

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУРЕНЬ КІЛЬКОСТЕЙ ПОСЛІДОВНИХ ТРІАД КОЛІРНИХ ТРИПЛЕТІВ ЯК РЕЗУЛЬТАТУ ПРОСТОРОВИХ МОДИФІКАЦІЙ КОЛІРНИХ СКЛАДОВИХ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ**Г.В. Ахмаметьєва, В.О. Гвоздик**Одеський національний політехнічний університет,
просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна; e-mail: a.v.akhmametieva@onu.ua

В роботі проводиться дослідження впливу збурних дій, спрямованих на просторову область цифрових зображень, на зміну кількості колірних триплетів в матриці унікальних кольорів цифрового зображення. В ході проведених обчислювальних експериментів встановлено, що при модифікації тільки синьої колірної матриці зображення кількість Blue-тріад (які указують на синю колірну складову зображення) в матриці унікальних кольорів цифрового зображення значно перевищує кількість Red- і Green-тріад, що при експертизі зображень дозволить однозначно встановити факт модифікації синьої колірної складової. Встановлена особливість характерна для більшості контейнерів в форматі з втратами, що пов'язано з технологіями формування і алгоритмами стиску цифрових зображень, тому, незважаючи на слабку чутливість людського ока до синього кольору, не рекомендується використовувати синю колірну складову зображення для просторових перетворень, зокрема стеганографічного перетворення. Найбільш придатними для просторових перетворень в ході експериментів виявлені зелена і червона колірні складові, оскільки їх модифікації призводять до появи меншої кількості Green- і Red-тріад (які указують на зелену і червону колірні складові зображення відповідно) і отримання порівняної кількості всіх видів тріад триплетів в матриці унікальних кольорів, що призведе до ускладнення коректної експертизи цифрового зображення з точки зору однозначного виявлення модифікованої колірної складової. Проведено обґрунтування отриманих результатів з позиції сприймання кольору людським оком, яке покладено в основу формування кольорів цифровими камерами, та особливості стиску зображень стандартом JPEG. Наведені критерії для визначення колірної складової цифрового зображення, яка забезпечує менші збурення у кількості послідовних тріад в матриці кольорів, і основні кроки визначення для конкретного зображення найбільш і найменш придатних для стеганографічного перетворення колірних складових з точки зору змін колірних триплетів в матриці унікальних кольорів.

Ключові слова: цифрове зображення, просторова область, аналіз послідовних тріад триплетів, стеганографія, експертиза цифрових зображень.

Вступ

Постійний розвиток інформаційних технологій та їх широке розповсюдження в усіх сферах людського життя сприяє доступному, легкому і швидкому обміну інформацією, будь то електронні документи, зображення, аудіо та інші. Існує величезна кількість програм, що дозволяють обробляти і редагувати електронну інформацію, покращувати характеристики зображень і аудіо, наприклад, художні фотографії, музичні файли з нестандартними звуковими ефектами. Однак в деяких випадках важливим є використання оригінальних, необроблених цифрових контентів, які можуть використовуватися як докази в суді, з цього приводу криміналістичні центри проводять експертизу, адже наявність будь-якої модифікації цифрового контенту може свідчити про підробку доказів і умисний намір свідка ввести суд в оману.

Останнім часом цифрові контенти, зокрема цифрові зображення (ЦЗ), використовують для організації прихованого каналу зв'язку для обміну повідомленнями, які нерідко містять небезпечні відомості щодо запланованих злочинів або викрадену конфіденційну інформацію. З метою ускладнення проведення експертизи і виявлення слідів злочину можуть застосовуватися різні «випадкові» модифікації, такі як накладання шумів, розмиття або підвищення контрастності, тощо, які хоч і призводять до порушення статистики ЦЗ, але дозволяють приховати головне. Найчастіше в якості контейнерів виступають кольорові ЦЗ, для забезпечення візуальної цілісності яких, як правило, використовується лише одна колірна складова, як правило, синя [1, 2], рідше зелена [3], деякі методи для модифікації застосовують всі три колірні складові зображення [4, 5]. Використання синьої колірної складової обумовлено нечутливістю людського ока до синіх відтінків, однак повноцінного дослідження щодо чутливості кольорів зображення до модифікації різних колірних складових проведено не було, частково в роботах [6-7], присвячених стеганоаналізу ЦЗ, були виявлені деякі особливості збурень кольорів при модифікації синьої колірної складової, такі як значне зменшення блоків з однаковими значеннями яскравості та зростання кількості Blue-триад в стеганоповідомленні у порівнянні з оригінальним контейнером. Використання цих особливостей дозволяє з одного боку точніше виявити модифіковану колірну складову при експертизі ЦЗ, а з іншого – враховувати порушення статистики ЦЗ при покращенні зображень або розробці нових стеганографічних методів. Тому питання виявлення найчутливішої колірної складової зображення і обґрунтованого вибору такої колірної складової, яка призвела би до ускладнення експертизи ЦЗ, є важливим і актуальним.

Мета і задачі роботи

Метою роботи є встановлення ролі чутливості кольорів цифрового зображення до збурних дій, накладених на певну колірну складову зображення, шляхом аналізу послідовних триад колірних триплетів в матриці унікальних кольорів ЦЗ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *задачі*:

- провести дослідження впливу збурних дій, спрямованих на певну колірну складову ЦЗ, на різноманітність кольорів при збереженні цілісності сприйняття ЦЗ, результатом якого є визначення найбільш чутливої до збурних дій колірної складової;
- провести обґрунтування отриманих результатів з точки зору особливостей сприйняття кольору людським оком і формування кольорових зображень цифровими фотокамерами;
- сформулювати критерії для вибору найбільш і найменш придатної для стеганографічного перетворення колірної складової ЦЗ.

