

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.32

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖАТИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ ЕСВАQ С ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ФОРМАТЕ CEOS

кан. техн. наук, доц. **Р.П. БОГУШ, И.Ю. ЗАХАРОВА**
(Полоцкий государственный университет);

кан. техн. наук **Н.М. НАУМОВИЧ**
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)

Рассмотрены особенности представления предварительно обработанных комплексных данных радиолокатора с синтезом апертуры в формате CEOS. Для сжатия данных использован модифицированный алгоритм на основе энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования. Представлены общая схема алгоритма и результаты моделирования по сжатию и записи восстановленных комплексных данных в стандартный формат. В качестве входных данных использованы значения отраженного сигнала радиолокатора с синтезом апертуры ERS-1, отсчеты которого даны в виде синфазной и квадратурной компонент. Приведены результаты фокусировки с геометрической коррекцией восстановленных после сжатия и представленных в стандартном формате данных ERS-1. Рассчитаны основные показатели качества работы квантователя.

Ключевые слова: синтезированная апертура, формат данных CEOS, радиолокационное изображение, энтропийно-ограниченное блочное адаптивное квантование.

Введение. В настоящее время пространственное разрешение изображений, получаемых с использованием систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), сопоставимо с разрешением космических снимков, получаемых системами ДЗЗ оптического диапазона [1]. При этом системы дистанционного зондирования Земли на основе РСА позволяют:

- получать детальные изображения местности в любых метеоусловиях и в любое время суток;
- обнаруживать объекты по их радиолокационным характеристикам;
- осуществлять зондирование подповерхностных объектов;
- обеспечивают возможность изучения деталей состояния водной поверхности [2].

Для стандартизации представления данных РСА систем ДЗЗ комитетом по спутниковым наблюдениям Земли (Committee on Earth Observation Satellites – CEOS) приняты рекомендации по уровням обработки радиолокационных данных и формату CEOS для их представления [3]. Известно, что чем ниже уровень обработки данных, тем меньше вероятность возникновения ошибок, проще организовать изменение алгоритмов при обработке, возможна максимальная автоматизация процесса и т.д. [1]. Однако определение состава и формата представления основных и вспомогательных данных РСА на каждом уровне требует учета многих разнородных факторов процесса функционирования не только самого датчика, но и его носителя и системы ДЗЗ в целом [1, 4]. Полученные данные обрабатываются, как правило, с использованием существующих коммерческих пакетов, которые учитывают особенности представления первичных данных РСА. Существует ряд коммерческих и свободно распространяемых прикладных программ, специально предназначенных для работы с радиолокационными данными. Для ряда других программ создаются специальные модули, позволяющие проводить обработку поляриметрических данных (таких как Envisat, ALOS/PALSAR, Radarsat-2, TerraSAR-X и др). Они позволяют проводить синтез изображений из комплексных данных первого уровня Single Look Complex Image (SLC), их калибровку, расчет различных поляриметрических параметров, когерентностей и других характеристик. К такому программному обеспечению относятся:

- ENVI со встраиваемым модулем SARscape;
- GAMMA Software;

- Geomatica 2012;
- ScanEx Image Processor;
- NEST;
- PolSARPro;
- DORIS.

Среди наиболее используемых программных модулей возможность обработки данных нулевого уровня предоставляется SARscape и Modular SAR Processor. Другое программное обеспечение направлено на обработку сфокусированных радиолокационных данных первого уровня. Для того чтобы обработка радиолокационных изображений была возможна, при разработке PCA систем дистанционного зондирования Земли необходимо учитывать рекомендации CEOS по формату представления данных, что обеспечит дальнейшую корректную обработку информации существующими программными пакетами.

Целью работы является моделирование сжатия комплексных радиолокационных данных на основе модифицированного энтропийно-ограниченного блочного адаптивного квантования с представлением восстановленных отсчетов отраженного сигнала PCA в формате CEOS, который поддерживается существующими программными пакетами.

