

УДК 621.391

## АЛГОРИТМ НОРМАЛИЗАЦИИ ЯРКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

В.В. РАБЦЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Поступила в редакцию 10 ноября 2017*

Предложен алгоритм нормализации яркости полутоновых АСМ-изображений. Выполнена оценка его эффективности, по сравнению с аналогами.

*Ключевые слова:* нормализация яркости, АСМ-изображения.

### Введение

Выравнивание яркости является одной из наиболее важных задач при обработке изображений. Выбор подходящего метода зависит от задач, которые решаются при обработке. Известными и наиболее распространенными методами нормализации яркости в настоящее время являются Auto Levels, Auto Retinex, Multi Scale Retinex [1]. При анализе АСМ-изображений обычно используют алгоритм вычитания средней плоскости.

Изображения, получаемые при атомно-силовой микроскопии, часто имеют наклон, который может появиться по разным причинам: реальный наклон поверхности образца, температурный дрейф, который может привести к смещению образца во время сканирования, нелинейность пьезокерамического манипулятора [2]. Правильно выполненная компьютерная обработка АСМ-изображений позволяет устранять большинство дефектов сканирования, а также проводить необходимый анализ.

Целью работы является разработка алгоритма нормализации яркости с минимальным количеством погрешностей, которые в дальнейшем могли бы повлиять на достоверность полученных данных.

### Используемые алгоритмы для нормализации изображений

Алгоритм вычитания плоскости среднего наклона широко применяется в атомно-силовой микроскопии и заключается в том, что из исходной матрицы значений вычитается плоскость среднего наклона. В результате получается матрица с меньшим диапазоном значений и мелкие детали отображаются большим количеством цветов, становятся более заметными. Нелинейности пьезоманипулятора могут приводить также к тому, что изображение получается вогнутым. В этом случае нужно вычитать не плоскость, а более сложную поверхность – параболическую или гиперболическую, что значительно увеличивает сложность начальной предобработки [2].

Вычитание крупномасштабных неровностей. Для исключения крупномасштабных неровностей поверхности изображение разбивается на одинаковые квадраты (например, для изображения  $512 \times 512$  точек имеет смысл выбрать размер квадрата  $16 \times 16$  или  $32 \times 32$  точек, в зависимости от масштаба неровностей, которые необходимо исключить). В каждом квадрате находится величина абсолютного минимума. Затем массив, состоящий из значений абсолютных минимумов (в рассматриваемом случае массив будет  $16 \times 16$  или  $32 \times 32$  точек), интерполируется до начального количества точек ( $512 \times 512$ ) и вычитается из исходного массива. Таким образом, удастся почти полностью исключить крупномасштабные неровности на анализируемой

поверхности [3]. Необходимо отметить, что данный метод работает только в случае, когда типичный размер частиц значительно меньше характерных неровностей поверхности. Данный алгоритм чувствителен к наличию шума на анализируемой поверхности, особенно, низкочастотного. Его наличие может существенно исказить получаемый результат.

Алгоритм Autolevel. Данный алгоритм базируется на следующем принципе: самый темный цвет на изображении является черным, а самый светлый – белым. Если изображение содержит небольшие очень яркие или очень темные участки, то высока вероятность того, что алгоритм не даст желаемого результата. Также Autolevel очень чувствителен к импульсному шуму.

Алгоритм Auto Retinex. Рассмотренные выше алгоритмы не учитывают локальные окрестности пикселей, поэтому в тех случаях, когда изображение содержит как и сильно темные, так и сильно светлые локальные области, эти алгоритмы не могут обеспечить качественное восстановление изображения. В данных ситуациях целесообразно применять алгоритм Retinex и его модификации.

Алгоритм SSR (Single-Scale Retinex) выравнивает освещенность изображения, сохраняя локальный контраст в плохо и ярко освещенных областях. Коррекция происходит в соответствии с формулой  $R(x, y, sigma) = \log[I(x, y)] - \log[I(x, y) \times G(x, y, sigma)]$ , где  $G$  – Гауссиан,  $sigma$  – коэффициента размытия. После применения SSR основная часть полученных пикселей принадлежит диапазону  $[-1; 1]$ .

