

УДК 621.391

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА
ОСНОВЕ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЖЕНИЯ ДВУХ КОМПОНЕНТ**М.Ю. ЛОВЕЦКИЙ^{1,2}, В.Ю. ЦВЕТКОВ², А.А. БОРИСКЕВИЧ², И.И. ЛЕВОНЕНКО²,
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 2023

Аннотация. Рассматривается задача взвешенного сложения компонентных изображений атомного силового микроскопа (АСМ). Получены зависимости локальной корреляционной метрики от размера окна корреляционного анализа и вклада компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображений. Предложена схема адаптивного взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений.

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 различных физических величин (высоты, вязкости и жесткости поверхности, деформации зонда и рассеивания энергии). Формируемые в этих измерительных каналах значения компонуются в несколько двухмерных матриц чисел, представляемых многоканальными АСМ-изображениями, в которых яркости пикселей каждого канала отражают значения измеряемой физической величины в соответствующих точках поверхности. Для эффективного визуального анализа многоканальных АСМ-изображений необходимо объединять их каналы для отображения на стандартных мониторах, имеющих относительно узкий динамический диапазон, с минимальными искажениями и потерями деталей. В данной работе рассматриваются комбинированные полутонные АСМ-изображения на основе двух измерительных каналов.

Для объединения изображений используются подходы, основанные на взвешенном сложении, методе главных компонент [1], дискретном вейвлет-преобразовании [2], однако они специально не ориентированы на объединение изображений, формируемых в измерительных каналах атомного силового микроскопа. Отсутствуют рекомендации по выбору алгоритма для эффективного формирования комбинированных АСМ-изображений. Для их разработки необходима оценка качества комбинированных изображений. Известные показатели качества изображений основаны на анализе краев [3, 4], взаимной информации [5], оценке количества информации в изображении [6], оценке точности визуальной информации в различных масштабах представления изображения [7], однако они специально не ориентированы на оценку качества комбинированных АСМ-изображений. Относительной простотой вычислений отличается коэффициент корреляции, использующий средние значения изображений, но не учитывающий локальные особенности распределения яркости. Для оценки качества АСМ-изображений, отличающихся существенными локальными неоднородностями распределения яркости, представляет интерес метрика качества комбинирования компонентных АСМ-изображений на основе коэффициентов локальной корреляции, учитывающая вклад каждого из компонентных АСМ-изображений в результирующее комбинированное АСМ-изображение и корреляцию между компонентными АСМ-изображениями. Локальная

корреляция обеспечивает более высокую точность оценки качества комбинирования АСМ-изображений по сравнению с глобальной корреляцией, но ее значения зависят от размера окна анализа.

Целью работы является определение вкладов значений пикселей компонентных АСМ-изображений, обеспечивающих передачу в комбинированное АСМ-изображение наиболее полной информации об объектах определенного размера.

Формирование комбинированных АСМ-изображений

Исходя из предположения о независимости эффективности методов объединения изображений и точности показателей качества комбинированных изображений для формирования комбинированных АСМ-изображений выбран простейший метод взвешенного сложения (рис. 1). Согласно данному методу значения пикселей $m_c(y, x)$ комбинированного АСМ-изображения $M_c = \left\| m_c(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ вычисляются на основе значений пикселей АСМ-изображений $M_1 = \left\| m_1(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ первого и $M_2 = \left\| m_2(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ второго измерительных каналов атомного силового микроскопа с помощью выражения

$$m_c(y, x) = \left[k m_1(y, x) + (1 - k) m_2(y, x) \right] \quad (1)$$

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

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; $[\]$ – операция округления значений пикселей до ближайшего целого.

