисперсії шуму, метод ковзного вікна.

### Вступ

Дослідження статистичних характеристик цифрових зображень є основою для розробки нових методів фільтрації шумів, покращення методів двомірної інтерполяції, синтезу тримірних моделей віртуальної реальності тощо. Відомо, що багато методів цифрової обробки зображень було запозичене з оптики, кібернетики, спеціальних розділів математики, радіоелектроніки і використовують особливості сприйняття візуальних образів людиною.

### Аналіз останніх досліджень та виділення не вирішених раніше частин проблеми

Сучасні прикладні дослідження характеристик зображень та сигналів ґрунтуються на використанні програмних комплексів комп'ютерної математики типу *MATLAB*, *MathCAD*, *Mathematica* та ін., які містять широкий набір програм цифрового аналізу і обробки сигналів та допускають створення нових [1] шляхом написання функцій користувачем у цих комплексах або на відомих мовах програмування. Відомо, що при оцінюванні параметрів отриманих даних завжди виникає проблема розрізнення шумів природного, технічного походження та артефактів реєстрації від корисної для даного дослідження інформації. Пошук методів розв'язання цієї проблеми призвів до створення класичних методів статистичного оцінювання параметрів експериментальних результатів, спектрального та вейвлет аналізу, великого набору методів фільтрації тощо.

Вищезазначені методи ґрунтуються на роботі з дійсними або цілими числами, а значення, що знаходяться на межі розрядності процесора трактуються як можлива арифметична похибка. RS-стегааналіз [2, 3], навпаки, досліджує закономірності і зв'язки для найменш значимих біт даних з сусідніми в околиці бітами та тими бітами, які знаходяться на рівень вище. Математичний апарат RS-стегааналізу включає не тільки статистичні, але й комбінаторні методи дослідження даних, що обумовило його унікальну здатність до розпізнавання і оцінки величин штучних змін у зображеннях, не доступних традиційним статистичним методам.

Тому дослідження можливостей RS-стегааналізу, а також розгляд концепцій створення похідних від нього алгоритмів для суміжних з стегаграфією областей цифрової обробки сигналів та зображень, статистичного оцінювання параметрів експериментальних даних є актуальними науковими проблемами. Зазначимо, що до запропонованої роботи ця тема ще не була предметом досліджень.

### Формулювання цілей статті

Метою написання статті є:

- виклад результатів дослідження масивів зображень за допомогою RS-стегааналізу;
- порівняння отриманих результатів з даними статистичних досліджень масивів зображень за відомими методами;
- визначення перспективи запозичення методики RS-стегааналізу для підвищення якості аналізу цифрових фотографій;
- опис методики перевірки придатності цього методу виявлення прихованих даних для створення нових методів фільтрації зображень після відповідних модифікацій.

### Постановка задачі

У роботі розглянуто використання RS-стегааналізу для досліджень масивів зображень, їх реакції на застосування сучасних складних цифрових фільтрів, визначення чутливості статистичних характеристик зображень до малих стохастичних збурень, викликаних додаванням даних (стегабіт) у найменш значимі біти (НЗБ) зображень. Дослідження властивостей кольорових зображень за методом RS-стегааналізу було виконано на декількох великих вибірках зображень різного класу, що підтверджує статистичну достовірність наведених даних. Подальші дослідження у вказаному напрямку можуть бути використані для побудови нових методів комп'ютерної обробки зображень.

**Принцип стегаграфічного вбудовування інформації у найменш значимі біти зображення**

Розглянемо стегаграфічне приховування даних у зображеннях [2– 9] за методом заміни найменш

значимого біта (НЗБ) на прикладі цифрових фотографій. Сучасні комп'ютерні зображення представляють собою масиви натуральних чисел, елементами яких є впорядковані 24-бітні структури для кольорових зображень або 8-бітні додатні числа для монохромних зображень, що відповідають пікселям зображення.

На рис. 1 наведено бітове представлення фрагменту рядка зображення і схему стеганографічного приховування інформації за методом заміни найменш значимих бітів (НЗБ) образу бітами текстового рядка. Для цього літери повідомлення замінюють значеннями відповідної кодової таблиці (наприклад, використовують код ASCII – American Standard Code for Information Interchange), а потім його перетворюють у бітову послідовність. Після цього найменш значимі (молодші) біти байтів кольорового каналу зображення (чисел, що відповідають яскравості) замінюють бітами приховано тексту (рис. 1). Стовпчик римських цифр відповідає номерам біту у байті, рядок чисел на білому фоні зверху рисунку – це значення байтів до вбудовування прихованих даних, а білі числа на чорному фоні – після вбудовування. Сірий прямокутник знизу містить біти, якими будуть замінитись найменш значимі біти (рівень № I) байтів зображення.

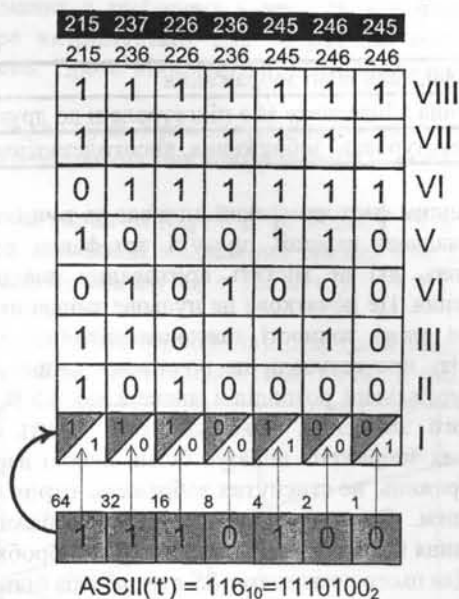


Рис. 1. Ілюстрація принципу стеганографічного приховування інформації у зображеннях

На рис. 1 схематично показано алгоритм вбудовування бітової послідовності літери "t" у пікселі зображення за методом заміни найменш значимого біта образу. В результаті, у зображення вбудовується текст без помітної зміни у якості фотографії, що можна бачити по значенням байтів зверху рисунка.