Основна частина

При дослідженні чутливості кольорів ЦЗ до збурних дій, накладених на певну колірну складову зображення, будемо використовувати ЦЗ в форматі з втратами, представленими у відповідності до колірної схеми RGB. Кожний піксель ЦЗ представлений як триплет значень (r_{xy}, g_{xy}, b_{xy}) , де r_{xy}, g_{xy}, b_{xy} - значення яскравості (x, y) -го пікселя червоної, зеленої і синьої колірних складових відповідно.

В якості методу дослідження взято підхід, заснований на аналізі послідовних триад триплетів в матриці унікальних кольорів, покладений в основу стеганоаналітичного методу [8]. Під унікальними кольорами будемо розуміти всі унікальні триплети ЦЗ, їх кількість дорівнює U . Послідовні триади триплетів поділяються на три види [8]:

- Red-тріади, для яких справедлива умова:

$$(r_k, g_k, b_k) \in UCT \text{ AND } (r_k - 1, g_k, b_k) \in UCT \text{ AND } (r_k + 1, g_k, b_k) \in UCT, k = \overline{1, U}; \quad (1)$$

- Green-тріади, для яких справедлива умова:

$$(r_k, g_k, b_k) \in UCT \text{ AND } (r_k, g_k - 1, b_k) \in UCT \text{ AND } (r_k, g_k + 1, b_k) \in UCT, k = \overline{1, U}; \quad (2)$$

- Blue-тріади, для яких справедлива умова:

$$(r_k, g_k, b_k) \in UCT \text{ AND } (r_k, g_k, b_k - 1) \in UCT \text{ AND } (r_k, g_k, b_k + 1) \in UCT, k = \overline{1, U}, \quad (3)$$

де UCT - матриця унікальних кольорів розміром $U \times 3$, що містить U упорядкованих унікальних триплетів (r_k, g_k, b_k) , $k = \overline{1, U}$. При підрахуванні кількості послідовних триад триплетів послідовна триада асоціюється з середнім триплетом $(r_k, g_k, b_k) \in UCT$, для якого виконуються умови (1), (2) або (3) в залежності від виду триади.

В роботі [8] встановлено, що ЦЗ в форматі з втратами, яке не зазнало ніяких збурних дій, містить не більше 2.5% середніх триплетів, асоційованих з Red-, Green- і Blue-тріадами. В результаті стеганоперетворення кількість триад значно зростає, більш того найбільше зростання характерно саме для того виду триад, який відповідає колірній складовій, куди відбувалася вбудова додаткової інформації. Використання цієї особливості дозволяє виявляти наявність вкладення секретного повідомлення навіть в умовах малих збурень контейнеру, коли пропускна спроможність прихованого каналу зв'язку становить 0.1-0.05 біт/піксель.

В роботах [6-7] помічено, що кольори ЦЗ по-різному реагують на збурні дії, спрямовані проти різних колірних складових, зокрема, складніше виявити вкладення додаткової інформації в зеленої колірної складової, найпомітніші збурення були характерні для синьої колірної складової.

З метою визначення ролі чутливості кольорів ЦЗ до збурних дій був проведений обчислювальний експеримент на основі 200 ЦЗ, які зазнавали наступних модифікацій окремо по кожній колірній складовій:

- накладання шуму (Гаусов і мультиплікативний);
- просторова фільтрація колірних складових (усереднюючий і круговий фільтри);
- стеганографічні перетворення (MiPOD [9] і LSB Replacement).

Результати модифікацій зберігалися в форматі без втрат, оскільки стиснення ЦЗ призводить до мінімізації кількості послідовних триад в матриці унікальних кольорів до рівня оригінального зображення, крім того, до сьогоднішнього дня поширеними є стеганографічні методи, що використовують просторову область ЦЗ для вбудови повідомлень. Для кожного результату була підрахована кількість послідовних Red-, Green- і Blue-тріад і визначені співвідношення:

$$d^{rg} = \frac{cR}{cG}; \quad d^{rb} = \frac{cR}{cB} \text{ для модифікованої червоної колірної складової}; \quad (4)$$

$$d^{gr} = \frac{cG}{cR}; \quad d^{gb} = \frac{cG}{cB} \text{ для модифікованої зеленої колірної складової}; \quad (5)$$

$$d^{br} = \frac{cB}{cR}; \quad d^{bg} = \frac{cB}{cG} \text{ для модифікованої синьої колірної складової}, \quad (6)$$

де cR, cG, cB - кількість Red-, Green- і Blue-тріад в матриці унікальних кольорів модифікованого зображення відповідно.

Значення співвідношень (4)-(6), більші за одиницю, характеризують наявність піку у кількості послідовних тріад саме у модифікованої колірної складової, значення менше одиниці призведуть до помилкового визначення модифікованої колірної складової. Слід зазначити, що чим вище значення співвідношень (4)-(6), тим легше і точніше виявляється модифікована колірна складова. В таблиці 1 наведений відсоток ЦЗ, в яких спостерігається мінімальне співвідношення в діапазонах D : I – менше 1; II – [1,1.1); III – [1.1,1.3); IV – більше 1.3, в умовах різних збурних дій окремо по кожній колірній складовій (СГМ – стеганографічний метод).

Таблиця 1.

