

ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ ЦІЛИМИ І НАПІВЦІЛИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ ДЛЯ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ У МОДИФІКОВАНОМУ ГРАФІЧНОМУ ФОРМАТІ JPEG

О. В. Шпортко¹, А. Я. Бомба², П. С. Янчук¹, В. О. Шпортко³

¹ПВНЗ “Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем’янчука”,
кафедра інформаційних систем та обчислювальних методів,

Україна, м. Рівне, вул. акад. С. Дем’янчука, 4

²Рівненський державний гуманітарний університет, кафедра інформатики та прикладної
математики, Україна, м. Рівне, вул. С. Бандери, 12

³Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра програмного забезпечення,
Україна, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

¹E-mail: ITShportko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4013-3057; E-mail: JanchukP@ukr.net,
ORCID: 0000-0002-1618-5228, ²E-mail: ABomba@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5528-4192,

³E-mail: VeronikaShportko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9460-0781

© Шпортко О. В., Бомба А. Я., Янчук П. С., Шпортко В. О., 2019

Запропоновано спосіб та відповідні алгоритми зменшення розмірів стиснутих зображень та прискорення їх декодування в модифікованому форматі JPEG завдяки використанню замість колірної моделі YCbCr альтернативних різницевих колірних моделей як з цілими, так і з напівцілими коефіцієнтами. Із застосуванням запропонованих різницевих колірних моделей зменшуються розміри файлів окремих стиснутих зображень внаслідок міжкомпонентної декореляції та прискорюється їх декодування з використанням операцій із цілими числами та операцій побітового зсуву замість операцій з дійсними чи масштабованими цілими числами. Основні висновки за результатами дослідження:

1. Не існує універсальної колірної моделі, яка дала б змогу оптимально виконати міжкомпонентну декореляцію для всіх типів зображень. Навіть для зображень одного типу оптимальними (в сенсі декореляції) можуть виявитися різні колірні моделі.

2. У графічних форматах для стиснення окремих зображень замість колірних моделей із дійсними коефіцієнтами доцільно використовувати різницеві колірні моделі з цілими чи напівцілими коефіцієнтами, якщо вони прогнозовано зменшують коефіцієнт стиснення. Такі колірні моделі в середньому прискорюють декодування на 3 %.

3. Для стиснення зображень без втрат варто застосовувати різницеві колірні моделі з цілими коефіцієнтами, а при компресії зображень із втратами – різницеві колірні моделі з напівцілими коефіцієнтами.

4. При стисненні зображень із втратами колірні моделі із напівцілими коефіцієнтами не збільшують діапазон можливих значень окремих компонентів та суттєво не впливають на якість зображень. Якщо потрібно мінімізувати RMSE, то несучу компоненту в різницевій колірній моделі варто сформувати з напівсуми компонентів. Коли ж необхідно максимально прискорити декодування, то несучу компоненту в різницевій колірній моделі доцільно сформувати з однієї зі вхідних компонентів.

Ключові слова: стиснення у форматі JPEG, різницеві колірні моделі, міжкомпонентна декореляція.

THE USE OF DIFFERENCE COLOR MODELS WITH INTEGER AND HALF-INTEGERS COEFFICIENTS FOR COMPRESSION OF IMAGES IN MODIFIED JPEG GRAPHIC FORMAT

Alexander Shportko¹, Andrey Bomba², Peter Yanchuk¹, Veronika Shportko³

¹Department of Information Systems and Computing Methods, Academician Stepan Demianchuk International University of Economics and Humanities, Ukraine, Rivne, Acad. S. Demianchuk street, 4

²Department of Informatics and Applied Mathematics, Rivne State Humanitarian University, 12, S. Bandery Str., Rivne, Ukraine

³Software Department, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, Ukraine

¹E-mail: ITShportko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4013-3057; E-mail: JanchukP@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1618-5228, ²E-mail: ABomba@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5528-4192,

³E-mail: VeronikaShportko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9460-0781

In the article a method and proper algorithms of reducing the size of compressed images and accelerating decoding in a modified JPEG format by using alternative difference color models with integer and half integer coefficients instead of the color model YCbCr are suggested. The use of the proposed difference color models reduces the size of each individual images due to intercomponent decorrelation and accelerates the decoding by using operations with integers and bitwise operations instead of operations with float numbers or scalable integers. Main findings of the study:

1. There is no universal color model that could allow to reach optimal decorrelation between components for all the types of images. Even for images of the same type, different color models may be optimal (in the sense of decorrelation).

2. In the graphic formats it is expedient to use discrete color models with integer or half-integer coefficients for compression of individual images, instead of color models with valid coefficients, if they predict the decrease of compression coefficient. On average, such color models accelerate decoding by 3 %.

3. For the image compression without losses, it is worthwhile to use difference color models with integer coefficients, and for the image compression with losses, it is better to use discrete color models with half-integer coefficients.

4. While compressing images with losses, color models with half-integer do not increase the range of possible values of individual components and do not significantly affect the image quality. If you want to minimize RMSE, then carrying component in a difference color model should be formed from the half sum of other components. If it is necessary to accelerate decoding as much as possible, then it is expedient to form the carrying component in a difference color model from one of the input components.

Key words: compression of the JPEG format, differential color models, inter-component decorrelation.