1. Сжатие и восстановление комплексных радиолокационных данных. Предварительная обработка радиолокационных данных на борту космического аппарата предполагает сжатие комплексных данных отраженного сигнала, которое необходимо для сокращения объема передаваемой информации по каналу связи. В основе ряда алгоритмов сжатия, применяемых в современных системах ДЗЗ на основе PCA, лежит технология блочного адаптивного квантования (БАК) [5]. Энтропийно-ограниченное блочное адаптивное квантование (Entropy Constrained Block Adaptive Quantization – ECBAQ) основывается на том, что динамический диапазон уровней мощности сигнала (от 0 до 255 или от –128 до + 127) в выделенном блоке данных намного меньше, чем у всего набора значений [5, 6], и представляется перспективным для использования в системах ДЗЗ. В связи с этим на первом шаге сжатия выполняется разбиение необработанных данных на блоки, минимальный размер которых выбирается таким образом, чтобы обеспечить нормальное распределение данных в блоке, а максимальный размер ограничен мощностью сигнала, которая должна оставаться постоянной для каждого блока [6]. Для радиолокационных данных ДЗЗ одним из наиболее часто применяемых является блок размером 128 отсчетов, который гарантирует выполнение заданных условий. Алгоритм на основе ECBAQ использует оптимальный квантователь, минимизирующий значения среднего квадрата ошибки (СКО) и выходной энтропии путем изменения параметров квантования, таких как количество уровней на выходе квантователя и шаг квантования [7].

Модифицированный алгоритм требует выполнения следующих основных шагов для одного блока входных данных:

1. Расчет количества уровней квантователя C :

$$C = 2^{R_{out}},$$

где R_{out} – заданная разрядность выходных данных, бит/символ.

2. Расчет размера шага квантования S_c :

$$S_c = A_{max}/C,$$

где A_{max} – максимальное значение во входном блоке данных.

3. Равномерное квантование значений в блоке на основе рассчитанных C и S_c .
4. Определение СКО согласно формуле [8]

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^n (x - \tilde{x})^2}{n},$$

где x – исходное значение;

\tilde{x} – квантованное значение;

n – количество элементов в блоке, $n = 128$.

5. Расчет энтропии H выполняется с учетом того, что входные радиолокационные данные подчиняются нормальному закону распределения вероятности [9]:

$$H = \frac{1}{2} \cdot \ln(2\pi\sigma^2 e),$$

6. Если значение энтропии H больше заданного значения R , причем изначально $R = R_{out}$, то шаг квантования уменьшается на единицу и происходит возврат к шагу 3.

7. Если значение СКО больше значения ϵ , которое задается исходя из требуемой точности квантователя, то количество уровней квантования увеличивается на единицу и происходит возврат к шагу 2.

8. Если максимальный индекс квантователя превышает значение $2^{R_{out}} - 1$, то пороговые значения повышаются и происходит возврат к шагу 1.

9. Запись индексов уровней квантования для блока и A_{max} для выбранных C и S_c .

10. Кодирование полученных данных алгоритмом Хаффмана.

Восстановление после сжатия происходит по следующему алгоритму:

- декодирование Хаффмана;
- разделение на блоки;
- извлечение значений A_{max} ;
- восстановление значений C и S_c исходя из переданного значения A_{max} ;
- восстановление кодовой книги исходя из рассчитанных значений;
- соотнесение индекса уровня квантования с индексом кодовой книги для получения значения, соответствующего данному индексу.

К основным характеристикам квантователя относится коэффициент сжатия данных (C_D), который вычисляется как отношение количества бит на отсчет для входных (R_{in}) и выходных данных (R_{out}).

2. Представление восстановленных комплексных радиолокационных данных в формате CEOS. Запись комплексных отсчетов отраженного сигнала PCA в формате CEOS, представляющих собой радиоголограмму (РГГ), обеспечивает возможность дальнейшей их обработки стандартными программными пакетами [10]. Данный формат представляет собой набор фиксированных записей основных данных и метаданных, состоящий из смеси ASCII и бинарных записей, и использует структуру из четырех файлов:

- файл каталога тома (Volume directory file);
- файл заголовка (Leader file);
- файл данных (Data set file);
- файл нулевого тома (Null volume file) [3, 10].

Согласно поставленной задаче моделирования необходимо радиолокационные данные записать по правилам формата в файл данных. Файл данных включает запись описания файла и набор записей РГГ. Запись описания файла содержит:

- идентификатор формата контрольного документа;
- номер и имя файла;
- данные о локации (номер, протяженность, код, флаг локации);
- информацию о количестве записей с необработанными данными, длине каждой записи, количестве строк и пикселей в каждом комплекте данных. CEOS код записи – 63, 192, 18, 18.

