

УДК 621.391

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТРИАНГУЛЯЦИИ

В.А. КОВШИК, Н.С. ДАВЫДОВА, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 20 марта 2019*

Аннотация. Разработан алгоритм разбиения топографического пространства на симплексы на основе триангуляции для параметризации изображений атомно-силовой микроскопии (АСМ-изображений). Алгоритм обеспечивает формирование геометрического описания областей АСМ-изображений, соответствующих элементам поверхностей неорганических материалов. Исследована устойчивость алгоритма к изменению яркости и контраста АСМ-изображения.

Ключевые слова: АСМ-изображения, триангуляция, параметризация.

Введение

Определение параметров структурных областей на изображении является одной из ключевых задач при выявлении зависимостей «структура-свойства». АСМ часто является наиболее информативным методом исследования поверхности и результатов ее модификации в субмикро- и наноразмерном диапазоне.

Идентификационные параметры, которые можно выделить для распознавания и описания областей на изображении, делятся на три группы: собственные, окрестные и относительные [1].

К свойствам значений относят: минимум, (минимальное значение высоты, найденное внутри сегмента), максимальное значение высоты, найденное внутри сегмента, среднее значение всех принадлежащих сегменту пикселей.

К свойствам площадей можно отнести площадь проекции найденного сегмента на плоскость, сторону эквивалентного квадрата (т. е. сторону квадрата с той же площадью проекции, что и у найденного сегмента), радиус эквивалентного диска (радиус диска с той же площадью проекции, что и у найденного сегмента), площадь поверхности (площадь поверхности найденного сегмента).

К свойствам границ относятся длина границы проекции (длина проекции границы сегмента на горизонтальную плоскость, а не на реальную трехмерную поверхность), минимальный ограничивающий размер (минимальный размер сегмента в горизонтальной плоскости), максимальный ограничивающий размер (максимальный размер зерна в горизонтальной плоскости). Максимальные и минимальные ограничивающие размеры зерна показаны на рис. 1 [2].

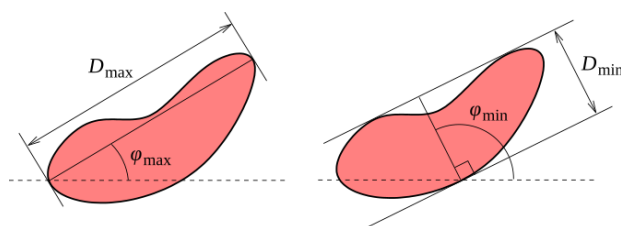


Рис. 1. Максимальные и минимальные ограничивающие размеры зерна

К свойствам объемов можно отнести объем между нулевой плоскостью и поверхностью (объем между поверхностью зерна и плоскостью $Z = 0$), объем между поверхностью и плоскостью, проходящей через минимум (объем между поверхностью зерна и плоскостью

$Z = Z_{\min}$, где Z_{\min} минимальная высота, найденная внутри сегмента).

К свойствам расположения можно отнести положение центра по оси абсцисс (горизонтальная координата центра сегмента), положение центра по оси ординат (вертикальная координата центра сегмента).

К свойствам наклонов относятся наклон θ (отклонение нормали к средней плоскости от оси Z), наклон φ (азимут наклона).

К свойствам кривизны можно отнести центр кривизны по оси абсцисс (горизонтальное положение центра квадратичной поверхности, которой аппроксимируется поверхность зерна), центр кривизны по оси ординат (вертикальное положение центра квадратичной поверхности, которой аппроксимируется поверхность зерна).

К относительным параметрам можно отнести свойства, описывающие место области относительно других выделенных областей на изображении. Одним из методов отображения таких параметров является построение сеток. Например, триангуляция – определение взаимного расположения точек на поверхности при помощи построения сети треугольников [2].

Алгоритм параметризации АСМ-изображений на основе триангуляции

Для параметризации АСМ-изображений предлагается алгоритм разбиения топографического пространства на симплексы на основе триангуляции. Сущность алгоритма состоит в нахождении локальных максимумов в каждой из сегментированных областей, а затем их соединении с двумя ближайшими максимумами. В результате выполнения алгоритма формируется множество треугольников, вершины которых соединяют все сегменты исходного изображения, а также матрицы углов и расстояний, описывающих эти треугольники. Алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Загрузка матрицы зондирования, в которой значение каждого элемента $m_z(y, x) \in [0, 2^b - 1]$ определяется высотой (трением или вязкостью) соответствующей точки поверхности, где Y, X – размеры матрицы зондирования по вертикали и горизонтали.

