

УДК 621.39

## КОМБИНИРОВАННОЕ РАЗНОСТНОЕ, АРИФМЕТИЧЕСКОЕ И RLE-КОДИРОВАНИЕ БИТОВЫХ ПЛОСКОСТЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Б.Д.С. САДИК, О.М.Х. АЛЬМИЯХИ, М.Н. БОБОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 20 марта 2019*

**Аннотация.** Разработана структура и исследована эффективность комбинированного кодера сжатия изображений без потерь в пространственной области, использующего алгоритмы разностного, арифметического и RLE-кодирования для компактного представления битовых плоскостей изображений.

*Ключевые слова:* комбинированное кодирование, сжатие изображений без потерь, разностное кодирование, арифметическое кодирование, кодирование длин серий.

### Введение

В современных кодерах сжатия изображений [1–6] используется, как правило, один алгоритм обработки для всех битовых плоскостей. Исключением являются кодеры EZW, SPIHT, SPECK [7–9], в которых используется раздельное кодирование битовых плоскостей и предусматривается возможность использования младших битовых плоскостей с равновероятным повтором нулей и единиц без кодирования, и кодек JPEG 2000 [6], в котором предусматривается возможность использования двух алгоритмов для сжатия изображений без потерь и с потерями. Однако в рассмотренных кодерах не предусмотрено применение разных алгоритмов кодирования к различным битовым плоскостям. Эффективность раздельного кодирования битовых плоскостей анализируется в работах [10, 11], но только для кодера RLE [12]. Результаты исследования эффективности использования комбинации арифметического и RLE-кодирования приведены в работе [13], но только для нескольких типов изображений. Часто разностное кодирование используется в комбинации с арифметическим кодированием. Недостаточное исследование комбинированного подхода к кодированию изображений связано с ростом вычислительной сложности из-за дополнительных затрат на выбор алгоритма кодирования и на память для реализации нескольких алгоритмов кодирования. С развитием элементной базы рост вычислительной сложности кодирования становится менее критичным в сравнении с увеличением коэффициента сжатия.

Цель работы – исследование эффективности комбинированного кодера сжатия изображений различных типов без потерь в пространственной области на основе алгоритмов разностного, арифметического и RLE-кодирования.

### Комбинированное эффективное кодирование битовых плоскостей изображений

Для повышения коэффициента сжатия изображений без потерь предлагается использовать комбинированное эффективное кодирование на основе разностного, арифметического и RLE-алгоритмов. Сущность подхода состоит в формировании разностных кодов по строкам и столбцам изображений и использовании для сжатия старших битовых плоскостей разностей или их комбинаций нескольких кодеров различных типов ( $f_{\text{RLE}}(B(r))$  и  $f_{\text{AC}}(I_c(r_{\text{HL}}, r_{\text{HH}}))$ ), лучше учитывающих распределение их значений, и непосредственном включении в результат кодирования младших битовых плоскостей разностей ( $f_{\text{NC}}(B(r))$  при  $r \geq 0$  или  $f_{\text{NC}}(I_c(0, r_{\text{LH}}))$  при  $r_{\text{LH}} \geq 0$ ), кодирование которых не эффективно ( $\langle f_{\text{RLE}}(B(r)) \rangle \geq YX$  при  $r \geq 0$

или  $f_{AC}(I_c(0, r_{LH})) \geq (r_{LH} + 1)YX$  при  $r_{LH} \geq 0$ ) (рис. 1), где  $B(r)$  – битовые плоскости;  $f_{NC}$  – функция непосредственного переноса младших битовых плоскостей без кодирования.

