



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-26-35>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932+004.258

СЕГМЕНТАЦИЯ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ МАКСИМУМОВ С ИХ ВЫБОРОМ В ПОРЯДКЕ УБЫВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ

В.В. РАБЦЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 10 сентября 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Рассматривается задача определения числа объектов на изображениях атомной силовой микроскопии (АСМ). Для автоматического (без участия оператора) решения данной задачи используется сегментация, разделяющая изображения на области, содержащие объекты интереса. Известны алгоритмы сегментации на основе морфологического водораздела, определяющие границы областей по локальным минимумам яркости пикселей, имеющие значительные ошибки сегментации АСМ-изображений и высокую вычислительную сложность. Менее вычислительно сложные алгоритмы сегментации, основанные на волновом выращивании областей, требуют предварительного определения начальных точек роста на АСМ-изображениях под контролем оператора. Алгоритмы выращивания областей без предварительного выбора начальных точек роста имеют наименьшую вычислительную сложность, но сегментируют АСМ-изображения с большой ошибкой. Для повышения точности автоматического определения числа объектов на АСМ-изображениях предложены модель и алгоритм волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений, отличающиеся использованием изменяющегося от максимума к минимуму порога яркости для выбора пикселей роста областей или пикселей, присоединяемых к пикселям смежных существующих областей. Модель обеспечивает параллельное расширение границ областей и автоматическое определение начальных пикселей роста в процессе сегментации. Предложенные модель и алгоритм позволяют устранить ошибки сегментации, характерные для маркерного водораздела, выращивания областей и водораздела Винсента – Солли, и повысить за счет этого точность определения числа объектов на изображениях атомной силовой микроскопии.

Ключевые слова: сегментация изображений, атомная силовая микроскопия, волновое выращивание областей, водораздел Винсент – Солли, локальный максимум, АСМ-изображения, маркерный водораздел.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю. Сегментация АСМ-изображений на основе волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений. Доклады БГУИР. 2022; 20(3): 26-35.

AFM IMAGE SEGMENTATION BASED ON WAVE GROWTH OF LOCAL MAXIMUM REGIONS WITH THEIR SELECTION IN ORDER OF DECREASING VALUES

VIYALETA V. RABTSEVICH, VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10 September 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The problem of determining the number of objects in atomic force microscopy (AFM) images is considered. For the automatic (without operator participation) solution of this problem, segmentation is used, dividing images into areas containing objects of interest. Known segmentation algorithms based on the morphological watershed, defining the boundaries of areas by local minima of pixel brightness, having significant segmentation errors of AFM images and high computational complexity. Less computationally complex segmentation algorithms based on wave growth of regions require preliminary determination of the starting points of growth on AFM images under the control of an operator. Algorithms for growing regions without preliminary selection of the starting points of growth have the least computational complexity, but they segment the AFM image with a large error. To improve the accuracy of automatic determination of the number of objects in AFM images, a model and an algorithm for the wave growth of the regions of local maxima with their selection in decreasing order of values are proposed, which differ in the use of a brightness threshold varying from maximum to minimum to select growth pixels of regions or pixels attached to pixels of adjacent existing areas. The model provides parallel expansion of the boundaries of areas and automatic determination of the initial growth pixels during the segmentation process. The proposed model and algorithm make it possible to eliminate segmentation error characteristic of the marker watershed, growing areas and the Vincent – Sulli watershed, and thereby increase the accuracy of determining the number of objects in atomic force microscopy images.

Keywords: image segmentation, atomic force microscopy, wave growing regions, Vincent-Sulli watershed, local maximum, AFM images, marker watershed.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Rabtsevich V.V., Tsviatkou V.Yu. AFM Image Segmentation Based on Wave Growth of Local Maximum Regions with their Selection in Order of Decreasing Values. Doklady BGUIR. 2022; 20(3): 26-35.

Введение

Атомная силовая микроскопия (АСМ) является эффективным методом исследования поверхностей материалов в субмикро- и наноразмерном диапазоне [1–3]. Данный метод основан на оценке интенсивности силового воздействия со стороны поверхности на микроронд и позволяет преобразовать информацию о рельефе поверхности в полутоновое АСМ-изображение. Одна из задач, решаемых при анализе АСМ-изображений, заключается в автоматической (без участия оператора) оценке количества структурных составляющих (частиц, фаз, зерен) на поверхностях материалов. Для решения данной задачи используется сегментация, выделяющая области пикселей АСМ-изображений, соответствующие данным объектам.