### Концепція RS-стегоаналіза

Для більшості зображень НЗБ рівень вважається випадковим, оскільки він не містить будь-якої легко розпізнаваної структури. Проте, НЗБ рівень, навіть якщо виглядає випадковим, є тим не менш пов'язаним з іншими бітовими рівнями нелінійною залежністю, на чому і ґрунтується RS-стегоаналіз. Тому класичні статистичні характеристики і оцінки, застосовані до НЗБ-рівня, не можуть надійно визначити ступінь його випадковості. RS-стегоаналіз ґрунтується на дослідженні та числовій оцінці цієї залежності і тому може досить точно оцінити довжину вбудованих у зображення повідомлень. Аналіз відмінностей у НЗБ-площині і зсунутій НЗБ-площині стего-образу дозволяє надійно виявляти повідомлення розміром від 1% і більше від загальної кількості пікселів (1 біт на відлік). У відповідності до статей [2, 3], метод виявлення НЗБ вбудованого прихованого повідомлення, відліки якого випадково розміщені у площині зображення, складається з наступних кроків:

- 1) Розділення стего-образу на групи сусідніх відліків, які не мають спільних елементів.
- 2) Обчислення дискримінаційної функції для кожної групи.
- 3) Виконання над групами переставних операцій для визначення обернено збурених груп пікселів.
- 4) Віднесення груп відліків за результатом переставних операцій до класів: регулярні (R), сингулярні (S), невикористані (U).
- 5) Нанесення на RS-діаграму значень для R і S груп стего-образу.
- 6) Побудова кривих RS-діаграми і обчислення їх перетину за екстраполяцією.
- 7) Визначення існування або не існування секретного повідомлення за перетином кривих.
- 8) Розрахунок довжини повідомлення (процент виявлених стегобіт – ПВС) за координатами перетину кривих.

### Фактори, що впливають на точність RS-стегоаналіза

Для сильнозашумлених і дрібнотекстурованих зображень різниця між кількістю регулярних і сингулярних груп зображення мала [9]. Відповідно, лінії в RS-діаграмі перетнуться під малим кутом і точність зменшиться.

У табл. 1 наведено типові значення розмірів виявлених повідомлень у пустих зображеннях для фотографій різних типів.

Отже, для деяких типів зображень, наведених у табл. 1, ймовірність виявлення прихованих даних суттєво знижується навіть для класичної НЗБ-стегографії, якщо відповідні програми використовуються підготовленими особами.

Методика RS-стегоаналізу більш точна для повідомлень, стегобіти яких випадково розміщені у площині стего-образу, ніж для повідомлень, вбудованих локально. Щоб застосувати RS-стегоаналіз у цьому випадку треба перейти до використання методики на базі ковзного вікна.

Типові відсотки значень розмірів повідомлень, виявлених RS-стегааналізом

Тип зображення	Хибно визначена довжина повідомлення у відсотках від кількості НЗБ зображення
Фотографії, скановані зображення	≈ 0–10 %
Зображення з Інтернету або підготовлені до друку	≈ 15 + 20 %
Дрібнотекстуровані зображення, високодеталізовані зображення	≈ 30 + 100 %

Іншим фактором, який впливає на точність оцінки довжини вбудованого повідомлення, є природний шум. Випадкові варіації шуму і артефакти реєстрації фотографії можуть призвести до того, що у зображеннях, які не містять прихованих повідомлень, RS-аналіз буде показувати наявність короткого повідомлення. Це початкове не нульове зміщення може бути як позитивним, так і негативним і встановлює теоретичні межі точності стегааналітичної методики представленої у роботах [2, 3]. Автори RS-стегааналізу протестували це початкове зміщення для набору з 331 чорно-білого JPEG зображення, які мають гауссівський розподіл з дисперсією 0,5 %. Для менших зображень є тенденція збільшення варіації початкового зміщення, оскільки вони мають меншу кількість RS-груп. Сканування напівтонових і зашумлених зображень показує більш високі варіації зміщення. З іншого боку, зміщення дуже мале для JPEG-зображень, не стиснутих зображень, отриманих з цифрових камер і результатів сканування з високим розрізненням. Саме дослідженню цього небажаного для стегааналізу ефекту і аналізу можливостей використання його для задач комп'ютерної обробки зображень і присвячена стаття.

Для цього розглянемо RS-стегааналіз більш детально.

Нехай фотографія – це зображення розміром  $M \times N$  пікселів зі значеннями пікселів з множини  $P$ . Наприклад, для 8-бітного чорно-білого зображення  $P = \{0, 1, \dots, 255\}$ . Аналіз стега-образу починається з ділення зображення на групи з  $n$  суміжних пікселів  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , які не перетинаються. У алгоритмі вибирають групи з  $n$  сусідніх пікселів у рядку. Далі визначається дискримінаційна функція  $f$ , за якою для кожної групи  $G = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  розраховується дійсне число  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}$ . Значення дискримінаційної функції визначає регулярність (гладкість) групи  $G$  пікселів. Дискримінаційні функції можуть мати різний вид, але повинні мати таку властивість: чим більше шуму в елементах групи, тим менше значення дискримінаційної функції.

Наприклад, задамо дискримінаційну функцію  $f$ , за якою будемо оцінювати "варіації" групи  $G$ :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^{n-1} |x_{i+1} - x_i| \quad (1)$$

Можна побудувати іншу дискримінаційну функцію на базі статистичних моделей або апріорної інформації про зображення.

Введемо операцію обернення  $F$  на  $P$  яку називають "перевертання". Перевертання – це перестановка рівнів відтінків сірого, яка складається з двох циклів і має властивість таку, що  $F(F(x)) = x$ , для всіх  $x \in P$ .

