

УДК 621.391

А.А. Борискевич, А.В. Антончик

## БЫСТРОЕ СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-БЛОЧНЫМ КОДИРОВАНИЕМ ГОЛОМБА – РАЙСА

*Предлагается блочный алгоритм быстрого сжатия изображений без потерь с пространственно-кодированной адаптацией, основанный на использовании двухпороговой маски предсказания с установленными порогами, адаптивно-блочного кодирования Голомба – Райса и снижения избыточности с помощью коэффициента относительного изменения параметра кода Голомба – Райса. Результаты моделирования алгоритма для полутоновых и цветных изображений показали высокую эффективность сжатия (1,6–1,75) при низкой вычислительной сложности.*

### Введение

Алгоритмы сжатия без потерь используются для многих классов изображений: медицинских, микро- и наноскопических, спутниковых, аэрофотографических, астрономических и т. п. В настоящий момент существует целый ряд стандартов и методов, позволяющих сжимать без потерь полутоновые и цветные статические изображения: Lossless JPEG, JPEG2000 Lossless, JPEG-LS, нестандартизованные алгоритмы сжатия CALIC, FELICS и т. д. [1–6]. Спектр приложения изображений определяет степень значимости критериев, определяющих эффективность алгоритма сжатия: коэффициента сжатия, скорости компрессии и декомпрессии, устойчивости к ошибкам, стоимости аппаратной и программной реализации.

Для сжатия изображений без потерь одним из наиболее оптимальных решений в понятиях критериев эффективности алгоритма является использование пространственных методов, основанных на применении предсказания. Анализ методов сжатия изображений в пространственной области показывает, что существует множество различных предсказателей и энтропийных кодеров. Это обусловлено отсутствием методов оптимального синтеза маски предсказания с максимальным отношением точность предсказания/вычислительная сложность и сложностью адаптации энтропийных кодов к источнику информации с произвольным распределением вероятностей.

Целью работы является разработка эффективных блочных кодово-адаптивных методов пространственного сжатия с использованием префиксных кодов Голомба – Райса.

### 1. Модель предсказателя изображения

Кодирование без потерь с предсказанием основано на устранении пространственно-кодированной избыточности элементов изображения  $I$ . Для этого выполняется предсказание текущих пикселей  $I_{i,j}$ ,  $i = 0, N-1$ ,  $j = 0, M-1$ , исходного изображения по пикселям их окрестности  $\Omega_{i,j}$  размером  $K \times (L_1 + L_2 + 1)$ :

$$\Omega_{i,j} = \begin{pmatrix} I_{i-K-1,j-L_1} & \cdots & I_{i-K-1,j} & \cdots & I_{i-K-1,j+L_2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{i-1,j-L_1} & \cdots & I_{i-1,j} & \cdots & I_{i-1,j+L_2} \\ I_{i,j-L_1} & \cdots & I_{i,j} & \cdots & I_{i,j+L_2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Обобщенное предсказание значения пиксела  $I_{i,j}$  можно представить в виде функционала  $F(\cdot)$ , значение которого зависит от выбора маски предсказания  $A(\Omega_{i,j})$  и окрестности предсказания  $\Omega_{i,j}$ :

$$\tilde{I}_{i,j} = F(A(\Omega_{i,j}) * \Omega_{i,j}), \quad (2)$$

где  $\tilde{I}_{i,j}$  – значение предсказанного пиксела;  $A(\Omega_{i,j}) = \{a_{i+k,j+l} \mid k = \overline{0, K-1}, j = \overline{-L_1, L_2}\}$  – маска предсказания с весовыми коэффициентами  $a_{i+k,j+l}$  для окрестности  $\Omega_{i,j}$ ; \* – символ оператора поточечного произведения матриц.

Значения функционала  $F = (F_\xi(A, \Omega, d) \mid \xi \in \{1, \xi_N\})$  определяются с помощью соотношения

$$F_\xi(A, \Omega, d) = F(A_{C_\xi}(\Omega_{i,j}) * \Omega_{i,j} \mid d(C_\xi, \Omega_{i,j}) \forall \xi \in \{1, \xi_N\}), \quad (3)$$

где  $C_\xi$  –  $\xi$ -й контекст или его параметрическое задание, характеризующее условие вычисления предсказанного значения  $\tilde{I}_{i,j}$ ;  $A_{C_\xi}(\Omega_{i,j})$  – маска коэффициентов предсказания для окрестности  $\Omega_{i,j}$  текущего пиксела  $I_{i,j}$  и выбранного контекста  $C_\xi$ ;  $d(C_\xi, \Omega_{i,j})$  – целевая функция принятия решения для выбора контекста  $C_\xi$  из набора  $\{C_\xi\}_{\xi=1}^{\xi_N}$  и соответствующих коэффициентов предсказания с целью достижения оптимального соотношения между точностью предсказания и вычислительной сложностью.