Кількісний склад ЦЗ з співвідношенням послідовних тріад, що належать діапазону D , %

Збурна дія		Модифікована колірна складова											
		Червона				Зелена				Синя			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Фільтр	Average	0	56.5	36.5	7	0	63.5	34	2.5	0	26	28	46
	Disk	0.5	83	16	0.5	0	81.5	18	0.5	0	46.5	42	11.5
Шум Gaussian	$m = 0.005,$ $\nu = 0.00005$	0	66.5	33.5	0	0	72	27.5	0.5	0	0	0	100
	$m = 0.001,$ $\nu = 0.00001$	0	0	10.5	89.5	0	0	56	44	0	0	0	100
Шум Speckle	$\nu = 0.003$	0	81.5	17.5	1	0	74	25	1	0	15.5	48	26.5
	$\nu = 0.001$	0	63.5	34.5	2	0	64	34	2	0	0	38.5	61.5
СГМ MiPOD	0.01 біт/піксель	7	83.5	9	0.5	5.5	68	24.5	2	0	52	36.5	11.5
	0.04 біт/піксель	31.5	61	7	0.5	19.5	59.5	20	1	10.5	53	27	9.5
СГМ LSB	0.04 біт/піксель	26	6	16	52	13	11.5	28.5	47	10.5	2.5	3	84
	0.05 біт/піксель	26.5	4.5	16.5	52.5	12	11	28.5	48.5	11	2.5	3	73.5

Як видно з таблиці 1, в більшості випадків при модифікації червоної і зеленої колірних складових співвідношення (4) і (5) приймають значення між 1 і 1.1, що свідчить про незначну перевагу у кількості Red- і Green-тріад над двома іншими видами тріад, виключення становлять випадки збурних дій шуму Gaussian ($m = 0.001$, $\nu = 0.00001$) і стеганографічного методу LSB Replacement. Крім того, для випадків стеганографічних методів MiPOD і LSB Replacement при модифікації червоної колірної складової виявлені найбільші помилки детектування при аналізі ЦЗ (стовпець I), найменші – при модифікації синьої колірної складової для співвідношень (6), для якої навпаки характерна значна перевага у кількості Blue-тріад понад іншими (стовпець IV), виключення складають збурні дії фільтром Disk, мультиплікативним шумом ($\nu = 0.003$) та стеганографічним методом MiPOD.

Слід відзначити, що збурення в матриці унікальних кольорів в результаті стеганографічного перетворення LSB Replacement при значеннях пропускну спроможності прихованого каналу зв'язку (ППС) 0.04 і 0.05 біт/піксель незалежно від заповненої колірної складової зовсім малі, що призведе до визначення таких контентів як оригінальних зображень. У випадку використання стеганографічного методу MiPOD значення кількості послідовних Red-, Green- і Blue-триад порівняні між собою, тобто відрізняються не більш ніж на 2-3 одиниці.

Таким чином, можна зробити висновок про найбільші збурення у кількості Blue-триад, які відповідають синій колірній складовій, найменші співвідношення між кількістю «основних» триад та двома іншими характерні для Red-триад, асоційованих з червоною колірною складовою, де під «основними» триадами будемо розуміти той вид послідовних триад триплетів, що відповідає модифікованій колірній складовій ЦЗ.

В таблиці 1 при модифікації червоної і зеленої колірних складових більшість співвідношень (4) і (5) належать діапазону $[1,1.1)$, що свідчить про невелику різницю у кількості послідовних триад триплетів, однак в залежності від абсолютного значення вмісту Red-, Green- і Blue-триад в матриці унікальних кольорів різниця може бути достатньо помітною. Введемо додатковий параметр для аналізу збурень в матриці унікальних кольорів:

$$dif_1 = |cR - cG|; \quad dif_2 = |cR - cB| \text{ для модифікованої червоної колірної складової;} \quad (7)$$

$$dif_1 = |cG - cR|; \quad dif_2 = |cG - cB| \text{ для модифікованої зеленої колірної складової;} \quad (8)$$

$$dif_1 = |cB - cR|; \quad dif_2 = |cB - cG| \text{ для модифікованої синьої колірної складової.} \quad (9)$$

Далі серед зображень-результатів збурних дій на основі формул (7)-(9) підраховується кількість ЦЗ, для яких виконується умова

$$dif_1 \leq 1.5 \ \& \ dif_2 \leq 1.5, \quad (10)$$

з якої витікає приблизно однаковий вміст різних видів послідовних триад в матриці унікальних кольорів, відсоток таких зображень наведений в таблиці 2.

Таблиця 2.

Кількісний склад ЦЗ з порівняним вмістом послідовних триад триплетів в матриці унікальних кольорів, %

Збурна дія		Модифікована колірна складова		
		Червона	Зелена	Синя
Фільтр	Average	22	26	2.5
	Disk	37	31.5	10.5
Шум Gaussian	$m = 0.005, \nu = 0.00005$	1.5	9.5	0
	$m = 0.001, \nu = 0.00001$	0	0	0
Шум Speckle	$\nu = 0.003$	0	0	0
	$\nu = 0.001$	7.5	5	0
СГМ	0.01 біт/піксель	52.5	32	12.5
MiPOD	0.04 біт/піксель	60	49	37
СГМ	0.04 біт/піксель	93	99.5	46
LSB	0.05 біт/піксель	93	99.5	49

З таблиці 2 видно, що найчастіше порівняні значення в кількості Red-, Green- і Blue-тріад виникають при модифікації червоної і зеленої колірних складових, для синьої колірної складової порівняні значення в кількості тріад зустрічаються рідше, а з урахуванням мінімальних помилок детектування (таблиця 1, стовпець I) характерним є значний пік у кількості Blue-тріад у порівнянні з кількістю Red- і Green-тріад. Таким чином, найчастіше складнощі при експертизі ЦЗ будуть виникати при модифікації (у тому числі стеганоперетворення) червоної і зеленої колірних складових. Як видно з таблиць 1 і 2, ступінь чутливості Red- і Green-тріад, відповідно асоційованих з червоною і зеленою колірними складовими, залежить від збурної дії, крім того, важливу роль можуть відігравати особливості самого ЦЗ: наявність дрібних деталей, фонових ділянок, переважаючий кольоровий тон, тощо.

