

УДК 621.397

DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-1-195-204

Разработка метода субполосного сжатия изображений

¹⁾ Лубков И.И., ²⁾ Жиляков Е.Г., ²⁾ Трубицына Д.И., ³⁾ Заливин А.Н.

¹⁾ ООО «Технопроект», Россия, 308009, г. Белгород, ул. Корочанская, 132а

²⁾ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

³⁾ Белгородский университет кооперации, экономики и права,
Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, 116а

E-mail: ii.lubkov@yandex.ru, zhilyakov@bsu.edu.ru, trubitsyna@bsu.edu.ru, zalivin@bsu.edu.ru

Аннотация. В работе представлен метод субполосного сжатия изображений. Описаны теоретические основы применения базиса собственных векторов субполосных матриц в задаче сжатия изображений земной поверхности (ИЗП). Показаны основные этапы уменьшения битовых представлений ИЗП. Представлены результаты реализации метода в программной среде MATLAB. В качестве исходных изображений использованы монохромные снимки земной поверхности пригорода, редколесья и портового района города. Проведен сравнительный анализ результатов сжатия для алгоритма JPEG2000 и метода субполосного сжатия. Показаны степени сжатия ИЗП порядка 80, 500 и 1000 раз.

Ключевые слова: сжатие изображений, частотный субинтервал, субполосная матрица, резкость изображения, изображение земной поверхности

Благодарности: исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00241 а.

Для цитирования: Лубков И.И., Жиляков Е.Г., Трубицына Д.И., Заливин А.Н. 2022. Разработка метода субполосного сжатия изображений. Экономика. Информатика. 49(1): 195–204. DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-1-195-204

Development of a method subband compression pictures

¹⁾ Ilya I. Lubkov, ²⁾ Evgeniy G. Zhilyakov, ²⁾ Diana I. Trubitsyna, ³⁾ Alexander N. Zalivin

¹⁾ Tehnoproekt LLC, 132a Korochanskaya St, Belgorod, 308009, Russia

²⁾ Belgorod National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 300815, Russia

³⁾ Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St, Belgorod, 308023, Russia
E-mail: ii.lubkov@yandex.ru, zhilyakov@bsu.edu.ru, trubitsyna@bsu.edu.ru, zalivin@bsu.edu.ru

Abstract. The article presents a method of subband image compression. Describes the theoretical foundations of the applying eigenvectors basis of subband matrices in the question of earth surface pictures (ESP) compression. Shows the main stages of reducing the bit representations of the ESP. Presented the results of the implementation of the method in the MATLAB software environment. Monochrome images of the earth's surface of the suburbs, light forests, and the port area of the city were used as initial images. Has been conducted a comparative analysis of the compression results for the JPEG2000 algorithm and the subband compression method. The ESP compression ratio is approximately 80, 500 and 1000 times. The distortions introduced by compression algorithms are described. According to the experimental data obtained, the subband compression method, in comparison with the JPEG2000 algorithm, demonstrates a similar image quality with a compression ratio of up to 100 times, and a better image quality with a compression of more than 100 times. The sub-band method has twice the sharpness index, retains the legibility and recognition of the image when compressed by 500 and 1000 times.

Keywords: image compression, frequency subinterval, subband matrix, image sharpness, earth's surface pictures

Acknowledgments: the research was supported by RFBR grant No. 20-07-00241 а.



For citation: Lubkov I.I., Zhilyakov E.G., Trubitsyna D.I., Zalivin A.N. 2022. Development of a method subband compression pictures. Economics. Information technologies. 49(1): 195–204 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2022-49-1-195-204

Введение

В настоящее время изображения земной поверхности (ИЗП) являются важным источником информации, используемым для мониторинга различных показателей состояния сельскохозяйственных территорий, производственных объектов, морских акваторий и русел рек, лесных массивов, пустынных и степных районов, населенных пунктов и прочих объектов. ИЗП получают при помощи дистанционного зондирования земли, используя оптико-электронные системы, установленные на летательные аппараты. Развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволило сделать доступным и экономически выгодным использование ИЗП в решении локальных задач мониторинга земной поверхности с целью их анализа для принятия различных управленческих решений. Полученные ИЗП применяют в своей практике сельскохозяйственные, проектные, строительные и эксплуатирующие организации, горно-обогатительные комбинаты, предприятия лесной промышленности, администрации, службы чрезвычайных ситуаций, безопасности и другие [Шовенгердт, 2010; Чандра, Гош 2008; Павлушенко, Евстафьев, Макаренко 2006; Трифонова, Мищенко, Краснощеков 2005]. Многие задачи требуют передачу изображений в процессе полета наземному комплексу управления (НКУ) для их обработки и анализа. Фотокамеры БПЛА, применяемых в задачах мониторинга земной поверхности, характеризуются высокой разрешающей способностью матриц, порядка 20–24 мегапикселей. Передача таких изображений требует высокоскоростного канала связи, для реализации которого необходима радиовидимость между БПЛА и НКУ с компенсацией большого затухания сигнала на трассе посредством увеличения выходной мощности передатчика либо увеличения коэффициентов усиления антенного оборудования [Боев, 2015]. Для экономного использования пропускной способности каналов связи необходимо уменьшить количество битовых представлений ИЗП посредством применения алгоритмов сжатия изображений.