Вступ

Сьогодні алгоритми компресії даних застосовують у багатьох типах файлів, адже стиснення дає змогу зменшити їхні розміри і, як наслідок, підвищити ефективність використання накопичувачів та прискорити передавання мережею. Сьогодні розроблено багато методів компресії різних типів даних: звуку, тексту, зображень, відео та ін. Серед цих методів особливе місце займають ті, що орієнтовані на стиснення зображень, тому що, по-перше, це область, де користувачі мають справу з багатьма файлами, які потрібно ефективно стиснути, і, по-друге, тут найчастіше можливе стиснення даних із частковою втратою інформації [1, 2]. За такими методами можна видалити більшу частину інформації із зображення, до якої не чутливе око людини, що приводить до підвищення ефективності стиснення. Перевіркою якості стиснення зображення є візуальне порівняння оригінального зображення і зображення, отриманого з його стиснутого образу, в якому

частину інформації втрачено. Якщо людина, яка перевіряє якість стиснення, не може відрізнити одне зображення від іншого, то таке стиснення із втратами допускається [1].

Сьогодні графічний формат JPEG [3] фактично є стандартом для зберігання фото-реалістичних зображень [1]. Популярності цього формату сприяють високі показники стиснення при спотвореннях, які практично не фіксуються оком людини, оптимізовані алгоритми кодування/декодування та підтримка практично всіма сучасними браузером і програмами для обробки зображень. Фотоапарати, відео- та web-камери фіксують зображення також переважно у форматі JPEG. Саме тому **підвищення ефективності стиснення зображень із вдосконаленням формату JPEG** (зокрема, вибору альтернативної колірної моделі) є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій методів стиснення зображень у форматі JPEG

Як відомо з основних положень теорії інформації, будь-яке стиснення даних можливе, насамперед, завдяки зменшенню надлишковості [1, 2]. Чим більше видів надлишковостей опрацьовує графічний формат і чим краще він ці надлишковості усуває – тим ефективніше він зможе стиснути орієнтовані на таку обробку дані.

Стиснення зображень у графічних форматах найчастіше складається з трьох послідовних достатньо незалежних етапів: переходу до альтернативного подання зображення (відображення), під час якого зменшується *візуальна* надлишковість [4]; застосування контекстно-залежного алгоритму для зменшення *міжелементної* надлишковості та поелементного кодування отриманих даних для ліквідації *кодової* надлишковості [5]. Відповідно, кодування JPEG-зображень у найуживанішому послідовному режимі згідно з цими етапами відбувається в такій послідовності [2]: спочатку виконується перехід з колірної моделі RGB в YCbCr та субдискретизація (відбір із заданим кроком) значень компонентів; потім отримані яскравості окремих компонентів розбиваються на мінімальні кодові блоки (MCU), які складаються з блоків одиниць даних по 8 x 8 значень і до кожної одиниці даних послідовно застосовується двовимірне дискретне косинусне перетворення (ДКП [1]), після чого отримані коефіцієнти ДКП квантуються (діляться на визначені значення кожен) і послідовно кодуються за алгоритмом Хафмана [6]. Перший коефіцієнт ДКП фактично визначає середнє значення яскравості одиниці даних (у форматі JPEG він називається DC [2]), а інші 63 (AC) задають коливання відносно цього середнього значення.

Основна ідея будь-якого контекстно-незалежного алгоритму кодування, зокрема й алгоритму Хафмана, який використовується у форматі JPEG на останньому етапі, полягає у заміні елементів з більшою частотою (тут і надалі – абсолютною) кодами з меншою кількістю бітів, ніж для елементів з меншою частотою. Згідно з теоремою Шенона про кодування джерел даних [6], елемент s_i (в нашому випадку під елементом мається на увазі кожен коефіцієнт ДКП окремої компоненти чергової одиниці даних) з ймовірністю появи $p(s_i)$ доцільно кодувати $-\log_2 p(s_i)$ бітами. Тому середня довжина коду елемента блоку після застосування будь-якого контекстно-незалежного алгоритму, згідно з формулою Шенона, не може бути меншою за *ентропію джерела*

$$H = -\sum_i p(s_i) \times \log_2 p(s_i). \quad (1)$$

Ентропія джерела зменшується зі збільшенням нерівномірності розподілу ймовірностей (частот) між елементами [6]. За нашими підрахунками, застосування контекстно-незалежного алгоритму в середньому зменшує коефіцієнт стиснення (відношення розмірів стиснутого до нестиснутого файлів зображення, виражене у відсотках, надалі КС) зображень на 33 %.

Сучасні дисплеї передають мільйони кольорів, і кожен піксел растрового зображення найчастіше відображається кольором, що зберігається у 24 бітах, де містяться яскравості компонентів синього, зеленого і червоного кольорів, які займають по 8 бітів згідно з колірною моделлю RGB [5]. Такий спосіб збереження кольорів зустрічається найчастіше. І це не дивно, адже трикомпонентні зображення якнайкраще відповідають фізіологічним основам кольорового зору

людини [8], а 8-бітна частота дискретизації найчастіше використовується у найпоширеніших ОС сімейства Windows. Тому, наприклад, зображення з розмірами 1024×1024 пікселів у колірній моделі RGB займає близько трьох мегабайтів. На щастя, **кольори** суміжних пікселів зображень **корельовані** між собою, і тому зберігання різниць яскравостей компонентів замість значень компонентів підвищує нерівномірність розподілу частот елементів навколо нуля, а, отже, зменшує ентропію і тим самим підвищує ефективність контекстно-незалежного алгоритму. Крім цього, **яскравості** суміжних пікселів теж **корельовані**. Два суміжні піксели можуть бути різних кольорів. Наприклад, один піксел може бути близький до зеленого, а інший – до червоного, але якщо перший був яскравим, то його сусід, зазвичай, теж буде яскравим. Саме цю властивість використовують у форматі JPEG при трансформації представлення пікселів з RGB у три інші компоненти [1]: яскравості Y та двох хроматичних компонентів Cb та Cr, які визначають колір за формулами (2).