Каждая запись с данными необработанного сигнала хранит описание, включающее количество строк, количество пикселей в строке, вспомогательную информацию о параметрах датчиков, счетчик пакетов, и представляет собой одну строку РГГ, т.е. отраженные сигналы для одного зондирующего импульса. Каждый элемент строки РГГ представлен двумя байтами, по одному байту на синфазную и квадратурную составляющие отраженного сигнала и записывается с 413 по 11644 байт. Количество записей необработанного сигнала равно количеству строк изображения. CEOS код записи – 50, 10, 31, 20.

Схема моделирования модифицированного ECBAQ сжатия и представления восстановленных комплексных радиолокационных данных в стандартный формат показана на рисунке 1.

3. Результаты моделирования. Представленная на рисунке 1 схема моделирования сжатия и записи комплексных радиолокационных данных в стандартный формат CEOS реализована с использованием программного пакета MatLab. В качестве входных значений использовались данные PCA ERS-1 с синфазной и квадратурной 8-битными составляющими из [11]. На первом этапе входные отсчеты разделяются на две части: синфазную и квадратурную составляющие. Далее выполняется блочная обработка данных по схеме, показанной на рисунке 1, при этом размер блока составляет 128 бит. Следует заметить, что при выставлении слишком низких пороговых значений R и ϵ , квантователь может повысить заданную разрядность выходных данных, т.е. уменьшить коэффициент сжатия. Для исключения увеличения разрядности предусмотрен шаг 8 алгоритма сжатия, рассмотренного в разделе 1. После завершения оптимального квантования формируется матрица на основе полученных квантованных отсчетов. Каждая строка матрицы включает значение максимальной амплитуды блока данных и индексы уровней квантования данного блока. Соответственно, количество строк матрицы определяется количеством бло-

ков. На следующем этапе выполняется эффективное кодирование без потери данных методом Хаффмана с использованием функции *huffmanenco*. Для восстановления данные необходимо декодировать методом Хаффмана (функция *huffmandeco*), затем преобразовать в матрицу, строки которой описывают один сжатый блок данных, выделить максимальное значение отсчета и индексы квантования для данного блока, выполнить восстановление данных на основе расчета шага и уровня квантования. После моделирования процедур сжатия и восстановления значений синфазной и квадратурной составляющих выполняется запись полученных данных в файл согласно спецификации формата CEOS [3].

