

УДК 53

В.В. Баранник, доктор технических наук, профессор,
А.В. Ширяев

МЕТОД КВАДРАТУРНОГО СЖАТИЯ ТРАНСФОРМАНТ ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ДВУМЕРНОМ ПОЛИАДИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рассматриваются вопросы вейвлет-преобразования, вейвлет-анализа, представления объема данных в двумерной полиадической системе, построения кодовых конструкций, устранения избыточности за счет сужения динамического диапазона, квадратурного сжатия для разного числа проходов, оценки показателей качества в виде среднеквадратического отклонения и отношения "сигнал – шум".

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, вейвлет-анализ, объем данных, полиадическая система, квадратурное сжатие.

Розглядаються питання вейвлет-перетворення, вейвлет-аналізу, представлення обсягу даних у двовимірній поліадичній системі, побудови кодових конструкцій, усунення надмірності за рахунок звуження динамічного діапазону, квадратурного стиснення для різного числа проходів, оцінки показників якості у вигляді середньоквадратичного відхилення і відношення "сигнал – шум".

Ключові слова: вейвлет-перетворення, вейвлет-аналіз, обсяг даних, поліадична система, квадратурне стиснення.

Questions of wavelet -transformation, wavelet -analysis, representation of data level in two-dimensional polyadic system, constructions of code designs, elimination of redundancy by narrowing of a dynamic range, quadrature compression for different number of passes, an estimation of indicators of quality as mean square deviations and signal to noise ratio are considered.

Keywords: wavelet -transformation, wavelet -analysis, data level, polyadic system, quadrature compression.

Процесс сжатия статичных изображений является важной задачей для средств аэрокосмической фотосъемки, средств слежения за наземными, воздушными и космическими объектами, а также для средств видеонаблюдения (банкоматы, охранные системы и т.д.). Важность заключается в достижении хорошей степени сжатия, для дальнейшей передачи по каналам связи при обеспечении допустимого уровня искажений. При этом для локализации областей искажений используется дискретное вейвлет-преобразование.

Дискретное вейвлет-преобразование в частотном плане раскладывает исходное изображение на высокочастотные $u_H(n)$ и низкочастотные $u_L(n)$ области, обрабатывая каждую строку и столбец исходного изображения с помощью частотных фильтров, значения коэффициентов которых (h_0, g_0) напрямую зависят от значений масштабирующей функции материнского вейвлета, формируя в

конечном счете на выходе четыре основные квадратуры: LL, LH, HL и HH (рис. 1), которые содержат информацию о значениях четырех различных частотных диапазонов.

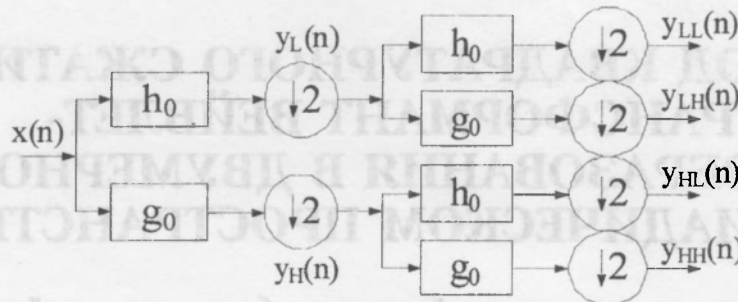


Рис. 1. Формирование квадратур вейвлет-преобразования

Число элементов в каждой области можно сократить вдвое, пользуясь теоремой Котельникова, поскольку частотная область, занимаемая элементами исходного изображения, каждый раз при прохождении через фильтр, уменьшается вдвое. Для устранения лишних элементов используется функция прореживания отсчетов [2].

Стандартные оконные преобразования позволяют проанализировать либо высокие частоты в коротком окне времени, либо низкочастотную компоненту в широком окне времени, но не оба колебания одновременно. Вейвлет-функции для различных диапазонов частот используют временные окна соответствующей длительности, которые обратно пропорциональны значению частот, и в результате растяжения или сжатия, а также смещения по времени, позволяют проводить анализ обеих компонент.