Алгоритм MSR (Multi-Scale Retinex) предполагает использование взвешенной суммы SSR с разными коэффициентами размытия [1]:  $MSR = w_1 \times SSR_1 + w_2 \times SSR_2 + \dots + w_n \times SSR_n$ , причем  $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$ . Обычно, на практике  $n = 3$  [1].

### Разработанный алгоритм для нормализации АСМ-изображений

Исходными данными для алгоритма является полутоновое изображение  $F$ , в котором  $f(y, x)$  – пиксели исходного изображения, принимающие значения в диапазоне  $[0, 255]$ .

Предлагаемый алгоритм позволяет на основе анализа размеров различных структур на изображении и их яркости разделить изображение и равномерно выровнять его части друг относительно друга.

Алгоритм состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Сегментация исходного изображения  $F$  и получения матрицы  $S$ .

Шаг 2. Деление матрицы  $S$  делим на четыре равные части  $C_1, C_2, C_3, C_4$ .

Шаг 3. Нахождение в каждой области  $C$  наиболее совпадающих по размеру сегментов  $v_1, v_2, v_3, v_4$ , каждый из которых должен полностью принадлежать одной области  $C_1, C_2, C_3, C_4$ .

Шаг 4. Нахождение самого яркого  $P_{max}$  и самого тусклого  $P_{min}$  пикселей в сегментах  $v_1, v_2, v_3, v_4$ .

Шаг 5. Проведение параллельной линии между  $P_{max}$  и  $P_{min}$ , которая будет являться линией разделения на исходном изображении  $F$ .

Шаг 6. Нахождение  $\Delta$  приращения на каждом шаге по формуле:

$$\Delta = \frac{(P_{max} - P_{min})}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}, \text{ где } x_1, x_2 \text{ и } y_1, y_2 - \text{координаты точек } P_{max} \text{ и } P_{min}.$$

Шаг 7. Добавление или исключение на исходном изображении (начиная от линии раздела)  $\Delta \times i$  при приближении к  $P_{max}$  или  $P_{min}$  соответственно ( $i$  – номер шага).

В результате выполнения данного алгоритма формируется новое изображение  $F'$  с выровненными уровнями яркости. Алгоритм позволяет внести изменения яркости изображения без нарушения его структуры. Достоинством данного алгоритма является линейность и высокая точность выравнивания различных частей изображения относительно друг друга.

### Оценка эффективности алгоритмов нормализации АСМ-изображений

На рис. 1 представлены исходные АСМ-изображения с четко выраженной неравномерностью расположения на подложке и результаты обработки этих изображений алгоритмами Autolevel и Auto Retinex.

На рис. 2 представлены АСМ-изображения, обработанные алгоритмами Multi-Scale Retinex, вычитания плоскости среднего наклона и с помощью разработанного алгоритма.