Из соотношений (2) и (3) видно, что точность предсказания зависит от точности моделирования окрестности, т. е. от количества и качества аппроксимации контекстов, по которым выбирается маска  $A(\Omega_{i,j})$ . Высокоэффективные методы предсказания позволяют добиться снижения разброса между исходными и предсказанными значениями и увеличить степень сжатия. Однако улучшение точности предсказания ведет к значительному росту вычислительной сложности. Задача оптимизации вычислительной сложности и снижения скорости передаваемого потока особенно актуальна в космических и наземных приложениях.

## 2. Алгоритм быстрого сжатия изображений без потерь на основе пространственно-кодовой адаптации

Алгоритм быстрого сжатия изображений без потерь на основе пространственно-кодовой адаптации состоит из следующих шагов:

*Шаг 1.* Предсказание исходного изображения.

Предсказатель с масками весовых коэффициентов  $A(\Omega_{i,j}) = \left\{ (0, 1, 0) \vee (0, 0, 1) \vee \left( 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) \right\}$

и двухпороговым контекстом  $C_\xi$ , определяющим условия выбора весовых коэффициентов, позволяет учитывать вертикальный и горизонтальный градиенты окрестности  $\Omega_{i,j}$ . Значение предсказанного пиксела  $\tilde{I}_{i,j}$  вычисляется с помощью соотношения

$$\tilde{I}_{i,j} = \begin{cases} I_{i,j-1}, & \text{если } |I_{i,j-1} - I_{i-1,j-1}| > \theta_b, \quad |I_{i-1,j} - I_{i-1,j-1}| < \theta_s; \\ I_{i-1,j}, & \text{если } |I_{i-1,j} - I_{i-1,j-1}| > \theta_b, \quad |I_{i,j-1} - I_{i-1,j-1}| < \theta_s; \\ \left\lfloor \frac{I_{i,j-1} + I_{i-1,j}}{2} \right\rfloor & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\theta_b$  и  $\theta_s$  – верхнее и нижнее пороговые значения градиентного параметра. Для окрестности с исходными пикселями  $A, B, C$  и предсказываемым пикселем  $X$  (рис. 1) соотношение (4) принимает вид

$$X = \begin{cases} A, & \text{если } |A - C| > \theta_b, \quad |B - C| < \theta_s; \\ B, & \text{если } |B - C| > \theta_b, \quad |A - C| < \theta_s; \\ \left\lfloor \frac{A + B}{2} \right\rfloor & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (5)$$

|   |   |
|---|---|
| С | В |
| А | Х |

Рис. 1. Окрестность трехточечного градиентного предсказателя с двухпороговым контекстом

*Шаг 2. Вычисление разностного изображения.*

При вычислении разностного изображения (рис. 2, а) по обобщенному выражению (2) выполняется сканирование исходного изображения (рис. 2, б). Для окрестности (1) сканирование выполняется в направлении сверху вниз и слева направо, начиная от пикселя  $\tilde{I}_{1,1}$ , т. е.  $i = \overline{1, M-1}$ ,  $j = \overline{1, N-1}$ . При этом возникает необходимость отдельной обработки левого столбца и верхней строки для формирования разностного изображения. Следует отметить, что для уменьшения вычислительной сложности алгоритма сжатия можно передавать первую строку и столбец без кодирования. В предлагаемом алгоритме вычисление разностных изображений производится по выражениям  $\tilde{I}_{0,j} = I_{1,j} - I_{0,j}$ ,  $j = \overline{1, N-1}$ , и  $\tilde{I}_{i,0} = I_{i,1} - I_{i,0}$ ,  $i = \overline{1, M-1}$ . В этом случае требуется передача первого пиксела исходного изображения  $I_{0,0}$ .

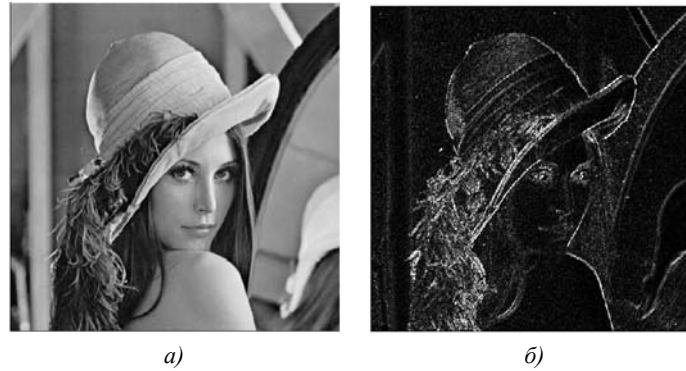


Рис. 2. Результат предсказания в пространственной области:  
а) исходное изображение; б) разностное

*Шаг 3. Преобразование разностного изображения.*

Для устранения кодовой избыточности разность предсказанного  $\tilde{I}$  и исходного  $I$  изображений кодируется энтропийным кодом. Разностное изображение  $E = I - \tilde{I}$  обладает статистическими свойствами симметричного экспоненциального распределения. Для эффективного энтропийного сжатия универсальными кодами Голомба – Райса [7] значения вероятностей символов  $P_j$  целочисленной сжимаемой последовательности символов должны удовлетворять условию  $P_0 \geq P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_j \geq \dots \geq P_{2^n-1}$  и подчиняться геометрическому закону  $P_n = 1 - q^n$ , где  $P_j$  – вероятность появления  $j$ -го значения символа;  $q$  – параметр распределения. Это гарантирует, что более вероятные символы будут закодированы более короткими кодовыми комбинациями.

