

ISSN 1816-0301 (print)
УДК 004

Поступила в редакцию 03.01.2018
Received 03.01.2018

В. В. Старовойтов

*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии
наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

АДАПТИВНОЕ СЖАТИЕ ШИРОКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ЦИФРОВЫХ РАДАРНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Аннотация. Рассматривается задача преобразования цифрового радарного изображения, имеющего широкий динамический диапазон значений яркости (до 2^{16} величин), для отображения на стандартном мониторе. Монитор имеет 2^8 оттенков яркости серого или каждого из трех базовых цветов в системе RGB. Линейное переквантование значений яркости исходного изображения порождает практически черное изображение с небольшими светлыми точками, так как большинство исходных значений имеют величину менее 255–512 и уменьшаются в 256 раз. Для решения поставленной задачи предлагается использовать нелинейное преобразование логарифмического типа с вычисляемым по исходным изображениям параметром. На реальных данных, полученных со спутника TerraSAR-X в формате geoTIFF, выполнены сравнительные исследования с другими алгоритмами сжатия широкого динамического диапазона яркостей изображений. Показывается, что предлагаемое решение позволяет создать визуально более качественное изображение по сравнению с известными алгоритмами.

Ключевые слова: большой динамический диапазон, отображение полутонов, сжатие диапазона, цифровое изображение, компандирование

Для цитирования. Старовойтов, В. В. Адаптивное сжатие широкого динамического диапазона цифрового радарного спутникового изображения / В. В. Старовойтов // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 81–91.

V. V. Starovoitov

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

ADAPTIVE COMPRESSING OF THE HIGH DYNAMIC RANGE OF DIGITAL RADAR SATELLITE IMAGES

Abstract. Transformation of a digital radar image with a wide dynamic range of luminance values (up to 2^{16} tones) for visualization on a standard monitor is considered. The monitor has 2^8 gray value range or any of three basic colors in the RGB system. Linear quantization of the luminance values of the original image generates a nearly black image with small light blobs, since most of the original values are less than 255–512 and are reduced by 256 times. To solve the problem, it is proposed to use a nonlinear logarithmic transformation with a parameter calculated from the original images. On real data received from the TerraSAR-X satellite in the geoTIFF format, comparative studies with other compression algorithms for a wide dynamic range of image brightness are performed. It is shown that the proposed solution allows creating a visually better image in comparison with the known algorithms.

Keywords: high dynamic range, tone mapping, range compression, digital image, companding

For citation. Starovoitov V. V. Adaptive Compressing of the High Dynamic Range of Digital Radar Satellite Images. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 81–91 (in Russian).

Введение. Многие современные устройства фиксации цифровых изображений имеют широкий динамический диапазон значений $[0, 2^N - 1]$, где $N > 8$. Такие изображения называют изображениями с большим динамическим диапазоном яркостей, или HDR(High Dynamic Range)-изображениями. Например, радарные изображения с синтезированной апертурой, получаемые со спутников TerraSAR-X, RADARSAT и COSMO-SKYMED, формируют полутоновые изображения с диапазоном яркостей $[0, 2^N - 1]$, где $N = 16$. Эти изображения невозможно отобразить на обычных мониторах со стандартным разрешением до восьми бит на пиксел. Линейное переквантование уровней яркости не решает задачу, так как в исходных изображениях око-

ло 80–90 % пикселей имеют значения в диапазоне [0–255] и итоговое изображение становится практически черным с отдельными светлыми точками. Необходимо выполнить операцию согласования широкого и узкого (стандартного) динамических диапазонов. Такую процедуру реализует сжатие тонового отображения (tone mapping). Первые исследования в этом направлении были выполнены в 1990-е гг. [1, 2]. Качество работы подобных алгоритмов оценивается по уровню сохранения деталей изображения, локального контраста и отсутствию артефактов. При этом исследования по выработке объективных критериев качества отсутствуют. Как правило, результат сжатия диапазона значений оценивается визуально. Все алгоритмы, решающие данную задачу, можно разделить на два класса: глобальные и локальные. Первые используют единую формулу для пересчета значений яркости любого пикселя, вторые адаптивно изменяют формулу пересчета в зависимости от яркости соседних пикселей.