$$\begin{aligned}
 Y &= \left(\frac{77}{256}\right)R + \left(\frac{150}{256}\right)G + \left(\frac{29}{256}\right)B; \\
 Cb &= -\left(\frac{44}{256}\right)R - \left(\frac{87}{256}\right)G + \left(\frac{131}{256}\right)B + 128; \\
 Cr &= \left(\frac{131}{256}\right)R - \left(\frac{110}{256}\right)G - \left(\frac{21}{256}\right)B + 128.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Око людини розпізнає контури об'єктів, а не окремі піксели і порівнює їх зі вже відомими аналогами [4]. Воно чутливе до незначних змін яскравості, але не кольору. Тому невеликі втрати інформації в компонентах Cr та Cb, які виникають у процесі стиснення, людське око не помічає, а спотворення інформації в компоненті Y розрізняє значно краще [2]. Крім цього, оскільки яскравості окремих компонентів у колірній моделі RGB найчастіше близькі між собою, то різниці цих компонентів, як правило, близькі до нуля, а оскільки перетворені компоненти найчастіше зберігаються як байтові беззнакові числа, то для зменшення втрат у процесі кодування/декодування різниці в хроматичних компонентах Cb та Cr збільшуються на 128, як видно з (2).

Отже, на першому етапі кодування зображень у форматі JPEG завжди виконується перехід від колірної моделі RGB до YCbCr. Для такого переходу в процесі кодування та в оберненому напрямку під час декодування виконуються операції з дійсними чи з масштабованими цілими числами (2), що суттєво сповільнює ці процеси. Ми ж пропонуємо застосовувати для кожного зображення в модифікованому форматі JPEG замість колірної моделі YCbCr таку з альтернативних різницевоїх колірних моделей із цілими чи напівцілими коефіцієнтами, яка максимально зменшує ентропію за двома компонентами [9].

Формування різницевоїх колірних моделей із цілими коефіцієнтами

Сучасні формати стиснення зображень опрацьовують піксели у фіксованій колірній моделі (наприклад, формат BMP – у моделі B, G, R; PNG – в моделі R, G, B; формат архіватора RAR – у моделі R-G, G, B-G; формат JPEG – у моделі YCbCr) і не використовують можливості вибору ефективної колірної моделі для кожного зображення, яка максимально зменшує ентропію завдяки міжкомпонентній декореляції або прискорює декодування. Тому, враховуючи, що колір кожного пікселя можна подати у вигляді координат за трьома лінійно-незалежними векторами будь-яких базових кольорів [4], опишемо алгоритми формування різницевоїх колірних моделей як із цілими, так і з напівцілими коефіцієнтами для кожного зображення в процесі їх стиснення із втратами в модифікованому форматі JPEG, які дадуть змогу покращити ці показники.

Зрозуміло, що колірна модель має гарантувати не лише пряме, а й зворотне перетворення значень компонентів кожного пікселя. Для забезпечення однозначності декодування в зображенні можна виконати максимум дві заміни значень різних компонентів різницями з іншими компонентами [10], оскільки одна з трьох компонентів має залишатися несучою сигналу. Відповідно, в процесі кодування для кожного зображення під час попередньої обробки виникає задача вибору однієї різницевої колірної моделі серед

альтернативних так, щоб максимально підвищити ефективність алгоритмів стиснення, які використовуються в обраному графічному форматі.

Як вже зазначалося, останнім кроком стиснення зображень у форматі JPEG найчастіше є кодування Хафмана, а середня довжина його коду для елемента близька до ентропії [6], тому загальна довжина блоку таких кодів для послідовності елементів наближено дорівнює сумі довжин їх ентропійних кодів, тобто *довжині ентропійного коду послідовності*. Наведемо формулу для обчислення цієї довжини з [5]. Нехай кожен з елементів s_i зустрічається N_i разів у послідовності довжини $N = \sum_i N_i$. Згідно із статистичним означенням ймовірності, $p(s_i) = N_i / N$, тому загальна довжина ентропійного коду послідовності, враховуючи (1), наближається до значення

$$L_H = N \times H = N \log(N) - \sum_i N_i \log(N_i). \quad (3)$$

Зрозуміло, що замінювати компоненту колірної моделі її лінійною комбінацією з іншою компонентою доцільно лише тоді, коли довжина ентропійного коду комбінації буде меншою за довжину ентропійного коду вхідної компоненти [5]. Але у форматі JPEG перетворені яскравості компонентів не кодуються безпосередньо, а опрацьовуються за допомогою ДКП [1, 11]. Коефіцієнти АС цього перетворення то менші, що ближчі один до одного сусідні значення вхідних яскравостей [2]. Тому для **вибору колірної моделі** для зображення з декількох альтернативних **будемо оцінювати довжину ентропійного коду** (3) не перетворених яскравостей, а **різниць перетворених яскравостей з аналогічними перетвореними яскравостями попереднього пікселя**.

Для двох з трьох компонентів колірної моделі YCbCr у форматі JPEG може виконуватися субдискретизація, яка зменшує КС. Крім цього, коефіцієнти квантування за кольорними компонентами, як правило, більші за аналогічні коефіцієнти для компоненти яскравості. Відповідно, втрати за кольорними компонентами можуть бути суттєвішими, ніж за компонентою яскравості, і в цих компонентах мають зберігатися різниці. Тому алгоритм вибору різницевої колірної моделі повинен сформувати саме дві різниці, збільшені на 128, які мають використовуватися замість значень компонентів Сb і Сr. Третю, несучу компоненту, застосовуватимуть замість компоненти Y. Отже, в модифікованому форматі JPEG альтернативними до колірної моделі YCbCr (2) можуть бути такі різницеві колірні моделі з цілими коефіцієнтами:

- | | | |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. R, G-R+128, B-R+128; | 2. R, G-R+128, B-G+128; | 3. R, G-B+128, B-R+128; |
| 4. R-G+128, G, B-G+128; | 5. R-G+128, G, B-R+128; | 6. R-B+128, G, B-G+128; |
| 7. R-B+128, G-R+128, B; | 8. R-G+128, G-B+128, B; | 9. R-B+128, G-B+128, B. |

Переходи до таких моделей з цілими коефіцієнтами виконуються швидко, оскільки не потребують виконання заокруглень та операцій з дійсними чи масштабованими цілими числами. Так само й декодування зображень з цих моделей буде виконуватися швидше від YCbCr.

