
Телевизионные системы, передача и обработка изображений

УДК 004.932.2

Разработка иерархических методов описания и анализа изображений индуцированных наноструктур

Жизняков А.Л., Привезенцев Д.Г., Кульков Я.Ю.

Предлагается рассматривать последовательность изображений, получаемую при изучении нанообъекта (индуцированных наноструктур кластерного типа) на разных масштабах как результат взаимного воздействия факторов наследственности и изменчивости признаков на некоторые его исходные характеристики. Введение понятий наследственности и изменчивости признаков дает возможность построения иерархических структур формальных описаний, т.е. моделей наноизображений, основанных на группах признаков, относящихся к различным морфологическим и масштабным уровням представления. Новые методы обработки и анализа изображений, основанные на данных теоретических положениях и подходах, должны обеспечивать возможность более полного извлечения информации за счет использования многоуровневой системы признаков.

Ключевые слова: обработка изображений, распознавание, анализ многомасштабный, наноструктуры.

Введение

Известно, что основные свойства, характеризующие наномасштабные изображения – это многоуровневая (вложенная) периодичность и сложные модели наблюдения. Нанообъекты проявляют свои характерные свойства (признаки) на разных масштабах рассмотрения, что определяет иерархичность систем описания их свойств [1].

Таким образом, для наиболее полного изучения наноструктуры необходимо использовать последовательность ее изображений, получаемую на разных масштабах наблюдения.

При этом, один и тот же признак (особенность) может проявлять себя в той или иной мере на нескольких изображениях многомасштабной последовательности, постоянно при этом изменяясь. В результате таких изменений, он может либо исчезнуть, либо измениться настолько, что будет рассматриваться уже как другой независимый признак (особенность). Здесь же можно отметить возможность взаимного влияния различных признаков друг на друга, приводящую к появлению в многомасштабной последователь-

ности изображений с новыми характерными свойствами и особенностями.

При этом появляется возможность получения иерархических структур формальных описаний нанообъекта, т.е. моделей изображений, основанных на различных признаках, относящихся к различным морфологическим и масштабным уровням представления. Анализ данных структур позволяет прийти к гибкой многоуровневой системе обработки «сверху - вниз», использование которой связано не только с требованием повышения точности, но и необходимостью принципиально изменять стратегию восприятия нанообъектов, в отличие от макрообъектов.

Анализ текущего состояния исследований в этой области

В настоящее время работы в области научной визуализации наноструктур активно ведутся как в России, так и за рубежом. Вопросы, связанные с получением изображений наноструктур, широко рассматриваются и представлены, в частности в [1-13]. Использование методов оптической (СОМ) [9], рентгеновской (РРМ) [5], электронной (РЭМ) [3,4], туннельной (ТЭМ) [12], атомно-силовой (АСМ) [6] микроскопии дает возможность

получения изображений нанообъектов с различным предельным разрешением.

Основными задачами получения микроскопических изображений объектов являются измерение размеров наночастиц, нанообъектов и нанопокровов, как основных элементов нанотехнологий [3,4], а также анализ и восстановление их 3D-формы [8,9]. Малейшие изменения толщины или рельефа нанопленки, приводят к изменению физических и химических свойств материала, поэтому задача повышения точности измерения параметров наноструктур является актуальной [10, 13].

Особое внимание, при этом уделяется тому, что свойства и параметры визуализируемых нанообъектов и структур зависят от выбранного масштаба сканирования, причем выбор параметров фокусировки микроскопа является не тривиальной задачей [4,7,10,11,14].

В [11] представлена методика совмещения макро-, микро- и нано- пространственной информации, извлекаемой из изображений одного объекта, полученных на различных уровнях разрешения методами оптической, рентгеновской и сканирующей электронной микроскопии. Показано, что сопоставление (слияние) многомасштабных изображений, позволяет дать более надежную оценку параметров исследуемых структур. В [15] рассматриваются возможности извлечения информации из изображений, полученных на различных уровнях разрешения (от макро- до нано).

