

based on HVS, CD-ROM Proceedings of the Second International Workshop on Video Processing and Quality Metrics, Scottsdale, USA, 2006. 4 p. **11.** *Ponomarenko N., Silvestri F., Egiazarian K., Astola J., Carli M., Lukin V.* On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions, CD-ROM Proceedings of the Third International Workshop on Video Processing and Quality Metrics, Scottsdale, USA, 2007. 4 p. **12.** *Wallace G.* The JPEG Still Picture Compression Standard, Comm. of the ACM. 1991. Vol. 34, No.4. **13.** *D. Taubman, M. Marcellin,* JPEG 2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice. Boston: Kluwer, 2002. **14.** *Zeng Wenjun, Daly S., Lei Shawmin,* An overview of the visual optimization tollos in JPEG2000, Signal Processing: Image Communication. 2002. Vol. 17. P. 85-104. **15.** *Egiazarian K., Astola J., Helsingius M., Kuosmanen P.* Adaptive denoising and lossy compression of images in transform domain, Journal of Electronic Imaging. 1999. Vol. 8. P. 233-245. **16.** *N. Nill,* A Visual Model Weighted Cosine Transform for Image Compression and Quality Assessment, IEEE Transactions on Communications COM-33. 1985. P. 551-557.

Поступила в редколлегию 28.03.2007

УДК621.391

ДИНАМИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАНТ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ДВУХУРОВНЕВОМ ПОЛИАДИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

БАРАННИК В.В., ХАХАНОВА И.В., ЕЛИСЕЕВ В.В.

Предлагается метод сжатия изображений на основе компактного представления компонент трансформант дискретных вейвлет-преобразований (dwt). Формирование кодового представления трансформант проводится в динамической полиадической системе. В этом случае дополнительное увеличение степени сжатия достигается в результате сокращения объемов служебных данных.

1. Введение

Последнее десятилетие характеризуется резким повышением видеоинформационных потребностей в различных отраслях деятельности человека. При этом темпы роста объемов изображений на несколько порядков превышают возможности вычислительных и телекоммуникационных технологий. Поэтому важным научно-прикладным направлением является совершенствование цифровой обработки изображений, в том числе их компактного представления [1 – 4].

Отсюда *цель исследований* состоит в уменьшении аппаратно-вычислительных затрат на цифровую обработку изображений при обеспечении передачи данных в информационно-телекоммуникационных системах в реальном времени.

Одним из недостатков метода сжатия, изложенного в работе [2], являются большие объемы двоичных разрядов $W_{сл}$, затрачиваемых на представление служебных данных (значений динамических диапазонов компонент трансформант dwt). Для метода [2] коэффициент сжатия $k_{сж}$ трансформант dwt оценивается

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Разказовский В.Б.

Лукин Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф., зам. зав. каф. ППОС НАКУ им. Жуковского „ХАИ”. Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. (057)7074841, E-Mail: lukin@ai.kharkov.com, факс (057)7441186.

Пономаренко Николай Николаевич, канд. техн. наук, докторант каф. ППОС НАКУ им. Жуковского „ХАИ”. Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова, 17, тел. (057)7074841, E-Mail: lukin@ai.kharkov.com, факс (057)7441186.

Кривенко Сергей Станиславович, инженер электросвязи 2 кат. ОАО «Укртелеком», соискатель каф. ППОС НАКУ им. Жуковского „ХАИ”. Научные интересы: цифровая обработка сигналов и изображений. Адрес: Украина, 61061, Харьков, ул. Краснооктябрьская, 14, тел. (057)7121641, E-Mail: krivenkos@inbox.ru

с учетом цифровых объемов на представление кодограмм W_k и служебных данных $W_{сл}$:

$$k_{сж} = \frac{W_{тр}}{W_k + W_{сл}}, \quad (1)$$

где $W_{тр}$ – объем цифрового представления трансформанты dwt:

$$W_{тр} = m \times n \times b; \quad (2)$$

m , n – соответственно количество строк и столбцов в трансформанте; b – количество разрядов на представление компоненты трансформанты;

$$W_{сл} = (m + n) \times b. \quad (3)$$

Из анализа выражения (1) видно, что с ростом объема $W_{сл}$ происходит уменьшение коэффициента сжатия $k_{сж}$.

Одним из способов уменьшения влияния объема $W_{сл}$ на величину $k_{сж}$ является увеличение размеров трансформанты, для компонент которой будет соответствовать единая система полиадических оснований. Действительно, разделив числитель и знаменатель соотношения (1), получим

$$k_{сж} = \frac{b}{W_k / (m \times n) + (m + n) b / (m \times n)}. \quad (4)$$

Как видно из анализа знаменателя выражения (4), при увеличении $(m \times n)$ затраты количества разрядов служебной части кодограммы, приходящиеся на одну компоненту трансформанты, уменьшаются. С одной стороны, это приводит к увеличению коэффициента сжатия. Данная зависимость демонстрируется в таблице, для $m=128$.

n	4	8	128
(m+n)/(m×n)	0,257	0,132	0,015

С другой – это данное направление связано с такими недостатками:

- увеличение цифрового объема промежуточных данных (поскольку требуется хранить трансформанты больших размеров);
- выполнение двух проходов для формирования кодограммы (первый проход выполняется для формирования единой системы оснований, второй – для вычисления кода-номера);
- снижение коэффициента сжатия вследствие повышения степени неоднородности обрабатываемой трансформанты.