Отримані вище результати досліджень характеризують ЦЗ як окремий цифровий контент лише з однією модифікованою колірною складовою. Для вибору колірної складової з найменшими спотвореннями кольорів конкретного ЦЗ до певної атаки доцільно аналізувати одночасно три результати перетворень з однаковими параметрами збурної дії, але з різними модифікованими колірними складовими: червоною, зеленою і синьою. Для аналізу зображень будемо використовувати мінімаксий критерій:

$$\min(\max(cR_R, cG_R, cB_R), \max(cR_G, cG_G, cB_G), \max(cR_B, cG_B, cB_B)), \quad (11)$$

де $cR_i, cG_i, cB_i, i = \{R, G, B\}$ - кількість послідовних Red-, Green-, Blue-тріад у ЦЗ з модифікованою i -ою колірною складовою. Отримане в формулі (11) значення дозволяє указати на модифікацію тієї колірної складової, для якої характерні найменші збурення в матриці унікальних кольорів. В таблиці 3 наведений відсоток ЦЗ, серед яких спостерігаються найменші збурення тріад в матриці унікальних кольорів за критерієм (11) при модифікації червоної (зеленої, синьої) колірних складових.

Таблиця 3.

Кількісний склад ЦЗ з найменшими збуреннями у кількості Red-, Green- і Blue-тріад при модифікації відповідно червоної, зеленої, синьої колірних складових, %

Збурна дія		Найменші збурення у кількості послідовних тріад триплетів при модифікації колірних складових ЦЗ		
		Червона	Зелена	Синя
Фільтр	Average	22.5	56.5	21
	Disk	8	76	16
Шум Gaussian	$m = 0.005, \nu = 0.00005$	13	12.5	74.5
	$m = 0.001, \nu = 0.00001$	98.5	0	1.5
Шум Speckle	$\nu = 0.003$	26.5	46.5	27
	$\nu = 0.001$	26	32	42
СГМ MiPOD	0.01 біт/піксель	11.5	76	11
	0.04 біт/піксель	6.5	80	13.5
СГМ LSB	0.04 біт/піксель	35.5	54	10.5
	0.05 біт/піксель	34.5	54.5	11

З таблиці 3 випливає, що при збурних діях, таких як фільтрація і стеганографічні перетворення, найменші збурення у кількості послідовних тріад в матриці унікальних кольорів виникають при модифікації саме зеленої колірної складової.

Чим можна пояснити значну чутливість у кількості Blue-тріад (що відповідають синьої колірної складової) та меншу чутливість Green-тріад (що відповідають зеленої

колірної складової) та Red-тріад (що відповідають червоної колірної складової) до збурних дій? Розглянемо сприйнятливість кольору людським оком.

Людське око сприймає видимий спектр - електромагнітні хвилі з довжиною хвилі приблизно від 380 (фіолетовий) до 740 нм (червоний), використовуючи для зору комбінацію з двох видів світлочутливих клітин (фоторецепторів): високочутливих паличок і менш чутливих колбочок. Палички розрізняють лише інтенсивність світла, колбочки також можуть розрізняти кольори і найкраще функціонують при яскравому світлі. У кожному оці є три типи колбочок, кожна з яких більш чутлива до коротких (К), середніх (С) або довгих (Д) світлових хвиль. Комбінація сигналів, можливих у всіх трьох колбочках, описує діапазон кольору, який ми можемо бачити своїми очима [10, 11]. Рисунок 1 ілюструє відносну чутливість кожного типу колбочок до всього видимого спектру приблизно від 400 до 700 нм.