На сегодняшний день существует несколько основных алгоритмов сжатия статических изображений JPEG и JPEG2000. Данные методы осуществляют сжатие на основе частотной фильтрации, применяя дискретное косинус-преобразование (JPEG) или дискретное вейвлет-преобразование (JPEG2000) [Гонсалес, Вудс, 2006]. Одной из проблем базисов косинус- и вейвлет-преобразований является приближенное нахождение доли энергии в некотором частотном интервале. ИЗП характеризуются наличием повторяющихся объектов, которые задают периодичность или квазипериодичность изменения яркости изображения, что в свою очередь приводит к концентрации энергии в определенных частотных интервалах [Жиляков, Черноморец 2009]. Таким образом, в задаче сжатия ИЗП в целях повышения степени сжатия адекватным является применение базиса, позволяющего адекватно отразить свойство сосредоточенности энергии в малой доле области пространственных частот.

Такую возможность представляет базис собственных векторов субполосных матриц, что используется в рамках данной статьи.

Основная часть

Изображение Φ обычно представляется в виде матрицы яркости $\Phi=(f_{ik}), i=1,2,\dots,M, k=1,2,\dots,N$, значения элементов которой соответствуют значению яркости отдельного пикселя (точки изображения) [Жиляков, Черноморец 2009].

Для выявления квазипериодических компонент изображения предлагается переходить в двумерную нормированную частотную область Ω , частоты u и v в которой изменяются в диапазоне $[-\pi,\pi]$

$$\pi \leq u, v \leq \pi.$$

Одной из наиболее важных характеристик изображения является значение доли энергии P_Ω в некотором прямоугольном частотном интервале (субинтервале) Ω

$$P_\Omega = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{(u,v) \in \Omega} |F(u, v)|^2 dudv, \quad (1)$$

где в качестве интервала Ω рассматривается следующая центрально-симметричная область частотной плоскости

$$\Omega: \{ \Omega(u, v) \mid (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [\beta_1, \beta_2]) \cup (u \in [\alpha_1, \alpha_2], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [-\beta_2, -\beta_1]) \cup (u \in [-\alpha_2, -\alpha_1], v \in [\beta_1, \beta_2]) \}, \quad (2)$$

где $0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \leq \pi$.

Точное значение доли энергии P_Ω изображения Φ в субинтервале Ω определяется следующим выражением

$$P_\Omega = \text{tr}ec (A^T \cdot \Phi \cdot B \cdot \Phi^T), \quad (3)$$

где матрицы $A=(a_{i_1 i_2})$, $i_1, i_2=1, 2, \dots, M$, и $B=(b_{k_1 k_2})$, $k_1, k_2=1, 2, \dots, N$, – симметрические субполосные матрицы, значения элементов которых зависят только от размерности изображения и значений частот на границах субинтервала Ω , и определяются выражениями [Жиляков, Черноморец, 2009]

$$a_{i_1 i_2} = \begin{cases} \frac{\text{Sin}(\alpha_2(i_1 - i_2)) - \text{Sin}(\alpha_1(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases} \quad (4)$$

$$b_{k_1 k_2} = \begin{cases} \frac{\text{Sin}(\beta_2(k_1 - k_2)) - \text{Sin}(\beta_1(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2. \\ \frac{\beta_2 - \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases} \quad (5)$$

Поскольку матрицы A и B являются симметрическими, то их можно представить в следующем виде

$$A = Q_A L_A Q_A^T, \quad (6)$$

$$B = Q_B L_B Q_B^T,$$

где столбцы матриц Q_A и Q_B составлены из значений собственных векторов, матриц A и B соответственно,

$$Q_A = (\vec{q}_{A1}, \vec{q}_{A2}, \dots, \vec{q}_{AM}), \quad (7)$$

$$Q_B = (\vec{q}_{B1}, \vec{q}_{B2}, \dots, \vec{q}_{BN}),$$

матрицы L_A и L_B – диагональные матрицы, составленные из собственных чисел матрицы A и B соответственно,

$$L^A = \text{diag}(\lambda_1^A, \lambda_2^A, \dots, \lambda_M^A), \quad (8)$$

$$L^B = \text{diag}(\lambda_1^B, \lambda_2^B, \dots, \lambda_N^B).$$



В дальнейшем для простоты предполагается упорядоченность собственных чисел по убыванию, то есть

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_N > 0.$$

Ввиду ортогональности матриц собственных векторов справедливо соотношение

$$\Phi = Q_A Q_A^T \Phi Q_B Q_B^T. \quad (9)$$

Поэтому матрицу

$$W_\Omega = Q_A^T \Phi Q_B \quad (10)$$

естественно называть субполосным представлением ИЗП, которое позволяет согласно (9) его восстановить.