Для сегментации АСМ-изображений широко используются градиентные [4] и маркерные алгоритмы [5], основанные на методе морфологического водораздела [6], который находит границы областей по локальным минимумам яркости пикселей. Эти алгоритмы выделяют области без предварительной информации об изображении, но имеют значительные ошибки сегментации и высокую вычислительную сложность. Вычислительно менее сложные алгоритмы сегментации, основанные на волновом выращивании областей SRG (Seeded Region Growing) [7–9], требуют предварительного определения начальных точек роста

на АСМ-изображениях. Это осуществляется под контролем оператора, так как автоматическое выделение начальных точек [10–11] приводит, как правило, к недостаточной или избыточной сегментации. Известные алгоритмы выращивания областей без предварительного выбора начальных точек роста RG (region growing) [12] имеют наименьшую вычислительную сложность, но сегментируют АСМ-изображения с большой ошибкой. Кроме того, их результаты сильно зависят от порядка выборки пикселей.

Целью работы является повышение точности определения числа объектов АСМ-изображений с помощью сегментации без предварительного выделения начальных точек роста областей.

Постановка задачи

Сегментация матрицы пикселей $M_P = \left\| m_P(y, x) \right\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ ($m_P(y, x) \in [0, 2^B - 1]$, где B – разрядность пикселей) размером $Y \times X$ приводит к формированию матрицы сегментации $M_S = \left\| m_S(y, x) \right\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ такого же размера, значения элементов которой указывают на номера сегментов n_S , которым они принадлежат ($n_S \in [1, N_S]$, где N_S – число сегментов). Выращивание областей без предварительного выбора начальных точек роста RG [13] включает поиск начальных точек (функция F_{SP}) и выращивание области (функция F_{RG}):

$$M_S \Leftarrow F_{SP} \rightleftarrows F_{RG}(Y_S, X_S, p_S, M_P, M_S, \Delta q), \quad (1)$$

где \rightleftarrows – вложение (из функции F_{SP} вызывается функция F_{RG}); $Y_S = \left\| y_S(p_S) \right\|_{(p_S=\overline{0, P_S-1})}$ и $X_S = \left\| x_S(p_S) \right\|_{(p_S=\overline{0, P_S-1})}$ – стеки y - и x -координат смежных пикселей; p_S – указатель стеков Y_S и X_S ; Δq – допустимая разница в значениях смежных пикселей для включения их в одну область.

Функция F_{SP} определяется выражением

$$m_S(y, x) = 0 \Rightarrow \{ n_S \leftarrow n_S + 1; m_S(y, x) \leftarrow n_S; y_S(0) \leftarrow y; x_S(0) \leftarrow x; p_S \leftarrow 1; F_{RG} \} \quad (2)$$

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

При инициализации $m_S(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$; $n_S \leftarrow 0$.

Функция F_{RG} выполняется, пока $p_S > 0$, и определяется выражениями:

$$\begin{aligned} & p_S \leftarrow p_S - 1; y \leftarrow y_S(p_S); x \leftarrow x_S(p_S); \\ & \forall j \forall i (m_S(y+j, x+i) = 0) \wedge \left(\left| \overline{R(n_S)} - m_P(y+j, x+i) \right| \leq \Delta q \right) \Rightarrow \\ & \{ m_S(y+j, x+i) \leftarrow m_S(y, x); y_S(p_S) \leftarrow y+j; x_S(p_S) \leftarrow x+i; \\ & p_S \leftarrow p_S + 1 \text{ при } j \in \{-1, 0, 1\}, i \in \{-1, 0, 1\}, |j| + |i| \neq 0 \}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\overline{R(n_S)}$ – средняя яркость n_S -го сегмента.

Из выражения (2) следует, что в процессе поиска несегментированных пикселей для выбора их в качестве точек роста элементы матрицы сегментации сканируются построчно. Сравнение значений средней яркости области и яркостей смежных пикселей в выражении (3) обеспечивает независимость от порядка сканирования, но не позволяет разделять области с плавными изменениями яркости. Вместо свободного поиска начальных точек роста по выражению (2), возможен выбор предварительно выделенных пикселей,

например, локальных экстремумов. Однако это не решает проблему разделения областей с низким контрастом и может приводить к неполной сегментации из-за условия (3).

