

УДК 621.391

**ВЗВЕШЕННОЕ СЛОЖЕНИЕ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ЛОКАЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ С УЧЕТОМ РАЗМЕРОВ ИХ ОБЛАСТЕЙ**М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ^{1,2}, И.И. ЛЕВОНЕНКО², Е.Г. МАКЕЙЧИК², В.Ю. ЦВЕТКОВ²,
В.А. ЛАПИЦКАЯ¹, С.А. ЧИЖИК¹

1 – Институт тепло- и массообмена имени А.В.Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь
2 – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2024

Аннотация. Рассматривается задача определения значения весового множителя для взвешенного сложения компонентных изображений двух каналов атомного силового микроскопа (АСМ), обеспечивающего повышение качества комбинированного АСМ-изображения, оцениваемого с помощью локальной корреляционной метрики в квадратном окне, размер которого согласован с преобладающими размерами областей на компонентных АСМ-изображениях.

Ключевые слова: атомная силовая микроскопия, оценка качества комбинирования изображений, корреляция изображений, взвешенное сложение изображений.

Введение

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) поверхности материала использует несколько параллельных синхронизированных измерительных каналов для измерения высоты, вязкости и жесткости поверхности. Получаемые в этих каналах значения переносятся в двухмерные матрицы чисел, представляемые многоканальными АСМ-изображениями. Яркости пикселей каждого одноканального АСМ-изображения отражают значения измеряемой физической величины в соответствующих точках поверхности. Для эффективного визуального анализа многоканальных АСМ-изображений можно сформировать одно комбинированное АСМ-изображение на основе взвешенной суммы АСМ-изображений отдельных каналов (компонентных АСМ-изображений), что значительно проще других известных методов, например [1, 2]. В данной работе рассматриваются комбинирование двух АСМ-изображений.

С учетом ограниченного динамического диапазона комбинированного АСМ-изображения для повышения его качества необходимо обеспечить минимальные искажения наиболее значимых деталей компонентных АСМ-изображений при их взвешенном сложении. Для оценки качества АСМ-изображений, отличающихся существенными локальными неоднородностями распределения яркости, представляет интерес метрика на основе локальной корреляции [3], учитывающая вклад каждого из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение и корреляцию между компонентными АСМ-изображениями. Локальная корреляция, в отличие от других известных метрик качества [4–7], специально ориентирована на АСМ-изображения и обеспечивает более высокую точность оценки качества комбинирования АСМ-изображений по сравнению с глобальной корреляцией, но ее значения существенно зависят от размера окна анализа. В [3] для определения размера окна вычисления локальной корреляционной метрики используется перебор в широком диапазоне возможных размеров деталей компонентных АСМ-изображений, что приводит к крайне низкой скорости обработки.

Целью работы является повышение скорости определения размера окна для вычисления локальной корреляционной метрики, используемой для оценки качества комбинированных АСМ-изображений.

Формирование комбинированных АСМ-изображений

Предполагая независимость эффективности методов объединения изображений и точности показателей качества АСМ-изображений выберем простейший метод взвешенного сложения (рис. 1) для формирования комбинированных АСМ-изображений. Согласно данному методу значения пикселей $m_c(y, x)$ комбинированного АСМ-изображения

$M_c = \|m_c(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ вычисляются на основе значений пикселей АСМ-изображений

$M_1 = \|m_1(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ первого и $M_2 = \|m_2(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ второго измерительных

каналов атомного силового микроскопа с помощью выражения

$$m_c(y, x) = \lceil km_1(y, x) + (1-k)m_2(y, x) \rceil \quad (1)$$

при $y = 0, \overline{Y-1}$, $x = 0, \overline{X-1}$,

где k – коэффициент, определяющий вклад значений пикселей каждого компонентного АСМ-изображения M_1 и M_2 в значения пикселей комбинированного АСМ-изображения M_c , $0 < k < 1$; Y, X – размеры (в пикселях) компонентных и комбинированного АСМ-изображений по вертикали и горизонтали; $\lceil \rceil$ – операция округления значений пикселей до ближайшего целого.