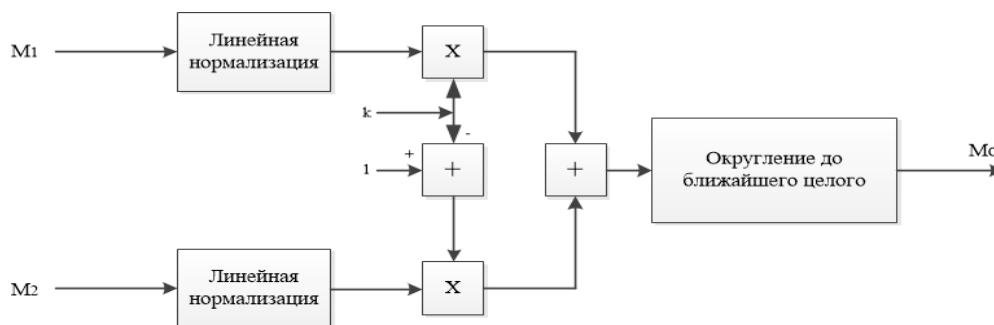


Рис. 1. Схема формирования комбинированного АСМ-изображения на основе взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений

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 .

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 $A = \left\| a(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ и $B = \left\| b(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$, 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 [8] 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.

Зависимости метрики качества комбинирования компонентных АСМ-изображений от размера окна корреляционного анализа

На рис. 2 приведены зависимости значений метрики $D_L(k)$ от размера p окна корреляционного анализа и коэффициента k для 10 комбинированных АСМ-изображений. Из рис. 2 следует, что для некоторых АСМ-изображений локальные максимальные значения метрики $D_L(k)$ зависят от значения p . Размер p окна корреляционного анализа определяет размер значимых объектов на компонентных АСМ-изображениях, которые должны вносить основной вклад в комбинированное АСМ-изображение M_C .

Из рис. 2 следует, что для АСМ-изображений 5 – 8 при любых p наибольшие значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ обеспечиваются при $k = 0,7$. На рис. 3 приведены компонентные АСМ-изображения 5 – 8, полученные при различных значениях k . Для АСМ-изображений 1 – 4, 9, 10 наибольшие значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ при различных значениях p достигаются для различных значений k .

При необходимости передачи в комбинированные АСМ-изображения 1, 3, 9, 10 наиболее полной информации о мелких объектах ($p = 3$) компонентных АСМ-изображений необходимо использовать значения k , равные 0,7, 0,5, 0,7, 0,5, соответственно. При необходимости передачи в комбинированные АСМ-изображения 1, 3, 9, 10 наиболее полной информации о более крупных объектах ($p > 5$) необходимо использовать значения k , равные 0,5, 0,3, 0,5 (0,3 при $p > 40$), 0,3, соответственно. На рис. 4 приведены компонентные АСМ-изображения 1, 3, 9, 10, полученные при различных значениях k .

Для АСМ-изображения 2 при $p < 40$ наибольшие значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ обеспечиваются при $k = 0,7$. При $p > 40$ наибольшие значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ обеспечиваются при $k = 0,5$. Для АСМ-изображения 4 при $p < 110$ наибольшие значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ обеспечиваются при $k = 0,5$. При $p > 110$ наибольшие значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ обеспечиваются при $k = 0,3$. На рис. 5 приведены компонентные АСМ-изображения 2 и 4, полученные при различных значениях k .

