

УДК 681.3

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОЛУТОНОВЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

канд. техн. наук Р.П. БОГУШ, канд. техн. наук С.В. МАЛЬЦЕВ, А.А. АНИСЬКОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Разработан метод поиска объектов на изображении на основе прямого вейвлет-преобразования. Новизна заключается в том, что в разработанном методе используется многоуровневая обработка объекта и изображения в сочетании с анализом моментов строк и столбцов матриц вейвлет-коэффициентов. Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке временных затрат при поиске полутоновых объектов на изображении.

Введение

Обнаружение объектов на изображении является составной частью многих прикладных задач [1 - 3]. Для этого широко применяются алгоритмы сопоставления с эталоном [3 - 6]. Эталон сравнивается со всеми объектами, находящимися на изображении, путем последовательного перемещения по изображению, как правило, слева направо, сверху вниз [3, 4]. В качестве оценочной величины используется взаимная корреляция между входным и эталонным изображениями [4 - 6]. Корреляционная обработка использует растровое представление изображений. Растровое изображение, в общем случае, это двумерная матрица, состоящая из большого числа пространственно упорядоченных дискретных элементов, каждый из которых может иметь при одинаковых размерах отличное от других элементов значение оптических характеристик (цвет, плотность и др.). Растровое представление изображения является очень привлекательным для обработки, поскольку обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с векторным представлением [7]: отсутствие потери информации о распознаваемых объектах; простота вычисления ряда параметров; отсутствие необходимости в очень трудоемких растровых преобразованиях. Основным недостатком корреляционных методов обработки состоит в том, что при обработке требуются значительные вычислительные, а следовательно и временные затраты для решения практических задач. Особенно это становится заметным при обработке изображений из-за многомерности представления. Использование быстрых двумерных ортогональных преобразований позволяет значительно уменьшить объем вычислений, и следовательно сократить временные затраты при поиске объектов [1, 8]. Традиционно для этого используются разновидности быстрого преобразования Фурье. Однако этим методам присущи два основных недостатка [4]; первый - двумерная нормированная корреляционная функция зачастую имеет довольно размытый максимум, что затрудняет точное определение координат объекта на изображении; второй - корреляционный поиск не позволяет решать задачу обнаружения объектов при различиях, связанных с поворотом объекта или с изменением масштаба объекта на изображении относительно эталона. Их преодоление приводит к значительным вычислительным затратам даже для средних размеров объектов.

В данной работе мы предлагаем эффективный метод поиска объектов на изображении с помощью прямого вейвлет-преобразования, который в значительной мере позволяет преодолеть указанные недостатки. При этом осуществляется многоуровневое разложение изображения и объекта, а решение о наличии объекта принимается в случае обнаружения его на всех уровнях вейвлет-разложения путем анализа амплитудных моментов строк и столбцов матриц вейвлет-коэффициентов объекта и изображения.

1. Обработка изображений с использованием вейвлет-преобразования

В общем случае вейвлет-преобразование изображения $f(x, y)$ определяется как корреляция между изображением и семейством вейвлетов $\{\varphi_s(x, y)\}$ [9, 10]:

$$W_f(s, t_x, t_y) = \langle f(x, y) * \varphi_s(x, y) \rangle,$$

где вейвлеты $\varphi_s(x, y)$ являются масштабированными и сдвинутыми копиями материнского вейвлета $\varphi(x, y)$:

$$\varphi_{s,t}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \varphi\left(\frac{x-t_x}{s}, \frac{y-t_y}{s}\right),$$

где s – параметр масштаба, а (t_x, t_y) – параметр сдвига.

Для вейвлет-преобразования цифровых изображений применяют пирамиду Маллата [8] – для каждой строки цифрового изображения $f(i, j)$ выполняются операция фильтрации с помощью одномерных низкочастотного фильтра L (с импульсной характеристикой l_k) и высокочастотного фильтра H (с импульсной характеристикой h_k) и операция децимации в два раза. В результате формируются матрица низкочастотных коэффициентов $f^L(i, j)$ и матрица высокочастотных коэффициентов $f^H(i, j)$. Затем для каждого столбца полученных матриц выполняются операции фильтрации и децимации, в итоге формируются четыре матрицы (изображения) $f^{LL}(i, j)$, $f^{LH}(i, j)$, $f^{HL}(i, j)$ и $f^{HH}(i, j)$. Изображение $f^{LL}(i, j)$ представляет собой аппроксимацию изображения $f(i, j)$, а изображения $f^{LH}(i, j)$, $f^{HL}(i, j)$ и $f^{HH}(i, j)$ содержат детализирующую информацию.

Для изображения $f(i, j)$ размером $N_1 \times N_2$ один шаг вейвлет-преобразования выполняется на основе выражений [10]:

$$f^{LL(g+1)}(i, j) = \sum_{k_1=0}^{L-1} \left(\sum_{k_2=0}^{L-1} f^{LL(g)}(2i+k_1, 2j+k_2) \cdot l_{k_2} \right) \cdot l_{k_1};$$

$$f^{HL(g+1)}(i, j) = \sum_{k_1=0}^{L-1} \left(\sum_{k_2=0}^{L-1} f^{LL(g)}(2i+k_1, 2j+k_2) \cdot h_{k_2} \right) \cdot l_{k_1};$$

$$f^{LH(g+1)}(i, j) = \sum_{k_1=0}^{L-1} \left(\sum_{k_2=0}^{L-1} f^{LL(g)}(2i+k_1, 2j+k_2) \cdot l_{k_2} \right) \cdot h_{k_1};$$

$$f^{HH(g+1)}(i, j) = \sum_{k_1=0}^{L-1} \left(\sum_{k_2=0}^{L-1} f^{LL(g)}(2i+k_1, 2j+k_2) \cdot h_{k_2} \right) \cdot h_{k_1},$$

где $f^{LL(g)}(i, j)$ – аппроксимирующие вейвлет-коэффициенты ($f^{LL(0)}(i, j) = f(i, j)$); g – этап вейвлет-разложения – $g = \overline{0, n}$ ($n = \log_2 \lfloor \min(N_1, N_2) \rfloor$); l_{k_1}, l_{k_2} и h_{k_1}, h_{k_2} – коэффициенты низкочастотного и высокочастотного фильтров длиной L соответственно, причем $(l_{k_1} = l_{k_2})$ и $(h_{k_1} = h_{k_2})$; $i = \overline{0, N_1/2^{g+1} - 1}$, $j = \overline{0, N_1/2^{g+1} - 1}$.

2. Поиск объектов

Используя свойство пространственной локализации вейвлет-преобразования, предлагается организовать поиск объекта путем сравнения вейвлет-коэффициентов объекта и изображения для всех возможных смещений окна в зоне поиска и для всех уровней вейвлет-разложения. Для этого предварительно выполняется n этапов ($n = \log_2 \lfloor \min(M_1, M_2) \rfloor$) быстрого диадного вейвлет-преобразования объекта $P = \{p_{i,j}\}$ размером $M_1 \times M_2$ ($M_1 = 2^q, M_2 = 2^w, q, w \in \mathbb{Z}$). Для обеспечения минимальных вычислительных затрат используем вейвлет Хаара с длиной $L = 2$ и низкочастотными коэффициентами вида:

$$l_{k_1} = l_{k_2} = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \right].$$

Детализирующие коэффициенты наиболее чувствительны к действию шума, поэтому для поиска используем только значения аппроксимирующих коэффициентов:

$$P^{g+1}(i, j) = \sum_{k_1=0}^{L-1} \left(\sum_{k_2=0}^{L-1} P^g(2i+k_1, 2j+k_2) \cdot l_{k_2} \right) \cdot l_{k_1},$$

где $P^0 = P$, $g = \overline{0, n}$, $i = \overline{0, M_1/2^{g+1} - 1}$, $j = \overline{0, M_2/2^{g+1} - 1}$.

Для принятого изображения $A = \{a_{i,j}\}$, $i = \overline{0, N_1 - 1}$, $j = \overline{0, N_2 - 1}$ также выполняется n этапов инвариантного к сдвигу вейвлет-преобразования, которое заключается в вычислении быстрого диадного вейвлет-преобразования для всех сдвигов вейвлетов. При этом размер матрицы коэффициентов на каждом этапе не изменяется. Инвариантное к сдвигу вейвлет-преобразование реализуется согласно выражению:

$$A^{g+1}(i, j) = \sum_{k_1=0}^{L-1} \left(\sum_{k_2=0}^{L-1} A^g(i + 2^g k_1, j + 2^g k_2) \cdot l_{k_2} \right) \cdot l_{k_1},$$

где $A^0 = A$, $g = \overline{0, n}$.

Таким образом, формальная сущность поиска объекта на изображении с использованием вейвлет-преобразования заключается в сравнении аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-разложения объекта и изображения для всех возможных смещений окна в зоне поиска и для всех уровней вейвлет-разложения. При этом осуществляется многоуровневый анализ изображения: только после обнаружения объекта на g уровне осуществляется поиск на $g-1$ уровне разложения. Решение о наличии объекта принимается в случае его обнаружения на всех уровнях вейвлет-разложения. Для сравнения вейвлет-коэффициентов на g -том уровне $\left(\frac{M_1}{2^g} \times \frac{M_2}{2^g} \right)$ вейвлет-коэффициентов анализируемого изображения выбираются с шагом, равным 2^g .

3. Метод обнаружения повернутых объектов

При решении задачи поиска объекта на изображении входной сигнал является стохастическим, т.е. его можно оценить только с помощью статистических законов. Одной из наиболее употребляемых характеристик стохастического сигнала является амплитудная плотность, которая характеризует среднее значение сигнала, определяемое в результате усреднения по времени и соответствующее первому моменту плотности распределения амплитуд. Очевидно, что за равное время усреднения одинаковым моментам плотности распределения амплитуд может соответствовать бесконечное множество форм сигналов, поэтому для растровой матрицы изображения $A = \{a_{i,j}\}$ размером $N \times N$ вводятся моменты строк R^A и столбцов C^A :

$$R_i^A = N^{-1} \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,j}, \quad i = \overline{0, N-1}; \quad C_j^A = N^{-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_{i,j}, \quad j = \overline{0, N-1}.$$

Два изображения будем считать идентичными тогда и только тогда, когда у них совпадают векторы моментов строк и столбцов.

Элементы растровой матрицы изображения $A = \{a_{i,j}\}$ можно представить как точки в декартовой системе координат с координатами (x, y) , причем

$$x = j - (N-1)/2; \quad y = i - (N-1)/2.$$

При повороте системы координат вокруг точки $(0, 0)$ на угол Θ координаты точек изменятся [11]:

$$x' = x \cdot \cos(\Theta) - y \cdot \sin(\Theta), \quad y' = y \cdot \cos(\Theta) + x \cdot \sin(\Theta). \quad (1)$$

Следовательно, элементы матрицы $B = \{b_{i,j}\}$, повернутой на угол Θ относительно матрицы $A = \{a_{i,j}\}$, будут определяться как

$$b(i, j) = b(y + (N-1)/2, x + (N-1)/2) = a(y' + (N-1)/2, x' + (N-1)/2). \quad (2)$$

На основе выражений (1) и (2) представим условия сравнения моментов строк и столбцов эталона и повернутого изображения на угол Θ изображения B :

$$\Theta = 90^\circ - \quad R_i^B = N^{-1} \sum_{j=0}^{N-1} b_{i,j} = N^{-1} \sum_{j=0}^{N-1} a_{j, N-i-1} = C_{N-i-1}^A, \quad C_j^B = N^{-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_{j, N-i-1} = R_j^A;$$

$$\Theta = 180^\circ - \quad R_i^B = R_{N-i-1}^A, \quad C_j^B = C_{N-j-1}^A;$$

$$\Theta = 270^\circ - \quad R_i^B = C_i^A, \quad C_j^B = R_{N-j-1}^A.$$

Рассмотрим случай зеркального отражения изображений. Если изображение $A' = \{a'_{i,j}\}$ является зеркальным отражением изображения $A = \{a_{i,j}\}$ относительно вертикальной оси, то выполняется равенство:

$$a'_{i,j} = a_{i,N-j-1}.$$

В результате получаем

$$R_i^{A'} = N^{-1} \sum_{j=0}^{N-1} a_{i,N-j-1} = R_i^A; \quad C_j^{A'} = N^{-1} \sum_{i=0}^{N-1} a_{i,N-j-1} = C_{N-j-1}^A.$$

Применение выражений (1) и (2) позволяет установить связь между моментами исходного изображения и его повернутой зеркальной копией:

$$\Theta = 90^\circ - R_i^{A'} = C_{N-i-1}^A, \quad C_j^{A'} = R_j^A;$$

$$\Theta = 180^\circ - R_i^{A'} = R_{N-i-1}^A, \quad C_j^{A'} = C_j^A;$$

$$\Theta = 270^\circ - R_i^{A'} = C_{N-i-1}^A, \quad C_j^{A'} = R_{N-j-1}^A.$$

Таким образом, для поиска объектов на изображении перспективным является использование вейвлет-преобразования в сочетании с анализом моментов строк и столбцов вейвлет-коэффициентов. Однако на некоторых этапах разложения векторы вейвлет-коэффициентов представлены всего несколькими отсчетами и использование в этом случае традиционного коэффициента корреляции как функции сравнения двух векторов приводит к частым «ложным» срабатываниям и, как следствие, к снижению быстродействия. Поэтому для сравнения двух векторов вводится функция соответствия:

$$K(U, V) = \prod_{i=0}^{N-1} \frac{\min(u_i + 1, v_i + 1)}{\max(u_i + 1, v_i + 1)},$$

где $U = \{u_i\}$ и $V = \{v_i\}$ – соответствующие сравниваемые векторы.

Решение о соответствии выделенного фрагмента изображения объекту на g -том этапе вейвлет-разложения принимается на основе анализа элементов вектора T^g :

$$T^g = \begin{bmatrix} K(R_+^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(C_+^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(C_-^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(R_+^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(R_-^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(C_-^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(C_+^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(R_-^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(R_+^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(C_-^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(C_-^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(R_+^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(R_-^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(C_+^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \\ K(C_-^{\rho^g}, R_+^{A^g}) \times K(R_-^{\rho^g}, C_+^{A^g}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0 \\ K_{90} \\ K_{180} \\ K_{270} \\ K'_0 \\ K'_{90} \\ K'_{180} \\ K'_{270} \end{bmatrix},$$

где R^{ρ^g} и C^{ρ^g} – моменты строк и столбцов g -того этапа вейвлет-разложения объекта; R^{A^g} и C^{A^g} – моменты строк и столбцов g -того этапа вейвлет-разложения изображения; $R_-^{\rho^g} = R_{N-i-1}^{\rho^g}$, $C_-^{\rho^g} = C_{N-i-1}^{\rho^g}$.

4. Результаты экспериментов

Предложенный метод поиска объектов реализован программно, что позволило провести практические исследования. Эксперименты выполнены для полутоновых изображений. На рис. 1 представлены результаты поиска полутонного объекта размером 64x64 пикселя на изображении размером 238x340 пикселей.

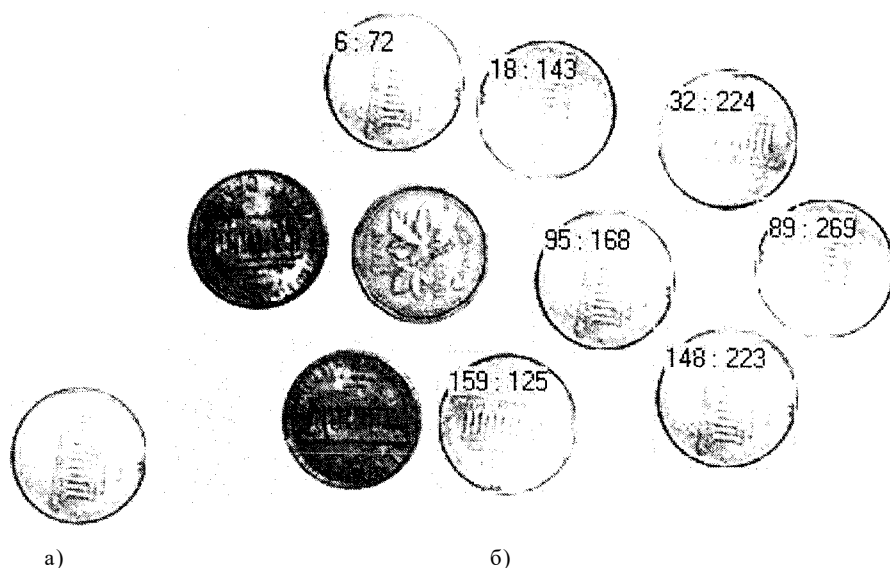


Рис. 1. Результаты эксперимента:
а - объект; б - обработанное изображение

На рис. 2 показана функция соответствия обрабатываемого изображения и объекта для некоторых этапов вейвлет-разложения (g). Очевидно, что с уменьшением g происходит значительное сокращение зоны поиска на каждом уровне вейвлет-разложения за счет исключения из зоны поиска фрагментов изображения, для которых функция соответствия не превысила пороговое значение на предыдущем уровне.

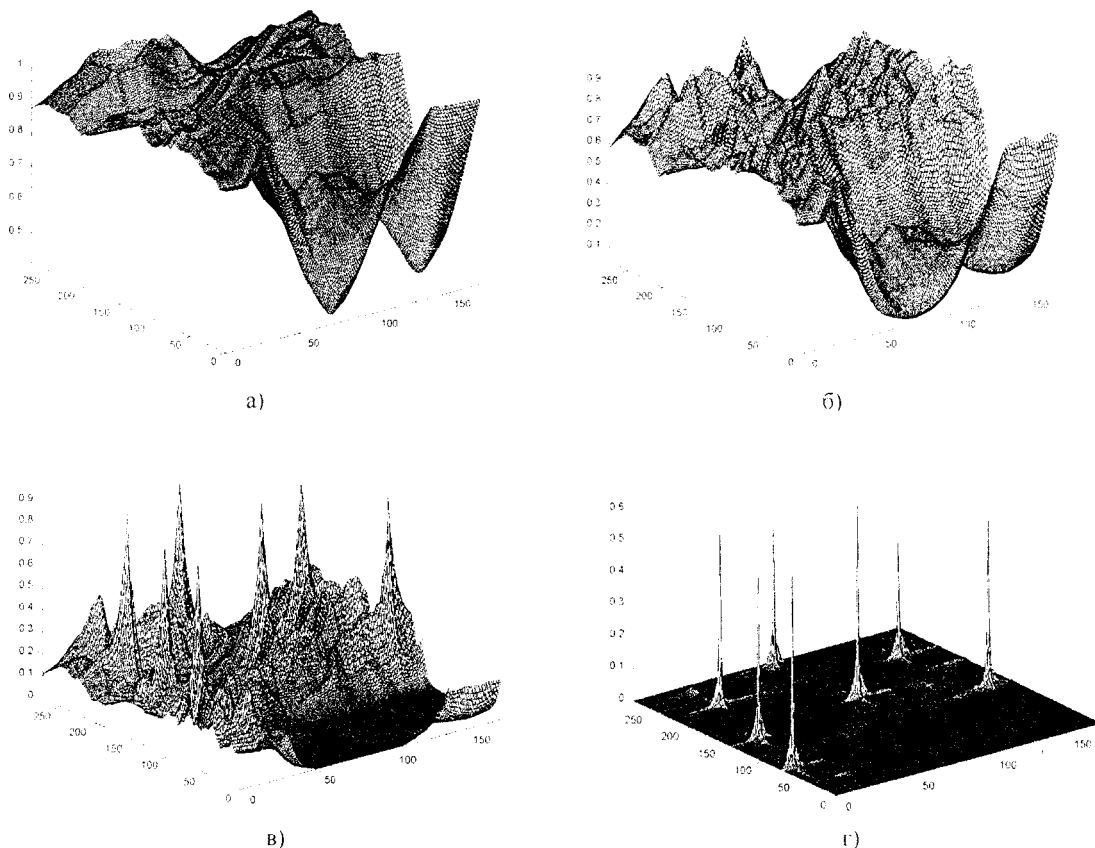


Рис. 2. Функция соответствия на различных уровнях вейвлет-разложения:
а - $g = 6$; б - $g = 4$; в - $g = 2$; г - $g = 0$

В таблице приведены временные затраты при поиске полутонных объектов на изображениях с рациональным уровнем порога обнаружения для каждого уровня вейвлет-разложения с использованием CPU - Celeron - 2000Mhz, RAM - 5 12Mb.

Результаты экспериментов по оценке временных затрат

Размер объекта	Размер изображения			
	256x256	512x512	1024x1024	2000x2000
	время поиска, t_s			
32x32	0,071	0,245	0,857	2,626
64x64	0,059	0,233	0,89	2,656
128x128	0,042	0,189	0,853	2,641

При обнаружении объектов на изображениях с шумом необходимо снижать уровень порога, что приводит к снижению быстродействия из-за более частого ложного обнаружения. Однако обнаружение зашумленных объектов без заметного снижения быстродействия достигается, если для каждого этапа вейвлет-разложения выбирается рациональный порог обнаружения.

При поиске нескольких различных объектов одновременно эффективность предложенного алгоритма значительно повышается, так как коэффициенты вейвлет-разложения изображения и моменты вычисляются лишь один раз, независимо от числа эталонов.

Заключение

Разработан метод поиска объектов на изображении на основе прямого вейвлет-преобразования. Формальная сущность метода заключается в сравнении аппроксимирующих коэффициентов вейвлет-разложения объекта и изображения для всех возможных смещений окна в зоне поиска и для всех уровней вейвлет-разложения. Разработанный алгоритм поиска предполагает многоуровневый анализ изображения и объекта. Решение о наличии объекта на изображении принимается после обнаружения его на всех уровнях вейвлет-разложения. Такая технология позволяет при рациональном выборе порога обнаружения на каждом уровне вейвлет-разложения значительно уменьшить вычислительные затраты и при этом реализовать все достоинства, присущие методу максимального правдоподобия. Для повышения степени инвариантности к повороту объекта разработан алгоритм поиска на основе анализа моментов строк и столбцов матриц вейвлет-коэффициентов объекта и изображения. Разработанный алгоритм инвариантен к зеркальному отображению и повороту объектов на угол, кратный 90° .

Таким образом, отличительными особенностями разработанного метода являются многоуровневый анализ объекта и изображения в сочетании со сравнением моментов строк и столбцов матриц вейвлет-коэффициентов.

Эксперименты выполнены для полутоновых изображений. Полученные результаты исследований подтвердили эффективность разработанных алгоритмов и показали, что метод является перспективным для использования в системах автоматизированного поиска полутоновых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsai D.-M., Chien- Ta L., Chen J.-F. The Evaluation of Normalized Cross Correlations for Defect Detection // Pattern Recognition Letters. - 2003. - V. 24, № 15. - P. 2525 - 2535.
2. Tsai D.M., Cheng H.D. Rotation-invariant Pattern Matching Using Wavelet Decomposition // Pattern Recognition Letters. - 2002. - V. 74, № 1 - 3. - P. 191 - 201.
3. Ключко В.К., Курилкин В.В., Шейнина И.В. Сравнительный анализ алгоритмов распознавания изображений объектов бортовыми РЛС // Радиотехника. - 2003. - № 12. - С. 3 - 8.
4. Крот А.М., Минервина Е.Б. Быстрые алгоритмы и программы цифровой спектральной обработки сигналов и изображений. - Мн.: Вышэйшая школа, 1995.-407 с.
5. An Efficient Correlation Computation Method for Binary Images Based on Matrix Factorisation / R. Bogush, S. Maltsev, S. Ablameyko et al. // Proc. of 6 Int. Conf. on Document Analysis and Recognition. - Seattle, 2001.-P. 312-316.
6. Ablameyko S., Bogush R., Maltsev S. Correlation Search for Binary Objects in Images by Factorizing Raster Matrices // Pattern Recognition and Image Analysis. - 2002. - V. 12, № 3. - P. 267 - 278.
7. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. Обработка изображений: технология, методы применения. - Мн.: Институт технической кибернетики НАФИ Беларуси, 1999. - 300 с.
8. MacLean J., Tsotsos J. Fast Pattern Recognition Using Gradient-Descent Search in an Image Pyramid // Proc. of the 15th ICPR 2000, Barcelona, Spain, September 3 - 7, 2000. - Barcelona, 2000. - V. 2. - P. 2873 - 2877.
9. Chen G., Applications of Wavelet Transforms in Pattern Recognition and De-noising / Concordia University. - Montreal, Canada, 1999. - P. 120.
10. Goswami J.C., Chan A.K. Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms and Application, Texas A&M University, 1999. - 306 p.
11. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1986. - 400 с.