

## АДАПТИВНАЯ МАСКА ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ГРАНИЦ ИЗОБРАЖЕНИЯ

СМЕЛЯКОВ К.С.

Описывается базовая система моделей изображений, включающая топологическую, геометрическую и функциональную модели. На ее основе вводятся критерии сегментации и строится модель адаптивной маски, позволяющие учитывать соответствующие этим моделям особенности изображения. Предлагается метод сегментации граничных элементов контрастных и частично контрастных изображений по адаптивной маске.

### 1. Постановка проблемы

Задачи автоматизированного (автоматического) распознавания изображений исследуемых объектов по их цифровым фотографиям возникают в различных прикладных областях: при проведении нефтегазопромысловых работ [[www.scanex.ru](http://www.scanex.ru)] и поиске месторождений иных ископаемых, при анализе экологического состояния регионов [1, 2], эмбрионов [3], при проведении аварийно-спасательных операций [4] и др. Однако ограниченная применимость существующих моделей и методов сегментации изображений сдерживает развитие систем автоматизации решения ряда актуальных задач обработки видеoinформации, в том числе в режиме реального времени [5], требуя привлечения специалистов для ручной обработки данных.

Один из эффективных подходов к сегментации изображений основан на выделении их границ [6–8]. Наиболее исследованной и широко используемой формой его реализации является метод пространственного дифференцирования, который, в случае использования масок [9,10] для оценки контрастности как максимума модуля градиента, обеспечивает высокую оперативность и простоту реализации. В настоящее время применяются преимущественно стандартные неадаптивные маски [10]. Однако устойчивость и адекватность сегментации границ изображений с неоднородной яркостью, полученной с использованием подобных масок, не прогнозируемы ввиду отсутствия учета интегральных параметров изображения. В связи с этим актуальной проблемой является разработка таких масок, которые позволили бы учитывать топологические и геометрические, а не только яркостные свойства изображения.

Кроме того, применение неадаптивных масок существенно снижает адекватность критериев сегментации, основанных на их использовании, в случае значимых вариаций параметров входных изображений [11], а также искажений яркости изображения шумом. Во втором случае, как правило, достаточно произвести начальную фильтрацию [12–16] с использованием адаптивных окрестностей [17], поскольку применение неадаптивных

фильтров приводит к потере изображений линий и размытию границ областей. Однако если контрастность изображения относительно фона ниже, чем в точках изображения, неадаптивные маски и соответствующие им критерии сегментации не обеспечивают требуемой адекватности дискриминации граничных элементов изображения.

*Цель* исследования состоит в разработке модели и метода решения задачи сегментации границ изображения в двух аспектах: локально — в отношении разработки критериев и методов сегментации граничных узлов на основе адаптивной маски, и глобально — в отношении разработки критериев и методов построения границ. При этом под адаптивностью понимается возможность настройки параметров маски (и критериев сегментации) для устойчивой сегментации на основе учета особенностей обрабатываемого изображения: его топологического типа, метрических и функциональных (яркостных, цветовых [18], контрастных) характеристик, уровня зашумления. Для этого необходимо решить следующие основные задачи.

- 1) Разработать унифицированную, в смысле современных требований к обработке изображений [[www.iitvision.ru/st2002.htm](http://www.iitvision.ru/st2002.htm)], систему моделей изображений, обеспечивающую дискриминацию объектов по контрастности с учетом их топологических, метрических и функциональных характеристик.
- 2) В рамках этой системы разработать критерии сегментации граничных элементов и, на их основе, модель адаптивной маски, а также метод настройки ее параметров на особенности изображений рассматриваемого класса прикладных объектов.
- 3) Разработать метод сегментации граничных элементов изображения с использованием адаптивной маски.
- 4) Разработать метод коррекции границ изображения по результатам сегментации с использованием адаптивных масок.

В данной работе дается решение задач 1–3. Для решения задачи 4 может быть применен один из общих подходов, изложенных в [17], с учетом дополнительных возможностей анализа окрестностей сегментированных граничных элементов, полученных при решении задач 1–3. При этом адаптация унифицированной системы моделей и методов сегментации изображений на конкретные приложения может осуществляться с использованием известных методов поддержки принятия решений [19–21].

### 2. Исходные данные

Исходные данные представлены полутоновым входным изображением  $E$  некоторой совокупности из  $K$  объектов в поле зрения; это изображение задается матрицей значений яркости  $F = \{f_{ij}\}$  на области входного изображения  $D = \{d_{ij} = (i, j)\}$ ,  $i = 0, 1, j = 0, 1$ , где  $d_{ij}$  — узлы прямоугольной регулярной решетки  $R$  на плоскости  $Oxy$  с единичным шагом, образующие которой параллельны