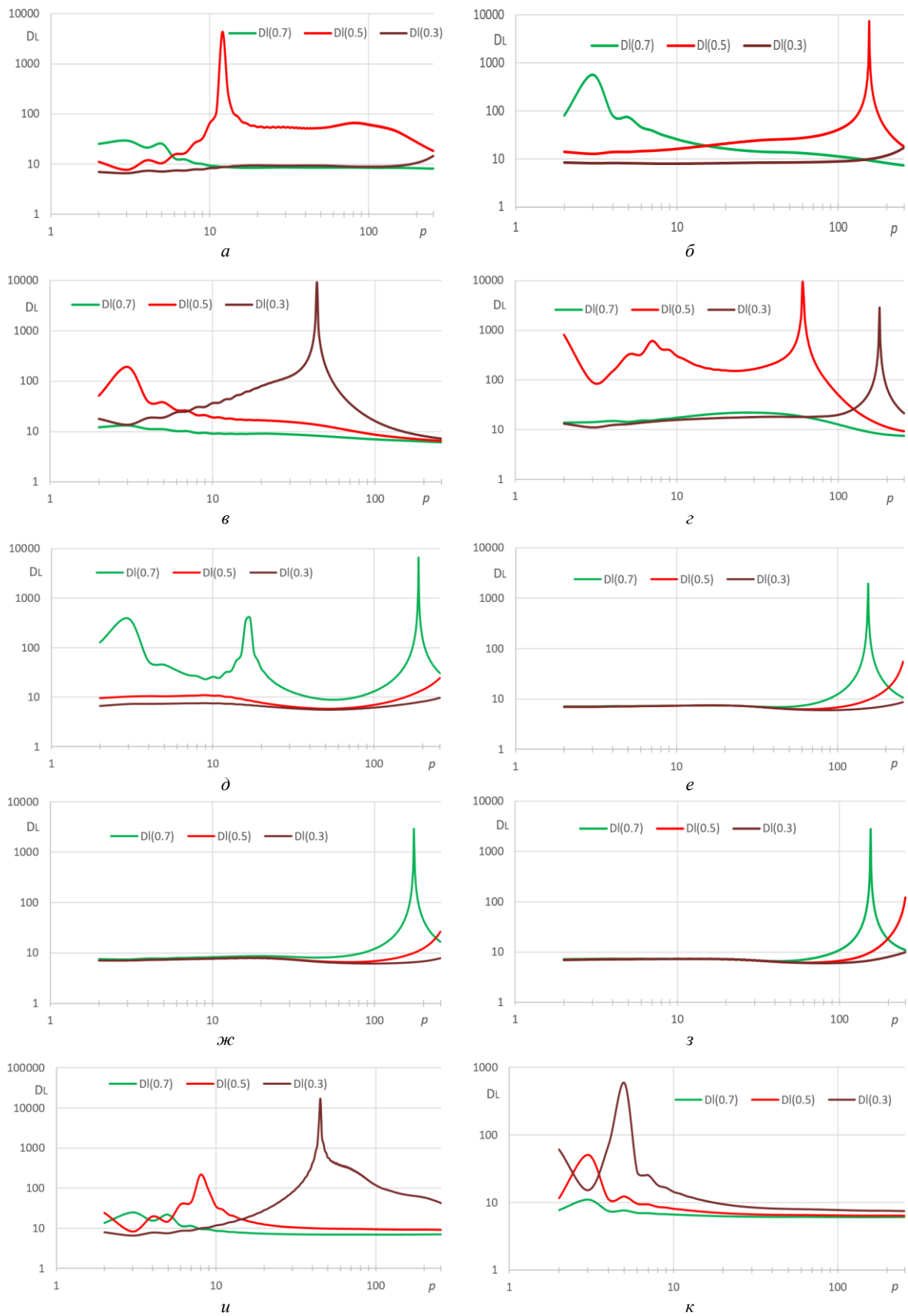


Рис. 2. Зависимости значений локальной корреляционной метрики от размера окна корреляционного анализа для компонентных АСМ-изображений: a – АСМ-1; \bar{b} – АСМ-2; \bar{v} – АСМ-3; \bar{z} – АСМ-4; \bar{d} – АСМ-5; e – АСМ-6; $\bar{ж}$ – АСМ-7; $\bar{з}$ – АСМ-8; u – АСМ-9; $\bar{\kappa}$ – АСМ-10