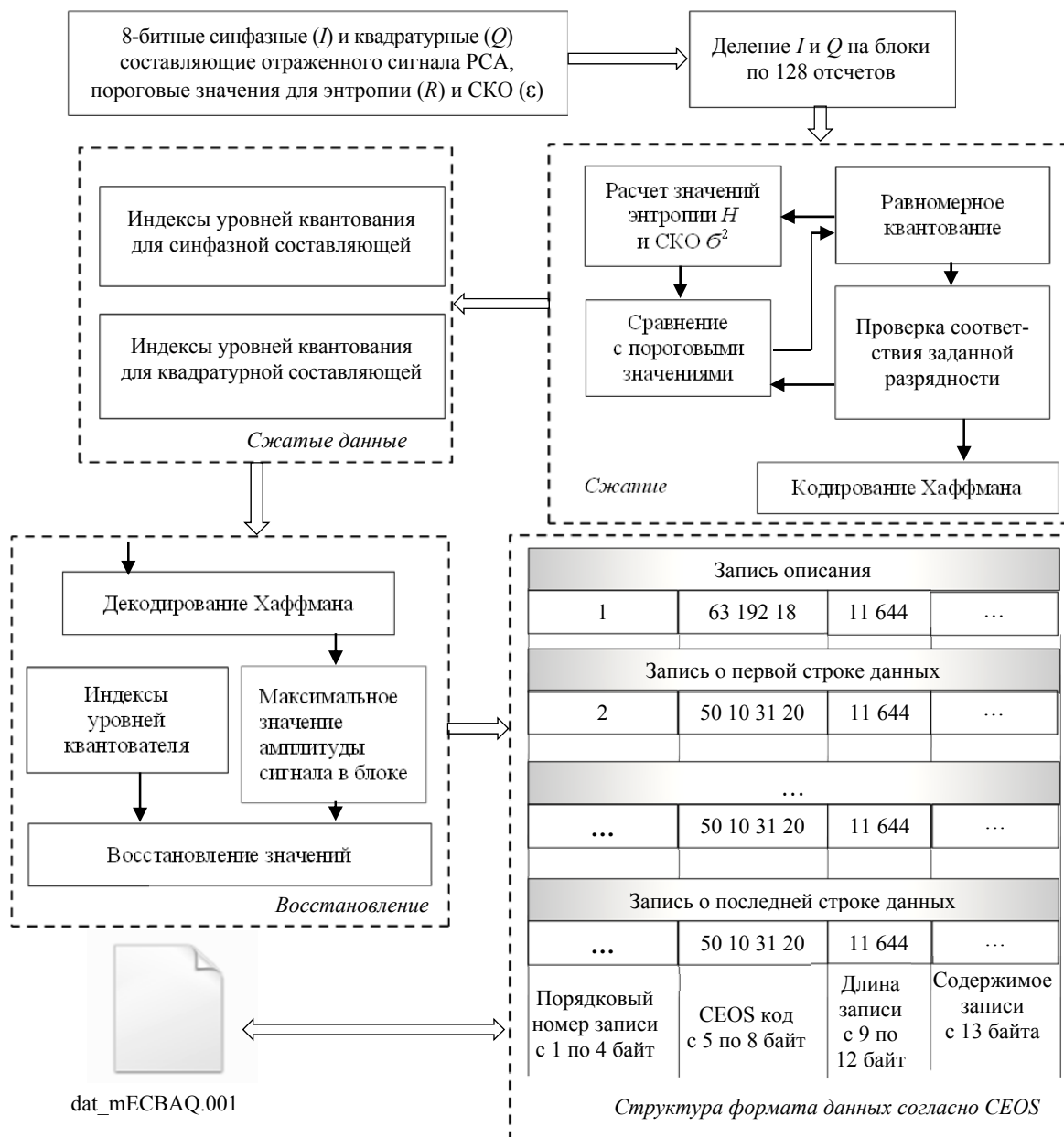
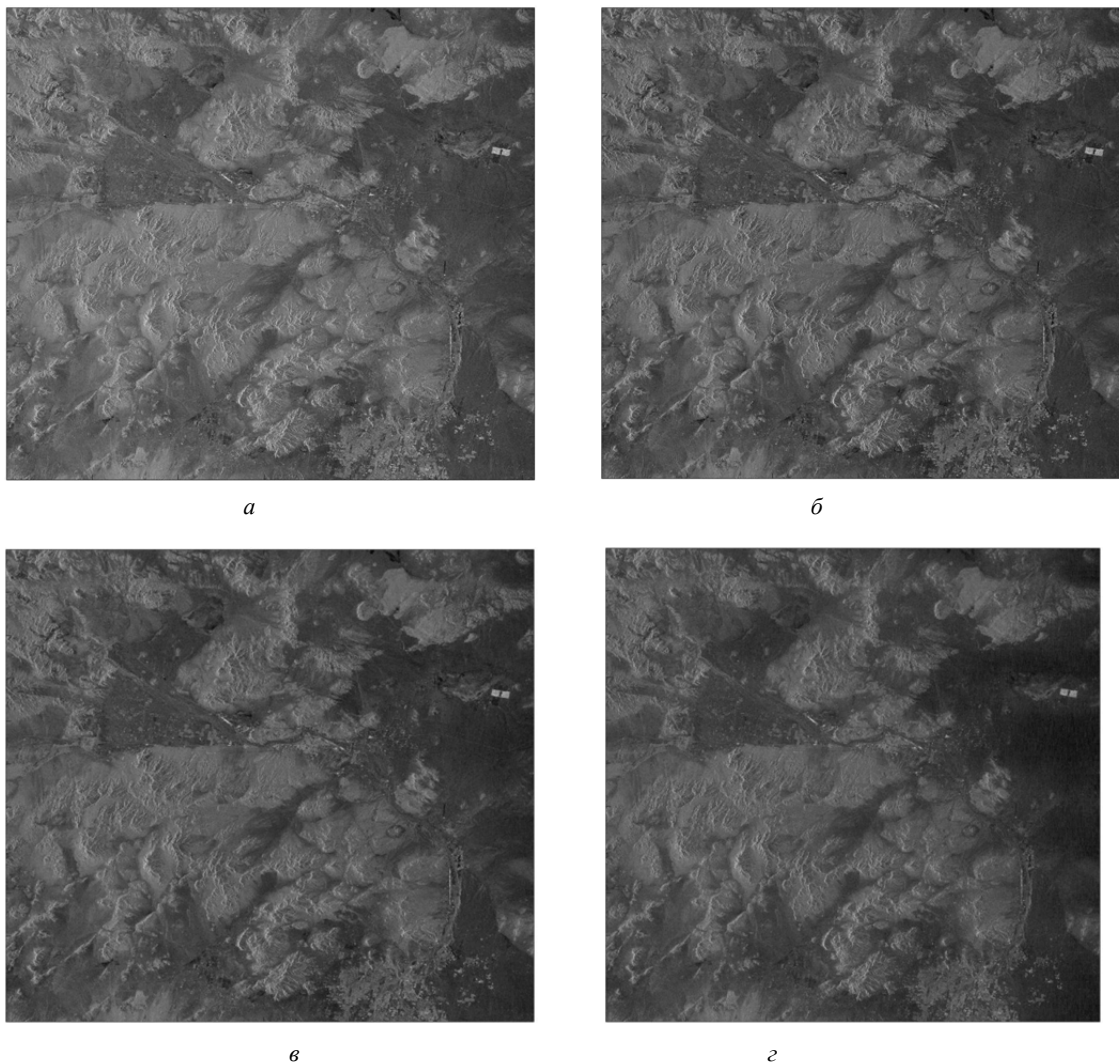