Перестановка  $F_1: 0 \leftrightarrow 1, 2 \leftrightarrow 3, \dots, 254 \leftrightarrow 255$  відповідає зменшенню НЗБ кожного сірого рівня. Далі задаємо зсунуте НЗБ перевертання  $F_{-1}$  як  $1 \leftrightarrow 0, 2 \leftrightarrow 1, 3 \leftrightarrow 2, \dots, 253 \leftrightarrow 254$  або  $F_{-1} = F_1(x+1)-1$  для всіх  $x$ .

Для повноти, також визначаємо  $F_0$  як тотожну перестановку  $F(x)$  для всіх  $x \in P$ . Дискримінаційна функція  $F$  використовується для виділення трьох груп [2, 3]:

Регулярні групи  $G \in R \Leftrightarrow f(F(G)) > f(G)$

Сингулярні групи  $G \in S \Leftrightarrow f(F(G)) < f(G)$

Невикористані групи  $G \in U \Leftrightarrow f(F(G)) = f(G)$

Позначення  $F(G)$  означає, що операція перевертання  $F$  застосована до всіх компонент вектора  $G$ . Можливі і інші варіанти перевертання до компонент вектора  $G$ . Операція перевертання вектора може бути виражена за допомогою маски  $M$ , яка називається  $n$ -кортежем зі значеннями  $-1, 0$  і  $1$ . Перевернута група  $F(G)$  визначається як  $(F_{M(1)}(X_1), F_{M(2)}(X_2), \dots, F_{M(n)}(X_n))$ .

Метою застосування перевертальної функції  $F$  є збурення малої кількості значень пікселів зворотним способом, чим симулюється дія НЗБ-стегаграфічного алгоритму. Для типових зображень додавання невеликої кількості шуму (тобто перевертання малої кількості значень) призведе скоріше до збільшення значення дискримінаційної функції. Тобто загальна кількість регулярних груп ( $R$ ) буде більшою ніж кількість сингулярних груп ( $S$ ).

Позначимо кількість регулярних груп для маски  $M$  як  $R_M$  (у відсотках від всіх груп). Аналогічно через  $S_M$  позначимо відносну кількість сингулярних груп. Маємо  $R_M + S_M \leq 1$  для позитивної маски і  $R_M + S_M \leq 1$  для негативної маски. Статистичні гіпотези стегааналітичної методики полягають у тому, що в типовому зображенні очікуване значення  $R_M$  дорівнює  $R_M$  і те саме вірно для  $S_M$  і  $S_M$ :

$$R_M \approx R_M \text{ і } S_M \approx S_M \quad (2)$$

Ця гіпотеза може бути перевірена евристично аналізом залежності (1).

Перевертальна операція  $F_{-1}$ , як і  $F_1$  застосовується до зображення, інтенсивності кольорів якого будуть зсунуті на одиницю. Для типового зображення не існує апріорної причини, чому кількість  $R$  і  $S$  груп

повинна суттєво відрізнятися при зсуві кольорів на одиницю.

Автори RS-стегааналізу [2, 3] переконані, що мають вичерпні експериментальні докази того, що гіпотеза (2) виконується дуже точно для зображень, отриманих з цифрових камер, як для форматів з втратами, так і для форматів без втрат. Це також добре витримується для зображень, оброблених звичайними операціями і для більшості сканованих зображень. Проте відношення (2) порушується, якщо НЗБ-рівень рандомізовано, наприклад, стегаанографією НЗБ.

Рандомізація НЗБ-рівня спрямовує різницю між  $R_M$  і  $S_M$  до нуля, з ростом довжини  $m$  повідомлення. Після перевертання НЗБ-рівня 50 % пікселів (що буде після вбудовування біта шифрованого повідомлення у кожен піксель) отримаємо  $R_M \approx S_M$ .

Помічено, що рандомізація НЗБ-рівня має протилежний вплив на  $R_M$  і  $S_M$ . Їх різниця збільшується зі зростанням довжини  $m$  вбудованого повідомлення. Просте пояснення збільшення різниці між  $R_M$  і  $S_M$  може бути запропоновано для маски  $M = [0; 1; 1; 0]$ . Означимо множину  $C_i = \{2i, 2i+1\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, 127$  і множину груп  $C_{rsi} = \{G | G \in C_r \times C_s \times C_i\}$ .

Існує  $128^3$  замкнених множин, кожна з яких складається з 8 груп (триплетів). Для цілей аналізу було обрано чотири різних типи множин, ігноруючи ті, що горизонтально і вертикально симетричні. У табл. 2

представлено ці чотири типи і кількість  $R$ ,  $S$  і  $U$  груп після  $F_1$   $F_{-1}$  для кожного типу. З табл. 1 видно, що рандомізація НЗБ намагається вирівняти кількість  $R$  і  $S$  груп в кожній підмножині після  $F_1$ , тоді як кількість  $R$  груп зростає, а кількість  $S$  груп спадає після  $F_{-1}$ .

