

УДК 621.372.542

## Розвиток алгоритмів безвтратної компресії зображень на основі аналізу перепадів яскравості

Б. П. Русин<sup>1</sup>, В. Я. Мосоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

<sup>2</sup>Державний університет «Львівська політехніка»

Надійшла до редакції 03.08.99

Розглянуто алгоритми безвтратного стиску зображень в сучасних системах передачі даних для підвищення ефективності використання каналів із недостатньою пропускну здатністю. Запропоновано новий підхід до безвтратного стиску, при якому декореляція зображення здійснюється аналізом значень перепадів яскравості, кодуванням старших розрядів сусідніх пікселів та інтерполяцією значень без використання ієрархічної декомпозиції зображень. Приведено порівняльний аналіз запропонованих алгоритмів з відомими ієрархічними алгоритмами безвтратного стиску.

Півтонові космічні зображення земної поверхні, які формуються за допомогою сканерів, широко використовуються при складанні карт, розвідці корисних копалин, для військових цілей тощо [2]. Їхня передача із супутників здійснюється цифровими каналами і вимагає узгодження пропускну здатності каналів з об'ємами інформації [3]. Найпростіше цього можна досягнути розробкою відповідних методів та алгоритмів стиску об'ємів інформації, принаймні витрати на неї значно нижчі, ніж витрати на модернізацію каналів.

Цифрові зображення представляються матрицею  $[B(i, j)]$ , ( $i = 1, \dots, N$ ;  $j = 1, \dots, M$ , де  $i, j$  — номери стовпчика і рядка, а  $B(i, j)$  — значення яскравості у точці з координатами  $i, j$ ). Якщо після операції стиску відновлене зображення  $[B_{out}(i, j)]$  еквівалентне оригіналу  $[B_{in}(i, j)]$ , тобто похибка

$$\delta = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (B_{in}(i, j) - B_{out}(i, j))^2 = 0,$$

то такий стиск має назву безвтратної компресії.

Використання безвтратної компресії обумовлене тим, що наявні на зображенні оригіналу потенційно важливі невеликі деталі, а також перепади яскравостей, підлягають певній деформації при компресії

з втратами. Слід також врахувати, що стиск може здійснюватись перед фільтрацією, оскільки прийняття рішення при вибір методу усунення завад здійснюється вже на приймальній стороні.

Безвтратну компресію виконують двома послідовними процедурами: декореляцією та кодуванням. Результатом першої є декорельоване зображення, яке при однакових розмірах має меншу ентропію через усунення з нього просторової надлишковості. Власне сам стиск відбувається на другому кроці з застосуванням добре відомих методів нерівномірного кодування: методу Хаффмена [5], арифметичного кодування [4], кодування за допомогою різноманітних модифікацій алгоритму Лемпела—Зіва.

Основна увага спеціалістів, що займаються алгоритмами безвтратної компресії, звернена саме на проблему декореляції оригінальних зображень, оскільки алгоритми нерівномірного кодування достатньо розроблені.

Декорельоване зображення — це набір випадкових значень з законом розподілу, близьким до симетрично-експоненційного, та нульовим математичним сподіванням. Значення дисперсії такого закону повинно бути меншим, оскільки ентропія

