

СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ БЛОЧНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ В ОБЛАСТИ ПАКЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

*Умняшкин С.В., д. ф.-м. н., профессор Национального исследовательского университета «МИЭТ»,
г. Москва, e-mail: vrinf@miee.ru;*

*Гизятуллин Р.Р., аспирант кафедры ВМ-1 Национального исследовательского университета «МИЭТ»,
г. Москва, e-mail: ruslan.gizyatullin@gmail.com*

Ключевые слова: сжатие изображений, блочная декомпозиция, вейвлет-преобразование, адаптивная декомпозиция, статистическая модель.

Предварительные сведения

Алгоритмы сжатия изображений, основанные на дискретном вейвлет-преобразовании (ДВП), показывают высокие характеристики при сжатии фотографических изображений. Однако пространственно-частотное разбиение спектра ДВП фиксировано и не может подстраиваться под локальные характеристики изображения. Данная проблема может быть решена за счёт адаптивного выбора базиса. Так, при использовании дискретного пакетного вейвлет-преобразования (ДПВП) высокочастотные саббэнды могут подвергаться дальнейшей декомпозиции с целью получения оптимального базиса для конкретного сигнала [1].

Немало работ посвящено улучшению характеристик сжатия на основе вейвлет-преобразования. Так, например, в работе [2] проведена адаптация вейвлет-разложения к различным частотным направлениям исходного сигнала. В работе [3] ставка сделана на выбор наиболее подходящего способа кодирования подмножеств коэффициентов вейвлет-спектра. В работе [4] предлагается использовать в качестве декоррелирующего бинарное вейвлет-преобразование. В основе наиболее широко используемых кодеков на основе ДВП пока лежит базис, при построении которого ВЧ и НЧ декомпозиции сначала подвергается всё изображение, а затем данная процедура может быть повторена над низкочастотной частью коэффициентов спектра, соответствующих коэффициентам при масштабирующих функциях. Такое разложение является «классическим». Число уровней декомпозиции называют также глубиной преобразования.

Коэффициенты вейвлет-спектра можно упорядочить в виде графа-дерева. При этом функции-потомки имеют носитель, не выходящий за область носителя функции-родителя. Коэффициенты, лежащие в самом низкочастотном LL саббэнде (LL4 на рис. 1), соответствуют масштабирующим функциям, представляют собой начало дерева и имеют трёх потомков – коэффициентов при функциях вейвлетов, имеющих ту же пространственную локализацию в области изображения, что и масштабирующая функция-родитель. Остальные коэффициенты

Предлагается схема сжатия изображений, основанная на адаптивной блочной декомпозиции в области вейвлет-преобразования, которая использует ограниченный класс базисов, подстраиваемых под локальные пространственные особенности изображения. Для сжатия вейвлет-спектра используется многомодельное арифметическое кодирование, где выбор статистической модели контекстно осуществляется по уже закодированным вейвлет-коэффициентам. Проведённые эксперименты показывают, что предложенный алгоритм показывает результаты по PSNR не хуже, чем JPEG2000. При этом на некоторых изображениях выигрыш в PSNR доходит до 0.3-0.5дБ.

в спектре соответствуют только вейвлет-функциям и имеют по 4 потомка, причем вейвлеты-потомки получаются из вейвлетов-родителей путём сжатия и сдвига. При этом функции-потомки имеют в области изображения носитель, не выходящий за область носителя функции-родителя. Сказанное иллюстрирует рис. 2, на котором изображена структура связей родителей и потомков. Проход от самого низкочастотного LL-саббэнда в сторону более высокочастотных саббэндов (направление по стрелкам на рис. 2) будет соответствовать повышению пространственного разрешения базисных функций в области изображения. При этом коэффициенты спектра, лежащие в трёх самых высокочастотных саббэндах HL_1 , HL_1 и LH_1 , потомков не имеют.

