

А.А. ОРЛОВ, Л.В. АНТОНОВ

Метод предварительной обработки изображений микро- и наноструктур

УДК 004.942

Муромский институт
(филиал) ФГБОУ ВПО
«Владимирский
государственный
университет имени
Александра
Григорьевича и Николая
Григорьевича
Столетовых», г. Муром

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-07-97515

В работе показана потребность в автоматической обработке снимков микро- и наноструктур. Разрабатывается метод предварительной обработки таких снимков для достоверного выделения безразрывных структур на них. Метод основан на более точном вычислении градиента яркости и подчеркивании границ образов. Приведены результаты обработки снимка наноструктуры.

В настоящее время широкое практическое использование нанотехнологий является важнейшим стратегическим направлением развития высокоуровневых производств и освоения на новой основе подходов к инновационному преобразованию промышленности. В течение последних лет работы в этой области стремительно развиваются в рамках ряда приоритетных программ правительств США, ФРГ, Франции, Китая и других стран, включая Россию [1].

В рамках данного научного направления атомные структуры веществ исследуются различными методами и средствами, в частности рентгеновскими, туннельными, атомно-силовыми и оптическими микроскопами. Перед исследователями стоит ряд задач по обработке данного типа изображений.

Одной из задач исследования в этой области является анализ наноструктуры наполненной резины при атомно-силовой микроскопии. В качестве показательного примера будем ссылаться на результаты, приведенные в работе [2], в которой проводились иссле-

дования структуры материалов на основе атомно-силового микроскопа (АСМ) Nano-DST (номинальный радиус наконечника иглы микроскопа - 10 нм). Для оценки микро- и наноструктуры определялись следующие характеристики: характер распределения (индекс Моришиты), площадь сечения, объем, компактность и размеры кластеров.

В данном случае следует отметить, что важной задачей анализа микро- и наноструктуры является выделение образов кластеров на снимках. Применение классических методов сегментации для решения этой задачи в большинстве случаев дает недостоверный результат (объекты выделяются неверно и носят незамкнутый характер). Причиной этого является сильная зашумленность, размытость и малоконтрастность формируемых снимков.

Цель настоящей работы – построение метода предварительной обработки снимков микро- и наноструктур для более достоверного выделения их образов и дальнейшего автоматического анализа.

Главная причина, по которой не удается получить безразрывные образы, - это размытость и нечеткость их границ. Основные подходы для решения задач обработки и анализа границ представлены в [3]. Задача выделения контуров объектов сводится к поиску перепадов яркости в области изображения. В связи с тем, что градиент характеризует скорость изменения величины (в данном случае яркости), делается вывод, что основным признаком границ образов является именно градиент.

Проблемы качественного вычисления градиента связаны с тем, что в реальности мы имеем не функцию, а матрицу изображения. Существует множество операторов, вычисляющих значения градиента в дискретном пространстве [3]. Следует отметить недостатки таких операторов: во-первых, чувствительность к шуму [4]; во-вторых, нет инвариантности к вращению матрицы изображения, что вносит значительные искажения.

Самый простой способ вычисления градиента в дискретном пространстве заключается в аппроксимации производных разностями:

$$\nabla f(x, y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \approx \nabla F_{ij} = (F_{i+1,j} - F_{ij}, F_{i,j+1} - F_{ij})$$

где F , ∇F – матрицы яркости и градиента соответственно.

Нетрудно заметить, что при вращении матрицы изображения на различные углы значение модуля градиента в точке вращения будет варьировать, что не удовлетворяет его свойствам, которые справедливы в непрерывном пространстве. Неверно меняется также и направление градиента (оно должно изменяться на угол поворота). Тоже можно сказать о результате других различных градиентных операторах.

