

МОДИФИЦИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА КОМПРЕССИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ БЕЗ ПОТЕРЬ НА БАЗЕ FPGA ДЛЯ БОРТОВЫХ УСТРОЙСТВ С ССD-ЛИНЕЙКОЙ

Ключевые слова: сжатия изображения, дистанционное зондирование, бортовые системы, ССD-линейка.

Введение

В системах дистанционного зондирования, осуществляемых с помощью космических аппаратов, используются данные, полученные от бортовых сканеров. Более 60 % входящей информации — изображения. Для сохранения и передачи по каналам связи большого потока изображений возникает необходимость в компрессии изображений, что имеет решающее значение в задачах дешифрирования потоков данных. В настоящее время существует большое количество методов сжатия с потерями и без потерь, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Однако в задачах дистанционного зондирования актуальна проблема восстановления или декодирования изображения при максимальном качестве. Изображения должны хранить все мельчайшие объекты и свойства оригинального изображения, поскольку они подвергаются прецизионному анализу, чтобы найти очень конкретные детали, к которым человеческий глаз не чувствителен. Как правило, для передачи или хранения таких изображений применяют методы компрессии без потерь.

Методы компрессии базируются на предположении, что набор данных содержит избыточность. Различают статистическую и визуальную избыточность изображений. Компрессия достигается путем поиска и кодирования избыточности изображений [1, 2]. В случае визуальной избыточности изображение имеет значительное количество избыточной информации, которую можно устранить с почти незаметным или с небольшим искажением, что составляет принцип компрессии с потерями. Как правило, компрессия с потерями позволяет достигать больших коэффициентов сжатия изображений [3–6].

Статистическая избыточность связана с предсказуемостью и коррелируемость данных. Эту избыточность можно устранить без потери информации и выходные данные могут быть полностью восстановлены. Наиболее известны методы [7–10] эффективного кодирования символов, основанных на описании частоты появления каждого символа набора данных. Эти частотные коды используются для построения таблицы и имеют следующие характеристики:

- коды могут иметь разное количество битов;
- символьные коды с большей частотой возникновения имеют меньше битов, чем коды символов с меньшей частотой;
- коды имеют разную длину описания, их можно восстановить только с помощью префиксных методов.

Вышеописанный подход используется в алгоритме Хаффмана и арифметического кодирования.

В [1] предлагается уменьшить изображение избыточности с помощью комбинированного алгоритма LZW. Этот подход эффективен для многоспектральных

© Б.П. РУСИН, А.А. ЛУЦКИ, Р.Я. КОСАРЕВИЧ, 2019

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2019, № 1*

изображений. Используя мультиспектральные датчики для разработки бортовых систем, полученных в [11], авторы берут за основу метод сжатия без потерь FELICS. Использование двумерной интерполяции, кодирование Голomba возможно для достижения стабильного коэффициента сжатия при алгоритме с низкой вычислительной сложностью [12–15]. Коэффициент компрессии в методах оптимального кодирования в значительной степени зависит от статистики конкретного изображения. В [16] показаны коэффициенты компрессии для различных типов изображений дистанционного зондирования. Здесь автор берет за основу методы, основанные на алгоритмах сжатия LZW.

В работах [17, 18] описана возможность реализации JPEG2000 LossLess на базе архитектуры VLS. Такая архитектура эффективна в плане вычислительной сложности. Авторы считают, что архитектура VLS намного лучше, чем FPGA, поскольку последняя перепрограммируема и менее эффективна.

Ряд исследователей считают, что компрессию без потерь можно легко заменить компрессией с потерями [19–24], так как сырые данные с камеры вмещают высокочастотный аддитивный шум, который не содержит полезной информации и может быть проигнорирован в процессе сжатия.