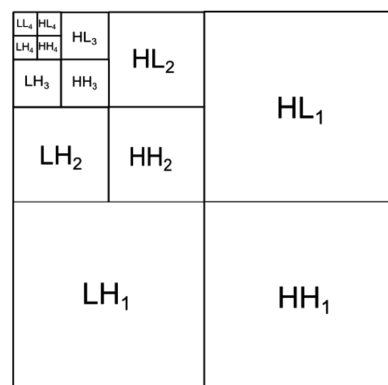


Рис. 1. Схема обозначений саббэндов при 4-х уровневой декомпозиции

Для изображений, имеющих сложную структуру, локализация распределения энергии по коэффициентам вейвлет-спектра может быть повышена в результате адаптации базиса под структуру изображения. Количество контролировать «качество» локализации энергии можно через энтропию сигнала относительно базиса вейвлет-пакетов [1]:

$$H = - \sum_k y_k^2 \ln(y_k^2), \quad (1)$$

где y_k – значения коэффициентов пакетного вейвлет-спектра. При этом предполагается, что используемый базис является ортогональным. Минимизация энтропии базиса (1) используется в предлагаемом кодеке, схема которого приведена на рис. 3.

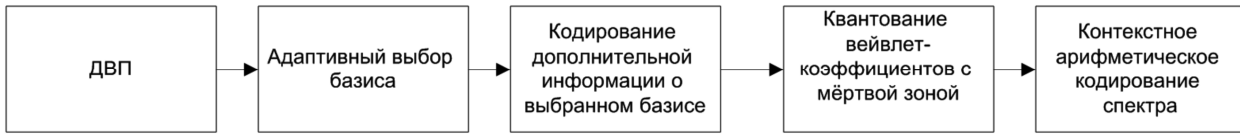


Рис. 3. Схема кодека

Описание алгоритма

Рассмотрим подробнее каждый этап работы предлагаемого кодека. На первом этапе выполняется четырёхуровневое вейвлет-преобразование. Выбор 4-х уровневое преобразования позволяет получить в самом низкочастотном LL₄ саббэнде почти некоррелированные коэффициенты. Для более корректного последующего сравнения предлагаемого кодека со стандартным JPEG2000 в качестве вейвлет-базиса выберем биортогональный вейвлет CDF 9/7, используемый в соответствующем методе сжатия изображений [7]. Возможно использование и других вейвлет-базисов; при этом может потребоваться некоторая корректировка эмпирически найденных числовых параметров предлагаемого алгоритма сжатия.

На следующем этапе производится адаптивное улучшение носителей базисных функций двух самых высокочастотных уровней ДВП {LH₁, HH₁, HL₁, LH₂, HH₂, HL₂} (см. рис. 1. Для этого в исходном изображении выделяются блоки размером $n \times n$, что соответствует разбиению коэффициентов вейвлет-спектра на множества, базисные функции которых локализованы в указанных областях оригинального изображения (см. рис. 4.)

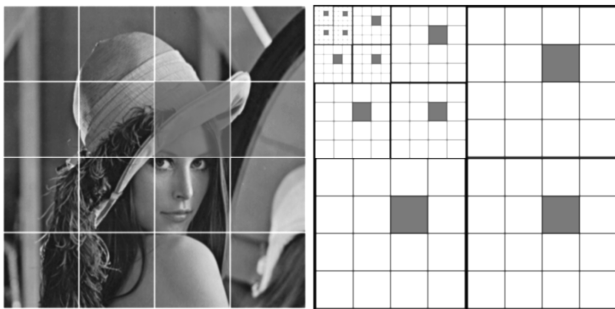


Рис. 4. Разбиение оригинального изображения и соответствие коэффициентов спектра выделенной области на изображении

Обозначим соответствующие каждому i -му блоку пикселей оригинального изображения блоки коэффициентов спектра двух самых высокочастотных уровней ДВП (первый или второй уровень, см. рис. 1): $S_{i,T2}$ и $S_{i,T1}$, где i – индекс блока в исходном изображении, $T1, T2$ – тип вейвлет-саббэндов: $T1 \in \{HL_1, HH_1, LH_1\}$, $T1 \in \{HL_1, HH_1, LH_1\}$. После выполнения процедуры поиска оптимального по критерию (1) базиса для оче-