В [16] делается вывод о том, что широко используемые «стандартные» методики обработки изображений не в состоянии охватить весь спектр информации, получаемой при помощи современных систем оптической, электронной и зондовой микроскопии. Предлагается для получения дополнительных данных использовать наборы изображений, полученных на различных разрешениях с использованием различных физических принципов. Здесь же отмечена важность возможности плавного изменения масштаба получаемых последовательностей. Также

описан метод получения «сверхразрешения» на основе набора микроскопических изображений с более низким исходным разрешением [17].

В [18] приводится обзор основных характеристик новых систем анализа изображений наноструктур. Показано, что современные системы анализа наноизображений переходят из категории систем визуализации в категорию средств измерений. Приводятся примеры работы анализатора изображений SIAMS для анализа изображений микроструктур в широком диапазоне масштабов, полученные различными методами цифровой микроскопии.

Результат анализа предлагаемых в настоящее время систем научной визуализации нанообъектов показывает, что они не включают в себя возможность автоматического анализа сложных многомасштабных геометрических структур на наборах изображений, вследствие чего, не позволяют автоматически достоверно проводить анализ получаемых данных. В связи с этим основная часть работ по обработке видеоданных осуществляется с участием оператора, что значительно ограничивает возможности измерения и контроля нанообъектов. Системы реконструкции многомерных моделей видеоданных в настоящее время находятся в стадии развития. Основной проблемой их реализации является сложность извлечения необходимой информации из регистрируемых видеоданных. Готовые универсальные решения подходят для решения далеко не всех задач. Адаптация таких систем, если она и возможна, требует немалых вложений. Разработка систем под заказ обычно ведется на базе существующих решений в области обработки видеоизображений. Вместе с тем, существует множество задач, решение которых требует создания принципиально новых технологий.

Таким образом, применение новых предложенных подходов, основанных на построении иерархических систем признаков многомасштабных последовательностей изображений наноструктур, позволяющих, адаптивно к особенностям изображения, выби-

рать масштаб его рассмотрения при анализе, при имеющейся технической и технологической базе, позволит достичь новых результатов, соответствующих мировому уровню достижений.

Многомасштабный подход к обработкам изображений

Для обработки изображений широко используются модели и алгоритмы, которые рассматривают изображение только как входные данные. Однако, например, при решении задачи сегментации более эффективно заменить изображение его многомасштабным представлением.

Под многомасштабным представлением изображения f понимается множество приближений $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, каждый элемент которых соответствует изображению f с более низким разрешением, и множество дополнений $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$. Каждый элемент набора дополнений содержит детали исходного изображения, которые были отброшены от исходного изображения до аппроксимации.

Широкое применение многомасштабного подхода к обработке изображений привело к разработке многомасштабных моделей изображений. Многомасштабные модели используются для описания зависимостей между элементами многомасштабного представления.

В общем, операция получения многомасштабного разложения изображения f в пространственной области может быть записана следующим образом:

$$W = T_k[f] = \{L, H\} = \{\{L^i\}, \{H^i\}\}, \quad (1)$$

где $i = 1..N$ – число уровней декомпозиции, $T_k[\cdot]$ – оператор прямого многомасштабного преобразования, $L = \{L^i\}$ – многомасштабная последовательность приближений, $H = \{H^i\}$ – многомасштабная последовательность дополнений.

Предлагаемые подходы и методы

Для описания структурной иерархии свойств изображений предлагается анализировать наноструктуру на следующих уровнях:

1. интегральном, характеризующим изображение в целом;
2. структурном, описывающим взаимное расположение, взаимодействие и взаимозависимость объектов;
3. локальном, характеризующим геометрические и цветовые характеристики объектов.

При этом актуальной задачей является возможность автоматического выбора масштаба рассмотрения нанобъекта, при котором могут быть получены наиболее информативные его признаки.

В частности, такая задача возникает при обработке результатов визуализации лазерно-индуцированных наноструктур кластерного типа с управляемой топологией. Кластеры из наночастиц, которые, в свою очередь, состоят из сравнительного небольшого числа (до нескольких тысяч) атомов, имеют свои масштабы проявления, их свойства зависят от размеров, формы, расположения кластеров, их схемотехнической организации и по разному проявляются на разных масштабах.