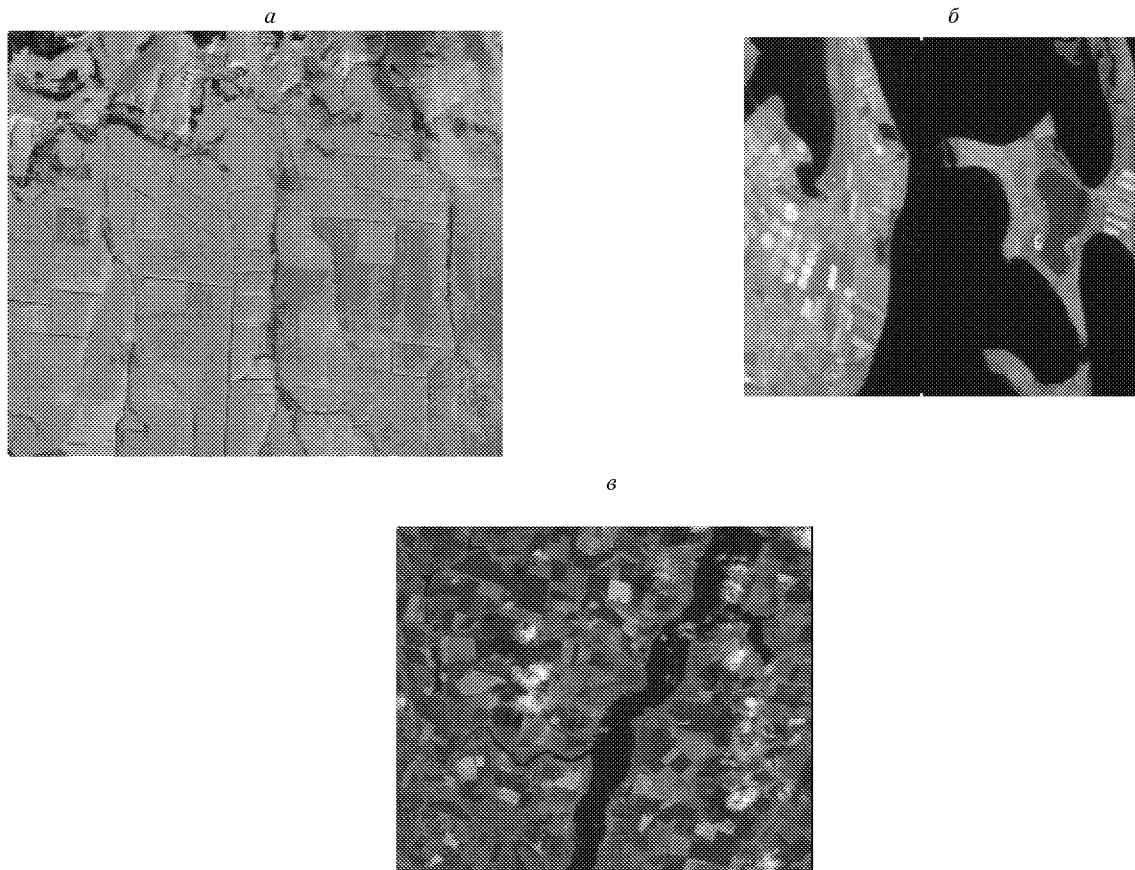


Рис. 1. Приклади зображень поверхні Землі, отримані з супутників: *a* — поле, *б* — коса, *в* — річка

також зменшується, що зменшує середню довжину коду на один піксель зображення.

У відомих алгоритмах декореляції, таких як алгоритми інтерполяції [6], класифікації і багаторівневої декомпозиції [7] та передбачуючого кодування [1], виконується процедура розбиття оригіналу  $[B(i, j)]$  на субзображення  $[B_q(i_q, j_q)]$  (декомпозиція), формування елементів яких здійснюється на ієрархічній основі. При цьому

$$[B(i, j)] = \bigcup_{q=1}^Q [B_q(i_q, j_q)], \quad q \in Q, \quad (i_q, j_q) \in D_q,$$

де  $D_q$  — множина точок субзображення  $q$ -рівня ієрархії ( $D_q \cap D_p = \emptyset, q \neq p, Q$  — кількість рівнів ієрархії).

Елементи субзображень вищих рівнів  $B_q(i_q, j_q)$  визначаються з елементів субзображень нижчих рівнів  $B_k(i_k, j_k), k = 1, \dots, q - 1$  за допомогою інтерполяційних поліномів  $f_q$ .

В загальному випадку запишемо

$$[B_q(i_q, j_q)] = f_q([B_{q-1}(i_{q-1}, j_{q-1})]),$$

Різниця між значеннями в точках зображення оригіналу  $[B(i, j)]$  та  $[B_q(i_q, j_q)]$ , є елементами декорельованого зображення  $[B_d(i, j)]$ ,

$$[B_d(i, j)] = [B(i, j)] - \bigcup_{q=1}^Q [B_q(i_q, j_q)], \quad q \in Q. \quad (1)$$

Подібним чином здійснюється формування субзображень  $B_q(i_q, j_q)$  і в інших алгоритмах. Відмінність полягає лише у виборі розміщення множин точок  $D_q$ , та виразів інтерполяційних поліномів  $f_q$  для визначення значень пікселів субзображень вищих рівнів ієрархії через нижчі.

В деяких алгоритмах можливий вибір конкретного полінома  $f_q$  із заданого набору  $S_q$  поліномів для  $q$ -го рівня ієрархії —  $\{f_q^s\}, s \in S_q$ . Даний вибір, наприклад, може здійснюватися за напрямом градієнта в околі точок  $i_q, j_q$  та вибором типу полінома за його мінімальною зміною. Це, у свою чергу, приводить до зменшення значень в (1). Очевидно, що використання одного із типів поліномів дозволяє змінювати ентропію декорельованого зображен-

ня та параметри стиску.