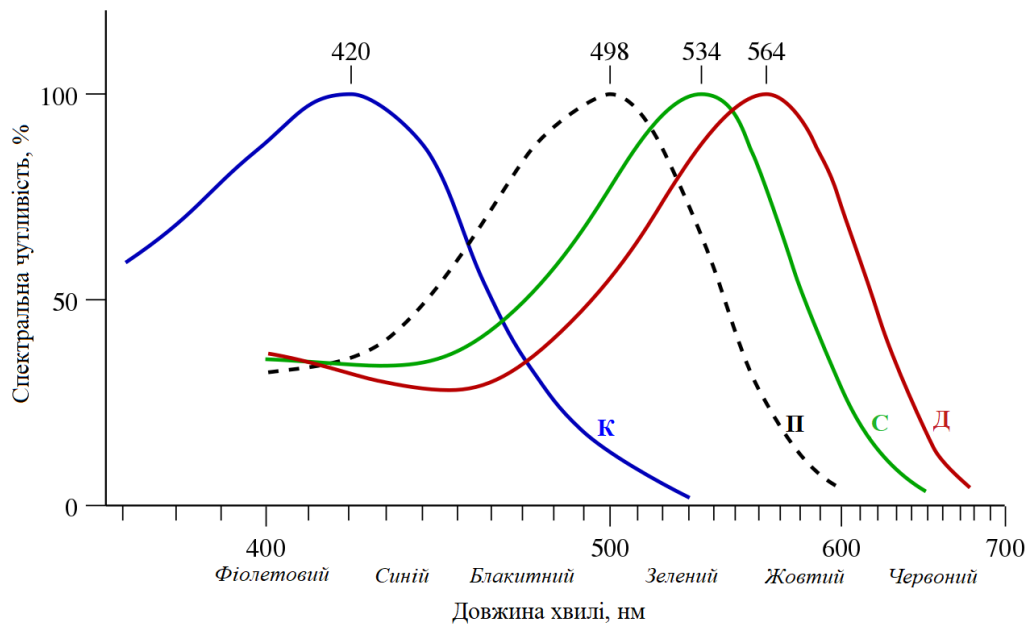


Рис. 1. Нормалізовані графіки світлочутливості колбочок людського ока К, С, Д; П – «чорно-біла» сприйнятливість паличок

Найбільшу чутливість до світла людське око має в області 555 нм, в зеленій частині спектра, відповідно, найменша сприйнятливість ока до коротко-хвильових частин видимого спектру, тобто до фіолетового і синього кольорів, саме на основі цієї особливості більшість стеганографічних методів використовують для вбудови додаткової інформації синю колірну складову ЦЗ.

Формування зображення цифровими фотокамерами побудовано на аналогії з особливостями сприйняття кольору людським оком. З врахуванням найбільшої чутливості людського ока до зеленої частини спектра сучасні фотокамери використовують спеціалізовану інтегральну мікросхему – сенсор, який складається з фотодіодів, що містять колірні фільтри, які пропускають лише певний колір, як правило, червоний, зелений і синій. Найбільш поширеним є фільтр Байєра, який складається з рядів червоно-зелених і зелено-синіх колірних фільтрів (рис.2, а), при цьому використовується наступне співвідношення колірних фільтрів: зелені - 50%, червоні - 25%, сині - 25%. В деяких камерах, наприклад, Sony, використовується сенсор, що знімає чотири кольори в схожому масиві: червоний, зелений, синій і смарагдово-зелений (рис.2, б) [12]. Компанія Fujifilm створила серію матриць Super-CCD з рознесеними октагональними, діагонально-розташованими пікселями різного розміру (рис.2, в) для сприйняття даних високого і низького контрасту. «Зелені» пікселі

– подвійні: для малих рівнів освітленості і ситуацій малого контрасту в структуру введені додаткові «зелені» пікселі більшого розміру. Пізніше були започатковані сенсори BSI EXR CMOS, схема розташування колірних фільтрів яких зображена на рисунку 2, г [13].

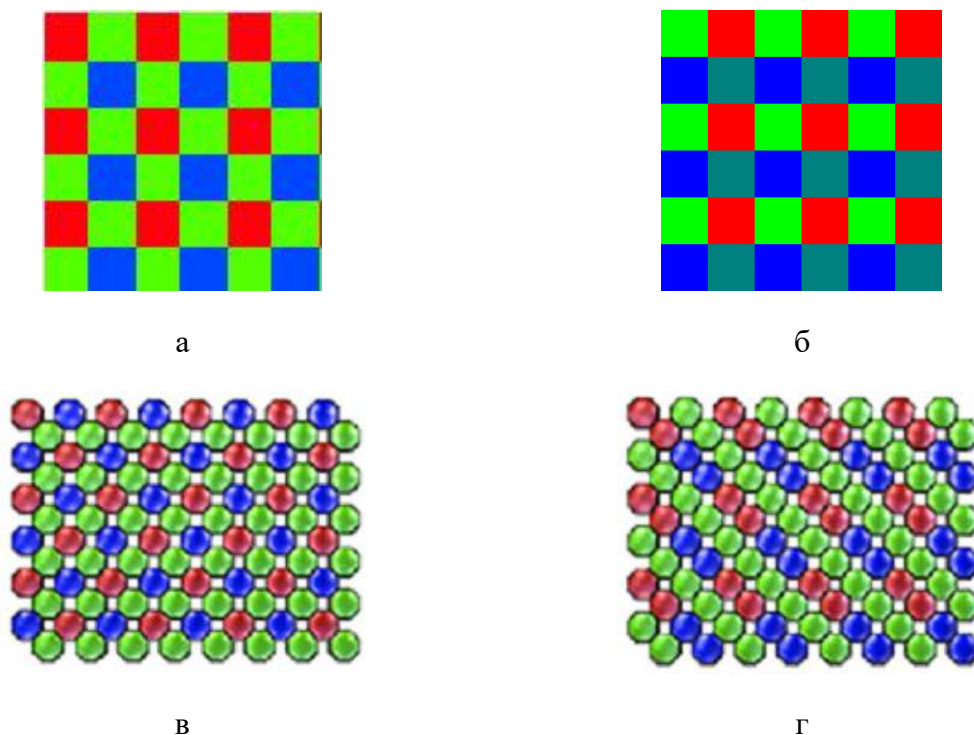


Рис.2. Схема розташування колірних фільтрів в сенсори: а – матриця Байєра; б – матриця з чотирма колірними фільтрами; в – матриця Super-CCD; г – матриця BSI EXR CMOS

Існують й інші види сенсорів [14], однак в більшості з них переважає кількість зелених фільтрів, тобто в ЦЗ найточніше передається саме зелений колір, з меншою точністю – червоний і синій. З рисунку 1 видно, що більшість кольорів формуються середніми і довгими світловими хвилями, що відповідають зеленому і червоному кольору, а з урахуванням даного факту і червона колірна складова ЦЗ опиняється більш точною, ніж синя. Неточність у передачі синього кольору при формуванні цифрового зображення компенсується досить складними алгоритмами, які описують процес дебайєрізації (або демозаїки) – відновлення відсутніх кольорових елементів [12], що дещо збільшує точність передачі кольорів. Прикладом можуть служити ЦЗ в форматі без втрат, для яких характерні досить великі порівняні між собою кількості послідовних Red-, Green-, Blue-тріад [8].

