

УДК 621.391

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КОМБИНИРОВАННЫХ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ МЕТРИКИ

*Левоненко И.И., студент гр.160801; Ловецкий М.Ю., аспирант*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*Цветков В.Ю. – д.т.н, профессор*

**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.

**Ключевые слова.** Атомная силовая микроскопия, оценка качества комбинирования изображений, глобальная корреляция изображений, локальная корреляция 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 двумерных 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 полутоновые 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. 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

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

при  $y = 0, Y - 1$ ,  $x = 0, X - 1$ ,

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.

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  $A = \|a(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$  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 может использоваться локальная корреляционная метрика  $D_L(k)$ , вычисляемая с помощью выражения (чем больше ее значение, тем лучше)

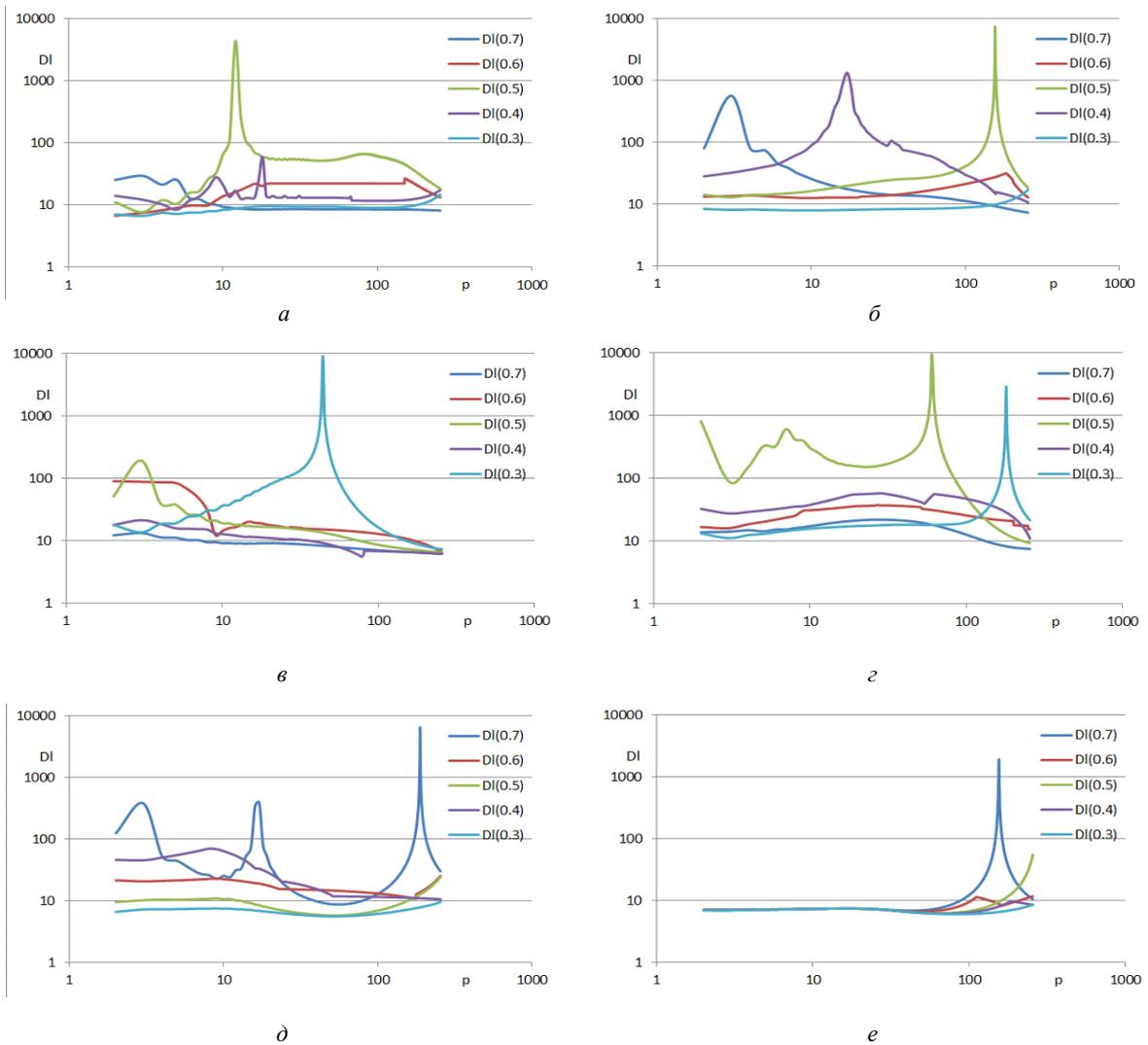
$$D_L(k) = \frac{r_L(M_c, M_1, k) + r_L(M_c, M_2, k)}{|r_L(M_c, M_1, k) - r_L(M_c, M_2, k)| r_L(M_1, M_2, 0, 5)}. \quad (3)$$

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 локальные максимальные значения метрики  $D_L(k)$  зависят от значения  $p$ . На рис. 3, 4 приведены компонентные АСМ-изображения, полученные при различных значениях  $k$ .