Таблиця 2

Кількість  $R$  і  $S$  груп після перевертання першого і другого етапів

Тип множини	$F_1$ перевертання	$F_{-1}$ перевертання
$r = s = t$	$2R, 2S, 4U$	$8R$
$r = s > t$	$2R, 2S, 4U$	$4R, 4U$
$r < s > t$	$4R, 4S$	$4R, 4S$
$r > s < t$	$8U$	$8U$

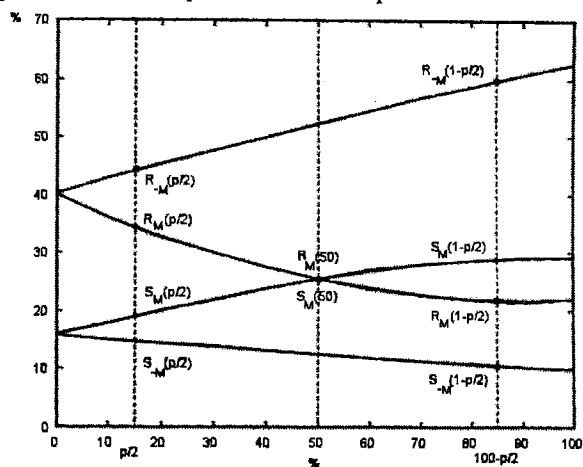


Рис. 2. RS-діаграма

RS стегааналітична методика представлена у статтях [2, 3] оцінює 4 криві RS діаграми і обчислює їх перетин за екстраполяцією. Загальна форма чотирьох кривих на діаграмі змінюється залежно від зображення від практично ідеально лінійної до кривої. Експерименти показали, що  $R_M$  і  $S_M$  добре наближуються прямими лініями; внутрішні криві  $R_M$  і  $S_M$  достатньо добре апроксимуються поліномами другого порядку.

### Дослідження закономірностей у каналах кольорових зображень за методом RS-стегааналізу

В результаті досліджень, проведених над 49678 зображеннями (оригінальними фотографіями без стегобіт), які доступні в Інтернеті, було визначено, що хибне визначення проценту виявлених стегобітів (ПВС) для них вище, ніж вказане авторами патенту для фотографій з цифрових камер і сканерів.

На думку авторів, це пов'язано з тим, що над такими зображеннями було виконано обробку для підготовки до друку, яка включає високочастотну фільтрацію, підвищення яскравості і контрасту, вирівнювання значень гістограми і т.п. операції, які підвищують візуальну якість зображення. Це супроводжується збільшенням сингулярних груп у цифровій фотографії.

Також було помічено не рівномірне зашумлення по каналам для кольорових зображень. Символами  $R$ ,  $G$ ,  $B$  позначено значення коефіцієнту, отриманого за RS-стегааналізом для червоного, зеленого та синього каналів відповідно. Очевидно, що частотами співвідношень кольорів – нерівностями можна побудувати множину всіх можливих подій у вибірці. Елементарні події подані повної множини подані у табл. 3. Вибірка № 3 з 1700 фотографій була зроблена цифровими камерами фотоапаратів, мобільних телефонів. Видно, що закономірність розподілу нерівностей зберігається і для фотографій до яких не застосовувались цифрові перетворення та відсутні цифрові водяні знаки.

В результаті обчислень отримано наступні частоти появи нерівностей у відсотках, при цьому похибка для рівностей і нерівностей була встановлена в межах 1 %, щоб врахувати обмеження розрядності обчислень (табл. 3). Загальна кількість оброблених зображень склала 51378 файлів.

Зазначимо, що висока повторюваність частот появи нерівностей дозволяє стверджувати, що явище має високу статистичну стійкість. Видно також, що нерівності, в яких переважає RS-коефіцієнт у червоному або синьому каналі переважають за частотою появи інші (табл. 4).

Відносні частоти появи нерівностей для двох вибірок

Вибірка	Нерівності													
	$R > G > B$	$R > B > G$	$G > R > B$	$G > B > R$	$B > R > G$	$B > G > R$	$R = G > B$	$B = R = G$	$G = B > R$	$R > G = B$	$B = R > G$	$G > B = R$	$R = G = B$	
1	3,46	8,26	8,29	9,43	21,99	9,43	1,03	2,36	1,11	1,72	1,28	1,35	0,28	
2	6,12	8,95	11,23	10,95	19,05	6,97	0,86	1,33	0,97	0,92	1,25	0,97	0,43	
3	0,71	2,18	7,82	11,65	25,29	0,06	0,12	0,59	0,59	0,24	0,35	0,24	0,18	

Таблиця 4

Відносна частота появи кольорів на першому місці у нерівностях

Назва кольорового каналу	Значення максимуму, %		
	Вибірка 1	Вибірка 2	Вибірка 3
Блакитний (B)	43,78	37,35	55,94
Червоний (R)	33,44	35,99	23,13
Зелений (G)	19,07	23,15	19,71

Нерівності, що відповідають RS-стегааналізу (табл. 3, 4) можуть безпосередньо використовуватись для перевірки великих масивів зображень на предмет вбудовування прихованих даних або для створення стеганографічного алгоритму керування заповненням інформацією на НЗБ-методом для великих масивів зображень, що не впливає на сукупну статистику для набору зображень.

#### Дослідження впливу цифрових фільтрів на значення ПВС

Відомо, що зображення з мереж загального доступу можуть мати цифрові водяні знаки, над ними можуть бути виконані операції покращення візуальної якості або спеціальні дизайнерські перетворення типу підготовки до друку. Тому було взяти 1700 фотографій з аматорської колекції, зроблені мобільним телефоном та цифровою камерою, над якими гарантовано не виконували будь-які перетворення. Далі вибірка була оброблена існуючими фільтрами (посилення кольору, зменшення/збільшення різкості, замулення і т.п.) і було виконано RS-стегааналіз, результати якого було наведено у табл. 5, 6.

За результатами експерименту було виявлено, що більшість зображень можна розділити на три групи:

- 1) зображення, на які перетворення суттєво впливають в напрямку зменшення або збільшення ПВС;
- 2) зображення, ПВС яких мало змінюється в результаті застосування фільтрів та перетворень будь-яких типів;
- 3) зображення, ПВС яких змінюється при застосуванні одних перетворень і мало змінюється при використанні інших.

За впливом конкретного фільтра на вибірку можна виділи фільтри, що зменшують ПВС (табл. 6) та такі, що збільшують ПВС (табл. 5). Дослідження будуть продовжені в напрямку розширення номенклатури фільтрів і їх комбінацій, що будуть застосовуватись до вибірок цифрових фотографій.