Однак більшість цифрових камер формують зображення в форматі з втратами, як правило, стандартом JPEG, – в результаті стиснення кількість Red-, Green-, Blue-тріад у матриці унікальних кольорів зменшується до 0-2.5%. Стандарт стиснення JPEG [15] передбачає переведення зображення у кольорову схему $Y C_R C_B$ за формулою

$$\begin{cases} Y = 0.2989R + 0.5866G + 0.1145B, \\ C_R = 0.5R - 0.4184G - 0.0816B, \\ C_B = -0.1688R - 0.3312G + 0.5B, \end{cases} \quad (12)$$

обчислення дискретного косинусного перетворення, причому на кожні чотири блоки 8×8 складової Y припадатиме по одному блоку складових C_R і C_B , і квантування блоків складових Y , C_R і C_B . Квантування складової Y відбувається з більшою точністю, ніж

складових C_R і C_B , а оскільки більший вклад в компоненту Y вносить матриця G (формула (12)) колірної схеми RGB, то і зелені кольори у стиснутому зображенні передаються точніше, ніж червоні і сині. Неточна передача червоного і синього кольорів призводить до наявності в зображенні меншої різноманітності червоних і синіх відтінків, ніж зелених, що в подальшому позначається на результатах модифікації червоної і синьої колірних складових у вигляді появи нових відтінків червоного і синього кольорів і виникнення значних піків у кількості Red- і Blue-тріад у матриці унікальних кольорів ЦЗ відповідно.

Розглянуті особливості вмісту послідовних тріад колірних триплетів в матриці унікальних кольорів можна використовувати для визначення тієї колірної складової, при модифікації якої збурення у кількості послідовних тріад триплетів в матриці унікальних кольорів будуть найменшими, зокрема це може використовуватися при стеганографічних перетвореннях. Оскільки незалежно від типу збурних дій кількості послідовних тріад триплетів зростає, для ускладнення аналізу ЦЗ рекомендованими будуть такі модифікації, в результаті яких будуть отримані порівняні значення кількості послідовних тріад. Ця пропозиція заснована на тому факті, що оригінальні ЦЗ, які ніколи не зазнавали стиснення, містять значну кількість послідовних тріад, причому ці значення порівняні між собою [8], в цьому випадку більшість методів аналізу ЦЗ, в тому числі стеганоаналітичних, виявляться неспроможними правильно провести експертизу зображення. З урахуванням проведеного дослідження можна сформулювати наступні критерії для визначення найбільш придатної для стеганографічного перетворення колірної складової окремого ЦЗ:

- мінімальні кількісні значення послідовних Red-, Green-, Blue-тріад у матриці унікальних кольорів серед зображень, сформованих застосуванням збурної дії до червоної, зеленої і синьої колірних складових (формула (11));
- мінімальні співвідношення між кількісними значеннями «основного» виду тріад у матриці унікальних кольорів до двох інших (формули (4)-(6));
- як додатковий критерій можна використовувати абсолютну різницю між кількісними значеннями «основного» виду тріад до двох інших (формула (10), за необхідності значення 1.5 можна збільшити, але не більше 3, щоб виключити можливість появи помітних піків у кількості тріад).

Основними кроками визначення найбільш і найменш придатних для стеганографічного перетворення колірних складових є наступні.

Крок 1. Модифікація червоної, зеленої і синьої колірних складових ЦЗ I збурною дією з однаковими параметрами. Результат – зображення I^R, I^G, I^B відповідно для модифікованих червоної, зеленої і синьої колірних складових.

Крок 2. Формування матриць унікальних кольорів UCT^R, UCT^G, UCT^B відповідно для зображень I^R, I^G, I^B .

Крок 3. Підрахування кількості послідовних Red-, Green-, Blue-тріад у матрицях унікальних кольорів UCT^R, UCT^G, UCT^B . Результати - $cR^i, cG^i, cB^i, i = \{R, G, B\}$.

Крок 4. Обчислити:

$$d_1^R = \frac{cR^R}{cG^R}, d_2^R = \frac{cR^R}{cB^R}; \quad d_1^G = \frac{cG^G}{cR^G}, d_2^G = \frac{cG^G}{cB^G}; \quad d_1^B = \frac{cB^B}{cR^B}, d_2^B = \frac{cB^B}{cG^B}.$$

Крок 5. Визначити:

$$S = \max\left(\min(d_1^R, d_2^R), \min(d_1^G, d_2^G), \min(d_1^B, d_2^B)\right).$$

Крок 6. Виявлення найменш придатної для стеганографічного перетворення колірної складової ЦЗ.

Якщо $S = \min(d_1^R, d_2^R)$, то

найменш придатною для стеганоперетворення є червона колірна складова ЦЗ I.

Інакше

Якщо $S = \min(d_1^G, d_2^G)$, то

найменш придатною для стеганоперетворення є зелена колірна складова ЦЗ I.

Інакше

Якщо $S = \min(d_1^B, d_2^B)$, то

найменш придатною для стеганоперетворення є синя колірна складова ЦЗ I.