При необходимости передачи в комбинированные АСМ-изображения наиболее полной информации о мелких объектах ( $p = 3$ ) компонентных АСМ-изображений необходимо использовать значения  $k$ , равные 0,7, 0,7, 0,5, 0,5, 0,7, 0,7, 0,5 для АСМ-изображений 1–5, 9, 10 соответственно. В этом случае выбор значения  $k$  для АСМ-изображений 6–8 не имеет существенного значения.



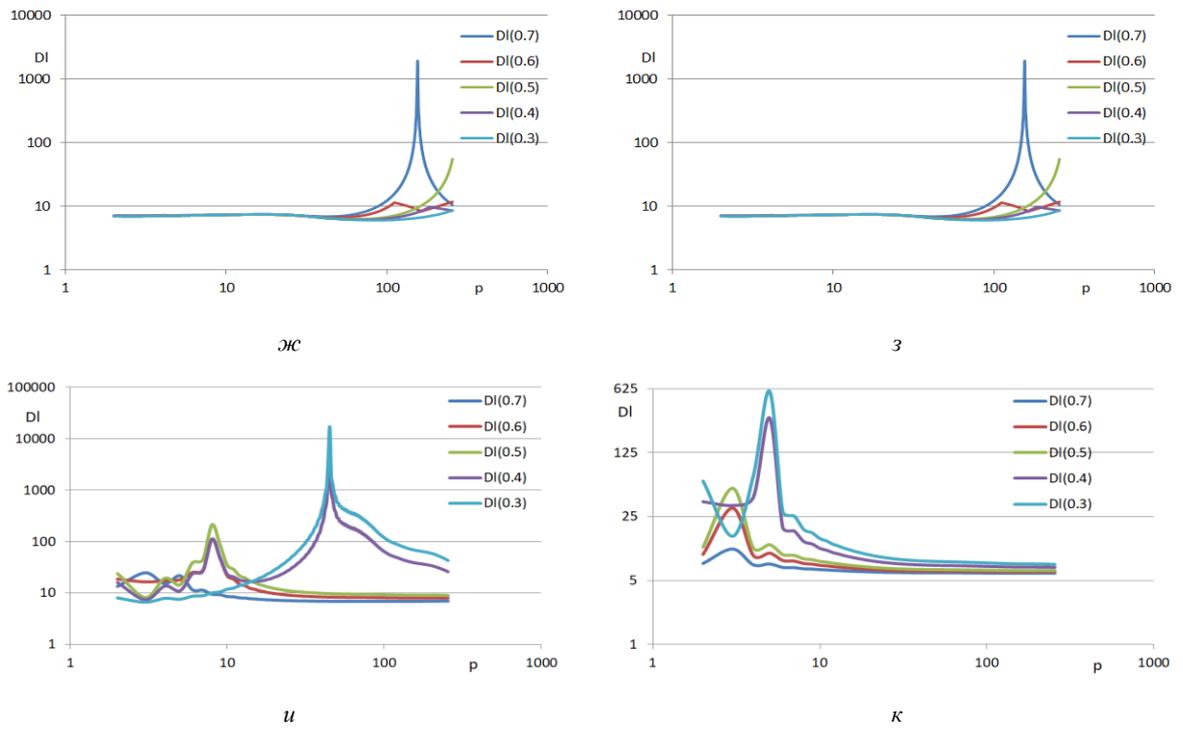


Рис. 2. Зависимости значений локальной корреляционной метрики от размера окна корреляционного анализа для компонентных АСМ-изображений: а – АСМ-1; б – АСМ-2; в – АСМ-3; г – АСМ-4; д – АСМ-5; е – АСМ-6; ж – АСМ-7; з – АСМ-8; и – АСМ-9; к – АСМ-10