Для преодоления данных недостатков волновое выращивание областей SRG [7–9] наряду с предварительным определением начальных точек (функция F_{SP}) использует цикл волнового роста, включающий цикл по областям, в который вложены выращивание области (функция F_{RG}) и выделение пикселей новой волны (функция F_{NW}):

$$M_S \leftarrow F_{SP}(N_S, Y_S, X_S) \rightarrow (\mapsto^{f_E} \mapsto^{n_S} F_{RG}(Y_S(n_S), X_S(n_S), p_S(n_S), N_S, M_S, M_P, \Delta q), F_{NW}(Y_S, X_S, p_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S)) \leftarrow^{n_S} \leftarrow^{f_E}), \quad (4)$$

где \mapsto^{f_E} , \leftarrow^{f_E} – символы начала и окончания цикла волнового роста; \mapsto^{n_S} , \leftarrow^{n_S} – символы начала и окончания цикла по областям; $\left\{ Y_C(n_S) = \left\| y_C(n_S, p_C(n_S)) \right\|_{(p_C(n_S)=0, p_C(n_S)-1)} \right\}_{(n_S=0, N_S)}$,

$\left\{ X_C(n_S) = \left\| x_C(n_S, p_C(n_S)) \right\|_{(p_C(n_S)=0, p_C(n_S)-1)} \right\}_{(n_S=0, N_S)}$ – множества стеков y - и x -координат

смежных пикселей; $\left\{ p_C(n_S) \right\}_{(n_S=0, N_S)}$ – множество указателей. При инициализации модели (4)

$$m_S(y, x) \leftarrow 0 \text{ при } y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}.$$

Функция F_{SP} определяется выражениями:

$$m_S(y_S(n_S), x_S(n_S)) \leftarrow n_S; y_C(n_S, 0) \leftarrow y_S(n_S); x_C(n_S, 0) \leftarrow x_S(n_S); p_C(n_S) \leftarrow 1 \quad (5)$$

при $n_S = \overline{1, N_S}$.

Функция F_{RG} выполняется пока $p_C(n_S) > 0$ и определяется выражениями, аналогичными (3):

$$p_C(n_S) \leftarrow p_C(n_S) - 1; y \leftarrow y_C(n_S, p_C(n_S)); x \leftarrow x_C(n_S, p_C(n_S));$$

$$\forall j \forall i (m_S(y+j, x+i) = 0) \wedge \left(\left| \overline{R(n_S)} - m_P(y+j, x+i) \right| \leq \Delta q \right) \Rightarrow$$

$$\{ m_S(y+j, x+i) \leftarrow m_S(y, x); y_S(p_S) \leftarrow y+j; x_S(p_S) \leftarrow x+i; p_S \leftarrow p_S + 1;$$

$$f_E \leftarrow f_E + 1 \text{ при } j \in \{-1, 0, 1\}, i \in \{-1, 0, 1\}, |j| + |i| \neq 0 \}, \quad (6)$$

где f_E – флаг остановки выращивания областей (обеспечивает выход из цикла, когда отсутствуют присоединяемые к областям пиксели); в каждом цикле по областям $f_E \leftarrow 0$.

Функция F_{NW} определяется выражениями:

$$y_C(n_S, p_C(n_S)) \leftarrow y_S(p_C(n_S)); x_C(n_S, p_C(n_S)) \leftarrow x_S(p_C(n_S)) \quad (7)$$

при $p_C(n_S) = \overline{0, p_S-1}$.

При волновой сегментации SRG число и расположение областей зависят от числа и расположения начальных точек роста, которые должны быть определены с соответствующей точностью для каждой конкретной задачи.

В случае автоматической сегментации АСМ-изображений точки роста должны принадлежать целевым объектам, расположенным на поверхности материала. На рис. 1 приведены АСМ-изображения поверхностей материалов (металлы с плотной атомной решеткой, волокна с высокой плотностью элементов), в которых подложка отсутствует или слабо выражена, а объекты имеют выпуклую форму. АСМ-изображения такого типа могут быть представлены моделью в виде совокупности областей, яркость каждой из которых монотонно уменьшается от локального максимума, соответствующего вершине объекта, до локальных минимумов, соответствующих подложке, или границы другой области.

Для точного определения числа объектов в таком случае на каждый из них должно приходиться ровно по одной точке. Для выполнения данного условия лучшим выбором является использование локальных максимумов в качестве начальных точек. Тогда для выделения областей, соответствующих объектам АСМ-изображений, необходим контроль монотонности уменьшения яркости от начальных точек роста. Следовательно, выражение (6) требует модификации, так как учитывает дисперсию яркости в пределах области, а не монотонность ее уменьшения. Причем процедуры контроля монотонности и поиска локальных экстремумов могут осуществляться параллельно, если сегментацию начинать с глобального максимума. Для определения числа объектов достаточно разделения АСМ-изображения на области из расчета, что каждая область содержит целевой объект. Тогда отсутствует необходимость в дополнительном условии остановки сегментации.