Крок 7. Визначити:

$$M = \min(\max(cR^R, cG^R, cB^R), \max(cR^G, cG^G, cB^G), \max(cR^B, cG^B, cB^B)).$$

Крок 8. Виявлення найбільш придатної для стеганографічного перетворення колірної складової ЦЗ.

Якщо $M = \max(cR^R, cG^R, cB^R)$, то

якщо $(0.9 \leq d_1^R \leq 1.1) \& (0.9 \leq d_2^R \leq 1.1)$, то

якщо $(|cR^R - cG^R| \leq N) \& (|cR^R - cB^R| \leq N)$, то

найбільш придатною для стеганоперетворення є червона колірна складова ЦЗ I.

Інакше

Якщо $M = \max(cR^G, cG^G, cB^G)$, то

якщо $(0.9 \leq d_1^G \leq 1.1) \& (0.9 \leq d_2^G \leq 1.1)$, то

якщо $(|cG^G - cR^G| \leq N) \& (|cG^G - cB^G| \leq N)$, то

найбільш придатною для стеганоперетворення є зелена колірна складова ЦЗ I.

Інакше

Якщо $M = \max(cR^B, cG^B, cB^B)$, то

якщо $(0.9 \leq d_1^B \leq 1.1) \& (0.9 \leq d_2^B \leq 1.1)$, то

якщо $(|cB^B - cR^B| \leq N) \& (|cB^B - cG^B| \leq N)$, то

найбільш придатною для стеганоперетворення є синя колірна складова ЦЗ I.

Інакше кожна колірна складова ЦЗ I зазнає значних збурень у кількості послідовних триплетів при модифікації обраною збурною дією.

Запропонований алгоритм можна використовувати для вибору і підготовки контейнеру для стеганографічного перетворення, встановлені особливості збурень кольорів ЦЗ можуть бути використані спеціалістами в області експертизи ЦЗ, що дозволить з високою точністю встановити модифіковану колірну складову зображення.

Висновки

В статті наведені результати дослідження впливу збурних дій, таких як зашумлення, фільтрація і стеганографічні перетворення, на кількість послідовних триад триплетів в матриці унікальних кольорів ЦЗ. Встановлено, що найбільші збурення у кількості колірних триплетів ЦЗ відбуваються при модифікації синьої колірної складової, де кількість Blue-триад в 1.3 рази і більше перевищує кількість Red- і Green-триад, що на стовпчастій діаграмі позначається у виді піку, який указує на модифіковану колірну складову зображення. Менш чутливими виявлені червона і зелена колірні складові: кількісні збурення у матриці унікальних кольорів при модифікації зеленої колірної складової менші, ніж при модифікації червоної, але найменші співвідношення між Red-, Green- і Blue-тріадами характерні саме для червоної колірної складової.

Отримані результати дослідження чутливості кольорів ЦЗ при модифікації відповідних колірних складових були обґрунтовані шляхом аналізу технологій формування кольорових зображень цифровими фотокамерами, побудованих на основі сприйняття кольору людським оком. Встановлено, що цифрові фотокамери, як і людське око, сприймають сині кольори з меншою точністю, ніж зелені і червоні, що призводить до меншої різноманітності синіх відтінків у матриці унікальних кольорів.

Список літератури

1. Kutter, M. Digital signature of color images using amplitude modulation / M. Kutter, F. Bossen // Proc. of the SPIE Storage and Retrieval for Image and Video Databases V. – 1997. – Vol.3022. – Pp. 518-526.
2. Козіна, М.О. Метод перевірки автентичності інформації, що передається стеганографічним каналом зв'язку / М.О. Козіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №1. – С. 117-121.
3. Wakure M.A. A Diskrete Wavelet Transform: A Steganographic Method for Transmitting Images / M.A. Wakure, Anilkumar N. Holambe // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Volume 129, No.5. – Pp.26-29.
4. Shiv Prasad. An RGB colour image steganography scheme using overlapping block-based pixel-value differencing / Shiv Prasad, Arup Kumar Pal // Royal Society Open Science. – 2017. – No.4. – Pp. 1-14.
5. Adwan Yasin. An Enhanced Steganographic Model Based on DWT Combined with Encryption and Error Correction Techniques / Adwan Yasin, Nizar Shehab, Muath Sabha, Mariam Yasin // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2015. – Vol. 6. – No.12. – Pp. 49-55.
6. Ахмамєтьєва Г.В. Удосконалення стеганоаналітичного методу виявлення вкладень додаткової інформації в цифрових зображеннях, заснованого на аналізі послідовних триад колірних триплетів / Г.В. Ахмамєтьєва, В.В. Мурова // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2017. – Т. 7. - №3. – С. 187-194.
7. Ахмамєтьєва, Г.В. Дослідження чутливості колірних складових цифрового зображення до стеганографічних перетворень / Г.В. Ахмамєтьєва // XX Ювілейна Міжнародна науково-практична конференція «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», м. Буча, Київська обл., ГНЦ «Зелена Буча», 22-24 травня 2018. – С. 117-118.
8. Akhmametiєva A. Steganalysis of digital contents, based on the analysis of unique color triplets / Anna Akhmametiєva // Annales Mathematicae et Informaticae. – 2017. – No.47. – Pp.3-18.
9. Sedighi, V. Content-Adaptive Steganography by Minimizing Statistical Detectability / V. Sedighi, R. Cогranne, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2016. – Vol.11. – Iss.2. – Pp. 221-234.
10. Основы цветового восприятия [Электронный ресурс]: Cambridge in Colour. A Learning Community for Photographers. Режим доступа: <https://www.cambridgeincolour.com/ru/tutorials-ru/color-perception.htm>.
11. Hunt, R. W. G.. The Reproduction of Colour. 6th.edition / R. W. G. Hunt. - Chichester UK : Wiley-ІS&T Series in Imaging Science and Technology, 2004. – 726 p.