Постановка задачи

Сжатия данных без потерь — это уменьшение размера файла, при котором функция декомпрессии может восстановить оригинальный файл точно, без потери данных. Сжатие данных без потерь используется в основном в задачах, где существуют высокие требования к качеству хранимой информации. Эти задачи могут включать области применения с экономией места на персональном компьютере и более ответственной отправкой данных через Интернет. Особенно актуальна область применения — задачи дистанционного зондирования, где важна прецизионная компрессия изображений. Задачи дистанционного зондирования очень чувствительны к информации на изображениях, поскольку анализ зачастую базируется на оценке отдельных точек изображения.

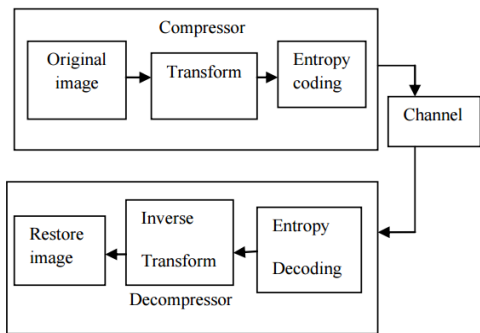


Рис. 1

- алгоритм должен работать на FPGA с CCD-линией.

В случае разработки методов компрессии для бортовых систем дистанционного зондирования (рис. 1) нужно учитывать следующие требования:

- минимизировать количество шагов обработки и уменьшить использование памяти и потребления энергии;
- способность алгоритма работать в один проход;

Блок компрессии

Алгоритм базируется на кодировании с помощью кода Голomba, который относится к классу энтропийных подходов. В соответствии с этим для любой закодированной последовательности чисел n при известном m кодовое слово будет записываться в унарном виде $q = \left\lfloor \frac{n}{m} \right\rfloor$. При этом если m — степень числа 2, то код n элементов должен иметь $\alpha (n \div m)$ бинарный вид $\beta (n \bmod m)$

в битах. В свою очередь, если m принимает другие значения, то вычисляется наименьший k такой, что $2k \geq 2m$. Словарь содержит m кодов для каждого слова длиной k .

При кодировании текущего пиксела линейки данных, отсканированной с CCD-матрицы, можно сделать выводы о значении кода выборки путем присвоения условной вероятности p для текущих пикселов на основе информации из ранее полученных данных, которые обрабатывались аналогично. В процессе кодирования короткие коды предназначены для более вероятных событий. Декодер может реконструировать условную вероятность, которая используется для кодирования текущей выборки, поскольку она зависит от уже декодированных данных.

Схема присвоения вероятности соответствующей длины кода для сжатия данных направлена на получение длины кода, которая приближается к эмпирическим данным энтропии. Нижнее значение энтропии может быть достигнуто при полиномах высшего порядка. Однако это может привести к появлению большого количества параметров k в статистической модели с соответствующей моделью стоимости, что, в свою очередь, приводит к фиксированным значениям энтропии. Подсчет статистики осуществляется на основе предварительно проанализированных данных, и это влияет на точность соответствующих оценок. Оценка значений асимптотической модели определяется как n — число элементов в линейке. Общее количество параметров имеет большое значение в задачах моделирования, причем устанавливается баланс между уровнем энтропии и моделью потерь.

Предложенный метод компрессии — модификация известных методов компрессии, основанных на кодировании Голомба. Отдельные функции реализуются не с 2D-изображением, а с отдельной строкой изображения. Функция прогнозирования адаптивна, а отдельные компоненты выбираются путем оптимизации. Во время первого прохода по выборке алгоритм определяет оптимальное количество параметров кодирования, которые в дальнейшем используются для моделирования зависимостей высокого порядка.

Кодирование можно описать следующими основными этапами.

- Определяются градиенты $D_1 = R_d - R_b$, $D_2 = R_b - R_c$, $D_3 = R_c - R_a$. Если значение градиентов нулевое, то осуществляется поиск самой длинной серии пикселов. Если значения градиентов близки к нулю, то они округляются до нуля, а количество пикселов в серии умножается на некоторый вес M .