Таблиця 5

Кількість зображень у групах, що відповідають фільтрам, які збільшують ПВС

Назва фільтра і класифікація операції	Кількість зображень, %			
	2% – max	2–5%	5–10%	10% – max
Оригінал	19	13	4,6	1,7
Малтіплай	26	19,2	4,6	2
Оверлей	25	20	4	1
Хайпас	20	13	7	2
<i>EnhanceDetails+</i> <i>EnhanceFocus+</i> <i>Sharpen_30+</i> <i>Soften30</i>	29,8	20,5	6	3,24
<i>Reduce noise</i>	19	14,4	3,6	1,1
<i>AutoContrast+</i> <i>FocusRestoration</i>	97	12,5	19	65,4
<i>Normalize</i>	20,7	13,7	5,15	1,88



Кількість зображень у групах, що відповідають фільтрам, які зменшують ПВС

Назва фільтра і класифікація операції	Кількість зображень, %			
	2 % – max	2– 5 %	5– 10 %	10 % – max
Оригінал	19	13	4,6	1,7
Медіанний	0,06	0,06	–	–
Гауссівський	0,35	0,35	–	–
Minimum 3x3	1,94	1,94	–	–
Average 3x3	2,12	2,12	–	–

Дослідження дії стеганографічного алгоритму, який вбудовує випадкову послідовність біт в НЗБ рівень цифрової фотографії, на вибірці зображень

**Мета досліджень** полягала у визначенні кількісних і якісних показників для середньоквадратичного відхилення оцінки шуму (СКВОШ) і RS-стегоаналізу при внесенні в НЗБ-рівень цифрових фотографій різної кількості рівномірно розподілених у площині зображення випадкових біт за методами стеганографії.

**Методологія досліджень.** Методологічною основою планування чисельних статистичних експериментів був метод еталонного моделювання. Для вибірки вихідних зображень чисельно розраховується СКВОШ за методом ковзного вікна і процент виявлених стегобітів (ПВС) за допомогою RS-стегоаналізу. Потім у вибірку зображень додаються випадково розміщені у площині цифрової фотографії біти за стеганографічним алгоритмом. Для кожного зображення з вбудованими стегобітами розраховується СКВОШ і ПВС. Операції повторюються для різних об'ємів стегобіт. Отримані значення СКВОШ перевіряються на чутливість до додавання стегобіт, тобто у відповідності з принципами еталонного моделювання. На основі попереднього вивчення проблеми [1,4,5] було вибрано ітеративний спосіб заповнення об'єму НЗБ зображення на 15 %, 30 %, 50 %, 70 %, 100 %.

Дослідження змін значення СКВОШ зображення при додаванні стегобіт у НЗБ фотографії і точності визначення об'єму вбудованих стегобіт перевіряються на двох вибірках цифрових фотографій різного походження та розміру зображень для того, щоб виявити також дію системи цифрової реєстрації інформації на отримані результати.

Дослідження точності методу RS-стегоаналізу виконувалось на двох вибірках цифрових фотографій з різних наборів фотоапаратів при різних об'ємах заповнення НЗБ рівня зображення. Масиви фотографій, з яких комплектувались вибірки, мають різний розмір і рівень шуму та були сфотографовані з інтервалом часу у десять років, тобто при різному рівні розвитку технологій цифрової фотографії.

**Стеганографічний алгоритм.** Для перевірки дії вбудовування стегобіт на рівень шуму у зображенні і значення ПВС, отриманого за методом RS-стегоаналізу, було використано класичний алгоритм заміни біт у НЗБ зображення з випадковим розміщенням місць вбудовування у площині. Рівень заповнення всіх каналів зображення однаковий. Далі рисунок з індексом "а" відповідає вибірці Test (407 зображень, розміром 2295\*1536 пікселів), зробленої десять років тому, "б" – Datacr (600 зображень, розміром 2950\*2094 пікселів), зробленої два роки тому.

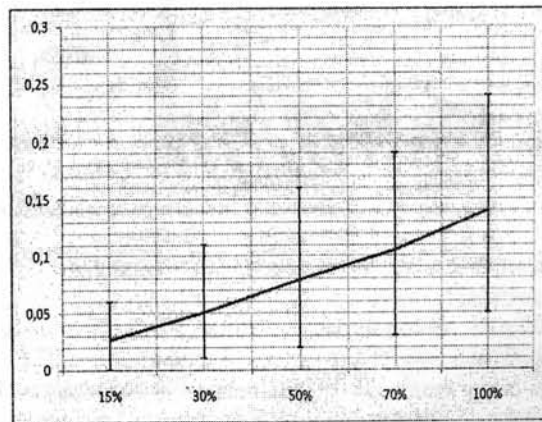
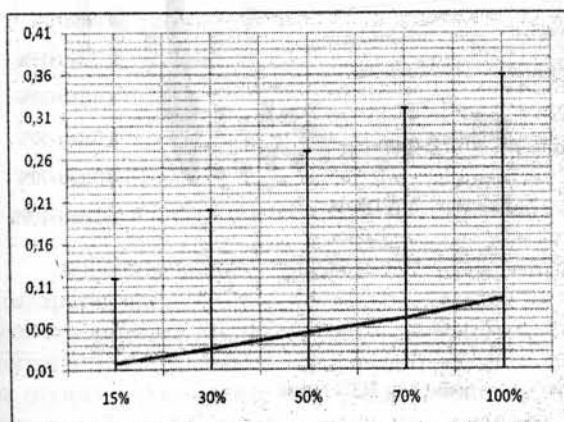


Рис. 3. Графік різниці між початковим СКВ і СКВ при додаванні відсотку стегобіт

На рис. 3 показано графіки різниці між отриманим середнім за вибіркою СКВОШ при додаванні стегобіт і середнім за вибіркою СКВОШ для початкових зображень. Позначення на рис. 3: графік – вибіркоче середнє СКВОШ і планки значень максимуму і мінімуму. Аналогічна картина для СКВОШ кольорових каналів та значень медіан, середніх значень зображень за вибіркою – додавання стегобіт призводить до зростання абсолютних значень на 0,00–0,06. Таким чином, додавання стегобіт приводить до лінійного зростання всіх середніх за вибірками параметрів.