В этой связи становится актуальной задача сжатия диапазона значений исходного изображения для отображения на мониторе с минимальными потерями информации. Более формально ее можно сформулировать следующим образом: дано полутоновое изображение с диапазоном значений яркости $[0, 2^N - 1]$, где $N > 8$. Требуется преобразовать изображение так, чтобы диапазон значений был не более чем $[0, 2^8 - 1]$ и при этом максимально сохранялся контраст изображения. Преобразования этого типа можно обозначить как HDR-LDR (High and Low Dynamic Range)-преобразования, т. е. широкий динамический диапазон преобразуется в узкий. В англоязычной научно-технической литературе такие преобразования называют tone mapping, т. е. тональные преобразования. Данную задачу можно разбить на две подзадачи:

- найти функцию переэквантования яркости в меньший диапазон значений;
- оценить контраст полученного изображения.

Рассмотрим преобразования глобального типа как более быстрые, так как для изменения яркости применяется одна и та же функция. В качестве оценки контраста будем использовать среднеквадратичное отклонение яркости в окрестности каждого пикселя и изображения в целом.

Ранее было сформулировано несколько требований к преобразованиям подобного типа [3]. Пусть f – функция HDR-LDR-преобразования. Она должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Монотонность. Для любых двух пикселей, имеющих значения яркости I_1 и I_2 , $I_1 < I_2$, после HDR-LDR-преобразования с функцией f новые значения яркости должны удовлетворять неравенству $f(I_1) \leq f(I_2)$, т. е. функция f должна быть неубывающей.

2. Сохранение отношений локального контраста. Более высокий контраст результирующего изображения означает более высокое качество преобразованного изображения. Если два пикселя имеют значения яркости I_1 и I_2 , а значения локального контраста в них оцениваются как $\text{contrast}(I_1) < \text{contrast}(I_2)$, то после HDR-LDR-преобразования должно сохраняться соотношение локальных контрастов в этих пикселях в виде неравенства $\text{contrast}(f(I_1)) \leq \text{contrast}(f(I_2))$.

Нелинейные функции сжатия широкого динамического диапазона. Основным подходом к HDR-LDR-преобразованию является нелинейное преобразование яркости. Оно описывается монотонно возрастающими функциями двух классов:

- выпуклые и вогнутые (экспоненциальные, логарифмические и т. п.);
- S-образные или сигмоидные функции.

Отметим, что исследование разных вариантов сигмоидных функций для очень широкого диапазона яркостей радарных изображений показало нецелесообразность их применения. Далее в статье будут рассматриваться только логарифмические и экспоненциальные функции.

Пусть A означает матрицу исходных значений яркости, нормализованных в диапазон $[0, 1]$. Если данные не нормализованы, они обозначены в виде A_s ; A_d означает матрицу преобразованных в узкий диапазон значений яркости для отображения, $(L_d - 1)$ – максимальное значение яркости для отображения (обычно 255), $(L_s - 1)$ – максимальное значение яркости радарного изображения.

Преобразование логарифмического типа имеет вид

$$A_d = k \times \log(1 + A_s), \quad (1)$$

где k – нормализующий коэффициент для растяжения значений яркости в диапазон $[0, 255]$.

Логарифмическая функция Драго из статьи [4] описывается формулой

$$A_d = [m / \log(1 + c)] \times [\log(1 + cA) / \log(2 + 8A)^b], \quad (2)$$

где c – нормализующий коэффициент, m – коэффициент управления яркостью, b – коэффициент управления контрастом изображения.

Гамма-сжатие диапазона значений вычисляется следующим образом:

$$A_d = (L_d - 1) \times [(A / (L_s - 1))^\gamma], \quad (3)$$

где $\gamma > 0$ – параметр управления яркостной адаптацией изображения.

Функция Рейнхарда – Девлина [5] описывает модель фоторецептора и рецепторов человеческого глаза:

$$\begin{aligned} A_0 &= lA + (1 - l)A_{avg}, \\ A_d &= A / [A + (bA_0)^m], \end{aligned} \quad (4)$$

где $l \in [0, 1]$ управляет яркостной адаптацией и влияет на контраст формируемого изображения, $b \in [-8, 8]$ определяет его яркость, A_{avg} – среднее значение яркости, константа m вычисляется на базе среднего и минимального значений яркости изображения:

$$m = 0,3 + 0,7 \left((1 - A_{avg}) / (1 - A_{min}) \right)^{1,4}. \quad (5)$$

Исследования показали, что модификация данных выражений не позволяет получать визуально приемлемые радарные изображения с задаваемыми средним или медианным значениями.