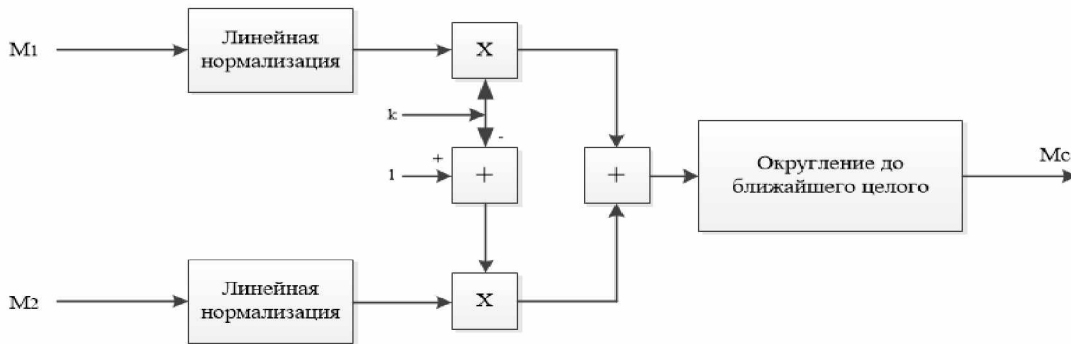


Рис. 1. Схема формирования комбинированного АСМ-изображения на основе взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений

Меньшие значения коэффициента k на рис. 1 соответствуют меньшей относительной доли значений компонентного АСМ-изображения M_1 в комбинированном АСМ-изображении M_c по сравнению с компонентным АСМ-изображением M_2 . Выбор значения k , в общем случае требует перебора всех возможных значений для различных размеров p окон локального корреляционного анализа.

Оценка качества комбинирования АСМ-изображений на основе коэффициента локальной корреляции

Повышение точности корреляционной оценки качества комбинирования АСМ-изображений достигается за счет учета локальных особенностей распределений значений пикселей в компонентных и комбинированном АСМ-изображениях. Для этого используется коэффициент $r_L(A, B)$ локальной корреляции двух АСМ-изображений $A = \|a(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$

и $B = \|b(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$, вычисляемый с помощью выражения

$$r_L(A, B, p) = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} |a(y, x) - a_L(y, x, p)| |b(y, x) - b_L(y, x, p)|}{\sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (a(y, x) - a_L(y, x, p))^2 \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (b(y, x) - b_L(y, x, p))^2}}, \quad (2)$$

где $a_L(y, x, p)$, $b_L(y, x, p)$ – средние значения яркостей пикселей изображений A и B в окрестности пикселя с координатами (y, x) размером $p \times p$ пикселей, $a_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p a(y+j, x+i)$,

$$b_L(y, x, p) = \frac{1}{p^2} \sum_{j=0}^p \sum_{i=0}^p b(y+j, x+i).$$

Для оценки качества комбинирования АСМ-изображений с учетом корреляции между комбинированным АСМ-изображением и каждым из двух компонентных АСМ-изображений, а также между компонентными АСМ-изображениями в [3] предложена локальная корреляционная метрика $D_L(k)$, вычисляемая с помощью выражения (чем больше ее значение, тем лучше)

$$D_L(k) = \frac{r_L(M_C, M_1, k) + r_L(M_C, M_2, k)}{|r_L(M_C, M_1, k) - r_L(M_C, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0, 5)}. \quad (3)$$

Локальная корреляционная метрика $D_L(k)$ позволяет определить значение k , обеспечивающее лучшее соотношение вкладов компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение по сравнению с глобальной корреляционной метрикой.

Быстрое определение размера окна для вычисления локальной корреляционной метрики

Для быстрого определения размера p окна вычисления значения $D_L(p, k)$ локальной корреляционной метрики при оценке качества комбинированных АСМ-изображений предлагается учитывать преобладающие размеры сегментов, выделяемых на компонентных АСМ-изображениях с помощью параллельного выращивания областей локальных экстремумов (Seeded Region Growing) (рис. 2).