Для формування альтернативної різницевої колірної моделі використаємо ідеї, описані в [5], тобто оцінимо доцільність заміни значень компонентів R_{ij} різницями $R_{ij}-G_{ij}$ або $R_{ij}-B_{ij}$, значень G_{ij} різницями $G_{ij}-R_{ij}$ або $G_{ij}-B_{ij}$ та значень B_{ij} різницями $B_{ij}-R_{ij}$ або $B_{ij}-G_{ij}$. **Серед можливих шести таких заміні необхідно вибрати ті дві, які максимально зменшать довжину ентропійного коду (3) різниць яскравостей з аналогічними яскравостями попереднього пікселя.**

Запишемо досліджувані довжини ентропійних кодів у вигляді матриці аналізу А:

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L(\Delta(R)) & L(\Delta(R-G)) & L(\Delta(R-B)) \\ L(\Delta(G-R)) & L(\Delta(G)) & L(\Delta(G-B)) \\ L(\Delta(B-R)) & L(\Delta(B-G)) & L(\Delta(B)) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де L – ентропійна довжина коду, обчислена за (3), а Δ – різниці яскравостей кожного пікселя з аналогічними яскравостями попереднього пікселя. Враховуючи (3), неважко пересвідчитись, що $a_{mn} = a_{nm}$, тобто для формування цієї матриці необхідно обчислити значення лише шести елементів. Нехай у межах кожного пікселя компонента R має індекс 0, G – 1, B – 2. Бачимо, що

різницева колірна модель визначається двома недіагональними елементами різних рядків матриці A , які серед елементів, менших за діагональні елементи своїх рядків, сумарно найбільше від них відхиляються (забезпечують максимальні зменшення довжин ентропійних кодів). У випадку наявності таких елементів індекс рядка кожного з них визначає зменшувану компоненту, а індекс стовпця – компоненту, що від неї віднімається. Наприклад, вибір елемента a_{12} вказує, що в альтернативній колірній моделі для кожного пікселя зображення необхідно значення компоненти G зменшити на значення компоненти B .

Покроково алгоритм формування різницевої колірної моделі з цілими коефіцієнтами перед стисненням зображення у форматі JPEG представимо так:

1. Визначити для кожної компоненти кожного пікселя зображення відхилення від яскравостей цієї самої компоненти попереднього пікселя зліва;
2. Обчислити довжини ентропійних кодів відхилень компонентів і різниць відхилень компонентів та зберегти їх у матриці аналізу A (4);
3. Занести значення 0 у змінні $ind11$, $ind12$, $ind21$ та $ind22$, що визначають можливі різниці альтернативної колірної моделі ($ind11$ вказує на зменшувану компоненту першої різниці, а $ind12$ – на компоненту, що від неї віднімається. Аналогічно, змінні $ind21$ та $ind22$ описують другу різницю колірної моделі);
4. Визначити в матриці A два елементи, які не належать головній діагоналі, не симетричні відносно неї, менші за діагональні елементи своїх рядків і сумарно найбільше від них відхиляються. Якщо такі елементи присутні, то занести в змінні $ind11$ та $ind12$ відповідно номер рядка та номер стовпця першого з цих елементів, а в змінні $ind21$ та $ind22$ – номер рядка та номер стовпця другого такого елемента;
5. Якщо значення змінних $ind11$ та $ind22$ однакові, то переставити значення змінних $ind11$ з $ind21$ та $ind12$ з $ind22$ місцями, тобто змінити черговість віднімання компонентів колірної моделі.

Зрозуміло, що використовувати сформовану різницеву колірну модель доцільно лише тоді, коли прогнозована довжина ентропійного коду (3) різниць яскравостей у цій моделі буде меншою від прогнозованої довжини ентропійного коду різниць яскравостей у колірній моделі YCbCr.

Але, як показали результати експериментів, обчислення різниць компонентів у різницевих колірних моделях призвело до збільшення діапазону (розсіювання) їх можливих значень: якщо значення окремих компонентів у колірній моделі RGB лежить у діапазоні $[0; 255]$, то різниці компонентів (наприклад, $R-G$) можуть набувати значень з діапазону $[-255; 255]$. Формат JPEG зберігає значення компонентів застосованої колірної моделі у тому самому діапазоні. Саме тому при практичному застосуванні наведеного алгоритму, враховуючи 8-ми бітну частоту дискретизації, різниці компонентів довелося збільшувати на 128 і обмежувати отримані значення (менші значення від нуля замінювати нулем, а більші значення від 255 замінювати на 255). Це, своєю чергою, призвело до кардинального збільшення RMSE (Root-mean-square deviation – середньоквадратична похибка) відхилень яскравостей пікселів початкового від відтвореного зображення та зменшення нерівномірності розподілу при розрахунку матриці A і тому до збільшення довжини ентропійного коду та відмови від застосування різницевої колірної моделі з цілими коефіцієнтами.

Саме для уникнення збільшення діапазону (розсіювання) можливих значень компонентів різницевої колірної моделі нами був розроблений алгоритм вибору різницевої колірної моделі з напівцілими коефіцієнтами, який описано у наступній частині статті.