Стабільне лінійне зростання середніх за вибіркою всіх параметрів СКВОШ показаних на рис. 3 а, б

доводить, що додавання стегобіт викликає збільшення середнього за вибіркою не обумовлено арифметичними похибками обмеженої розрядності процесора ПК. Більше відхилення планок екстремумів значень вгору ніж вниз було викликано великою кількістю нульових значень, які зсунули чисельну величину середнього значення вниз відносно симетричного положення.

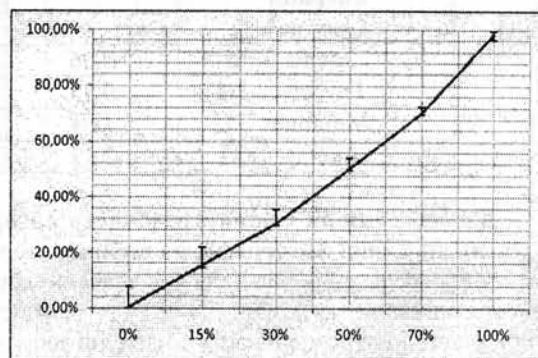
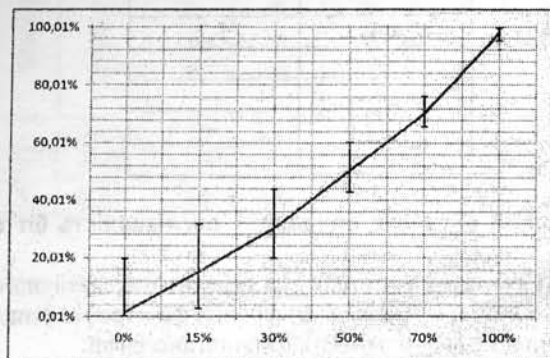


Рис. 4. Залежність ПВС за RS-стегоаналізом від додавання стегобіт у НЗБ

На рис. 4 а представлено залежність ПВС для різних рівнів заповнення НЗБ: на 15 %, 30 %, 50 %, 70 %, 100 % для дизайнерської вибірки *Test* цифрових фотографій десятилітньої давнини. Видно, що в середньому метод RS-стегоаналізу точно визначає ступінь заповнення НЗБ-рівня фотографій вибірки. Чим менший об'єм заповнення НЗБ фотографії, тим вище можлива похибка визначення факту вбудовування стегобіт (хибно позитивно визначені стегобіти) і їх відносної кількості в НЗБ-рівні зображення. Наприклад, при 0 % внесених стегобіт (оригінальні зображення) можливе хибно позитивне виявлення об'єму стегобіт зі значеннями від 0,06 до 19,5 %.

На рис. 4 б представлено результати чисельних експериментів для вибірки *Datacr*. Аналогічно до попередньої вибірки видно, що чим вищий об'єм заповнення фотографії тим менша похибка виявлення факту вбудовування стегобіт у зображення і визначення ПВС за RS-стегоаналізом. Низький рівень природного шуму реєстрації у фотографіях, отриманих на сучасному професійному обладнанні, обумовлює більш високу точність RS-стегоаналізу. Видно, що при малих рівнях заповнення НЗБ зображення (0–15 % об'єму заповнення НЗБ-зображення) похибка методу дає 5–10 % хибно позитивно виявлених стегобіт.

**Дослідження впливу на нерівності ПВС кольорових каналів зображень при додаванні стегобіт**

Раніше були отримані залежності у вигляді нерівностей ПВС для додавання стегобіт (табл. 3). Було встановлено, що додавання стегобіт змінює співвідношення частот нерівностей (рис. 5).

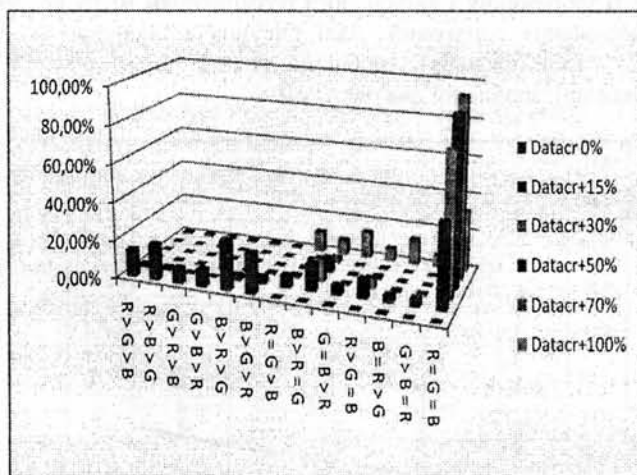
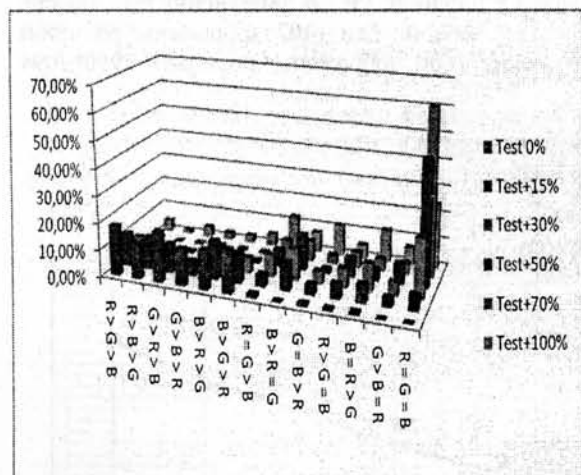


Рис. 5. Залежність нерівностей ПВС від об'єму заповнення НЗБ рівня

Позначення *Test+x %* або *Datacr+x %* на рис. 5 відповідають відсотку заповнення НЗБ рівня зображення стегобітами у вибірках. Видно, що при зростанні об'єму стегобіт у вибірці зображень статистика по нерівностям ПВС має тенденцію до обертання або прихованої періодичності, тобто додавання стегобіт призводить до повтору пропорцій нерівностей ПВС після досягнення деякого екстремума оцінки об'єму внесених стегобіт.