Для формирования визуальной информации с односторонним геометрическим распределением выполняется преобразование разностного изображения  $E$  в положительное целочисленное изображение  $\hat{E}$ :

$$\hat{E}_{i,j} = f(E_{i,j}) = \begin{cases} 2 \cdot E_{i,j} & \text{при } E_{i,j} \geq 0; \\ 2 \cdot |E_{i,j}| - 1 & \text{при } E_{i,j} \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Изображение  $\hat{E}$  имеет приблизительно статистические свойства одностороннего геометрического распределения, что позволяет эффективно использовать коды Голомба – Райса.

*Шаг 4.* Формирование вектора разностного изображения.

Преобразованное разностное изображение  $\hat{E}$  имеет высокую пространственную избыточность. Для ее уменьшения используется блочно-адаптивное статистическое кодирование, обладающее высокой чувствительностью к вариации значений разностных пикселей в пределах блока (вектора) и позволяющее почти оптимально кодировать каждый вектор.

Формирование векторов осуществляется из последовательности пикселей разностного изображения  $\{\hat{E}_n\}$ , полученной посредством его вертикально-горизонтального сканирования:

$$\{\hat{E}_n\} = \{\hat{E}_{i,j} \mid i = \overline{0, N-1}, j = \overline{0, M-1}, n = ij, n = \overline{0, NM}\}. \quad (7)$$

Поток сформированных векторов  $\{\vec{x}_t\}_{t=1}^T$  определяется системой

$$\begin{cases} \vec{x}_t = (\hat{E}_n, \dots, \hat{E}_{n+S-1}); \\ T = \text{ceil}\left(\frac{NM}{S}\right), \end{cases}$$

где  $S$  – размер или количество компонент вектора;  $\text{ceil}(\ )$  – символ операции округления с избытком;  $T$  – общее число кодируемых векторов изображения;  $t$  – номер вектора (блока). При  $T \bmod S \neq 0$  выполняется дополнение вектора  $\vec{x}_t$  нулями до размерности  $S$ .

*Шаг 5.* Адаптивное энтропийное кодирование Голомба – Райса.

При кодировании компоненты блока (символа)  $\hat{E}_n$  префиксным кодом Голомба – Райса компонента представляется в виде  $\hat{E}_n = q \cdot m + r$ , где  $q$  и  $r$  – целые неотрицательные числа;  $m = 2^k$  – делитель;  $k$  – параметр расщепления, задающий вид распределения кода. Значение  $q$  кодируется унарным кодом, остаток от деления  $r$  представляется в бинарной форме. Кодовое слово имеет вид  $(r_2 \mid q_u)$ , где  $r_2$  – двоичное представление числа  $r$ ;  $q_u$  – унарное представление числа  $q$ . Кодовые слова для первых восьми символов, кодированных различными кодами Голомба – Райса, приведены в табл. 1. Длина кодового слова  $l_c^k$ , соответствующего значению  $\hat{E}_n$  при кодировании с параметром  $k$ , определяется соотношением  $l_c^k = l_r + l_q^k$  бит, где  $l_r = k$  – битовая длина  $r_2$ ;  $l_q^k = \frac{\hat{E}_n}{2^k} + 1$  – битовая длина  $q_u$ .

Таблица 1

Кодированные значения символов  $\hat{E}_n$  для кодов Голомба – Райса с различными параметрами  $k$

| Значение символа $\hat{E}_n$ | Значение параметра кода |         |         |         |         |         |
|------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                              | $k = 0$                 | $k = 1$ | $k = 2$ | $k = 3$ | $k = 4$ | $k = 5$ |
| 0                            | 1                       | 0 1     | 00 1    | 000 1   | 0000 1  | 00000 1 |
| 1                            | 01                      | 1 1     | 01 1    | 001 1   | 0001 1  | 00001 1 |
| 2                            | 001                     | 0 01    | 10 1    | 010 1   | 0010 1  | 00010 1 |
| 3                            | 0001                    | 1 01    | 11 1    | 011 1   | 0011 1  | 00011 1 |
| 4                            | 00001                   | 0 001   | 00 01   | 100 1   | 0100 1  | 00100 1 |
| 5                            | 000001                  | 1 001   | 01 01   | 101 1   | 0101 1  | 00101 1 |
| 6                            | 0000001                 | 0 0001  | 10 01   | 110 1   | 0110 1  | 00110 1 |
| 7                            | 00000001                | 1 0001  | 11 01   | 111 1   | 0111 1  | 00111 1 |

При блочно-адаптивном кодировании потока векторов (блоков)  $\{\vec{x}_t\}_{t=1}^T$  для каждого  $\vec{x}_t$  выполняется поиск параметра кода  $k_t$ , при котором обеспечивается максимальное сжатие:  $k_t = \arg \min l_{vk}$ . Длина  $l_{vk}$  любого кодированного вектора (рис. 3) определяется соотношением  $l_{vk} = l_{ID} + \sum_{d=1}^S l_c^{k,d}$ , где  $l_{ID} = \text{ceil}(\log_2(k+1))$  – битовая длина идентификатора кода вектора;  $l_c^{k,d}$  – битовая длина  $d$ -го кодового слова с параметром  $k$ .