Алгоритм вибору різницевої колірної моделі з напівцілими коефіцієнтами

Враховуючи зазначене вище та послідовність опрацювання даних у форматі JPEG, приходимо до висновку, що альтернативними до колірної моделі YCbCr можуть бути такі різницеві колірні моделі з напівцілими коефіцієнтами:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. $R, (G-R)/2+128, (B-R)/2+128;$ | 2. $R, (G-R)/2+128, (B-G)/2+128;$ |
| 3. $R, (G-B)/2+128, (B-R)/2+128;$ | 4. $(R-G)/2+128, G, (B-G)/2+128;$ |
| 5. $(R-G)/2+128, G, (B-R)/2+128;$ | 6. $(R-B)/2+128, G, (B-G)/2+128;$ |
| 7. $(R-B)/2+128, (G-R)/2+128, B;$ | 8. $(R-G)/2+128, (G-B)/2+128, B;$ |
| 9. $(R-B)/2+128, (G-B)/2+128, B.$ | |

Перетворені яскравості компонентів пікселів таких моделей з напівцілими коефіцієнтами розраховуються швидше від колірної моделі YCbCr, оскільки при їх розрахунку не потрібно виконувати заокруглення та операції з дійсними числами, а достатньо застосувати лише побітовий зсув вправо на один біт. Тому ж і декодування зображень з цих моделей теж буде виконуватися швидше від декодування з YCbCr.

Для формування альтернативної різницевої колірної моделі з напівцілими коефіцієнтами, аналогічно до попереднього алгоритму, оцінимо доцільність заміни значень компонентів R_{ij} напіврізницями $R_{ij}-G_{ij}$ або $R_{ij}-B_{ij}$, значень G_{ij} напіврізницями $G_{ij}-R_{ij}$ або $G_{ij}-B_{ij}$ та значень B_{ij} напіврізницями $B_{ij}-R_{ij}$ або $B_{ij}-G_{ij}$. **Серед можливих шести таких замін необхідно вибрати ті дві, які максимально зменшать довжину ентропійного коду (3) різниць перетворених яскравостей з аналогічними перетвореними яскравостями попереднього пікселя, як в алгоритмі попередньої частини статті.**

Застосування напіврізниць замість різниць компонентів не призводить до збільшення діапазону можливих значень компонентів різницевої колірної моделі і, як наслідок, до збільшення довжини ентропійного коду. Звичайно, напіврізниця негативно впливають на RMSE, оскільки заокруглюють непарні відхилення до найближчих парних, але, як показали результати експериментів, такі втрати прийнятні для формату JPEG.

У наступній частині статті ми також дослідили можливості заміни ведучої компоненти напівсумою компонентів. Зрозуміло, що серед двох напівсум для визначених напіврізниць необхідно обирати ту, яка у разі свого застосування прогнозовано забезпечує меншу довжину ентропійного коду відхилень перетворених яскравостей пікселів з аналогічними перетвореними яскравостями попередніх пікселів.

Результати експериментів

Проаналізуємо результати роботи розглянутих алгоритмів на восьми файлах 24-бітних зображень стандартного набору АСТ. Характеристики цих файлів наведено у табл. 1 (% унікальних кольорів – це відношення кількості різних (унікальних) кольорів пікселів до загальної кількості пікселів зображення) з [5]. Завантажити TIFF-версії цих зображень можна, наприклад, з <http://www.compression.ru/arctest/act/act-tif.htm>.

Таблиця 1

Характеристика зображень набору АСТ

№ файла	Назва файла	Розмір, Кб	Розміри, пікселів	% унікальних кольорів	Використання спектра, %	Особливості
1	Clegg.bmp	2101	814 × 880	17,83	0,76	Синтезоване, з шумами, декілька великих об'єктів
2	Frymire.bmp	3622	1118 × 1105	0,29	0,02	Синтезоване, один великий об'єкт
3	Lena.bmp	769	512 × 512	56,56	0,88	Фотореалістичне, декілька великих об'єктів
4	Monarch.bmp	1153	768 × 512	19,99	0,47	Фотореалістичне, один великий і багато малих об'єктів
5	Peppers.bmp	769	512 × 512	42,47	0,66	Фотореалістичне, декілька великих об'єктів
6	Sail.bmp	1153	768 × 512	19,26	0,45	Фотореалістичне, багато середніх об'єктів
7	Serrano.bmp	1464	629 × 794	0,26	0,01	Синтезоване, один великий фрагментований об'єкт
8	Tulips.bmp	1153	768 × 512	30,07	0,70	Фотореалістичне, декілька великих об'єктів

Цей набір містить як синтезовані (№ 1, 2, 7), так і фотореалістичні (решта) зображення. Вибір саме цього тестового набору зумовлений різноплановістю його зображень та наявністю у відкритих джерелах результатів тестувань на ньому алгоритмів інших дослідників.

Для реалізації компресії зображень з формату BMP у стандартний формат JPEG та декомпресії отриманих JPEG-файлів у формат BMP нами було використано вихідні тексти програм з CD до [2], в яких додатково було реалізовано визначення тривалості кодування/декодування та відхилення RMSE початкових від декодованих BMP-файлів.

Модифікації у формат JPEG нами вносилися в частині переходу до альтернативних колірних моделей із цілими та напівцілими коефіцієнтами та зворотного повернення від них до колірної моделі RGB. У цих модифікаціях було реалізовано алгоритми формування для кожного зображення таких колірних моделей:

1. Різницева колірна модель із цілими коефіцієнтами (*Колірна модель 1*).
2. Різницева колірна модель із несучою компонентою та напівцілими коефіцієнтами (*Колірна модель 2*).
3. Різницева колірна модель з несучою напівсучою компонентів та напівцілими коефіцієнтами (*Колірна модель 3*).