осям координат. Яркость  $f_{ij}$  в соответствующих узлах  $d_{ij}$  области  $D$  принимает значение на интервале целых неотрицательных чисел  $[0, 255]$ . При рассмотрении этих узлов на плоскости, для определенности, будем называть их точками. Изображение объекта  $E_k = [F_k, D_k]$  аналогично входному изображению, представлено распределением яркости  $F_k = \{f_{ij}\}$  в узлах области изображения  $D_k = \{d_{ij}\}$ ,  $(i, j) \in I_k$ . При этом фоном считается изображение  $E_0 = [F_0, D_0]$ , такое, что

$$D_0 = D \setminus \bigcup_{k=1, K} D_k$$

### 3. Базовая топологическая система моделей

В топологии область  $\Omega$ , лежащая на плоскости, называется односвязной [22], если непрерывной деформацией любая петля в ней стягивается в точку; подобная область имеет тип диска (рис. 1, а). При этом линейно-связное множество с  $n+1$  компонентой границы имеет топологический тип диска с  $n$  дырами (рис. 1, б, в), а ее фундаментальная группа является свободной группой  $C_{(n)}$  [23].

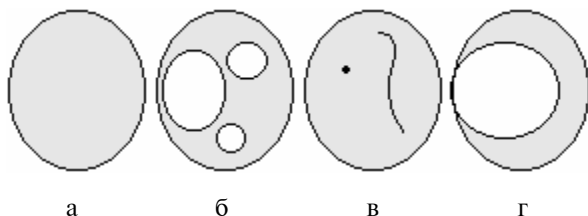


Рис. 1. Топология областей на плоскости

В практически значимых случаях не односвязных областей рассматривают замыкание области с выколотыми дисками (рис. 1, б), а сингулярные множества типа “точка” или “линия” (рис. 1, в) не рассматриваются, как и случай выколотого диска, граница которого касается границы заданной области (рис. 1, г). При этом область  $\Omega$ , имеющая тип диска с  $n$  дырами (на рис. 1, б —  $n = 3$ ), определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \Omega = Cl \omega_0 \setminus \bigcup_{i=1, n} \omega_i ; \\ Cl \omega_i \subset \omega_0, Cl \omega_i \cap Cl \omega_j = \emptyset, \\ i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\{\omega_i\}_{i=0, n}$  — односвязные области, а  $Cl$  — операция замыкания. Диск  $\omega_0$  называется носителем, его граница  $Fr \omega_0$  — внешней границей области, а границы  $Fr \omega_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , назовем внутренними.

Рассмотрение диска с  $n$  дырами исчерпывающим образом определяет топологическую модель рассматриваемых областей на плоскости и посредством (1) задает их структуру (вложения) и топологическую классификацию. Рассмотрим, как описанную топологию плоскости (с евклидовой метрикой) можно перенести на область  $D$ .

Пусть  $\varepsilon > 0$  и  $d_{ij} \in D$ . Назовем множество  $O_\varepsilon(d_{ij}) = \{d_{\xi\eta} \mid \rho(d_{ij}, d_{\xi\eta}) \leq \varepsilon\}$   $\varepsilon$ -окрестностью узла  $d_{ij}$  в  $D$ ; для всякого узла в  $D$  число различных его

окрестностей конечно, причем для различных  $\varepsilon$  окрестности узла могут совпадать.

Топология объектов поля зрения, проецируемых на плоскость  $Oxy$  (перпендикулярную к главной оптической оси регистрирующего устройства), и их дискретных аналогов — изображений, заданных в  $D$ , существенно различна. Поэтому для моделирования изображений, обеспечивающего учет топологических свойств объектов в  $D$ , необходимо ввести соответствующие континуальным дискретные аналоги.

Единичную окрестность  $O_1(d_{ij})$  узла  $d_{ij}$  назовем элементарной. Заметим, что узел  $d_{ij}$  является 4-связным [6] с остальными узлами окрестности в смысле выполнения условия  $|i - \xi| + |j - \eta| = 1$  (рис. 2, а), и если не оговорено иное, считаем узлы смежными, если они 4-связны; соответственно, в окрестности  $O_\varepsilon(d_{ij})$ ,  $\varepsilon = \sqrt{2}$  все узлы 8-связны с  $d_{ij}$ .

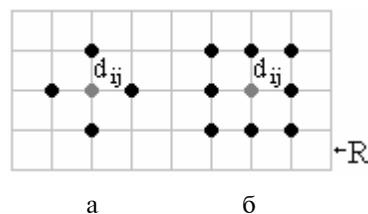


Рис. 2. 4- и 8-связность (серого) узла  $d_{ij}$

Множество  $G \subset D$  назовем линейно 4-связным, если для всякой пары его узлов  $d_{ij}, d_{\xi\eta} \in G$  существует последовательность смежных узлов с началом в  $d_{ij}$  и концом в  $d_{\xi\eta}$ , которую назовем путем. Соответственно, 8-связный аналог пути назовем линейной 8-связностью. Если в случае областей на плоскости линейная связность влечет связность, и наоборот, то в пространстве  $D$  аналогичная эквивалентность может иметь место для 8-связности и не выполняться для 4-связности. Поэтому в дальнейшем изложении эти типы связности различаются.