Рисунок 1. – Схема моделирования модифицированного ECBAQ сжатия с представлением восстановленных комплексных радиолокационных данных в стандартном формате

На рисунке 2, *a* показано сфокусированное радиолокационное изображение PCA ERS-1 из [11], а на рисунках 2, *б–г* представлены результаты фокусировки восстановленных после модифицированного ECBAQ сжатия данных при различных значениях C_0 , записанных в формате CEOS, т.е. получены по схеме обработки, показанной на рисунке 1.

Для фокусировки и формирования радиолокационного изображения с геометрической коррекцией использовался алгоритм, реализованный в пакете MatLab, из [10], предназначенный для обработки данных спутников ERS-1/ERS-2. Входные данные представляют собой сформированный файл `dat_mECBAQ.001` и стандартный файл заголовка `LEA_01.001` с метаданными [11].



**Рисунок 2. – Результат фокусировки: а – для исходных комплексных данных;
б – для восстановленных данных после сжатия при $C_Q = 8/4$;
в – для восстановленных данных после сжатия при $C_Q = 8/3$;
г – для восстановленных данных после сжатия при $C_Q = 8/2$**

Для оценки качества работы квантователя используется отношение сигнал/шум (Signal To Quantization Noise Ratio – SQNR), которое вычисляется как [12]

$$SQNR = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} x_{ij}}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (x_{ij} - \tilde{x}_{ij})^2} \right),$$

где x_{ij} – значение исходного отсчета сигнала;

\tilde{x}_{ij} – значение восстановленного после сжатия отсчета сигнала;

M – количество строк в матрице данных;

N – количество столбцов в матрице данных.

В таблице 1 приведены результаты экспериментальных исследований по оценке качественных характеристик алгоритма.

Таблица 1 – Рассчитанные качественные характеристики алгоритма и пороговые значения

Коэффициент сжатия, C_Q	$SQNR$, дБ	$SQNR_{ЕСВАQ}$, дБ [7]	Результирующее пороговое значение ϵ	Результирующее пороговое значение R
8/4	23,33	22,23	1,75	1,7
8/3	18,1	16,17	6,94	2,38
8/2	12,63	9,67	26,8	3,06

Визуальное сравнение синтезированных радиолокационных изображений, которые показаны на рисунке 2, свидетельствует, что для сжатых/восстановленных радиолокационных данных при $C_Q = 8/4$ и $C_Q = 8/3$ отличия несущественны, а в случае $C_Q = 8/2$ области, содержащие ряд высокочастотных компонент, имеют визуально отличимые различия. Анализ таблицы 1 свидетельствует, что модифицированный алгоритм обеспечивает улучшение отношения сигнала/шум для разных коэффициентов сжатия.