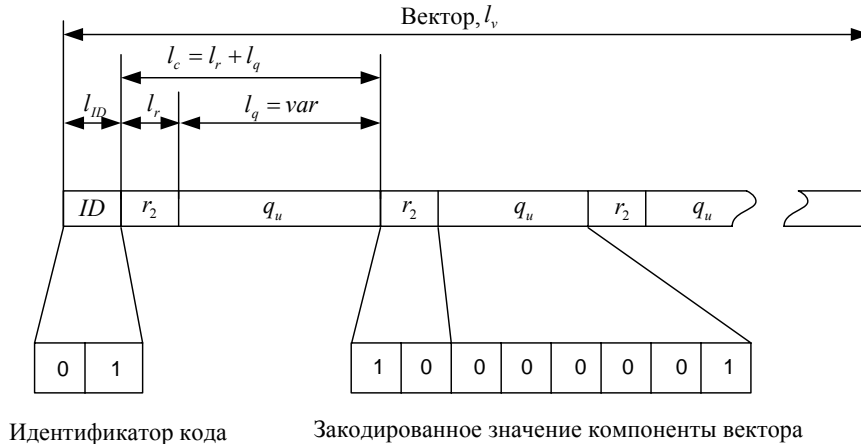


Рис. 3. Структура кодированного вектора длиной  $l_v$  при блочно-адаптивном кодировании изображения

Адаптация кодов Голломба к источнику изображения может достигаться несколькими способами. В методе полного поиска выполняется параллельное кодирование блока несколькими кодами Голломба – Райса. По результатам кодирования выбирается код с минимальной длиной.

Вычисление кумулятивной суммы бит бинарного представления компоненты  $\hat{E}_n$  позволяет оценить величину  $\hat{E}_n$  и выбрать параметр  $k$ , пропорциональный  $\hat{E}_n$ , при допущении, что вероятности появления наименее значимых бит  $\hat{E}_n$  подчинены равномерному закону.

Метод кодового предсказания (адаптации) является наиболее эффективным в случае, если между блоками сохраняется высокая корреляция. В этом случае для кодирования выбираются коды с параметром  $k_t = k_{t-1} + \delta_t$ ,  $k_0 = 0$ , где  $k_0$  – инициализирующий параметр;  $\delta_t \in \{\delta_i | \rho_{\delta_i} \geq \Theta\}$  – квазиоптимальное значение параметра относительного изменения  $k_t$ ;  $\rho_{\delta_i}$  – априорные вероятности события  $\{\delta_i = \delta_i | \arg \min_k l_{v,k}\}$ ;  $\Theta$  – квазивероятностный порог адаптации кода, величина которого определяет точность адаптации к статистике изображения. Из гистограммы параметра  $\delta_t$  для изображения Lena видно, что параметр  $k$  сохраняет высокую корреляцию (рис. 4).

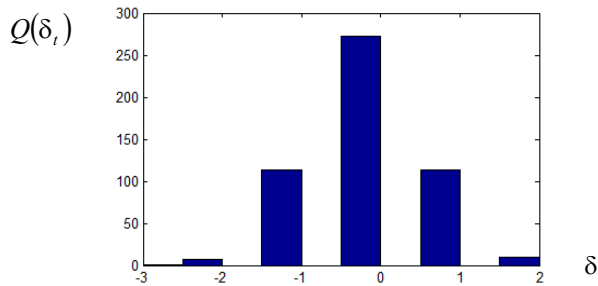


Рис. 4. Гистограмма  $Q(\delta_i)$  появления  $\delta_i$  для значения текущего оптимального параметра  $k_t$  относительного предыдущего  $k_{t-1}$  при кодировании изображения Lena

Величину корреляций  $\{\delta_i\}$  можно оценить посредством гистограммы  $Q(\delta_i)$  относительного изменения  $\{\delta_i\} = \{k_i - k_{i-1}\}$  оптимального параметра  $k$ . Из рис. 4 видно, что более 95 % оптимальных  $\delta_i$  принадлежат диапазону  $[k_{i-1} - 1; k_{i-1} + 1]$ . Следовательно, наиболее обоснованным будет использование трех значений  $k_i$ :  $k_{i-1} - 1$ ,  $k_{i-1}$  или  $k_{i-1} + 1$ .

Таким образом, кодовая адаптация обеспечивается за счет учета пространственно-статистической корреляции разностного изображения и вычисления квазиоптимального параметра кода  $k_i$  для каждого вектора  $\vec{x}_i$ .

