

УДК 621.391

МЕТОД РЕВЕРСИВНОГО КОДИРОВАНИЯ НУЛЬ-ДЕРЕВЬЕВ

В.В. НОВИЦКИЙ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 18 ноября 2019*

Аннотация. Предложен метод эффективного кодирования цифровых изображений на основе реверсивного кодирования нуль-деревьев битовых плоскостей. Он обладает низкой вычислительной сложностью и высокой степенью параллелизма. Численное моделирование на реальных аэрокосмических снимках показало приблизительно равный SBHP коэффициент сжатия.

Ключевые слова: реверсивное кодирование нуль-деревьев, аэрокосмические снимки.

Введение

Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), такие как Worldview-3, GeoEye-2, KOMPSAT-5, ASRANO, SPOT-7, Pleiades-1B имеют на борту съемочную аппаратуру сканирующего типа, формирующую цифровые кадры сверхвысокого разрешения [1]. Скорость формирования этих цифровых кадров значительно превышает пропускную способность радиолинии передачи данных, что вынуждает использовать сжатие в режиме реального времени в бортовой аппаратуре приведенных выше КА.

В качестве бортовых систем сжатия чаще всего используют кодеки JPEG2000 и ICER [2, 3], которые базируются на вычислительно сложном методе контекстного битового моделирования с последующим арифметическим кодированием, так называемом MQ кодере [4–6]. Данный кодер имеет низкую пропускную способность из-за необходимости тройного прохода по каждой битовой плоскости при контекстном моделировании. Этот факт приводит к необходимости параллельной работы большого количества таких кодеров для сжатия потока кадров сверхвысокого разрешения, что в свою очередь приводит к существенному росту ресурсоемкости подобного решения.

В тоже время известен метод эффективного кодирования SBHP [7], который осуществляет рекурсивное кодирование нуль-деревьев битовых плоскостей изображения и имеет в четыре раза меньшую вычислительную сложность по сравнению с MQ кодером. Данный метод входит в верификационную модель стандарта JPEG2000 и позволяет сжимать изображения с небольшим проигрышем в коэффициенте сжатия по сравнению с базовым методом стандарта.

Целью данной работы является разработка нового метода эффективного кодирования на основе SBHP, хорошо подходящего для реализации на базе программируемой логики (ПЛИС) и не уступающего по качеству сжатия прототипу.

Математическая модель реверсивного кодирования нуль-деревьев

Предлагаемый метод эффективного кодирования заключается в реверсивном кодировании иерархических квадродеревьев битовых плоскостей кодовых блоков, на которые равномерно делится изображение после его пространственно-частотного преобразования (рекомендуется вейвлет-преобразование). Метод назван FBQT – Fast Block Quad Tree coding.

Сущность метода заключается в построении L -уровневого иерархического квадродерева для битовой плоскости кодового блока по формуле:

$$m_{HQT} \left(\sum_{m=0}^{l-1} \frac{N_{CB}}{4^m} + p \right) = \bigcap_{k=0}^3 m_{HQT} \left(\sum_{m=0}^{l-1} \frac{N_{CB}}{4^m} - \frac{N_{CB}}{4^{l-1}} + 4p + k \right), \quad (1)$$

где $l = \overline{0, L-1}$, $p = 0, \frac{N_{CB}}{4^l} - 1$, L – количество уровней иерархического квадродерева, N_{CB} – размер битовой плоскости после Z -перестановки пикселей кодового блока. При этом нулевым уровнем иерархического квадродерева является сама битовая плоскость, а каждый последующий уровень меньше предыдущего в четыре раза.

После построения иерархического квадродерева оценивается компактность его уровней по следующим формулам:

$$C_L = \sum_{l=1}^L \left(4 \sum_{p=0}^{\frac{N_{CB}-1}{4}} m_{HQT} \left(\sum_{m=0}^{l-1} \frac{N_{CB}}{4^m} + p \right) \right), \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{N_{CB}}{4} + 4 \sum_{p=0}^{\frac{N_{CB}-1}{4}} m_{HQT} (N_{CB} + p), \quad (3)$$

и выбирается минимальная.

На основе данной оценки компактности строится карта значимости, состоящая из значимых четырехбитных кластеров, которая наиболее компактно описывает текущую битовую плоскость. Значимость кластера оценивается по следующей формуле:

$$S_{CL}(V_p, p) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=0}^3 V_p(p+i) > 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (4)$$

Описание алгоритма для метода FBQT

Предлагаемый метод эффективного кодирования FBQT состоит из следующих шагов.