При обработке цифровых сигналов часто используется их компандирование [6]. Компандирование (от англ. *compranding* (*compression + expanding*)) – это способ уменьшения количества каналов при ограниченном динамическом диапазоне значений сигнала. Он основан на увеличении числа интервалов квантования сигнала в области малых значений входного сигнала и уменьшении числа интервалов в области максимальных значений исходного диапазона [7]. Зависимость шага дискретизации от уровня сигнала называется законом компандирования. Обычно для такой дискретизации применяют логарифмические функции. Например, в телекоммуникации для компандирования в восьмибитовое представление сигнала используют μ -закон, являющийся стандартом для Северной Америки и Японии [8]. Для цифрового сигнала x он записывается следующим образом:

$$F(x) = \operatorname{sgn}(x) \frac{\ln(1 + \mu|x|)}{\ln(1 + \mu)}, \quad -1 \leq x \leq 1, \quad (6)$$

где $\mu=255$ является константой при сжатии в восьмибитовый диапазон значений.

В процессе исследований были протестированы разные варианты модификации μ -закона. Лучшим оказался вариант с заменой константы μ на параметр k , который вычисляется для каждого изображения индивидуально. Значения яркости изображения A должны быть предварительно нормализованы и не могут быть отрицательными:

$$Y(A) = \frac{\ln(1 + kA)}{\ln(1 + k)}, \quad 0 \leq A \leq 1, \quad A_d = (L_d - 1) \times Y(A). \quad (7)$$

Параметр k нелинейно влияет на изменение значений яркости из исходного широкого диапазона. Из рис. 1 видно, что при меньших значениях коэффициента k меньше растягивается средняя часть исходного диапазона значений и наоборот. Изменение этого коэффициента позволяет влиять на качество результирующего изображения. Например, исходное значение яркости 1000 может быть преобразовано в новое в диапазоне от 130 до 150.

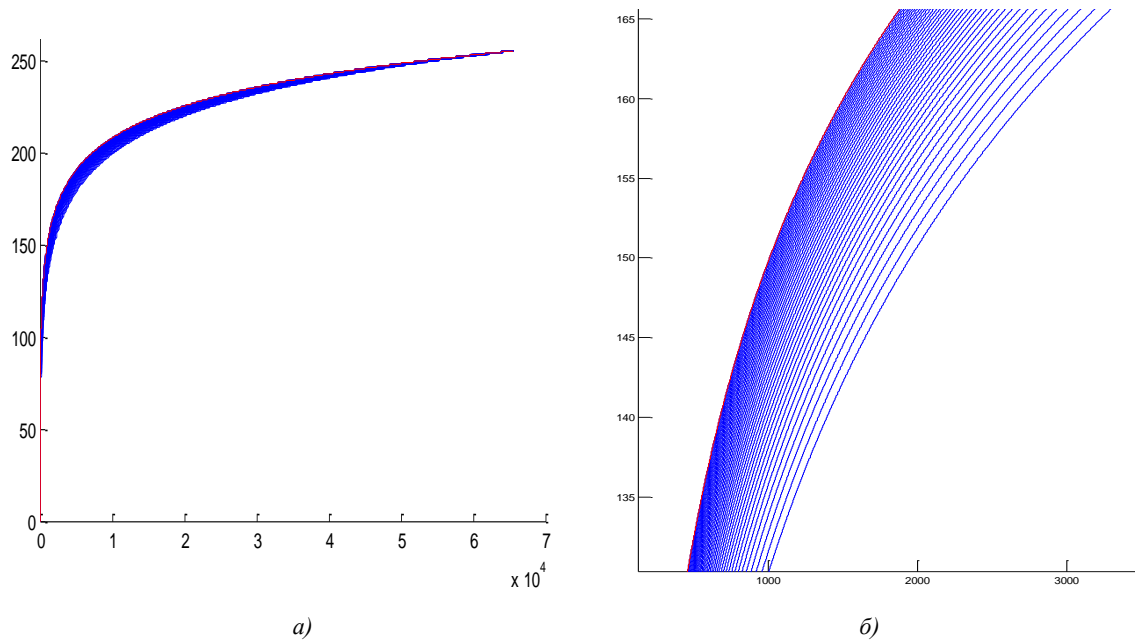


Рис. 1. Функции изменения яркости $Y(A)$ для разных значений k (а), горизонтальная шкала – исходные значения яркости, вертикальная – новые в диапазоне $[0, 255]$; увеличенный фрагмент графиков при разных коэффициентах k (б)