### 3. Результаты моделирования

Результаты моделирования показывают, что выбор значений  $\theta_b$  и  $\theta_s$  двухпорогового градиентного предсказателя может осуществляться с помощью зависимости степени сжатия кодера от  $\theta_b$  и  $\theta_s$  (рис. 5) для тестовых изображений размером  $512 \times 512$ . Установлено, что наиболее эффективным является использование следующих значений:  $\theta_b = 15$  и  $\theta_s = 15$ .

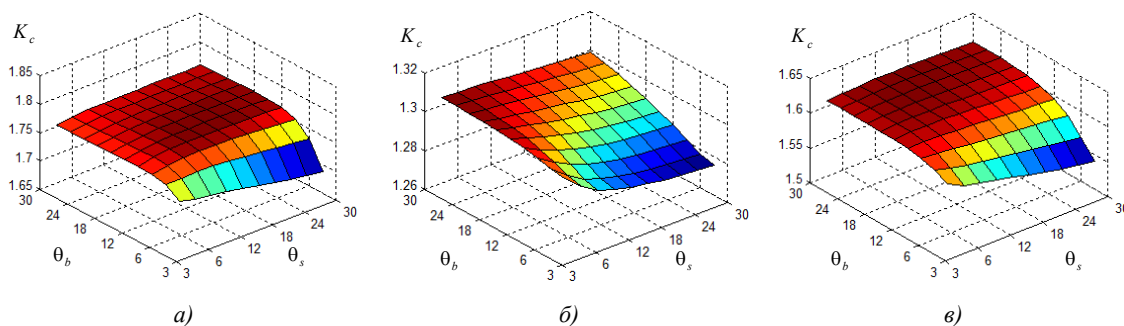


Рис. 5. Зависимости степени сжатия  $K_c$  (бит/пиксел) от выбора пороговых значений  $\theta_b$  и  $\theta_s$  для изображений: а) Lena; б) Baboon; в) France

Из результатов моделирования следует, что наиболее часто применяется маска  $\left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$  (рис. 6) из  $\left\{(0, 1, 0), (0, 0, 1), \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)\right\}$ .

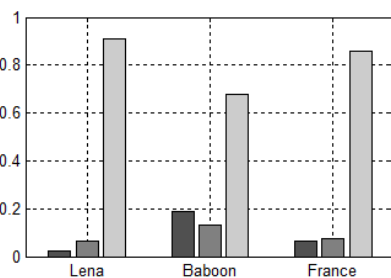


Рис. 6. Вероятности использования трех контекстов при кодировании изображений Lena, Baboon и France:  $|A - C| > \theta_b, |B - C| < \theta_s$ ;  $|B - C| > \theta_b, |A - C| < \theta_s$  и в остальных случаях

Для оценки эффективности и точности предсказания используется степень сжатия разностных изображений  $K_{ec} = \frac{b_o}{E'}$ , где  $b_o$  – максимальное число бит на пиксел исходного изображения;  $E' = \sum_m p_m \cdot \log_2 p_m$  – энтропия разностного изображения;  $p_m$  – частота появления пиксела со значением  $E_m$  (табл. 2 и 3). Для оценки эффективности снижения избыточности ис-

пользуется относительный прирост  $\Delta K$  коэффициента сжатия  $K_c$  по сравнению со степенью сжатия  $K_{ec}$  для предсказателей LOCO-1 [3], ВТРС (Binary Tree Predictive Coding), FLICS (Fast Lossless Image Compression System) [8] и градиентного предсказателя [9] (табл. 4).

Таблица 2  
Оценка степени сжатия полутоновых изображений для различных предсказателей

| Исходное изображение | Степень сжатия $K_{ec}$ |               |        |                           |       |      |
|----------------------|-------------------------|---------------|--------|---------------------------|-------|------|
|                      | DPCM                    | Трех-точечный | LOCO-1 | Градиентный предсказатель | FLICS | ВТРС |
| Lena                 | 1,71                    | 1,75          | 1,75   | 1,80                      | 1,58  | 1,45 |
| Barbara              | 1,43                    | 1,44          | 1,45   | 1,51                      | 1,37  | 1,23 |
| Baboon               | 1,19                    | 1,27          | 1,28   | 1,25                      | 1,21  | 1,10 |
| France               | 1,51                    | 1,62          | 1,64   | 1,60                      | 1,47  | 1,34 |
| Средняя $K_{ec}$     | 1,44                    | 1,50          | 1,51   | 1,52                      | 1,39  | 1,26 |