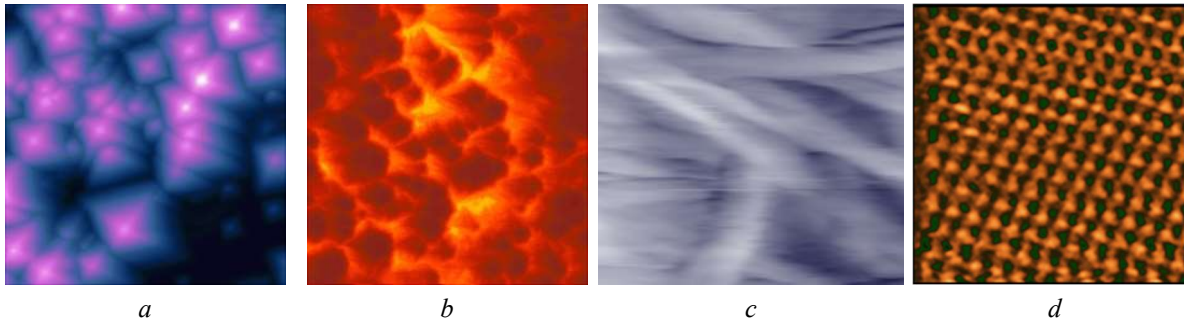


Рис. 1. АСМ-изображения: *a* – рельеф текстурированной поверхности кремния после анизотропного травления, изображение с перепадом высот 4 мкм получено в контактном режиме (Тест-1); *b* – GaAs, осажденный на поликристаллической подложке (Al₂O₃) (Тест-2); *c* – поверхность целлюлозы (Тест-3); *d* – пленка железо-иттриевого граната на подложке гадолиний-галлиевого граната (Тест-4)

Fig. 1. AFM-images: *a* – relief of the textured silicon surface after anisotropic etching, an image with a vertical drop of 4 μm was obtained in contact mode (Test-1); *b* – GaAs deposited on a polycrystalline substrate (Al₂O₃) (Test-2); *c* – cellulose surface (Test-3); *d* – film of yttrium iron garnet on a gadolinium-gallium garnet substrate (Test-4)

Из приведенных выше замечаний следуют основные требования к новому алгоритму автоматической сегментации АСМ-изображений, ориентированному на точное определение числа объектов: выделение локальных максимумов в процессе сегментации в качестве начальных точек роста, начиная с глобального максимума; контроль монотонности уменьшения яркости в процессе роста области; прекращение роста области при нарушении монотонности или достижении границы другой области.

Предлагаемые математическая модель и алгоритм сегментации АСМ-изображений

Для автоматической сегментации АСМ-изображений без предварительного выделения начальных точек роста предлагается модель волнового выращивание областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений (AWS). Сущность модели состоит в использовании изменяющегося от максимума к минимуму порога яркости для выбора пикселей роста областей (локальных максимумов) или пикселей, присоединяемых к пикселям смежных существующих областей, которые имеют такую же или большую яркость.

Модель AWS описывает цикл по уровням яркости q ($q = 2^B - 1, 0$), в котором выполняются определение значимых пикселей (функция F_{MP}), выращивание областей (функция F_{RG}), поиск начальных точек – строгих и нестрогих локальных максимумов (функция F_{SP}), начальное выращивание области (функция F_{PRG}):

$$M_S \leftarrow \mapsto^q F_{MP}(M_S, M_P, \Delta q), F_{RG}(N_S, \{Y_C(n_S)\}, \{X_C(n_S)\}, \{p_C(n_S)\}, M_S),$$

$$F_{SP}(M_S, N_S) \rightleftharpoons F_{PRG}(N_S, Y_C(N_S), X_C(N_S), p_C(N_S), Y_S, X_S, p_S, M_S) \downarrow^q. \quad (8)$$

При инициализации модели (8) $m_S(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$.