Для выявления основных изменений в изображениях на рисунках 3, а, 4, а и 5, а показаны негативные разностные изображения для сфокусированных исходных данных и восстановленных после сжатия, а также соответствующие им гистограммы. Для лучшего масштабирования гистограмм нулевой уровень яркости, принадлежащий фону, на них не отображается.

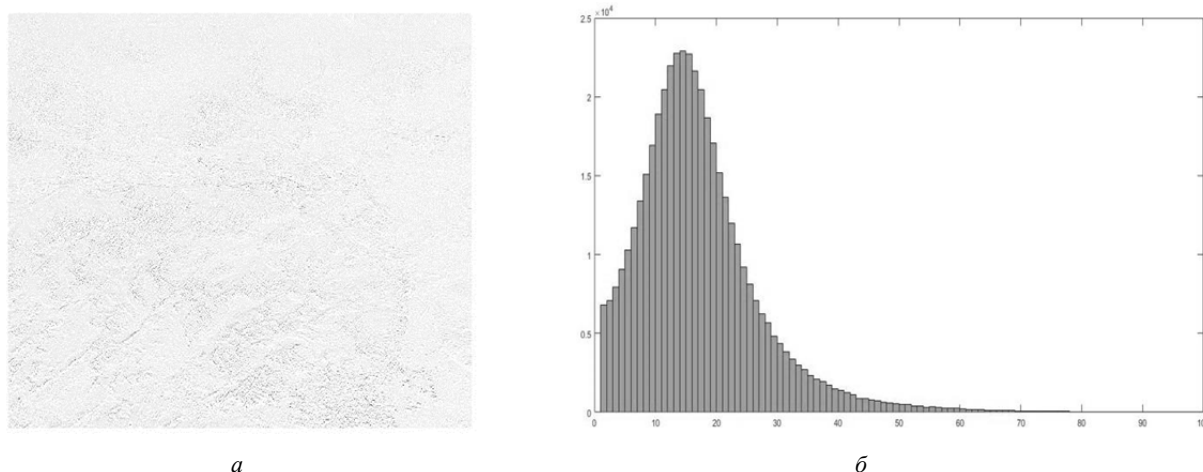


Рисунок 3. – Визуальное представление изменений сфокусированного изображения при сжатии радиолокационных данных с $C_Q = 8/4$: а – разностное изображение; б – гистограмма

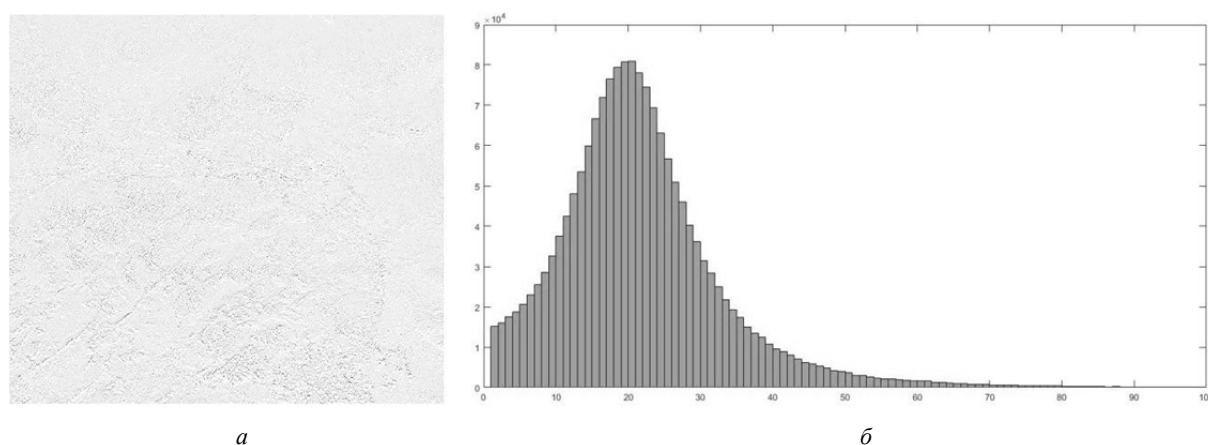


Рисунок 4. – Визуальное представление изменений сфокусированного изображения при сжатии радиолокационных данных с $C_Q = 8/3$: а – разностное изображение; б – гистограмма

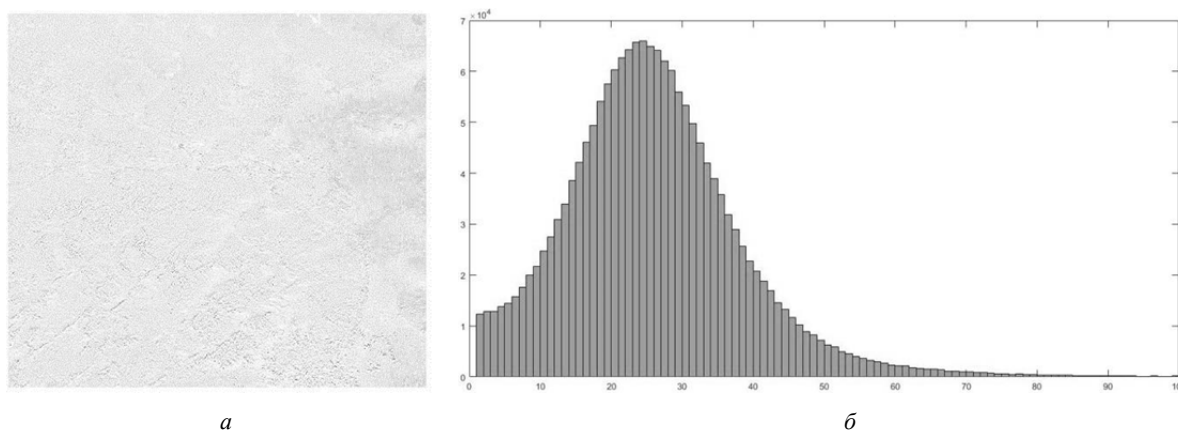


Рисунок 5. – Визуальное представление изменений сфокусированного изображения при сжатии радиолокационных данных с $C_Q = 8/4$: *a* – разностное изображение; *б* – гистограмма

Анализ рисунков 3–5, показывает, что для сжатых/восстановленных изображений при $C_Q = 8/4$ и $C_Q = 8/3$ отличия несущественны, а при $C_Q = 8/2$ в правой части разностного изображения присутствуют области и пиксели с увеличенной амплитудой. Гистограмма для данного разностного изображения также свидетельствует о наличии на нем большего количества пикселей с увеличенным уровнем яркости.

При наличии в обрабатываемом блоке данных значительного количества высокочастотных составляющих с высокой амплитудой и применении сжатия при $C_Q = 8/2$ для корректного отображения всего диапазона входных данных требуется большее число выходных уровней квантователя, т.е. $R_{out} > 2$. Вследствие этого на подобных участках изображений могут образовываться шумовые области (рисунок 6). Для практического использования рекомендуется применение модифицированного алгоритма с коэффициентами сжатия $C_Q = 8/4$ и $C_Q = 8/3$ и отношением сигнал/шум 23,33 дБ и 18,1 дБ соответственно.