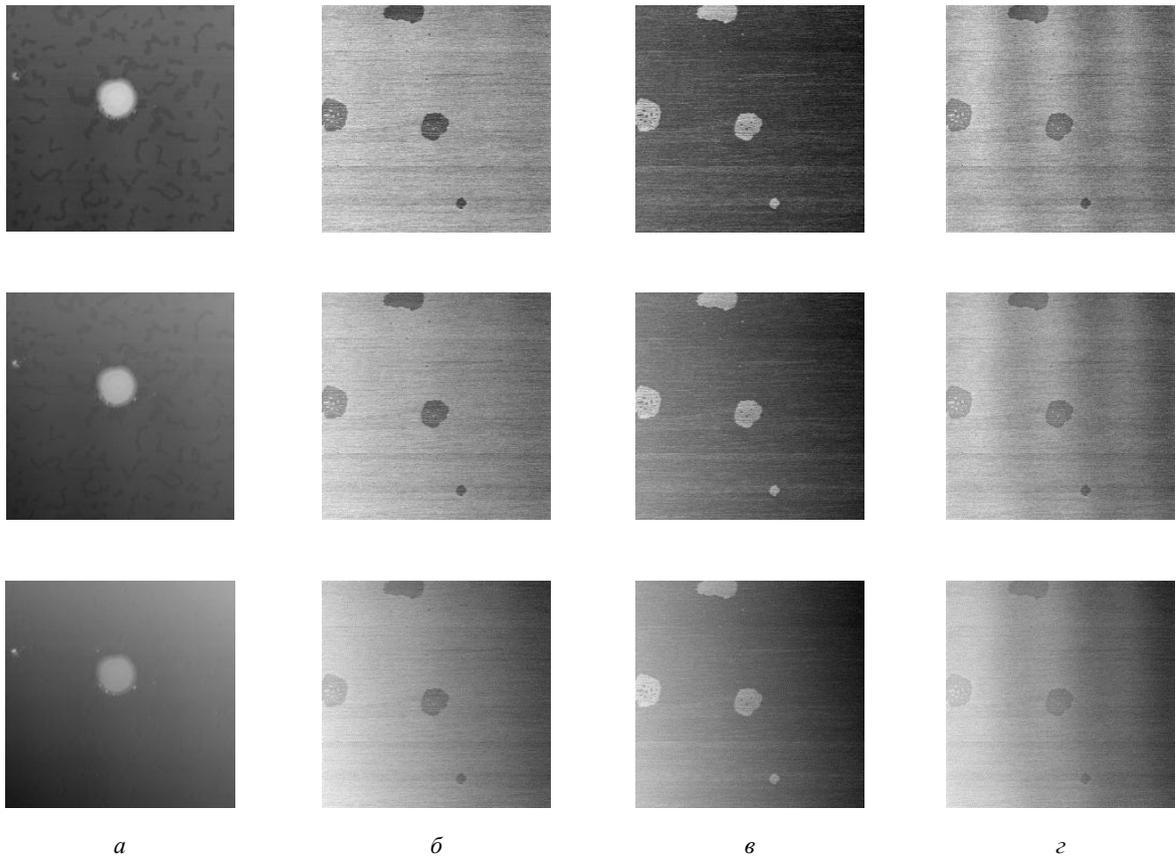


Рис. 3. Комбинированные АСМ-изображения при значениях  $k=0,7$  (верхний ряд),  $k=0,5$  (средний ряд),  $k=0,3$  (нижний ряд): а – АСМ-5; б – АСМ-6; в – АСМ-7; г – АСМ-8

При необходимости передачи в комбинированные АСМ-изображения наиболее полной информации о более крупных объектах ( $p > 3$ ) необходимо использовать различные значения  $k$ , обеспечивающие для различных АСМ-изображений наибольшие значения метрики  $D_L(k)$ .