12. Матрица-сенсор фотокамеры [Электронный ресурс]: ФотоУрок. Режим доступа: <https://fotourok.com/matrica-sensor/>.
13. Рождение изображения. Часть 3 – Как появляется цвет [Электронный ресурс]: Sony. Режим доступа: <https://www.sony.ru/alphapro/articles/rozhdenie-izobrazheniya-chasti-3-kak-royavlyayetsya-cvetnoe-izobrazhenie>.
14. Татарников, О. Матрицы для цифровых фотоаппаратов [Электронный ресурс] / О. Татарников // КомпьютерПресс, 2007. - № 1. Режим доступа: <https://compress.ru/article.aspx?id=17125>.
15. Алгоритм N 3 JPEG. Основные соотношения [Электронный ресурс] // Научно-производственное предприятие МедиаСкан. Разработка и внедрение научно-технической продукции. Режим доступа: <http://www.mediascan.by/index.files/jpeg-ref.pdf>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В КОЛИЧЕСТВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ТРИАД ЦВЕТОВЫХ ТРИПЛЕТОВ КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДИФИКАЦИЙ ЦВЕТОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

А.В. Ахматетьева, В.А. Гвоздик

Одесский национальный политехнический университет,
просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина; e-mail: a.v.akhmametieva@opu.ua

В работе проводится исследование влияния возмущающих воздействий, направленных на пространственную область цифровых изображений, на изменение цветковых триплетов в матрице уникальных цветов цифрового изображения. В ходе проведенных вычислительных экспериментов установлено, что при модификации только синей цветовой матрицы изображения количество Blue-триад (которые указывают на синюю цветовую составляющую изображения) в матрице уникальных цветов цифрового изображения значительно превышает количество Red- и Green-триад, что при экспертизе изображений позволит однозначно установить факт модификации синей цветовой составляющей. Установленная особенность характерна для большинства контейнеров в формате с потерями, что связано с технологиями формирования и алгоритмами сжатия цифровых изображений, поэтому, несмотря на слабую чувствительность человеческого глаза к синему цвету, не рекомендуется использовать синюю цветовую составляющую изображения для пространственных преобразований, в частности стеганографического преобразования. Наиболее пригодными для пространственных преобразований в ходе экспериментов выявлены зеленая и красная цветковые составляющие, поскольку их модификации приводят к появлению меньшего количества Green- и Red-триад (которые указывают на зеленую и красную цветковые составляющие изображения соответственно) и получения сопоставимого количества всех видов триад триплетов в матрице уникальных цветов, что приведет к усложнению корректной экспертизы цифрового изображения с точки зрения однозначного выявления модифицированной цветовой составляющей. Проведено обоснование полученных результатов с позиции восприятия цвета человеческим глазом, которое положено в основу формирования цветов цифровыми камерами, и особенности сжатия изображений стандартом JPEG. Приведены критерии для определения цветовой составляющей цифрового изображения, обеспечивающей меньшие возмущения в количестве последовательных триад в матрице уникальных цветов, и основные шаги определения для конкретного изображения наиболее и наименее подходящих для стеганографического преобразования цветковых составляющих с точки зрения изменений цветковых триплетов в матрице уникальных цветов.

Ключевые слова: цифровое изображение, пространственная область, анализ последовательных триад триплетов, стеганография, экспертиза цифровых изображений.

**RESEARCH OF PERTURBATIONS IN THE QUANTITY OF SEQUENTIAL
TRIADS OF COLOR TRIPLETS AS A RESULT OF SPATIAL MODIFICATIONS
OF THE COLOR COMPONENTS OF A DIGITAL IMAGE**

A.V. Akhmametiyeva, V.O. Hvozdyk

Odessa National Polytechnic University,

1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine; e-mail: a.v.akhmametiyeva@opu.ua

In this paper we study the effect of perturbing influences aimed at the spatial domain of digital images on the change of color triplets in the matrix of unique colors of a digital image. In the course of computational experiments established that the modification of only blue color matrix of the image, the quantity of Blue-triads (which indicate the blue color component of the image) in the matrix of unique colors of the digital image significantly exceeds the quantity of Red- and Green-triads that will allow for the examination of images clearly establish the fact of modifying the blue color component. The identified feature is typical for most containers in a lossy format which is associated with the digital image's formation technologies and compression algorithms therefore despite the low sensitivity of the human eye to blue color it is not recommended to use the blue color component for spatial transformations of the image, in particular, for steganographic transformations. During the experiments the most suitable for spatial transformations green and red color components revealed, since their modifications lead to the appearance of a smaller quantity of Green- and Red-triads (which indicate the green and red color components of the image, respectively) and to obtain a comparable quantity of all types of triads of triplets in a matrix of unique colors which will complicate the correct examination of a digital image from the point of view of unambiguously identifying a modified color component. The obtained results are substantiated from the standpoint of color perception by the human eye, which underlies the formation of colors by digital cameras, and the image compression features of the JPEG standard. Criteria for determining the color component of a digital image providing less disturbance in the quantity of sequential triads in a matrix of unique colors and the basic steps for determining for a particular image the most and least suitable for steganographic transformation color components in terms of changes in color triplets in a matrix of unique colors are given.

Keywords: digital image, spatial domain, analysis of sequential triplets of triplets, steganography, examination of digital image.