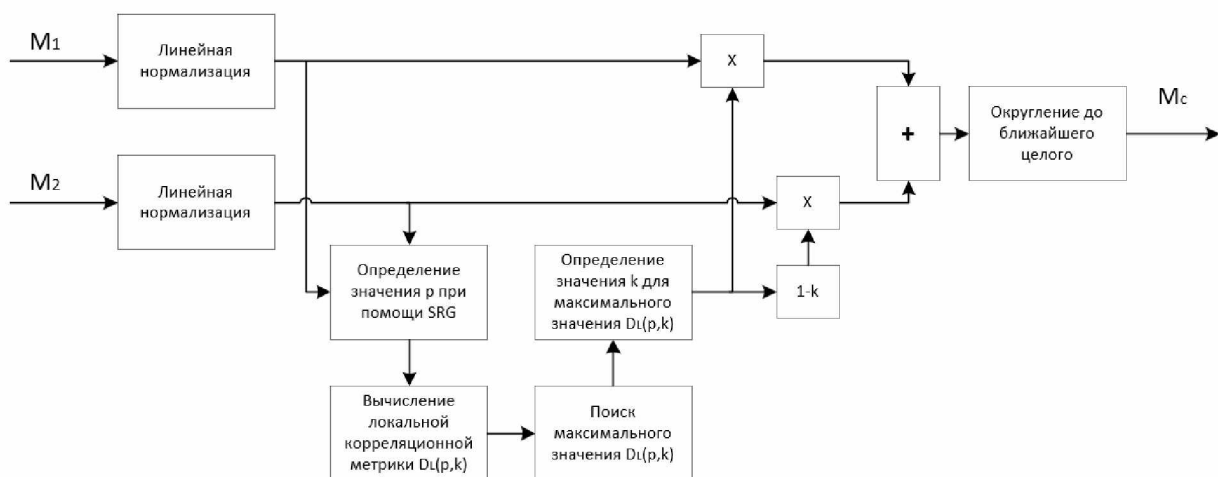


Рис. 2. Схема определения размера окна вычисления локальной корреляционной метрики

В схеме, приведенной на рис. 2, предварительно осуществляются приведение к одному динамическому диапазону и медианная фильтрация компонентных АСМ-изображений с целью устранения шума. После этого формируется список координат положения всех локальных экстремумов на АСМ-изображениях с помощью алгоритма НЗА селективно-сегментного поиска локальных яркостных экстремумов [8]. Сущность алгоритма состоит в сканировании изображения для поиска несегментированных пикселей, использовании их в качестве начальных точек роста, наращивании однородных областей и сравнении значений их граничных пикселей со значениями соответствующих пикселей смежных сегментов: область является локальным максимумом (минимумом), если значения всех ее граничных пикселей больше (меньше) значений всех смежных пикселей или равны им. В этом алгоритме сегментации используется модель параллельного выращивания областей изображения на основе присоединения смежных пикселей $i = (x, y)$ к области n , в которой присоединения пикселей происходят попеременно к

областям максимальных и минимальных экстремумов с использованием списка, состоящего из всех экстремумов изображения. Области выращиваются, пока не присоединят все пиксели изображения. Для присоединения к области смежный пиксель не должен быть занят другим регионом, а также удовлетворять условию:

$$0 \leq n(X, Y) - i(x, y) \leq |d|$$

где $n(X, Y)$ – значения экстремума; d – шаг присоединения, который изменяется от 0 с шагом 1.

Для максимальных экстремумов d отрицательное, а для минимальных – положительное. Изменение d происходит, когда все экстремумы из списка присоединяют все возможные смежные пиксели с этим шагом присоединения. После этого рост начинается заново и продолжается пока $|d|$ меньше максимального значения пикселя в изображении.

На АСМ-изображениях имеются области, которые не могут присоединить ни один смежный регион. Данные области занимают менее 1% от всего количества пикселей, поэтому не оказывают влияния на результат.

После сегментации определяются размеры выделенных областей и формируется гистограмма таких размеров для каждого компонентного АСМ-изображения. Максимумы гистограмм соответствуют наиболее часто встречающимся размерам областей на компонентных АСМ-изображениях. Предполагается, что именно области с наиболее часто встречающимися размерами являются значимыми для последующего визуального анализа и должны с минимальными искажениями отображаться на комбинированном АСМ-изображении.

На рис. 3 и 4 приведены примеры компонентных АСМ-изображений и гистограммы размеров их областей, полученные в результате работы алгоритма SRG, где по оси абсцисс отложен размер области, а по оси ординат – количество областей с таким же размером.

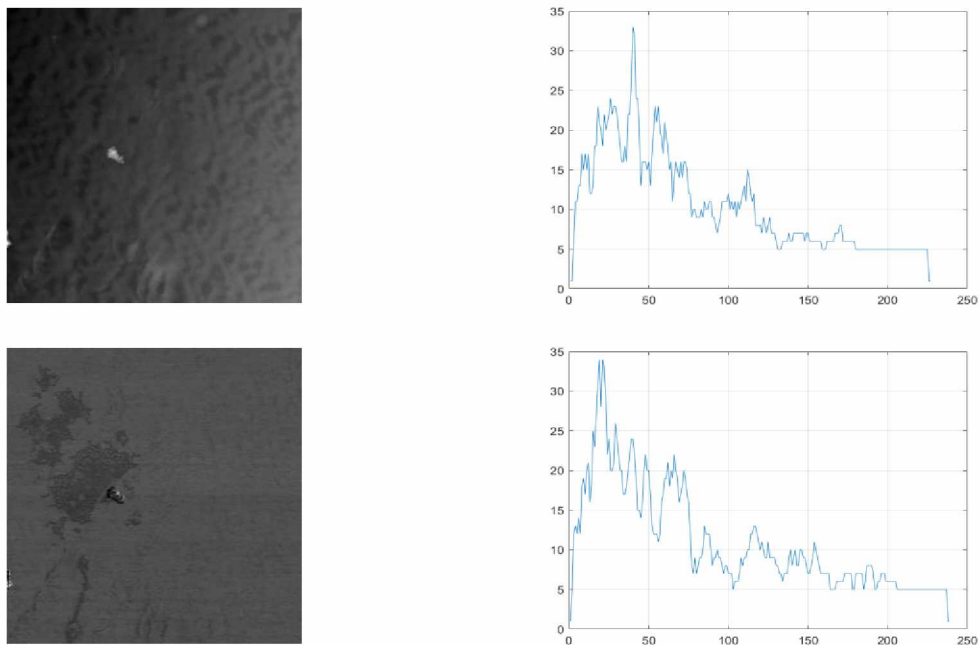


Рис. 3. Компонентные АСМ-изображения АСМ-1 и гистограммы размеров их областей

Максимальные значения гистограмм показывают лучшие размеры окон для вычисления локальной корреляционной метрики. Размер p окна корреляционного анализа определяет размер значимых областей на компонентных АСМ-изображениях, которые должны вносить основной вклад в комбинированное АСМ-изображение M_c . Поскольку значения максимумов на гистограммах, соответствующих компонентным АСМ-изображениям, не совпадают, оба максимальных значения используются для подбора лучшего значения весового множителя k , используемого для взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений по схеме, приведенной на рис. 1.

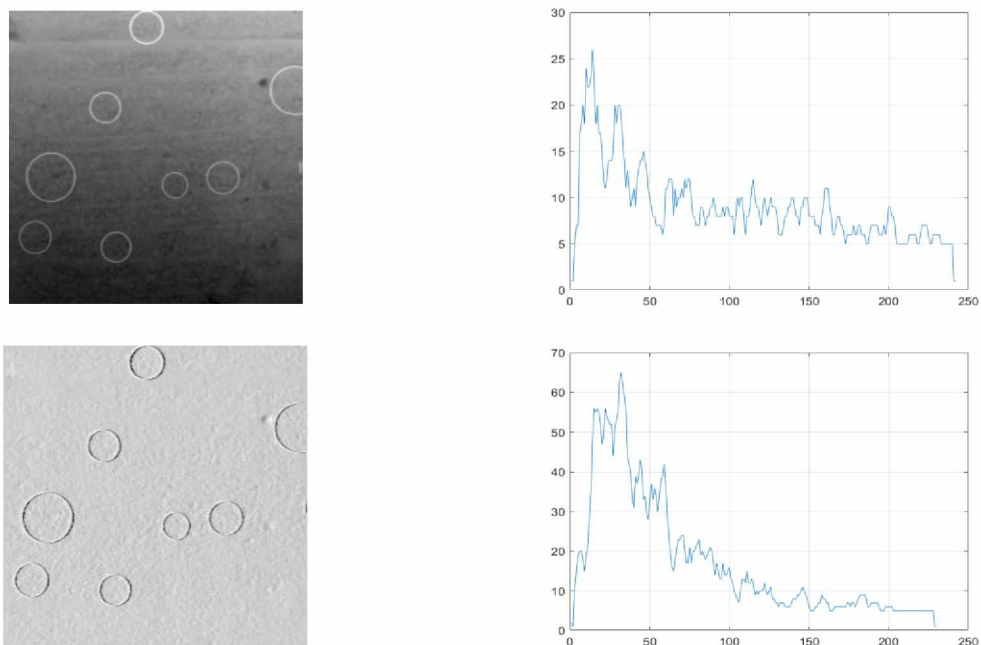


Рис. 4. Компонентные АСМ-изображения АСМ-2 и гистограммы размеров их областей

Поиск наилучшего коэффициента наложения

Полученные выше размеры окон локального корреляционного анализа (два в общем случае) используются для определения значений весового множителя k , соответствующего максимальному значению локальной корреляционной метрика D_L . Для этого выбирается один из размеров окна локального корреляционного анализа, для которого значения k изменяются в пределах $(0,1)$ с заданным шагом (определяется исходя из имеющихся временных ресурсов на обработку АСМ-изображений) и вычисляются значения локальной корреляционной метрика D_L с помощью выражения (3). То же делается для второго размера окна (примеры зависимостей $D_L(k)$ приведены на рис. 5 и 6). Затем ищется максимум зависимостей значений D_L от k , соответствующих двум размерам окон. Соответствующее максимуму значение k используется для взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений.

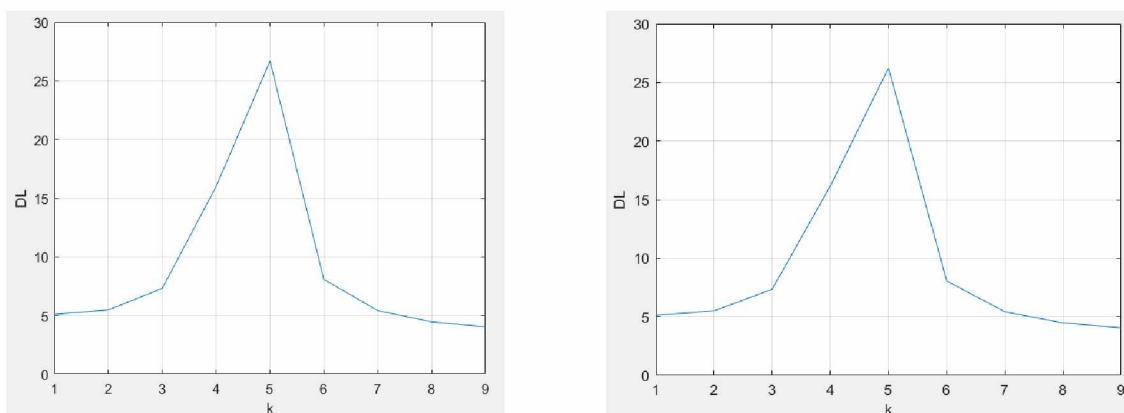


Рис. 5. Зависимости $D_L(k)$ ($k \times 10$) для размеров окон 33 и 34, полученных при обработке компонентных изображений АСМ-1

Из рис. 5 и 6 следует, что зависимости $D_L(k)$ имеют единственный максимум. Значения максимумов для зависимостей $D_L(k)$ двух компонентных АСМ-изображений, полученные для различных размеров окон корреляционного анализа, могут быть близкими, как на рис. 5, или существенно отличаться, как на рис. 6. В случае различных значений выбирается наибольшее. Шаг по k зависит от доступных временных ресурсов на обработку АСМ-изображений.

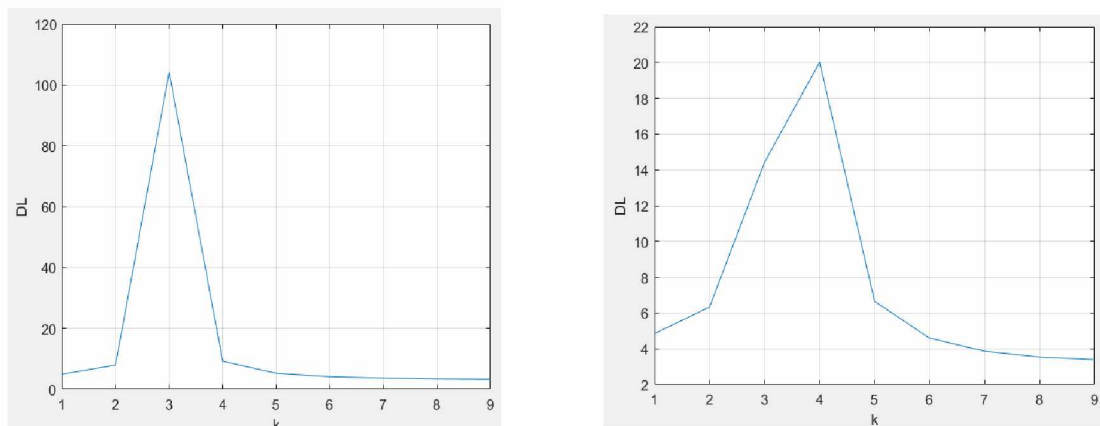


Рис. 6. Зависимости $D_L(k)$ ($k \times 10$) для размеров окон 21 и 47, полученных при обработке компонентных изображений АСМ-9

Заключение

Исследованы зависимости локальной корреляционной метрики, вычисляемой для комбинированных АСМ-изображений, от размера окна корреляционного анализа и весового множителя, используемого для взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений. Исходя из гладкой формы зависимостей локальной корреляционной метрики от упомянутых параметров исследована эффективность подхода к ускорению определения размера окна корреляционного анализа с учетом преобладающих размеров областей на компонентных АСМ-изображениях. Установлено, что значения максимумов для данных зависимостей, полученных для различных размеров окон корреляционного анализа, могут быть близкими или существенно отличаться. В случае различных значений рекомендуется выбирать наибольшее из них.

WEIGHTED COMPOSITION OF AFM IMAGES BASED ON LOCAL CORRELATION WITH ACCOUNT THE SIZES OF THEIR AREAS

M.Yu. LAVETSKI, I.I. LIAVONENKA, E.G. MAKEICHIK, V.Yu. TSVIATKOU,
V.A. LAPITSKAYA, S.A. CHIZHIK

Abstract. We consider the problem of determining the value of the weighting factor for the weighted addition of component images of two channels of an atomic force microscope (AFM), which improves the quality of the combined AFM image, assessed using a local correlation metric in a square window, the size of which is consistent with the prevailing sizes of areas in the component AFM images.

Keywords: atomic force microscopy, image combination quality assessment, image correlation, weighted image summation.

Список литературы

1. Jifeng S., Yuanjiao J., Shaoyong Z. // Proceedings of the SPIE International Conference on Space Information Technology. 2008. Vol. S98S. P. 739-744.
2. Zhang A.K., Dare. Y.P. // ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing. 2007. Vol.62, No. 4. P.249-263.
3. Ловецкий М.Ю., Цветков В.Ю., Борискевич А.А., Лапицкая В.А., Чижик С.А. // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 78-86
4. Petrovic V., Xydeas C. // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05). 2005. Vol. 1, P. 1866-1871.
5. Piella G., Heijmans H. // Proceedings International Conference on Image Processing (Cat. No.03CH37429). 2003. P. 111-173.
6. Qu G., Zhang D., Yan P. // Opt. Express. 2001. Vol. 9. P. 184-190.
7. Aslantas V., Bendes E. // AEU – International Journal of Electronics and Communications. 2015. P. 1890-1896.
8. Нгуен А.Т., Цветков В.Ю. // Информатика. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 23–36.