Пополнением линии будем называть некоторое множество узлов, если в совокупности они образуют путь. Ясно, что каждый узел  $d'$  пополнения — это один из двух узлов:  $d_{i\eta}$  или  $d_{\xi j}$ , смежных 8-связным узлам  $d_{ij}$  и  $d_{\xi\eta}$  линии,  $i \neq \xi$  и  $j \neq \eta$ , введение которого обеспечивает достижение 4-связности для последовательности узлов  $d_{ij} d' d_{\xi\eta}$ .

Если начальный и конечный узлы пути (линии) совпадают (4- или 8-связны, соответственно), он называется замкнутым (квазизамкнутым); заметим, что оба эти типа путей составлены из одного и того же множества узлов. Если всякий узел пути (линии) связан лишь с предшествующим или последующим, путь (линия) называется простым, в непрерывном случае это означает отсутствие самопересечений.

Элементарная окрестность узла  $d_{ij}$  включает его и множество смежных ему узлов; для этих пяти узлов

узел  $d_{ij}$  назовем внутренним. Соответственно, узел  $d_{ij} \in G$  является внутренним для множества  $G \subset D$ , если его элементарная окрестность принадлежит  $G$ , и граничным, если  $O_1(d_{ij}) \setminus G \neq \emptyset$  и хотя бы один смежный ему узел лежит в  $G$ ; иначе он считается изолированным.

В отличие от плоскости, в  $D$  не существует множества, содержащего лишь внутренние узлы. Однако мы можем ввести понятия внутренней  $\text{Int } G$  множества  $G$  и его границы  $\text{Fr } G$ , как объединений соответственно внутренних и граничных узлов множества  $G$ . Множество  $\text{Int } G \cup \text{Fr } G$  является аналогом области с присоединенной границей. Далее предполагается, что топологический тип рассматриваемых областей и их замыканий совпадает. Назовем  $\Gamma$  покрытием множества  $G$ , если  $G \subset \Gamma$ . Если связные компоненты границы множества  $G$  попарно не имеют 8-связных узлов, назовем их отделимыми в  $G$ .

Граница множества  $G \subset D$  в общем случае является 8-связным множеством. Однако она не всегда может быть представлена простой линией вследствие особенностей самих объектов (например, протяженных или разветвленных структур типа сосудов, дорог и т.п.) и погрешностей при их дискретизации. Вместе с тем, при наложенных ограничениях на топологический тип областей и их замыканий получаем, что всякая компонента связности  $\text{Fr } G_i$  границы  $\text{Fr } G$  изображения представима объединением простой замкнутой линии (носитель границы) и, возможно, связных с ней древовидных структур из простых линий, которые в совокупности не образуют петель, не стягиваемых на  $\text{Fr } G$ ; носители границ на рис. 3 обозначены черным, а древовидные компоненты – крестиками.

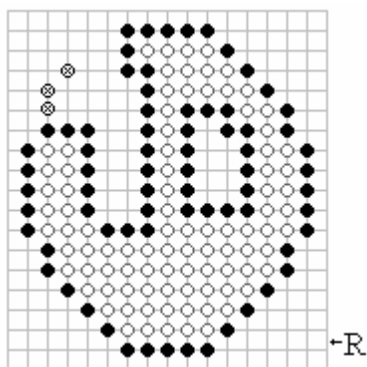


Рис. 3. Носители и древовидная компонента границы изображения типа диск с дырой

В результате получаем, что введенные понятия окрестности и связности для дискретных множеств в  $D$  порождают ту же топологию связности, описываемую группой  $C_{(n)}$ , что и исходный объект, описываемый диском с  $n$  дырами, если при отображении объекта шаг решетки АЦП достаточно мал по отношению к линейным размерам дыр исходного объекта.

В итоге, область входного изображения может содержать множества двух типов: области (диски с дырами) с присоединенной границей и линии (в частности, пути); соответственно, назовем их множествами первого и второго типа. Здесь важно отметить, что множества второго типа возникают при анализе изображений, аналогом которых являются протяженные объекты, например, линии на чертежах [24], дороги на картах и космических снимках [25, 26], сосуды и иные элементы биологических [3] и иных объектов, полученных при невысоком разрешении. При этом иные типы множеств, например, “очки” (две линии, соединенные линией), естественной декомпозицией могут быть сведены к совокупности введенных конструкций.

#### 4. Базовые геометрические модели

Говоря о метрических характеристиках множеств, заданных узлами  $d_{ij} \in D$ , будем рассматривать метрику плоскости. Важнейшей метрической характеристикой множества  $G \subset D$  является его диаметр  $\text{diam } G$ . Считается, что на диаметр области изображения  $D_k$  наложены следующие ограничения:

$$\theta^* \leq \text{diam } D_k \leq \Theta^*. \quad (2)$$

Введем модель образа кривой в области  $D$ . Пусть  $\varphi$  – непрерывная простая спрямляемая кривая на плоскости, параметризованная величиной  $\tau$ , которая задана уравнением