Уменьшение количества битовых представлений изображения методом субполосного сжатия осуществляется за счет следующих операций.

Величина собственного числа равна доле энергии, приходящейся на заданный интервал Ω , для соответствующего собственного вектора [Жиляков, Черноморец, 2009]. Таким образом, при осуществлении операции субполосного преобразования (10) и восстановления (9), естественно применять только те собственные векторы субполосных матриц A и B , которые соответствуют ненулевым собственным числам.

Количество ненулевых собственных чисел этих матриц J_a и J_b зависит от размерности матрицы яркости Φ ($M \times N$) и размера субинтервала $\Omega = (0: \pi/m, 0: \pi/n)$,

$$J_a = 2 \left\lceil \frac{M}{2m} \right\rceil + 2 \quad \text{и} \quad J_b = 2 \left\lceil \frac{N}{2n} \right\rceil + 2, \quad (11)$$

где операция [выражение] означает операцию взятия целой части «выражения» [Жиляков, Черноморец 2009].

Таким образом, коэффициент сжатия за счет такого сокращения элементов матрицы (11) определяется выражением,

$$K_{c1} = \frac{M \times N}{J_a \times J_b}. \quad (12)$$

Например, изображение Φ размерностью ($M \times N$) 1000x1000 пикселей с частотным интервалом $\Omega = (0: \pi/10, 0: \pi/10)$, используя ненулевые собственные векторы Q_A и Q_B , имеет субполосное представление W_Ω размерностью ($J_a \times J_b$) 102x102, получаем коэффициент сжатия $K_{c1} = 96,12$ раз.

Далее выполняется малоразрядное квантование соответствующих элементов матрицы субполосного представления изображения W_Ω , по уровню. Сохраняются шаг квантования, матрица значений шагов квантования и знаковая матрица разрядностью 1 бит. Так, при стандартной разрядности изображения 8 бит, применяя 3-разрядное квантование плюс 1-знаковый разряд, получаем сжатие изображения еще в 2 раза.

Последним этапом является применение кодов Хаффмана к матрицам шагов квантования и знаковой матрице. Согласно экспериментальным данным, алгоритм Хаффмана уменьшает количество битовых представлений матрицы шагов квантования для 4 разрядов ≈ 3 раза, для 3 разрядов в $\approx 4-5$ раз, знаковой матрицы в ≈ 8 раз.

Итого, предполагаемый коэффициент сжатия можно определить следующим выражением:

$$K_c = \frac{M \times N \times N_d}{\left(\frac{J_a \times J_b \times N_{kv}}{C_{H1}}\right) + \left(\frac{J_a \times J_b}{C_{H2}}\right)}, \quad (13)$$

где N_d – разрядность исходного изображения, N_{kv} – количество разрядов квантования, C_{H1} и C_{H2} – коэффициент сжатия алгоритма Хаффмана для матрицы шагов квантования и знаковой матрицы соответственно.

Так, для изображения размерностью 1000x1000 пикселей с глубиной цвета 8 бит при субполосном сжатии с частотным интервалом $\Omega=(0:\pi/10, 0:\pi/10)$, четырехразрядном представлении, получаем общий коэффициент сжатия:

$$K_c = \frac{1000 \times 1000 \times 8}{\left(\frac{102 \times 102 \times 3}{5}\right) + \left(\frac{102 \times 102}{8}\right)} = 699.$$

Вычислительные эксперименты

Метод субполосного сжатия изображений реализован в программной среде MATLAB. Ниже представлены результаты сжатия монохромных ИЗП с глубиной цвета 8 бит, для различных участков земной поверхности. Сравнение осуществляется с алгоритмом JPEG2000, т. к. алгоритм JPEG не способен достигать степеней сжатия более 100.

Для представленных ниже изображений рассчитана мера резкости K_p по строкам и столбцам согласно выражению:

$$K_p = \frac{\sum(a_i - a_{i+1})}{a_{max} - a_{min}}, \quad (14)$$

где a_i – элемент матрицы яркости.

Согласно результатам исследования, алгоритм JPEG2000 при уровне сжатия в 76 раз проявляет характерное размытие, сглаживание текстур и объектов, особенно заметно в левом верхнем углу, при частичном слиянии лесопосадки и дороги (рис. 1.а). Субполосный метод при уровне сжатия 77 раз имеет меньший показатель резкости, однако лучше передает свойства текстур и поверхностей, частично видна дорожная разметка (рис. 1.в).