Данные особенности приводят к необходимости увеличивать объем запоминающего устройства и повышать время на обработку.

Следовательно, *научная задача* заключается в разработке метода представления трансформанты dwt , обеспечивающего выполнение следующих условий:

- повышение степени сжатия $k_{сж} \uparrow$ за счет уменьшения объема $W_{сл} \downarrow$;
- уменьшение объема промежуточных данных вычислительного процесса;
- построение кодограммы трансформанты за один проход.

2. Построение подхода к сжатию изображений

В целях уменьшения объема промежуточного запоминающего устройства предлагается выбирать количество столбцов в трансформанте Y , равным $n=4 \dots 8$ (трансформанта строится по столбцам).

В результате получаем двумерный массив Y_τ размером $(128 \times n)$ элементов:

$$Y_\tau = \{y_{ij}^{(\tau)}\}, i=\overline{1, 128}; j=\overline{1, n}; Y = \bigcup_{\tau=1}^v Y_\tau,$$

где $y_{ij}^{(\tau)}$ – (i, j) -я компонента τ -го массива компонент трансформанты; τ – индекс массива, указывающий на его положение в трансформанте (номер очередности обработки). Для начального массива $\tau=1$; v – количество массивов, на которые разбивается трансформанта Y .

В соответствии с особенностями полиадического кодирования трансформант для массива Y_τ формируется система оснований Ψ_τ :

$$\Psi_\tau = \{\psi_{ij}^{(\tau)}\}, i=\overline{1, 128}; j=\overline{1, n}; \psi_{ij}^{(\tau)} > y_{ij}^{(\tau)}, \quad (5)$$

где $\psi_{ij}^{(\tau)}$ – основание (i, j) -го элемента τ -го массива компонент трансформанты.

Для уменьшения объема служебных данных предлагается формировать систему оснований массива $(\tau+1)$ с учетом системы оснований предыдущего τ -го массива.

Для этого все компоненты массива $Y_{\tau+1}$ разделяются на два класса. Первый класс $Y_{\tau+1}^{(1)}$ включает в себя компоненты, соответствующие системе оснований Ψ_τ предыдущего массива. В этом случае выполняется условие (5):

$$Y_{\tau+1}^{(1)} = \{y_{ij}^{(\tau+1)} \mid \psi_{ij}^{(\tau)} > y_{ij}^{(\tau+1)}\}; i=\overline{1, 128}; j=\overline{1, n}, \quad (6)$$

где $y_{ij}^{(\tau+1)}$ – (i, j) -я компонента $(\tau+1)$ -го массива компонент трансформанты.

Для компонент, входящих в множество $Y_{\tau+1}^{(2)}$ второго класса, наоборот, условие (5) невыполняется, т.е.:

$$Y_{\tau+1}^{(2)} = \{y_{ij}^{(\tau+1)} \mid \psi_{ij}^{(\tau)} \leq y_{ij}^{(\tau+1)}\}; i=\overline{1, 128}; j=\overline{1, n}. \quad (7)$$

Тогда требуется для компонент множества $Y_{\tau+1}^{(2)}$ формировать собственную систему оснований, для которой будет выполняться неравенство

$$\psi_{ij}^{(\tau+1)} > y_{ij}^{(\tau+1)}, \quad (8)$$

где $\psi_{ij}^{(\tau+1)}$ – основание (i, j) -го элемента $(\tau+1)$ -го массива компонент трансформанты.

Значит, для $(\tau+1)$ -го массива система оснований $\Psi_{\tau+1}$ строится по двухуровневому принципу:

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

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

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

Возможный вариант – разделение компонент трансформанты на два класса иллюстрируется на рис. 1.

Следовательно, для уменьшения количества оснований организуется передача только системы оснований

$\Psi_{\tau+1}^{(2)} = \{\psi_{ij}^{(\tau+1)}\}$, отличающейся от оснований предыдущего массива.

При этом для последовательности массивов трансформанты может выполняться условие

$$\psi_{ij}^{(1)} < \psi_{ij}^{(2)} < \dots < \psi_{ij}^{(v)}.$$

Исходя из того, что для каждого последующего массива формируется двухуровневая система оснований

по принципу, заданному выражениями (5) – (9), для компонент второго класса будет выполняться неравенство

$$\psi_{ij}^{(\tau)} \leq y_{ij}^{(\tau+1)} < \psi_{ij}^{(\tau+1)}. \quad (10)$$

Поэтому для уменьшения объема W_k предлагается использовать дифференциальное полиадическое представление компонент второго множества. Суть такой обработки состоит в представлении компонент второго множества в виде полиадического числа, соответствующего разностной системе оснований. Накладывается ограничение на динамический диапазон компонент не только сверху $\psi_{ij}^{(\tau+1)}$, но и снизу $\psi_{ij}^{(\tau)}$. Это позволяет переходить к обработке компонент, имеющих меньшие значения. Полиадическое число в разностной системе задается следующими выражениями

$$z_{ij}^{(\tau+1)} = y_{ij}^{(\tau+1)} - \psi_{ij}^{(\tau)}; \quad z_{ij}^{(\tau+1)} < d_{ij}^{(\tau+1)}, \quad (11)$$