- Рассчитывается величина Q — индекс текущего пиксела, с определенного интервала абсолютных значений величин. После этого оцениваются значения вероятности пиксела:

$$P(x) = \begin{cases} \min(R_a, R_b) & \text{при } R_c \geq \max(R_a, R_b), \\ \max(R_a, R_b) & \text{при } R_c \leq \min(R_a, R_b), \\ R_a + R_b - R_c & \text{при } R_c \geq \min(R_a, R_b). \end{cases} \quad (1)$$

Если исследуемый пиксел из массива линейки не является крайним, то для него справедливо выражение (1). Для крайнего левого и правого пикселов значения вероятности можно установить аппроксимацией окрестности оцененных вероятностей.

- Корректируется оценка прогноза, коррекции значений $C(Q)$ и установка $\text{Max}(P(x))$:

$$P(\tilde{x}) = \begin{cases} P(x) + C & \text{при } Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1, \\ P(x) - C & \text{при } Q_1 + Q_2 + Q_3 \neq 1, \\ P(x) & \text{при } P(x) > \text{Max}(P(x)), \\ 0 & \text{при } P(x) < 0. \end{cases} \quad (2)$$

После окончательной оценки скорректированной вероятности $P(\tilde{x})$ необходимо рассчитать ошибку прогнозирования:

$$\text{error} = P(x) - P(\tilde{x}). \quad (3)$$

На этапе квантования получим следующее выражение:

$$\text{error} = \begin{cases} \frac{\text{error} + G}{2G + 1} & \text{при } \text{error} > 0; \\ \frac{G - \text{error}}{2G + 1} & \text{при } \text{error} < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где G равно среднему значению $P(\tilde{x})$.

В результате ошибка прогнозирования error уменьшается по модулю. Кодирование происходит с помощью выражения

$$\text{error} = \begin{cases} \text{error} + \text{rng} & \text{при } \text{error} < 0; \\ \text{error} - \text{rng} & \text{при } \text{error} \geq \frac{\text{rng} + 1}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\text{rng} = \max(P(\tilde{x})) - \min(P(\tilde{x}))$.

Коды Голомба в значительной степени зависят от выбора параметра m , определяются следующие величины:

$$q = \text{floor}\left(\frac{n-1}{m}\right), \quad (6)$$

$$r = n - qb - 1. \quad (7)$$

Генерируемый код состоит из части уникального кода и бинарного r , состоящего из служебных битов Голомба. Год обозначается $G(k)$. Наибольшее число кодируется через I , тогда максимальная длина $G(0)$ равна $I + 1$.

Массив, состоящий из последовательности кодов, содержит положительные и отрицательные значения целочисленного типа. Количество параметров k для кода Голомба зависит от статистики данных, и его значение обновляется каждый раз, когда появляется новый пиксел.

Особенностью описанного выше подхода является то, что он предназначен для кодирования отдельных строк изображения. Главное преимущество данного подхода — возможность обрабатывать и передавать закодированную информацию без необходимости промежуточного буфера памяти, что особенно актуально в системах дистанционного зондирования поверхности земли и удаленного наблюдения. Формат кода также предусматривает наличие служебной информации, с помощью которой можно провести оперативное дешифрование отдельных строк с последующим автоматизированным воспроизведением 2D-изображения. Средства дистанционного зондирования способны формировать крупноформатные изображения, где ширина изображения ограничивается размером CCD-линейки, а количество линеек может

быть сколь угодно большим, поскольку процесс сканирования синхронизирован со скоростью летательного аппарата и происходит непрерывно. Предложенный подход не лишен недостатков, главный из них — неадекватно возможный коэффициент компрессии без потерь по сравнению с методами, оперирующими 2D-изображением, и составляет 10–20 %. Это объясняется доступом к междустрочной информации и дополнительными зависимостями между ними.