Отже, проаналізуємо результати стиснення зображень набору АСТ з використанням у модифікованому форматі JPEG цих різницевих колірних моделей та визначимося з перспективами їх застосування. Розраховані різницеві колірні моделі наведено у табл. 2, RMSE відхилень вхідних зображень у форматі BMP від закодованих у стандартний чи модифікований формат JPEG і розкодованих назад зображень у BMP-формат подано у табл. 3, КС наведено у табл. 4, час кодування – у табл. 5, а час декодування – у табл. 6.

Таблиця 2

Варіанти різницевих колірних моделей для стиснення зображень набору АСТ у модифікованому форматі JPEG

№ файла	Колірна модель 1	Колірна модель 2	Колірна модель 3
1	B, G, B з поверненням до YCbCr	R, (G-R)/2, (B-R)/2	(B+R)/2, (G-R)/2, (B-R)/2
2	B, R-B+128, G-B+128	B, (R-B)/2, (G-B)/2	(R+B)/2, (G-B)/2, (R-B)/2
3	R, B-G, G-R з поверненням до YCbCr	R, (B-G)/2, (G-R)/2	(G+R)/2, (B-G)/2, (G-R)/2
4	R, G-B, B-R з поверненням до YCbCr	R, (G-B)/2, (B-R)/2 з поверненням до YCbCr	(B+R)/2, (G-B)/2, (B-R)/2 з поверненням до YCbCr
5	R, B-G, G-R з поверненням до YCbCr	R, (B-G)/2, (G-R)/2 з поверненням до YCbCr	(G+R)/2, (B-G)/2, (G-R)/2 з поверненням до YCbCr
6	G, R-G, B-G з поверненням до YCbCr	G, (R-G)/2, (B-G)/2	(B+G)/2, (R-G)/2, (B-G)/2
7	B, R-G+128, G-B+128	B, (R-G)/2, (G-B)/2	(G+B)/2, (R-G)/2, (G-B)/2
8	R, B-G, G-R з поверненням до YCbCr	R, (B-G)/2, (G-R)/2	(G+R)/2, (B-G)/2, (G-R)/2

Таблиця 3

RMSE файлів зображень набору АСТ після компресії та декомпресії у стандартний та модифікований формат JPEG з використанням різних колірних моделей

№ файла	YCbCr	Колірна модель 1	Колірна модель 2	Колірна модель 3
1	3,84	3,84	4,36	4,06
2	3,20	59,83	3,51	3,43
3	3,35	3,35	4,19	3,56
4	1,96	1,96	1,96	1,96
5	2,19	2,19	2,19	2,19
6	2,48	2,48	2,60	2,55
7	3,26	46,56	4,35	3,59
8	2,17	2,17	2,68	2,31
Середнє RMSE	2,81	15,30	3,23	2,96

Бачимо, що навіть у процесі розрахунку різницевих колірних моделей із цілими коефіцієнтами (Колірна модель 1) для фотореалістичних і окремих синтезованих зображень довелося відмовитися від їх застосування, оскільки прогнозована довжина ентропійного коду (3) навіть у найкращій з таких моделей виявилася більшою, ніж у колірній моделі YCbCr. Таке збільшення довжини ентропійного коду, як вже зазначалося, відбулося через збільшення діапазону (розсіювання) можливих значень різниць компонентів.

Таблиця 4

Коефіцієнт стиснення файлів зображень набору АСТ у стандартному та модифікованому форматі JPEG із використанням різних колірних моделей, %

№ файла	YCbCr	Колірна модель 1	Колірна модель 2	Колірна модель 3
1	34,27	34,27	35,13	34,94
2	28,35	30,15	27,39	27,66
3	17,56	17,56	16,78	16,91
4	14,14	14,14	14,14	14,14
5	15,47	15,47	15,47	15,47
6	20,29	20,29	20,03	20,03
7	25,07	29,30	23,22	24,59
8	17,69	17,69	16,91	17,26
Середній КС	21,61	22,36	21,13	21,38

Таблиця 5

Час кодування файлів зображень набору АСТ у стандартний та модифікований формат JPEG з використанням різних колірних моделей, с

№ файла	YCbCr	Колірна модель 1	Колірна модель 2	Колірна модель 3
1	1,14	1,33	1,41	1,42
2	2,03	2,22	2,17	2,22
3	0,36	0,42	0,42	0,44
4	0,52	0,59	0,59	0,61
5	0,34	0,42	0,41	0,42
6	0,56	0,66	0,63	0,67
7	0,75	0,92	0,84	0,89
8	0,55	0,69	0,63	0,64
Середній час	0,78	0,91	0,89	0,91

Таблиця 6

Час декодування файлів зображень набору АСТ із стандартного та модифікованого формату JPEG з використанням різних колірних моделей, с

№ файла	YCbCr	Колірна модель 1	Колірна модель 2	Колірна модель 3
1	0,99	1,00	0,97	0,98
2	1,59	1,66	1,53	1,56
3	0,28	0,28	0,27	0,27
4	0,39	0,39	0,39	0,39
5	0,27	0,27	0,28	0,27
6	0,44	0,44	0,47	0,42
7	0,61	0,64	0,56	0,59
8	0,44	0,41	0,44	0,44
Середній час	0,63	0,64	0,61	0,62

Для синтезованих зображень № 2, 7 прогнозована довжина ентропійного коду в альтернативній колірній моделі з цілими коефіцієнтами виявилася меншою, ніж у колірній моделі YCbCr,

але внаслідок відсікання під час кодування значень різниць діапазону $[-127; 383]$ до допустимого діапазону $[0; 255]$ значення яскравостей компонентів зазнали суттєвих змін, як, наприклад, на рис. 1, б (спотворення на рамці і на щоці), що призвело до суттєвого зростання RMSE (див. дані табл. 3) і негативно позначилося на КС (див. табл. 4).