Так, при заповненні 100 % НЗБ фотографії статистичний паттерн (набір ознак) нерівностей повертається до вигляду, подібного до заповненні 15 % НЗБ фотографії – тобто було пройдено екстремум у співвідношеннях нерівностей, викликаний насиченням фотографії стегобітами, що призвело до попередніх статистичних співвідношень. Повна заміна стегобітами оригінальних біт зображення призводить до

співпадіння їх з половиною бітів зображення, що дало перерозподіл відсотків частот і повернення попередніх співвідношень частот нерівностей.

Нерівності по СКВОШ (рис. 6 а, б) мають форму подібну до нерівностей для ПБС при відсутності стегобіт, проте їх співвідношення практично не змінюється при додаванні стегобіт в НЗБ рівень зображень, оскільки (див. рис. 3) додавання стегобіт змінює величини СКВОШ кольорових каналів лише у сотих і десятих частках чисел.

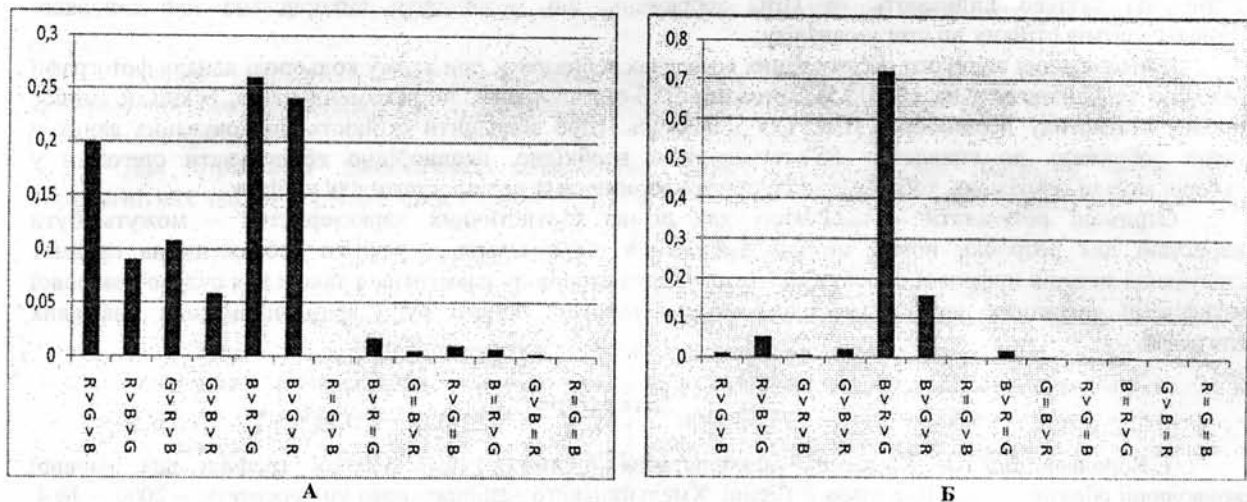


Рис. 6. Гістограма для нерівностей СКВ оцінки шуму

Видно, що зберігається залежність у зростанні частот нерівностей від синього, до червоного і мінімум для зеленого. В той же час, за абсолютними значеннями СКВОШ в каналах немає закономірності для мінімумів, максимумів і середніх значень за вибіркою зображень, а лише має місце лінійне зростання в сотих частках цих величин при додаванні стегобіт.

За аналогією до попередніх статистичних досліджень було перевірено закономірності і для середніх значень, медіан та СКВОШ у вибірках зображень (рис. 7) Як видно з рисунку, гістограми середніх значень мають максимуми у  $R > G > B$  та у  $B > R > G$ .

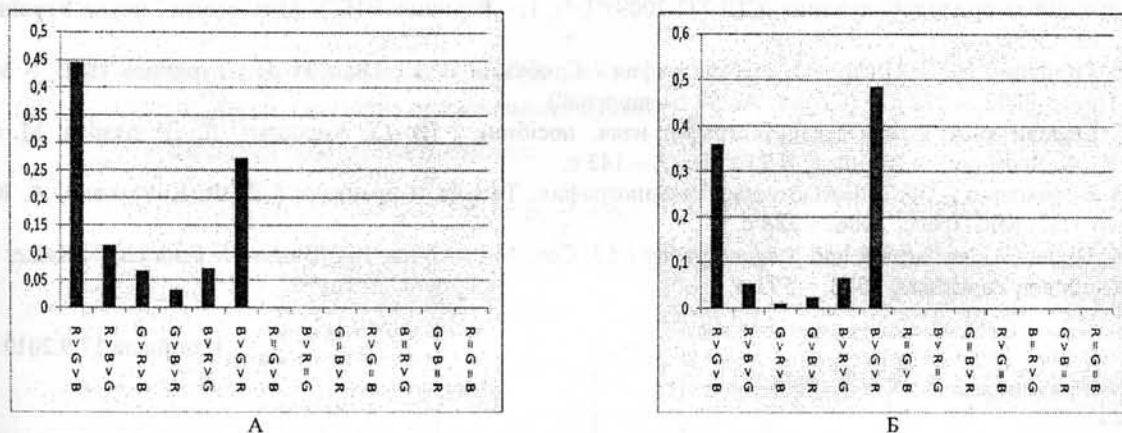


Рис. 7. Гістограми частот нерівностей для середнього значення у вибірці. (а) – Test, (б) – Datacr

Таку особливість можна пояснити специфікою побудови ПЗЗ-матриць сучасних цифрових фотоапаратів, які будуються на базі баєрівських матриць. Для медіан і СКВОШ у двох вибірках гістограми мають аналогічний вигляд до рис. 7 з тріхи більшими максимумами у таких же нерівностях. Подібні гістограми з екстремумами для середніх значень, медіан і СКВОШ, подані на рис. 5–7 для системи RGB, були отримані у вибірках: Test, Datacr і Вибірка № 3 і для зображень у системі HLS. Виявлений факт, на думку авторів, можна застосувати для покращення характеристик алгоритмів стиску великих масивів зображень шляхом групуванню зображень за нерівностями і створення методів доказової цифрової ідентифікації фотоапаратів, якими було зроблено серію зображень.