Для уменьшения влияния аддитивного шума, наблюдаемого на исходных снимках, будем сглаживать изображения вдоль некоторого отрезка l . Пусть отрезок l лежит на оси x и задан системой параметрических уравнений:

$$\begin{aligned}x &= t, -r \leq t \leq r, \\y &= 0,\end{aligned}$$

где r – половина длины отрезка.

Повернем отрезок на угол θ и сместим его на вектор (x_0, y_0) :

$$\begin{aligned}x &= t \cos \theta + x_0, \\y &= t \sin \theta + y_0, \\-r &\leq t \leq r,\end{aligned}$$

Нанесем на длину отрезка еще одно ограничение. Пусть l лежит на однородной по яркости области изображения, т.е.

$$-r_1 \leq t \leq r_2 \quad (f(x_0, y_0) - f(x, y) < \varepsilon), \quad (1)$$

где ε – порог вариации яркости по отрезку.

Следует полагать, что значение порога ε зависит от интенсивности аддитивного шума на исходном изображении $f(x, y)$.

Таким образом, отрезок на плоскости изображения будем задавать с помощью трех параметров θ, x_0, y_0 , а множество точек отрезка будет вычисляться по следующей формуле:

$$l = \{(x, y) | x = t \cos \theta + x_0 \ \& \ y = t \sin \theta + y_0 \ \& \ -r_1 \leq t \leq r_2\}.$$

Преобразование вида

$$\begin{aligned}h(\theta, x_0, y_0) &= H_l[f(x, y)] = \frac{1}{L} \int_l f(x, y) ds = \\&= \frac{1}{r_1 + r_2} \int_{-r_1}^{r_2} f(t \cos \theta + x_0, t \sin \theta + y_0) dt\end{aligned} \quad (2)$$

назовем интегральным преобразованием по отрезку l .

Из физического смысла криволинейного интеграла в выражении (2) ясно, что значение функции $h(\theta, x_0, y_0)$ будет равно средней яркости отрезка с параметрами θ, x_0, y_0 . Исходя из условия (1), можно также видеть, что самые длинные отрезки находятся либо на однородных областях, либо (что самое важное) вдоль перепадов яркости.

Учитывая наличие аддитивного шума, в качестве исходных данных будем брать не саму функцию яркости $f(x, y)$, а ее спектр $h(\theta, x, y)$, полученный в результате применения интегрального преобразования по отрезку (2), где происходит усреднение яркости вдоль границы, тем самым, подавляя аддитивный шум с сохранением перепадов яркости.

В работе [5] показано, что

$$\nabla f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathbf{Rot}_\varphi \left(\frac{\partial h(\varphi - \frac{\pi}{2}, x, y)}{\partial x_\varphi}, \frac{\partial h(\varphi, x, y)}{\partial x_{\varphi + \frac{\pi}{2}}} \right) d\varphi, \quad (3)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_\varphi}, \frac{\partial f}{\partial x_{\varphi + \frac{\pi}{2}}}$ – производные по ортогональным друг к другу направлениям,

$\mathbf{Rot}_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$ – оператор поворота на угол φ .

Запишем производную по направлению через предел:

$$\frac{\partial h(\varphi - \frac{\pi}{2}, x, y)}{\partial x_\varphi} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{h(\varphi - \frac{\pi}{2}, x + \Delta \cos \varphi, y + \Delta \sin \varphi) - h(\varphi - \frac{\pi}{2}, x, y)}{\Delta}.$$

Отсюда следует, что в дискретном пространстве аппроксимацию производной следует производить разностью

$$\frac{\partial h(\varphi - \frac{\pi}{2}, x, y)}{\partial x_\varphi} \approx dH_\varphi = H_{q, i + \cos \varphi, j + \sin \varphi} - H_{q, i, j}, \quad (4)$$

где q – градация угла наклона отрезка, H – массив значений спектральной функции $h(\theta, x_0, y_0)$.