Для управления выбором коэффициента k было предложено вычислить медианное значение яркости $med1$ исходного изображения A и преобразовать его в заданное медианное значение $med2$ с помощью функции (7). Медианные значения лучше, чем средние, характеризуют наборы данных с широкими динамическими диапазонами значений. Таким образом, можно задать желаемое медианное значение яркости нового изображения и вычислить параметр k , подставив данные в уравнение (7):

$$med2 = \frac{\ln(1+k \times med1)}{\ln(1+k)} ; \quad (8)$$

$$k + 1 = (k \times med1 + 1)^{1/med2}.$$

Уравнение (8) имеет три точных решения при $med2 = 1/2$, $med2 = 1/3$ и $med2 = 1/4$. Первое соответствует медианному значению нового диапазона яркостей 127,5, второе – 85, третье – 64,25. Использование меньших медианных значений порождает темные изображения, а больших – слишком светлые. При других значениях $med2$ уравнение (8) относительно k можно решить итерационно с задаваемой точностью.

При $med2 = 1/2$ из (8) получается $k + 1 = (k \times med1 + 1)^2$, откуда

$$k = \frac{1-2med1}{med1^2}.$$

При $med2 = 1/3$ имеем $k + 1 = (k \times med1 + 1)^3$. Уравнение сводится к квадратному с положительным корнем

$$k = \frac{-3 \times med1^2 + \sqrt{4 \times med1 - 3 \times med1^2}}{2 \times med1^2}. \quad (9)$$

При $med2 = 1/4$ получаем $k + 1 = (k \times med1 + 1)^4$.

Уравнение (8) сводится к кубическому:

$$k^3 \times med1^4 + 4k^2 \times med1^3 + 6k \times med1^2 + 4k - 1 = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) всегда имеет действительный корень, k можно вычислить по формуле Кардано или Виета.

В итоге предложен новый вариант сжатия широкого диапазона с адаптивным выбором константы k .

Алгоритм сжатия широкого динамического диапазона состоит из следующих шагов:

1. Задать $med2$. Найти минимальное и максимальное значения яркости и нормализовать исходные значения яркости A в диапазон $[0,1]$:

$$A1 = (A - \min(A)) / (\max(A) - \min(A)).$$

2. Вычислить $med1$ исходного изображения $A1$. Вычислить коэффициент k по формуле (9).

3. Выполнить HDR-LDR-преобразование:

$$A2 = \text{round} (255 \times (\log(k \times A1 + 1) / \log(k + 1))).$$

Данное преобразование трансформирует исходные яркости из широкого диапазона значений в узкий (или стандартный) с заданным медианным значением $med2$ в диапазоне яркостей $[0,255]$.

Аналогично по заданным медианным значениям можно вычислить параметр γ в формуле (2):

$$\gamma = \frac{\log med2}{\log med1}.$$

Отметим, что применение средних значений вместо медианных не дает желаемого результата в силу линейности вычисления средних значений и нелинейности HDR-LDR-преобразования.

Экспериментальный анализ предложенного преобразования. В экспериментах использовались реальные 16-битовые радарные изображения Панамского канала и Подмосковья, записанные в формате GeoTIFF [9]. Примеры разных преобразований фрагмента 7000×7000 пикселей снимка Панамского канала приведены на рис. 2–5. Характеристики исходного изображения: среднее значение яркости – 135,11, медианное – 98, максимальное – 32 767, средне-квадратичное отклонение – 192,89.