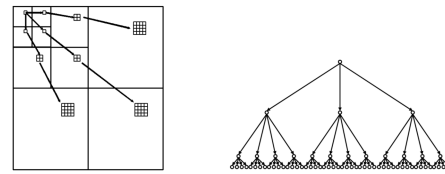


Рис. 2. Структура связей «родитель-потомки» между базисными функциями вейвлет-спектра на примеретрёхуровневого преобразования

редного блока оригинального изображения формируются три ключа, определяющие способ фильтрации блоков коэффициентов в первых двух уровнях ДВП спектра. Будем обозначать эти ключи { k_{HH} , k_{HL} , k_{LH} }. Фильтрация блоков при этом осуществляется парой фильтров декомпозиции по трём возможным шаблонам декомпозиции, определяемым рис. 5. Предлагаемые шаблоны позволяют полностью избежать «конфликта родительских и дочерних коэффициентов» (parentingconflict) [5] (этот конфликт возникает тогда, когда область носителя функции-потомка превышает и выходит за область носителя функции-родителя).

Возможность выбора базиса влечёт дополнительные битовые затраты на кодирование типа его структуры. Выбор только трёх шаблонов блочной декомпозиции сокращает объем дополнительных вычислений, необходимых для оценки эффективности (по критерию (1) анализируемого базиса, а также влечёт меньшие битовые затраты на кодирование типа выбранного итогового базиса. С целью уменьшения затрат на кодирование дополнительной информации о типе используемого базиса три ключа { k_{HH} , k_{HL} , k_{LH} }, которые оказываются достаточно сильно коррелированными, объединяются в один символ алфавита $K = k_{HH}k_{HL}k_{LH}$, который затем сжимается адаптивным арифметическим кодером. Соответствующий алфавит символов состоит из $3 \times 3 \times 3 = 27$ символов.

Таким образом, для каждого блока изображения в области вейвлет-преобразования предлагается использовать 27 типов базисов.

Для реализации алгоритма компрессии изображения необходимо определиться с размером фрагмента изображения, соответствующего разбиению в области вейвлет-спектра, схема которого приведена на рис. 4. На выбор размера блока обработки оказывают влияние два находящихся в противоречии фактора. С одной стороны, для учёта локальных особенностей изображения блоки должны быть как можно меньшего размера, чтобы иметь возможность более точной адаптации к локальным структурным особенностям изображения. С другой стороны, уменьшение размера блока приводит к росту дополнительных битовых затрат на кодирование базисов большего числа блоков изображения. Поэтому нужен некоторый компромисс между геометрическими размерами блоков и объёмом дополнительной информации. В наших экспериментах использовались квадратные блоки, соответствующие области 64×64 пикселя в области оригинального изображения.

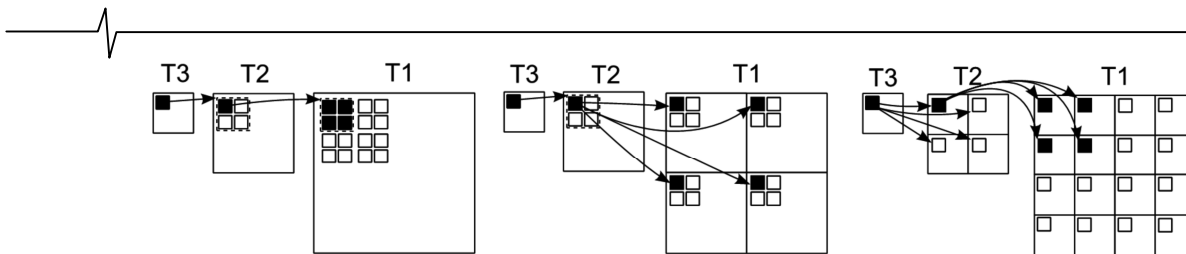


Рис. 5. Схема трёх шаблонов блочной декомпозиции и структура связей родитель-потомки внутри блоков, где блок, $T1 \in \{HL_1, NH_1, LH_1\}$, $T2 \in \{HL_2, NH_2, LH_2\}$, $T3 \in \{HL_3, NH_3, LH_3\}$

