

УДК 004.932

А. Т. НГУЕН, В. Ю. ЦВЕТКОВ

## БЛОЧНО-СЕГМЕНТНЫЙ ПОИСК ЛОКАЛЬНЫХ ЭКСТРЕМУМОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЯРКОСТЕЙ СМЕЖНЫХ ПИКСЕЛЕЙ И ОБЛАСТЕЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*Целью работы является разработка алгоритма выделения локальных экстремумов изображений с низкой вычислительной сложностью и высокой точностью. Известные алгоритмы блочного поиска локальных экстремумов имеют низкую вычислительную сложность, но выделяют без ошибок только строгие максимумы и минимумы. Морфологический поиск дает точные результаты, выделяя экстремальные области, образованные нестрогими экстремумами, однако, он имеет высокую вычислительную сложность. В работе предложен алгоритм блочно-сегментного поиска локальных экстремумов изображений на основе анализа яркостей смежных пикселей и областей. Сущность алгоритма состоит в поиске однопиксельных локальных экстремумов и однородных по яркости областей, сравнении значений их граничных пикселей со значениями соответствующих пикселей смежных областей: область является локальным максимумом (минимумом) если значения всех ее граничных пикселей больше (меньше) или равны значениям всех смежных пикселей. Разработанный алгоритм, как и алгоритм морфологического поиска, позволяет обнаруживать все однопиксельные локальные экстремумы, а также экстремальные области, чем превосходит алгоритмы блочного поиска. При этом разработанный алгоритм по сравнению с алгоритмом морфологического поиска требует значительно меньше времени и оперативной памяти.*

**Ключевые слова:** *локальные экстремумы изображений, строгие и нестрогие экстремумы, блочно-сегментный поиск локальных экстремумов, сегментация изображений.*

### Введение

Для обработки изображений часто требуется определение начальных элементов, в качестве которых могут выступать локальные экстремумы. Для поиска локальных экстремумов используются алгоритмы блочного [1–7] и морфологического [8] поиска.

В блочных алгоритмах поиск экстремумов осуществляется в пределах перекрывающихся блоков, размером, как правило,  $3 \times 3$  пикселя. Такие алгоритмы имеют низкую вычислительную сложность, однако для них характерны: а) избыточная обработка (при выделении локальных минимумов повторно обрабатываются пиксели, являющиеся локальными максимумами, и наоборот); б) пропуск нестрогих экстремумов (для однородной области, состоящей из нескольких смежных пикселей с одинаковыми значениями, ни один из пикселей этой области не детектируется в качестве локального экстремума – рис. 1); в) ошибки поиска локальных экстремальных

областей (если на изображении имеется, например, однородная область, значения части пикселей которой больше или равны значениям смежных пикселей, а в окрестностях других пикселей области существуют пиксели с большими значениями, то первая часть пикселей этой области ошибочно детектируется как локальные максимумы, а вторая часть – как немаксимумы).

Алгоритм морфологического поиска использует для выделения локальных максимумов и минимумов на изображении соответственно операции дилатации и эрозии. Он дает точные результаты по сравнению с блочными алгоритмами, выделяя, как строгие экстремумы, так и экстремальные области (многопиксельные экстремумы), образованные нестрогими экстремумами. Однако, морфологический алгоритм имеет высокую вычислительную сложность, что связано с отдельной обработкой максимумов и минимумов, а также итера-

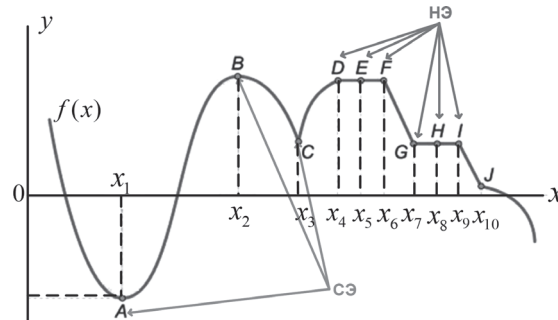


Рисунок 1. Виды локальных экстремумов в одномерном представлении: СЭ – строгий экстремум; НЭ – нестрогий экстремум

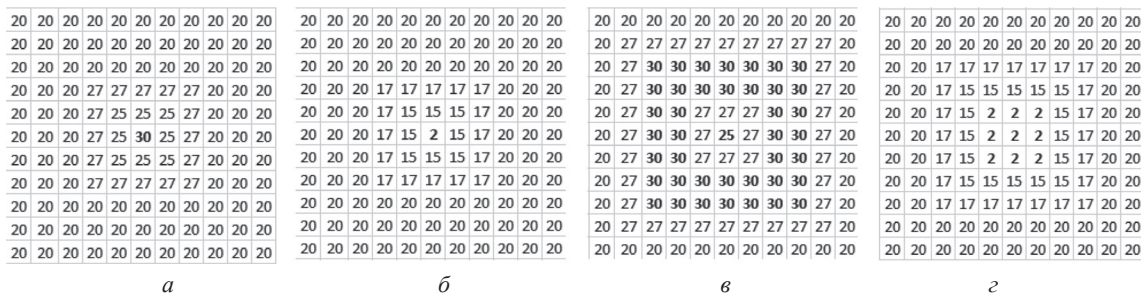


Рисунок 2. Матрицы значений пикселей полутоновых изображений, содержащие локальные экстремумы: а – строгий максимум; б – строгий минимум; в – максимальная область; г – минимальная область

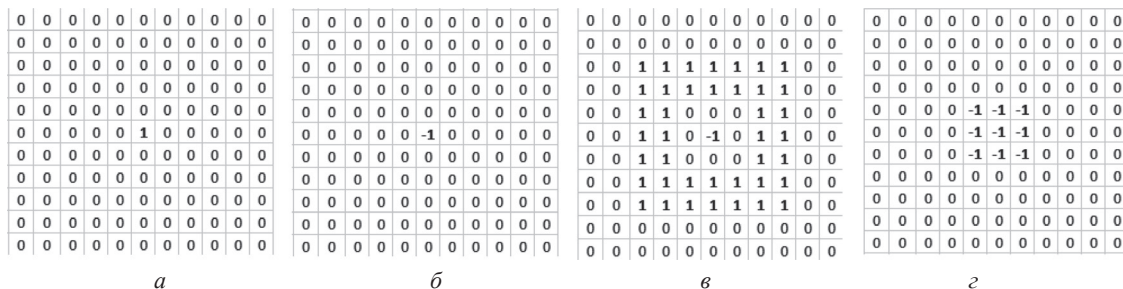


Рисунок 3. Экстремальные матрицы, содержащие: а – строгий максимум; б – строгий минимум; в – максимальную область; г – минимальную область

тивной обработкой окрестностей всех пикселей изображения.

Целью работы является разработка алгоритма выделения локальных экстремумов изображений с низкой вычислительной сложностью и высокой точностью.

**Постановка задачи**

На рис. 2 приведены матрицы значений пикселей полутоновых изображений, содержащие строгие и нестрогие экстремумы.

В результате выделения локальных экстремумов на полутоновом изображении  $I = \|i(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  размером  $Y \times X$  должна быть сформирована матрица  $E = \|e(y, x)\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$  локальных экстремумов, положительные и отрицательные значения элементов которой указывают на положение,

номера и типы соответствующих экстремумов, а нулевые значения элементов – на отсутствие локальных экстремумов в соответствующих пикселях изображения. Такие экстремальные матрицы для приведенных на рис. 2 матриц пикселей полутоновых изображений представлены на рис. 3.

**Предлагаемые математическая модель и алгоритм**

Для выделения локальных экстремумов с низкой вычислительной сложностью и высокой точностью предлагается математическая модель блочно-сегментного поиска на основе анализа яркостей смежных пикселей и областей, описываемая выражениями:

$$\forall y \forall x \exists n_s (i(y, x) \in R(n_s)), \quad (1)$$

$$e(y, x) = \begin{cases} n_s & \text{если } (i(y, x) \in R(n_s)) \wedge \left( (\forall \Delta y_1 \forall \Delta x_1 (i(y, x) > i(y + \Delta y_1, x + \Delta x_1))) \vee \right. \\ & \left. \vee (\forall y' \forall x' \forall \Delta y_2 \forall \Delta x_2 ((i(y', x') \in R(n_s)) \Rightarrow (i(y', x') \geq i(y' + \Delta y_2, x' + \Delta x_2)))) \right), \\ 0 & \text{если } (i(y, x) \in R(n_s)) \wedge \\ & \wedge \exists y' \exists x' \exists \Delta y_1 \exists \Delta x_1 ((i(y', x') \in R(n_s)) \Rightarrow (i(y', x') < i(y' + \Delta y_1, x' + \Delta x_1))) \wedge \\ & \wedge \exists y'' \exists x'' \exists \Delta y_2 \exists \Delta x_2 ((i(y'', x'') \in R(n_s)) \Rightarrow (i(y'', x'') > i(y'' + \Delta y_2, x'' + \Delta x_2))), \\ -n_s & \text{если } (i(y, x) \in R(n_s)) \wedge \left( (\forall \Delta y_1 \forall \Delta x_1 (i(y, x) < i(y + \Delta y_1, x + \Delta x_1))) \vee \right. \\ & \left. \vee (\forall y' \forall x' \forall \Delta y_2 \forall \Delta x_2 ((i(y', x') \in R(n_s)) \Rightarrow (i(y', x') \leq i(y' + \Delta y_2, x' + \Delta x_2)))) \right) \end{cases} \quad (2)$$

при  $y = \overline{0, Y-1}$ ,  $x = \overline{0, X-1}$ ,  $(\Delta y_1 \in \{-1, 0, 1\}) \wedge$   
 $\wedge (\Delta x_1 \in \{-1, 0, 1\}) \wedge ((\Delta y_1 \neq 0) \vee (\Delta x_1 \neq 0))$ ,  $(\Delta y_2 \in$   
 $\in \{-1, 0, 1\}) \wedge (\Delta x_2 \in \{-1, 0, 1\}) \wedge ((\Delta y_2 \neq 0) \vee (\Delta x_2 \neq 0))$ ,  
 где  $n_s \in [0, N_s]$  – номер однородной по яркости области  $R(n_s)$ ;  $N_s$  – число однородных областей экстремумов.

Значения элементов  $e(y, x)$  матрицы  $E$  локальных экстремумов в выражении (2) указывают на принадлежность соответствующих пикселей изображения  $n_s$ -й максимальной ( $e(y, x) = n_s$ ), минимальной ( $e(y, x) = -n_s$ ) или неэкстремальной ( $e(y, x) = 0$ ) области  $R(n_s)$ . Из выражений (1) и (2) следуют отличия блочно-сегментного поиска, обеспечивающие высокую точность в сравнении с блочным поиском и меньшую вычислительную сложность в сравнении с морфологическим поиском: 1) совмещенный поиск максимумов и минимумов за счет присвоения элементам  $e(y, x)$ , как положительных, так и отрицательных значений; 2) учет нестрогих экстремумов за счет оценки окрестности пикселя  $i(y, x)$  с использованием нестрогих неравенств; 3) исключение ошибок поиска локальных экстремальных областей за счет оценки окрестностей всех пикселей каждой однородной области  $R(n_s)$ ; 4) отсутствие необходимости сегментации матрицы  $E$  локальных экстремумов за счет назначения номеров  $n_s$  однопиксельным экстремумам и экстремальным областям; 5) однократная обработка окрестностей всех пикселей за счет выращивания однородных областей  $R(n_s)$ .

Исходя из рассмотренной модели предлагается алгоритм BSA (Block Segment Analysis) блочно-сегментного поиска локальных экстре-

мумов изображений на основе анализа яркостей смежных пикселей и областей. Сущность алгоритма состоит в поиске однопиксельных локальных экстремумов и однородных по яркости экстремальных областей (из двух и более одинаковых пикселей): область является локальным максимумом (минимумом) если значения всех ее граничных пикселей больше (меньше) или равны значениям всех смежных пикселей.

Блок-схема алгоритма BSA приведена на рис. 4. Как показано на рис. 4, алгоритм начинается с блока инициализации (блок 1). Затем, в цикле осуществляется поиск очередного не сегментированного и не заблокированного пикселя (блок 2). Если найден не заблокированный вероятный максимум (блок 3), то осуществляется его блочная проверка на строгий и нестрогий максимум (блоки 4–8). Если текущий пиксель не является строгим или нестрогим максимумом (блок 4), то осуществляется блокировка соответствующего смежного вероятного минимума (если текущий пиксель меньше смежного, то смежный пиксель не может быть минимумом) (блок 8) и осуществляется переход к обработке не заблокированного вероятного минимума (блок 13). Если текущий пиксель является строгим или нестрогим максимумом (блок 4), то блокируются все смежные вероятные максимумы (блок 5) и осуществляется проверка текущего пикселя на строгий максимум (блок 6).

Если условие выполняется (блок 6), то осуществляется регистрация текущего пикселя в качестве однопиксельного локального максимума (блок 7) и переход к обработке следующего пикселя (блок 14). Если условие не выполняется, то осуществляется сегментация ве-

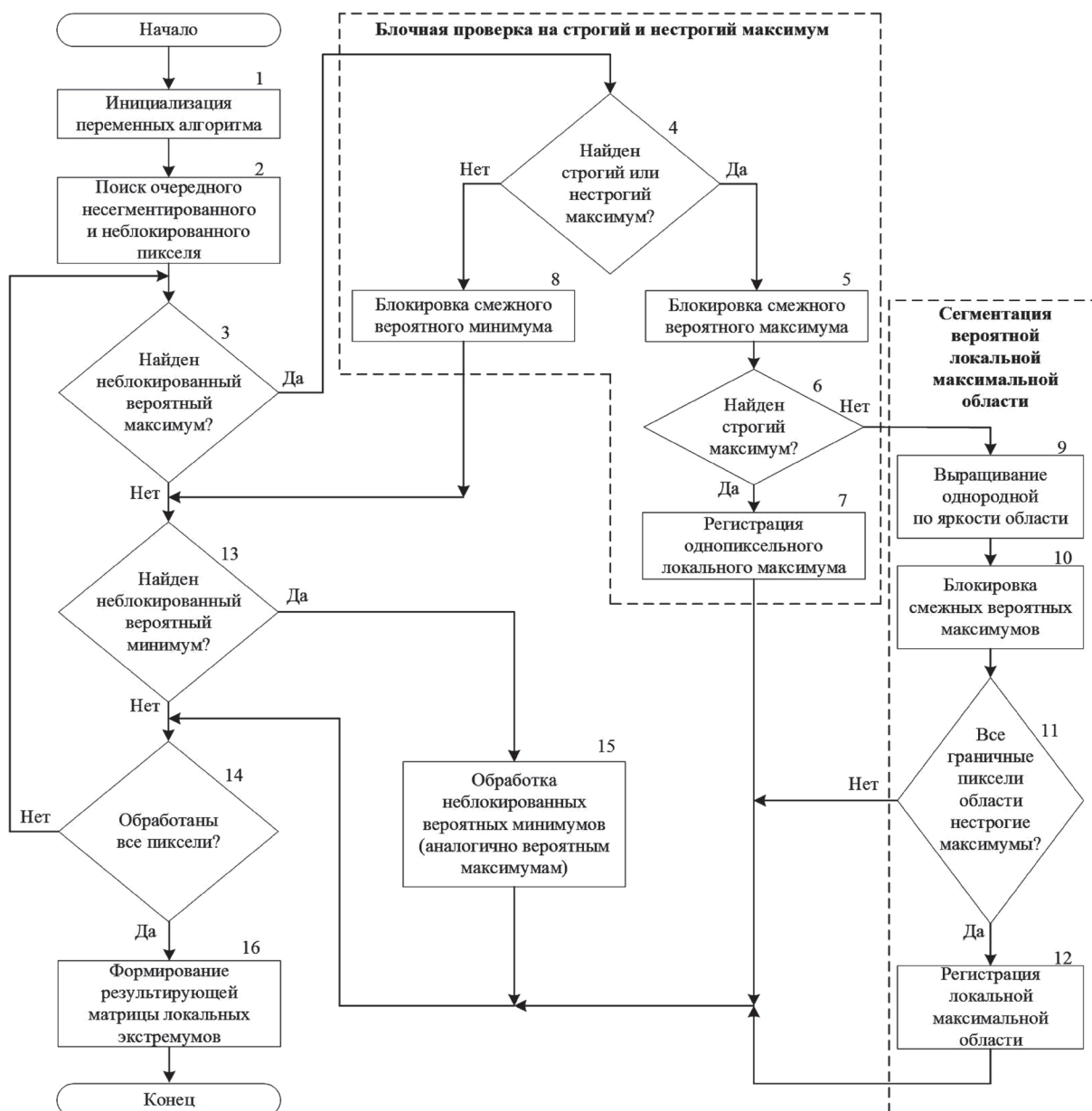


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма блочно-сегментного поиска локальных экстремумов

роятной локальной максимальной области (блоки 9–12). Для этого выращивается однородная по яркости область в результате постепенного присоединения к текущему пикселю соседних пикселей с равными ему значениями (блок 9). Все пиксели, смежные с граничными пикселями сформированной области, являющимися нестрогими максимумами, блокируются как вероятные максимумы (блок 10). Если хотя бы один граничный пиксель области не является нестрогим максимумом (блок 11), то вся область не является локальным максимумом. При этом осуществляется переход к обработке следующего пикселя (блок 14). Неблокированные вероятные минимумы обрабатываются аналогично (блок 15). Если не обработаны все пиксели (блок 14), то осуществляется переход к поиску очередного несегментированного и неблокированного пикселя (блок 2). Если обработаны все пиксели (блок 14), то формируется результирующая матрица локальных экстремумов (блок 16).

Если все граничные пиксели области являются нестрогими максимумами (блок 11), то выделенная однородная область регистрируется как локальный максимум (блок 12) и осуществляется переход к обработке следующего пикселя (блок 14). Неблокированные вероятные минимумы обрабатываются аналогично (блок 15). Если не обработаны все пиксели (блок 14), то осуществляется переход к поиску очередного несегментированного и неблокированного пикселя (блок 2). Если обработаны все пиксели (блок 14), то формируется результирующая матрица локальных экстремумов (блок 16).

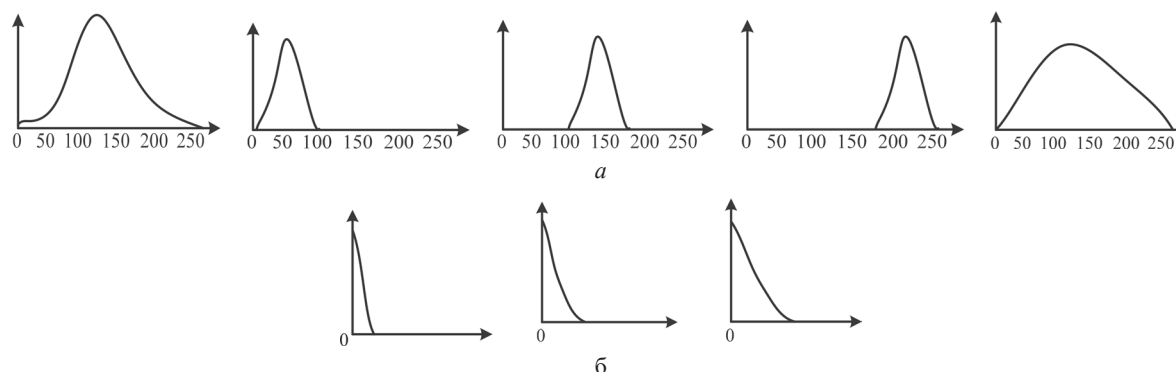


Рисунок 5. Гистограммы тестовых изображений:  $a$  – яркости;  $b$  – производной по яркости

### Оценка результатов выделения локальных экстремумов

Произведено сравнение предложенного алгоритма BSA с известными алгоритмами блочного (Scanline3x3) [6] и морфологического [8] поиска локальных экстремумов по числу экстремумов, скорости обработки и затратам оперативной памяти. Результаты получены с усреднением по изображениям, разделяемым на 15 типов в зависимости от форм гистограмм их яркости и производных по яркости (рис. 5).

Экспериментально установлено, что алгоритмы BSA и морфологический выделяют в 1,4 раза больше локальных экстремумов по сравнению с алгоритмом Scanline3x3 за счет учета нестрогих экстремумов. Выделение экстремальных областей дополнительно к строгим экстремумам приводит к росту вычислительной сложности алгоритма BSA в сравнении с алгоритмом Scanline3x3. При использовании вычислительных платформ Intel Core i3 3.1 ГГц, 6 ГБ ОЗУ, Windows 7 в среде Matlab (платформа IWM), Intel Core i3 3.1 ГГц, 6 ГБ ОЗУ, Windows 7, реализация на C++ (платформа IWC), Raspberry Pi, ARM-A53, Linux, реализация на C++ (платформа RLC) алгоритм BSA по сравнению с алгоритмом Scanline3x3 требует соответственно в 2,2,

1,7, 2,0 раза больше времени и в 5,8 раза больше оперативной памяти. При этом реализации алгоритма BSA на вычислительных платформах IWM и IWC по сравнению с реализациями морфологического алгоритма требуют соответственно в 4,1 и 3,1 раза меньше времени и в 2,1 раза меньше оперативной памяти.

### Заключение

Разработаны математическая модель и алгоритм блочно-сегментного поиска локальных экстремумов изображений на основе анализа яркостей смежных пикселей и областей. Разработанный алгоритм, как и алгоритм морфологического поиска, позволяет обнаруживать все однопиксельные локальные экстремумы, а также экстремальные области, состоящие из пикселей с одинаковыми значениями, большими или меньшими по сравнению со значениями пикселей смежных областей, чем превосходит алгоритмы блочного поиска локальных экстремумов. При этом разработанный алгоритм по сравнению с алгоритмом морфологического поиска требует значительно меньше времени (в 3–4 раза в зависимости от вычислительной платформы с усреднением по типам изображений) и оперативной памяти (в 2 раза).

### REFERENCES

1. **Van Herk, M.** A fast algorithm for local minimum and maximum filters on rectangular and octagonal kernels / M. Van Herk // Pattern Recognition Letters. – 1992. – Vol. 13. – P. 517–521.
2. **Gil, J.** Computing 2-D min, median, and max / J. Gil, M. Werman // IEEE Trans. on PAMI. – 1993. – Vol. 15. – P. 504–507.
3. **Coltuc, D.** Fast computation of rank order statistics / D. Coltuc, P. Bolon // Proc. Of EUSIPCO. – 2000. – P. 2425–2428.
4. **Neubeck, A.** Efficient non-maximum suppression / A. Neubeck, L. Van Gool // Proc. of ICPR. – 2006. – Vol. 3. – P. 850–855.
5. **Forstner, W.** A fast operator for detection and precise locations of distinct points, corners, and centres of circular features / W. Forstner, E. Gulch // Proc. of Intercommission Conf. on Fast Processing of Photogrammetric Data. – 1987. – P. 281–305.

6. **Tuan Q. Pham.** Non-maximum Suppression Using fewer than 2 Comparisons per Pixel / Tuan Q. Pham // Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems(ACIVS). – 2010. – Vol. 12. – P. 438–451.

7. **Bastys, A.** Iris Matching by Local Extremum Points of Multiscale Taylor Expansion / A. Bastys, J. Kranauskas, R. Masiulis // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ICB 2009, LNCS 5558. – P. 1070–1079.

8. **Soille, P.** Morphological Image Analysis: Principles and Applications / P. Soille. Springer, 2002. – 391 p

Поступила  
29.09.2019

После доработки  
01.11.2019

Принята к печати  
01.12.2019

NGUYEN A. T., TSVIATKOU V. YU.

## BLOCK-SEGMENT SEARCH OF LOCAL EXTREMA OF IMAGES BASED ON ANALYSIS OF BRIGHTNESSES OF RELATED PIXELS AND AREAS

*The aim of the work is to develop an algorithm for extracting local extremes of images with low computational complexity and high accuracy. The known algorithms for block search for local extrema have low computational complexity, but only strict maxima and minima are distinguished without errors. The morphological search gives accurate results, highlighting the extreme areas formed by non-severe extremes, however, it has high computational complexity. The paper proposes a block-segment search algorithm for local extremums of images based on an analysis of the brightness of adjacent pixels and regions. The essence of the algorithm is to search for single-pixel local extremes and regions of uniform brightness, comparing the values of their boundary pixels with the values of the corresponding pixels of adjacent regions: the region is a local maximum (minimum) if the values of all its boundary pixels are larger (smaller) or equal to the values of all adjacent pixels. The developed algorithm, as well as the morphological search algorithm, allows detecting all single-pixel local extremes, as well as extreme areas, which exceeds the block search algorithms. At the same time, the developed algorithm in comparison with the morphological search algorithm requires much less time and RAM.*

**Keywords:** local extremums of images, strict and non-strict extremes, block-segment search for local extremes, image segmentation.

Работа выполнена в рамках НИР «Разработка алгоритмов и программных средств обнаружения и сопровождения наземных объектов, определения их местоположения по изображениям земной поверхности» (№ госрегистрации 20182047).



**Нгуен Ань Туан** – аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

E-mail: [nguyenanhtuanrti@gmail.com](mailto:nguyenanhtuanrti@gmail.com).

**Nguyen Anh Tuan** – PG student of department of infocommunication technologies of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.



**Цветков Виктор Юрьевич** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

E-mail: [vtsvet@bsuir.by](mailto:vtsvet@bsuir.by).

**V. Yu. Tsviatkou.** doctor of Engineering, associate professor, head of department of infocommunications of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.