При уровне сжатия 520 для JPEG2000 контуры домов практически неразличимы, местами дорога сливается со зданиями, субполосный метод при сжатии в 593 раза обладает большей резкостью и сохраняет контуры дорог, здания еще различимы, можно произвести подсчет строений (рис. 1 г, е).

При уровне сжатия 1033 алгоритмом JPEG2000 узнаваемыми остаются только наиболее контрастные объекты. При сжатии в 1084 раз субполосным методом ИЗП остается все еще узнаваемым, различимы контуры домов и кварталов. Для алгоритма JPEG2000 сжатие в 1033 раз является максимальным (рис. 1 ж, и).

На следующем ИЗП при уровне сжатия 78 алгоритм JPEG2000 и субполосный метод показывают схожие результаты, однако субполосный более точно передает текстуры поверхностей, это можно наблюдать на кроне дерева слева сверху, детальных тенях дерева справа снизу и вытоптанной траве в центре.

При сжатии в 500 и 1000 раз алгоритмом JPEG2000 наблюдается сильное размытие поверхностей и вдвое меньшая резкость относительно субполосного метода при сопоставимых уровнях сжатия. Субполосный метод передает более естественное восприятие ИЗП с сохранением узнаваемости объектов (рис. 2 г, е, рис. 3 а, в).

Далее на ИЗП портового района города при степени сжатия 77 для JPEG2000 и 80 для субполосного сжатия наблюдаются схожие результаты, однако, субполосный метод более детально передает структуру поверхности воды и более четкие грани улиц и пирсов (рис. 4).

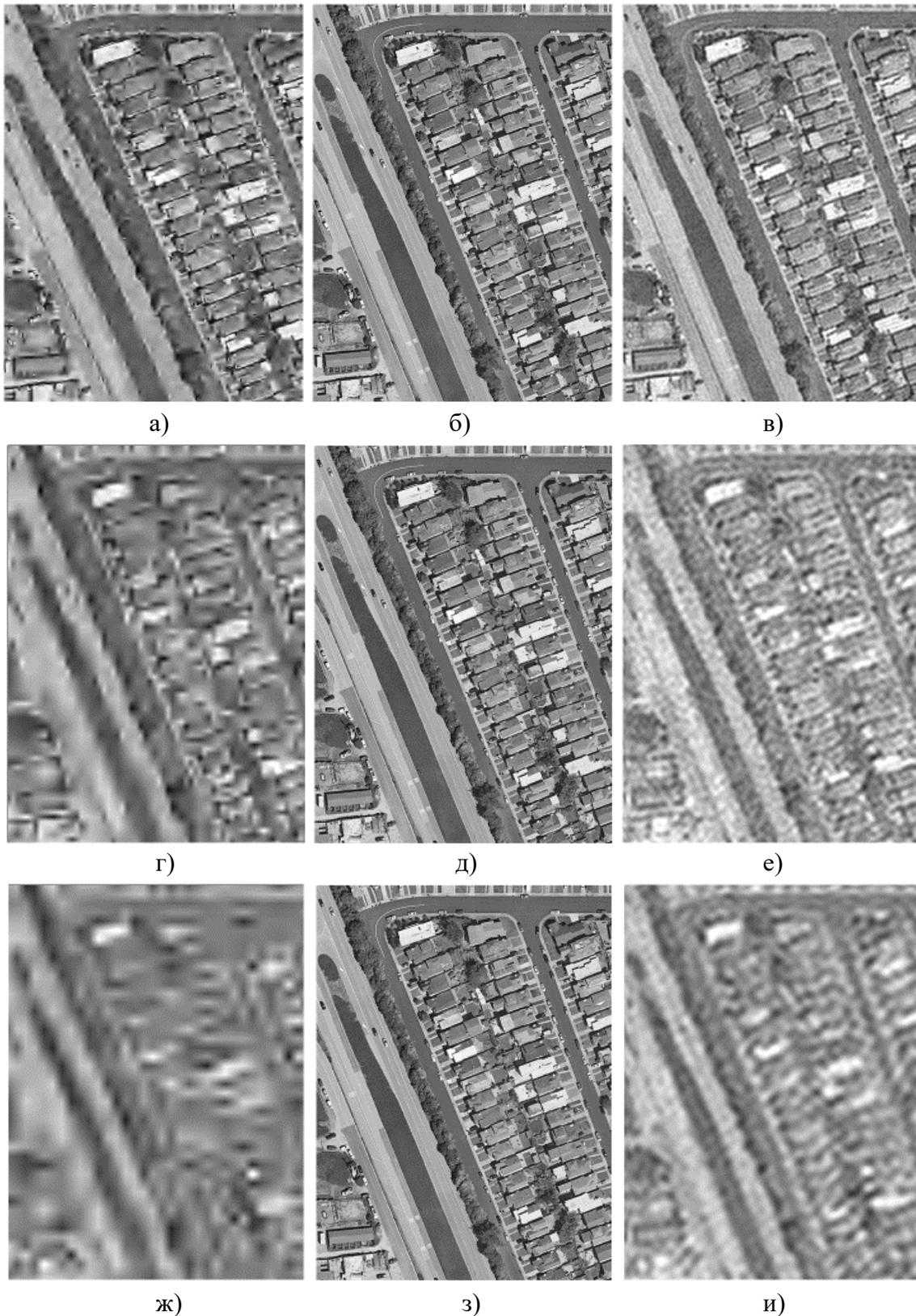


Рис. 1. Результаты сжатия ИЗП: а) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=76$, $K_p=26/23,4$; б), д), з) исходное изображение $K_r=63/60$; в) субполосное сжатие $K_c=77$, $K_p=22/21$; г) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=520$, $K_p=10/10$; е) субполосное сжатие $K_c=593$, $K_p=12,8/12,4$; ж) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=1033$, $K_p=6/6$; и) субполосное сжатие $K_c=1084$, $K_p=9/9$
Fig. 1. Compression results of the ESP: a) JPEG2000 compression ratio $K_c=76$, $K_p=26/23,4$; b), d), z) original image $K_r=63/60$; c) subband compression $K_c=77$, $K_p=22/21$; d) JPEG2000 compression ratio $K_c=520$, $K_p=10/10$; e) subband compression $K_c=593$, $K_p=12,8/12,4$; f) subband compression $K_c=593$, $K_p=12,8/12,4$; g) JPEG2000 compression ratio $K_c=1033$, $K_p=6/6$; i) subband compression $K_c=1084$, $K_p=9/9$

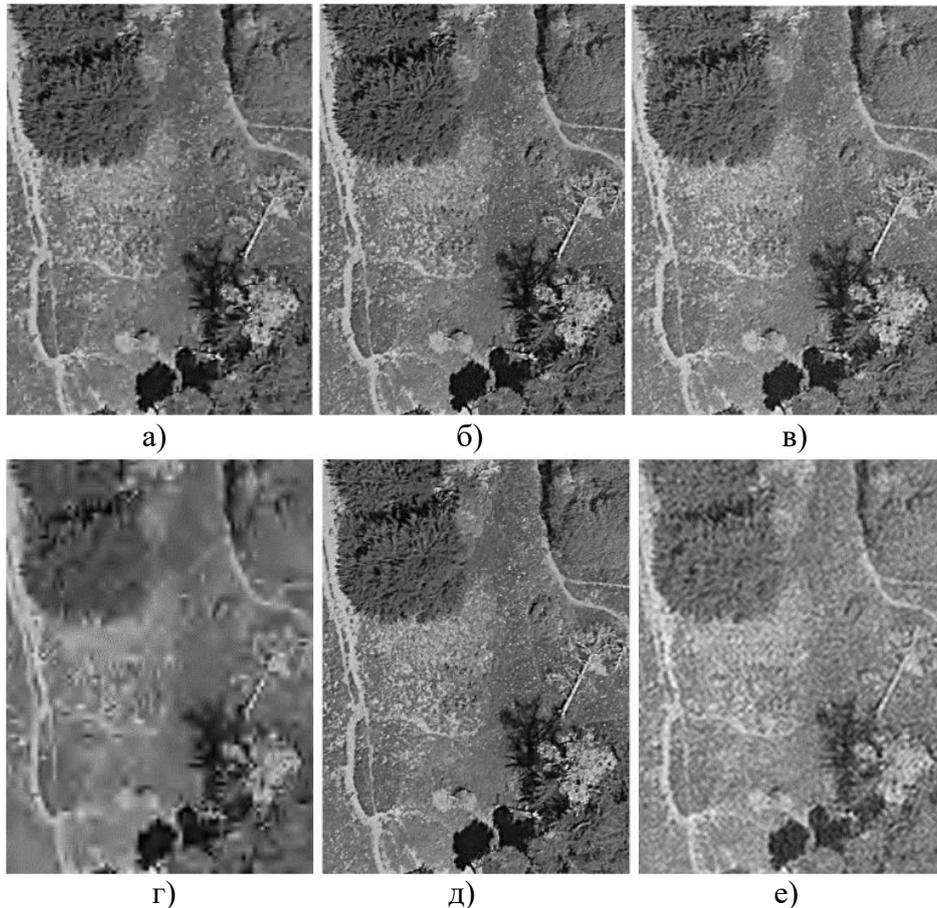


Рис. 2. Результаты сжатия ИЗП: а) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=78$, $K_r=15/15$;
б), д) исходное изображение $K_r=22/21$; в) субполосное сжатие $K_c=78$, $K_r=16/16$;
г) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=512$, $K_r=5/6,4$; е) субполосное сжатие $K_c=517$, $K_r=10/11$
Fig. 2. Compression results of the ESP: a) JPEG2000 compression ratio $K_c=78$, $K_r=15/15$;
b), e) original image $K_r=22/21$; c) subband compression $K_c=78$, $K_r=16/16$; d) JPEG2000 compression ratio
 $K_c=512$, $K_r=5/6,4$; f) subband compression $K_c=517$, $K_r=10/11$