$$\varphi(x(\tau), y(\tau)) = 0, \quad \tau \in [0,1]. \quad (3)$$

Рассмотрим унифицированное отображение кривой типа (3) в  $D$ . Пусть, соответственно росту параметра в (3), кривая  $\varphi$  пересекается с образующими решетки  $R$  в точках  $\{t^q = (x^q, y^q)\}_{q=1,Q}$ . Отобразив каждую из них на ближайший узел решетки  $R: t^q \rightarrow d_{ij}^q$ , получаем последовательность  $\{d_{ij}^q\}$ . Применяя к ней итеративную процедуру устранения кратных узлов вида  $\dots aa\dots \rightarrow \dots a\dots$ , получаем последовательность  $\lambda = \{d_{ij}^p\}_{p=1,P}$ , которую назовем образом  $\lambda$  кривой  $\varphi$  в области  $D$ ; примеры образов отрезка и окружности (черные точки) приведены на рис. 4. Не теряя общности, будем считать, что  $P > 1$ , т.е. образ кривой не вырожден.

В общем случае образ  $\lambda$  является линией в  $D$ . Действительно, пусть на интервале  $(\tau_1, \tau_2)$  все точки кривой  $\varphi$  лежат во внутренней некоторого элементарного квадрата  $sq$ , а в точках  $t_1, t_2$  при определенных значениях параметра  $\tau_1, \tau_2$  кривая  $\varphi$  пересекается с решеткой  $R$ . Тогда образы  $d_{ij}^1, d_{ij}^2$  точек  $t_1, t_2$  совпадают, 4- или 8-связны. Не теряя общности, положим, что кривая  $\varphi$  не имеет континуальных совпадений с образующими решетки. Тогда по индукции получаем, что после устранения совпадающих узлов и вся последовательность  $\lambda = \{d_{ij}^p\}$  8-связна, т.е. является линией. При этом из условия невырожденности следует, что

образ замкнутой кривой на плоскости является замкнутой линией и в  $D$ .

Для построения геометрической модели маски используются образы отрезка, ломаной и окружности. Образ отрезка, соединяющего два узла решетки, назовем  $s_4$ -отрезком, если узлы лежат на одной образующей (рис. 4,а), в противном случае получаем  $s_8$ -отрезок (рис. 4,б). Первый из них является путем, а второй – линией. Соответственно,  $\lambda$ -ломаной в  $D$  назовем образломаной, составленный из  $s_4$ - и/или  $s_8$ -отрезков.

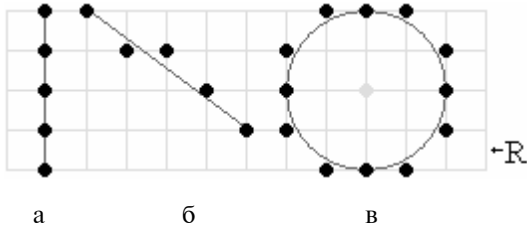


Рис. 4. Образы отрезков и окружности в  $D$

Заметим, что задача распознавания границ, в отличие от моделирования образа кривой на узлах области  $D$ , является некорректно поставленной вследствие возможной неустойчивости решения, что, как правило, не учитывается в существующих моделях и методах решения подобных задач.

### 5. След окружности

Рассмотрим на плоскости окружность радиуса  $\rho$ :

$$\begin{cases} x = \xi + \rho \cdot \cos(2\pi\tau), \\ y = \eta + \rho \cdot \sin(2\pi\tau), \end{cases} \quad (4)$$

с центром в узле решетки  $(\xi, \eta)$ .

Типовыми назовем расстояния от центра  $(\xi, \eta)$  до иных узлов решетки, считая их упорядоченными по возрастанию  $\{\rho_\zeta\}_\zeta = \{1, \sqrt{2}, 2, \sqrt{5}, \sqrt{8}, 3, \dots\}$ . Эти радиусы определяют семейство образов окружностей  $\{\lambda_\zeta\}$ , каждая из которых представлена упорядоченной последовательностью узлов  $\lambda_\zeta = \{d_\zeta^p\}_p$  (рис. 5, сверху).

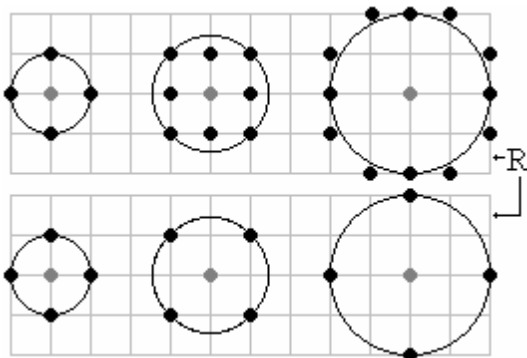


Рис. 5.  $\lambda$ -окружности радиусов  $\rho_1 - \rho_3$  и их следы

Подпоследовательность  $\{d_\zeta^r\}_r \in \lambda_\zeta$  узлов, удаленных от центра  $\lambda$ -окружности  $\lambda_\zeta$  на расстояние  $\rho_\zeta$ , назовем следом  $sl\lambda_\zeta$  этой окружности относительно узла  $(\xi, \eta)$  (рис. 5внизу). В целях использования РИ, 2004, № 1

следа для дифференциальной обработки изображений по направлениям параметризуем узлы следа  $sl\lambda_\zeta$  полярным углом  $\alpha$ , используя (4). Полученные значения координат  $\{\alpha_\zeta^r\}_r$  представим матрицей-строкой направлений  $A_\zeta$  (рис. 6,а). С другой стороны, в целях минимизации времени обращения к узлам следа зададим их матрицей координат  $K_\zeta = \{k_\zeta^r\}$  в системе  $D$  относительно  $(\xi, \eta)$  (рис.6,б).