2. Формирование матрицы $M_s = \|m_s(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ сегментации по алгоритму [3], значимые области которой нумеруются с помощью счетчика C_s сегментов.

3. Формирование матрицы $M_Q(C_s) = \|m_Q(C_s, y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ значений локальных максимумов для каждого значения C_s , элементы которой определяются с помощью выражения

$$\begin{cases} (m_z(y, x) = \max C_s) \Rightarrow (m_Q(C_s, y, x) \leftarrow 1), \\ (m_z(y, x) \neq \max C_s) \Rightarrow (m_Q(C_s, y, x) \leftarrow 0), \end{cases}$$

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

4. Формирование стека S со значениями координат экстремумов матрицы M_Q .

5. Формирование стеков S_1 и S_2 со значениями двух ближайших к экстремуму рассматриваемого сегмента.

6. Формирование стеков R_1 и R_2 со значениями расстояний к двум ближайшим экстремумам от экстремума рассматриваемого сегмента.

7. Построение матрицы $M_c = \|m_c(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ с разбиением топографического пространства на симплексы.

Алгоритм параметризации АСМ-изображений на основе триангуляции реализован в среде Matlab.

Оценка работы алгоритма параметризации АСМ-изображений на основе триангуляции

На рис. 2 приведены тестовые изображения, а на рис. 3 и 4 – полученные на их основе с помощью разработанного алгоритма триангуляционные сетки.

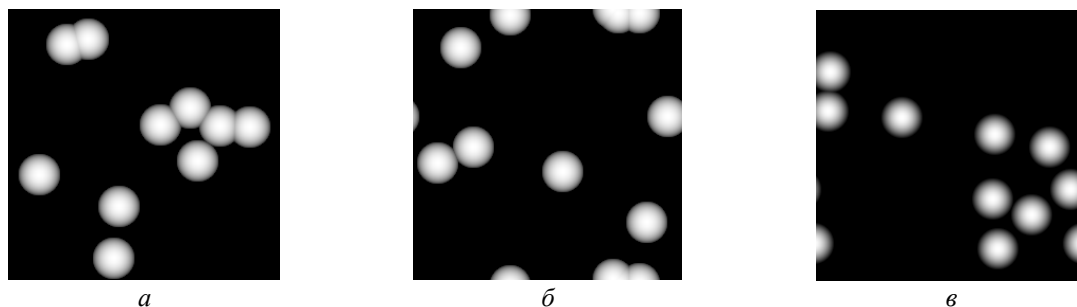


Рис. 2. Тестовые АСМ-изображения: *a* – ТР-1; *б* – ТР-2; *в* – ТР-3

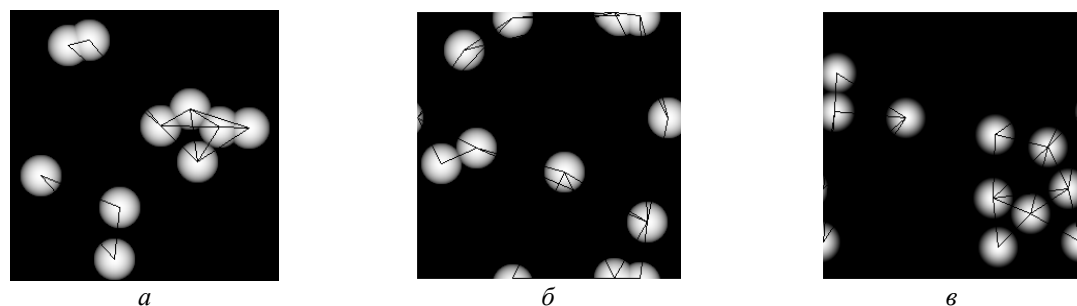


Рис. 3. Результаты триангуляции тестовых АСМ-изображений: *a* – ТР-1; *б* – ТР-2; *в* – ТР-3

