

Формування колірних моделей з центруванням інтервалів різниць компонентів в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.060>

Олександр Шпортко

Кафедра інформаційних систем та обчислювальних
методів

ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний
університет імені академіка Степана Дем'янука»
м. Рівне, Україна

ITShportko@gmail.com

Андрій Бомба

Кафедра комп'ютерних наук та прикладної
математики

Національний університет водного господарства та
природокористування
м. Рівне, Україна

abomba@ukr.net

Анотація—Обґрунтована доцільність та описаний механізм формування різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів під час прогресуючого ієрархічного стиснення зображень без втрат. На прикладі зображень тестового набору АСТ показано, що застосування різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів дає змогу зменшити коефіцієнти стиснення зображень в середньому на 0.02 bpb.

Ключові слова—прогресуюче стиснення зображень, стиснення без втрат, різницева колірна модель з цілими коефіцієнтами.

I. ВСТУП

Як відомо, зображення суттєво полегшують і прискорюють сприйняття інформації людиною. Саме тому на сьогодні вони є невід'ємною складовою мультимедійної інформації, яка найчастіше передається каналами зв'язку чи зберігається на електромагнітних носіях [1].

Всі графічні формати та методи, що в них використовуються, за принципом стиснення даних зображень поділяють на два основні класи: з втратами (наприклад, JPEG) та без втрат (наприклад, PNG) [2]. І якщо для переважної більшості алгоритмів компресії зображень з втратами можна забезпечити потрібний коефіцієнт стиснення (відношення розмірів стиснутого до нестиснутого файлів зображення, виражене в bpb, надалі – КС) за рахунок погіршення якості, то рівень стиснення зображень без втрат залежить, власне, лише від перепадів кольорів їх пікселів та самого алгоритму стиснення, не регулюється програмно і становить в середньому тільки 30-70 % [1]. Отже, проблема підвищення ефективності стиснення зображень є актуальною сьогодні і буде актуальною в найближчому майбутньому.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Будь-яке стиснення даних можливе за рахунок зменшення чи ліквідації надлишковостей [3]. В зображеннях розрізняють три основні типи надлишковостей [4]: візуальну (полягає в наявності інформації, яка не сприймаються зоровою системою людини), міжелементну або просторову (проявляється в корельованості яскравостей суміжних пікселів) та кодову (виявляється при використанні кодів однакової довжини для елементів з різними ймовірностями). Зрозуміло, що чим більше видів надлишковостей кожного типу опрацьовуються графічним форматом – тим ефективніше стиснення. Але в процесі стиснення без втрат інформація не втрачається, ось чому перший тип надлишковостей не зменшується. Тому стиснення зображень без втрат в архіваторах та графічних форматах найчастіше відбувається максимум в чотири етапи: на першому контекстно-залежне кодування зменшує надлишковості між однаковими фрагментами чи фрагментами з однаковою структурою (зменшує міжелементну надлишковість); на другому етапі виконується перехід до альтернативної колірної моделі [5; 6]; на третьому – яскравості компонентів пікселів перетворюються за допомогою предикторів [7] (другий та третій етапи не стискають зображення, але збільшують нерівномірність розподілу яскравостей і тому підвищують ефективність четвертого етапу); на четвертому етапі контекстно-незалежне кодування формує коди елементів з довжинами, залежними від їх ймовірностей (опрацьовує кодову надлишковість, наприклад, кодами Хафмана чи арифметичними кодами [2; 3; 5-7]). Середня довжина коду елемента блоку після застосування будь-якого контекстно-незалежного алгоритму, згідно з формулою of Shannon [4], не може бути меншою ентропії джерела

$$H = -\sum_i p_i \times \log p_i, \quad (1)$$

де p_i – ймовірність появи елемента i .