0	$\pi/2$	$\pi$	$3\pi/2$	1	0	-1	0
				0	1	0	-1

а

б

Рис. 6. Матрицы направлений (а) и координат (б) для узлов следа  $sl\lambda_1$

Подпоследовательность узлов  $\{d_\zeta^v\}_v \subset sl\lambda_\zeta$ , где угол между векторами  $d_{\xi\eta}d_\zeta^v$  и  $d_{\xi\eta}d_\zeta^{v+1}$  составляет  $90^\circ$ , назовем ортогональным следом. В силу симметрии, всякий след может быть разложен на серию из  $q_\zeta$  непересекающихся подмножеств по 4 узла – ортогональных следов  $\{sl_\perp^r\lambda_\zeta\}_r$ , где  $r \in \{1, \dots, q_\zeta\}$  – номер первого узла в  $sl\lambda_\zeta$  (рис.7). Для представления таких следов также используются матрицы направлений  $A_\zeta^r$  и координат  $K_\zeta^r$ .

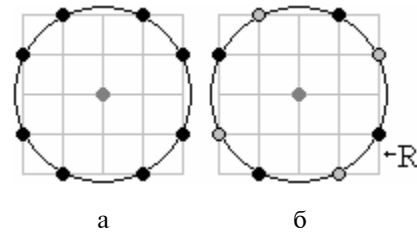


Рис. 7. След  $sl\lambda_4$  (а) и его разложение на серию ортогональных следов  $sl_\perp^1\lambda_4$  и  $sl_\perp^2\lambda_4$  (б)

### 6. Базовые критерии сегментации границ

Пусть  $n_S$  – общее число сегментированных узлов, среди которых  $n_D$  граничных, а  $n$  – число граничных узлов изображения  $D_k$ . Оценим качество сегментации границы этого изображения показателями частичной и ложной сегментации:

$$p_f = 1 - \frac{n_D}{n}, \quad P_f = 1 - \frac{n_D}{n_S},$$

которые принимают значение в диапазоне  $[0, 1]$  и при выделении всех граничных и отсутствии «ложных» узлов равны 0. Это позволяет рассматривать их как вероятностные оценки величин, дополнительных к показателям полноты  $q_f = 1 - p_f$  и адекватности  $Q_f = 1 - P_f$  сегментации.

Пусть яркости граничных узлов области изображения  $D_k$  принадлежат интервалу  $I^* = [f^*, F^*]$ . Тогда отображение  $Cr_f : \Gamma \rightarrow D_f$ , относящее к множеству  $D_f$  все точки покрытия  $\Gamma$  области  $D_k$ , яркости которых принадлежат интервалу  $I^*$ , назовем базовым

вым критерием сегментации граничных узлов. Он обеспечивает полноту, но не гарантирует адекватности сегментации, поскольку  $n_D = n$  и  $n_S \geq n_D$ .

В общем случае сужение интервала  $I^*$  способствует росту адекватности, но может приводить к потере полноты сегментации. Поэтому повышение адекватности сегментации целесообразно осуществлять до использования критерия  $Cr_f$  — путем фильтрации шумов, минимизации покрытия  $\Gamma$  и ширины интервала  $I^*$  на основе обучающих правил и, после его применения, для исключения малых объектов.

Для формирования множества  $D_f$  можно применить стандартный метод, основанный на построчном сканировании покрытия  $\Gamma$  и выделении узлов с яркостью в диапазоне  $I^*$ . В общем случае  $D_f$  — несвязное множество, состоящее из 8-связных подмножеств  $\{D_f^i\}_i$ , которые могут быть получены, например, с использованием волнового метода.

Поскольку, в соответствии с (2), диаметр искомого изображения превышает  $\theta^*$ , введем в рассмотрение базовый критерий пост-обработки  $Cr_{dm}$ , применение которого исключает из рассмотрения подмножества из  $D_f$ , имеющие меньший диаметр.

### 7. Критерии сегментации границ по контрастности

Пусть  $sl \lambda_\zeta = \{d_\zeta^f\}$  — след с центром в  $d_{\xi\eta} \in D$ . Тогда контрастностью в  $d_{\xi\eta}$  по направлению  $\alpha_\zeta^f$  назовем модуль разности яркости в узлах  $d_{\xi\eta}$  и  $d_{ij} = d_\zeta^f$ :

$$u_\zeta^f = |df_\zeta^f|, \quad df_\zeta^f = f_{ij} - f_{\xi\eta}, \quad u_\zeta^f \in [0, 255]. \quad (5)$$

Максимальное из этих значений  $u_{\xi\eta, \zeta}$  назовем контрастностью центра следа, а их совокупность — спектром контрастности  $U_\zeta(d_{\xi\eta})$ ; подобно матрице направлений  $A_\zeta$ , представим его строкой  $U_{\zeta, \xi\eta}$ .