Для предложенного метода компрессированные данные состоят из:

- сегмента данных, содержащих коды Голомба и их служебную информацию;
- количества битов, необходимого для реализации процесса декодирования;
- служебной информации для воспроизведения 2D-изображения.

В случае компрессии без потерь информативный критерий оценки эффективности сжатия — зависимость коэффициента компрессии от значения энтропии изображения. Таким образом, метод, обладающий высшим коэффициентом сжатия при заданном значении энтропии, может считаться более эффективным для компрессии. Чтобы избежать влияния размера изображения на значение энтропии, предлагается использовать нормированную энтропию. На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов компрессии от значений энтропии изображений для предложенного и известного Jpeg-LS-методов.

Из рисунка видно, что изображение с большими значениями энтропии меньше подвержены компрессии без потерь. Большинство изображений дистанционного зондирования имеет значение энтропии

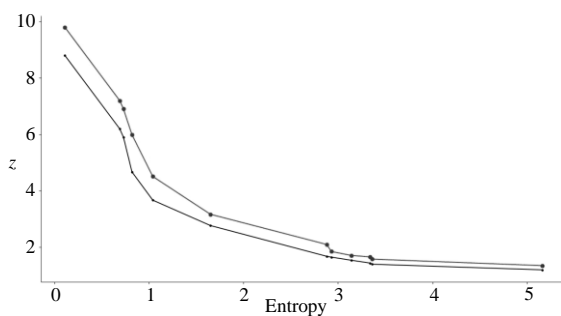


Рис. 2

в пределах 1–4. Как исключение, можно выделить класс изображений с однородной текстурой: изображение морей, океанов, пустынь. Для них значение энтропии меньше единицы и коэффициент компрессии может достигать 4–9 раз.

Предварительная фильтрация

Компрессия изображений без потерь, в отличие от сжатия с потерями, позволяет полностью сохранить информацию, которая получена непосредственно из датчика. Это главное преимущество методов компрессии изображений данного класса. Однако изображения, полученные средствами дистанционного зондирования, содержат большую избыточность в виде аддитивного шума. Источник и свойства аддитивного шума на изображениях хорошо изучены и напрямую связаны с шумом CCD-линейки. Данная помеха не представляет интереса ни при визуальном наблюдении, ни при машинной обработке изображения, поэтому фильтрование является актуальной задачей устранения бесполезной информации.

Методы компрессии изображений с потерями в большинстве основаны на исключении избыточной информации, малозаметной при визуальном наблюдении, которая представлена в высокочастотной области спектра изображения. Однако такая фильтрация является грубой относительно подавления шумов и больше направлена на достижение высоких коэффициентов компрессии. Кроме фильтрации, побочным эффектом является появление артефактов, которые приводят к разбиению изображения на сегменты, потери мелких деталей

на изображении, появлению областей с неравномерным размытием. Именно эти недостатки критические при выборе метода компрессии изображений.

Предложенный подход, который кодирует отдельные строки изображения при высоких значениях энтропии изображения, несколько проигрывает подходам, где анализируются 2D-изображения. Как было установлено экспериментальным путем, коэффициент компрессии без потерь существенно увеличивается после фильтрации изображения. Компрессия изображений осуществляется отдельными строками, поэтому процесс фильтрации также должен происходить для отдельных строк изображения, поскольку отсутствует буфер для сохранения полного изображения. Это накладывает определенные ограничения на процесс фильтрации и его эффективность.

Обозначим x_i интенсивность пиксела в линейке, разрядностью 12 бит, s_i — значение шума в заданном пикселе линейки. Простейшим случаем является линейная фильтрация, здесь фильтр имеет следующий вид:

$$x(i) = \sum_i y(i - i_1) \cdot a(i_1), \quad (8)$$

где $y_i = x_i + s_i$, $a(i_1)$ — весовой коэффициент с импульсной характеристикой.