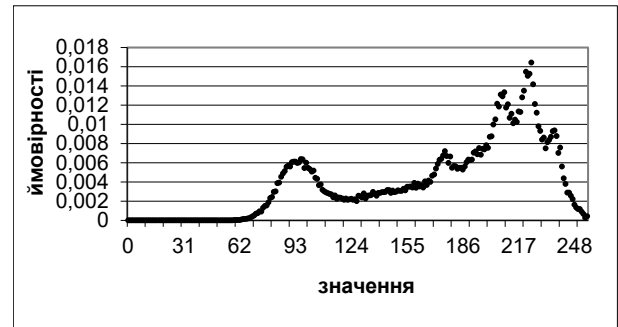
Як відомо, ентропія джерела зменшується зі збільшенням нерівномірності розподілу ймовірностей (частот) між елементами [7]. Оскільки середня довжина контекстно-незалежного коду близька до ентропії (1) [3], то загальна довжина блоку таких кодів для послідовності елементів наближено дорівнює сумі довжин їх ентропійних кодів, тобто довжині ентропійного коду послідовності [6]. Нехай кожне зі значень i зустрічається n_i разів в послідовності довжини $N = \sum_i n_i$. Згідно статистичного означення ймовірності, $p_i = n_i / N$, тому довжина ентропійного коду елемента, до якого близька довжина арифметичного коду, становить $l_i = -\log p_i = \log \frac{N}{n_i}$, а загальна довжина ентропійного коду послідовності, враховуючи (1), наближається до значення

$$L = N \times H = N \log(N) - \sum_i n_i \log(n_i). \quad (2)$$

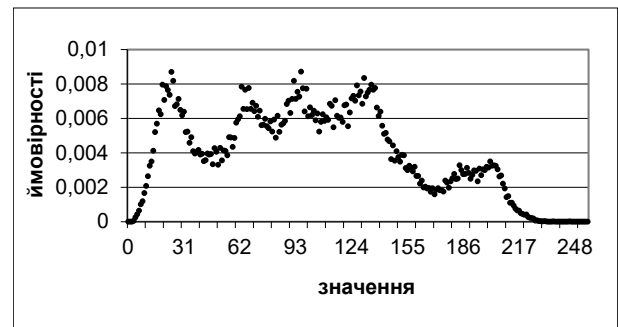
III. ФОРМУВАННЯ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ З ЦЕНТРУВАННЯМ ІНТЕРВАЛІВ РІЗНИЦЬ КОМПОНЕНТІВ

Як було показано в [6], різницеві колірні моделі неефективні для фрагментів з коливаннями близьких значень яскравостей вхідних компонентів: якщо значення яскравостей від'ємника несуттєво перевищують значення яскравостей зменшуваного, то в різницях при 8-бітній розрядності дискретизації отримуємо значення, близькі до 255. А коли значення яскравостей від'ємника трохи менші значень яскравостей зменшуваного, то в різницях отримуються значення, близькі до нуля (рис. 1в). Таке розсіювання значень різниць колірної моделі для близьких пікселів негативно впливає на точність прогнозування нелінійними предикторами і, як наслідок, збільшує ентропію (1). Для уникнення такого розсіювання значень різниць близьких яскравостей компонентів в [6] ми зміщували до 128 (середини діапазону можливих значень) різниці медіан компонентів колірної моделі RGB, розраховуючи на те, що більшість яскравостей цих компонентів зосереджені навколо їх медіан. Але зміщення до середини діапазону різниці медіан переміщує до значень, близьких до нуля і 255 значення, віддалені від різниці медіан на 128 і погіршує прогнозування навколо них. Наприклад, медіана компоненти R зображення *Lena.bmp* (рис. 1а) для пікселів, неопрацьованих контекстно-незалежним алгоритмом, становить 197. Медіана компоненти G (рис. 1б) цих же пікселів рівна 98. Тому для зміщення різниці медіан компоненти $R-G$ до 128 різниці яскравостей цих компонентів для кожного пікселя потрібно збільшувати на $-197 + 98 + 128 = 29$. Застосування різниці $R - G + 29$ (рис. 1г) погіршує прогнозування навколо різниць компонентів, рівних 227 ($197 - 98 + 128$), адже переведе їх в значення, близькі до нуля там, де $R - G \geq 227$, і в значення, близькі до 255 там, де $R - G < 227$. Тому для розсіювання якомога меншої кількості різниць зміщувати різниці компонентів

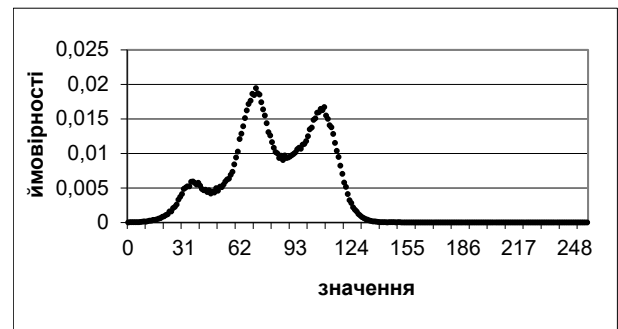
будемо так, щоб навколо нуля та 255 було зосереджено якомога менше значень. Або, що те саме, до середини діапазону можливих значень будемо зміщувати середину інтервалу, що охоплює майже весь діапазон можливих значень, з максимальною кількістю елементів.