Пусть  $Fr D_k = \{d_{\xi\eta}\}$  — граничные узлы  $D_k$ ,  $\rho_\zeta$  — заданный радиус следа  $sl \lambda_\zeta$ . Не теряя общности, рассмотрим случай достаточной гладкости границы по отношению к радиусу  $\rho_\zeta$ . Тогда при совмещении центра следа  $sl \lambda_\zeta$  с узлом  $d_{\xi\eta} \in Fr D_k$  узлы следа попадают в область  $D_k$  и в ее дополнение  $\bar{D}_k$ , определяя базовое условие устойчивости (для следа):

$$(sl \lambda_\zeta \cap D_k \neq \emptyset) \wedge (sl \lambda_\zeta \cap \bar{D}_k \neq \emptyset). \quad (6)$$

В этих условиях оценим плотности распределения  $p(u_\zeta)$ ,  $p(c_\zeta)$  (рис.8) контрастности  $\{u_\zeta\}$ ,  $\{c_\zeta\}$  в граничных узлах  $d_{\xi\eta}$  относительно узлов следа  $sl \lambda_\zeta$ , лежащих в областях  $D_k$  и  $\bar{D}_k$ , соответственно; пределы их изменения обозначим  $[u_\zeta^*, U_\zeta^*]$ ,  $[c_\zeta^*, C_\zeta^*]$  и рассмотрим разность  $sep_\zeta = (c_\zeta^* - U_\zeta^*)$ .

Практически основной интерес представляют лишь контрастное и простейший тип частично-контрастного изображения, определяемые соотношениями  $U_\zeta^* < c_\zeta^*$ ,  $u_\zeta^* < c_\zeta^* \leq U_\zeta^* < C_\zeta^*$  (на рис.8 вверху и внизу

соответственно). Поэтому при сегментации по контрастности вначале возникает задача выбора следа, обеспечивающего контрастность, или, по крайней мере, частичную контрастность изображения, при минимальных вычислительных затратах.

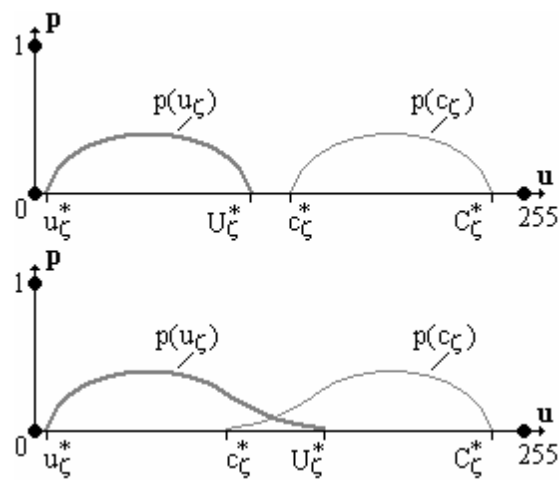


Рис. 8. Плотности распределения контрастности

При решении этой задачи следует учитывать наличие «тени» изображения  $sh D_k$  (рис.9), т.е. области, прилегающей к границе объекта со стороны фона в условиях, когда ширина тени не превышает нескольких узлов, а контрастность между узлами границы и фона достаточно велика. Все узлы тени однозначно отделить от граничных узлов изображения по яркости невозможно (ни физически, ни математически).

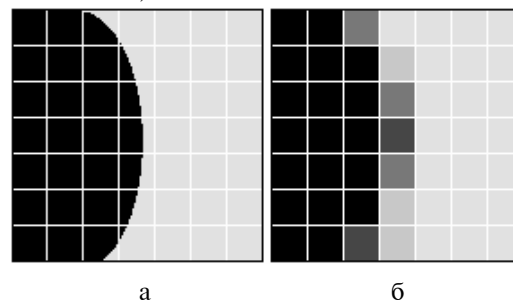


Рис. 9. Формирование цифрового изображения объекта с гладкой границей на светлом фоне и его тени: а — оптическое, б — оцифрованное изображение

Поэтому, хотя сегментация узлов тени не считается ложной, входящие в нее узлы стремятся не сегментировать. При этом для исключения доминирующего влияния тени введем критерий  $Cr_{sep}$  определения радиуса следа: он должен быть достаточно велик, чтобы в след попали и те узлы фона  $\bar{D}_k$ , которые не принадлежат тени.

Для решения задачи нейтрализации влияния тени радиус следа достаточно увеличить, начиная от  $\zeta = 1$ , до некоторого минимального значения  $\zeta^*$ , после чего всякий след будет содержать требуемые узлы фона. После этого для решения задачи сегментации выбираем радиус  $\zeta \geq \zeta^*$ , для которого достигается требуемое значение разности. Выбор в последнем случае минимально допустимого радиуса  $\zeta^*$  обеспечит минимизацию вычислительных

затрат, а рассмотрение радиуса  $\zeta \geq \zeta^*$  может повысить адекватность и/или полноту сегментации.