Следующим шагом рассматриваемого алгоритма является квантование. В качестве процедуры квантования была выбрана та же схема скалярного квантования с мёртвой зоной [6], которая применяется в JPEG2000 [7]. Безусловным плюсом такой схемы является простота ее вычислительной реализации (более эффективным, с точки зрения достигаемого уровня сжатия, может стать использование вычислительно более сложных способов квантования с учётом статистических зависимостей внутри саббэнда). В работе [6] было показано, что функция зависимости качества восстановленного изображения от ширины мёртвой зоны имеет экстремум при ширине зоны, равной 1.9 величины дискрета квантования q . Почти такой же результат показывает ширина мёртвой зоны, равная $2.0 \cdot q$. С точки зрения аппаратной и программной реализации использование целочисленного значения ширины мёртвой зоны более предпочтительно, тем более что проигрыш в качестве восстановленного изображения при этом минимален. Поэтому в предлагаемой схеме компрессии ширина мёртвой зоны была выбрана равной $2q$. После квантования для сжатия полученных коэффициентов вейвлет-спектра используется многомодельное адаптивное арифметическое кодирование. Хорошо известен тот факт, что НЧ-саббэнды имеют большую дисперсию значений вейвлет-коэффициентов, а ВЧ-саббэнды – меньшую дисперсию [8]. Для разделения статистик коэффициентов в разработанном кодеке используется несколько (четыре) статистических модели-гистограммы для кодирования коэффициентов-трансформант: одна модель – для сжатия самого низкочастотного LL_4 саббэнда и три других – для кодирования остальной части коэффициентов вейвлет-спектра. Все модели являются адаптивными, т.е. подстраивают используемую при кодировании гистограмму распределения вероятностей символов в соответствии с частотами их появления в обработанных данных. Модель с номером $M=0$ используется для кодирования коэффициентов при масштабировании функций, лежащих в саббэнде LL_4 . Кодированию при этом подвергается величина V , равная разности текущего обрабатываемого коэффициента X и взвешенной суммы его четырёх соседей

$$V = X - \left(A + C - \frac{B + D}{2} \right), \quad (2)$$

где A, B, C, D – соседние, уже закодированные коэффициенты, расположение которых показано на рис. 6.

Другие три статистических модели используются для кодирования саббэндов 1-12 (рис. 7). Порядок обработки саббэндов соответствует их нумерации на рис. 7. Сначала кодированию подвергаются коэффициенты, принад-

лежащие саббэнду LL_4 . Далее сжатию последовательно подвергаются саббэнды вейвлет-коэффициентов 1-12.

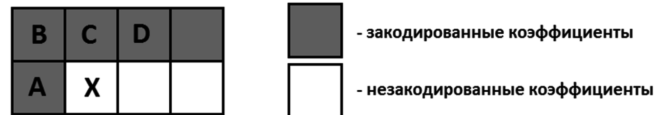


Рис. 6. Контекст для кодирования коэффициентов масштабировующих функций

При кодировании текущий саббэнд обрабатывается поблочно, блок вейвлет-коэффициентов соответствует блоку выбранной размерности 64×64 пикселя в изображении, см. рис. 4. Внутри блока в саббэнде коэффициенты обрабатываются построчно. Порядок обработки коэффициентов саббэнда, соответствующий построчному сканированию внутри блока и последовательному перебору блоков, отражен на рис. 7 на примере саббэнда HL_1 сплошной ломаной линией.

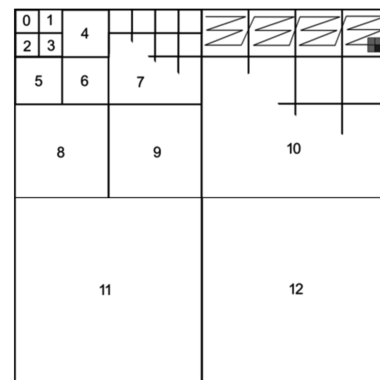


Рис. 7. Порядок обработки саббэндов при сжатии вейвлет-спектра

Для кодирования саббэндов 1-3 используется модель с номером $M=1$. При кодировании саббэндов 4-12 может быть использована любая из моделей $M=1,2,3$. Выбор модели $M \in \{1,2,3\}$ для кодирования проквантованного коэффициента W_j из саббэндов 4-12 осуществляется на основании прогнозной величины S_j , построенной по эмпирической формуле из работы [9]:

$$S_j = 0.36P_i + 1.06(|W_{j_x}| + |W_{j_y}| + 0.4|W_{j_d}|), \quad (3)$$

где W_{j_x} – уже закодированный горизонтальный сосед, W_{j_y} – вертикальный сосед, W_{j_d} – диагональный (на рис. 7 обрабатываемый коэффициент обозначен чёрным цветом, а три используемых в (3) соседних коэффициента – серым); P_i – прогнозные вклады родительского коэффициента W_i и его соседей, лежащих в том же саббэнде [9]:

$$P_i = \frac{1}{16} (4|W_i| + 2 \sum_{m \in M_1} |W_m| + \sum_{m \in M_2} |W_m|). \quad (4)$$

Расположение коэффициентов W_m показано на рис. 8. Отметим, что вне зависимости от способа используемой нумерации вейвлет-коэффициентов в саббэндах индекс i уже обработанного ранее родительско-го коэффициента W_i однозначно определяется по значению индекса j текущего обрабатываемого вейвлет-коэффициента W_j схемами связей «родитель-потомки», отраженной на рис. 5.

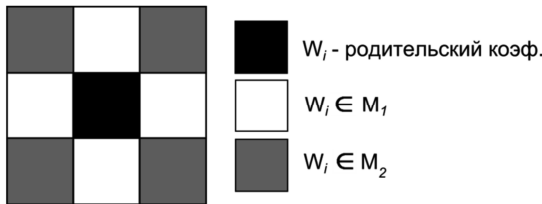


Рис. 8. Расположение коэффициентов для построения прогноза P_i

По значению прогнозной величины (3) номер статистической модели $M \in \{1,2,3\}$ для кодирования проквантованных вейвлет-коэффициентов $\{W_j\}$ из саббэндов 4-12 (рис. 7) определяется по следующему правилу:

$$M = \begin{cases} 1, & 0 \leq S_j < T_1; \\ 2, & T_1 \leq S_j < T_2; \\ 3, & T_2 \leq S_j. \end{cases}$$

Параметры T_1 и T_2 были определены эмпирически при тестировании алгоритма с целью минимизации битовых затрат при различных значениях параметра скалярного квантователя q на различных тестовых изображениях.

Результаты экспериментов

Для оценки характеристик предложенной схемы компрессии (рис. 3) использовались общепринятые показатели. Оценка качества восстановленного изображения проводилась при помощи пикового соотношения сигнал-шум (PSNR)

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{MSE} \text{ [дБ]}, \quad (5)$$

где средний квадрат ошибки (MSE, MeanSquareError) вычисляется по формуле

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i,j} (x_{i,j} - y_{i,j})^2. \quad (6)$$

В формуле (6): M и N - размеры изображения в пикселях (по горизонтали и вертикали), $x_{i,j}$ - значение яркости пикселя исходного изображения, $y_{i,j}$ - значение яркости пикселя восстановленного изображения. Изменяя значения дискреты квантования вейвлет-коэффициентов q , можно получить зависимость качества восстановленного изображения от битовых затрат на его кодирование. Битовые затраты выразим в битах на пиксель (bpp, bitsperpixel)

$$bpp = \frac{S}{MN}, \quad (7)$$

где S - общее число бит, необходимое на кодирование изображения.

В качестве кодека, с которым производилось сравнение, выступала реализация алгоритма JPEG2000 программного пакета ACDSee 14.0. Битовые затраты кодека JPEG2000 оценивались за вычетом размера заголовка jpeg-файла. Оценка битовых затрат предложенного кодека учитывала как сжатие собственно коэффициентов вейвлет-спектра, так и кодирование типа выбранного базиса блоков. Также было проведено сравнение с вариантом кодека с отключенным блоком выбора адаптивного базиса (классический базис, на рис. 10-12 соответствующая кривая помечена как *classic*). Тестирование проводилось на стандартных изображениях, таких как Lena, Barbara и Goldhill. На всех тестовых изображениях характеристики были схожи или выше у предложенного кодека. Так, на изображении Barbara выигрыш в PSNR достиг 0.3-0.5дБ. На рис. 9 показаны полученные варианты пакетных базисов для некоторых тестовых изображений. Рис. 10, 11 и 12 отображают полученные характеристики сжатия. Кривые, помеченные как *adaptive*, соответствуют предложенному пакетному кодеку.

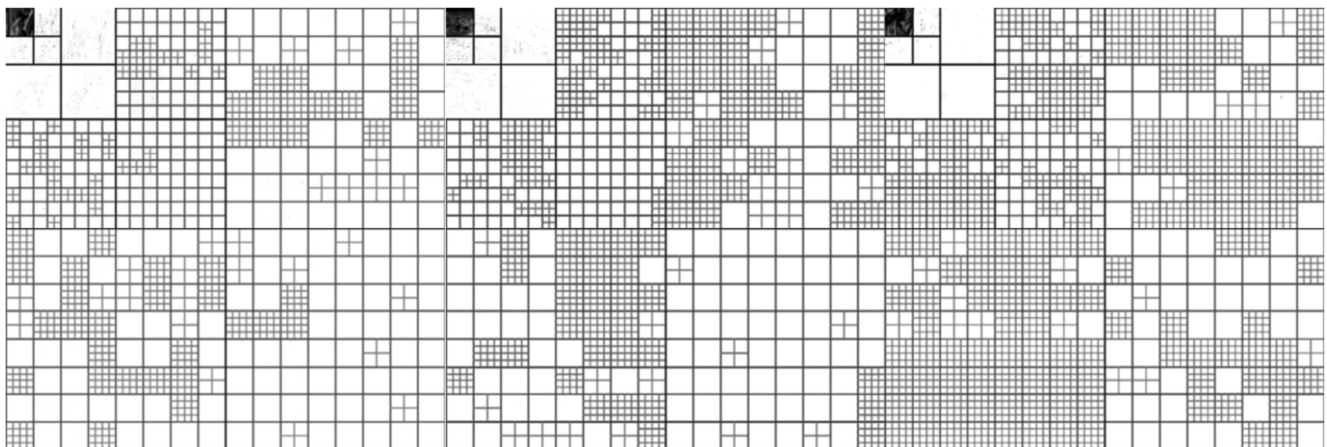


Рис. 9. Вид базиса, полученного адаптивным кодеком при сжатии изображений. Слева-направо: Lena, Goldhill, Barbara

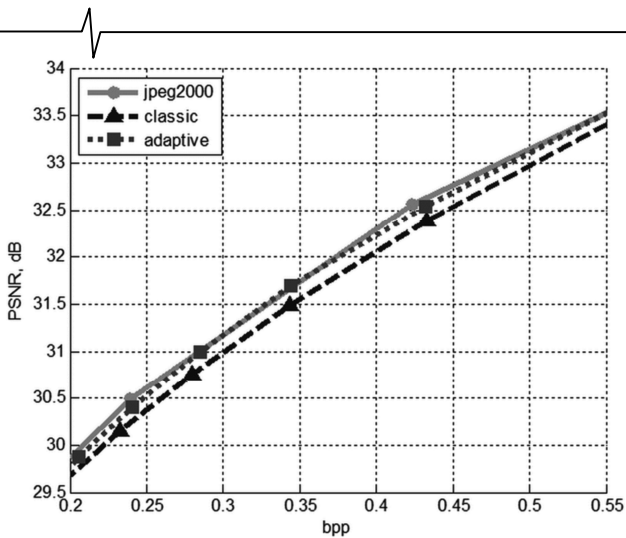


Рис. 10. График сравнения пикового соотношения сигнал-шум при сжатии изображения Goldhill

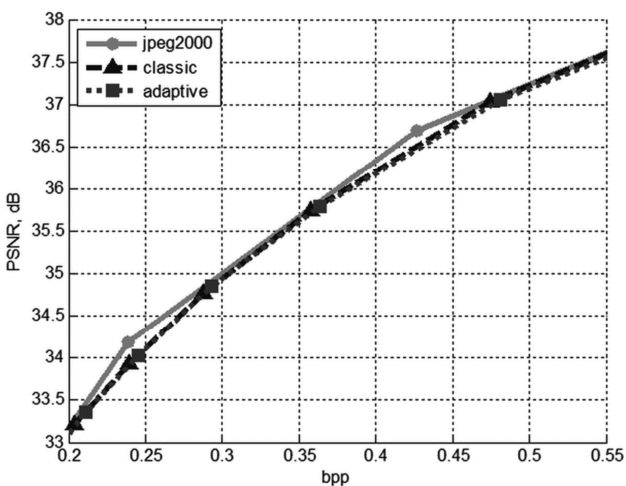


Рис. 11. График сравнения пикового соотношения сигнал-шум при сжатии изображения Lena

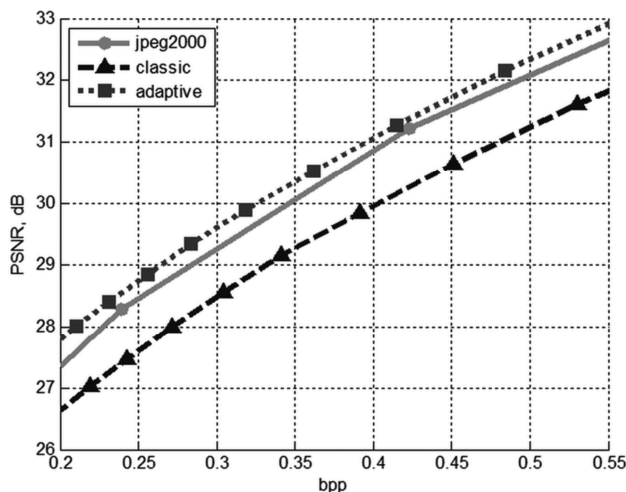


Рис. 12. График сравнения пикового соотношения сигнал-шум при сжатии изображения Barbara

Выводы и направления дальнейших исследований

Описанная схема компрессии показывает высокие результаты и не уступает, а на некоторых изображениях

показывает до 7% лучшее сжатие при одинаковом (по PSNR) качестве восстановленного изображения, по сравнению с кодеком JPEG2000 программного пакета ACDSsee 14.0. Предложенная схема компрессии является универсальной и нацелена на сжатие любых фотографических изображений. Даже в неоптимизированной тестовой программной реализации время сжатия изображения 512x512 пикселей на компьютере с двухядерным процессором IntelCore 2 Duo 2.0 ГГц занимает около 100 миллисекунд, что позволяет использовать данный кодек для сжатия в реальном времени. В частности, предложенный кодек потенциально может быть использован для сжатия видеопоследовательностей на этапе внутрикадрового кодирования опорных и разностных кадров.

В дальнейшем необходимо уточнить значения весовых коэффициентов прогноза (3), т.к. в работе [9] они были получены для классической схемы вейвлет-разложения и нуждаются в уточнении для предложенных вариантов базисов. Также планируется изучить возможность увеличения числа шаблонов блочной декомпозиции. Кроме того, планируется исследовать и адаптировать для предложенной схемы компрессии раздельное кодирование знака и модуля [10] коэффициентов вейвлет-спектра.

Представляет также интерес изучение возможностей использования банков многополосных и, в частности, трехполосных КИХ-фильтров [11] для сжатия изображений. Для этого, прежде всего, необходим пересмотр и обобщение концепции упорядочивания вейвлет-структур в «деревья» (см. рис. 2) с последующим ее расширением на пакетные преобразования.

Литература

1. Coifman R.R., Wickerhauser M.V. Entropy-based algorithms for best basis selection // IEEE Trans. Inform. Theory, Special Issue on Wavelet Transforms and Multires. Signal Anal. - Vol. 38. Mar. 1992, - pp. 713-718.
2. Guojin Liu, Xiaoping Zeng, Fengchun Tian, KadriChai-bou, ZanZheng. A novel direction-adaptive wavelet based image compression // International Journal of Electronics and Communications – Vol. 64, issue 6, 2010.
3. Su C.-K., Hsin H.-C., Lin S.-F. Wavelet tree classification and hybrid coding for image compression // IEEE Proc. Vision Image and Signal Processing – Vol. 152, issue 6, 2005, - p. 752.
4. Hong Pan, Li-Zuo, Xiao-Hui Yuan, Si-Yu Xia, Liang-Zheng Xia. Context-based embedded image compression using binary wavelet transform // Image and Vision Computing – Vol. 28, issue 6, 2010, –pp.991-1002.
5. Rajpoot M., Wilson G., Mayer G., Coifman R. Adaptive wavelet packet basis selection for zerotree Image coding // IEEE Trans. Image Proc. – Vol. 12. December 2003, – pp.1460-1471.
6. Strom J. Dead Zone Quantization in Wavelet Image Compression // Mini project in ECE 253a. 1993.
7. Taubman D., Marcellin M.W. JPEG2000 Image Compression Fundamentals, Standard and Practice. - Kluwer Academic Publishers, 2002.

8. Zou X., Perelman W.A. Lapped Orthogonal Transform Coding by Amplitude and Group Partitioning // Application of Digital Image Processing XXII, Proceedings of SPIE – Vol.3808. 1999. – pp.293-304.

9. Умняшкин С.В. Компрессия цифровых изображений на основе кодирования древовидных структур вейвлет-коэффициентов с прогнозированием статических моделей // Известия вузов. Электроника. – №5. – 2001. – с. 86-94.

10. Deever A., Hemami S. What's your sign? // Proc. Of Data Compression Conference, 2000. – pp. 273-282.

11. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Расчёт банков фильтров дискретного вейвлет-преобразования и анализ их характеристик // Цифровая обработка сигналов. – № 2. – 2006.

IMAGE COMPRESSION BASED ON BLOCK DECOMPOSITION IN THE WAVELET-PACKETS DOMAIN

Umnyashkin S.V., Gizyatullin R.R.

An algorithm of still image compression is proposed, which is based on wavelet packet transform. The compression algorithm uses a limited number of wavelet packet bases which are adjusted to the local spatial properties of the image processed. Experiments prove that the basis adjustment increases the peak signal-to-noise ratio (PSNR) up to 1 dB. The final performance of the proposed codec never shows the rate-distortion characteristics less than JPEG2000 standard has, an average improvement of 0,3-0,5 dB is observed.

ПРИГЛАШЕНИЕ

XI Международная научная конференция «ФИЗИКА И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ» ФРЭМЭ'2014

1-3 июля 2014 г.

ВЛАДИМИР – СУЗДАЛЬ, РОССИЯ

Уважаемые коллеги!



Министерство образования и науки РФ, Российское НТО РЭС им. А.С. Попова, Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, Институт космических исследований РАН, Департамент здравоохранения Администрации Владимирской области, Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Московский Государственный Технический Университет им. Баумана, Фраунгоферовский институт интегральных схем (г. Эрланген, Германия), Университет Фридриха-Александра (г. Эрланген, Германия), Университет прикладных наук г. Иена (Германия) проводят **1-3 июля 2014 года XI Международную научно-техническую конференцию «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ'2014)** с научной молодежной школой **«Интеллектуальные биометрические системы и технологии»**.

Председатель

Гуляев Ю. В., академик РАН,
директор Института радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова, РАН, г. Москва

Сопредседатель

Агаджанян Н. А., академик РАН,
профессор кафедры нормальной физиологии
Российского университета дружбы народов, г. Москва

Тематические разделы конференции:

- | | |
|---|---|
| * Методы и средства диагностики и лечения заболеваний | * Биотехнические и медицинские аппараты, системы, комплексы |
| * Биокibernетика и математическое моделирование | * Методы и средства диагностики природной среды |
| * Биомеханика, проблемы коррекции и лечения опорно-двигательного аппарата | * Экология и здоровье человека |
| * Новые информационные технологии в медицине и экологии | * Актуальные вопросы высшего образования в области биомедицинской и экологической инженерии |

Научная Молодежная Школа

«Интеллектуальные биометрические системы и технологии»

К участию в научной молодежной школе «Биометрические системы и технологии» приглашаются молодые научные сотрудники, аспиранты и студенты старших курсов научных и образовательных учреждений, работающие по ее тематике. Возраст участников не должен превышать 33 лет.