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;

$$d_{ij}^{(\tau+1)} = (\psi_{ij}^{(\tau+1)} - \psi_{ij}^{(\tau)}). \quad (12)$$

В соответствии с соотношениями (11) и (12) код-номер $R_{\tau+1}$ дифференциального полиадического числа вычисляется по формуле

$$R_{\tau+1} = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{n'} z_{ij}^{(\tau+1)} \rho_{ij}^{(\tau+1)}, \quad (13)$$

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

Если обход компонент массива осуществляется в направлении столбцов, то значение весового коэффициента находится по формуле

$$\rho_{ij}^{(\tau+1)} = \prod_{\xi=i+1}^{m'} d_{\xi j}^{(\tau+1)} \prod_{\xi=i+1}^{m'} \prod_{u=1}^{n'} d_{\xi u}^{(\tau+1)}. \quad (14)$$

Подставив формулы (11), (12) и (14) в соотношение (12), получим

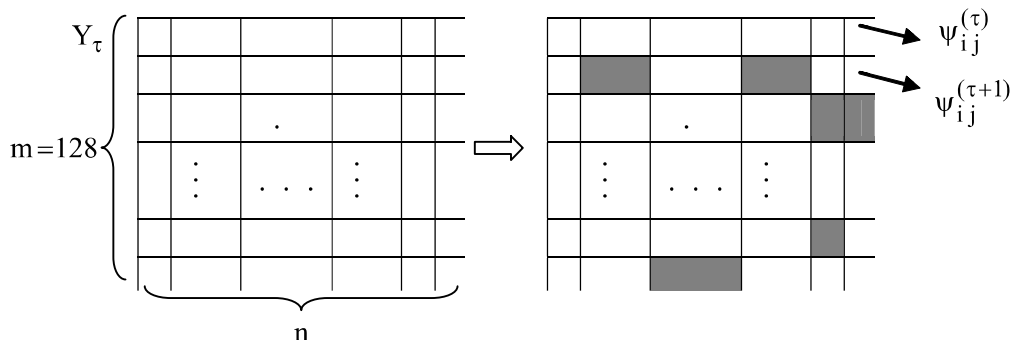


Рис. 1. Схема разделения компонент трансформант

$$R_{\tau+1} = \sum_{i=1}^{m'} \sum_{j=1}^{n'} (y_{ij}^{(\tau+1)} - \psi_{ij}^{(\tau)}) \prod_{\xi=i+1}^{m'} (\psi_{\xi j}^{(\tau+1)} - \psi_{\xi j}^{(\tau)}) \times \prod_{\xi=i+1}^{m'} \prod_{u=1}^{n'} (\psi_{\xi u}^{(\tau+1)} - \psi_{\xi u}^{(\tau)}). \quad (15)$$

Значение кода-номера для дифференциального полиадического числа уменьшается по сравнению со значением кода-номера абсолютного полиадического числа.

Для реализации направлений решения сформулированной проблемы необходимо разработать метод динамического представления трансформант в смешанной полиадической системе.

3. Метод динамического сжатия трансформант в двухуровневой системе оснований

Чтобы метод сжатия содержал все направления, обеспечивающие решение поставленной проблемы, требуется организовать выполнение следующих этапов.

Этап 1. Обработка первого массива Y_1 компонент трансформанты, $\tau = 1$:

1) формируется система оснований Ψ_1 . Определяются значения динамических диапазонов $\lambda_i^{(1)}$ в строках массива Y_1 :

$$\lambda_i^{(1)} = \max_{1 \leq j \leq n} \{y_{ij}^{(1)}\} + 1, \quad i = \overline{1, m}. \quad (16)$$

Вычисление значений динамических диапазонов $\chi_j^{(1)}$ в столбцах массива Y_1 проводится по формуле

$$\chi_j^{(1)} = \max_{1 \leq i \leq m} \{y_{ij}^{(1)}\} + 1, \quad j = \overline{1, n}. \quad (17)$$

Тогда значения оснований $\psi_{ij}^{(1)}$ элементов $y_{ij}^{(1)}$ будут равны

$$\psi_{ij}^{(1)} = \min(\lambda_i^{(1)}, \chi_j^{(1)}), \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}. \quad (18)$$

В отличие от систем оснований последующих массивов для начального массива Y_1 будет соответствовать одноуровневая система оснований

$$\Psi_1 = \Psi_1^{(1)} = \{\psi_{ij}^{(1)}\}, \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n};$$

2) строятся кодограммы для первого массива трансформанты. Каждая кодограмма содержит информацию о значении кода-номера $N^{(\tau, \gamma)}$, который для $\tau=1$ равен:

$$N^{(\tau, \gamma)} = \sum_{\theta=1}^{\Theta_{1, \gamma}} y_{\theta}^{(1, \gamma)} h_{\theta}^{(1, \gamma)}, \quad (19)$$

где γ – индекс полиадического числа; $N^{(\tau, \gamma)}$ – код-номер γ -го полиадического числа, построенного для τ -го массива компонент трансформанты; $y_{\theta}^{(1, \gamma)}$ – θ -е значение γ -го полиадического числа для первого массива трансформанты:

$$Y_{1, \gamma} \in Y_1; Y_{1, \gamma} = \{y_{\theta}^{(1, \gamma)}\}, \theta = \overline{1, \Theta_{1, \gamma}};$$

$\Theta_{1, \gamma}$ – количество элементов в γ -м полиадическом числе первого массива; $h_{\theta}^{(1, \gamma)}$ – весовой коэффициент элемента $y_{\theta}^{(1, \gamma)}$.