Получение набора коэффициентов масштабирующей функции вейвлет-преобразования

$$y_L(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot h(2n - k) \quad (1),$$

где $y_L(n)$ – значения выходных укрупненных масштабирующих коэффициентов аппроксимации вейвлет-функции;

$x(k)$ – исходные значения изображения;

$h(n)$ – коэффициенты укрупненной масштабирующей вейвлет-функции;

Получение набора уточняющих детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования

$$y_H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot g(2n - k) \quad (2),$$

где $y_H(n)$ – значения выходных детализирующих коэффициентов аппроксимации вейвлет-функции;

$g(n)$ – коэффициенты детализирующей вейвлет-функции.

Следовательно, проводя вейвлет фильтрацию по строкам и по столбцам получаем квадратуры вейвлет-преобразования.

Формирование коэффициентов LL-квадратуры вейвлет трансформанты ориентируется на значения, полученные в результате вычислений (2), которые проводились по строкам, и впоследствии применяя аналогичную процедуру для столбцов

$$y_{LL}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} y_L(n) \cdot h(2n - k) \quad (3).$$

Коэффициенты LH-квадратуры вейвлет трансформанты так же получаются при обработке строк (2), но для столбцов применяется уже выделение уточняющих детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования

$$y_{LH}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} y_L(n) \cdot g(2n - k) \quad (4).$$

Формирование коэффициентов HL-квадратуры вейвлет трансформанты ориентируется на значения, полученные в результате вычислений (3) по строкам, а для столбцов применяется выделение масштабирующих коэффициентов вейвлет-преобразования

$$y_{HL}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} y_H(n) \cdot h(2n - k) \quad (5).$$

Для получения коэффициентов HH-квадратуры вейвлет трансформанты проводится расчет значений детализирующих коэффициентов по строкам (3) и впоследствии для столбцов также применяется выделение уточняющих детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования

$$y_{HH}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} y_H(n) \cdot g(2n - k) \quad (6).$$

Для того, чтобы выделить обобщающие признаки, каждая квадратура представляется набором равных прямоугольных фрагментов, величины которых выбираются на основании того, что рядом находящиеся элементы связаны друг с другом в большей мере, и чем мельче по объему взяты фрагменты, тем эта зависимость все больше возрастает.

Для каждого фрагмента трансформанты определяется динамический диапазон по строкам и столбцам отдельно и заносится в отдельную матрицу, называемую системой оснований данного фрагмента. Системы оснований гарантируют, что значения коэффициентов в строке или столбце данного фрагмента трансформанты вейвлет-преобразования не выйдут за пределы найденных диапазонов. Это важно потому, что часть динамического диапазона не будет использована и за счет этого уменьшается объем передаваемых данных. Таким образом, для всех фрагментов трансформант Y_r формируются собственные системы оснований Ψ_r .

Системы оснований относятся к разряду служебных данных и фактически увеличивают совокупный объем передаваемой информации. С точки зрения формирования систем оснований рекомендуется реализовать как можно меньше фрагментов, что позволит уменьшить число систем оснований, однако с точки зрения анализа коррелированных значений коэффициентов вейвлет-преобразования размеры фрагментов должны быть как можно меньше, что обуславливает большое число фрагментов.

Поэтому для уменьшения объема служебных данных предлагается формировать систему оснований массива $(\tau + 1)$ с учетом значений оснований предыдущего τ -го массива. Для этого все компоненты массива $Y_{\tau+1}$ разделяются на два класса. Первый класс $\bar{Y}_{\tau+1}^{(1)}$ включает в себя компоненты, соответствующие системе оснований Ψ_{τ} предыдущего массива.