Одним из подходов здесь является автоматический анализ получаемой последовательности изображений нанобъекта, основанный на вычислении параметров наследственности и изменчивости его информативных признаков. Параметры наследственности и изменчивости характеризуют процесс сохранения и исчезновения выбранных признаков на последовательности изображений.

В проекте предлагается разработка новых методов многомасштабного представления изображений наноструктур, отличающихся возможностью выбора коэффициента изменения масштаба, адаптивного к свойствам изображения и позволяющих более точно отслеживать особенности анализируемого изображения

Предлагается рассматривать процесс преобразования изображения нанобъекта при его рассмотрении на нескольких масштабах, как результат взаимного воздействия, факторов наследственности и изменчивости при-

знаков на некоторое исходное множество его характеристик.

Предполагается, что использование для извлечения данных о параметрах наноструктуры многомасштабной последовательности ее изображений, позволит выделить более информативные характеристики и повысить точность измерения параметров нанообъектов.

Новые методы обработки и анализа изображений, основанные на данных теоретических положениях и подходах, должны обеспечивать возможность более полного извлечения информации за счет использования многоуровневой системы признаков

Разработка адаптивных многомасштабных последовательностей изображений наноструктур

Для того, чтобы построить адаптивную последовательность многомасштабных приближений L изображений f , следующий алгоритм разработан:

1. Построить многомасштабную последовательность приближений $T_K[f] = L = \{L^i\}$ на основе исходного изображения f .

2. Вычислить значение DS по элементам полученной последовательности L (DS является расстоянием между исходными изображениями и элементами многомасштабной последовательности). Наиболее подходящей метрикой для анализа последовательностей многомасштабных является количеством взаимной информации:

$$DS[i] = \sum_{t=1}^m p[t] \log \left(\frac{p[t]}{q_i[t]} \right), \quad (2)$$

где $p[t]$ – гистограмма исходного изображения, $q_i[t]$ – гистограмма приближения изображения L^i .

3. Выбрать на основе некоторого правила RL элементы последовательности L , который будет включен в последовательности L_a , или набор коэффициентов сжатия K , на основе которых построена последовательность L_a .

Рассмотрим пример построения адаптивной последовательности приближений для тестового изображения (рис. 1).

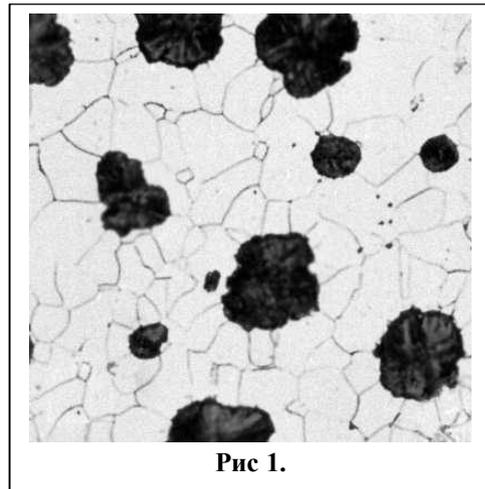


Рис 1.

Для построения L_a использовалась первоначальная последовательность L , которая состоит из 50 элементов. На рис. 2 показаны элементы последовательности приближений L_a изображения (а - 4; б - 12; с - 20; д - 29; е - 39; е - 50), показанного на рис. 1.

Заключение

В результате анализа предлагаемых в настоящее время систем научной визуализации нанообъектов показывает, что они не включают в себя возможность автоматического анализа сложных многомасштабных геометрические структуры на множествах изображений, и, следовательно, они не позволяют автоматически анализ полученных данных чтобы быть достоверно выполнена. В связи с этим, большая часть работы по обработке видеоданных осуществляется с оператором, который значительно ограничивает возможность измерения и контроля нанообъектов. Системы реконструкции для данных моделей многомерной видео в настоящее время в стадии разработки. Основная проблема их реализации является сложность извлечения необходимой информации из записанных видеоданных. Готовые универсальные решения подходят для решения не все задачи. Адаптация таких систем, если это возможно, требует значительных инвестиций. Развитие систем под заказ, как правило, на основе существующих решений в области обработки видеоизображений. В то же время, есть много задач, решение которых требует создания принципиально новых технологий.