Построение полиадических чисел осуществляется на основе компонент трансформанты Y_1 в направлении столбцов. Для того чтобы избежать переполнения машинного слова, отбор компонент в полиадические числа проводится на основе правила

$$y_{ij}^{(1)} \in Y_{1, \gamma}: y_{\theta}^{(1, \gamma)} := y_{ij}^{(1)}, \text{ если } h_{\theta}^{(1, \gamma)} \leq 2^M - 1; \quad (20)$$

$$y_{ij}^{(1)} \notin Y_{1, \gamma}: y_{\theta}^{(1, \gamma)} \neq y_{ij}^{(1)}, \text{ если } h_{\theta}^{(1, \gamma)} > 2^M - 1. \quad (21)$$

Поскольку трансформанта Y_1 имеет структуру двумерного массива, то выражение (19) необходимо записать через значения компонент $y_{ij}^{(1)}$. Рассмотрим общий случай формирования полиадического числа на основе части массива Y_1 , изображенный на рис. 2.

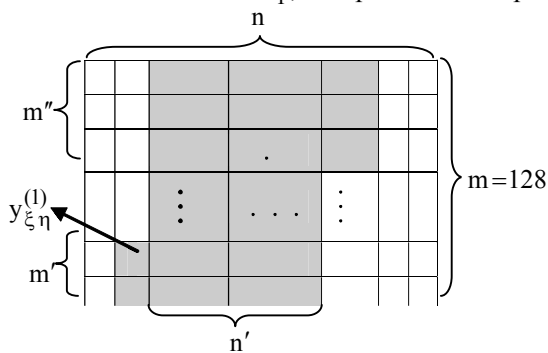


Рис. 2. Вариант позиционирования полиадического числа в массиве трансформанты

Тогда для начальной компоненты γ -го полиадического числа с координатами $(\xi; \eta)$ выражение (19) примет вид

$$N_{\Theta_{1, \gamma}}^{(1, \gamma)} = \sum_{i=\xi}^m y_{i\eta}^{(1, \gamma)} h_{i\eta}^{(1, \gamma)} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=\eta+1}^{n'} y_{ij}^{(1, \gamma)} h_{ij}^{(1, \gamma)} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{m''} y_{i, n'+1}^{(1, \gamma)} h_{i, n'+1}^{(1, \gamma)}, \quad (22)$$

где $N_{\Theta_{1, \gamma}}^{(1, \gamma)}$ – значение кода-номера γ -го полиадического числа, содержащего $\Theta_{1, \gamma}$ компонент трансформанты Y_1 ; m' , m'' – количество компонент соответственно в η -м и $(n'+1)$ -м столбцах трансформанты; n' – целое количество столбцов, входящих в состав полиадического числа.

В соответствии с рис. 2 количество элементов $\Theta_{1, \gamma}$ будет равно

$$\Theta_{1, \gamma} = m' + m \times n' + m'' = (m - \xi) + m \times n' + m'', \quad (23)$$

а величины весовых коэффициентов $h_{i\eta}^{(1, \gamma)}$, $h_{ij}^{(1, \gamma)}$ и $h_{i, n'+1}^{(1, \gamma)}$ для трех частей полиадического числа будут вычисляться по формулам:

– для компонент трансформант, соответствующих η -му столбцу массива Y_1 :

$$h_{i\eta}^{(1, \gamma)} = \prod_{\phi=i+1}^m \psi_{\phi\eta}^{(1)} \prod_{\phi=1}^m \prod_{j=\eta+1}^{n'} \psi_{\phi j}^{(1)} \prod_{\phi=1}^{m''} \psi_{\phi, n'+1}^{(1)}; \quad (24)$$

– для компонент трансформант, соответствующих $(n'+1)$ -му столбцу массива Y_1 :

$$h_{ij}^{(1, \gamma)} = \prod_{\phi=i+1}^m \psi_{\phi j}^{(1)} \prod_{\phi=1}^m \prod_{u=j+1}^{n'} \psi_{\phi u}^{(1)} \prod_{\phi=1}^{m''} \psi_{\phi, n'+1}^{(1)}; \quad (25)$$

– для компонент трансформант, соответствующих n' столбцам массива Y_1 :

$$h_{i, n'+1}^{(1, \gamma)} = \prod_{\phi=i+1}^{m''} \psi_{\phi, n'+1}^{(1)}. \quad (26)$$

Обработка массива Y_1 проводится до тех пор, пока не будет проанализирована компонента $y_{mn}^{(1)}$. На выходе данного этапа образуются последовательность кодограмм, содержащих значения кодов-номеров $N_{\Theta_{1, \gamma}}^{(1, \gamma)}$, $\gamma = \overline{1, v_{\text{ч}}}$ ($v_{\text{ч}}$ – количество полиадических чисел для массива Y_1), и система оснований $\{\lambda_i^{(1)}\}$, $i = \overline{1, m}$, $\{\chi_j^{(1)}\}$, $j = \overline{1, n}$.