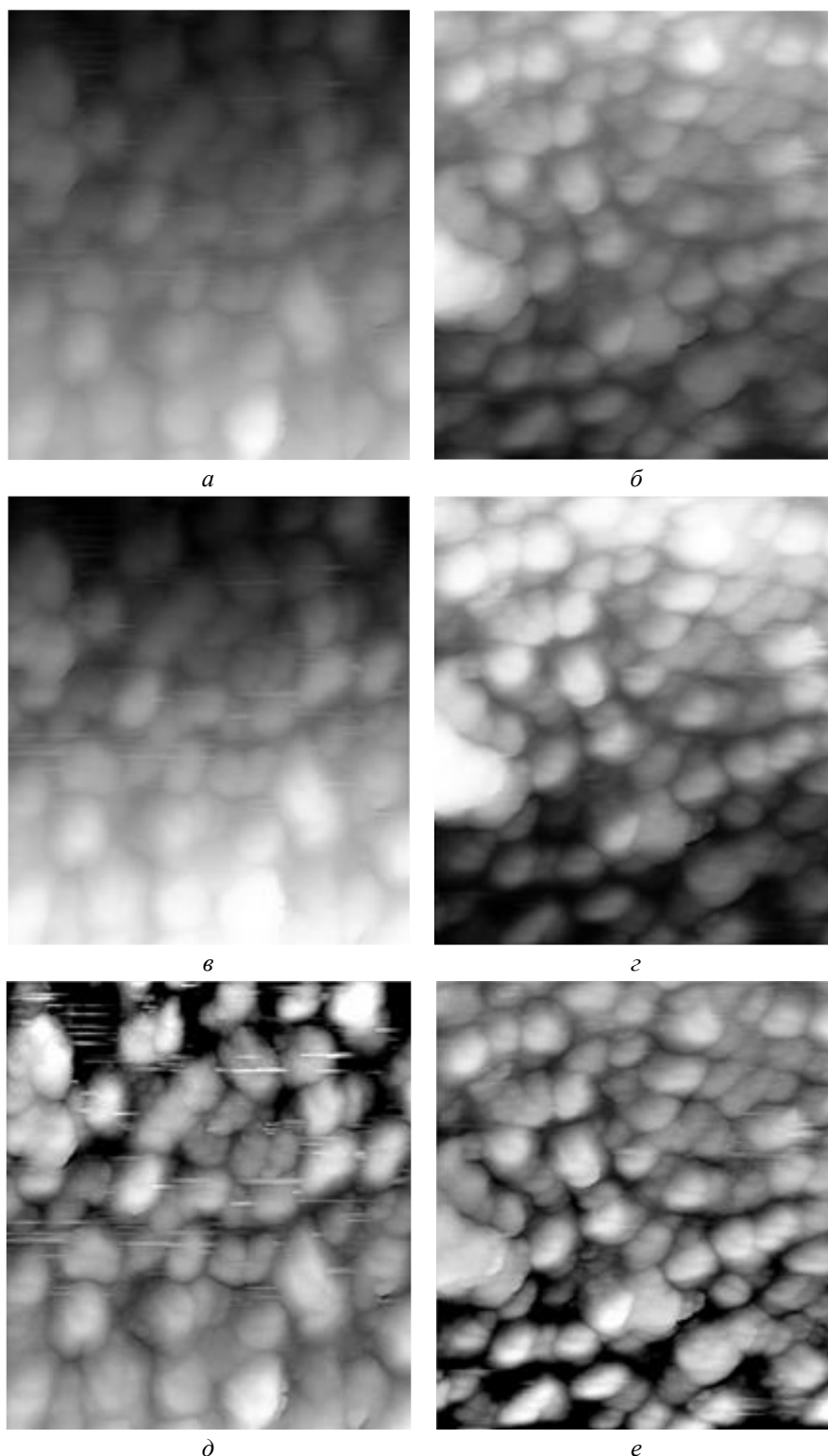


Рис. 1. Нормализация АСМ-изображений: *а, б* – исходные изображения; *в, г* – обработанные по алгоритму Autolevel; *д, е* – обработанные по алгоритму Auto Retinex

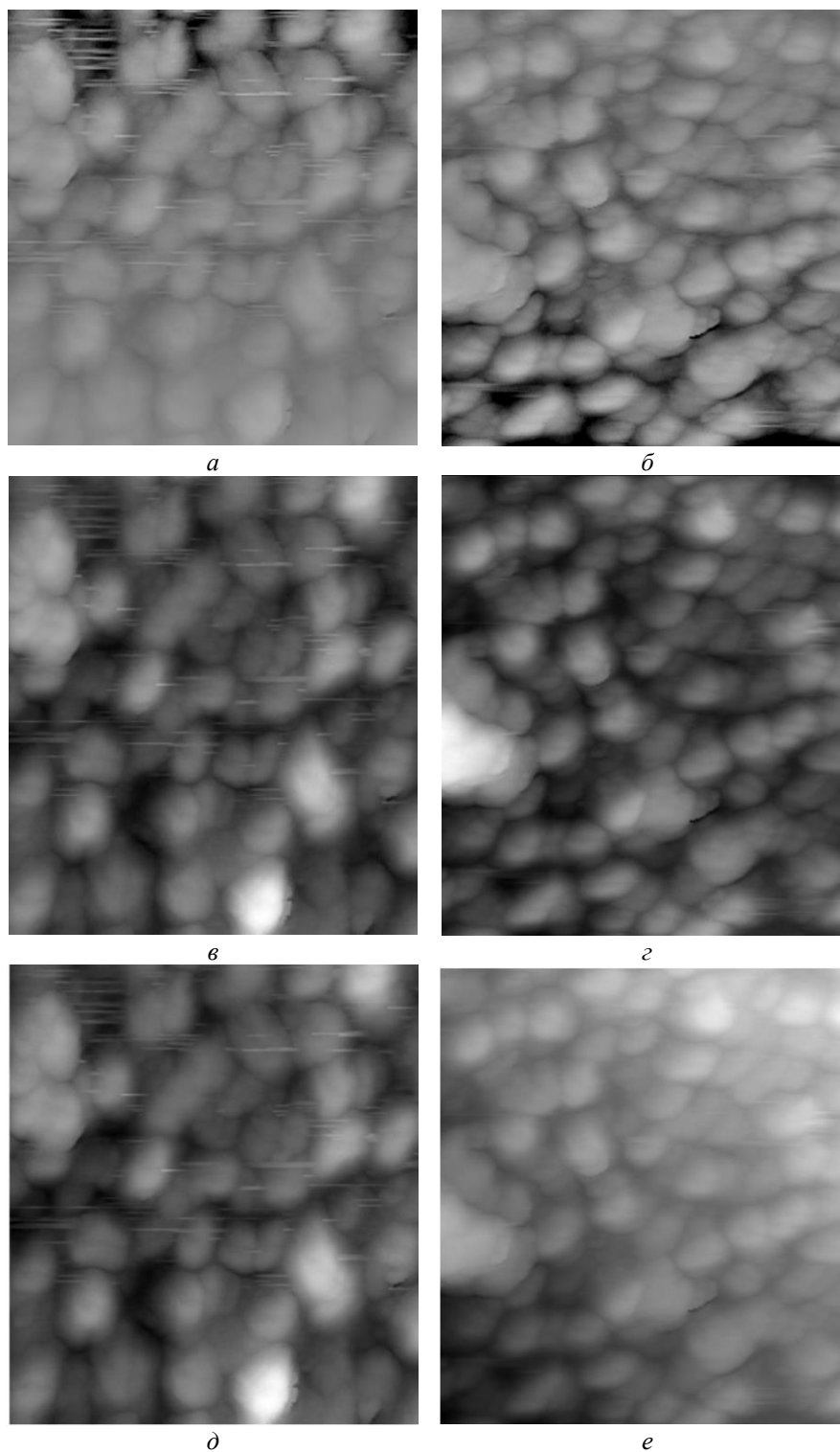


Рис. 2. Нормализация АСМ-изображений: *a, б* – обработанные по алгоритму Multi-Scale Retinex; *в, г* – вычитенной плоскостью среднего наклона; *д, е* – обработанные с помощью разработанного алгоритма

На рис. 3 представлены профили яркости рассмотренных изображений в направлении от левого верхнего угла до правого нижнего. По профилям яркости исходных изображений, четко прослеживается наклон всего образца (пунктирная линия соответствует первому изображению, сплошная – второму). На основе результатов анализа представленных профилей можно сделать вывод о том, что все алгоритмы, кроме алгоритма Autolevel, способны в некоторой степени убрать наклон и нормализовать поверхность, но только алгоритм вычитания средней плоскости и разработанный алгоритм способны сохранить форму профиля, что крайне важно при последующем анализе данных, получаемых с атомно-силового микроскопа.

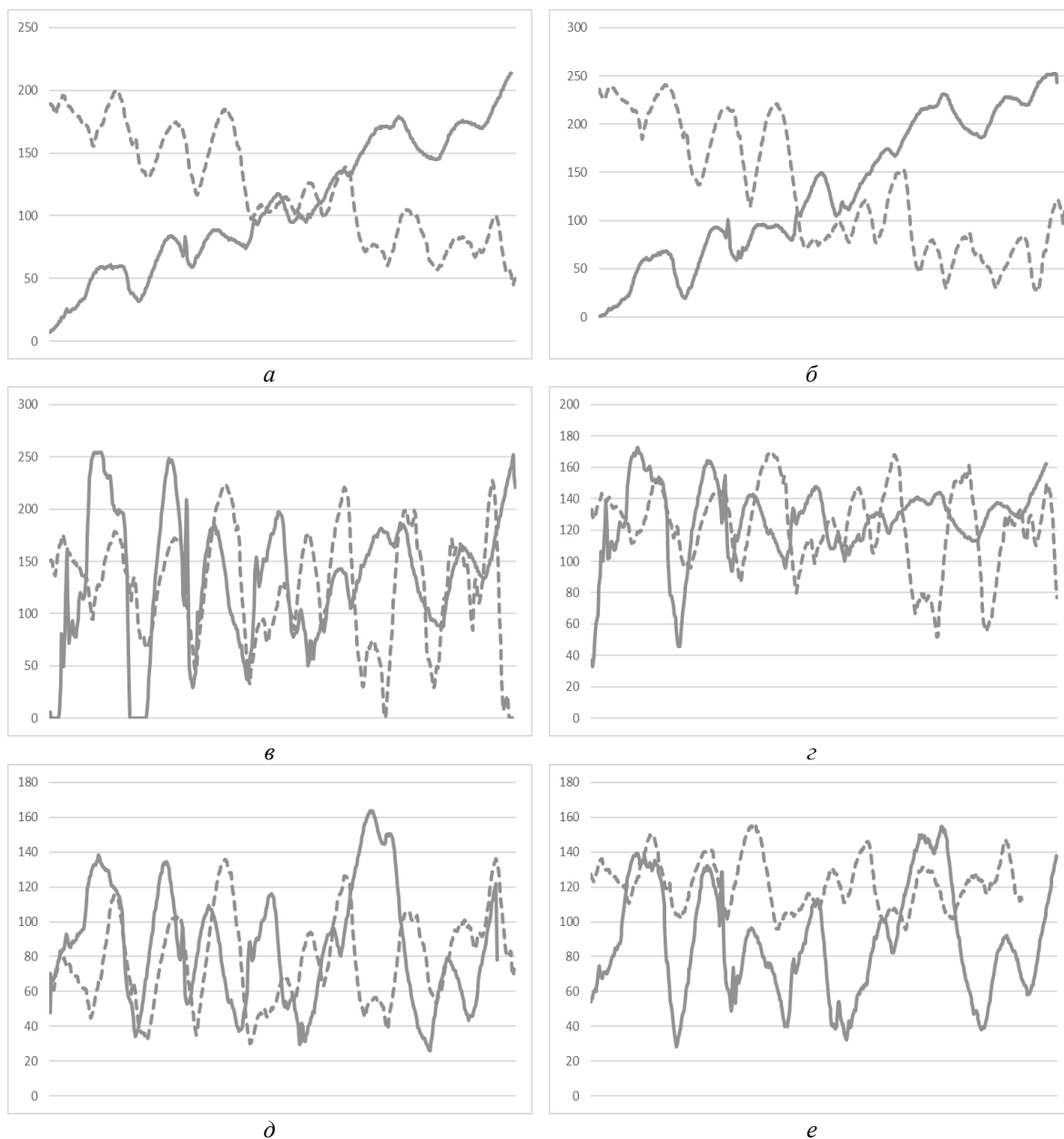


Рис. 3. Профили яркости обработанных изображений: *a* – исходные; *б* – обработанные по алгоритму Autolevel; *в* – обработанные по алгоритму Auto Retinex; *г* – обработанные по алгоритму Multis-Scale Retinex; *д* – с вычитенной плоскостью среднего наклона; *е* – обработанные с помощью разработанного алгоритма

На основе анализа представленных профилей яркости можно сделать вывод о том, что разработанный авторами алгоритм способствует уменьшению перепада яркости между крайними точками в 2,5 и в 9,9 раз соответственно для первого и второго тестового изображения, сохраняя при этом форму профиля.

### Заключение

Для нормализации АСМ-изображений предложен алгоритм на основе выделения схожих областей. Суть алгоритма заключается в нахождении разницы в значениях между двумя схожими точками. Показано, что использование разработанного алгоритма обеспечивает выравнивание перепада яркости между крайними точками в 2,5 и 9,9 раза при сохранении формы профиля.

# ALGORITHM OF NORMALIZATION OF BRIGHTNESS OF IMAGES ATOMIC-POWER MICROSCOPY

V.V. RABTSEVICH, V.Yu. TSVIATKOU

## Abstract

The algorithm for brightness normalization of halftone AFM-images is suggested. It's efficiency is estimated in comparison with analogs.

*Keywords:* brightness normalization, AFM-images.

## Список литературы

1. Носов А.В., Бузаев Д.В., Зотин А.Г. // Решетневские чтения. 2012. №16. С. 623–624.
2. Solomon C. // Fundamentals of Digital Image Processing. 2011. P. 263–286.
3. Чукланов А.П., Бородин П.А., Зиганишина С.А. и др. // Учебные записки казанского государственного университета. 2008. №7. С. 221–225.