$$Y_{\tau+1}^{(1)} = \{y_{ij}^{(\tau+1)} \mid \psi_{ij}^{(\tau)} > y_{ij}^{(\tau+1)}\}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n} \quad (7),$$

$$Y_{\tau+1}^{(2)} = \{y_{ij}^{(\tau+1)} \mid \psi_{ij}^{(\tau)} \leq y_{ij}^{(\tau+1)}\}; i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n} \quad (8),$$

$$\Psi_{\tau+1} = \Psi_{\tau+1}^{(1)} \cup \Psi_{\tau+1}^{(2)}; \Psi_{\tau+1}^{(1)} = \{\psi_{ij}^{(\tau)}\}; \Psi_{\tau+1}^{(2)} = \{\psi_{ij}^{(\tau+1)}\} \quad (9),$$

где $\Psi_{\tau+1}^{(1)}$, $\Psi_{\tau+1}^{(2)}$ – множества оснований, соответствующих первому и второму классам компонент массива $Y_{\tau+1}$.

Следовательно, для уменьшения количества оснований организуется передача только системы оснований $\Psi_{\tau+1}^{(2)} = \{\psi_{ij}^{(\tau+1)}\}$, отличающейся от оснований предыдущего массива.

Полиадическое число в разностной системе задается следующим выражением

$$z_{ij}^{(\tau+1)} = y_{ij}^{(\tau+1)} - \psi_{ij}^{(\tau)}; z_{ij}^{(\tau+1)} < d_{ij}^{(\tau+1)} \quad (10),$$

где $z_{ij}^{(\tau+1)}$ – (i, j) -й элемент $(\tau + 1)$ -го дифференциального полиадического числа;

$d_{ij}^{(\tau+1)}$ – разностное основание (i, j) -го элемента $(\tau + 1)$ -го второго множества компонент

$$d_{ij}^{(\tau+1)} = (\psi_{ij}^{(\tau+1)} - \psi_{ij}^{(\tau)}) \quad (11).$$

В соответствии с соотношениями (10) и (11) код-номер $R_{\tau+1}$ полиадического числа вычисляется по формуле

$$R_{\tau+1} = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{n'} z_{ij}^{(\tau+1)} \rho_{ij}^{(\tau+1)} \quad (12),$$

где $\rho_{ij}^{(\tau+1)}$ – весовой коэффициент (i, j) -го элемента $(\tau + 1)$ -го дифференциального полиадического числа.

$$\rho_{ij}^{(\tau, \gamma)} = \prod_{\phi=m}^{j-1} (\psi_{\phi j}^{(\tau)} - \psi_{\phi j}^{(\tau-1)}) \quad (13).$$

На основе вычисленного значения величины $\rho_{ij}^{(\tau, \gamma)}$ можно провести оценку на принадлежность компоненты $y_{ij}^{(\tau)}$ текущему дифференциальному полиадическому числу. Для этого проверяется неравенство

$$\rho_{ij}^{(\tau, \gamma)} < 2^M - 1 \quad (14).$$

Таким образом, для каждой квадратуры находят значения кода-номера. Обобщенная схема фрагмента алгоритма процесса сжатия представлена на рис. 2. В процессе формирования кода-номера происходит циклический обход значений по квадратурам и отдельным элементам.