Таблица 3  
Оценка коэффициента сжатия полутоновых изображений для различных предсказателей

| Исходное изображение | Коэффициент сжатия $K_c$ |               |        |                           |       |      |      |      |
|----------------------|--------------------------|---------------|--------|---------------------------|-------|------|------|------|
|                      | DPCM                     | Трех-точечный | LOCO-1 | Градиентный предсказатель | FLICS | ВТРС | RAR  | ZIP  |
| Lena                 | 1,73                     | 1,76          | 1,76   | 1,67                      | 1,56  | 1,45 | 1,56 | 1,17 |
| Barbara              | 1,49                     | 1,52          | 1,53   | 1,43                      | 1,41  | 1,27 | 1,23 | 1,11 |
| Baboon               | 1,21                     | 1,29          | 1,29   | 1,23                      | 1,22  | 1,10 | 1,20 | 1,10 |
| France               | 1,50                     | 1,60          | 1,61   | 1,50                      | 1,44  | 1,32 | 1,50 | 1,19 |
| Средний $K_c$        | 1,48                     | 1,54          | 1,55   | 1,46                      | 1,41  | 1,29 | 1,37 | 1,14 |

Таблица 4  
Оценка относительного прироста коэффициента сжатия

| Исходное изображение | Относительный прирост $\Delta K$ |               |        |                           |       |       |
|----------------------|----------------------------------|---------------|--------|---------------------------|-------|-------|
|                      | DPCM                             | Трех-точечный | LOCO-1 | Градиентный предсказатель | FLICS | ВТРС  |
| Lena                 | 0,02                             | 0,01          | 0,01   | -0,13                     | -0,02 | 0,00  |
| Barbara              | 0,06                             | 0,08          | 0,08   | -0,08                     | 0,04  | 0,04  |
| Baboon               | 0,02                             | 0,02          | 0,01   | -0,02                     | 0,01  | 0,00  |
| France               | -0,01                            | -0,02         | -0,03  | -0,10                     | -0,03 | -0,02 |
| Средний $\Delta K$   | 0,02                             | 0,02          | 0,02   | 0,02                      | 0,02  | 0,02  |

Для оценки влияния способа формирования вектора на коэффициент сжатия используются блоки изображения размером  $16 \times 1$ ,  $8 \times 2$ ,  $4 \times 4$ , трехточечный предсказатель, вертикально-горизонтальная развертка и развертка Гильберта (табл. 5).

Таблица 5  
Влияние выбора формы блока-вектора на коэффициент сжатия для вектора размером  $S = 16$  и DPCM-предсказателя

| Выбор вектора       | Коэффициент сжатия $K_c$ |         |        |        | Средний $K_c$ |
|---------------------|--------------------------|---------|--------|--------|---------------|
|                     | Lena                     | Barbara | Baboon | France |               |
| Блок $16 \times 1$  | 1,73                     | 1,49    | 1,21   | 1,50   | 1,48          |
| Блок $8 \times 2$   | 1,74                     | 1,51    | 1,23   | 1,52   | 1,5           |
| Блок $4 \times 4$   | 1,75                     | 1,53    | 1,23   | 1,53   | 1,51          |
| Развертка Гильберта | 1,69                     | 1,46    | 1,25   | 1,53   | 1,48          |

Определено, что форма выбора вектора слабо влияет на величину коэффициента сжатия (табл. 5). Учитывая относительную сложность реализации формирования векторов из двухмерных блоков, формирование вектора из одномерного блока  $16 \times 1$  является наиболее эффективным.

Для выбора оптимального размера вектора  $\vec{x}_i$  при адаптации кода построен график зависимости коэффициента сжатия  $K_c$  от размера вектора  $S$  (рис. 7). Установлено, что наиболее оптимальный размер блока для всех классов изображений –  $16 \times 1$ .

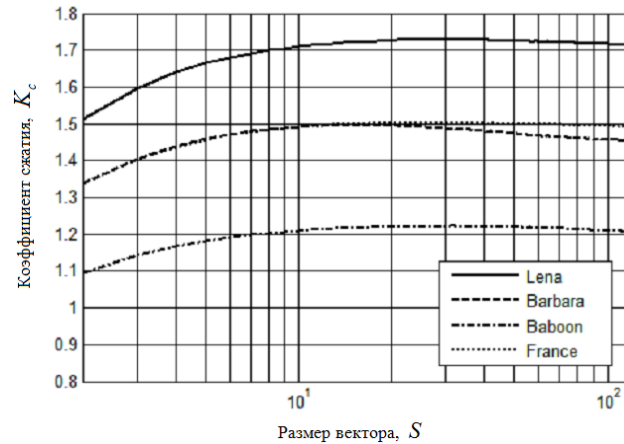


Рис. 7. Зависимость коэффициента сжатия от размера вектора  $S$  при адаптивном кодировании Голомба – Райса для различных тестовых изображений: Lena, Barbara, Baboon и France

Результаты статистического моделирования декомпозиции источника визуальной информации по кодам Голомба приведены в табл. 6 и 7. Для выявления особенностей кодовой избыточности используются уровень сжатия кодом  $k$   $Vpp_k = \sum_c \frac{V_{c,k}}{V_S}$ , где  $V_{c,k}$  и  $V_S$  – количество бит в блоке, кодируемом кодом  $k$ , и в исходном блоке соответственно; процент использования кода  $\frac{n_k}{N}$  и выигрыш энтропийного кодирования для кода  $k$   $G_k = (b_o - Vpp_k) \cdot \frac{n_k}{N}$ , где  $n_k$  – количество блоков, кодируемых кодом  $k$ ;  $N$  – общее количество блоков.