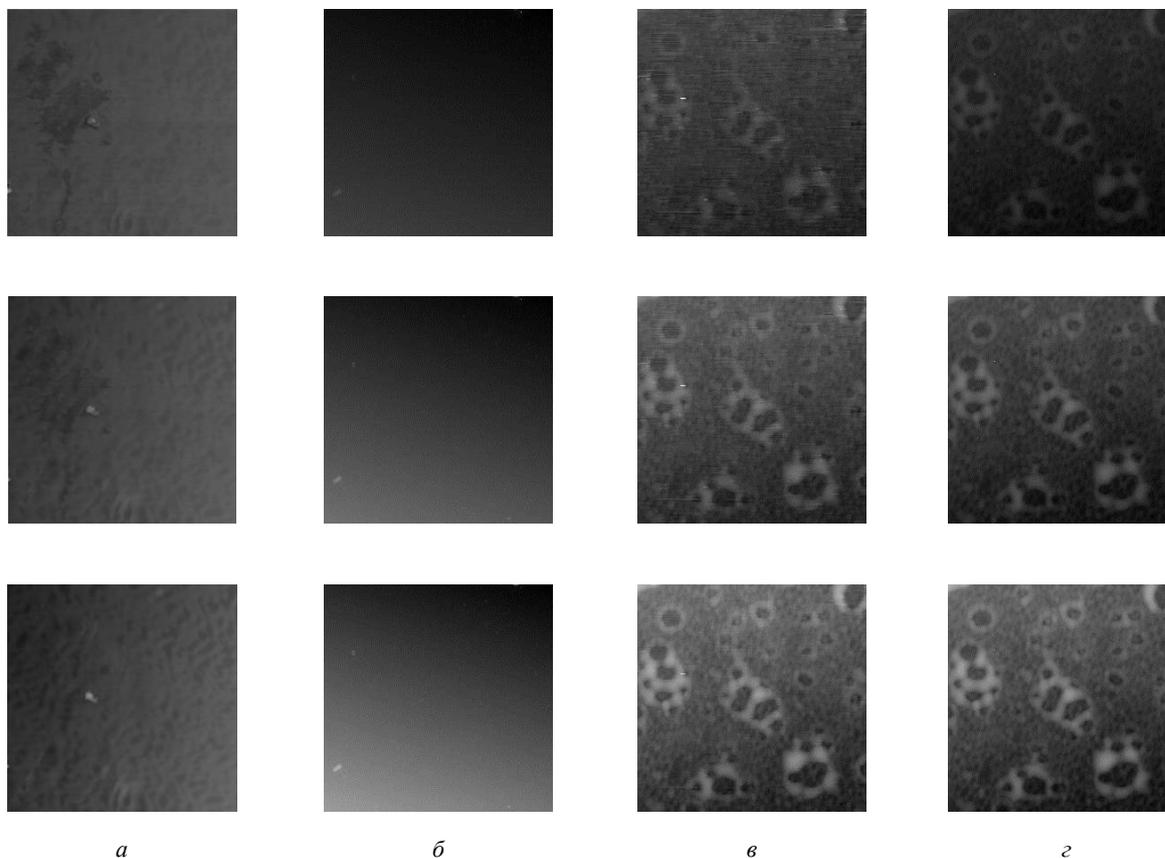


Рис. 4. Комбинированные АСМ-изображения при значениях  $k=0,7$  (верхний ряд),  $k=0,5$  (средний ряд),  $k=0,3$  (нижний ряд): а – АСМ-1; б – АСМ-3; в – АСМ-9; г – АСМ-10

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 разработана схема адаптивного взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений (рис. 5) с автоматическим выбором значения  $k$ , определяющим вклад значений пикселей компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение.

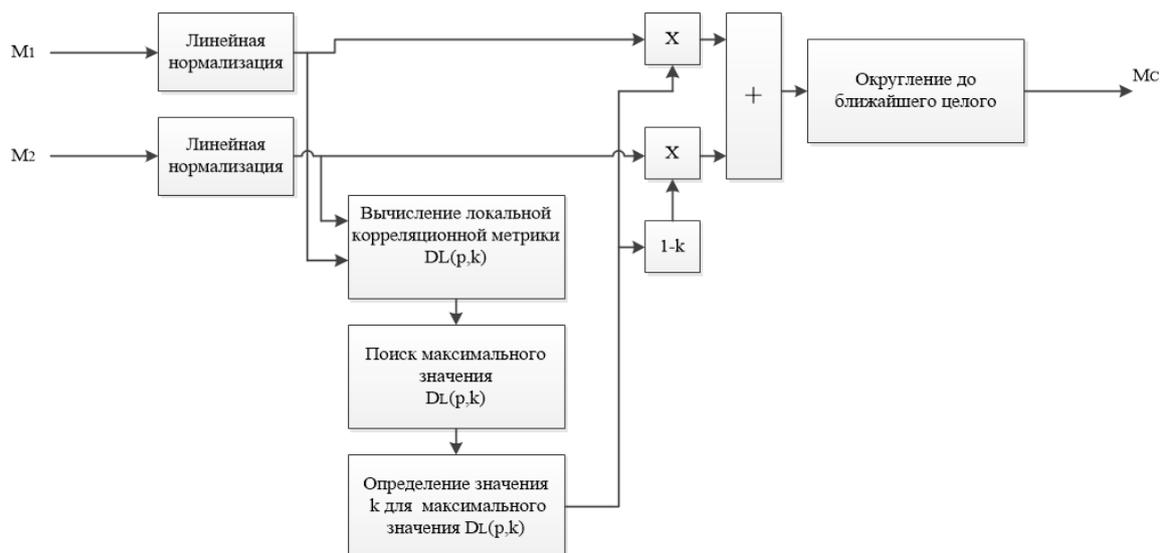


Рис. 5. Схема адаптивного формирования комбинированного АСМ-изображения на основе взвешенного сложения компонентных АСМ-изображений с автоматическим определением вклада значений пикселей компонентных АСМ-изображений в комбинированное АСМ-изображение

### 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.

#### Список использованных источников:

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.

UDC 621.391

## QUALITY EVALUATION OF COMBINED AFM IMAGES BASED ON LOCAL CORRELATION METRIC

*I.I. Levonenko, student gr. 160801; M.Yu. Lavetski, PhD student*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*V.Yu. Tsviatkou – Doctor of Engineering, professor*

**Annotation.** 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 are obtained. A scheme for adaptive weighted summation of component AFM images is proposed.

**Keywords.** Atomic force microscopy, image combination quality assessment, global image correlation, local image correlation.