Этап 2. Обрабатывается τ -й массив трансформанты. Особенность обработки массивов, имеющих индексы $\tau > 1$, состоит в том, что:

– при построении системы оснований Ψ_{τ} учитывается система оснований $\Psi_{\tau-1}$ предыдущего массива (динамическая система оснований);

– вычисление кодов-номеров проводится с учетом формирования двух типов полиадических кодов (смешанная двухуровневая система оснований);

– для накопленного количества оснований нескольких массивов формируется кодограмма для их компактного представления.

Для реализации данных особенностей обработка массивов Y_τ трансформанты должна содержать следующие операции.

1. Проводится анализ компонент массива Y_τ на их принадлежность одному из двух классов. Для этого проверяется система неравенств:

$$\text{если } y_{ij}^{(\tau)} < \psi_{ij}^{(\tau-1)}, \text{ то } y_{ij}^{(\tau)} \in Y_{\tau\gamma}; \quad (27)$$

$$\text{если } y_{ij}^{(\tau)} \geq \psi_{ij}^{(\tau-1)}, \text{ то } y_{ij}^{(\tau)} \in Z_{\tau\gamma}, \quad (28)$$

где $Y_{\tau\gamma}, Z_{\tau\gamma}$ – γ -е полиадическое число τ -го массива, построенное соответственно для абсолютной и дифференциальной систем оснований.

2. Если при обработке компоненты $y_{ij}^{(\tau)}$ выполняется неравенство (27), то она принадлежит абсолютному полиадическому числу. Проверяются неравенства (20) и (21). В случае выполнения неравенства (20), т.е. $y_{\theta}^{(\tau,\gamma)} := y_{ij}^{(\tau)}$, величина θ увеличивается на 1 и организуется пересчет значения кода-номера $N_{\theta}^{(\tau,\gamma)}$ по рекуррентной формуле [3]:

$$N_{\theta}^{(\tau,\gamma)} = N_{\theta-1}^{(\tau,\gamma)} + y_{ij}^{(\tau,\gamma)} h_{ij}^{(\tau,\gamma)}, \quad (29)$$

где $N_{\theta-1}^{(\tau,\gamma)}$ – значение кода-номера для γ -го полиадического числа на предыдущем шаге обработки (для $(\theta-1)$ -го элементов).

Если выполняется неравенство (21), то компонента $y_{ij}^{(\tau)}$ будет первым элементом $(\gamma+1)$ -го полиадического числа: $y_1^{(1,\gamma+1)} := y_{ij}^{(\tau)}$. Текущее значение кода-номера $N_1^{(\tau,\gamma+1)}$ определяется по формуле

$$N_1^{(\tau,\gamma+1)} = y_{ij}^{(\tau,\gamma+1)}. \quad (30)$$

При этом значение весового коэффициента $h_{ij}^{(\tau,\gamma)}$ вычисляется на основе системы оснований $\Psi_{\tau-1}$ предыдущего массива $Y_{\tau-1}$:

– если текущее полиадическое число включает в себя часть j -го столбца массива Y_τ , то

$$h_{ij}^{(\tau,\gamma)} = \prod_{\phi=m-m'+1}^{i-1} \psi_{\phi j}^{(\tau-1)}; \quad (31)$$

– если текущее полиадическое число включает в себя часть j -го столбца и n' полных столбцов массива Y_τ , то

$$h_{ij}^{(\tau,\gamma)} = \prod_{\phi=1}^{i-1} \psi_{\phi j}^{(\tau-1)} \prod_{\phi=1}^m \prod_{u=1}^{n'} \psi_{\phi u}^{(\tau-1)}; \quad (32)$$

– если текущее полиадическое число включает в себя часть j -го столбца, n' полных столбцов и m' компонент $(j-n'-1)$ -го столбца массива Y_τ , то

$$h_{ij}^{(\tau,\gamma)} = \prod_{\phi=1}^{i-1} \psi_{\phi j}^{(\tau-1)} \prod_{\phi=1}^m \prod_{u=1}^{n'} \psi_{\phi u}^{(\tau-1)} \times \prod_{\phi=m-m'+1}^m \psi_{\phi, j-n'-1}^{(\tau-1)}. \quad (33)$$

Как показывает анализ соотношений (31) – (33), формирование кода-номера $N_{\theta}^{(\tau,\gamma)}$ проводится за один проход.

Это объясняется тем, что не требуется строить для массива Y_τ систему оснований $\Psi_\tau^{(1)}$ первого уровня.