Таблица 6

Оценка статистических свойств кодовой избыточности полутонового изображения Lena

| Параметр кода $k$ | Статистические характеристики кода        |   |                            |
|-------------------|---|---|----------------------------|
|                   | Уровень сжатия кодом $Vpp_k$ , бит/пиксел | Процент использования кода, $\frac{n_k}{N}$ | Выигрыш кодирования, $G_k$ |
| 0                 | 3,40                                      | 17,5  | 0,231                      |
| 1                 | 4,12                                      | 43,7  | 0,486                      |
| 2                 | 5,09                                      | 25,5  | 0,213                      |
| 3                 | 6,09                                      | 11,7  | 0,064                      |
| 4                 | 6,84                                      | 1,3   | 0,004                      |
| 5                 | –   | 0   | 0                          |
| 6                 | –   | 0   | 0                          |
| 7                 | –   | 0   | 0                          |

Проведена оценка вычислительной сложности вычисления разностного изображения для различных предсказателей (табл. 7).



Таблица 7

Оценка вычислительной сложности различных предсказателей

| Тип предсказателя         | Битовые операции    |                 |           |            | Общая сложность      | Количество операций на пиксел |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------|------------|----------------------|-------------------------------|
|                           | сложение            | умножение       | сравнение | округление |                      |                               |
| DPCM                      | 1                   |                 |           |            | 1                    | 1                             |
| Трехточечный              | $2 + \kappa_3$      | $\kappa_3$      | 3         | 2          | $7 + 2\kappa_3$      | 8,82                          |
| LOCO-1                    | $2\kappa_3$         |                 | 5         |            | $5 + 2\kappa_3$      | 5,65                          |
| Градиентный предсказатель | $7 + 4\kappa_{3,6}$ | $4\kappa_{3,6}$ | 6         | 6          | $19 + 8\kappa_{3,6}$ | 22,3                          |
| FLICS                     | 2,2                 |                 | 2,1       |            | 4,3                  | 4,3                           |
| ВTPC                      | 1,5                 |                 |           |            | 1,5                  | 1,5                           |

Примечание:  $\kappa_3$  – коэффициент, характеризующий вероятность вычисления предсказанного значения  $\tilde{I}_{i,j}$  в зависимости от контекста  $C_\xi$ .

Для оценки влияния выбора цветового преобразования на показатели эффективности сжатия проведено моделирование алгоритма с использованием преобразований YIQ, O1O2O3, I1I2I3, YCoCg, YUUVr, YDbDr, YIUIVI, GRbRr, RCT (YCbCr) (табл. 8–10) [10, 11].

Таблица 8

Оценка коэффициента сжатия цветных изображений при использовании цветового преобразования RGB

| Исходное изображение | Тип предсказателя |              |        |
|----------------------|-------------------|--------------|--------|
|                      | DPCM              | Трехточечный | LOCO-1 |
| Lena                 | 1,64              | 1,68         | 1,66   |
| Barbara              | 1,48              | 1,50         | 1,51   |
| Baboon               | 1,20              | 1,26         | 1,26   |

Таблица 9

Оценка коэффициента сжатия цветных изображений при использовании цветового преобразования YCoCg

| Исходное изображение | Тип предсказателя |              |        |
|----------------------|-------------------|--------------|--------|
|                      | DPCM              | Трехточечный | LOCO-1 |
| Lena                 | 1,67              | 1,70         | 1,67   |
| Barbara              | 1,67              | 1,82         | 1,90   |
| Baboon               | 1,25              | 1,30         | 1,29   |

Таблица 10

Оценка коэффициента сжатия цветных изображений при использовании цветового преобразования YCrCb

| Исходное изображение | Тип предсказателя |              |        |
|----------------------|-------------------|--------------|--------|
|                      | DPCM              | Трехточечный | LOCO-1 |
| Lena                 | 1,67              | 1,72         | 1,68   |
| Barbara              | 1,68              | 1,82         | 1,91   |
| Baboon               | 1,25              | 1,30         | 1,29   |

Из табл. 8–10 видно, что влияние преобразования цветового пространства RGB в цветовые пространства YCoCg и YCbCr на коэффициент сжатия  $K_c$  зависит от типа предсказателя. Следует отметить, что целесообразность использования преобразования цветового пространства зависит от достижения требуемого соотношения между коэффициентом сжатия и быстродействия.

Результаты моделирования с использованием программной реализации предложенного алгоритма сжатия изображений на основе языка программирования C++ и стандартной библиотеки классов MFC показывают, что разработанный алгоритм обладает высокой скоростью ком-

прессии и декомпрессии, которая линейно зависит от размеров изображения и составляет не более  $2,4 \cdot 10^{-4}$  мс/пиксел (Intel CPU 3,06 GHz).