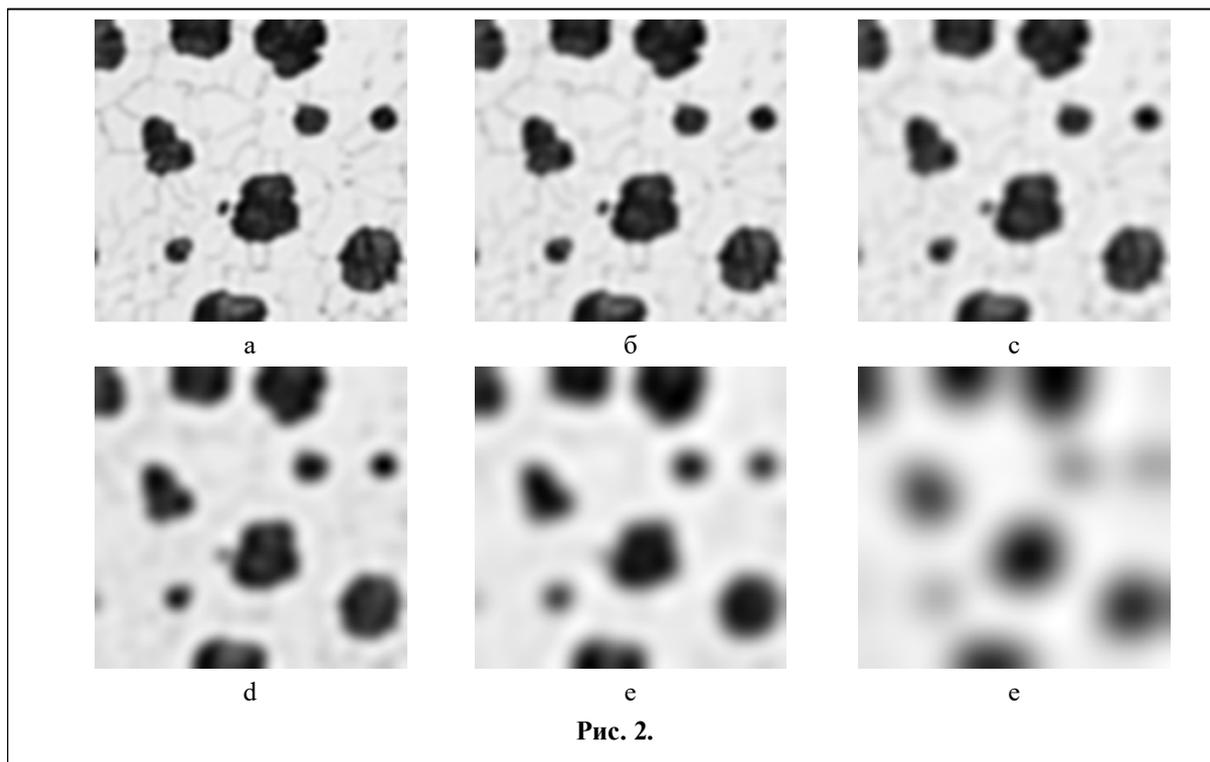


Рис. 2.

Таким образом, применение новых предлагаемых подходов, основанных на построении иерархических систем признаков многомасштабных последовательностей изображений наноструктур, что позволяет, адаптивно к особенностям изображения, чтобы выбрать масштаб рассмотрения в ходе анализа, с имеющимися технической и технологической база, позволит достичь новых результатов, соответствующих мировому уровню достижений.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-07-01191.

Литература

1. Сойфер В.А., Куприянов А.В. Анализ и распознавание наномасштабных изображений: традиционные подходы и новые постановки задач. Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 136-144.

2. Аракелян С.М., Кучерик А.О., Прокошев В.Г., Рау В.Г., Сергеев А.Г. Введение в фемто-нанофотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов. М.: Логос, 2015

3. S. Arakelian, S. Kutrovskaya, A. Kucherik, A. Osipov, A. Povolotckaia, A. Povolotskiy, A. Manshina Laser-induced synthesis of a nanostructured polymer-like metal-carbon complexes//Proc. of SPIE Vol. 9884, 988425 (2016).