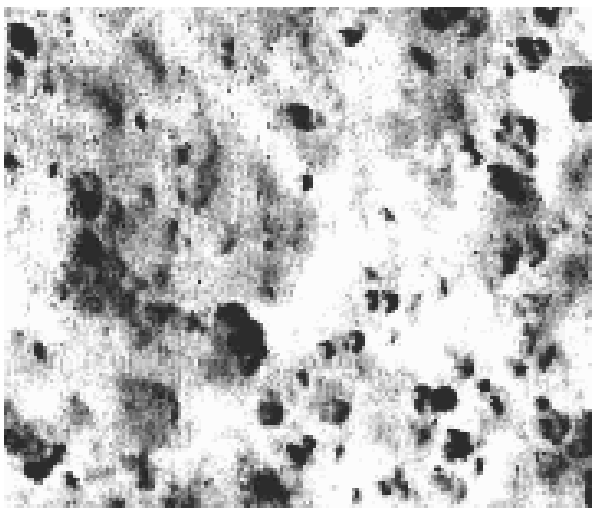
Принимая во внимание формулы (3) и (4), вычисление градиента будет сводиться к определению значений с помощью выражения:

$$\nabla f(x, y) \approx \nabla F_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{\varphi} \mathbf{Rot}_{\varphi} \begin{pmatrix} dH_{\varphi} \\ dH_{\varphi+\pi/2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

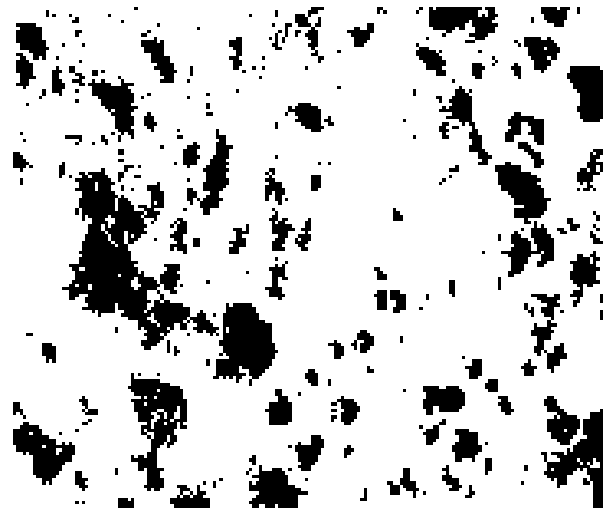
Для четкого выделения областей объектов на снимках разработан алгоритм подчеркивания границ на полутоновых изображениях, позволяющий устранять зоны перепадов яркости. Алгоритм основан на использовании значений градиента и подробно описан в [6, 7]. В зависимости от уровня шума изображение делится на области перепадов яркости и на однородные области. Однородные области сглаживаются, а области перепадов делятся по линии границы и сливаются с соответствующими однородными областями. Разработанный алгоритм показал высокое качество обработки на тестовых изображениях [6-10].

Результат предварительной обработки реальных изображений наноструктур на основе алгоритма подчеркивания границ при вычислении градиента по формуле (5) представлен на рисунке 1.