Відзначимо недоліки, які характерні для ієрархічних алгоритмів.

При розбитті зображення оригіналу на окремі субзображення, значення різниць в (1), визначені для елементів нижчих рівнів субзображень, особливо нульового, значно більші, ніж для субзображень вищих рівнів. Як наслідок, на сумарну ентропію декорельованого зображення особливо впливають ентропії субзображень нижчих рівнів.

Іншим важливим недоліком є неврахування того, що найвища кореляція — між двома сусідніми пікселями, а у ієрархічних алгоритмах значення елементів субзображень визначаються за декількома сусідніми елементами по вертикалі чи горизонталі.

Запропонований алгоритм не вимагає розбиття оригіналу на субзображення, усуваючи тим самим значний вплив на величину стиску субзображень нижчих рівнів. Одночасно для зменшення значень різниці (1) він враховує неодинаковість значень перепадів яскравості між сусідніми елементами у різних напрямках.

У запропонованому алгоритмі для елементів кожного рядка визначаються значення кореляційних коефіцієнтів по горизонталі — між сусідніми пікселями та вертикалі — між пікселями даного і попереднього рядка, — відповідно  $R_h$  та  $R_v$ . Вони дозволяють встановити, в якому напрямку взаємозв'язок є вищим, а розрив яскравості меншим. Якщо  $R_v < R_h$ , то декореляція даного рядка здійснюється диференціальною імпульсно-кодовою модуляцією (ДІКМ) по горизонталі (ДІКМ-Г). Якщо ж  $R_v > R_h$  — між елементами по вертикалі (ДІКМ-В). Значення коефіцієнтів  $R_h$ ,  $R_v$  визначаються як середні значення перепадів яскравості між елементами одного рядка та елементами двох сусідніх рядків:

$$R_h = \frac{1}{MN} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^M |B(i, j) - B(i-1, j)|,$$

$$R_v = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^M |B(i, j) - B(i, j-1)|.$$

Декореляція першого рядка  $[B(i, 1)]$ , а також першого стовпця  $[B(1, j)]$  здійснюється шляхом ДІКМ-Г та ДІКМ-В відповідно.

Для ілюстрації цих тверджень були виконані експериментальні дослідження зображень розмірністю  $240 \times 240$  та  $512 \times 512$  пікселів, отриманих з ШСЗ (рис. 1).

Ентропії та значення яскравості даних зображень представлені у табл. 1. Очевидно, що не розкид значень яскравості в зображенні впливає на зна-

Таблиця 1. Параметри досліджуваних зображень поверхні Землі

Назви зображень	Кількість значень яскравості	Ентропія
Поле	233	6.49
Коса	138	5.51
Річка	108	5.40

Таблиця 2. Ентропії декорельованих зображень по вертикалі та горизонталі

Назви зображень	Ентропія	
	ДІКМ по горизонталі	ДІКМ по вертикалі
Поле	4.64	4.51
Коса	4.50	3.98
Річка	4.21	4.22

чення ентропії, а саме частота їх появи, що також ілюструється даною таблицею.

До кожного з цих зображень застосовувалась як ДІКМ-Г, так і ДІКМ-В. Для декорельованих зображень отримані значення ентропій представлено у табл. 2. Видно, що вибір напрямку (по вертикалі чи горизонталі) особливо для зображення коси, відіграє важливу роль, оскільки різниця ентропій становить 0.52 біта. Це легко пояснити, оскільки дане зображення містить крупні темні області, орієнтовані вертикально. При їх горизонтальній орієнтації результати були б протилежними. На рис. 2 наведені декорельовані зображення коси по вертикалі та горизонталі. Добре видно більшу рельєфність зображення по горизонталі, ніж по вертикалі.

Для задання відновлюючого алгоритму інформації про ДІКМ формується додатковий масив, розмір якого дорівнює  $N/8$  біт. Кожен окремий біт визначає, який саме тип застосовувався, — ДІКМ-Г чи ДІКМ-В. Додатково введені біти не впливають на величину ентропії, оскільки розмір декорельованого зображення збільшується при цьому лише на  $100/(8M)$  %.