3. Для варианта, когда выполняется неравенство (28), для компоненты $y_{ij}^{(\tau)}$ формируется система оснований второго уровня $\Psi_\tau^{(2)} = \{\psi_{ij}^{(\tau)}\}$. В этом случае выполняется неравенство (10). Компонента $y_{ij}^{(\tau)}$ принадлежит дифференциальному полиадическому числу $Z_{\tau\gamma}$. Перевод компоненты $y_{ij}^{(\tau)}$ в элемент дифференциального полиадического числа проводится по формуле

$$z_{ij}^{(\tau)} = y_{ij}^{(\tau)} - \psi_{ij}^{(\tau-1)}. \quad (34)$$

После этого вычисляется весовой коэффициент $\rho_{ij}^{(\tau,\gamma)}$. Вычисление значения $\rho_{ij}^{(\tau,\gamma)}$ организуется по аналогии с вычислением весового коэффициента $h_{ij}^{(\tau,\gamma)}$ на основе формул (31) – (33):

– если текущее дифференциальное полиадическое число включает в себя часть j -го столбца массива Y_τ , то

$$\rho_{ij}^{(\tau,\gamma)} = \prod_{\phi=m-m'+1}^{i-1} (\psi_{\phi j}^{(\tau)} - \psi_{\phi j}^{(\tau-1)}); \quad (35)$$

– если текущее дифференциальное полиадическое число включает в себя часть j -го столбца и n' полных столбцов массива Y_τ , то

$$\rho_{ij}^{(\tau,\gamma)} = \prod_{\phi=1}^{i-1} (\psi_{\phi j}^{(\tau)} - \psi_{\phi j}^{(\tau-1)}) \prod_{\phi=1}^m \prod_{u=1}^{n'} (\psi_{\phi u}^{(\tau)} - \psi_{\phi u}^{(\tau-1)}); \quad (36)$$

– если текущее дифференциальное полиадическое число включает в себя часть j -го столбца, n' полных столбцов и m' компонент $(j-n'-1)$ -го столбца массива Y_τ , то

$$\rho_{ij}^{(\tau,\gamma)} = \prod_{\phi=1}^{i-1} (\psi_{\phi j}^{(\tau)} - \psi_{\phi j}^{(\tau-1)}) \prod_{\phi=1}^m \prod_{u=1}^{n'} (\psi_{\phi u}^{(\tau)} - \psi_{\phi u}^{(\tau-1)}) \times \prod_{\phi=m-m'+1}^m (\psi_{\phi, j-n'-1}^{(\tau)} - \psi_{\phi, j-n'-1}^{(\tau-1)}). \quad (37)$$

На основе вычисленного значения $\rho_{ij}^{(\tau,\gamma)}$ можно провести оценку на принадлежность компоненты $y_{ij}^{(\tau)}$

текущему дифференциальному полиадическому числу. Для этого проверяется неравенство

$$\rho_{ij}^{(\tau, \gamma)} \leq 2^M - 1. \quad (38)$$

Если неравенство (38) выполняется, то $z_{ij}^{(\tau, \gamma)} = z_{ij}^{(\tau)}$; $y_{ij}^{(\tau)} \in Z_{\tau, \gamma}$. В противном случае $y_{ij}^{(\tau)} \notin Z_{\tau, \gamma}$ и начинает формироваться новое дифференциальное полиадическое число.

Код-номер $R_{\theta}^{(\tau, \gamma)}$ дифференциального полиадического числа находится по формуле:

$$R_{\theta}^{(\tau, \gamma)} = R_{\theta-1}^{(\tau, \gamma)} + z_{ij}^{(\tau, \gamma)} \rho_{ij}^{(\tau, \gamma)}, \quad (39)$$

где $R_{\theta-1}^{(\tau, \gamma)}$ – значение кода-номера для γ -го дифференциального полиадического числа на предыдущем шаге обработки (для $(\theta-1)$ -го элементов).

Сравним значения кодов-номеров для абсолютного $N_{\Theta, \gamma}^{(\tau, \gamma)}$ и дифференциального $R_{\Theta, \gamma}^{(\tau, \gamma)}$ полиадических чисел. При этом полиадические числа формируются для одинаковых компонент массива Y_{τ} :

$$N_{\Theta, \gamma}^{(\tau, \gamma)} = \sum_{i=\xi}^m y_{i\eta}^{(\tau, \gamma)} h_{i\eta}^{(\tau, \gamma)} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=\eta+1}^{n'} y_{ij}^{(\tau, \gamma)} h_{ij}^{(\tau, \gamma)} + \sum_{i=1}^{m'} y_{i, n'+1}^{(\tau, \gamma)} h_{i, n'+1}^{(\tau, \gamma)}; \quad (40)$$

$$R_{\Theta, \gamma}^{(\tau, \gamma)} = \sum_{i=\xi}^m (y_{i\eta}^{(\tau, \gamma)} - \psi_{i\eta}^{(\tau-1)}) \rho_{i\eta}^{(\tau, \gamma)} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=\eta+1}^{n'} (y_{ij}^{(\tau, \gamma)} - \psi_{ij}^{(\tau-1)}) \rho_{ij}^{(\tau, \gamma)} + \sum_{i=1}^{m'} (y_{i, n'+1}^{(\tau, \gamma)} - \psi_{i, n'+1}^{(\tau-1)}) \rho_{i, n'+1}^{(\tau, \gamma)}. \quad (41)$$

Из анализа выражений (40) и (41) следует, что выполняется неравенство $R_{\Theta, \gamma}^{(\tau, \gamma)} < N_{\Theta, \gamma}^{(\tau, \gamma)}$.