#### Висновки

Встановлено, що для кольорових каналів характерне різне значення хибно позитивного ПБС, розрахованого за методом RS-стегааналізу. Більш високі значення для блакитного каналу можна пояснити більш швидким релеєвським розсіюванням (поглинанням) синього спектру повітрям, порівняно з іншими кольорами, що відображається як підвищення рівня зашумлення у синьому кольоровому каналі. Високі значення для червоного кольору пояснюються більш високою контрастністю (детальністю) для червоного кольору, ширина спектру якого є найбільшою поміж трьох кольорів, а відносна ступінь поглинання є



найменшою, оскільки з нього починається спектр видимого світла. Найнижче відносне значення зафіксовано для зеленого кольору, який займає проміжне місце у спектрі між червоним і блакитним.

Крім того, за результатами обробки зображень різними фільтрами було визначено, що їх можна розділити на три групи: зображення, в яких перетворення суттєво впливають на ПВС, зображення, ПВС яких мало змінюється в результаті застосування фільтрів, та зображення, ПВС яких змінюється при застосуванні одних перетворень і мало змінюється при використанні інших. Це дозволило виділити ті фільтри, які суттєво впливають на ПВС зображень, що може бути використано при створенні стеганоалгоритмів стійких до стеганоаналізу.

Приховування великого об'єму даних в масивах зображень, при якому кольорові канали фотографії рівномірно заповнюються на 10–15 % методами НЗБ-стеганографії, не рекомендується, оскільки змінює природну статистику нерівностей ПВС для зображень. Щоб збільшити стійкість приховування даних у масивах зображень до виявлення RS-стеганоаналізом необхідно, неоднорідно вбудовувати стегобіти у кольорові канали зображень, тобто у відповідності з отриманими нерівностями для вибірок.

Отримані результати – нерівності для різних статистичних характеристик – можуть бути використані для розробки нових методів зменшення рівня шумів, перевірки зображень на предмет застосування методів цифрової обробки та вбудовування сторонніх елементів, а також для судово-доказової ідентифікації апаратних засобів реєстрації (*digital forensic*), якими були зроблені масиви цифрових фотографій.

### Література

1. Корольов В. Ю. Концепція використання бібліотек комп'ютерної графіки для умовної деконволюції образів / В. Ю. Корольов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2006. – № 4. – С. 140–145.
2. Fridrich J., Goljan M., and Du R. Detecting LSB Steganography in Color and Gray-Scale Images, Magazine of IEEE Multimedia, Special Issue on Security, October-November issue, 2001, pp. 22–28.
3. Fridrich J., Goljan M., Du R. Lossless Data Embedding – New Paradigm in Digital Watermarking // Special Issue on Emerging Applications of Multimedia Data Hiding. – 2002. – Vol. 2002, N 2. – P. 185–196.
4. Корольов В. Ю. Стеганографічна персоналізація інформації на базі ПК / В. Ю. Корольов, В. В. Поліновський, В. А. Герасименко // Вісті Академії інженерних наук України. – 2009. – № 2 (39). – С. 18–24.
5. Корольов В. Ю. Дослідження стійкості НЗБ-стеганографії до RS-аналізу / В. Ю. Корольов, В. В. Поліновський, В. А. Герасименко // Матеріали IV Міжнар. конф. [“Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2009)”]. Ч. 1. – Вінниця: ВНТУ Мін. освіти і науки України, 2009. – С. 53.
6. Грибунин В. Г. Цифровая стеганография / Грибунин В. Г., Оков И. Н., Туринцев И. В. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 272 с. – (Серия “Аспекты защиты”).
7. Основи комп'ютерної стеганографії: навч. посібник / [В. О. Хорошко, Л. Д. Азаров, М. Є. Шелест, Ю. Є. Яремчук]. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 143 с.
8. Конахович Г. Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович, А. Ю. Пузыренко. – К.: МК-Пресс, 2006. – 288 с.
9. Digital Watermarking and Steganography / I.J. Cox, M.L. Miller, J.A. Bloom, J. Fridrich, T. Kalker. – Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 593 p.

Надійшла 17.9.2010 р.

УДК 621.33

В.Д. КОСЕНКОВ, Л.В. СКУБІЙ  
Хмельницький національний університет

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З НЕЗМІННОЮ МАГНІТНОЮ ПРОВІДНІСТЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ

*В статті проведено дослідження конструкції електромагнітного перетворювача з незмінною магнітною провідністю повітряного проміжку. Отримані вирази для визначення електромагнітної сили та закону зміни в часі положення рухомого елемента перетворювача.*

*In clause the researches of a design of the electromagnetic converter with constant magnetic conductivity of an air interval are carried out (spent). The expressions for definition of electromagnetic force and law of change in time of a rule (situation) of a mobile element of the converter are received.*

Ключові слова: електромагнітний перетворювач, електромагнітна сила.

### Вступ

В багатьох конструкціях електричних апаратів електромагнітні системи побудовані таким чином, що при русі якоря змінюється магнітна провідність повітряного проміжку між якорем та нерухомою