Использование такого метода фильтрации дает низкое качество обработки, но преимуществом является скорость работы. Для оценки качества обработки используется критерий

$$E \left(x(i) - \sum_i y(i - i_1) \cdot a(i_1) \right)^2 = \min. \quad (9)$$

Здесь в качестве критерия используется средний квадрат ошибки между истинным сигналом и восстановленным после фильтрации.

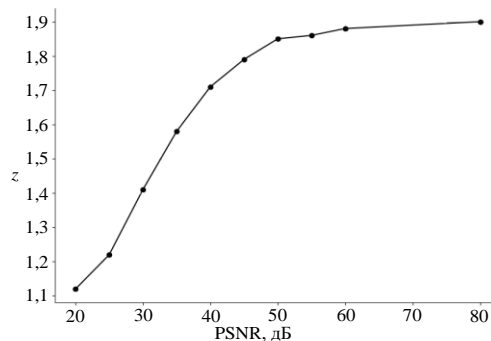


Рис. 3

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента компрессии без потерь от наличия аддитивного шума, который оценивается пиковым соотношением сигнал–шум. В реальных условиях аддитивный шум CCD-линейки оценивается в пределах 40–60 дБ. За счет предварительной фильтрации аддитивного шума можно получить увеличение коэффициента компрессии на 10–15 %.

Реализация на FPGA-архитектуре

Значительное развитие FPGA для повышения тактовой частоты и параллелизма позволило использовать его для вычислительно сложных задач цифровой обработки сигналов в условиях реального масштаба времени. Реконфигурируемые архитектуры, такие как FPGA, находятся на границе между программными и аппаратными средствами обработки данных и используют языки аппаратных средств — VHDL или Verilog.

В настоящее время использование аппаратных языков для программирования FPGA — чрезвычайно сложный и затратный процесс. Для простого моделирования сложных алгоритмов лучшим вариантом является использование таких языков, как C или Matlab, с последующей конвертацией в языки аппа-

ратных средств. Эта процедура позволяет упростить и ускорить процесс разработки и дает возможность уделять больше внимания оптимизации алгоритма и архитектуры в целом.

Можно выделить следующие преимущества:

- поддержка создания кода системных объектов и функций MATLAB;
- возможность программирования плат FPGA от компаний Xilinx и компании Altera;
- обмен ресурсами и восстановление синхронизации для достижения компромисса между скоростью и областью.

Результат преобразования не столь оптимальный для использования всех ресурсов FPGA. В прямом результате использование VHDL несколько лучше.

Реализация CCSDS 121-B-2 SZIP на Xilinx Virtex-5QV FPGA позволяет достичь производительности порядка 410 Мбит/с, коэффициент сжатия 1,9, потребление энергии 2497 Вт.

При использовании TSMC 0,13 мкм 1р8м частота 273 МГц может быть достигнута производительность 546 МВ/с. Потребление электроэнергии — 33,93 мВт.

Предварительная фильтрация может уменьшить энтропию изображения и соответственно увеличит степень сжатия до 3–5 раз.

Заключение

Особенность предложенного подхода — реализация компрессии без потерь CCD-сканера. CCD-сканеры до сих пор широко используются в системах дистанционного зондирования и в бортовых системах для повышенного разрешения, поскольку позволяют получать изображения с разрешением в десятки тысяч пикселей. Для компрессии полноценного 2D-изображения необходимо наличие большого буфера для последовательного накопления информации с CCD-сканера, а недостатки проявляются в ограниченном быстродействии, слабой помехоустойчивости, дороговизне системы.

Предложенный подход предполагает последовательную компрессию отдельных порций информации с CCD-сканера с последующим формированием большого количества отдельных пакетов данных. Для компрессии используется модифицированный алгоритм кодирования без потерь LOCO-I с возможностью кодирования одномерных сигналов. Алгоритм оптимизирован для параллельной обработки на FPGA. Это позволяет осуществлять компрессию потока данных 3Gb/s в реальных масштабах времени со скоростью обработки 330 МВ/с на FPGA Xilinx Virtex-5QVFPGA.