Таким образом, предложенный алгоритм сжатия изображений обеспечивает высокое отношение сжатие/вычислительная сложность за счет выбора предсказателя с высоким отношением точность предсказания/вычислительная сложность, размера кодируемого блока и энтропийного кодирования на основе кодов Голомба – Райса, что в результате дает возможность адаптироваться к изменениям в статистике контента изображения и выполнить требования по минимизации числа шагов кодирования. Для повышения сжатия цветных изображений предпочтительнее использовать трехточечный предсказатель, который в меньшей степени зависит от изображения.

### Заключение

Предложен быстрый алгоритм сжатия полутоновых и цветных изображений без потерь, основанный на использовании пространственного двухпорогового предсказателя с выбором порогов по критерию максимизации коэффициента сжатия и локальной вертикальной и горизонтальной градиентной информации, а также на блочно-адаптивном вычислении квазиоптимального параметра кода Голомба – Райса за счет учета пространственно-статистической корреляции между кодируемыми блоками. Алгоритм обеспечивает низкую вычислительную сложность (8,8 битовых операций на пиксел при использовании трехточечного двухпорогового предсказателя), высокий коэффициент сжатия (1,6–1,76) для тестовых изображений Lena, Barbara, France и не зависит от размеров изображения (квадратное, прямоугольное или кратное степени двойки).

Определено, что для эффективного уменьшения кодовой избыточности целесообразно использовать квазиоптимальное значение параметра  $\delta_i = \pm 1$  относительного изменения параметра кода  $k_i$  Голомба – Райса.

Установлено, что наиболее оптимальным числом компонент вектора для выбранных тестовых изображений является 16 и выбор формы кодируемого блока (вектора) разностного изображения незначительно влияет на коэффициент сжатия.

### Список литературы

1. Santa-Cruz, D. JPEG2000 performance evaluation and assessment / D. Santa-Cruz, T. Ebrahimi // Signal Processing: Image Communication. – 2002. – Vol. 17 (1). – P. 113–130.
2. Santa-Cruz, D. An analytical study of JPEG 2000 functionalities / D. Santa-Cruz, T. Ebrahimi // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP). – Vancouver, Canada, 2000. – Vol. 2. – P. 49–52.
3. Weinberger, M. The LOCO-I lossless image compression algorithm: Principles and standardization into JPEG-LS / M. Weinberger, G. Seroussi, G. Sapiro // IEEE Trans. Image Processing. – 2000. – Vol. 9. – P. 1309–1324.
4. Lopes, F.A. A low complexity image compression solution for onboard space applications / A.F. Lopes, R. d'Amore // SBCCI'10 Proc. of the 23d symposium on Integrated circuits and system design. – Sao Paulo, Brazil, 2010. – P. 174–179.
5. Attar, A. An accurate gradient-based predictive algorithm for image compression / A. Attar, R.M. Rad, A. Shahbahrami // MoMM'10 Proc. of the 8th Intern. Conf. on Advances in Mobile Computing and Multimedia. – Paris, France, 2010. – P. 374–377.
6. Khan, T.H. Lossless and Low-Power Image Compressor for Wireless Capsule Endoscopy / T.H. Khan, K. A. Wahid // Hindawi Publishing Corporation [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access : <http://www.hindawi.com/journals/vlsi/2011/343787/cta>. – Date of access : 29.10.2011.
7. Rice, R. Algorithms for a very high speed universal noiseless coding module / R. Rice, P-S. Yeh, W. Miller. – Pasadena, 1991. – 20 p.
8. Suzuki, N. Fast lossless image compression system based on neighborhood comparisons / N. Suzuki // United States Patent [Electronic resource]. – 2005. – Mode of access : <http://www.patents.com/us-6882750.html>. – Date of access : 29.10.2011.

9. Avramović, A. Lossless Predictive Compression of Medical Images / A. Avramović, S. Savić // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 8. – P. 27–36.

10. Van Assche, S. Lossless compression of pre-press images using a novel color decorrelation technique / S. Van Assche, W. Philips, I. Lemahieu // Pattern Recognition. – 1999. – Vol. 32. – P. 435–441.

11. Malvar, H.S. YCoCg-R: A Color Space with RGB Reversibility and Low Dynamic Range / H.S. Malvar, G.J. Sullivan // ITU [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access : [http://ftp3.itu.ch/av-arch/jvt-site/2003\\_09\\_SanDiego/JVTI014r3.doc](http://ftp3.itu.ch/av-arch/jvt-site/2003_09_SanDiego/JVTI014r3.doc). – Date of access : 29.10.2011.

Поступила 27.06.11

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
Минск, П. Бровки, 6  
e-mail: anbor@bsuir.by*

**A.A. Boriskevich, A.V. Antonchyk**

**FAST IMAGE COMPRESSION TECHNIQUE  
WITH ADAPTIVE BLOCK CODING OF GOLOMB – RICE**

A fast block algorithm for lossless image compression with a spatial-code adaptation is proposed. It is based on the use of two-level prediction mask with predefined thresholds, block-adaptive Golomb – Rice code and effective reducing redundancy by a relative change of Golomb – Rice code parameter. The simulation results of the proposed algorithm for grayscale and color images have demonstrated a high compression ratio (1.6–1.75) and a low computational complexity.