Функция F_{MP} определяется выражением

$$q \leq m_p(y, x) < q - \Delta q \Rightarrow m_s(y, x) \leftarrow 1 \quad (9)$$

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

Функция F_{RG} определяется выражениями:

$$\begin{aligned} & y \leftarrow y_c(n_s, p); \quad x \leftarrow x_c(n_s, p); \\ & \forall j \forall i (m_s(y+j, x+i) = 1) \Rightarrow \{m_s(y+j, x+i) \leftarrow m_s(y, x); \\ & y_c(n_s, p_c(n_s)) \leftarrow y+j; \quad x_c(n_s, p_c(n_s)) \leftarrow x+i; \\ & p_c(n_s) \leftarrow p_c(n_s)+1 \text{ при } j \in \{-1, 0, 1\}, i \in \{-1, 0, 1\}, |j|+|i| \neq 0 \} \\ & \text{при } p = \overline{0, p_c(n_s)-1}, \quad n_s = \overline{2, N_s}. \end{aligned} \quad (10)$$

Функция F_{SP} определяется выражением

$$\begin{aligned} & m_s(y, x) = 1 \Rightarrow \{N_s \leftarrow N_s + 1; \quad m_s(y, x) \leftarrow N_s; \quad y_s(0) \leftarrow y; \quad x_s(0) \leftarrow x; \quad p_s \leftarrow 1; \\ & y_c(N_s, 0) \leftarrow y; \quad x_c(N_s, 0) \leftarrow x; \quad p_c(N_s) \leftarrow 1; \quad F_{PRG} \} \\ & \text{при } y = \overline{0, Y-1}, \quad x = \overline{0, X-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Функция F_{PRG} выполняется пока $p_s > 0$ и определяется выражениями:

$$\begin{aligned} & p_s \leftarrow p_s - 1; \quad y \leftarrow y_s(p_s); \quad x \leftarrow x_s(p_s); \quad \forall j \forall i (m_s(y+j, x+i) = 1) \Rightarrow \\ & \{m_s(y+j, x+i) \leftarrow N_s; \quad y_s(p_s) \leftarrow y+j; \quad x_s(p_s) \leftarrow x+i; \quad p_s \leftarrow p_s + 1; \\ & y_c(N_s, p_c(N_s)) \leftarrow y+j; \quad x_c(N_s, p_c(N_s)) \leftarrow x+i; \\ & p_c(N_s) \leftarrow p_c(N_s)+1 \text{ при } j \in \{-1, 0, 1\}, i \in \{-1, 0, 1\}, |j|+|i| \neq 0 \}. \end{aligned} \quad (12)$$

В отличие от обычного выращивания областей RG [13], использующего последовательную обработку сегментов, в предложенной модели границы всех областей расширяются итеративно (волнообразно) за счет присоединения необработанных смежных значимых пикселей, яркости которых удовлетворяют порогу, понижаемому после обработки всех значимых пикселей. В отличие от волнового выращивания областей SRG [7–9], определяющего все точки роста при инициализации, в предложенной модели выбор начальных точек роста осуществляется в процессе сегментации и связан со значением порога, постепенно снижаемым от максимума к минимуму.

Модель AWS обеспечивает полную сегментацию изображений на N_s неперекрывающихся областей, число которых заранее неизвестно и уточняется в процессе сегментации при постепенном понижении порога яркости q ($q = \overline{2^B - 1, 0}$) с каждым циклом и обнаружении новых локальных максимумов с помощью выражения (11), которые могут быть строгими или нестрогими благодаря выражениям (12). Новые локальные максимумы и очередные присоединяемые к существующим областям пиксели обнаруживаются с помощью выражения (9).

Волновой рост областей и взвешенное разделение областей с плавными границами обеспечивается выражением (10). Сравнение выражений (4) и (8) показывает, что предложенная модель является более сложной по сравнению с моделью SRG волнового выращивания областей с начальными точками роста. Однако модель SRG не учитывает поиск начальных точек, что делает рассматриваемые модели примерно эквивалентными по сложности.

Алгоритм AWS, основанный на выражениях (8) – (12), состоит из следующих шагов:

Вход: $M_P; N_S; Y_C; X_C; \Delta q$.

Инициализация: $M_S = 0 \{M_S, Y_C, X_C, P_C\}, q = \overline{2^B - 1, 0}, n_S = 0$.

Цикл 1 (пока $q \geq 0$)

$$\{M_S, Y_S, X_S\} \leftarrow F_{MP}(M_S, M_P, \Delta q).$$

Цикл 2 (пока $n_S \leq N_S, p = \overline{0, p_C(n_S - 1)}$)

$$\{M_S, Y_S, X_S, p_S, p_C(n_S)\} \leftarrow F_{RG}(n_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S), M_S),$$

$$\{M_S, Y_C, X_C\} \leftarrow F_{SP}(N_S, Y_C, X_C); n_S = n_S + 1.$$

Конец цикла 2

Цикл 3 (для $p_S > 0$)

$$(M_S, N_S) \leftarrow F_{PRG}(N_S, Y_C(N_S), X_C(N_S), p_C(N_S), Y_S, X_S, p_S, M_S)$$

$$\{Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S)\} F_{NW}(Y_S, X_S, p_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S)).$$

Конец цикла 3.