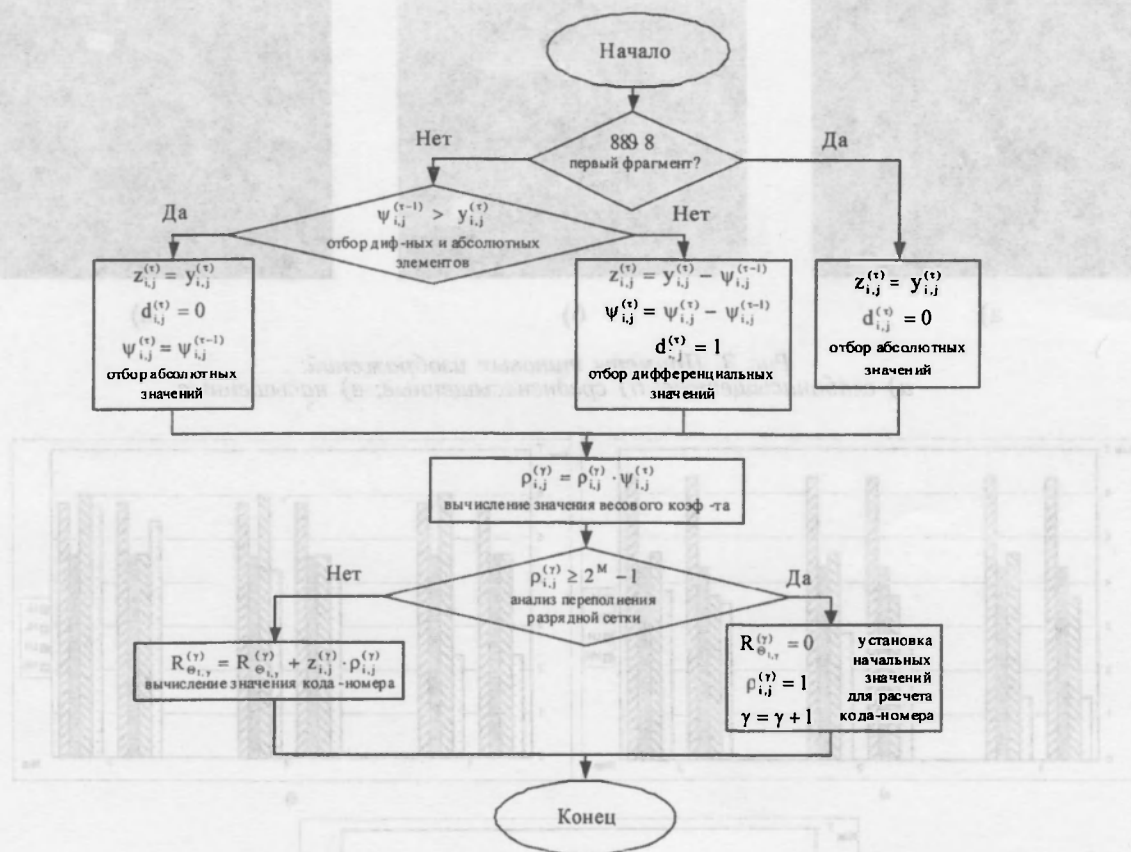


Рис. 2. Обобщенное представление фрагмента алгоритма процесса сжатия

В результате обхода проводится деление значений вейвлет-трансформант на дифференциальные и абсолютные, в результате чего определяются состояния ключевых элементов. Для каждого элемента двумерного полиадического пространства вычисляется значение весового коэффициента, максимальная размерность которого определяется максимально допустимой разрядностью вычислительной системы. Чем выше разрядность, тем выше степень сжатия можно обеспечить.

Как уже говорилось ранее, существует несколько классов изображений, которые подразделяются по степени насыщенности мелкими, детализирующими

объектами и чем выше степень насыщенности, тем сложнее обеспечить сжатие при допустимом уровне искажений. Анализ типовых изображений (рис. 3) по коэффициенту сжатия для отдельных квадратур от уровня разложения представлен на рис. 4.

В зависимости от числа проходов (уровней разложения) вейвлет-преобразования, которое применяется к низкочастотной составляющей, можно получить увеличение коэффициента сжатия для всего изображения, поскольку за счет увеличения числа проходов низкочастотная составляющая также раскладывается на базисные вейвлет-функции, среди которых аналогичным образом находятся закономерности, однако уже для меньшего объема данных. Таким образом, из рис. 4 видно, что влияние числа проходов на коэффициент сжатия будет происходить в зоне LL-квадратуры.