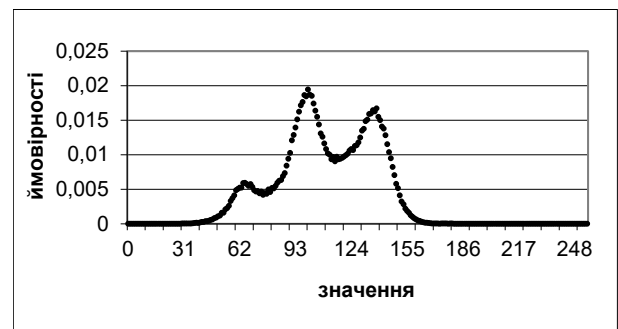
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1. Розподіл ймовірностей (відносних частот) яскравостей окремих компонентів та їх різниць, не опрацьованих контекстно-залежним алгоритмом, для зображення *Lena.bmp*: а) компоненти R ; б) компоненти G ; в) різниці $R - G$; г) зміщеної різниці $R - G + 29$

Для 8-ми бітної розрядності дискретизації ми реалізували зміщення до 128 середини інтервалу з максимальною кількістю елементів з розмахом 241 (по 120 значень зліва і справа від цієї середини). Тим

самим, інтервал решти діапазону можливих значень з розмахом 15 та найменшою кількістю елементів ми розміщуємо навколо нуля. Наприклад, для пікселів зображення Lena.bmp, неопрацьованих контекстно-залежним алгоритмом, максимальна кількість елементів різниці компонентів $R - G$ зосереджена в інтервалі $[-83; 157]$, тобто в сукупності інтервалів $[173; 255]$ U $[0; 157]$. Відповідно, в інтервалі $[158; 172]$ зосереджено найменше елементів серед інтервалів з розмахом 15. Тому для різниці $R - G$ середину інтервалу з максимальною кількістю елементів 37 слід змістити до середини діапазону можливих значень 128, додавши до всіх таких різниць 91 (128-37). Це змістить інтервал $[158; 172]$ з найменшою кількістю елементів в окіл нуля (рис. 2) і тим самим підвищить ефективність застосування предикторів та зменшить ентропію (1). Наголосимо: центрувати інтервали з максимальною кількістю елементів потрібно лише для різниць компонентів, адже зміщення вхідних компонентів не покращує результати застосування предикторів. Надалі інтервали з максимальною кількістю елементів різниць компонентів будемо називати скорочено «Інтервали різниць компонентів», маючи на увазі, що у цих інтервалах зосереджена максимальна кількість значень таких різниць.

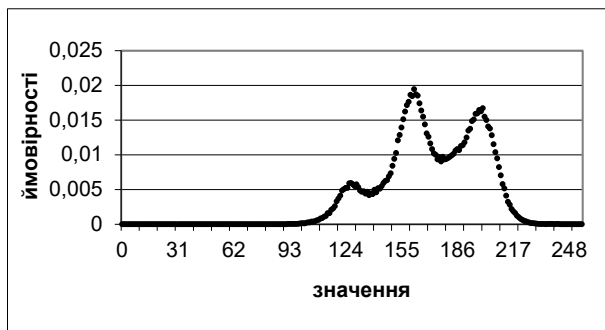


Рисунок 2. Розподіл ймовірностей (відносних частот) яскравостей зміщеної різниці $R - G + 91$ для пікселів зображення Lena.bmp, не опрацьованих контекстно-залежним алгоритмом

Після застосування предикторів довжина ентропійного коду різниці компонентів близька до довжини ентропійного коду протилежної різниці, адже вона базується не на значеннях елементів, а на їх частотах (2). Це підтверджують і дані табл. 1. Довжина ентропійного коду після застосування різницевої колірних моделей з протилежними різницями та предикторів може незначно зменшитися насамперед за рахунок збільшення перехресної кореляції між компонентами. Тому для прискорення вибору різницевої колірної моделі з центруванням інтервалів різниць компонентів виділимо з 49 альтернативних моделей [6] 16 основних:

0. $R, G, B;$
1. $R, R-G-middle(R-G)+128, R-B-middle(R-B)+128;$
2. $R, R-G-middle(R-G)+128, B-G-middle(B-G)+128;$
3. $R, G-B-middle(G-B)+128, R-B-middle(R-B)+128;$
4. $G-R-middle(G-R)+128, G, G-B-middle(G-B)+128;$
5. $G-R-middle(G-R)+128, G, B-R-middle(B-R)+128;$
6. $R-B-middle(R-B)+128, G, G-B-middle(G-B)+128;$
7. $B-R-middle(B-R)+128, G-R-middle(G-R)+128, B;$

8. $R-G-middle(G-R)+128, B-G-middle(B-G)+128, B;$
9. $B-R-middle(B-R)+128; B-G-middle(B-G)+128, B;$
10. $R, G, G-B-middle(G-B)+128;$
11. $R, G, R-B-middle(R-B)+128;$
12. $R, R-G-middle(R-G)+128, B;$
13. $R, B-G-middle(B-G)+128, B;$
14. $G-R-middle(G-R)+128, G, B;$
15. $B-R-middle(B-R)+128, G, B.$

Цей перелік моделей подібний до переліку, наведеного в [6], але додатково ще й передбачає центрування інтервалів з максимальною кількістю елементів (центр кожного такого інтервалу обчислює функція *middle()*). Компоненти різниць колірних моделей містять однакові зменшувані чи від'ємники одного знаку, що підвищує їх перехресну кореляцію.

Обирати альтернативну різницеву колірну модель доцільно в два етапи: на першому – вибрати таку різницеву колірну модель з 16 основних альтернативних, наведених вище, яка забезпечує найменшу прогнозовану довжину ентропійного коду (2) після застосування предикторів, а на другому – співставити ефективність обраної моделі з максимум трьома альтернативними різницевою колірними моделями з протилежними різницями (з двома протилежними різницями, з першою протилежною різницею та з другою протилежною різницею). Наприклад, якщо після першого етапу найменшу прогнозовану довжину ентропійного коду забезпечує різницева колірна модель $G - R, G, G - B$, то на другому етапі потрібно буде порівняти її ефективність лише з такими альтернативними різницевою колірними моделями: $R - G, G, B - G; R - G, G, G - B; G - R, G, B - G$. Такий підхід зменшує кількість аналізованих альтернативних колірних моделей з 49 до максимум 19 і тому прискорює в 2.5 рази вибір альтернативної колірної моделі, спрощує реалізацію кодера та забезпечує можливість компактного зберігання номера обраної з 16 основних альтернативних різницевої колірних моделей (для цього достатньо 4 біти). Причому це стосується як цілого зображення, так і його окремих фрагментів.

IV. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ З ЦЕНТРУВАННЯМ ІНТЕРВАЛІВ РІЗНИЦЬ КОМПОНЕНТІВ

Проаналізуємо результати застосування сформованих різницевої колірних моделей з цілими коефіцієнтами з центруванням інтервалів різниць компонентів для стиснення тестових зображень набору АСТ [8] та порівняємо їх з аналогічними результатами застосування колірних моделей з медіанами компонентів. Співставляючи дані першого та другого рядків табл. 1 бачимо, що зміщення середин інтервалів різниць компонентів до середини діапазону можливих значень замість зміщення до цього ж значення різниць медіан компонентів зменшило КС в середньому на 0.02 bpb. При цьому зменшення КС спостерігається для трьох з п'яти фотореалістичних знімків, максимальне зменшення становить 0.11 bpb (для зображення № 8). На стиснення дискретно-тонових зображень різницевої колірні моделі істотно не впливають.

Середній час кодування (табл. 2) відносно 49-ти альтернативних кольірних моделей з [6] збільшився на 3.81 %, оскільки зміщення середин інтервалів необхідно розраховувати для 6-ти різниць компонентів, а медіани – лише для трьох компонентів. Час декодування стиснутих зображень внаслідок застосування різницевої кольірної моделі з цілими коефіцієнтами з центруванням інтервалів різниць компонентів не змінився і становить в середньому 0.59 с., оскільки зміщення різниць передаються декодеру явно як в першому, так і в другому випадках.

