

РЕГРЕССИВНЫЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ

В.В. РАБЦЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ, ЛОВЕЦКИЙ М.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию

Аннотация. Предложен метод сегментации АСМ-изображений на основе регрессивного волнового выращивания областей путем присоединения к областям новых элементов с учетом их уровня квантования. Проведено сравнение данного метода с наиболее распространенными методами сегментации.

Ключевые слова: сегментация изображений, выращивание областей, водораздел.

Abstract. Proposed algorithm segmentation of the atomic force microscopy images based on the regressive wave methods of region growing is proposed by attaching new elements to the regions taking into account their quantization level. This method is compared with the most common in the field of atomic force microscopy.

Keywords: image segmentation, region growing, watershed.

Введение

Технологии анализа структуры материалов на основе атомной силовой микроскопии (АСМ) в настоящее время интенсивно развиваются с приложением к различным областям. В материаловедении атомный силовой микроскоп позволяет получить АСМ-изображение сканируемого участка поверхности материала, яркость каждого пикселя которого несет информацию о физических свойствах соответствующего элемента участка. Во многих случаях это информация о расстоянии между этим элементом и щупом закрепленном на кантилере (при контактном методе исследования). Растр (двумерная матрица) значений пикселей в таких случаях представляет информацию о топологии соответствующего участка поверхности. Одной из основных задач анализа АСМ-изображений заключается в локализации их структурных элементов. В цифровой обработке изображений данная задача решается с помощью сегментации. В настоящее время все методы сегментации можно разделить на корреляционные, пороговые, основанные на областях, основанные на границах, текстурные, основанные на анализе цвета [14]. Корреляционные методы применяются при известных эталонах объектов. Они являются эффективными в системах прикладного телевидения и относятся в основном к области распознавания изображений. Пороговые методы эффективны для обработки АСМ-изображений, но требуют сложных алгоритмов предобработки, поскольку используют стабильные различия в яркостях отдельных областей и сильно зависят от выбора порога. Методы выделения границ эффективны, если границы достаточно четкие и стабильные, что не подходит для АСМ-изображений. Для описания свойств изображения применяются текстурные методы. Методы, основанные на анализе цвета, по своей сути являются комбинированными. Из всех категорий сегментации для решения прикладной задачи по разделению на области АСМ-изображений наиболее подходят методы на основе областей, которые можно разделить на четыре группы: водораздела [1 – 4], поровой обработки [5], разделения и слияния областей [6, 7, 8], выращивания областей [9 – 12]. Для сегментации АСМ-изображений наиболее эффективны и наиболее часто применяются методы водораздела. В их основе лежит отношение к яркости изображения как к

топографической карте, что позволяет строить линии раздела областей на самых ярких участках. Основные недостатки методов водораздела заключаются в избыточной сегментации, необходимости предварительной обработки (построение градиента либо матрицы расстояний, в зависимости от реализации) [14].

Для устранения данных недостатков можно задавать исходные точки роста. Это может быть сделано с помощью алгоритма маркерного водораздела.

Целью работы является разработка метода сегментации АСМ-изображений, учитывающего их физические особенности и вносящего минимум погрешностей при анализе.

Сравнение существующих методов сегментации применяемых в атомно-силовой микроскопии

В настоящее время в атомно-силовой микроскопии наибольшее распространение получили два типа методов сегментации: пороговые и с использованием водораздела. Однако для минимизации ошибки чаще используют последние.

Среди методов водораздела используются методы математической морфологии водоразделов с применением градиента, такие как метод Хариса, Винсента, Бачера, Пана, которые строятся на схожих критериях.

Классический алгоритм сегментации водоразделом состоит из следующих шагов.

Вычисление градиента в каждом пикселе.

Определение локальных минимумов.

Обход пикселей, применение приоритетной очереди (приоритет выше - чем выше интенсивность).

Полученное изображение часто получается чрезмерно сегментированным на большое число маленьких областей (бассейнов), большинство из которых не являются значимыми при решении проблемы. Устранить пересегментацию позволяет алгоритм маркерного водораздела, который включает процедуру предобработки и выбора маркеров, удовлетворяющих заданным условиям.

Еще одним распространенным алгоритмом является алгоритм выращивания областей, состоящий из следующих основных шагов.

1. На первоначальном этапе на изображении выбираются точки роста принадлежащие выделяемым областям (например точки с максимальным уровнем яркости).

2. Вокруг выбранных точек начинается рост областей, то есть присоединение соседних с использованием определенного критерия близости (например, пороговая величина).

3. Остановка роста областей по критерию (например, превышение порога отклонения яркости новых точек от заданного уровня яркости центра кристаллизации).

Недостатками данного алгоритма являются необходимость определения центров кристаллизации или задания некоторого правила для их обнаружения; выращивание областей в отдельном процессе без учета ситуации на других участках сегментируемого изображения, что может приводить к ошибкам; необходимость правила окончания выращивания областей.

Описание алгоритма регрессивного волнового выращивания областей

Предлагается алгоритм сегментации АСМ-изображений на основе регрессивного волнового выращивания областей путем присоединения к областям новых элементов с учетом их уровня квантования. Отличие предложенного алгоритма от классического алгоритма выращивания областей заключается в квазипараллельном увеличении размеров выделенных областей, что позволяет повысить точность сегментации изображений с плавными перепадами яркости. Предложенный алгоритм отличается от алгоритма волнового выращивания областей [13] выбором начальных точек роста областей по уровням квантования, начиная с наибольшего, и увеличением областей за счет постепенного присоединения к ним соседних элементов, принадлежащих нижнему смежному уровню квантования, что позволяет повысить точность сегментации АСМ-изображений при сопоставлении высоты точки сканирования со значением соответствующего пикселя.

Исходными данными для алгоритма являются матрица $M_Z = \|m_Z(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ зондирования, в которой значение каждого B -разрядного элемента $m_Z(y, x) \in [0, 2^B - 1]$ определяется высотой соответствующей точки поверхности, и пороги начала Δ_H и окончания Δ_N регистрации среза вертикального профиля поверхности, которые задают условия отделения локальных склонов поверхности от вершин и подложки, где Y, X – размеры матрицы сканирования по вертикали и горизонтали. Алгоритм состоит из следующих шагов.

1) Инициализация матрицы сегментации. Формируется матрица $M_S = \|m_S(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ сегментации, элементы которой определяются с помощью выражения $m_S(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$. Счетчику C_S сегментов присваивается нулевое значение: $C_S \leftarrow 0$.

2) Инициализация счетчика циклов прогрессивной сегментации. Счетчику C_Q циклов прогрессивной сегментации присваивается значение верхнего уровня квантования: $C_Q \leftarrow 2^B - 1$

3) Начало цикла прогрессивной сегментации. Формирование матрицы значимости для C_Q -го уровня квантования. Формируется матрица $M_Q(C_Q) = \|m_Q(C_Q, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ значимости для C_Q -го уровня квантования, элементы которой определяются с помощью выражения

$$\begin{cases} (m_S(C_S, y, x) = 0) \wedge (m_Z(y, x) = C_Q) \Rightarrow (m_Q(C_Q, y, x) \leftarrow 1), \\ (m_S(C_S, y, x) \neq 0) \wedge (m_Z(y, x) \neq C_Q) \Rightarrow (m_Q(C_Q, y, x) \leftarrow 0) \end{cases}$$

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

4) Проверка матрицы значимости C_Q -го уровня квантования на нуль. Вычисляется сумма всех элементов матрицы $M_Q(C_Q)$ значимости для C_Q -го уровня квантования с помощью выражения: $S_Q = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_Q(C_Q, y, x)$.

Если $S_Q = 0$, то осуществляется переход на окончание цикла прогрессивной сегментации (шаг 6).

5) Элементы матрицы $M_Q(C_Q)$, удовлетворяющие условию

$$(m_Q(C_Q, y, x) = 1) \wedge (m_S(y, x) = 0) \quad (1)$$

сегментируются с помощью алгоритма выращивания областей [13]. В результате формируется матрица $M_S(C_Q) = \|m_S(C_Q, C_S, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ новых областей C_Q -го уровня квантования, номера элементов которой $m_S(C_Q, y, x) \in [1, C_S(C_Q)]$ указывают на изолированные совокупности единичных элементов матрицы $M_Q(C_Q)$, удовлетворяющих условию (1), где $C_S(C_Q)$ – число сегментов, выделенных в матрице $M_Q(C_Q)$.

б) Начало цикла волновой сегментации. Формируется матрица $M_T(C_Q, C_S) = \|m_T(C_Q, C_S, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ наращивания существующих областей C_Q -го уровня квантования и C_S -номера изолированной области в матрице сегментации, элементы которой определяются с помощью выражения $m_T(C_Q, C_S, y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$.

7) Волновое наращивание областей. Элементы матрицы $M_T(C_Q, C_S)$ переопределяются с помощью выражения

$$(m_S(y, x) \neq 0) \wedge (m_z(C_{Q-1}, y + j, x + i) = C_{Q-1}) \wedge \\ (m_T(C_Q, C_S, y + j, x + i) = 0) \Rightarrow \\ \Rightarrow (m_T(C_Q, C_S, y + j, x + i) \leftarrow m_S(y, x))$$

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

8) Обновление матрицы сегментации. В матрицу сегментации M_S добавляются новые значимые элементы с помощью выражения

$$m_S(y, x) \leftarrow m_S(y, x) + m_T(C_Q, C_S, y, x)$$

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

9) Проверка условия выхода из цикла волнового наращивания областей. Определяется число S_T значимых элементов матрицы $M_T(C_Q, C_W)$ с помощью выражения

$$S_T = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_T(C_Q, C_W, y, x)$$

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

Если $S_T = 0$ (новых присоединяемых элементов нет) осуществляется выход из цикла волновой сегментации.

10) Окончание цикла прогрессивной сегментации. Значение счетчика C_Q циклов прогрессивной сегментации уменьшается на единицу: $C_Q \leftarrow C_Q - 1$. Затем счетчик C_Q циклов проверяется на отрицательное значение. Если $C_Q \geq 0$, то осуществляется переход в начало цикла прогрессивной сегментации (шаг 3 алгоритма). Если $C_Q < 0$, то осуществляется выход из цикла и завершение алгоритма.

В результате выполнения данного алгоритма формируется матрица M_S сегментации, номера элементов которой $m_S(y, x) \in [1, C_S]$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$ указывают на сегменты, к которым они принадлежат.

Оценка эффективности алгоритмов сегментации АСМ-изображений

Для объективной оценки эффективности использования алгоритмов сегментации для выделения областей на АСМ-изображениях сформирован набор $\{M_T(j)\}_{(j=\overline{1, J})}$ из $J = 8$ тестовых АСМ-матриц $M_T(j) = \|m_T(j, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ размером $Y \times X$ по вертикали и горизонтали, элементы $m_T(j, y, x)$ которых содержат информацию о расстояниях от нижнего сечения подложки до верхних поверхностей эталонных полусфер одинакового размера, расположенных в трехмерном пространстве таким образом, что их основания лежат в параллельных плоскостях, а проекции их центральных точек в горизонтальной плоскости находятся в узлах виртуальной квадратной сетки. На рисунке 1 приведены тестовые АСМ-изображения. Результатом сегментации тестовых АСМ-матриц должна быть бинарная матрица, в которой элементам верхних поверхностей полусфер соответствуют единичные значения, а пространству между полусферами – нулевые значения. Данная бинарная матрица сегментации может быть преобразована в изображение в результате замены каждого ее элемента пикселем с максимальной или минимальной яркостью в зависимости от значения соответствующего элемента – «единица» или «ноль». Рассмотренная бинарная матрица сегментации является

эталонной. С ее помощью для каждого алгоритма выделения областей может быть получено значение нормированной ошибки E_S сегментации с помощью выражения

$$E_S = E_O + E_I,$$

$$\text{где } E_O = \frac{\sum_{i=1}^9 S_O(i)}{S_E} \text{ – нормированная ошибка избыточной сегментации; } E_I = \frac{\sum_{i=1}^9 S_I(i)}{S_E} \text{ –}$$

нормированная ошибка недостаточной сегментации; i – порядковый номер эталонной полусферы; $S_E = \lceil 2\pi R_E \rceil$ – площадь проекции эталонной полусферы в горизонтальной плоскости (в пикселях); R_E – радиус талонной полусферы (в пикселях); $S_O(i)$ – число пикселей сегментированной области, соответствующей i -й эталонной полусфере и попадающих вне ее проекции в горизонтальной плоскости; $S_I(i)$ – число пикселей сегментированной области, соответствующей i -й эталонной полусфере и отсутствующих под ее проекцией в горизонтальной плоскости; $\lceil \rceil$ – операция округления до ближайшего целого с избытком.

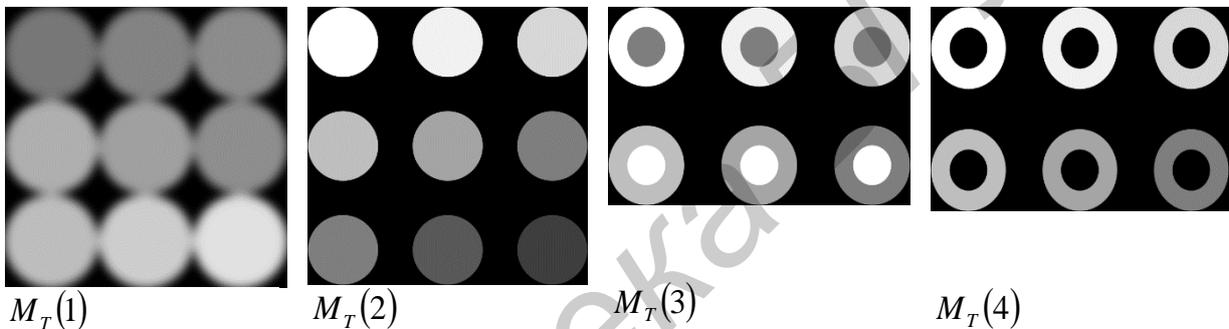


Рис.1. Тестовые изображения

На рисунках 2-5 приведены результаты визуализации матриц сегментации, полученных с помощью различных методов на основе 4-х тестовых матриц в результате их сегментации и бинаризации. Для визуализации матриц сегментации осуществлена замена каждого их элемента пикселем с яркостью, соответствующей значению данного элемента.

В таблице 1 приведены значения нормированных ошибок E_S , E_O и E_I для исследуемых алгоритмов сегментации и 4-х тестовых матриц.

Таблица 1 – Нормированные ошибки сегментации

Алгоритмы сегментации на основе	Значения нормированных ошибок сегментации для тестовых матриц											
	$M_T(1)$			$M_T(2)$			$M_T(3)$			$M_T(4)$		
	E_O	E_I	E_S	E_O	E_I	E_S	E_O	E_I	E_S	E_O	E_I	E_S
регрессивного волнового выращивания областей	0.27	0.02	0.29	0	0	0	1,1	0	1,1	0.68	0	0.68
маркерного водораздела	4.01	0.2	4.03	3.19	0.23	3.43	1.9	0.75	2.65	0.56	0.19	0.75
выращивания областей	5.06	0	5.06	0.064	0	0.064	0.012	0.048	0.06	0.02	0.054	0.07

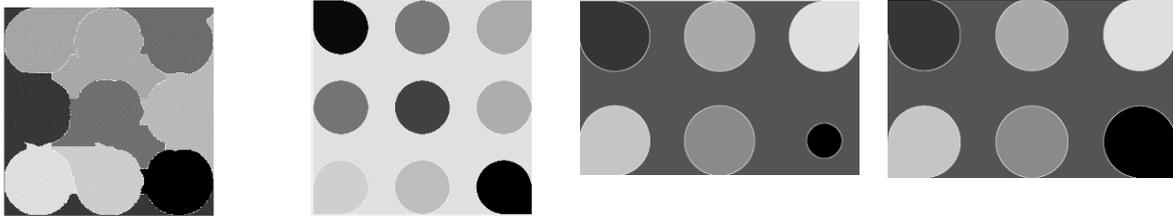


Рис. 2. Результат применения алгоритма маркерного водораздела

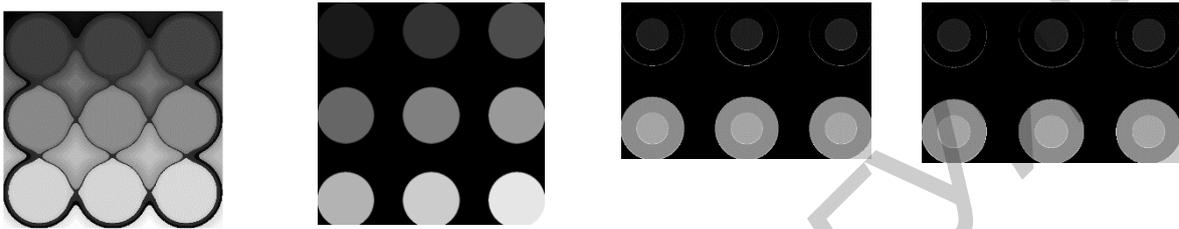


Рис. 3. Результат применения алгоритма выращивания областей

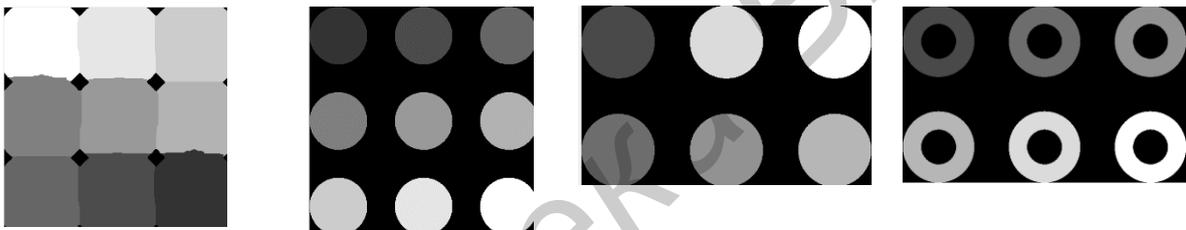


Рис. 4 Результаты разработанного метода

Из таблицы 1 и рисунков 2–4 следует, что при сегментации изображений подверженных размытию, предложенный метод показывает результаты в 13 и 8 раза лучше, чем методы водораздела и выращивания областей соответственно. На изображениях с четким разделением границ, ошибка сегментации предложенного метода стремится к нулю. Для изображений со сложной морфологией ошибка связана с захватом менее ярких областей, лежащих внутри или снаружи более ярких областей. Однако внешние границы таких сегментов, предложенный метод сегментирует без ошибок.

Заключение

Для сегментации АСМ-изображений предложен алгоритм на основе регрессивного волнового выращивания областей. Сущность алгоритма заключается в квазипараллельном, послойном выращивании областей вокруг максимальных для каждого слоя точек роста, что обеспечивает автоматическое разделение областей по высоте, которые известные методы сегментируют с ошибками.

Список литературы

1. Lalitha M., Kiruthiga M., Loganathan C. // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. No. 2. P. 348–358.
2. Gauch J. M. // IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. 1999. Vol. 8. No. 1. P. 69–79.
3. Khiyal M. S. H., Khan A., Bibi A. // Informing Science and Information Technology. 2009. Vol. 6. P. 876–886.

4. Arindrajit Seal, Arunava Das, Prasad Sen. // International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT). 2015. Vol. 6. No. 3. P. 2295–2297.
5. Chang, J.H. , Fan K.Ch., Chang Y.L. // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20. P. 203–216.
6. Muhsin, Z.F., Rehman A., Altameem A. et. al // The Imaging Science Journal. 2014. Vol. 62. No. 1. P. 56–62.
7. Xiaolin Wu. // IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE. 1993. Vol. 15. No. 8. P. 808–815.
8. Dass R., Priyanka, Devi S. // International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT). 2012. Vol. 3. Issue 1. P. 66–70.
9. Singh, K.K., Singh A. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7. No. 5. P. 414–417.
10. Shih F. Y., Cheng S. // Image and Vision Computing. 2005. No. 23. P. 877–886.
11. Sharma Ritu, Sharma Rajesh // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2014. Vol. 2. Issue 9. P. 5686-5692.
12. N. Mohd Saad, S.A.R. Abu-Bakar, Sobri Muda, M. Mokji, A.R. Abdullah // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, 14-16 March 2012. P. 674-677.
13. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. // Докл. БГУИР. 2016. №8 (102). С. 82-88. (*Almiahi O.M., Tsviatkou V.Yu. , Kanapelka V.K., // Dokl. BGUIR. 2016. №8 (102) S.82-88.*)
14. Панченко Д.С., Путятин Е.П. // Радиоэлектроника и информатика 1999. С. 109-

References

1. Lalitha M., Kiruthiga M., Loganathan C. // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. No. 2. P. 348–358.
2. Gauch J. M. // IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. 1999. Vol. 8. No. 1. P. 69–79.
3. Khiyal M. S. H., Khan A., Bibi A. // Informing Science and Information Technology. 2009. Vol. 6. P. 876–886.
4. Arindrajit Seal, Arunava Das, Prasad Sen. // International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT). 2015. Vol. 6. No. 3. P. 2295–2297.
5. Chang, J.H. , Fan K.Ch., Chang Y.L. // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20. P. 203–216.
6. Muhsin, Z.F., Rehman A., Altameem A. et. al // The Imaging Science Journal. 2014. Vol. 62. No. 1. P. 56–62.
7. Xiaolin Wu. // IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE. 1993. Vol. 15. No. 8. P. 808–815.
8. Dass R., Priyanka, Devi S. // International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT). 2012. Vol. 3. Issue 1. P. 66–70.
9. Singh, K.K., Singh A. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7. No. 5. P. 414–417.
10. Shih F. Y., Cheng S. // Image and Vision Computing. 2005. No. 23. P. 877–886.
11. Sharma Ritu, Sharma Rajesh // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2014. Vol. 2. Issue 9. P. 5686-5692.
12. N. Mohd Saad, S.A.R. Abu-Bakar, Sobri Muda, M. Mokji, A.R. Abdullah // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, 14-16 March 2012. P. 674-677.
13. *Almiahi O.M., Tsviatkou V.Yu. , Kanapelka V.K., // Dokl. BGUIR. 2016. №8 (102) S.82-88.*
14. Panchenko D.S., Putyatyn E.P., // *Radioelektronika i informatika* 1999. S. 109-114.

Сведения об авторах

Рабцевич В.В., аспирант 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.

Ловецкий М.Ю., студент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Rabtsevitch V.V., postgraduate student of department of infocommunication technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsviatkou V.Yu., D.Sci., associate professor, chief of department of infocommunication technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Lovetskiy M.Yu., student of department of infocommunication technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники тел. +375-17-293-84-08; e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovka st., 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics tel. +375-17-293-84-08; e-mail: vtsvet@bsuir.by Tsviatkou Victor Yur'evich

Библиотека БГУИР