Рис. 2. Преобразование типа $A_s(A_s > 255) = 255$. Потеряны детали в областях с большой яркостью



Рис. 3. Простое логарифмическое преобразование $30 \times \log(A_s + 1)$ создает слишком светлое изображение. Среднее значение яркости – 137,97, медианное – 138, std – 22,35

В результате анализа разных вариантов вычисления параметра k задаваемое значение параметра $med2=1/2$ было забраковано, поскольку итоговое изображение получалось слишком светлым. Два других значения $med2=1/3$ и $med2=1/4$ создавали визуально приемлемые изображения. Однако для некоторых изображений или их фрагментов желательно было получить вариант параметра k , определяемый промежуточным медианным значением.



Рис. 4. Сжатие диапазона значений яркости с помощью μ -закона. Не видны детали в темных областях, среднее значение яркости – 29,12, медианное – 26, std – 16,60



Рис. 5. Сжатие предложенным способом. Параметр $k = 3423,23$. Видны детали, среднее значение яркости – 76,20, медианное – 76, std – 21,57

Для быстроты вычисления в качестве промежуточного значения параметра k использовалось геометрическое среднее значений параметра k , вычисленных по формулам (9) и (10). Для ускорения вычисления $med1$ допустимо находить медианное значение не для всех пикселей, а, например, с шагом 10 по вертикали и горизонтали. В итоге сортируется массив в 100 раз меньшего объема, а значение медианы отличается от истинного не более чем на одну-две единицы в исходном диапазоне значений.

Визуально радарные изображения, сжатые до стандартного диапазона значений яркости методом гамма-коррекции (3) и предложенным алгоритмом, очень похожи. Однако средне-квадратичное отклонение последних выше, что объясняется особенностями функций сжатия. Логарифмическая функция формирует более темные оттенки, чем степенная, при результирующих значениях менее заданной медианной величины и более яркие – при больших значениях (рис. 6).

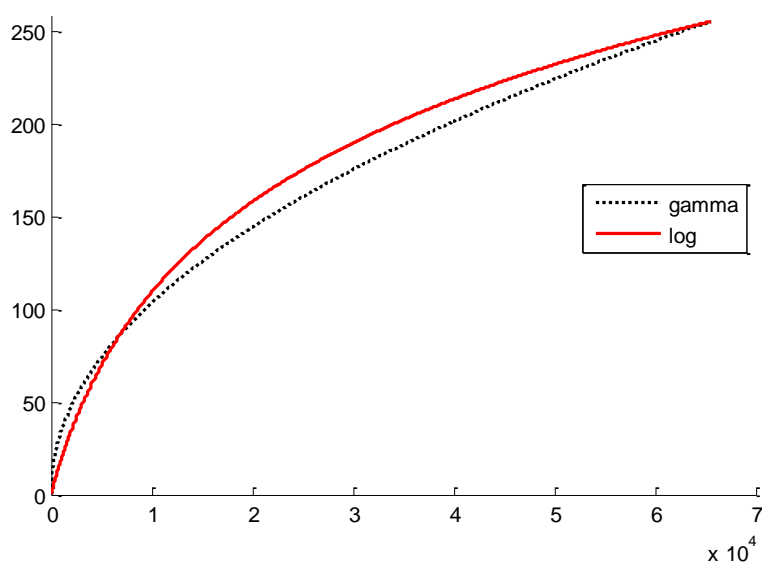


Рис. 6. Графики функций сжатия по формулам (3) и (9) при заданном медианном значении яркости, равном 85

Оказалось, что требование 2, сформулированное во введении, не выполняется примерно у 44–48 % пар пикселей, если в качестве оценки локального контраста использовать среднеквадратичное отклонение яркости исходного и преобразованного изображений. В то же время в отличие от исходного изображения преобразованное имеет почти нормальное распределение локальных среднеквадратичных отклонений яркости вокруг пиксела (рис. 7), поэтому для единой оценки результата преобразования можно использовать среднее от множества локальных отклонений.

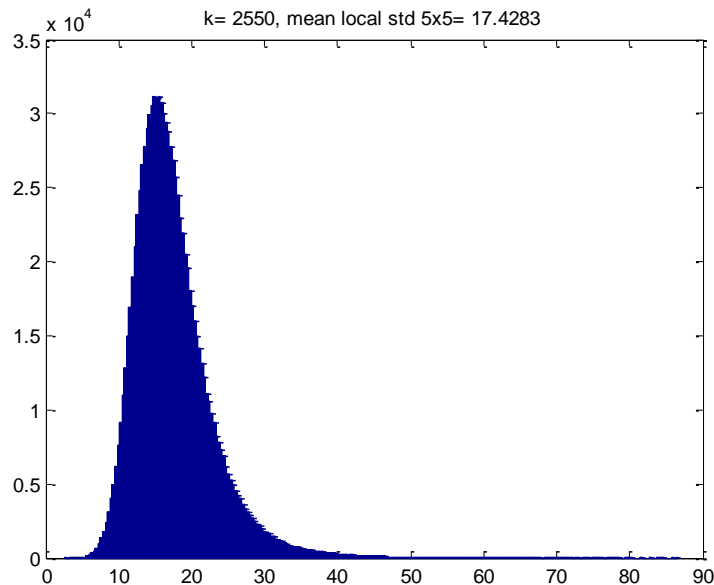


Рис. 7. Гистограмма локальных std в окрестности 5×5

Оценки глобального и среднего из локальных среднеквадратичных отклонений яркости (и их дисперсии) имеют схожие тенденции для разных значений параметра k (рис. 8). Однако глобальное отклонение быстрее вычисляется, поэтому оно принято в данном исследовании за оценку качества при сравнении разных вариантов HDR-LDR-преобразования.

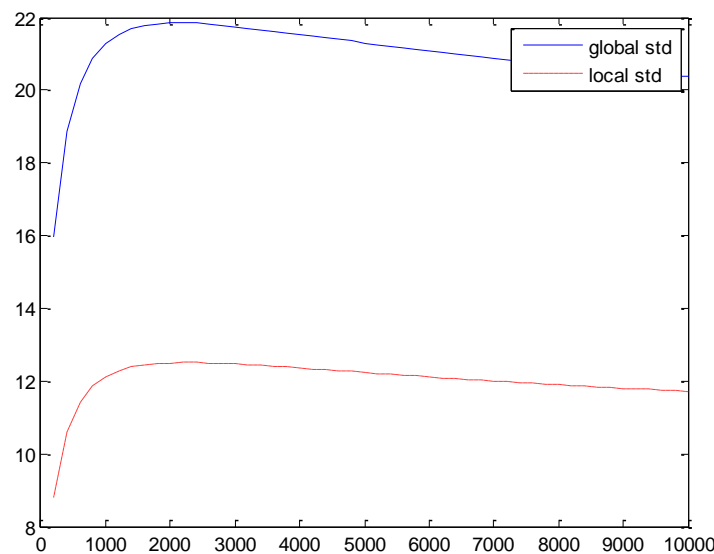


Рис. 8. Графики глобального и среднего из локальных среднеквадратичных отклонений яркости для разных значений параметра k

Такие оценки качества сжатия динамического диапазона изображений, как TMQI2 (tone mapped image quality index), структурная точность [10, 11], нормальность, контраст, яркость, предложенные в [11], и оценка QiNafchi [12] оказались бесполезными в случае применения к радарным космическим снимкам, что подтверждают графики на рис. 9. Эти оценки не имеют выраженных пиков для средних значений параметра k , соответствующих визуально качественным изображениям.