Если $q \geq 0$ выполняется, то $q = q - 1$.

Конец цикла 1.

Выход: M_S . Если в результате выполнения данного алгоритма $\exists y \exists x (m_S(y, x) = 0)$, то циклы сегментации повторяются для соответствующих пикселей.

Алгоритм AWS выполняется до полной сегментации изображения, что достаточно для определения числа сегментов без учета их формы. Для сегментации АСМ-изображений с определением границ областей (AWSS) предлагается ограничить число циклов по уровням яркости q в выражении (8) значением уровня остановки q_S , задаваемым оператором $(q = \overline{2^B - 1, q_S})$.

В отличие от алгоритма AWS в алгоритме AWSS цикл 1 выполняется, пока $q \geq q_S$.

В этом случае осуществляется неполная сегментация изображения. На рис. 2, 3 представлены результаты неполной сегментации АСМ-изображений, приведенных на рис. 1, с помощью алгоритма AWSS и алгоритма Винсента – Солли с предварительным вычислением градиента в восьмисвязной области (VSG) [13], (Gwiddion [Electronic resource]. Mode of access: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/grain-analysis.html>.) – Date of access: 06.08.2021

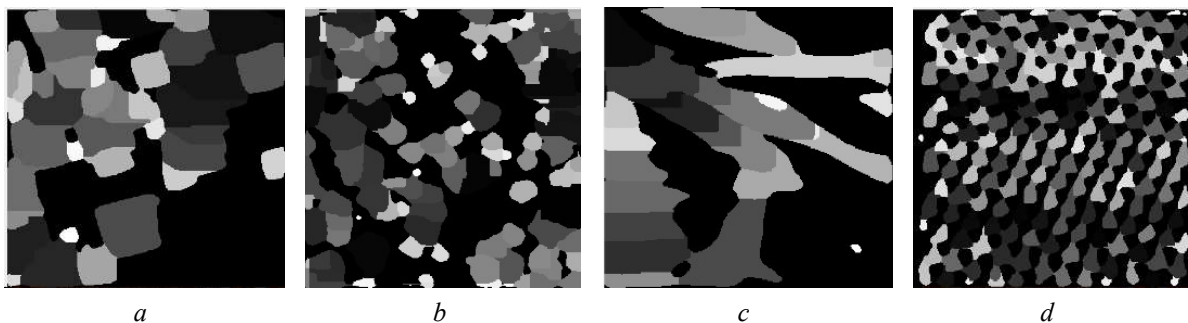


Рис. 2. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма AWSS:

a – Тест-1; b – Тест-2; c – Тест-3; d – Тест-4

Fig. 2. Results of a complete segmentation of test AFM-images for the AWSS:

a – Test-1; b – Test-2; c – Test-3; d – Test-4

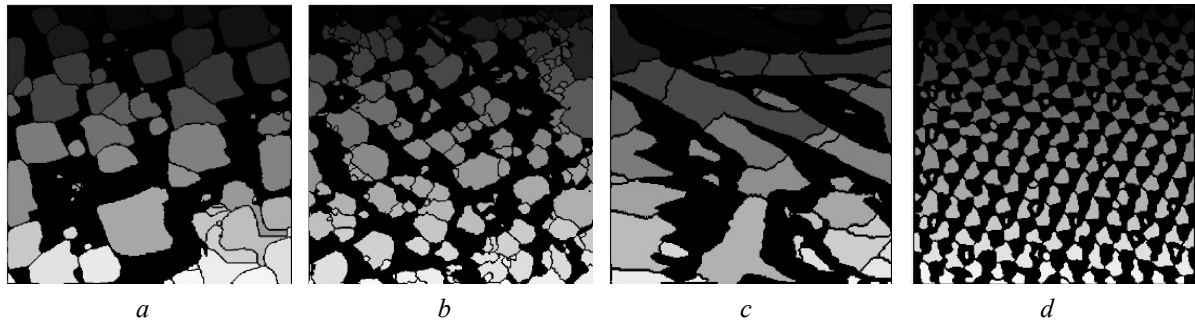


Рис. 3. Результаты неполной сегментации тестовых АСМ-изображений для алгоритма VSG:

a – Тест-1; *b* – Тест-2; *c* – Тест-3; *d* – Тест-4

Fig. 3. Results of incomplete segmentation of test AFM-images for the VSG:

a – Test-1; *b* – Test 2; *c* – Test-3; *d* – Test-4

Оценка ошибок и времени сегментации

Для тестовых изображений с резкими границами, приведенных на рис. 4, произведена оценка нормированных ошибок E и времени T сегментации (табл. 1) с использованием реализованных в Matlab (М) и на С++ (С) алгоритмов волнового выращивания областей локальных максимумов с их выбором в порядке убывания значений AWS (AWS-M, AWS-C), маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров (MWA-M), маркерного водораздела под контролем оператора (MWO-C), выращивания областей без выбора начальных точек (RG-M, RG-C), Винсента – Солли с предварительным вычислением градиента в восьмисвязной области (VSG-M), Винсента – Солли с выделением контуров областей и последующим их заполнением (VSF-C).

Нормированная ошибка сегментации E_S вычисляется с помощью выражения $E_S = E_O + E_I$, где $E_O = \sum_{i=1}^9 S_O(i) / S_E$ – нормированная ошибка избыточной сегментации; $E_I = \sum_{i=1}^9 S_I(i) / S_E$ – нормированная ошибка недостаточной сегментации; i – порядковый номер тестового объекта; S_E – число значимых элементов бинарной маски, выделяющей сегментируемые объекты; $S_O(i)$ – число пикселей сегмента, принадлежащих i -му тестовому объекту, попадающих на незначимые элементы маски; $S_I(i)$ – число значимых элементов маски, соответствующих i -му тестовому объекту и не попадающих на пиксели соответствующего сегмента.

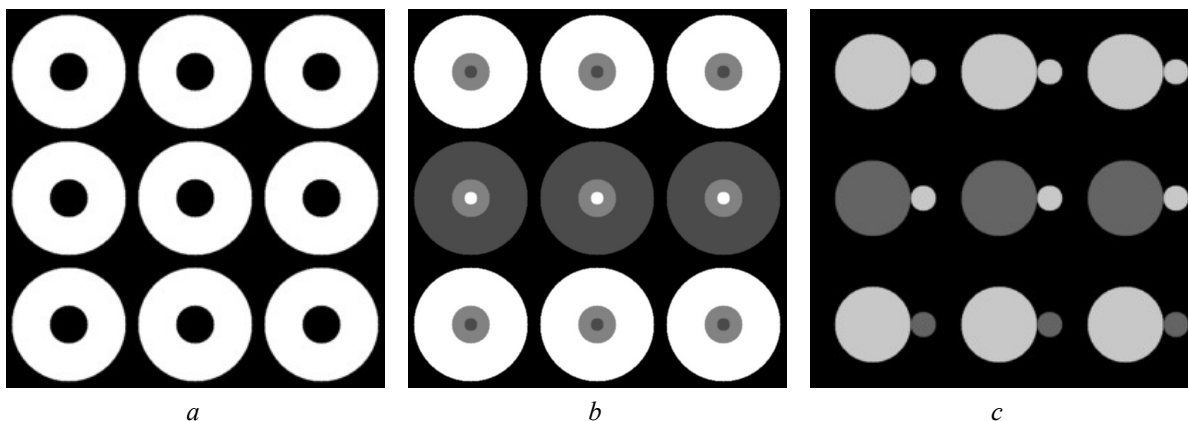


Рис. 4. Тестовые изображения: *a* – АСМ-1; *b* – АСМ-2; *c* – АСМ-3

Fig. 4. Test images: *a* – AFM-1; *b* – AFM-2; *c* – AFM-3

Таблица 1. Значения ошибок и времени сегментации тестовых АСМ-изображений
Table 1. The values of the segmentation errors and time of the test AFM-images

Изображение	Параметр	Значение нормированных ошибок сегментации (%10 ⁻³) и времени сегментации (мс)							
		реализация в Matlab				реализация на C++			
		AWS-M	MWA-M	RG-M	VSG-M	AWS-C	MW-C	RG-C	VSF-C
АСМ-1	E_o	0	109,6	98,6	109,6	0	94,6	109,6	0,1
	E_l	0	44,3	52,0	46,1	0	0,5	81,7	0,6
	E_s	0	153,9	150,7	155,7	0	95,2	191,3	0,7
	T	23117	443	287708	287708	5957	4794	8196	9848
АСМ-2	E_o	0	0	0	43,7	0	10,2	0	0,5
	E_l	0	359,9	56,5	0	0	0	79,9	523,1
	E_s	0	359,9	56,5	43,7	0	10,2	79,9	523,6
	T	30288	455	295066	295066	7824	13797	9907	11251
АСМ-3	E_o	0	0	42,2	73,6	0	19,9	0	2034,9
	E_l	0	17,9	78,3	0	0	0	96,1	0
	E_s	0	17,9	78,3	73,6	0	19,9	96,1	2034,9
	T	26439	492	250363	250363	3907	9302	6988	8368