### 7.1. Критерии сегментации узлов контрастного изображения

Порогом по контрастности для заданного изображения и следа  $sl\lambda_\zeta$  назовем величину  $T_\zeta$ , лежащую в интервале  $[U_\zeta^*, c_\zeta^*]$ ; соответственно, если для узла  $d_{\xi\eta}$  выполняется условие  $u_{\xi\eta,\zeta} > T_\zeta$ , он считается контрастным, иначе – неконтрастным.

В этих условиях критерий контрастности  $Cr_u$  определяет, что узел  $d_{\xi\eta} \in D_f$  заведомо не является граничным, если он неконтрастный.

Использование критерия  $Cr_u$  приводит к сегментации всех граничных узлов области изображения; иначе говоря, вероятность  $p_u$  частичной сегментации по контрастности равна нулю. Однако при этом с некоторой вероятностью  $P_u$  могут быть ложно сегментированы неграничные узлы области изображения. В целях их исключения оценим допустимые вариации контрастности границ, вводя в рассмотрение для критерия  $Cr_u$  уровень запаса прочности  $af_\zeta = \min\{(T_\zeta - U_\zeta^*), (c_\zeta^* - T_\zeta)\}$ .

Начальное значение порога  $T_\zeta$  принимается равным величине  $(U_\zeta^* + c_\zeta^*)/2$ , при которой уровень запаса прочности обращается в максимум. Это значение порога обеспечивает (в среднем) наибольшую устойчивость сегментации по критерию  $Cr_u$  за счет равного удаления порога от границ интервала  $[U_\zeta^*, c_\zeta^*]$ .

Увеличению радиуса следа  $sl\lambda_\zeta$  при сегментации, как правило, соответствует рост количества сегментированных внутренних узлов изображения, для которых справедливо (6), и неконтрастных узлов тени,  $\delta$ -связных с граничными, что усиливает проявление известного эффекта утолщения границ; снижению влияния этого эффекта способствует уменьшение радиуса следа  $\rho_\zeta$  и увеличение порога  $T_\zeta$ .

По признаку контрастности сегментация может приводить к выделению узлов тени и фона, а также внутренних узлов изображения, что проявляется утолщением и ложными компонентами границ. Для исключения подобных узлов предлагается использовать индикаторную функцию, заданную для узлов  $r$  следа  $sl\lambda_\zeta$  относительно его центра  $d_{\xi\eta}$ :

$$ind_\zeta^r = \begin{cases} \text{sign}(df_\zeta^r), & \text{если } u_\zeta^r > T_\zeta, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

которая принимает значения 1, -1 для контрастных разностей и 0 – для неконтрастных. Совокупность значений этой функции для узла  $d_{\xi\eta}$  назовем спектром. Из условия (6) следует, что спектры

граничных узлов могут иметь только один из трех типов:  $S^1 = \{-1, 0\}$ ,  $S^2 = \{0, 1\}$  и  $S^3 = \{-1, 0, 1\}$ .

На этом основании вводится индикаторный критерий  $Cr_{ind}$ , относящий контрастный узел к множеству граничных, если его спектр  $S_\zeta(d_{\xi\eta})$  имеет тип  $S^1$ ,  $S^2$  или  $S^3$ . При этом сегментация граничных узлов может производиться не по всем трем типам спектров, в зависимости от априорной информации о яркости фона относительно объекта.

С использованием введенных критериев анализ изображения по контрастности предлагается строить в три этапа, аналогично схеме анализа по яркости: первый и третий предназначены для минимизации вероятности ложной сегментации, а второй – для сегментации граничных узлов.

Именно на первом этапе (предобработка) использование критерия  $Cr_{sep}$  позволяет получить контрастное изображение посредством увеличения радиуса следа в интерактивном режиме. С этой целью для заданного радиуса значение порога увеличивается, начиная с начального значения  $(U_\zeta^* + c_\zeta^*)/2$ , до удовлетворения условия контрастности; в противном случае берем следующее значение радиуса. Если это условие не выполнено при достижении предельного значения радиуса и соответствующего ему порога  $(c_\zeta^* - 1)$ , задача переходит в категорию сегментации частично контрастного изображения; в этом случае необходимо максимизировать разнос с применением той же процедуры, но уже в условиях частичной контрастности изображения.

Заметим, что процедура предобработки подразумевает увеличение радиуса следа, в то время как для уменьшения эффекта утолщения границ радиус следа следует уменьшать. Поэтому если след минимального радиуса, обеспечивающий контрастность изображения, приводит к избыточному утолщению границы, но получение всех граничных узлов не требуется (этот случай рассматривается в 7.2), можно перейти к задаче сегментации частично контрастного изображения при большем пороге или меньшем радиусе следа.