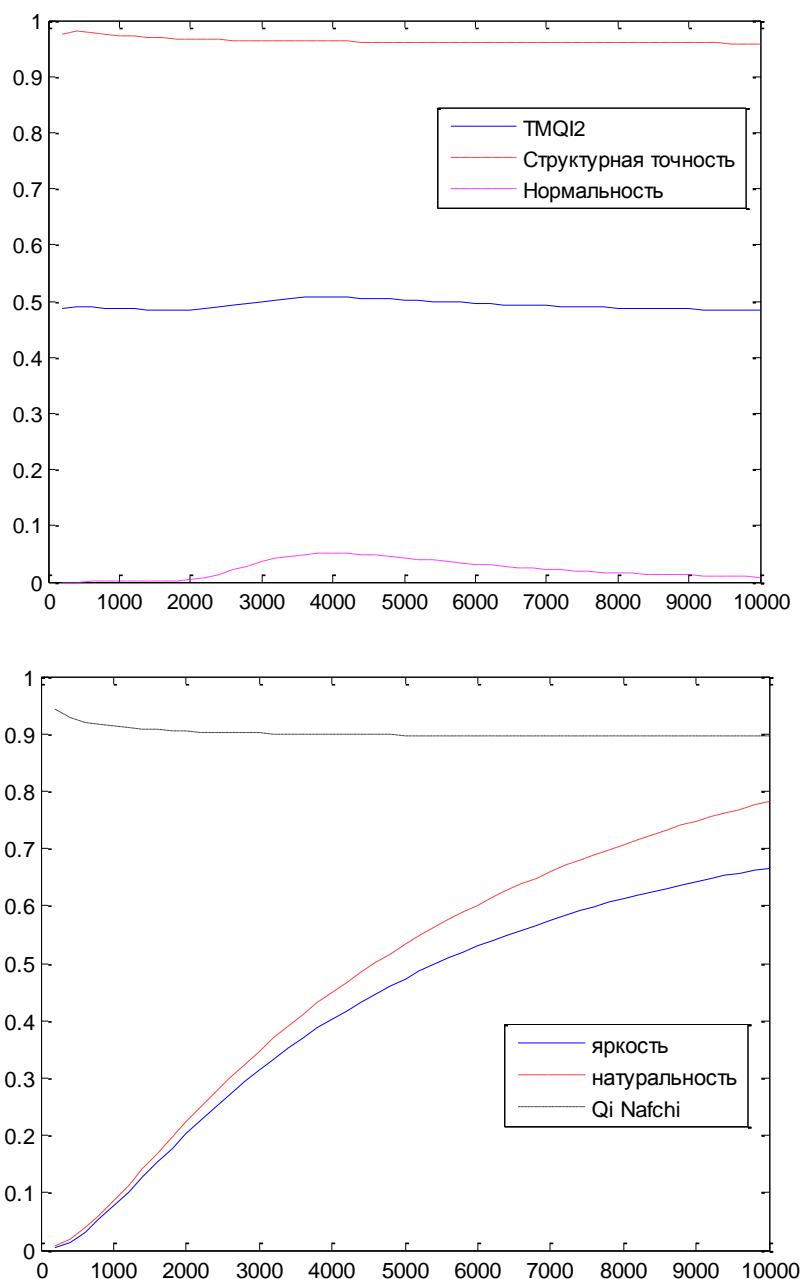


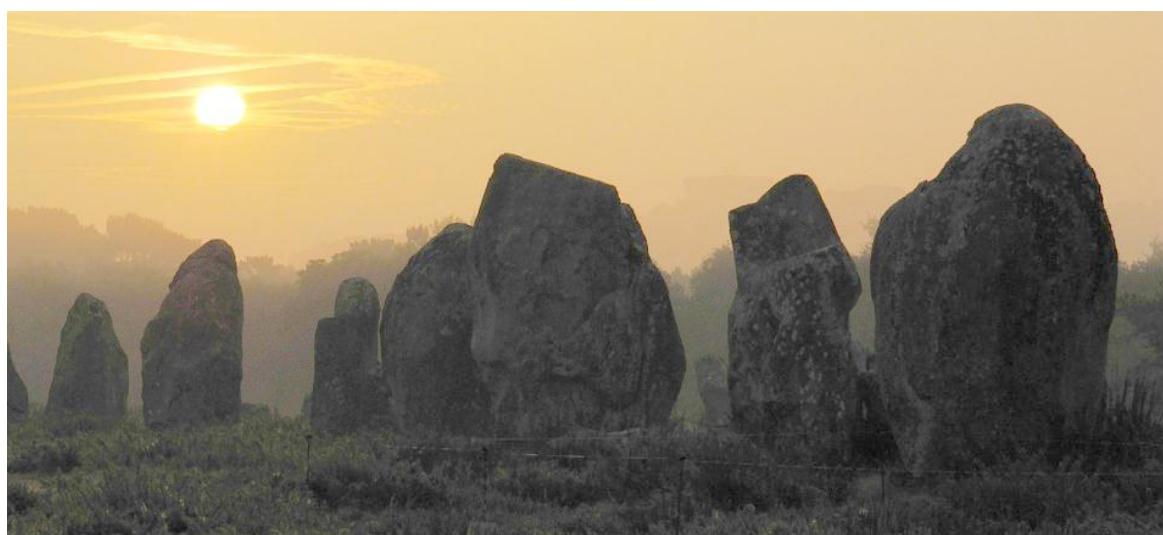
Рис. 9. Оценки качества изображений в отсутствие эталона при сжатии динамического диапазона радарных снимков для $100 < k < 10\,000$