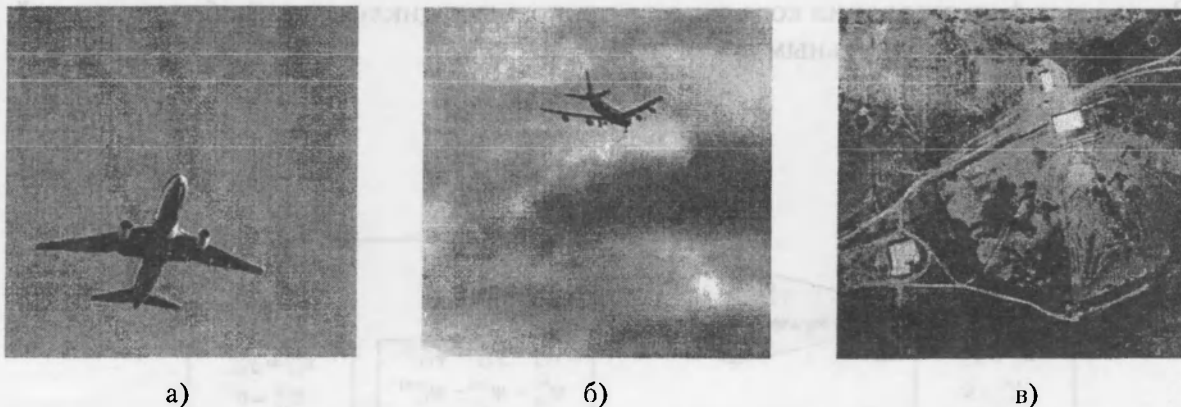


Рис. 3. Примеры типовых изображений:
а) слабонасыщенные; б) средненасыщенные; в) насыщенные

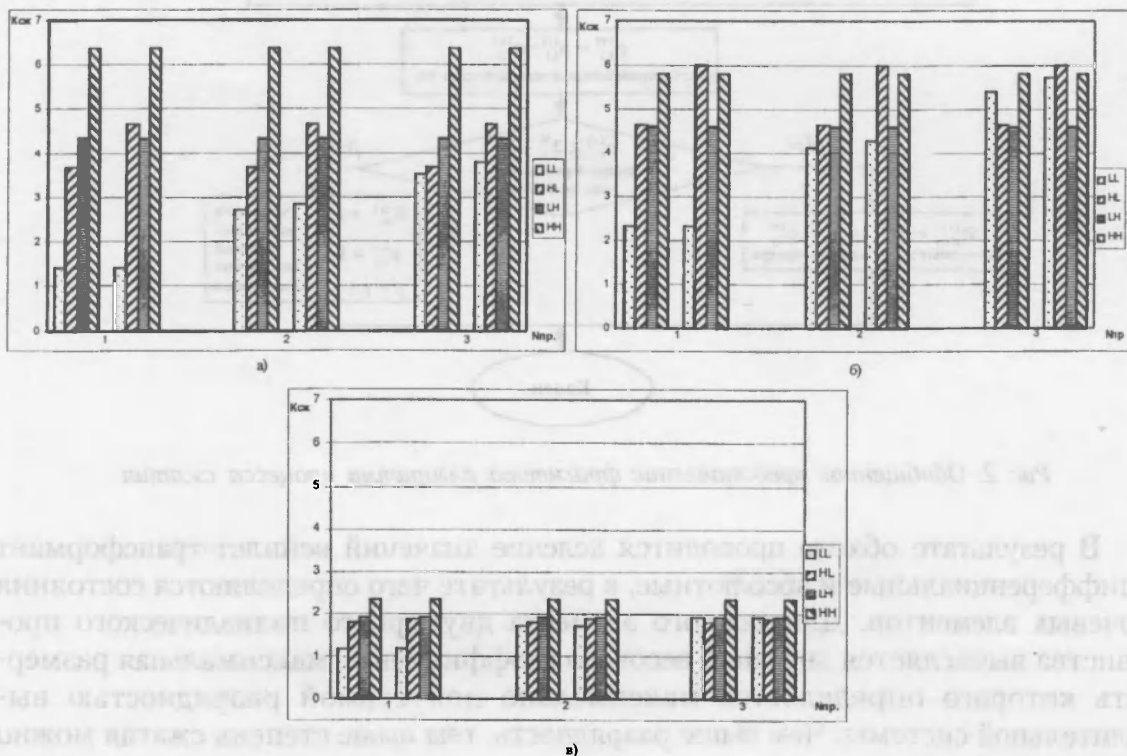


Рис. 4. Характеристики зависимостей степени сжатия квадратур для типовых изображений от числа проходов вейвлет-преобразования
а) слабонасыщенных; б) средненасыщенных; в) насыщенных мелкими деталями

Также на рис. 4 отобразена особенность обработки квадратур LH и HL. При однотипной обработке, при условии, что эти квадратуры не связаны друг с другом, расчетное значение коэффициента сжатия для HL-квадратуры меньше, чем для случая совместной обработки их данных.

Увеличение числа проходов вейвлет-преобразования за счет проводимых округлений вычислений приводит к появлению ошибки восстановления значений исходных пикселей изображений. Оценка данной ошибки производится при помощи среднеквадратичного отклонения значений пикселей (L2 мера, или root mean square – RMS) (15). На рис. 5 показаны зависимости значений среднеквадратичного отклонения для приведенных типовых изображений в зависимости от числа проходов вейвлет-преобразования.

$$d_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} (x_{ij} - y_{ij})^2}{n \cdot m}} \quad (15).$$

Мера, которую сейчас используют на практике, называется мерой отношения сигнала к шуму (peak-to-peak signal-to-noise ratio – PSNR), которая оценивается как (16) и рис. 6 отражает характер закономерностей значений PSNR для типовых изображений в зависимости от числа проходов вейвлет-преобразования.

$$d_{\text{PSNR}} = 10 \cdot \log \left(\frac{255^2 \cdot n \cdot m}{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} (x_{ij} - y_{ij})^2} \right) \quad (16).$$

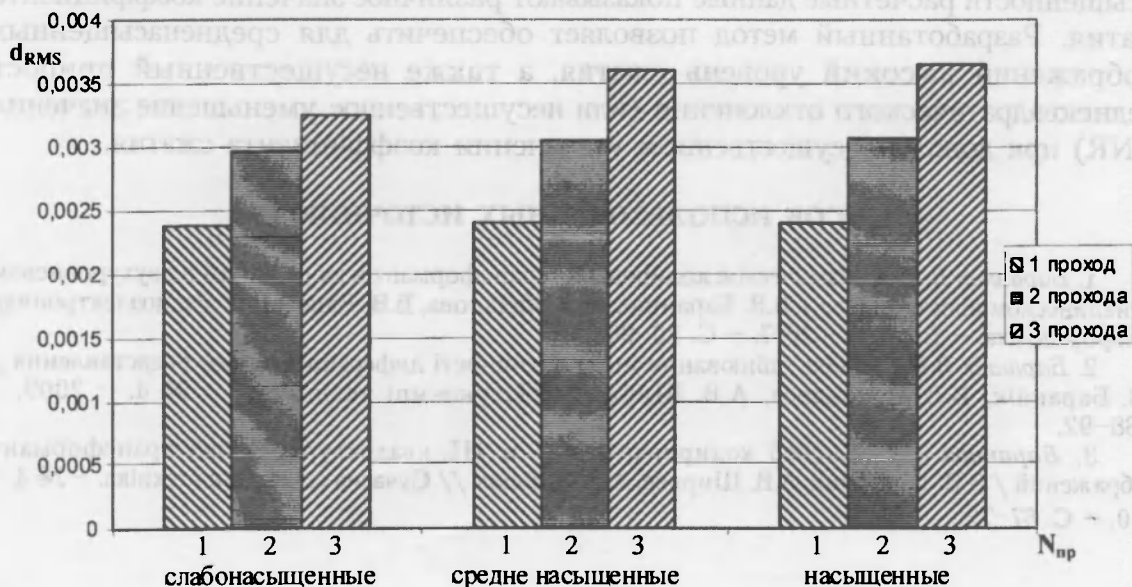


Рис. 5. Зависимости значений среднеквадратичного отклонения для типовых изображений в зависимости от числа проходов вейвлет-преобразования