Это обусловлено двумя причинами:

$$(y_{ij}^{(\tau, \gamma)} - \psi_{ij}^{(\tau-1)}) < y_{ij}^{(\tau, \gamma)}; \quad \rho_{ij}^{(\tau, \gamma)} < h_{ij}^{(\tau, \gamma)}.$$

Значит, за счет перехода от абсолютной к дифференциальной системе оснований обеспечивается уменьшение значения кода-номера на представление массива трансформанты. Максимальная длина кодограммы уменьшается на

$$\log_2 h_{ij}^{(\tau, \gamma)} - \log_2 \rho_{ij}^{(\tau, \gamma)} = \sum_{\phi=1}^{i-1} \log_2 (\psi_{\phi j}^{(\tau)}) + \sum_{\phi=1}^m \sum_{u=1}^{n'} \log_2 (\psi_{\phi u}^{(\tau)}) +$$

$$+ \sum_{\phi=m-m'+1}^m \log_2 (\psi_{\phi, j-n'-1}^{(\tau)}) - \sum_{\phi=1}^{i-1} \log_2 (\psi_{\phi j}^{(\tau)} - \psi_{\phi j}^{(\tau-1)}) - \sum_{\phi=1}^m \sum_{u=1}^{n'} \log_2 (\psi_{\phi u}^{(\tau)} - \psi_{\phi u}^{(\tau-1)}) - \sum_{\phi=m-m'+1}^m \log_2 (\psi_{\phi, j-n'-1}^{(\tau)} - \psi_{\phi, j-n'-1}^{(\tau-1)}), \quad (\text{бит}) \quad (42)$$

где $\log_2 h_{ij}^{(\tau, \gamma)}$, $\log_2 \rho_{ij}^{(\tau, \gamma)}$ – максимальное количество разрядов, затрачиваемое на представление кода-номера соответственно в абсолютном и дифференциальном пространствах.

Для того чтобы на приемной стороне можно было определить, к какому типу системы оснований относится восстанавливаемая компонента, вводится двоичная матрица $G_{m, n}^{(\tau)}$ размерностью $m \times n$ элементов:

$$G_{m, n}^{(\tau)} = \{g_{ij}^{(\tau)}\}, \quad i=\overline{1, m}; \quad j=\overline{1, n},$$

где $g_{ij}^{(\tau)}$ – $(i; j)$ -й элемент матрицы $G_{m, n}^{(\tau)}$, сформированной для τ -го массива трансформанты.

Элемент $g_{ij}^{(\tau)}$ принимает следующие значения:

$$g_{ij}^{(\tau)} = \begin{cases} 0, & \rightarrow y_{ij}^{(\tau)} \in Y_{\tau, \gamma}; \\ 1, & \rightarrow y_{ij}^{(\tau)} \in Z_{\tau, \gamma}. \end{cases} \quad (43)$$

При этом если матрица $G_{m, n}^{(\tau)}$ содержит полностью нулевой столбец

$$g_{ij}^{(\tau)} = 0, \quad \text{для } i=\overline{1, m}$$

или полностью нулевую строку

$$g_{ij}^{(\tau)} = 0, \quad \text{для } j=\overline{1, n},$$

то соответствующее основание по столбцу $\chi_j^{(\tau)}$ и по строке $\lambda_i^{(\tau)}$ будет равно нулевому значению:

$$\chi_j^{(\tau)} = 0; \quad \lambda_i^{(\tau)} = 0.$$

Это значит, что основания для соответствующих компонент массива трансформанты полностью заменяются основаниями предыдущего $(\tau-1)$ -го массива. На приемную сторону передаются основания, значения которых отличны от 0. Тогда достигается уменьшение количества оснований, необходимых для безошибочного восстановления компонент трансформант на приемной стороне.

Увеличение объема цифрового представления сжатого изображения на величину, равную количеству

разрядов W_G , затрачиваемых на матрицу $G_{m,n}^{(\tau)}$, компенсируется уменьшением количества разрядов на представление кода-номера (выражение (42)) и сокращением количества оснований, используемых для его формирования. Кроме того, обработка части компонент проводится за один проход (не требуется предварительного вычисления оснований).

Дальнейшее уменьшение количества оснований второго уровня достигается за счет того, что для компонент $Y_{ij}^{(\tau)}$, имеющих значение признака $g_{ij}^{(\tau)} = 1$, строится отдельный массив $Y_{\tau}^{(2)}$:

$$Y_{\tau}^{(2)} = \{y_{\xi u}^{(\tau,2)}\}, \quad i = \overline{1, v_g}; \quad j = \overline{1, n},$$

где $y_{\xi u}^{(\tau,2)}$ – $(\xi; u)$ -й элемент матрицы $Y_{\tau}^{(2)}$.