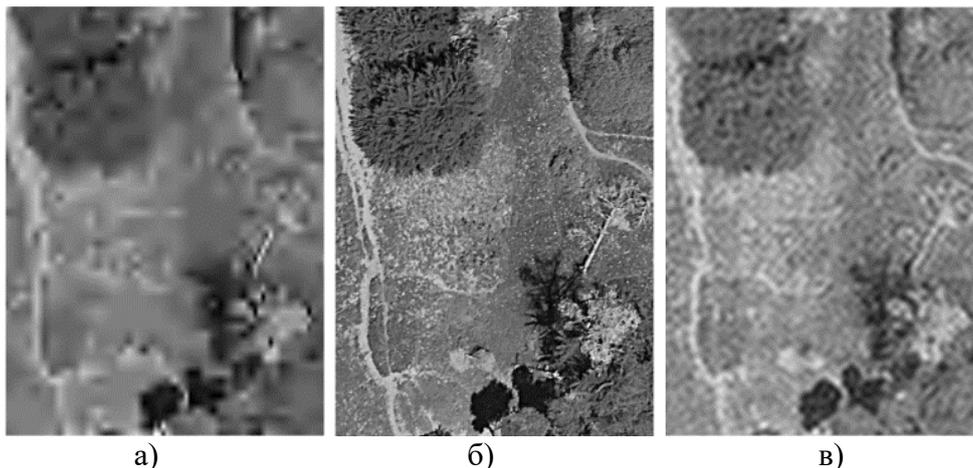


Рис. 3. Результаты сжатия ИЗП: а) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=1000$, $K_r=3/3,8$;
б) исходное изображение $K_r=22/21$; в) субполосное сжатие $K_c=1161$, $K_r=6,6/7,3$
Fig. 3. Compression results of the ESP: a) J JPEG2000 compression ratio $K_c=1000$, $K_r=3/3,8$;
b) original image $K_r=22/21$; c) subband compression $K_c=1161$, $K_r=6,6/7,3$

Результаты субполосного сжатия в 631 и 1157 раз при сопоставимых уровнях сжатия демонстрируют практически вдвое большую резкостью и лучшую узнаваемость, все еще различимую структуру кварталов, более детальное отображение прибрежной грани (рис. 5).

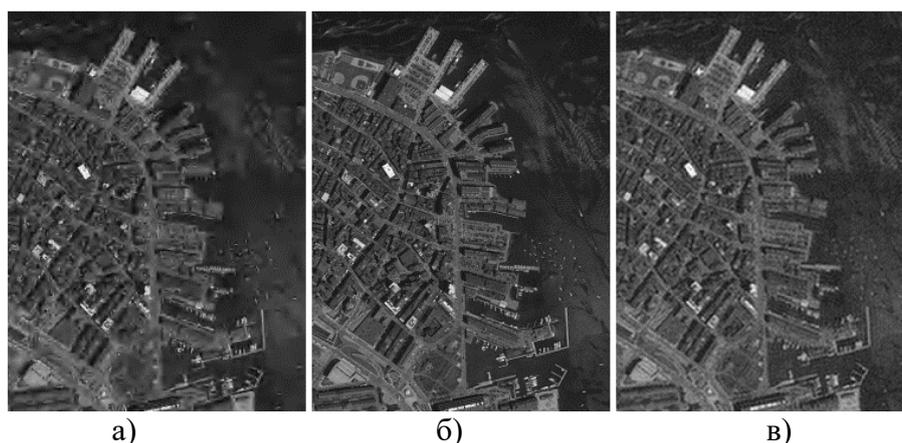


Рис. 4. Результаты сжатия ИЗП: а) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=77$, $K_r=11/11$;
б) исходное изображение $K_r=34/32$; в) субполосное сжатие $K_c=80$, $K_r=11/11$
Fig. 4. Compression results of the ESP: a) JPEG2000 compression ratio $K_c=77$, $K_r=11/11$;
b) original image $K_r=34/32$; c) subband compression $K_c=80$, $K_r=11/11$

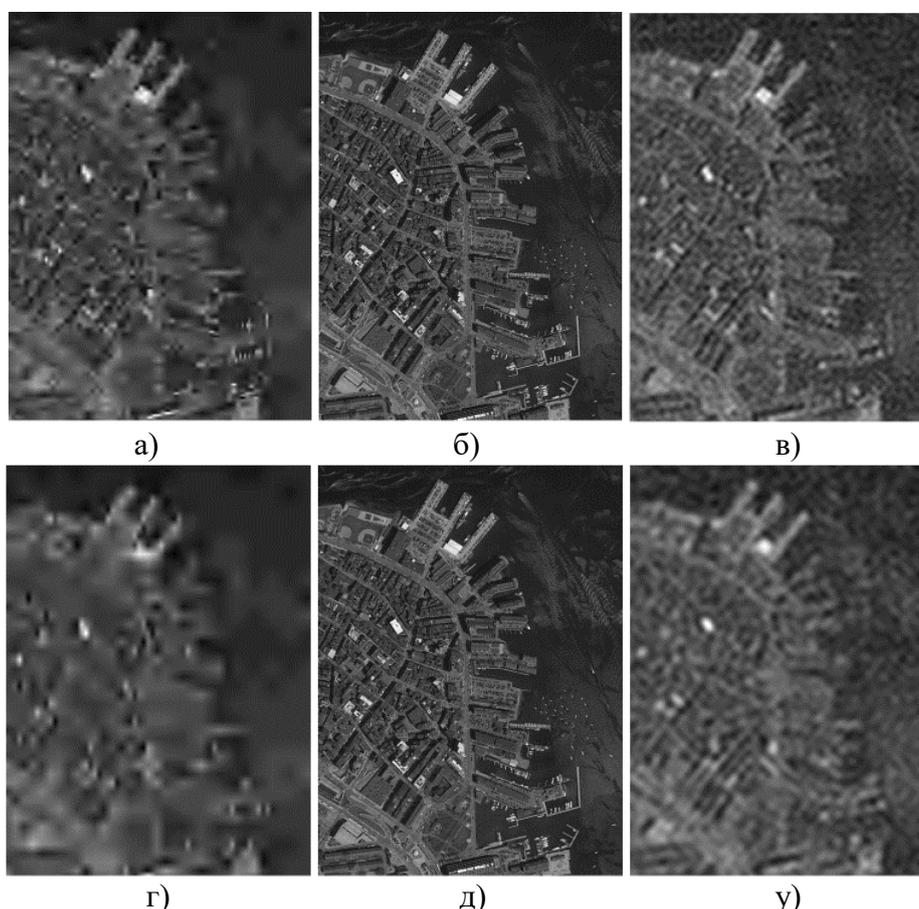


Рис. 5. Результаты сжатия ИЗП: а) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=525$, $K_r=4,8/4,6$;
б), д), исходное изображение $K_r=34/32$; в) субполосное сжатие $K_c=631$, $K_r=7,1/7,1$;
г) JPEG2000 коэффициент сжатия $K_c=1000$, $K_r=2,8/3,1$; е) субполосное сжатие $K_c=1157$, $K_r=5,3/5,3$
Fig. 5. Compression results of the ESP: a) JPEG2000 compression ratio $K_c=525$, $K_r=4.8/4.6$;
b), e) original image $K_r=34/32$; c) subband compression $K_c=631$, $K_r=7.1/7.1$; d) JPEG2000 compression
ratio $K_c=1000$, $K_r=2.8/3.1$; f) subband compression $K_c=1157$, $K_r=5.3/5.3$

Заклучение

Разработанный метод субполосного сжатия позволяет достигать степеней сжатия 500 и более с сохранением узнаваемости изображения земной поверхности. В сравнении с алгоритмом

JPEG2000, демонстрирует схожее качество изображения при степени сжатия до 100 раз, и лучшее качество изображения при сжатии более 100 раз (250, 500, 1000). При сжатии в 500 и 1000 раз обладает вдвое большим показателем резкости, сохраняет разборчивость и узнаваемость изображения. Метод имеет гибкую настройку степени сжатия в зависимости от уровней квантования субполосного представления изображения W_{Ω} и размеров частотного диапазона Ω .

Список литературы

- Гонсалес Р., Вудс Р. 2012. Цифровая обработка изображений. Издание 3-у, исправленное и дополненное. Пер. с англ. М.: Техносфера, 1104.
- Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. 2006. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. Пер. с англ. М.: Техносфера, 616.
- Жиляков Е.Г., Черноморец А.А. 2009. Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений. Белгород: Изд-во ГиК, 146.
- Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. 2000. Обработка изображений. Технология, методы, применение. М.: Амалфея, 304.
- Красильников Н.Н. 2001. Цифровая обработка изображений. М.: Вузовская книга, 320.
- Смоленцев Н.К. 2009. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 448.
- Сергиенко А.Б. 2011. Цифровая обработка сигналов. СПб.: БХВ-Петербург, 768.
- Ричард Л. 2006. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. М., ООО «Бином-Пресс», 656.
- Смит С. 2018. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. Пер. с англ. М. ДМК-Пресс, 718.
- Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. 2003. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 384.
- Сэлмон, Д. 2004. Сжатие данных, изображений и звука. Пер. с англ. М.: Техносфера, 365.
- Чуи К. 2001. Введение в вейвлеты. Пер. с англ. М.: Мир, 416.
- Шовенгердт Р.А. 2010. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Пер. с англ. М.: Техносфера, 560.
- Чандра А.М., Гош С.К. 2008. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Пер. с англ. М.: Техносфера, 312.
- Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко И. 2006. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. М.: Изд-во «Права человека», 612.
- Трифонов Т.А., Мищенко Н.В., Краснощекоев А.Н. 2005. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М.: Академический Проект, 349.
- Боев Н.М., Шаршавин П.В., Нигруца И.В. 2015. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния. Таганрог: Известия ЮФУ. Технические науки. 7: 147–158.
- Боев Н.М. 2012. Анализ командно-телеметрической радиопередачи с беспилотными летательными аппаратами. Красноярск: Вестник СибГАУ. 86–91.
- Никифоров М., Костяшкин Л. 2016. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 240.
- Burrus C.S. 1998. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, 268.

References

- Gonzalez R., Woods R. 2008. Digital Image Processing. 3rd Edition. NJ: Prentice Hall, 977. (in Russian)
- Gonzalez R., Woods R., Steven L. 2004. Digital image processing using MATLAB. NJ: Prentice Hall, 609. (in Russian)
- Zhilyakov E.G., Chernomorets A.A. 2009. Variatsionnyie algoritmyi analiza i obrabotki izobrazheniy na osnove chastotnyih predstavleniy [Variational Algorithms for Image Analysis and Processing Based on Frequency Representations], Belgorod: GiK Publishing House, 146.
- Ablameyko S.V., Lagunovskiy D.M. 2000. Obrabotka izobrazheniy. Tehnologiya, metodyi, primenenie [Image processing. Technology, methods, application]. Moscow.: Amalfeya, 304.
- Krasilnikov N.N. 2001. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]. Moscow.: Vuzovskaya kniga, 320
- Smolentsev N.K. 2009. Osnovyi teorii veyvletov. Veyvletyi v MATLAB [Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB]. Moscow.: DMK Press, 448.



- Sergienko A.B. 2003. Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. SPb., Peter. 604
- Richard L. 2004. Understanding Digital Signal Processing, 2nd Edition, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR2004. 621.
- Smith S. 2002. Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists 1st Edition. Newnes, 650.
- Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V. 2003. Metodyi szhatiya dannyih. Ustroystvo arhivatorov, szhatie izobrazheniy i video [Data compression methods. Archiver device, image and video compression]. Moscow: DIALOG-MIFI, 384.
- Salomon D. 2002. Data compression methods. NY: Springer, 295. (in Russian)
- Chui K. 1992. An Introduction to Wavelets. Texas: Academic Press, 366. (in Russian)
- Schowengerdt R. 2006. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. NY: Academic Press, 560. (in Russian)
- Chandra A.M.; Ghosh S.K. 2006. Remote sensing and geographical information system. New Delhi: Publishing House, 298.
- Pavlushenko M., Evstafev G., Makarenko I. 2006. Bepilotnyie letatelnyie apparaty: istoriya, primeneniye, ugroza rasprostraneniya i perspektivy razvitiya [Unmanned aerial vehicles: history, application, proliferation threat and development prospects]. Moscow. Publishing house «Prava cheloveka», 612.
- Trifonova T.A., Mischenko N.V., Krasnoschekov A.N. 2005. Geoinformatsionnyie sistemy i distantsionnoe zondirovaniye v ekologicheskikh issledovaniyakh [Geoinformation systems and remote sensing in ecological research.]. Moscow: Akademicheskiiy Proekt, 349.
- Boev N.M., Sharshavin P.V., Nigrutsa I.V. 2015. Postroeniye sistem svyazi bepilotnyih letatelnyih apparatov dlya peredachi informatsii na bolshie rasstoyaniya [Construction of communication systems for unmanned aerial vehicles for transmitting information over long distances]. Taganrog: Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki. 7: 147–158.
- Boev N.M. 2012. Analiz komandno-telemetricheskoy radiolinii svyazi s bepilotnyimi letatelnyimi apparatami [Analysis of uav radio control and telemetry systems]. Krasnoyarsk: Vestnik SibGAU. 86–91.
- Nikiforov M., Kostyashkin L. 2016. Obrabotka izobrazheniy v aviatsionnyih sistemah tehničeskogo zreniya [Image processing in aircraft vision systems]. Moscow: FIZMATLIT, 240.
- Burrus C.S. 1998. Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, 268.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лубков Илья Игоревич, директор ООО «Техно-проект», Белгород, Россия

Ilya I. Lubkov, Director Tehnoproekt LLC, Belgorod, Russia

Жиляков Евгений Георгиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Evgeniy G. Zhilyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod National Research University Belgorod, Russia

Трубицына Диана Игоревна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Diana I. Trubitsyna, Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer of the Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Заливин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Белгородский университет кооперации, экономики и права, г. Белгород, Россия

Alexander N. Zalivin, Associate Professor of the Department of Information Security, Candidate of Technical Sciences, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod, Russia