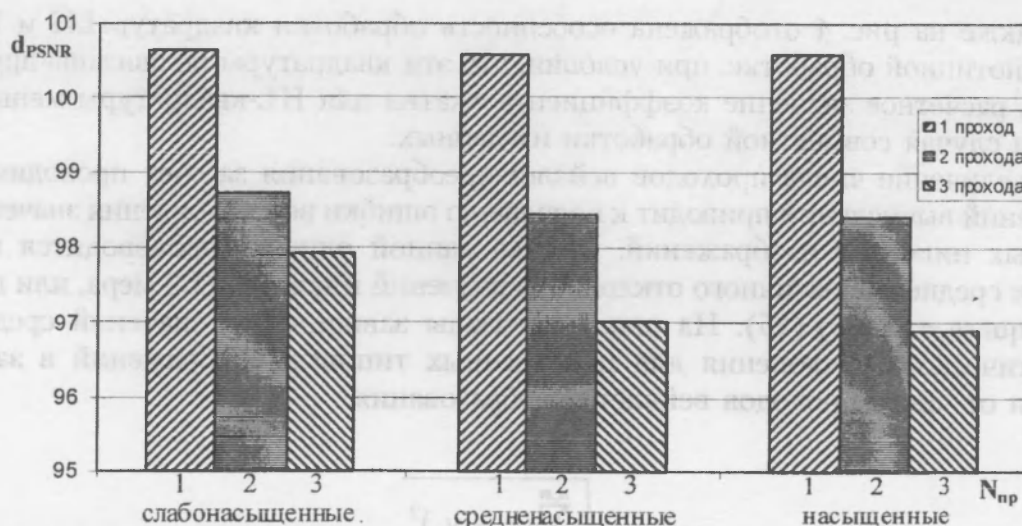


Рис. 6. Зависимости значений PSNR для типовых изображений в зависимости от числа проходов вейвлет-преобразования

В зависимости от класса насыщенности изображений мелкими объектами коэффициент сжатия варьируется от 1,7 до 4 раз. Кроме этого, квадратурное сжатие может быть применено в несколько проходов к значимой по динамическому диапазону LL-квadrатуре, увеличивая при этом коэффициент сжатия на 13–44 % в зависимости от числа проходов (в данном случае не более 3-х) и от класса изображения. При этом оценки показателей качества в виде среднеквадратического отклонения и отношения “сигнал–шум” составляют не более 5 % при различном числе проходов. Разработанный механизм использования зако-номерностей между LH- и HL-квadrатурами позволил получить выигрыш от 1,5 % до 57,1 % для разных классов изображений и числа проходов.

Из полученных данных следует, что для изображений разных классов насыщенности расчетные данные показывают различное значение коэффициента сжатия. Разработанный метод позволяет обеспечить для средненасыщенных изображений высокий уровень сжатия, а также несущественный прирост среднеквадратического отклонения (или несущественное уменьшение значения PSNR) при довольно существенном увеличении коэффициента сжатия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранник В.В. Динамическое кодирование трансформант изображений в двухуровневом полиадическом пространстве / В.В. Баранник, И.В. Хаханова, В.В. Елисеев // Радиоэлектроника и информатика. – Вып. 2. – 2007. – С. 90–96.
2. Баранник В.В. Модель оцінювання інформативності диференціального представлення / В.В. Баранник, В.В. Шинкарев, А.В. Ширяев // Наукоємні технології. – № 4. – 2009. – С. 88–92.
3. Баранник В.В. Способ кодирования LH и HL-квadrатур вейвлет-трансформант изображений / В.В. Баранник, А.В. Ширяев, А.В. Пивнюк // Сучасна спеціальна техніка. – № 4 – 2010. – С. 67–72.

Отримано 22.06.2011