Час кодування для зображень № 2, 7 при використанні альтернативних колірних моделей з цілими коефіцієнтами у середньому зріс на 17 %, що пов'язано з розрахунком параметрів цих моделей, а декодування – у середньому на 9,5 % внаслідок збільшення розмірів стиснутих файлів.

Наведені результати свідчать, що різницеві колірні моделі з цілими коефіцієнтами недоцільно застосовувати для стиснення зображень із втратами у форматі JPEG, оскільки відсікання значень яскравостей перетворених компонентів призводить до суттєвого погіршення якості зображень і не зменшує КС та час кодування/декодування.

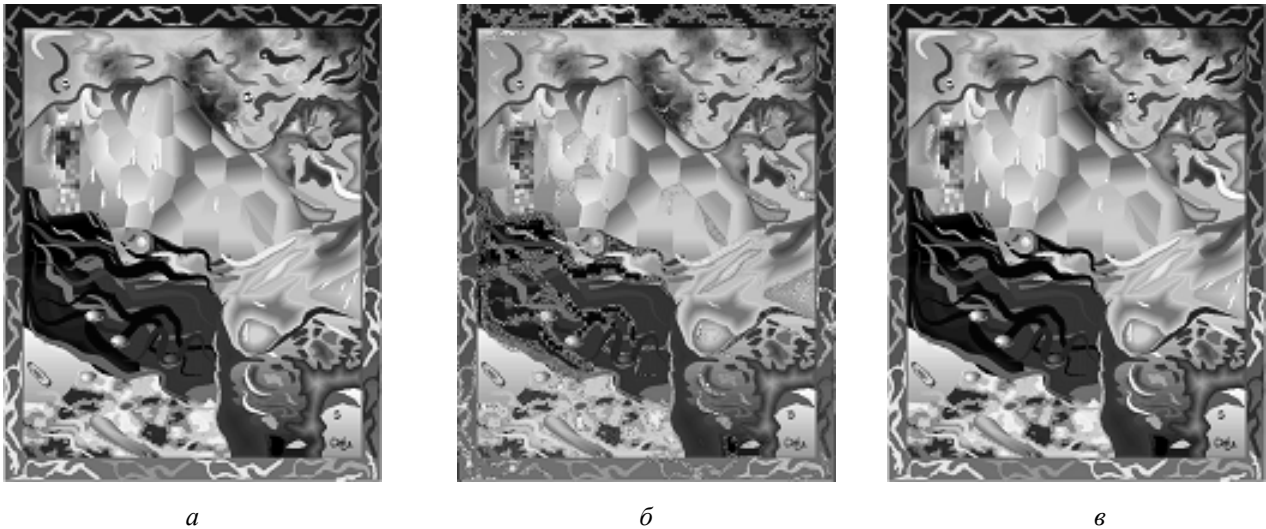


Рис. 1. Зміни яскравостей пікселів зображення *Serrano.bmp* (а) внаслідок застосування різницевих колірних моделей з цілими коефіцієнтами (б) та напівцілими коефіцієнтами та несучою компонентою (в)

Виконаємо тепер аналогічний аналіз результатів застосування запропонованих у попередній частині статті алгоритмів формування та переходу до різницевих колірних моделей із напівцілими коефіцієнтами в модифікованому форматі JPEG.

Як свідчать дані табл. 2, у процесі розрахунку різницевих колірних моделей із напівцілими коефіцієнтами як для синтезованих, так і для більшості (60 %) фотореалістичних зображень прогнозована довжина їх ентропійного коду (3) в альтернативній колірній моделі виявилася меншою, ніж у колірній моделі YCbCr. Такі моделі не збільшують діапазон (розсіювання) можливих значень компонентів і тому в принципі можуть зменшити ентропію (1), що створює перспективи для їх застосування (рис. 1в).

Різницеві колірні моделі з напівцілими коефіцієнтами в середньому забезпечують кращі КС на 0,23–0,48 %, хоча й погіршують RMSE на 0,15–0,42 одиниці яскравості. Вони хоча й у середньому сповільнюють кодування на 0,11–0,13 с, зате прискорюють декодування на 0,01–0,02 с. (3 %). Різніці компонентів у різницевих колірних моделях із цілими і напівцілими коефіцієнтами зберігаються, тому визначати такі різниці можна швидше, як для алгоритму з цілими коефіцієнтами. Різницеві колірні моделі з несучою напівсумою компонентів (*Колірна модель 3*) у середньому забезпечують кращу якість відтвореного зображення (менші RMSE) від різницевих колірних моделей з несучою компонентою (*Колірна модель 2*), зате призводять до більших КС і сповільнюють декодування.

Отже, для забезпечення кращої якості відтвореного зображення доцільно застосовувати різницеві колірні моделі із напівцілими коефіцієнтами та несучою напівсумою, а для кращого стиснення і швидшого декодування – різницеві колірні моделі з напівцілими коефіцієнтами та несучою компонентою.

Висновки і перспективи подальших досліджень

У процесі дослідження можливостей зменшення розмірів стиснутих зображень та прискорення декодування в модифікованому форматі JPEG завдяки використанню замість колірної моделі YCbCr альтернативних різницевої колірних моделей як з цілими, так і з напівцілими коефіцієнтами встановлено, що:

1. Типове стиснення зображень у графічних форматах найчастіше складається з трьох послідовних достатньо незалежних етапів: переходу до альтернативного подання зображення (відображення), застосування контекстно-залежного алгоритму для зменшення міжелементної надлишковості та поелементного кодування отриманих даних для ліквідації кодової надлишковості. Одним із способів підвищення ефективності стиснення трикомпонентних зображень із втратами є вибір однієї з альтернативних колірних моделей для кожного зображення, яка перерозподілить енергію зображення (виконає міжкомпонентну декореляцію) або підвищить рівень надлишковості для контекстно-залежного чи контекстно-незалежного алгоритмів, що застосовуються в обраному графічному форматі.