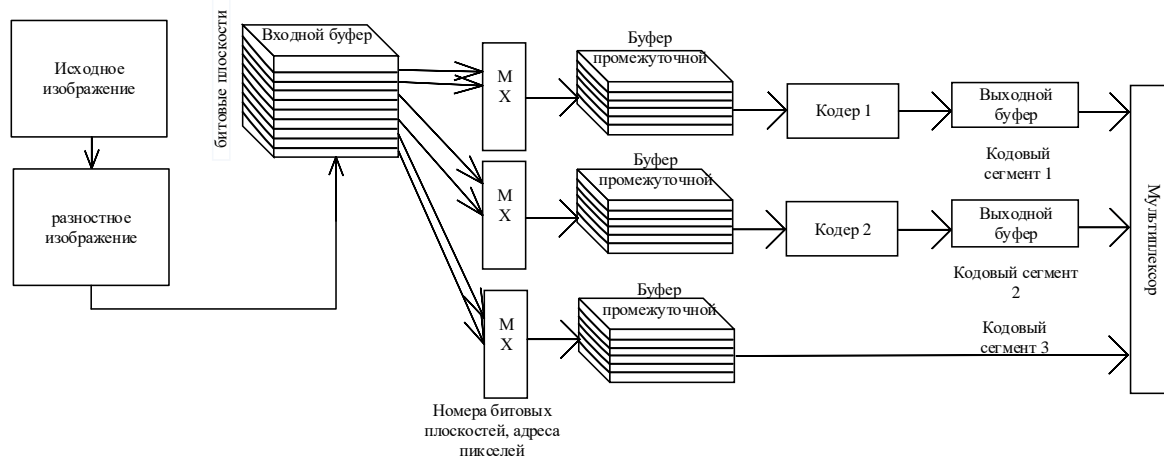


Рис. 1. Схема комбинированного эффективного кодирования битовых плоскостей изображения

Битовые плоскости  $B(r)$  формируются из одинаковых разрядов  $r$  разностей  $d(R + 3, y, x)$  пикселей  $i(R, y, x)$   $R$ -разрядного изображения  $I(R) = \|i(R, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  (3 дополнительных разряда необходимы для учета знаков разностей и увеличения абсолютных значений разностей) и представляют собой матрицу  $B(r) = \|b(r, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ , состоящую из нулей и единиц ( $b(r, y, x) = \{0, 1\}$ ), размер  $Y \times X$  которой совпадает с размером  $Y \times X$  исходного изображения  $I(R)$ . Старшая битовая плоскость  $B(R + 2)$  содержит знаки (0 – обозначает положительные числа, 1 – отрицательные). Значения  $d(R, y, x)$  и  $b(r, y, x)$  связаны выражением:

$$d(R + 3, y, x) = \begin{cases} \sum_{r=0}^{R+2} 2^r b(r, y, x) & \text{при } b(R + 2, y, x) = 0, \\ -\sum_{r=0}^{R+2} 2^r b(r, y, x) & \text{при } b(R + 2, y, x) = 1, \end{cases}$$

при  $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$ .

Комбинация из нескольких  $r_c$  битовых плоскостей разностей ( $0 < r_c < R + 3$ ) с  $r_L$  по  $r_H$  ( $r_H > r_L, r_c = r_H - r_L + 1$ ) представляет матрицу  $I_c(r_L, r_H) = \|i_c(r_L, r_H, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ , значения  $i_c(r_L, r_H, y, x)$  которой имеют  $r_c$  разрядов. В этом случае

$$i_c(r_L, r_H, y, x) = \sum_{r=r_L}^{r_H} 2^{r-r_L} b(r, y, x) \quad \text{при } y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}.$$

Для частного случая  $r_H = r_L$  справедливо равенство  $i_c(r_L, r_H, y, x) = b(r_L, y, x)$ .

В табл. 1, 2 приведены средние коэффициенты сжатия битовых плоскостей разностей 8-разрядных ( $R = 8$ ) спутниковых, портретных, медицинских полутоновых и ландшафтных тепловизионных изображений (примеры приведены на рис. 2), полученные с использованием RLE и арифметического кодеров (AC). Усреднение значений коэффициентов сжатия произведено по 8-ми тестовым изображениям каждого типа.

Таблица 1. Коэффициенты сжатия битовых плоскостей разностных кодов изображений для кодера RLE

| Битовые плоскости | Частичные и полные коэффициенты сжатия битовых плоскостей разностей изображений |                        |                         |
|-------------------|---|------------------------|-------------------------|
|                   | Полутоновые спутниковые   | Полутоновые портретные | Полутоновые медицинские |
| 8                 | 0,23  | 0,28                   | 0,35                    |
| 7                 | 3518,71   | 2048,00                | 6553,60                 |
| 6                 | 116,72  | 16,86                  | 178,09                  |
| 5                 | 9,93  | 2,78                   | 8,52                    |
| 4                 | 2,36  | 0,94                   | 1,89                    |
| 3                 | 0,58  | 0,46                   | 0,78                    |
| 2                 | 0,36  | 0,24                   | 0,57                    |
| 1                 | 0,40  | 0,20                   | 0,27                    |
| 0                 | 0,40  | 0,20                   | 0,25                    |

Таблица 2. Коэффициенты сжатия битовых плоскостей разностных кодов изображений для арифметического кодера

| Битовые плоскости | Частичные (полные) коэффициенты сжатия битовых плоскостей разностей изображений |                        |                         |
|-------------------|---|------------------------|-------------------------|
|                   | Полутоновые спутниковые   | Полутоновые портретные | Полутоновые медицинские |
| 8                 | 0,97  | 0,97                   | 1,00                    |
| 7                 | 29,75   | 24,60                  | 27,15                   |
| 6                 | 27,09   | 12,49                  | 24,22                   |
| 5                 | 13,28   | 5,03                   | 8,92                    |
| 4                 | 4,51  | 2,48                   | 3,43                    |
| 3                 | 1,60  | 1,43                   | 2,27                    |
| 2                 | 1,02  | 1,04                   | 1,49                    |
| 1                 | 0,97  | 0,97                   | 1,03                    |
| 0                 | 0,97  | 0,96                   | 0,96                    |

Кодер RLE применен отдельно для каждой битовой плоскости разностей ( $f_{RLE}(B(r))$  при  $r = \overline{0, R+2}$ ), где  $f_{RLE}$  – функция RLE-кодирования. На основе получаемого при этом объема  $\langle f_{RLE}(B(r)) \rangle$  кода (в битах) вычисляются частичные коэффициенты сжатия с помощью выражения:

$$CR_{RLE}(r) = YX / \langle f_{RLE}(B(r)) \rangle, \text{ при } r = \overline{0, R=2},$$

где  $\langle \rangle$  – оператор вычисления объема кода.



Рис. 2. Примеры тестовых изображений

Кодирование тестовых изображений целиком (без разделения на битовые плоскости) с помощью кодера RLE не приводит к сжатию ( $\langle f_{RLE}(I(R)) \rangle \geq YX$ ).

Арифметический кодер применен отдельно для старших ( $f_{AC}(i_c(r_{HL}, r_{HH}, y, x))$ ) и младших ( $f_{AC}(i_c(r_{LL}, r_{LH}, y, x))$ ) битовых плоскостей ( $r_{HH} > r_{HL}, r_{LH} = r_{HL} - 1, r_{LH} > r_{LL}, r_{LL} \geq 0$ ), где  $f_{AC}$  – функция арифметического кодирования. Частичные коэффициенты сжатия вычисляются с помощью выражений

$$CR_{AC}(r_{HL}, r_{HH}) = (r_{HH} - r_{HL} + 1)YX / \langle f_{AC}(I_c(r_{HL}, r_{HH})) \rangle,$$

$$CR_{AC}(r_{LL}, r_{LH}) = (r_{LH} - r_{LL} + 1)YX / \langle f_{AC}(I_c(r_{LL}, r_{LH})) \rangle.$$

В табл. 3 приведены наиболее эффективные комбинации арифметического и RLE кодеров для битовых плоскостей разностных кодов тестовых изображений, и коэффициенты сжатия  $CR_C$ , соответствующие этим комбинациям.

Таблица 3. Наиболее эффективные комбинации арифметического и RLE кодеров для разностных кодов изображений

| Битовые плоскости | Комбинации арифметического и RLE кодеров для разностных кодов изображений |                        |                         |
|-------------------|---|------------------------|-------------------------|
|                   | Полутоновые спутниковые   | Полутоновые портретные | Полутоновые медицинские |
| 8                 | NC  | NC                     | NC                      |
| 7                 | RLE   | RLE                    | RLE                     |
| 6                 | RLE   | RLE                    | RLE                     |
| 5                 | AC  | AC                     | AC                      |
| 4                 | AC  | AC                     | AC                      |
| 3                 | AC  | AC                     | AC                      |
| 2                 | AC  | AC                     | AC                      |
| 1                 | NC  | NC                     | AC                      |
| 0                 | NC  | NC                     | NC                      |
| $CR_C$            | 2,05  | 1,85                   | 2,29                    |
| $CR_{AC}$         | 2,01  | 1,82                   | 2,23                    |
| $CR_{RLE}$        | 1,76  | 1,48                   | 1,72                    |

Коэффициент сжатия  $CR_C$  при комбинированном эффективном кодировании вычисляется с помощью выражения

$$CR_C = \frac{RYX}{\sum_{m=1}^M \langle f_{RLE}(B(r(m))) \rangle + \sum_{n=1}^N \langle f_{AC}(I_c(r_L(n), r_H(n))) \rangle + \sum_{p=0}^{P-1} \langle f_{NC}(B(p)) \rangle}$$

при  $R = M + N + P$ ,  $r_H(n) > r_L(n)$ ,  $M \geq 0, N \geq 0, P \geq 0$ , где  $M$  – число битовых плоскостей, кодируемых с помощью кодера RLE;  $N$  – число битовых плоскостей, кодируемых с помощью арифметического кодера;  $P$  – число битовых плоскостей, непосредственно переносимых в результирующий код.

Исходя из табл. 3, для повышения коэффициента сжатия предлагается следующее правило комбинированного кодирования разностей пикселей изображений, определяющее формирование результирующего кода  $C_C$ : необходимо использовать арифметический кодер для старшей знаковой плоскости и битовых плоскостей 5–2, кодер RLE – для битовых плоскостей 6–7, перенос без кодирования – для битовых плоскостей 8 и 1–0.

Из табл. 3 следует, что комбинированное разностное, арифметическое и RLE-кодирование позволяет повысить коэффициент сжатия изображений в среднем в  $CR_C/CR_{AC} = 1,02$  и  $CR_C/CR_{RLE} = 1,25$  раза по сравнению с арифметическим и RLE-кодированием соответственно.

### Заключение

Установлена эффективность комбинированного разностного, арифметического и RLE-кодирования для сжатия изображений. Выбор оптимальных комбинаций битовых плоскостей разностных кодов изображений для арифметического и RLE кодирования позволяет повысить коэффициент сжатия в среднем в 1,02 и 1,25 соответственно.

### COMBINED DIFFERENCE, ARITHMETIC AND RLE-CODING OF IMAGE BIT PLAYS

B.S.S. SADIK, O.M.Kh. ALMIYANI, M.N. BOBOV

**Abstract.** A structure and efficiency of combined lossless image compression codec in the spatial domain using arithmetic and RLE-coding algorithms for compact representation of bit planes of the image was developed and researched.

*Keywords:* combined coding, lossless image compression, differential coding, arithmetic coding, run length coding.

### Список литературы

1. Ватолин Д. [и др.] Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео М: Диалог-МИФИ, 2003.
2. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука М: Техносфера, 2004.
3. Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Методы сжатия изображений, аудиосигналов и видео СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
4. Гонсалес Р. Вудс Р. Цифровая обработка изображений М: Техносфера, 2006.
5. Ziv J., Lempel A. // IEEE Transactions on Information Theory, IT-23. 1977. P. 337–343.
6. Taubman D.S., Marcellin M.W. JPEG2000: image compression fundamentals, standards, and practice Springer–Verlag, 2002.
7. Shapiro J.M. // IEEE Trans. Signal Processing. 1993. № 41. P. 3445–3462.
8. Said A., Pearlman W.A. // IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. 1996. Vol. 6. P. 243–250.
9. Islam A., Pearlman W.A. // ISO/IEC/JTC1/SC29, WG1. 1998. № 873. P. 312–326.
10. Аль-Бахдили Х.К. [и др.] // Докл. БГУИР. 2016. № 2 (96). С. 63–69.
11. Al-Bahadily H.K. [et al.] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2016. Vol. 7, No. 7. P. 250–255.
12. Golomb S.W. // IEEE Transactions on Information Theory. July, 1966. P 399–401.
13. Abdmouleh M.K., Masmoudi A., Bouhleb M.S. // Journal of Software Engineering and Applications. 2012. No. 5. P. 41–44.