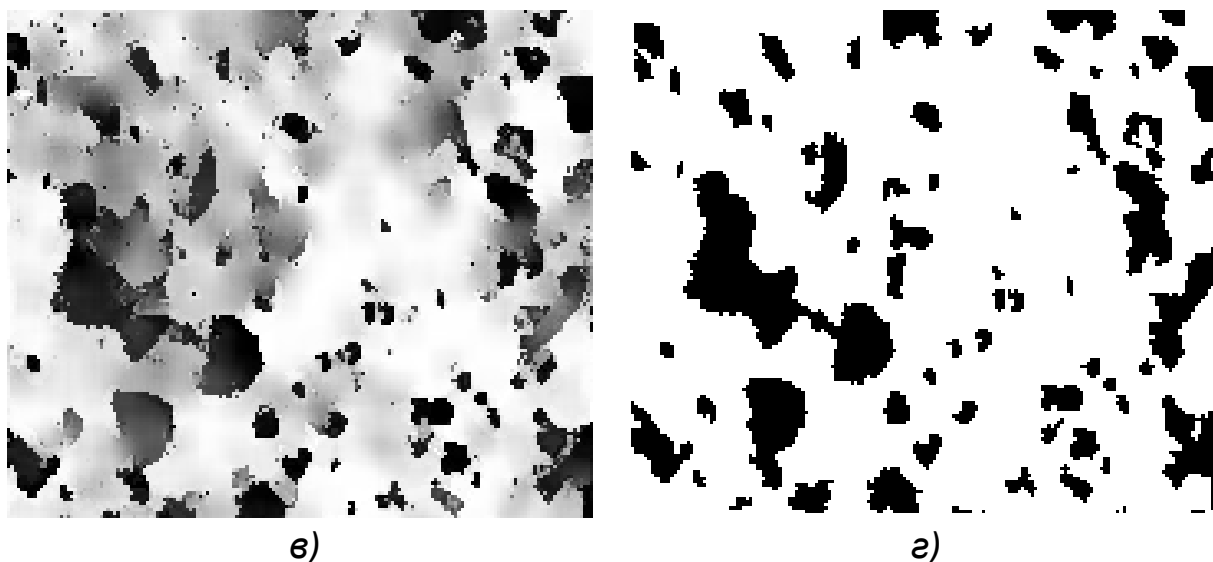
Таким образом, в результате проведенной работы сформирован метод предварительной обработки, состоящий в вычислении градиента яркости на основе интегрального преобразования по отрезку и подчеркивании границ. Разработанный метод дает возможность достоверно выделять безразрывные образы наноструктур на снимках.



а)



б)



500 нм

а – исходный снимок, *б* – выделенная структуры без предварительной обработки, *в* – результат обработки снимка на основе метода подчеркивания границ, предобработка для сегментации, *г* – выделенная структура с предварительной обработкой и устранением малых областей

Рис. 1. Снимки наноструктуры наполненной резины

Литература

1. *Столяров А.А.* Методические материалы по подготовке и представлению (презентации) инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых учёных по направлению “Наноинженерия” - М.: МГТУ им. Баумана, 2010. 71с.
2. *Морозов И.А.* Анализ микроструктуры наполненной резины при атомно-силовой микроскопии // Механика композиционных материалов и конструкций – 2009. №1. С. 83
3. Методы компьютерной обработки изображений. Под ред. В.А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
4. Вопросы кибернетики: Распознавание. Нейросети. Виртуальная реальность. Под ред. В.Б. Бетелика - М., 1997.
5. *Орлов А.А., Сафронов Е.М.* Вычисление градиента яркости на цифровых изображениях // Системы и методы обработки и анализа информации. Сборник науч. статей - М: Горячая линия - Телеком, 2005. С.50-55
6. *Орлов А.А., Зацепин Д.Б.* Анализ изображений на основе интегральных преобразований по неаналитическим кривым // Алгоритмы и методы обработки и анализа информации. Сборник научных статей. - М: Горячая линия - Телеком, 2006. С.9-14.
7. *Орлов А.А., Ерин А.М.* Алгоритм контурного обнаружения объектов на полутоновых изображениях // Данные, информация и их обработка: Сборник научных статей. - М.: Горячая линия – Телеком, 2002. С.9-14.
8. *Орлов А.А., Канунова Е.Е.* Цифровая обработка текста на изображениях рукописей как линейчатых объектов // Информационные технологии. - 2008, №1. С.57-62

9. Орлов А.А., Ермаков А.А. Технология сравнения и идентификации растворов изображений линий // Программные продукты и системы. - 2008, №1. С.68-70.

10. Садыков С.С., Орлов А.А., Ермаков А.А. Методика обработки линейчатых образов на дефектоскопических снимках // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. - 2009, №2. С.11-16