2. Не існує універсальної колірної моделі, яка дозволила б оптимально виконати міжкомпонентну декореляцію для всіх типів зображень. Навіть для зображень одного типу оптимальними (в сенсі декореляції) можуть виявитися різні колірні моделі.

3. У графічних форматах для стиснення окремих зображень замість колірних моделей з дійсними коефіцієнтами доцільно використовувати різницеві колірні моделі з цілими чи напівцілими коефіцієнтами, якщо вони прогнозовано зменшують КС. Такі колірні моделі в середньому прискорюють декодування на 3 %.

4. Для стиснення зображень без втрат варто застосовувати різницеві колірні моделі з цілими коефіцієнтами [5], а при компресії зображень з втратами – різницеві колірні моделі з напівцілими коефіцієнтами.

5. У процесі вибору різницевої колірної моделі з декількох альтернативних доцільно мінімізувати довжину ентропійного коду приростів окремих компонентів, оскільки прирости яскравостей окремих компонентів найчастіше використовуються контекстно-залежним алгоритмом стиснення графічного формату, а до ентропії наближається ефективність його контекстно-незалежного алгоритму.

6. При стисненні зображень із втратами колірні моделі з напівцілими коефіцієнтами не збільшують діапазон можливих значень окремих компонентів та суттєво не впливають на якість зображень. Якщо потрібно мінімізувати RMSE, то несучу компоненту в різницевій колірній моделі варто сформувати з напівсуми компонентів. Коли ж необхідно максимально прискорити декодування, то несучу компоненту в різницевій колірній моделі доцільно сформувати з однієї з вхідних компонентів.

Надалі, з метою подальшого зменшення КС та прискорення декодування в популярних графічних форматах, під час вибору різницевої колірної моделі з декількох альтернативних ми пропонуємо враховувати особливості реалізацій як контекстно-залежних, так і контекстно-незалежних алгоритмів, реалізованих у цих форматах.

Список літератури

1. Сэломон, Д. (2006). *Сжатие данных, изображений и звука*. – М.: Техносфера.
2. Миано, Дж. (2003). *Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии* (С. 249-318). Москва: Триумф.
3. Wallace, G. K. (1991). The JPEG still picture compression standard. *Communication of ACM*, 34(4), 30-44.
4. Гонсалес, Р. & Вудс, Р. (2005). *Цифровая обработка изображений*. – М.: Техносфера.
5. Шпортько, О.В. (2010). *Підвищення ефективності стиснення кольорових зображень у форматі PNG* (Дис. ... канд. техн. наук). Рівненський державний гуманітарний університет, Рівне.

6. Ватолин, Д., Ратушняк, А., Смирнов, М. & Юкин, В. (2003). *Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео*. Москва: ДИАЛОГ-МИФИ.
7. Пономаренко, С. И. (2002). *Пиксел и вектор: Принципы цифровой графики. Гл. 17. Цифровые модели. Цифровая модель RGB*. Відновлено з <http://www.computerbooks.ru/books/Graphics/Book-Digital-Graphics/Glava%2017/Index2.htm>.
8. Прэтт, Э. (1982). *Цифровая обработка изображений*. – М.: Мир.
9. Шпортко, О. В. (2009). Використання різницевих кольорових моделей для стиснення RGB-зображень без втрат. *Відбір і обробка інформації*, 31(107), 90–97.
10. Шпортко, О. В. & Шпортко, В. О. (2018). Застосування різницевих колірних моделей для стиснення зображень в модифікованому графічному форматі JPEG (С. 144–146), Обчислювальні методи і системи перетворення інформації. V наук.-техн. конф. Львів: ФМІ.
11. Шпортко, О. В. (2018). Зменшення розмірів стиснутих даних черезрядкових сканів графічного формату JPEG (С. 298–299), Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій: Міжнар. наук. конф. – Рівне: А. В. Червінко.

References

1. Salomon, D. (2006). *Compression of data, images and sound*. Moscow: Technosphere.
2. Miano, J. (2003). *Format and image compression algorithms in action* (p. 249–318). Moscow: Triumph.
3. Wallace, G. K. (1991). The JPEG still picture compression standard. *Communication of ACM*, 34(4), 30–44.
4. Gonzalez, R. & Woods, R. (2005). *Digital image processing*. Moscow: Technosphere.
5. Shportko, A. V. (2010). *Increase of the efficiency of color image compressions in the PNG format* (Dis. PhD). Rivne State Humanitarian University, Rivne.
6. Vatin, D., Ratushnyak, A., Smirnov, M. & Yukin, V. (2003). *Data compression methods. Device archivers, image and video compression*. Moscow: Dialogue-MIPHI.
7. Ponomarenko, S. (2002). *Pixel and vector: principles of digital graphics. Chapter 17. Digital models. Digital RGB model*. Retrieved from <http://www.computerbooks.ru/books/Graphics/Book-Digital-Graphics/Glava%2017/Index2.htm>.
8. Pratt, W. (1982). *Digital image processing*. Moscow: Mir.
9. Shportko, A. V. (2009). Usage of the difference color models for the compression of RGB images without losses. *Selection and processing of information*, 31 (107), 90–97.
10. Shportko, A. V. & Shportko, V. A. (2018). *Application of difference color models for image compression in the modified JPEG graphic format* (pp. 144–146), Computational methods and systems conversion information. V Sciences. and tech. conf. Lviv: FMI.
11. Shportko, A. V. (2018). *The reduction of the size of the compressed interlaced scans of the JPEG graphic data format* (pp. 298–299), The modern problems of mathematical modeling, computational methods and information technology. Intern. sciences. conf. Rivne: A. V. Chervinko.