4. Kutrovskaya S., Kucherik A., Arakelian S., Osipov A., Vartanyan T., Itina T. Optical properties of quasi-organized bimetallic clusters obtained by laser-assisted colloidal deposition// Modern problems of laser physics The VII International Symposium and Young Scientists School. 2016. С. 187-188.

5. Novel method for dimensional measurements of nanorelief elements based on electron probe defocusing in a scanning electron microscope / M. N. Filippov [et al.] // Measurement Science and Technology. — 2014. — Mar. — Vol. 25, no. 4.

6. Scanning electron microscopy used to measure the feature dimensions of ananoscale test pattern on a silicon surface / V. P. Gavrilenko [et al.] // Russian Microelectronics. — 2011. — Nov. — Vol. 40, no. 6. — Pp. 436-440.

7. Novikov Y. A. Electron distribution density in a low voltage SEM probe //Russian Microelectronics. — 2014. — Sept. — Vol. 43, no. 5. — Pp. 361-370.

8. Novikov Y. A. Imaging of a test object with a trapezoidal profile and large sidewall inclinations in a scanning electron microscope in the backscattered electron mode // J. Synch. Investig. — 2011. — Oct. — Vol. 5, no. 5. — Pp. 917-923.

9. Feasibility study on 3-D shape analysis of high-aspect-ratio features using through-focus scanning optical microscopy / R. K. Attota [et al.] // Opt. Express. — 2016. — July. — Vol. 24, no. 15.

10. Method for optical inspection of nanoscale objects based upon analysis of their defocused imag-

es and features of its practical implementation / M. Ryabko [et al.] // Opt. Express. — 2013. — Oct. — Vol. 21, no. 21.

11. Gerke K. M., Karsanina M. V., Mallants D. Universal Stochastic Multiscale Image Fusion: An Example Application for Shale Rock // Sci. Rep. — 2015. — Nov. — Vol. 5.

12. Larionov Y. V., Novikov Y. A. Mechanisms of image formation in SEM // International Conference Micro- and Nano-Electronics 2012 / ed. by A. A. Orlikovsky. — SPIE-Intl Soc Optical Eng, Jan. 2013.

13. Strain mapping with nm-scale resolution for the silicon-on-insulator generation of semiconductor devices by advanced electron microscopy / D. Cooper [et al.] // J. Appl. Phys. — 2012. — Vol. 112, no. 12.

14. Novikov Y. A. Backscattered electron imaging of micro- and nanostructures: 2. Rectangular

structures // J. Synch. Investig. — 2015. — May. — Vol. 9, no. 3. — Pp. 496–507.

15. Optical characterization of macro-, micro- and nanostructures using polarized light / P. Petrik [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — Dec. — Vol. 558.

16. Optimized imaging using non-rigid registration / B. Berkels [et al.] // Ultramicroscopy. — 2014. — Mar. — Vol. 138. — Pp. 46–56.

17. Strain mapping accuracy improvement using super-resolution techniques / G. BÁRCENA-GONZÁLEZ [et al.] // Journal of Microscopy. — 2015. — Oct. — Vol. 262, no. 1. — Pp. 50–58.

18. Digital microscopy from nano to macro, using the SIAMS image-analysis system / R. M. Kadushnikov [et al.] // J. Opt. Technol. — 2011. — Jan. — Vol. 78, no. 1. — P. 61.

Поступила 30 октября 2018 г.

It is proposed to consider the sequence of images obtained in the study of nano-objects (induced cluster-type nanostructures) at different scales as a result of the mutual influence of hereditary factors and the variability of characters on some of its original characteristics. The introduction of the concepts of heredity and variability of attributes makes it possible to build hierarchical structures of formal descriptions, i.e. models of nano-images based on groups of characters belonging to different morphological and scale levels of representation. New methods of processing and analyzing images based on these theoretical positions and approaches should provide the possibility of more complete extraction of information through the use of a multi-level system of signs.

Key words: image processing, recognition, multiscale analysis, nanostructures.

Жизняков Аркадий Львович – доктор технических наук, первый заместитель директора Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Привезенцев Денис Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры САПР Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Кульков Ярослав Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры САПР Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.