Из табл. 1 следует, что алгоритм AWS обеспечивает сегментацию без ошибок. Другие алгоритмы сегментируют тестовые изображения с ошибками. Реализация алгоритма AWS в Matlab обеспечивает в среднем в 57 раз меньшую скорость работы по сравнению с маркерным водоразделом и в 10 раз большую скорость работы по сравнению с выращиванием областей и водоразделом Винсента – Солли. Реализация алгоритма AWS на C++ обеспечивает в среднем в 1,6 раза меньшую скорость работы по сравнению с маркерным водоразделом, в 1,4 и 1,7 раз большую скорость работы по сравнению с выращиванием областей и водоразделом Винсента – Солли соответственно (с учетом временных затрат на расстановку маркеров оператором и использованием дополнительных алгоритмов сегментации для определения номеров сегментов).

Заключение

Предложены математическая модель и алгоритм волнового выращивания областей локальных максимумов, выбираемых в порядке убывания их значений, для сегментации АСМ-изображений. Сущность модели состоит в использовании изменяющегося от максимума к минимуму порога яркости для выбора начальных пикселей роста областей или пикселей, присоединяемых к пикселям существующих смежных областей с такой же или большей яркостью. Предложенный алгоритм, в отличие от известных алгоритмов на основе маркерного водораздела с автоматической расстановкой маркеров, маркерного водораздела под контролем оператора, выращивания областей без выбора начальных точек, Винсента – Солли с предварительным вычислением градиента в восьмисвязной области, Винсента – Солли с выделением контуров областей и последующим их заполнением, обеспечивает выделение без ошибок областей с резкими границами и повышение за счет этого точности определения их количества на АСМ-изображениях.

Список литературы / References

1. Ulyanova T.M., Titova L.V., Medichenko S.V., Zonov Yu.G., Konstantinova T.E., Glazunova V.A., Doroshkevich A.S., Kuznetsova T.A. Investigation of the structure of nanocrystalline refractory oxides by X-ray diffraction, electron microscopy and atomic force microscopy. *Crystallography Reports*. 2006;51:144–149. DOI:10.1134/S1063774506070212.
2. Kuznetsova T., Zubar T., Chizhik S., Gilewicz A., Lupicka O., Warcholinski B. Surface microstructure of Mo(C)N coatings investigated by AFM. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016;25(12):5450-5459. DOI: 10.1007/s11665-016-2390-z.
3. Geisse N.A. AFM and Combined Optical Techniques. *Materials Today*. 2011;12(7-8):40-45. DOI: 10.1016/S1369-7021(09)70201-9.
4. Vincent L. Watershed in Digital Spaces: an efficient algorithm based on immersion simulation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991;13(6):583-598. DOI: 10.1109/34.87344.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing, Third Edition*. 2008:798-800.

6. Beucher S., Lantuéjoul C. Use of watersheds in contour detection. *International Workshop on Image Processing, Real-Time Edge and Motion Detection/Estimation*. 1979.
7. Adams R., Bischof L. Seeded region growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1994;16(6):641-647. DOI: 10.1109/34.295913.
8. Fan M., Lee T. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485. DOI: 10.1049/iet-ipr.2014.0490.
9. Fan J., Zeng G., Body M., Hacid M.S. Seeded region growing: an extensive and comparative study. *Pattern Recognition Letters*. 2005;26(8):1139-1156. DOI: 10.1016/j.patrec.2004.10.010.
10. Van Herk M. A fast algorithm for local minimum and maximum filters on rectangular and octagonal kernels. *Pattern Recognition Letters*. 1992;13:517-521. DOI: 10.1016/0167-8655(92)90069-C.
11. Gil J., Werman M. Computing 2-D min, median, and max. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1993;15:504-507.
12. Pratt W.K. *Digital Image Processing, Third Edition*. 2001:562-566.
13. Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1991;13:583-598. DOI: 10.1109/34.87344.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Рабцевич В.В., ассистент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Цветков В.Ю., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-017-293-84-04;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Rabtsevich V.V., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies of the Belerussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsviatkou V.Yu., Dr. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Infocommunications of the Belerussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich