

АПАРАТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ СТИСК РАСТРОВИХ МОНОХРОМНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

© Троценко В.В., Хедик Л.В., Хедик С.А., 2004

Запропоновано апаратно-орієнтовану систему стиску растрових монохромних зображень. Систему побудовано із використанням передпроцесорного вейвлітного перетворення за схемою ліфтингу. До вейвлітних коефіцієнтів застосовано адаптивне кодування. Система стиску орієнтована на застосування в галузі мультимедіа. Алгоритмічна модель орієнтована на реалізацію на основі ПЛІС із ступенем інтеграції до 100 тис. вентилів.

Hardware oriented system of raster monochrome image compression is proposed. It is based on preliminary lifting wavelet transform with an adaptive encoding of wavelete coefficients. The compression system is designed for multimedia applications. Algorithmic model is oriented for FPGA implementation up to 100 K gates count.

Вступ. Дискретне вейвлітне перетворення (ДВП) інтенсивно використовують у задачах стиску зображень. ДВП локалізовано у частотній та часовій областях і тому спроможне відбивати локальну темпоральну кореляцію в спектрі [1]. Це дозволяє коректно аналізувати типові для зображення структури та виділяти локальні особливості зображення. Тут просторова локальність вейвлітів не є блоковою, як в ДКП (де зображення обробляється не цілим, а, переважно, блоками 8x8, 16x16, інколи 32x32, які не перекриваються). Вейвліти застосовують до цілого зображення. Через компактність базису майже відсутні артефакти на відновленому зображенні, що є основним недоліком блок-косинусного спектрального перетворення на великих рівнях стиску. Спектральне вейвлітне перетворення згладжує відновлене зображення, що вигідно в царині мультимедії. ДВП є сепарабельним, що дозволяє виконувати двовимірні перетворення на основі одновимірних [1]. Існує алгоритм швидкого спектрального вейвлітного перетворення – ШВП.

Традиційно ДВП реалізовували за допомогою фільтрів зі скінченною імпульсною характеристикою (КІХ-фільтри) [1]. Основна операція таких систем – множення з накопиченням. Відповідно такі системи вимагають високих обчислювальних затрат, і затрат на збереження коефіцієнтів (поданих у форматі рухомою комою), що заперечує застосування як у вбудованих системах із низьким споживанням потужності, так і високошвидкісних системах. Нещодавно запропонована схема ліфтингу дала змогу значною мірою зменшити обчислювальні затрати при реалізації ДВП.

Основні переваги, що надає побудоване за схемою ліфтингу ДВП – це виконання перетворення в одному місці (execute in place), що заощаджує пам'ять та можливість проведення обчислень у форматі з фіксованою комою [2].

Розподіл коефіцієнтів ДВП має яскраво виражений пік (моду) в околі нуля. Це дозволяє зменшити загальний обсяг інформації за рахунок занулення коефіцієнтів, менших за абсолютною величиною від наперед заданого порогу, і подальше ущільнення процедурою кодування довжин нульових послідовностей. Разом це уможливує спрощену реалізацію за умови незначних апаратних витрат. Коефіцієнти, значення яких більші за величину порогу, розподіляють між зонами квантизації. Ширину діапазонів квантизації визначають динамічно за максимумом коефіцієнтів ДВП поточного зображення.

З кодів довжин послідовностей нулів та квантизованих коефіцієнтів складаємо абетку з 256 суперсимволів. Послідовність суперсимволів стискаємо ентропійним кодером Хафмена з стативною таблицею кодів.

Результат – це система втратного стиску, що за простих і невибагливих (у сенсі апаратних затрат) алгоритмів, має продуктивність, достатню для стиску відео в режимі реального часу, з прийнятною якістю зображення.

Структура системи. Розроблену нами структурну схему системи стиску зображень подає рис. 1. Вхідне зображення, розміри якого не перевищують 512×512 пікселів, міститься у зовнішній пам'яті, звідки його послідовно зчитуємо, обробляємо, а потім записуємо (назад до цієї пам'яті) всі рядки зображення. Потім процедуру повторюємо, але оперуємо вже стовпцями з результатів обробки рядків.

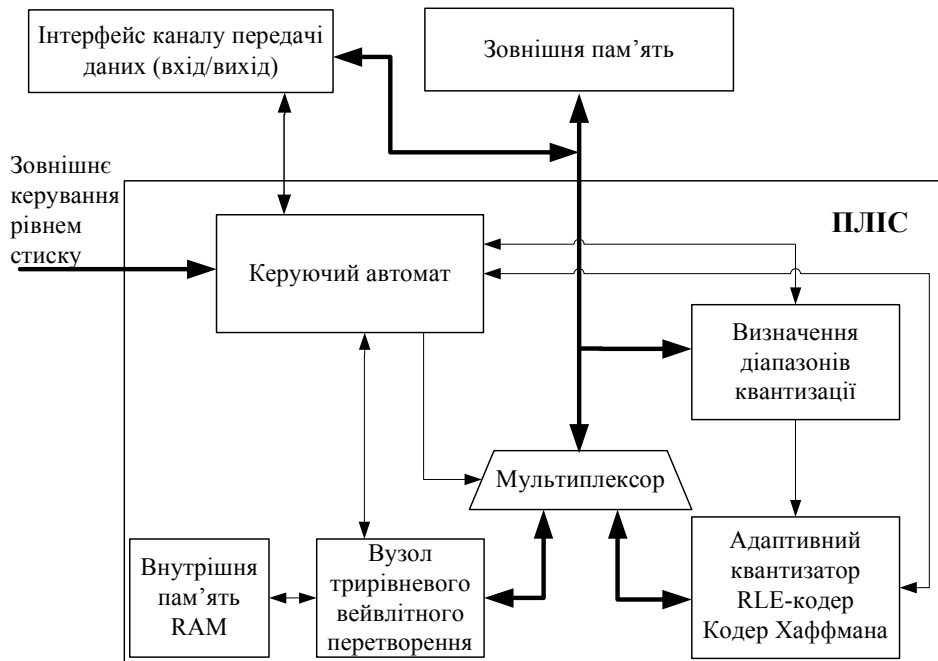


Рис. 1. Загальна структура пристрою стиску зображень на основі попереднього спектрального вейвлітного перетворення

Внутрішня пам'ять призначена для зберігання проміжних результатів обробки одного рядка/стовпця зображення блоком трирівневого вейвлітного перетворення. Детальний опис роботи трирівневого вейвлітного перетворювача, а також його архітектуру та опис роботи з пам'яттю подані в наступному пункті.

Блок кодера виконує динамічну квантизацію вейвлітних коефіцієнтів з їх наступним ентропійним кодуванням Хаффмана. У цьому ж блоці відбувається форматування вихідного потоку. Детальний опис роботи кодера подано в пункті 4.

Цілочисельне вейвлітне перетворення за схемою ліфтингу. Ліфтингову схему запропонував Вім Свелденс. Це один із методів побудови вейвлітних функцій і апаратури для реалізації перетворення [3, 4].

Нижче подано вирази для обрахунку апроксимуючих та деталізуючих вейвлітних коефіцієнтів при застосуванні вейвліту (5,3):

$$d_n = -\frac{1}{2} p_{2n} + p_{2n+1} - \frac{1}{2} p_{2n+2};$$

$$S_n = -\frac{1}{8} p_{2n-2} + \frac{1}{4} p_{2n-1} + \frac{3}{4} p_{2n} + \frac{1}{4} p_{2n+1} - \frac{1}{8} p_{2n+2},$$

де p – піксели вхідного зображення; d – деталізуючі коефіцієнти; S – апроксимуючі коефіцієнти. Зауважимо, що при прямій апаратній реалізації подані вирази потребуватимуть великої місткості фізичної пам'яті для збереження проміжних результатів. Застосування схеми ліфтингу дає

можливість запису обрахованих коефіцієнтів до тих самих комірок пам'яті, поверх оригінальних значень пікселів. Це є так звана ХІР (execute-in-place) технологія, – виконання-на-тому-самому-місці.

Ми застосували ліфтовий біортогональний вейвліт (5,3). ДВП із вказаним базисним вейвлітом можна подати такими формулами [3]:

$$d_i^{(l)} = d_{2i+1}^{(l-1)} - \left[\frac{d_{2i}^{(l-1)} + d_{2i+2}^{(l-1)}}{2} \right];$$

$$s_i^{(l)} = d_{2i}^{(l-1)} - \left[\frac{d_i^{(l)} + d_{i-1}^{(l)}}{4} \right],$$

де $d_i^{(0)} = p_{2i+1}$ та $s_i^{(0)} = p_{2i}$; d – деталізуючі коефіцієнти; S – апроксимуючі коефіцієнти.

Формули зворотного ліфтового ДВП мають такий вигляд:

$$s_{2i}^{(l)} = s_i^{(l-1)} - \left[\frac{d_{i-1}^{(l-1)} + d_i^{(l-1)}}{4} \right];$$

$$s_{2i+1}^{(l)} = d_i^{(l)} + \left[\frac{s_{2i}^{(l)} + d_{2i+2}^{(l)}}{2} \right],$$

де s_{2i} – парні відліки та s_{2i+1} – непарні; d – деталізуючі коефіцієнти; S – апроксимуючі коефіцієнти.

Рис. 2 унаочнює запропоновану нами апаратну реалізацію алгоритму ліфтингу.

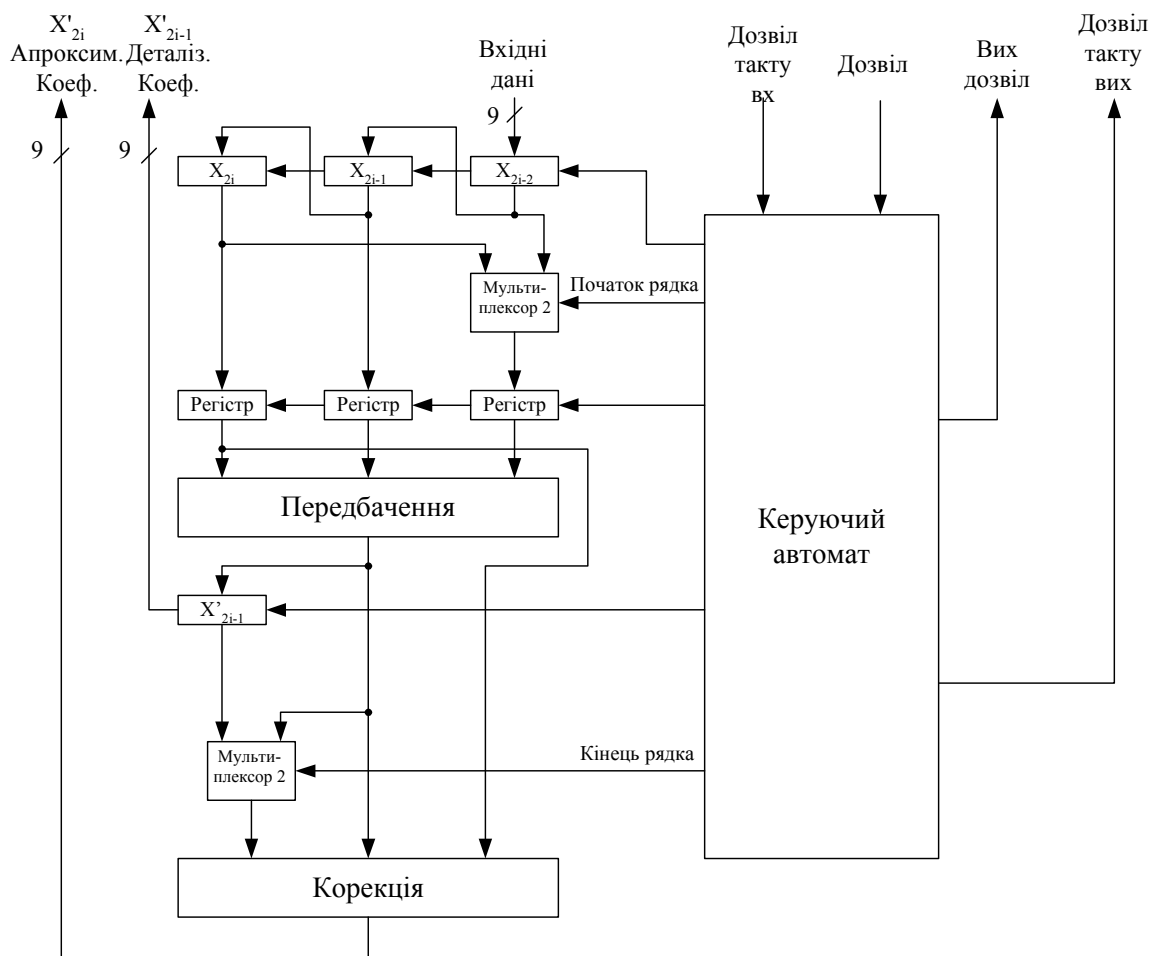


Рис. 2. Структура апаратних засобів, що виконують прямий ліфтинг

Адаптивний метод стиску з привнесенням втрат. Запропонований метод стиску поєднує алгоритм квантизації та кодування довжин нулів. Залежно від значення коефіцієнта, порівняно з наперед заданим порогом, виконуємо або його квантизацію, або RLE кодування. Керування рівнем стиску виконуємо налаштуванням порогів занулення. Введено чотири набори порогів відкидання спектральних коефіцієнтів, що відповідають чотирьом рівням стиску: “мінімальний”, “середній”, “значний” та “максимальний”.

Внаслідок прямого трирівневого вейвлітного перетворенням за схемою “горизонтально-горизонтально-вертикальне-вертикальне” отримаємо 16 областей. Кожну з яких квантизуємо окремо. Адаптуючись до діапазону зміни коефіцієнтів у кожній області, розбиваємо його на 16 рівнів квантизації. При цьому коефіцієнти відбиваються на один із 16 можливих рівнів квантизації.

Коефіцієнти, що мають менше значення від вказаного порогу, занулюємо. Для кожної зони квантизації задано власне значення нульового порогу. Застосування нульового порогу значно збільшує кількість нульових коефіцієнтів. Тепер послідовності нулів можна закодувати, застосовуючи підрахунок кількості нулів і зберігаючи це значення замість усієї послідовності.

Для кодування використано ентропійний кодер Хаффмана [5, 6]. Метод Хаффмана має спрощену реалізацію і забезпечує високу швидкість. Кодування, що базується на алгоритмі Хаффмана, виконуємо за лінійний час (лінійність відносно довжини кодових слів). Ми застосували апроксимацію кодера Хаффмана. Тут використовуються наперед задані коди, розподіл ймовірностей яких наближений до розподілу ймовірностей у послідовностях, що підлягають кодуванню.

Вихід ентропійного кодера містить дані змінної розрядності від 3 до 18 біт. Для запису до зовнішньої пам'яті потрібно спакувати біти у 32-розрядні слова. Пакування виконуємо за допомогою п'ятиступеневого зсувача з накопиченням. Отримані коди зсуваємо на потрібну кількісну біт, при проходженні зсувача з метою наповнення 32-розрядного накопичувача. Після його наповнення відбувається запис у пам'ять.

Зараз подамо розроблену структуру вузла адаптивного кодування.

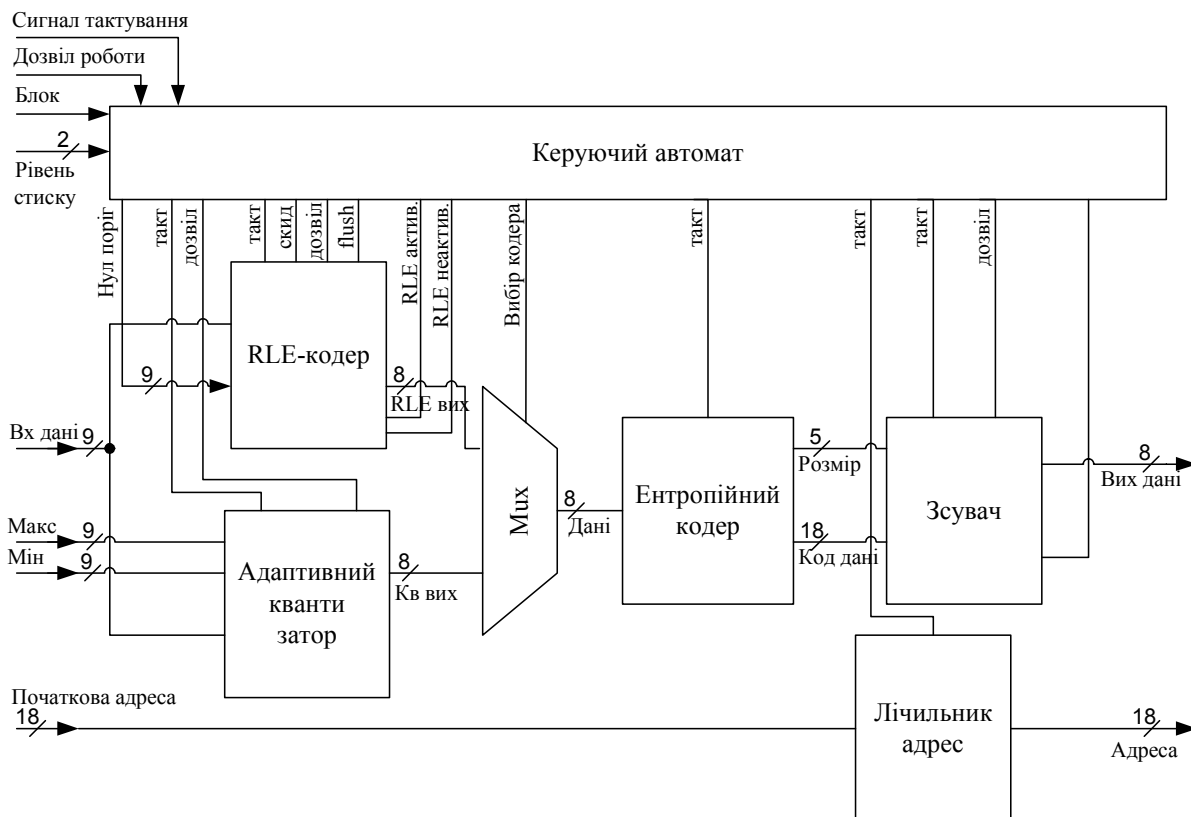


Рис. 3. Структура вузла адаптивної квантизації, RLE-кодера та ентропійного кодування Хаффмана

Програмна модель і експериментальні результати. Для якісної і кількісної оцінки запропонованого алгоритму стиску зображень створено його програмну модель в середовищі MATLAB 6.0. Створена програма, використовуючи вхідне зображення у форматі TIFF, виконує послідовність етапів алгоритму стиску зображення, подані попередніми розділами. Для визначення характеристик запропонованої системи стиску модель містить процедури зворотного перетворення (відновлення) зображення. Квантизація та занулення спричиняють втрати при стиску. Для їх кількісної оцінки результат порівнюємо з вихідним зображенням, обраховуємо величини середньоквадратичного відхилення (RMSE) та рівень шумів (PNSR). Це загальноприйняті оцінки для втратного стиску.

Подано оригінальне зображення “Lena” та результати, отримані за “мінімального”, “середнього” та “значного” ступенів стиску (рис. 4). Метою тестування є візуальна перевірка відтвореного після стиску зображення.



*Рис. 4. Результати тестування (зображення “Lena”)
а – оригінальне зображення; б – мінімальний ступінь стиску;
в – середній ступінь стиску; г – високий ступінь стиску*

В табл. 1–3 подано числові результати тестування втратного стиску трьох мультимедійних зображень порівняно із результатами аналога [7].

Таблиця 1

Результати тестування зображення “Lena”

Конфігурація	Ступінь стиску	PSNR (ДБ)	RMSE	Ступінь стиску	PSNR (ДБ)	RMSE
	запропонований пристрій			аналог		
Мінімальний стиск	11	33,437	5,4286	9,11	30,783	7,368
Середній стиск	19	31,8714	6,50	47,18	29,630	8,414
Значний стиск	27	30,0338	8,0325			
Максимальний стиск	33	28,4468	9,6427	69,58	28,040	10,104

Результати тестування зображення “Barbara”

Конфігурація	Ступінь стиску	PSNR (ДБ)	RMSE	Ступінь стиску	PSNR (ДБ)	RMSE
	запропонований пристрій			аналог		
Мінімальний стиск	7	31,0183	7,1717	8,82	24,891	14,520
Середній стиск	11	29,237	8,8042	32,01	24,412	15,343
Значний стиск	19	26,2874	12,3643			
Максимальний стиск	31	24,0644	15,9705	53,33	23,525	16,992

Результати тестування зображення “Goldhill”

Конфігурація	Ступінь стиску	PSNR (ДБ)	RMSE	Ступінь стиску	PSNR (ДБ)	RMSE
	запропонований пристрій			аналог		
Мінімальний стиск	8	32,3689	6,1389	8,7	29,733	8,314
Середній стиск	15	30,4961	7,6161	43,18	28,001	10,15
Значний стиск	24	28,52	9,5618			
Максимальний стиск	32	27,0049	11,384	72,09	26,355	12,267

Ясно, що запропонований підхід значно переважає аналог на низьких рівнях стиску, дає близькі (за якістю) результати на середніх рівнях, і дещо програє на високих.

Висновки. Запропонована система втратного стиску растрових монохромних зображень використовує попереднє спектральне вейвлетне перетворення. Реалізація ШВП базується на схемі ліфтингу, що спрощує апаратну реалізацію (присутні операції додавання та зсуву, на противагу класичній схемі, що використовує множення з накопиченням), дозволяє виконання перетворення на одному місці (що заощаджує пам'ять), та надає можливість цілочисельного перетворення.

Підсистема адаптивного стиску водночас використовує алгоритми кодування довжин нульових послідовностей та динамічної квантизації. Вибір алгоритму кодування визначає поріг занулення коефіцієнтів. Отримані коди стискаються ентропійним кодером Хафмена.

За рахунок використання спрощених алгоритмів стиску, порівняно з контекстним методом [8], або кодуванням дерев нулів [9] вдалося отримати систему мультимедійного стиску зображень, що орієнтується на реалізацію на ПЛІС із ступенем інтеграції до 100 тис. вентилів, що дозволяє її використання у вбудованих системах. Очікувана продуктивність системи – стиск відео в реальному режимі часу. Тестування показало, що запропонований підхід має меншу складність, проте подають конкурентні кількісні і числові характеристики, порівняно з відомим аналогом.

1. Дрёмин И. М. Иванов О. В. Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 5. – С. 105–120. 2. Calderbank A. R., Daubechies I., Sweldens W., Yeo B.-L. Wavelet transforms that map integers to integers. *Applied and Computational Harmonic Analysis*. – July 1998. – Vol. 5, No. 3. – P. 332–369. 3. Sweldens W. The lifting scheme: A New Philosophy in Biorthogonal Wavelet Constructions. *SPIE, Wavelet Applications in Signal and Image Processing III*. – 1995. – P. 68–79. 4. Calderbank R., Daubechies I., Sweldens W., Yeo B.-L. Lossless Image Compression using Integer to Integer Wavelet Transforms. *International Conference on Image Processing (ICIP)*. – 1997. – Vol. 1. 5. Knuth D. E. Dynamic Huffman Coding. *Journal of Algorithms*. – 1985. – № 6. – P. 163–180. 6. Vitter J. F. Design and Analysis of Huffman Codes. 1985 7. Mathen S. J. Wavelet Transform based adaptive image compression on FPGA. Master thesis, Regional Engineering College, Calicut, University of Calicut, Calicut, India, 1996. 8. Weinberger J., Seroussi G., Shapiro G. LOCO-I: A Low Complexity, Context-Based, Lossless Image Compression Algorithm, *IEEE Data Compression Conference, Snowbird, Utah, March-April 1996*. 9. Shapiro J. M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients // *IEEE Trans. Signal Processing*. – 1993. – Vol. 11. – P. 3115–3162.