1. Преобразование исходного двумерного массива $C = \|c(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ элементов (вейвлет-коэффициентов, пикселей изображения) в одномерный массив $M_Z = \|m_Z(n)\|_{(n=\overline{0, N_{CB}-1})}$

с помощью рекурсивной Z -перестановки [8], где $N_{CB} = Y \times X$. Рекурсивная Z -перестановка сохраняет пространственную корреляцию элементов, существующую в двумерном массиве, после переноса их в одномерный массив и позволяет упростить процесс кодирования битовых плоскостей. В процессе перестановки осуществляется анализ значений элементов для определения номера MSB старшей битовой плоскости и знаков $S_K = \|s_K(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ значимых элементов с помощью выражений

$$MSB = \left\lfloor \log_2 \left(\max(|c(y, x)|) \right) \right\rfloor, \quad S_K = \begin{cases} 1, & \text{если } c(y, x) \leq 0, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad \text{при } y = \overline{0, Y-1}, \quad x = \overline{0, X-1}, \quad \text{где } \lfloor \rfloor -$$

операция округления до целого с недостатком. Значимыми считаются все ненулевые элементы.

2. Инициализация массивов и указателей: $b = 0$ – номер обрабатываемой битовой плоскости; $M_{SP} = \|m_{SP}(n)\|_{(n=\overline{0, N_{CB}-1})}$ – массив значимых бит ($m_{SP}(n) = 0$ при $n = \overline{0, N_{CB}-1}$);

$P_{SM} = 0$ – указатель на обрабатываемый бит карты значимости $SM = \|sm(n)\|_{(n=\overline{0, N_{CB}-1})}$;

$M_{HQT} = \left\| m_{HQT}(n) \right\|_{(n=0, N_{CB}-1)}$ – массив нулевого уровня квадродерева

$m_{HQT}(n) = \begin{cases} 0, & \text{если } m_Z(n) \wedge 2^b = 0, \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$ – заполнение нулевого уровня $m_{HQT}(n)$ битами текущей

битовой плоскости; $L = \log_4(N_{CB})$ – количество уровней квадродерева.

3. Заполнение нулевого уровня $m_{HQT}(n)$ битами текущей битовой плоскости согласно

выражению $m_{HQT}(n) = \begin{cases} 0, & \text{если } m_Z(n) \wedge 2^b = 0, \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$, где b – номер обрабатываемой битовой

плоскости.

4. Формирование бинарного L -уровневого квадродерева. Каждый уровень квадродерева, начиная с первого, заполняется на основе предыдущего в результате оценки значимости его 4-элементных кластеров с помощью формулы (1).

5. Оценка компактности карты значимости. Поскольку SM формируется из иерархического квадродерева путем включения только значимых кластеров, то по построенному дереву можно определить ее оптимальную длину: используя формулу (3) для одноуровневого квадродерева и формулу (2) для L -уровневого квадродерева. Если выполняется условие $C_L \leq C_1 \leq N_{CB}$, то осуществляется переход к шагу 6, если выполняется условие $C_1 \leq N_{CB}$, то осуществляется переход к шагу 7, иначе – переход к шагу 8.

6. Формирование карты значимости на основе L -уровневого квадродерева (в случае, если оценка компактности показала, что исходная битовая плоскость содержит много незначимых кластеров). Если верхний уровень квадродерева равен 0, то флагу F присваивается значение 0 и осуществляется переход к шагу 8, иначе флагу F присваивается значение 1, и осуществляется перенос в SM всех значимых кластеров M_{HQT} и переход к шагу 9.

7. Формирование карты значимости на основе 1-уровневого квадродерева (в случае, если оценка компактности показала, что исходная битовая плоскость содержит немного незначимых кластеров и целесообразнее формировать карту значимости на основе 1-уровневого квадродерева). Флагу F присваивается значение 2, осуществляется перенос в SM уровня 1 M_{HQT} и всех значимых кластеров уровня 0 M_{HQT} , переход к шагу 9.

8. Передача битовой плоскости без формирования ее карты значимости (в случае, если оценка компактности показала, что исходная битовая плоскость является шумом и кодирование нецелесообразно). Флагу F присваивается значение 3, осуществляется перенос в SM уровня 0 M_{HQT} и переход к шагу 9.

9. Окончание формирования карты значимости для текущей битовой плоскости. Проверка условия $b = MSB$. Если условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 10, иначе – $b = b + 1$ и переход к шагу 3.

10. Окончание эффективного кодирования FBQT исходного двумерного массива C элементов. В конец выходного потока, компактно описывающего текущий кодовый блок, вставляется код знаков значимых пикселей S_K . На рис. 1 представлена структура выходного потока кодера FBQT.

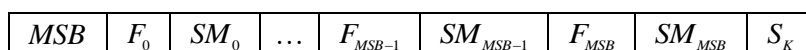
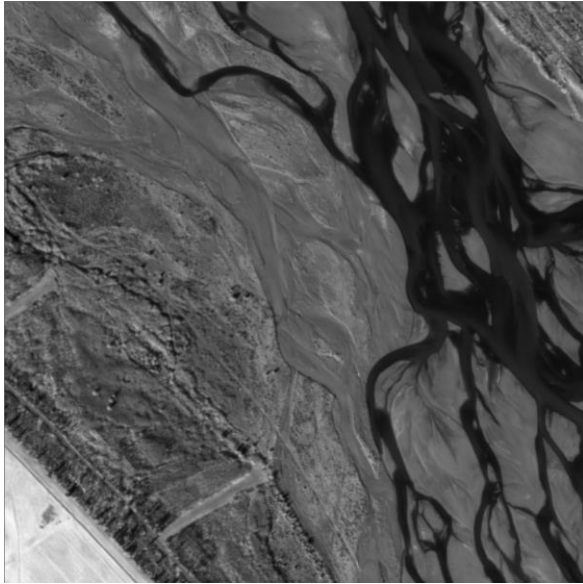


Рис. 1. Структура выходного потока кодера FBQT

Структура блочно-поточного кодера, реализующего метод FBQT

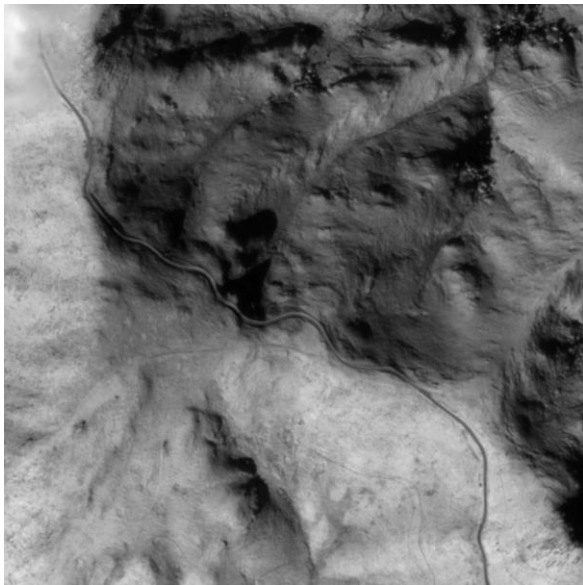
На рис. 2 представлена функциональная схема блочно-поточного кодера, реализующего метод FBQT. Особенность данной схемы заключается в множественном распараллеливании вычислительных операций при построении иерархического квадродерева и оценки



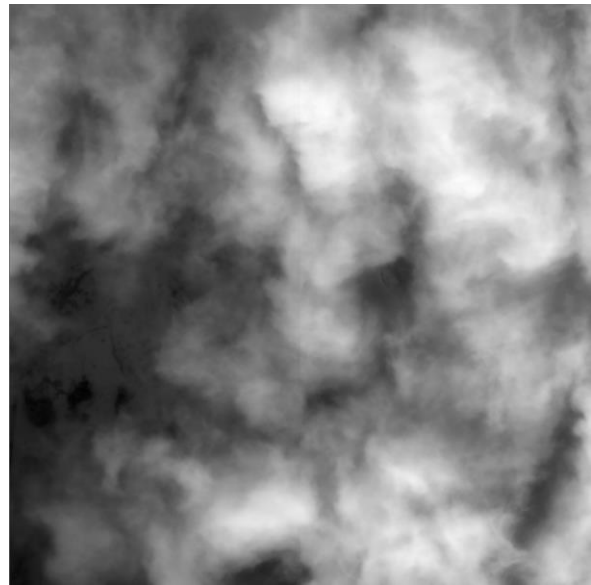
a



б



в



г

Рис. 3. Выборочные кадры панхроматического канала показательного маршрута: *a* – 7-й кадр, *б* – 23-й кадр, *в* – 38-й кадр, *г* – 56-й кадр

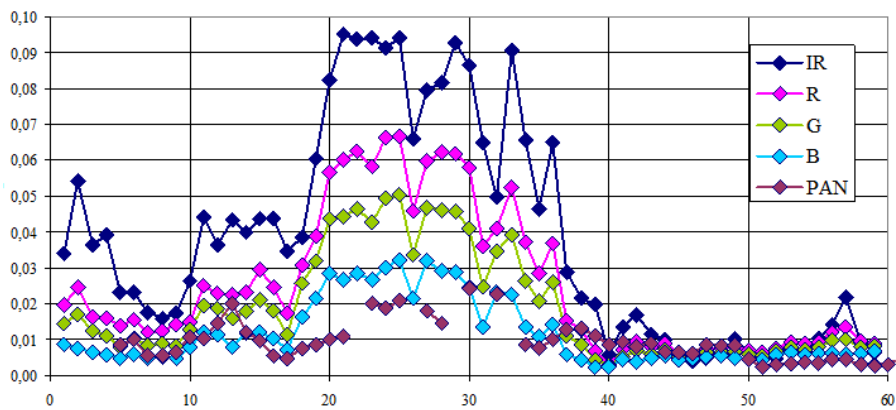


Рис. 4. Зависимость среднего контраста CT от номера кадра

В табл. 1 даны минимальное, максимальное и среднее значение коэффициента сжатия для всех кадров маршрута при их целочисленном вейвлет-преобразовании и эффективном кодировании методами MQ, SBHP и FBQT.

Таблица 1. Значения коэффициента сжатия для всех кадров маршрута

Метод эффективного кодирования	Минимальный CR для 60 кадров	Максимальный CR для 60 кадров	Средний CR для 60 кадров
MQ	1,708	2,497	2,212
SBHP	1,657	2,412	2,155
FBQT	1,665	2,424	2,163

Как видно из табл. 1 предложенный метод FBQT выигрывает у прототипа (без дополнительного энтропийного кодирования) порядка 1 % в коэффициенте сжатия и проигрывает значительно более вычислительно сложному методу MQ порядка 5 %.

Заключение

Предложен новый метод эффективного кодирования FBQT, который заключается в реверсивном кодировании иерархических квадродеревьев битовых плоскостей кодовых блоков. Данный метод предназначен для реализации на программируемой логике и имеет значительные упрощения в кодировании по сравнению с прототипом, что позволило реализовать множественное распараллеливание вычислительных операций. Также предложена структура блочно-поточного кодера, реализующего метод FBQT, которая подтверждает возможность работы устройства сжатия в режиме реального времени.

Численное моделирование показало, что предлагаемый метод практически идентичен по качеству сжатия с прототипом и уступает значительно более вычислительно сложному методу MQ стандарта JPEG2000.

METHOD OF REVERSIVE ZERO-TREE CODING

V.U. NAVITSKI, V.Yu. TSVIATKOU

Abstract. An effective coding method of digital images based on reversive zero-tree coding of bit planes was proposed. It is a low complexity and highly paralleled method. It was shown that the method has a little bit higher compression ratio in comparison with SBHP at aerospace images.

Keywords: reversive zero-tree coding, aerospace images.

Список литературы

1. Bormin H. // Sat. Data Compression. Springer New York DordrechtHeidelberg. London. 2011. P. 33–45.
2. Taubman D.S., Marcellin M.W. JPEG2000: Fundamentals, Standards and Practice. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
3. Kielyand A., Klimesh M. The ICER Progres. Wavelet Im. Compressor. IPN Progress Report 42-155, 2003.
4. Ghodhbani R., [et. al.] // Journal of Real-Time Processing. 2019. Vol. 16. P. 1595–1606.
5. Horrigue. L., [et. al.]. An efficient, high speed architecture for JPEG2000 MQ-coder. IEEE IPAS, 2014.
6. Modrzyk D., Staworko M. A high-performance architecture of JPEG2000 encoder. IEEE ESPP, 2011.
7. Chrysafis C., [et. al.] // IEEE ICASSP, 2000. Vol. 4. P. 2035–2038.
8. Morton G.M. A computer oriented geodetic data base and a new technique in file sequencing. Technical report, IBM Ltd., Ottawa, Ontario, Canada, 1966.