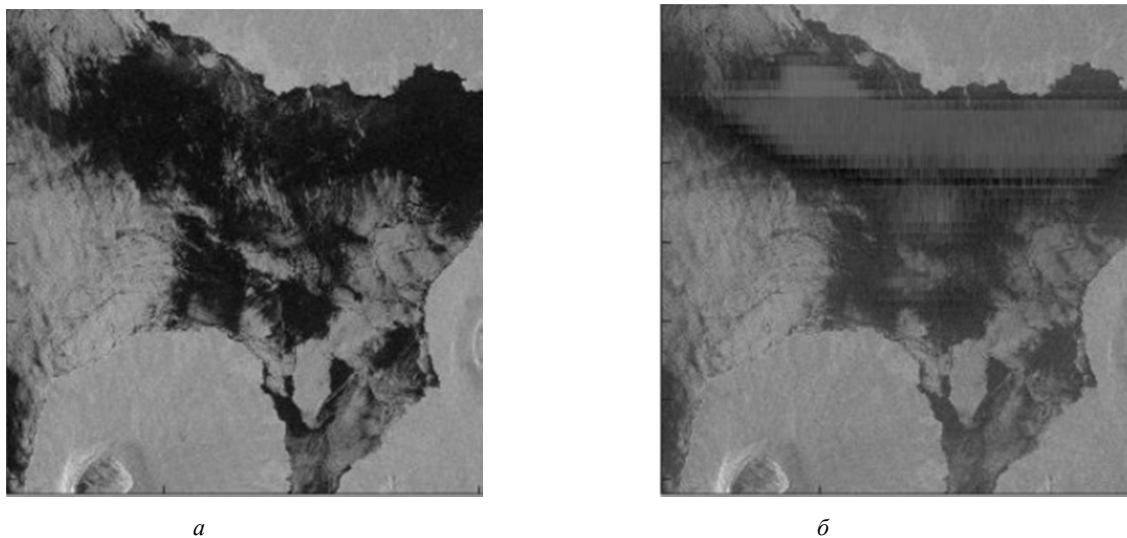


Рисунок 6. – Пример наличия шумовой области на изображении при $C_Q = 8/2$:
a – результат фокусировки исходных данных; *б* – результат фокусировки для восстановленных данных после сжатия при $C_Q = 8/2$

Заключение. Рассмотрен модифицированный алгоритм сжатия ЕСВАQ радиолокационных данных PCA и записи восстановленных после сжатия отсчетов в формате CEOS. Представлены результаты моделирования в пакете MatLab для комплексных данных PCA ERS-1. Приведены сфокусированные изображения с геометрической коррекцией для сжатых и записанных в формате CEOS данных. Результаты моделирования свидетельствуют о корректности выполнения процедур сжатия и восстановления данных с последующей записью их в формате стандартного пакета CEOS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба [и др.] – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Коберниченко, В. Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли : учеб. пособие / В. Г. Коберниченко ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. федер. ун-та, 2016. – 220 с.
3. CEOS WGD on Synthetic Aperture Radar Data Product Format Standards issue 2 revision (CEOS-SAR-CST) // Committee on Earth Observation Satellite (CEOS) Data Subgroup, 1989.
4. Беленов, А. В. Стандартные уровни обработки и форматы представления данных ДЗЗ из космоса. Мировой опыт / А. В. Беленов // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 18–202.
5. Benz, U. A Comparison of Several Algorithms for SAR Raw Data Compression / U. Benz, K. Strodl, A. Moreira // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 1995. – Vol. 33. – № 5. – P. 1266–1276.
6. Agrawal, N. SAR signal processing algorithms / N. Agrawal, K. Venugopalan // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2009. – Vol. 4, № 9. – P. 40–45.
7. Algra, T. Compression of raw sar data using entropy-constrained quantization / T. Algra // IEEE IGARSS, Honolulu, HI, 14 June 2000. – Vol. 6. – P. 2660–2662.
8. Agrawal, N. Analysis of Complex SAR Raw Data Compression / N. Agrawal, K. Venugopalan // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, USA, July 2–6, 2008 / Cambridge, 2008. – P. 155–160.
9. Вернер, М. Основы кодирования : учебник для ВУЗов / М. Вернер. – М. : Техносфера, 2004. – 288 с.
10. Моделирование алгоритма формирования радиолокационного изображения на основе представленных в формате CEOS необработанных данных дистанционного зондирования Земли / Р. П. Богуш [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 13–21.
11. Geohazard Supersites and Natural Laboratories. GEO – Group on Earth Observations. [Electronic resource]. – Mode of access: http://eo-virtual-archive4.esa.int/search/ER01_SAR_IM__0P/html/?name=Franche-Comte. – Date of access: 20.06.17.
12. Сэлмон, Д. Сжатие данных, изображений и звука / Д. Сэлмон. – М. : Техносфера, 2004. – 368 с.

Поступила 20.09.2017

**SIMULATION OF COMPRESSION ECBAQ MODIFICATION WITH REPRESENTATION
IN CEOS FORMAT OF EARTH REMOTE SENSING DAT**

R. BOHUSH, I. ZAKHARAVA, N. NAUMOVISH

Features of the representation of compressed complex SAR radar data in CEOS format for the possibility of their further processing by existing software packages are considered. The general scheme of the algorithm and the results of modeling for compression and recording of complex data in a standard format are presented. As the initial data, the values of the reflected ERS-1 signal with In –phase and Quadrature phase components were used. Data compression is performed based on entropy-constrained block adaptive quantization modification algorithm. The proposed processing algorithm is implemented in MatLab software. Experimental results are presented in the paper.

Keywords: synthetic aperture radar, CEOS format, radar image, compression.