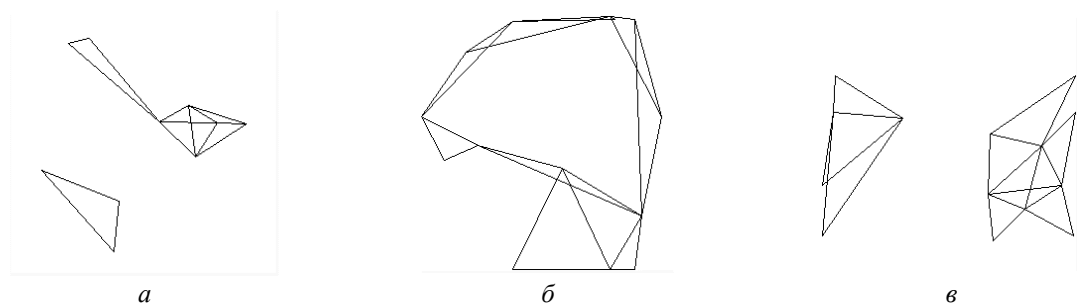


Рис. 4. Полученные сетки тестовых АСМ-изображений: *a* – ТР-1; *б* – ТР-2; *в* – ТР-3

В таблице для тестового изображения ТР-1 приведены значения углов и расстояний между локальными максимумами областей, полученные с помощью предложенного алгоритма параметризации АСМ-изображений на основе триангуляции.

Значения углов и расстояний для найденных центров масс

Углы, град	Расстояние, пиксел	Расстояние, пиксел	Расстояние, пиксел
26,655	80,777	105,551	49,254
54,851	20,616	116,276	105,759
115,977	20,616	105,759	116,276
47,370	49,254	105,551	80,777
105,975	49,254	80,777	105,551
73,914	32,249	48,796	50,488
118,991	32,249	32,757	56,009
78,306	39,115	48,795	56,009
150,782	28,018	32,757	58,822
35,192	28,0179	58,523	39,115

Из таблицы следует, что с помощью предложенного алгоритма можно найти экстремумы всех значимых областей и формирует простые симплексы на основе анализа соседних центров.

Оценка устойчивости алгоритма параметризации АСМ-изображений на основе триангуляции

Проверка устойчивости алгоритма разбиения топографического пространства на симплексы на основе триангуляции проводилась при изменении параметров яркости и контрастности. Полученные результаты приведены на рис. 5–8.

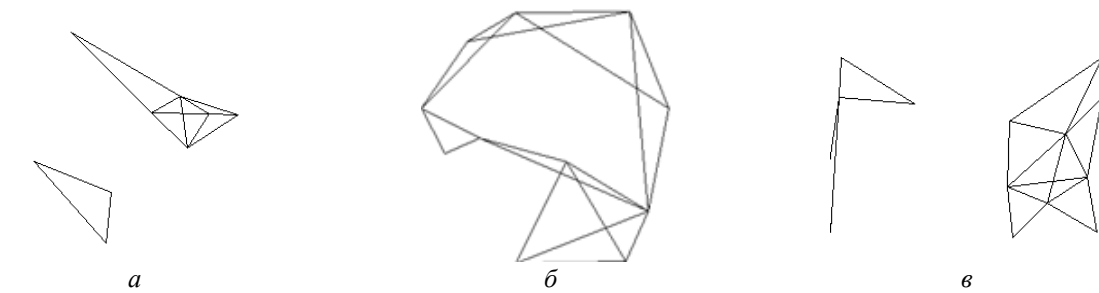


Рис. 5. Результат триангуляции при увеличении яркости АСМ-изображений: *a* – TP-1; *б* – TP-2; *в* – TP-3

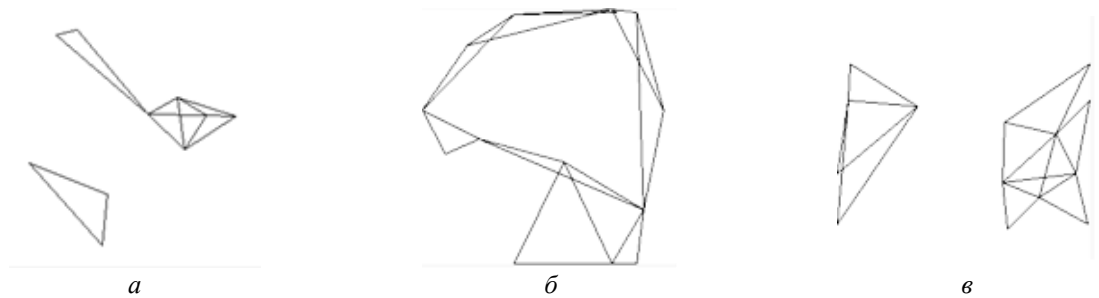


Рис. 6. Результат триангуляции при уменьшении яркости АСМ-изображений: *a* – TP-1; *б* – TP-2; *в* – TP-3