До переваг даного алгоритму можна віднести те, що при визначенні значень елементів декорельованого зображення враховується величина перепадів яскравості: якщо вона вища по вертикалі, то вибирається горизонтальний напрямок і навпаки.

Іншим додатковим фактором, який можна використати для зменшення ентропії і таким чином покращити параметри стиску, є усунення корельованості старших бітів сусідніх пікселів. Очевидно, що даний біт не змінює свого значення на протилежне від одного пікселя до іншого, а є деякою сталою величиною на певних відрізках. Це дозволяє здійснити перехід від задання абсолютного

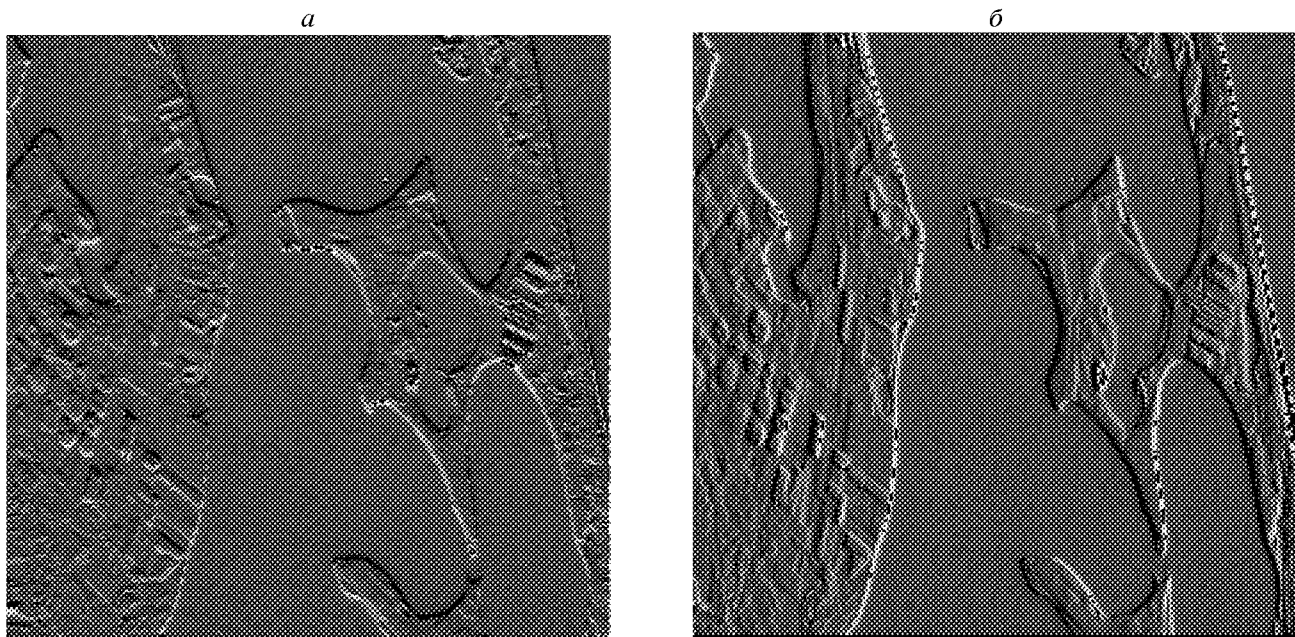


Рис. 2. Декорельовані зображення коси, отримані за допомогою: *а* — ДІКМ-В, *б* — ДІКМ-Г

значення до відносного його кодування. Наприклад, зміна старшого біта вказує на необхідність змінити його значення на протилежне. Це дозволяє перейти від симетричного експоненційного закону розподілу значень для (1) до різко асиметричного розподілу, що зменшує розкид значень та ентропію декорельованого зображення.

Інформацію про використання конкретної ДІКМ, яка міститься у  $N/8$  бітах додаткового масиву, можна використати для досягнення ще вищої декореляції. Коли після двох послідовних ДІКМ-В наступною є горизонтальна, попередній рядок можна сформулювати на основі використання інтерполяційних поліномів, як і у ієрархічних алгоритмах, оскільки значення попередніх рядків вже відомі, а значення наступних рядків можна відновити без участі даного рядка.

Наприклад, якщо рядок  $i - 1$  визначався через ДІКМ-В, а два наступні рядки  $i$  та  $i + 1$  — через ДІКМ-Г, то  $i$ -й рядок визначаємо через значення

рядків  $i - 1$  та  $i + 1$  за обраним інтерполяційним поліномом.