Преимущества предлагаемого подхода следующие:

- высокий коэффициент компрессии без потерь (1,5–5);
- повышенная помехоустойчивость системы;
- работа в реальном масштабе времени;
- возможность работы с отдельными пакетами данных;
- удешевление системы.

Коэффициент компрессии сильно зависит от статистики изображения и в отдельных случаях может достигать 5 раз. Алгоритм компрессии для одной линейки проигрывает алгоритму для 2D-изображений на 7–20 %.

Для повышения коэффициента компрессии предложено проводить предварительную фильтрацию изображений. CCD-линейка характеризуется аддитивным шумом 40–60 дВ. Впервые учтено влияние аддитивных шумов. Путем фильтрования устраняют их влияние что позволяет уменьшить энтропию данных на 3–10 %, благодаря чему коэффициент компрессии повышается на 10–15 %.

Б.П. Русин, О.А. Луцик, Р.Я. Косаревич

МОДИФІКОВАНА АРХІТЕКТУРА КОМПРЕСІЇ ЗОБРАЖЕНЬ БЕЗ ВТРАТ НА БАЗІ FPGA ДЛЯ БОРТОВИХ ПРИСТРОЇВ З CCD-ЛІНІЙКОЮ

Проведено детальний огляд методів і технологій стиснення зображення в задачах дистанційного зондування. Запропоновано модифіковану технологію стиснення зображення без втрат для бортових систем з однією скануючою CCD-лінійкою. Алгоритм стиснення без втрат базується на модифікованому LOCO-I. Робота демонструє ефективність стиснення, що в деяких випадках може досягати 2–5 разів. Досліджуються властивості запропонованого алгоритму компресії в разі попередньої фільтрації даних CCD-лінійки від адитивного шуму. Показана можливість реалізації запропонованої технології на FPGA-архітектурі для роботи в системах реального часу.

Ключові слова: стиснення зображення, дистанційне зондування, бортові системи, CCD-лінійка.

В.Р. Русын, А.А. Лутык, Р.Я. Косаревич

MODIFIED ARCHITECTURE OF LOSSLESS IMAGE COMPRESSION BASED ON FPGA FOR ON-BOARD DEVICES WITH CCD-LINE

A detailed review of methods and technologies for image compression in remote sensing problems is given. A modified lossless image compression technology for onboard systems with a single scanning CCD-ruler is proposed. The lossless compression algorithm is based on the modified LOCO-I. The work demonstrates the efficiency of compression, which in some cases can reach 2–5 times. The properties of the proposed compression algorithm are investigated in the case of previous filtering of CCD line data from additive noise. The possibility of implementing the proposed technology on the FPGA-architecture for working in real-time systems is shown.

Keywords: image compression, remote sensing, onboard systems, CCD-line.

1. Mishra S., Singh A. Image compression and enhancement by using the LZW and BHEPL. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2017. Vol. 7, N 5. P. 235–238. DOI: 10.29322
2. Tsung Han Tsai, Yu-HsuanLeeandYu-YuLee. Design and analysis of high-throughput lossless image compression engine using VLSI-oriented FELICS algorithm. *IEEE transactions on very large scale integration systems*. 2010. Vol. 18, N 1. DOI: 10.1109/TVLSI.2008.2007230
3. http://ethw.org/History_of_Lossless_Data_Compression_Algorithms.
4. Gupta B., Gupta M., Chadha B. Image compression technique under jpeg by wavelets transformation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2014. Vol. 4, N 6.
5. Sengupta A., Roy D. Mathematical validation of HWT based lossless image compression. *IEEE International Symposium on Information Systems (iNIS)*. 2017. P. 20–22.
6. Deigant Y., Akshat V., Raunak H., Pranjal P., Avi J. A proposed method for lossless image compression in nano-satellite systems. *Aerospace Conference 2017 IEEE*. 2017. P. 1–11. DOI: 10.1109/AERO.2017.7943682
7. Firas A. Jassim. Increasing compression ratio in png images by k-modulus method for image transformation. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2013. Vol. 3, N 6.
8. Hasan M., Nur K. A lossless image compression technique using location based approach. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2012. Vol. 1, N 2. P. 101–105.