Массив $Y_{\tau}^{(2)}$ образуется путем вычеркивания компонент $Y_{ij}^{(\tau)}$, для которых соответствует значение признака $g_{ij}^{(\tau)} = 0$: $y_{\xi u}^{(\tau,2)} = y_{ij}^{(\tau)} \mid g_{ij}^{(\tau)} = 1$.

Заполнение массива $Y_{\tau}^{(2)}$ происходит по строкам слева направо. Значит, на $(\xi; u)$ -м шаге заполнения массива $Y_{\tau}^{(2)}$ используется следующее правило:

– если $u < n$, то $y_{\xi, u+1}^{(\tau,2)} = y_{ij}^{(\tau)}$;

– если $u = n$, то $y_{\xi+1, u}^{(\tau,2)} = y_{ij}^{(\tau)}$.

При этом $v_g \leq m$, поэтому размер массива $Y_{\tau}^{(2)}$ не будет превышать размера исходного массива Y_{τ} .

С учетом данных особенностей вычисление $\chi_j^{(\tau)}$ и $\lambda_i^{(\tau)}$ выполняется только для элементов массива $Y_{\tau}^{(2)}$, т.е.

$$\lambda_i^{(\tau)} = \max_{1 \leq j \leq n} \{y_{ij}^{(\tau)}\} + 1, \quad i = \overline{1, v_g}; \quad (44)$$

$$\chi_j^{(\tau)} = \max_{1 \leq i \leq v_g} \{y_{ij}^{(\tau)}\} + 1, \quad j = \overline{1, n}. \quad (45)$$

В соответствии с формулами (44) и (45) на определение величин $\chi_j^{(\tau)}$ и $\lambda_i^{(\tau)}$ потребуется затратить меньшее количество операций сравнения, чем для массива Y_{τ} .

Использование матрицы $G_{m,n}^{(\tau)}$ позволяет учитывать ситуацию, когда значения оснований текущего массива намного меньше, чем значения оснований предыдущего массива. Для такого варианта одновременно выполняются два условия:

$$y_{ij}^{(\tau)} < \psi_{ij}^{(\tau-1)};$$

$$\log_2 \psi_{ij}^{(\tau-1)} > 2 \log_2 (\min(\lambda_i^{(\tau)}, \chi_j^{(\tau)})). \quad (46)$$

Условие (46) указывает на то, что введение основания для элемента $Y_{ij}^{(\tau)}$ приведет к снижению суммарной длины кодограммы (учитывается информационная и служебная части кодовой комбинации).

Для учета такой ситуации в матрице $G_{m,n}^{(\tau)}$ вводится элемент $g_{ij}^{(\tau)}$, имеющий значение, равное 2. Такая дополнительная служебная информация обеспечит взаимно-однозначное определение типа обработки каждой компоненты массива трансформанты.

Таким образом, разработан метод, обеспечивающий дополнительное повышение степени сжатия без внесения погрешности с учетом ограничений на вычислительную сложность алгоритма.

Дальнейшее развитие созданной технологии состоит в разработке компактного представления массивов признаков компонент трансформант.

4. Выводы

Разработан метод сжатия изображений на основе динамического представления трансформант дискретных вейвлет-преобразований в двухуровневом полиадическом пространстве.

Научная новизна созданных результатов заключается в том, что впервые:

– для сокращения объема данных полиадическая система оснований строится по динамическому и двухуровневому принципам;

– разрабатывается кодирование на основе совмещения абсолютного и дифференциального полиадического представления отдельных частей трансформанты.

Это позволяет: сократить количество служебных данных; снизить значение кода-номера полиадического числа; проводить обработку компонент массива трансформанты за один проход.

Практическая значимость состоит в том, что созданная технология относительно технологии, реализованной в формате JPEG 2000, позволяет дополнительно увеличить степень сжатия реалистических изображений без внесения погрешности и снизить время на обработку изображений.

Литература: 1. Adams M.D. The JPEG-2000 Still Image Compression I N 2412, Sept. 2001. 2. Wallace G.K. The JPEG Still Picture Compression Standard // Communication in ACM. 1991. V34, №4. P.31–34. 3. Баранник В.В. Метод сжатия изображений комбинированным полиадическим кодированием трансформант // ИУСЖТ. 2000. №2. С. 66 – 69. 4. Баранник В.В., Гуржий П.Н. Кодирование массивов цветowych координат в разностном полиадическом пространстве // Радиоелектронні та комп'ютерні системи. 2005. №1 (9). С. 44 – 49.

Поступила в редколлегию 25.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Поляков П.Ф.

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории Харьковского университета Воздушных Сил. Научные интересы: обработка и передача информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Хаханова Ирина Витальевна, канд. техн. наук, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование цифровых систем на кристаллах, обработка и передача информации. Увлечения: английский язык, музыка. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 70-21-326. E-mail: hahanova@mail.ru.

Елисеев Владимир Васильевич, канд. техн. наук, доцент Северодонецкого технологического института Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. Научные интересы: компьютерная инженерия, программно-технические комплексы систем контроля и управления. Адрес: Украина, 93405, Северодонецк Луганской обл., пл. Победы, 2, тел. (06452) 2-95-87.