Описанный вариант изменения яркости изображения можно применять для повышения качества темных фотографий с небольшими яркими участками, если требуется сделать более заметными детали темных областей. На рис. 10 после преобразования изображения хорошо видны детали, которые ранее видны не были. Гамма-коррекция с таким же медианным значе-

нием формирует менее контрастное изображение со среднеквадратичным отклонением яркости, даже меньшим, чем у исходного изображения.



a)



б)

Рис. 10. Исходное изображение (медианное значение – 18, std – 65,76) (a); преобразованное предложенным методом (медианное значение – 85, std – 67,61) (б)

Заключение. В работе исследована задача сжатия широкого динамического диапазона яркостей радарных спутниковых изображений для отображения на стандартных мониторах. Предложен и обоснован алгоритм соответствующего преобразования, основанный на нелинейном переквантовании значений яркости на базе логарифмической функции с задаваемым медианным значением формируемого изображения, что позволяет управлять выбором параметра преобразования.

Попытки комбинирования частично линейного (в области малых значений яркости) и нелинейного преобразования для остальных значений не дали заметных улучшений формируемых изображений, поэтому такой вариант преобразования был отклонен.

Исследована корректность оценок качества изображений, получаемых после сжатия динамического диапазона, таких как нормальность, контраст, яркость, структурная точность и др., опубликованных в литературе. Показано, что они некорректно оценивают результаты сжатия

радарных снимков. В качестве оценки контраста изображений можно использовать средне-квадратичное отклонение или дисперсию яркости. Предложенный подход позволяет повысить качество темных фотографий для их визуального анализа.

Работа частично выполнена в рамках проекта БРФФИ Ф16СРБГ-004.

Список использованных источников

1. Schlick, C. Quantization techniques for visualization of high dynamic range pictures / C. Schlick // *Photorealistic Rendering Techniques*. – Berlin, Heidelberg, 1995. – P. 7–20.
2. Larson, G. W. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes / G. W. Larson, H. Rushmeier, C. Piatko // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 1997. – Vol. 3, no. 4. – P. 291–306.
3. Starovoirov, V. Comparative Analysis of Some Dynamic Range Reduction Methods for SAR Image Visualization // *Intern. Conf. on Pattern Recognition and Information Processing*. – Cham: Springer, 2017. – P. 63–76.
4. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes / F. Drago [et al.] // *Computer Graphics Forum*. – 2003. – Vol. 22, no. 3. – P. 419–426.
5. Reinhard, E. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology / E. Reinhard, K. Devlin // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2005. – Vol. 11, no. 1. – P. 13–24.
6. Smith, B. Instantaneous companding of quantized signals / B. Smith // *Bell Labs Technical Journal*. – 1957. – Vol. 36, no. 3. – P. 653–709.
7. Берлин, А. Н. Оконечные устройства и линии абонентского участка информационной сети / А. Н. Берлин. – М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2016. – 395 с.
8. ITU-R BT.709-5: Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange [Electronic resource]. – June 2015. – Mode of access: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.709/en>. – Date of access: 20.12.2017.
9. Sample Radar Imagery [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.intelligence-airbusds.com/en/23-sample-imagery.php#>. – Date of access: 20.12.2017.
10. High dynamic range image compression by optimizing tone mapped image quality index / K. Ma [et al.] // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2015. – Vol. 24, no. 10. – P. 3086–3097.
11. Yeganeh, H. Objective quality assessment of tone-mapped images / H. Yeganeh, Z. Wang // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2013. – Vol. 22, no. 2. – P. 657–667.
12. FSITM: a feature similarity index for tone-mapped images / H. Z. Nafchi [et al.] // *IEEE Signal Processing Letters*. – 2015. – Vol. 22, no. 8. – P. 1026–1029.

Информация об авторе

Старовойтов Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Information about the author

Valery V. Starovoirov – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova Str., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valerys@newman.bas-net.by