У табл. 3 наведені результати стиску даних зображень за відомими алгоритмами: алгоритм інтерполяції (АІ), алгоритм багаторівневої декомпозиції (АБРД), алгоритм передбачуючого кодування (АПК). Стиск декорельованих зображень здійснювався за алгоритмом Хаффмена.

Відзначимо використані параметри для згаданих вище алгоритмів: у випадку АІ — тривірневий алгоритм; у випадку АБРД — двірнева декомпозиція з розбиттям на чотири субзображення; у випадку АПК — розбиття зображення на два субзображення, одне з яких формується по чергово рядками з парними та непарними пікселями оригінального зображення, а інше визначається на основі першого шляхом аналізу локальних градієнтів.

В табл. 4 представлено результати по чергового використання трьох запропонованих алгоритмів для

Таблиця 3. Порівняльні результати стиску зображень для відомих алгоритмів

Назви зображень	Інтерполяції		Багаторівневої декомпозиції		Передбачуючого кодування	
	ентропія	стиск	ентропія	стиск	ентропія	стиск
Поле	4.47	1.779	4.41	1.78	4.46	1.78
Коса	4.23	1.857	4.06	1.93	4.16	1.88
Річка	4.31	1.798	4.196	1.98	4.02	1.97

Таблиця 4. Результати дослідження запропонованих алгоритмів

Назви зображень	З врахуванням орієнтації перепадів	З відносним кодуванням	З додатковим врахуванням просторового розподілу	Стиск
	ентропія	ентропія	ентропія	
Поле	4.41	4.39	4.36	1.78
Коса	3.97	3.93	3.92	1.99
Річка	4.02	3.98	3.98	1.97

декореляції зображень рис. 2. Стиск зображень, як і у попередньому випадку, здійснювався за алгоритмом Хаффмена.

Порівняння табл. 3 і 4 показує, що запропонований підхід ефективніший, ніж відомі алгоритми, особливо коли значення перепадів яскравості переважають в одному напрямі (зображення коси — напрям вздовж горизонталей). Застосування відносного кодування (графа 3, табл. 4) і просторового розподілу (графа 4, табл. 4) також дозволяє зменшити ентропію приблизно на 2 %.

**Висновок.** Використання запропонованого підходу дозволяє отримати менші значення ентропії і вищий коефіцієнт стиску у порівнянні з відомими методами. Розроблені алгоритми слабо залежать від величини ентропії вхідного зображення, а їх ефективність зменшується при нижчій корельованості сусідніх пікселів зображення (зображення поля).

1. Мосоров В. Я. Ієрархічний алгоритм компресії графічної інформації // Комп'ютерні технології друкарства: Збірник наук. праць 2-ї міжнар. конф. — Львів, 1998.—С. 47—48.
2. Русин Б. П. Системи синтезу, обробки і розпізнавання складноструктурованих зображень. — Львів: Вертикаль.—1997.—264 с.
3. Русин Б. П., Мосоров В. Я. Розвиток алгоритмів безвратного стиску зображень для сучасних систем передачі інформації // НТК-Телеком-99: Тр. IV Междунар. научно-

техн. конф. по телекомунікаціям. — 1999.—С. 607—610.

4. Howard P., Vitter J. New methods for lossless image compression using arithmetic coding // J. Info. Proc@Manag.—1992.—28, N 5.—P. 765—779.
5. Huffman D. A. A method for the construction of minimum-redundancy codes // Proc. IRE.—1952.—40.—P. 1098—1101.
6. Jain A. K. Image data compression: A review // Proc IEEE.—1981.—69.—P. 349—389.
7. Lee H. S., Kim Y., Oh S. Lossless compression of medical images by predication and classification // Opt. Eng.—1994.—33.—P. 160—166.

---

#### DEVELOPMENT OF LOSSLESS IMAGE COMPRESSION ALGORITHMS BASED ON THE ANALYSIS OF BRIGHTNESS DIFFERENCES

B. P. Rusyn and V. Ya. Mosorov

We discuss the lossless image compression algorithms which are used in the modern data base communication systems for upgrading the efficiency of the channels with insufficient transmitting capacity. A new approach is proposed for lossless compression in which the image decorrelation is based on the analysis of brightness differences, coding of most significant digits in neighboring pixels, and interpolation, without recourse to the hierarchical image decomposition. These algorithms were compared with well-known hierarchical algorithms for lossless compression.