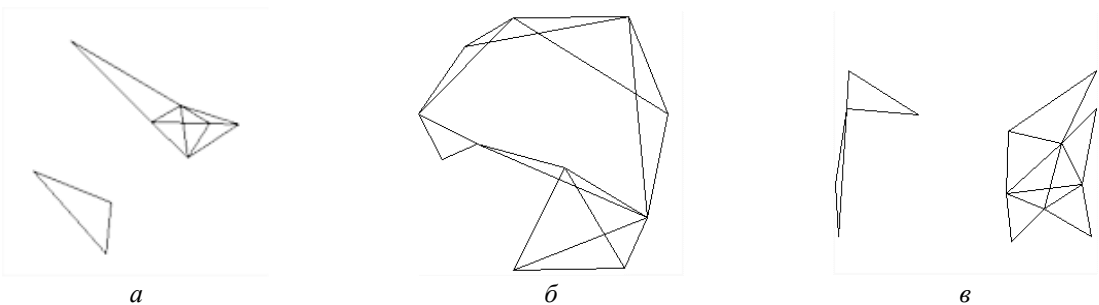


Рис. 7. Результат триангуляции при увеличении контрастности АСМ-изображений: *a* – TP-1; *б* – TP-2; *в* – TP-3

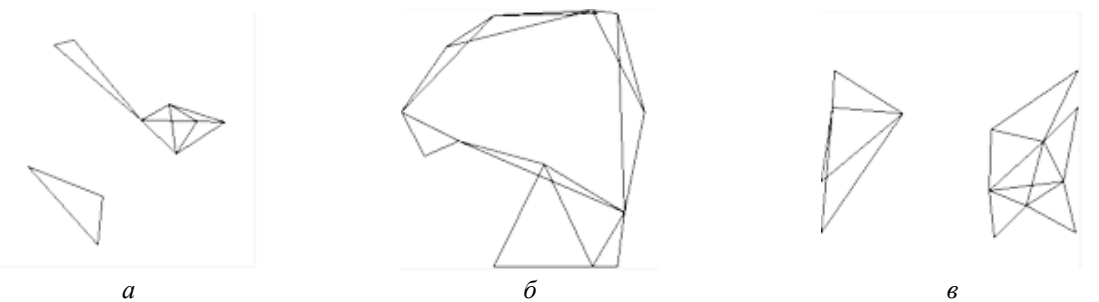


Рис. 8. Результат триангуляции при уменьшении контрастности АСМ-изображений: *a* – TP-1; *б* – TP-2; *в* – TP-3

Из рис. 5–8 видно, что уменьшение яркости и контраста АСМ-изображений не влияет на результаты триангуляции, а при увеличении яркости и контраста появляются изменения

из-за засвета границы близко расположенных зерен. Эту проблему можно решить предварительной обработкой АСМ-изображений.

Заключение

Разработан алгоритм разбиения топографического пространства на симплексы на основе триангуляции для параметризации АСМ-изображений. Алгоритм формирует геометрическое описание областей, соответствующих элементам поверхностей неорганических материалов, в виде сетки треугольников. Приведены основные характеристики, которые можно использовать в качестве собственных и относительных идентификационных параметров для распознавания и описания областей на АСМ-изображении. Показано, что разработанный алгоритм устойчив к уменьшению яркости и контраста АСМ-изображений при их предварительной нормализации.

PARAMETRIZATION OF AFM-IMAGES BASED ON TRIANGULATION

V.A. KOVSHIK, N.S. DAVYDOVA, V.Yu. TSVIATKOU

Abstract. An algorithm has been developed for splitting topographic space into simplexes based on triangulation for parametrization of atomic force microscopy images (AFM-images). The algorithm provides the formation of a geometric description of AFM-images areas corresponding to the elements of the surfaces of inorganic materials. The stability of the algorithm to changes in the brightness and contrast of the AFM-image is investigated.

Keywords: AFM-images, triangulation, parameterization.

Список литературы

1. Конопелько В.К., Цветков В.Ю. Формирование и обработка образов в помехоустойчивом кодировании и передаче изображений Минск: Бестпринт, 2015.
2. Gwiddion [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gwiddion.net>. (дата обращения: 15.03.2019).
3. Рабцевич В.В., Цветков В.Ю., Ловецкий М.Ю. // Сб. материалов междунар. научн.-техн. конф. «Мониторинг техногенных и природных объектов» Минск: БГУИР, 2017. С. 77–84.