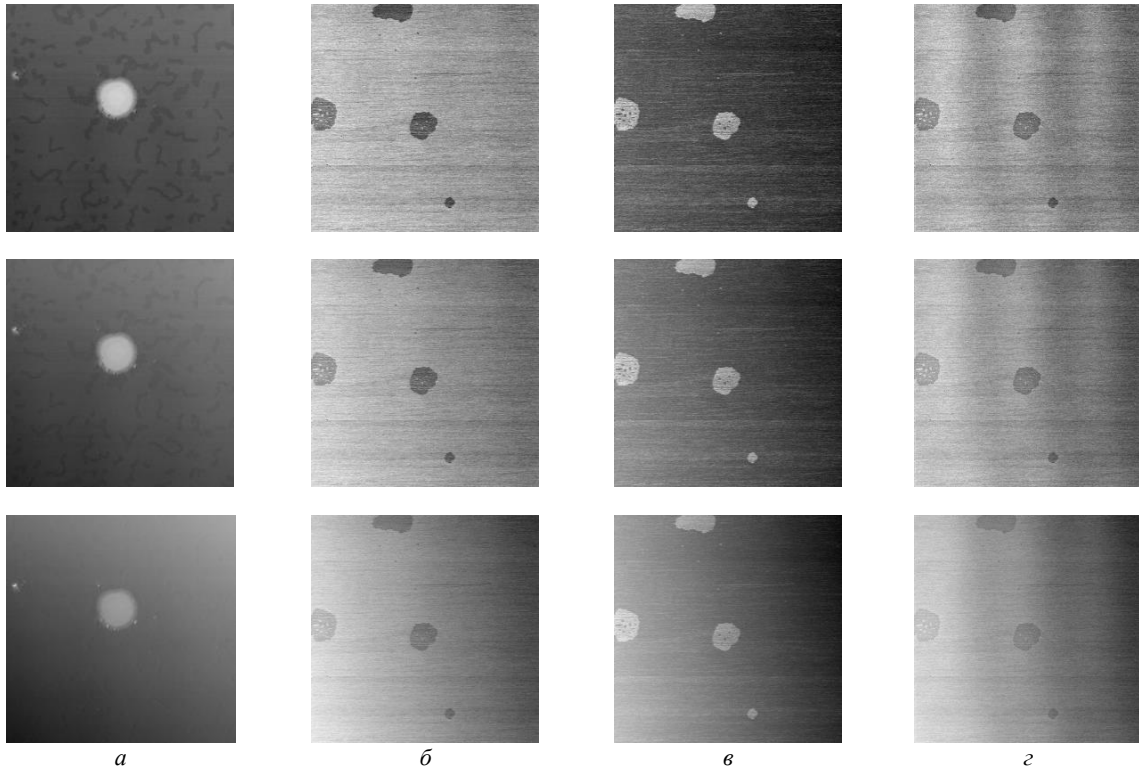


Рис. 3. Комбинированные АСМ-изображения при значениях $k=0,7$ (верхний ряд), $k=0,5$ (средний ряд), $k=0,3$ (нижний ряд): а – АСМ-5; б – АСМ-6; в – АСМ-7; г – АСМ-8

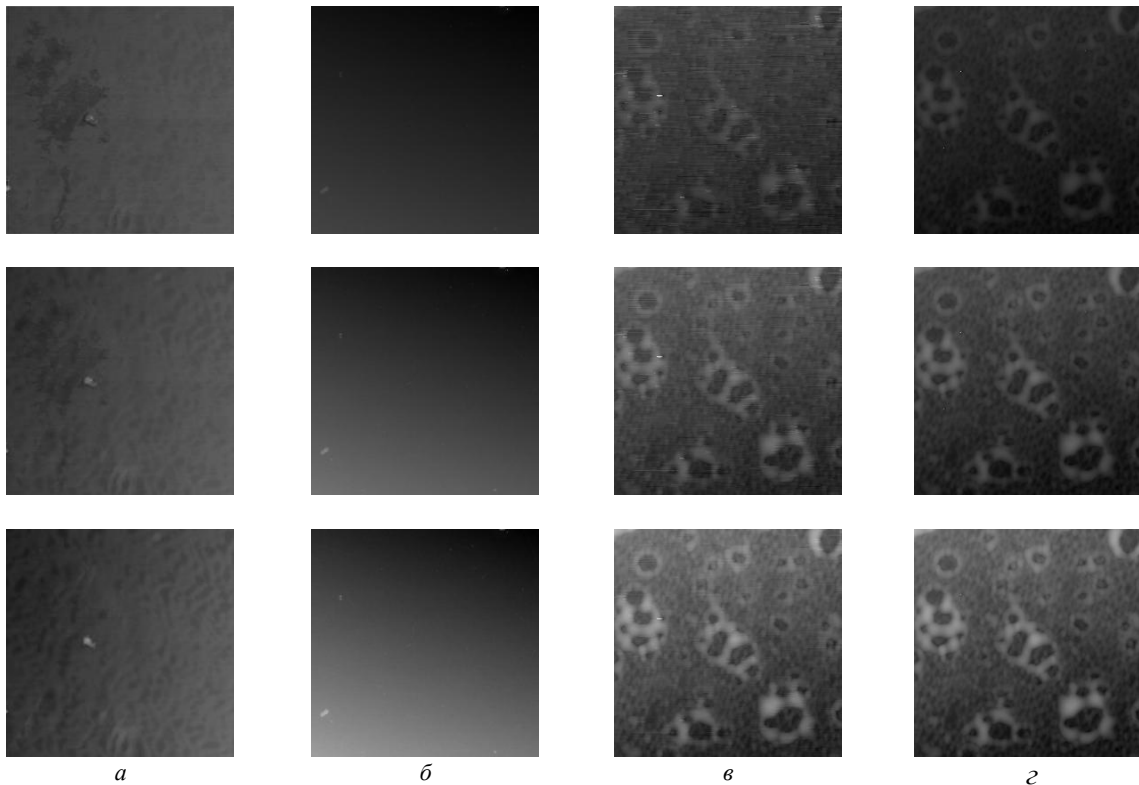


Рис. 4. Комбинированные АСМ-изображения при значениях $k=0,7$ (верхний ряд), $k=0,5$ (средний ряд), $k=0,3$ (нижний ряд): а – АСМ-1; б – АСМ-3; в – АСМ-9; г – АСМ-10

Из рис. 2 следует, что по глобальному максимальному значению локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ во всем диапазоне изменения значения p можно определить значение k , обеспечивающее лучшие условия для передачи в комбинированное АСМ-

изображение информации об объектах компонентных АСМ-изображений, имеющих наиболее часто встречающиеся размеры. С учетом данного свойства предлагается схема адаптивного взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений (рис. 6) с автоматическим выбором значения k , определяющим вклад значений пикселей компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение.

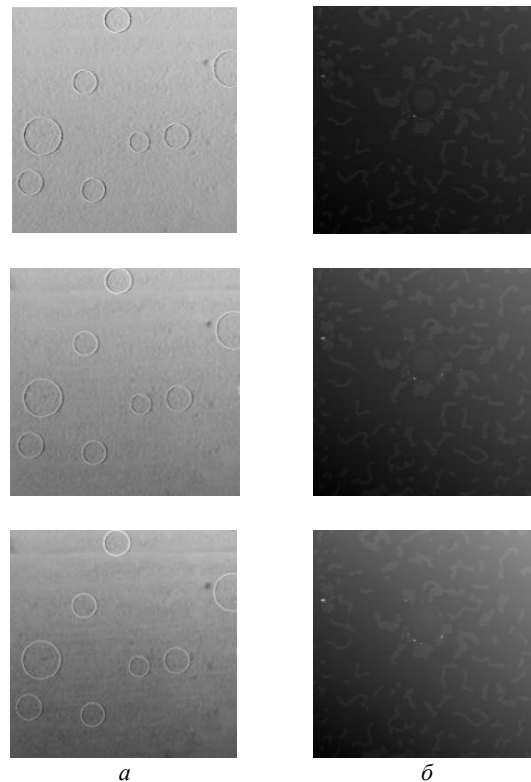


Рис. 5. Комбинированные АСМ-изображения при значениях $k=0,7$ (верхний ряд), $k=0,5$ (средний ряд), $k=0,3$ (нижний ряд): a – АСМ-2; b – АСМ-4

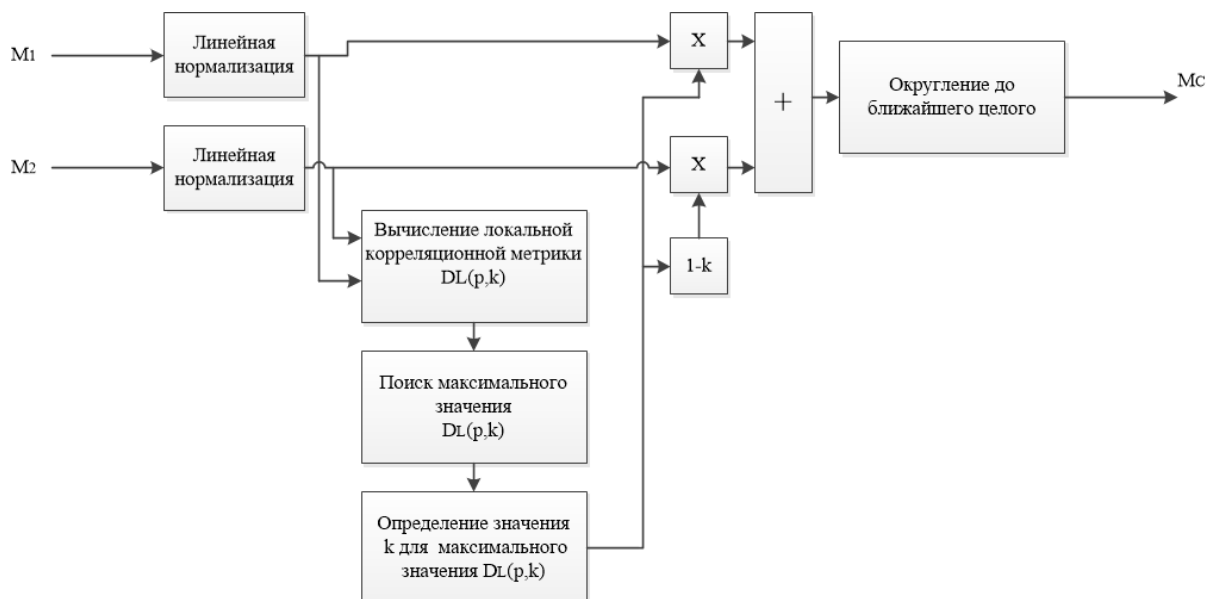


Рис. 6. Схема адаптивного формирования комбинированного АСМ-изображения на основе взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений с автоматическим определением вклада значений пикселей компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение

Схема на рис. 6 получена из схемы, приведенной на рис. 1, за счет введения дополнительных блоков, обеспечивающих вычисление значений локальной корреляционной

метрики $D_L(k)$ для различных значений p и k с последующим поиском максимального значения $D_L(k)$ и определением соответствующего ему значения k . Адаптивное формирование комбинированного АСМ-изображения имеет существенно более высокую вычислительную сложность по сравнению с обычным формированием. Значения локальной корреляционной метрики $D_L(k)$ записываются в матрицу размером $p \times k$, что приводит к соответствующему росту пространственной сложности. Временная сложность увеличивается на $2pk$ операций, необходимых для вычисления значений локальной корреляционной метрики и поиска ее максимального значения.

Заключение

Получены зависимости значений локальной корреляционной метрики от размера окна корреляционного анализа и вклада компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение. По данным зависимостям установлены вклады значений пикселей компонентных АСМ-изображений, обеспечивающих передачу в комбинированное АСМ-изображение наиболее полной информации об объектах определенного размера. Предложена схема адаптивного взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений с автоматическим определением вклада значений пикселей компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение.

FORMATION OF COMBINED AFM IMAGES BASED ON WEIGHTED ADDITION OF TWO COMPONENTS

M.Yu. LAVETSKI, V.Yu. TSVIATKOU, A.A. BORISKEVICH, I.I. LIAVONENKA,
V.A. LAPITSKAYA, S.A. CHIZHIK

Abstract. The problem of weighted addition of component images of an atomic force microscope (AFM) is considered. The dependences of the local correlation metric on the size of the correlation analysis window and the contribution of component AFM images to the resulting combined AFM images were obtained. A scheme for adaptive weighted summation of component AFM images was proposed.

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. Petrovic V., Xydeas C. // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05). 2005. Vol. 1, P. 1866-1871.
4. Piella G., Heijmans H. // Proceedings International Conference on Image Processing (Cat. No.03CH37429). 2003. P. 111-173.
5. Qu G., Zhang D., Yan P. // Opt. Express. 2001. Vol. 9. P. 184-190.
6. Aslantas V., Bendes E. // AEU – International Journal of Electronics and Communications. 2015. P. 1890-1896.
7. Han Y., Cai Y., Cao Y., Xu X. // Inf. Fusion. 2013. Vol. 14. No. 2. P. 127–135.