TABLE I. Коефіцієнти стиснення зображень набору АСТ ПІСЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ФОРМУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ, ВРВ

Колірні моделі	№ файла								Серед. КС
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Різницева з 49-ти альтернативних з медіанами компонентів	1.34	0.57	4.45	3.25	3.69	4.06	0.59	3.71	2.71
Різницева з 49-ти чи 19-ти альтернативних з центруванням інтервалів	1.34	0.57	4.45	3.25	3.67	4.05	0.59	3.60	2.69
Різницева з 16-ти основних альтернативних з центруванням інтервалів	1.34	0.57	4.45	3.27	3.67	4.05	0.59	3.60	2.69

TABLE II. Час кодування файлів зображень набору АСТ з ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ФОРМУВАННЯ РІЗНИЦЕВИХ КОЛІРНИХ МОДЕЛЕЙ, С

Колірні моделі	№ файла								Серед. час
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Різницева з 49-ти альтернативних з медіанами компонентів	2.62	3.53	1.29	2.17	1.41	2.20	1.50	2.05	2.10
Різницева з 49-ти, 16-ти чи 19-ти основних альтернативної з центруванням інтервалів	2.45	3.52	1.41	2.33	1.56	2.41	1.61	2.14	2.18

Вибір різницевої кольірної моделі тільки з 16-ти наведених основних альтернативних погіршив КС лише для зображення № 4 на 0.02 bpb (третій рядок табл. 1), відчутно не вплинувши на час кодування та декодування. Такий вибір дає змогу істотно спростити процес кодування та використовувати для зберігання різницевої кольірної моделі лише 4 біти. Бачимо, що для цілих зображень після вибору різницевої кольірної моделі з 16-ти основних альтернативних доцільно ще й проаналізувати показники стиснення максимум трьох моделей з симетричними різницями. Це дає змогу отримати такі ж КС, як і для 49 альтернативних моделей (другий рядок табл. 1), істотно не змінюючи час кодування та декодування. Тому для цілих зображень ми рекомендуємо обрати різницеву кольірну модель максимум з 19 альтернативних, а для фрагментів – з 16 основних альтернативних різницевої кольірної моделі.

V. ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Зменшити КС зображень в трикомпонентних кольірних моделях можна не лише за рахунок декореляції даних окремих компонентів, а й за допомогою міжкомпонентної декореляції шляхом переходу до різницевої кольірної моделі.
2. Для забезпечення найменших КС різницевої кольірної моделі з цілими коефіцієнтами для цілого зображення варто формувати максимум з 19-ти альтернативних (16-ти основних альтернативних з наведеного переліку і трьох з симетричними різницями).
3. З метою підвищення ефективності застосування різницевої кольірної моделі з цілими коефіцієнтами інтервали з максимальною кількістю різниць базових компонентів R , G , B слід зміщувати до середини діапазону можливих значень. Такі зміщення замість зміщень медіан окремих компонентів дають змогу додатково зменшити КС в середньому на 0.02 bpb.
4. Різницеві кольірні моделі з цілими коефіцієнтами дають змогу суттєво підвищити ефективність стиснення без втрат трикомпонентних фотореалістичних зображень у форматах, що використовують предиктори, і тому можуть бути впроваджені в наступні версії цих форматів на рівні стандартів.

Надалі, з метою додаткового зменшення розмірів файлів стиснутих зображень без втрат і прискорення декодування в процесі прогресуючого ієрархічного стиснення, нами планується дослідити ефективність застосування різницевої кольірної моделі [5-6] до окремих фрагментів зображень.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest and C. Stein, "Introduction to Algorithms," Third Edition, vol. 1, Kiyv: Dialektika, 2020, 648 p. (In Ru).
- [2] J. Miano, "Compressed Image File Format: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP," New York: Addison Wesley, 1999, 264 p.
- [3] D. Selomon, "A Guide to Data Compression Methods," New York: Springer, 2002, 295 p.
- [4] R. Gonzalez and R. Woods, "Digital Image Processing," 4th ed., London: Pearson, 2017, 1192 p.
- [5] О. В. Шпортко, "Використання різницевої кольірної моделі для стиснення RGB-зображень без втрат," Відбір і обробка інформації, 2009, № 31 (107), С. 90–97.
- [6] A. Shportko, A. Bomba and V. Postolatii, "Programming the Formation of Difference Color Models for Lossless Image Compression," in Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2023), April 20-21, 2023, Kharkiv, Ukraine, vol. 3, ceur-ws.org, pp. 53–68, URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3403/paper5.pdf>.
- [7] A. Shportko and V. Postolatii, "Development of Predictors to Increase the Efficiency of Progressive Hierarchic Context-Independent Compression of Images Without Losses," in Proceedings of the 5th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2021), April 22-23, 2021, Kharkiv, Ukraine, vol. 1, ceur-ws.org, pp. 1026-1038, URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2870/paper77.pdf>.
- [8] "ACT – Test Files." [Online]. Available: <http://www.compression.ca/act/act-files.html>. [Accessed: October 09, 2023].