9. Vemuri B.C., Sahni S., Chen F., Kapoor C., Leonard C., Fitzsimmons J. Lossless image compression. 2014. Vol. 45, N 1. P. 1–5.
10. Singh A., Kirar K.G. Review of image compression techniques. *International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE)*. 2017. P. 172–174.
11. M. Tuny Pet Seenu M.R., Arul Linsely J. Analysis of lossless image compression using VLSI oriented FELICS algorithm. *International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies*. 2011. P. 623–628. DOI: 10.1109/ICSCCN.2011.6024626.
12. Mehboob R., Khan S.A., Ahmed Z. High speed lossless data compression architecture. *Proc. IEEE Int. Conf. Multitopic*. 2006. P. 84–88. DOI: 10.1109/DATE.2007.364584
13. Howardand P.G., Vitter J.S. Fast and efficient lossless image compression. *Proc. IEEE Int. Conf. Data Compression*. 1993. P. 501–510. DOI:10.1109/DCC.1993.253114.
14. Bhimani D., Chaurasiya P., Sedani B. Optimized lossless image compression algorithm LOCO-I for small images. *Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*. 2016. P. 223–225. DOI: 10.1109/CASP.2016.7746169.
15. Verhack R., Lange L., Lambert P., Walle R., Sikora T. Lossless image compression based on kernel least mean squares. *2015 Picture Coding Symposium (PCS)*. 2015. P. 189–193. DOI:10.1109/PCS.2015.7170073.
16. Rusyn B., Lutsyk O., Lysak Y., Lukenyuk A., Pohreliuk L. Lossless image compression in the remote sensing applications. *IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. Lviv. 2016. P. 195–198. DOI: 10.1109/DSMP.2016.7583539.
17. Lakis M.P., Pantazis V., Kakarountas A.P. Efficient high — performance ASIC implementation of JPEG-LS encoder. *Int. Design Autom. Test Europe Conf.* 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/DATE.2007.364584.
18. Mert Y.M. FPGA Based JPEG-LS Encoder for onboard real-time lossless image compression. *Satellite Data Compression, Communications, and Processing XI. Proc. of SPIE*. 2015. Vol. 9501. DOI: 10.1117/12.2177882.
19. Zhao B., Huang W., Haoxiang H., Zhe Liu W. Image de-noising algorithm based on image reconstruction and compression perception. *International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI)*. 2017. P. 532–535.
20. Howard P.G., Vitter J.S. Fast and efficient lossless image compression. *IEEE Data Compression Conference*. 1993. P. 351–360. DOI: 10.1109/DCC.1993.253114.
21. http://www.visengi.com/products/jpeg_hardware_encoder.
22. Nivedha B., Priyadharshini M., Thendral E., Deenadayalan T. lossless image compression in cloud computing. *International Conference on Technical Advancements in Computers and Communications (ICTACC)*. 2017. P. 112–115. DOI: 10.1109/ICTACC.2017.37.
23. Li S., Yin H., Fang X., Lu H. Lossless image compression algorithm and hardware architecture for bandwidth reduction of external memory. *IET Image Processing*. 2017. Vol. 11, N 6. P. 379–388. DOI: 10.1049/iet-ipr.2016.0636.
24. Storer J.A., Helgott H. Lossless image compression by block matching. *The Computer Journal*. 1997. Vol. 40, N 2. P. 137–145.

Получено 04.09.2018