На втором этапе сегментация граничных узлов производится с использованием полученного значения порога и радиуса следа на основе последовательного применения критериев  $Cr_u$  и  $Cr_{ind}$  на множестве узлов  $D_f$ , сегментированных по яркости, что дает систему  $\delta$ -связных множеств  $D_u = \{D_u^i\}$ .

На третьем этапе (постобработка) для фильтрации ложносегментированных множеств  $D_u^i$  применяется критерий  $Cr_{dm}$ .

### 7.2. Критерии сегментации узлов частично-контрастного изображения

Для контрастных изображений критерии  $Cr_u$  и  $Cr_{ind}$  исключают частичную сегментацию, допускающую ложную. Однако в случае частично-контрастных изображений их применение может привести

к частичной сегментации, что требует подбора радиуса и порога для достижения оптимального соотношения между вероятностями частичной и ложной сегментации. Поэтому для сегментации всей границы частично-контрастного изображения фиксируем порог на уровне  $T_\zeta = (c_\zeta^* - 1)$  и ищем решение в три этапа, подобно сегментации контрастного изображения, за исключением рассмотрения уровня запаса прочности.

Применение этого подхода исключает частичную сегментацию, но ввиду слабого отличия распределений контрастности граничных и внутренних узлов изображения может привести к существенному возрастанию вероятности ложной сегментации.

Однако при решении многих прикладных задач сегментация всех граничных узлов изображения не требуется, если для него известны определенные геометрические параметры (форма и др.), поскольку в этом случае границы изображения с требуемой степенью точности могут быть оценены или восстановлены по сегментированным узлам. В этих условиях частичная сегментация допустима, но требуется низкая вероятность ложной. Поэтому выбирается начальное значение порога  $T_\zeta = U_\zeta^*$  и, как и для контрастного изображения, сегментация производится по той же трехэтапной схеме со следующими отличиями.

На первом этапе ищется компромиссное значение порога  $T_\zeta$  в интервале  $[(c_\zeta^* - 1), C_\zeta^*]$ , нижняя граница которого обеспечивает исключение частичной сегментации, а верхняя — минимизацию ложной.

На третьем этапе, когда диаметр изображения меньше расстояния от него до иных объектов, в соответствии с критерием  $Cr_p$  сегментированные узлы объединяются в подмножество  $D_u$  граничных узлов изображения, если попарные расстояния между ними не превосходят диаметра изображения. Могут вводиться и другие метрические критерии, учитывающие геометрические особенности изображения. При этом критерий  $Cr_{dm}$  применяется лишь в случае применения критерия  $Cr_p$ .

## 8. Сегментация граничных узлов по маске

Сегментация граничных узлов с использованием одного следа может быть неустойчивой вследствие нарушения условия (6) из-за отсутствия общих узлов следа с областью изображения или ее дополнением. Для обеспечения устойчивости этого процесса рассмотрим маску — множество узлов, полученное минимальным узловым пополнением  $\lambda$ -окружности  $\lambda_\zeta$  до простого пути. Ввиду неоднозначности этой операции рассмотрим внутреннюю  $Imask_\zeta$  и внешнюю  $Emask_\zeta$  маски. Они получают следующим образом. Полагаем  $Imask_\zeta = Emask_\zeta = \lambda_\zeta$  и рассматриваем последовательность соседних пар узлов  $d_\zeta^p, d_\zeta^{p+1}$  этой  $\lambda$ -окружности. Если эти узлы 8-связны (т.е. лежат на диагонали единичного квадрата), то ближайший (к центру  $d_{\xi\eta}$ ) из оставшихся двух узлов этого квадрата

относим к  $Imask_\zeta$ , а второй — к  $Emask_\zeta$ . Совокупность полученных масок обозначим  $Mask_\zeta = \{Imask_\zeta, Emask_\zeta\}$ .

При  $\zeta = 1, 2$  внутренняя и внешняя маски совпадают с  $\lambda$ -окружностью  $\lambda_2$ . При  $\zeta \in \{3, 4, 5, 6\}$  внутреннюю и внешнюю маски можно получить присоединением к  $\lambda_\zeta$  одного (рис. 10) или более следов. В общем случае маска может быть получена пополнением  $\lambda$ -окружности набором ортогональных следов.

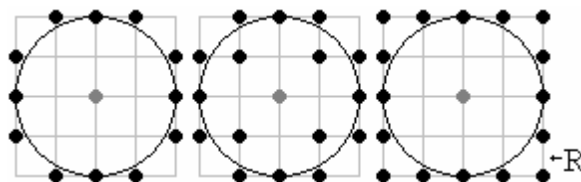


Рис. 10.  $\lambda$ -окружность  $\lambda_3$  и маски  $Imask_3, Emask_3$

Для устойчивости сегментации требуется, чтобы при установке центра маски в граничную точку хотя бы для одного ее следа выполнялось условие (6). Рассмотрим, как выбирать диаметр маски для выполнения этого требования, считая область изображения  $D_k = \{d_{\xi\eta}\}_{\xi\eta}$  отделимой от края входного изображения:  $\xi \neq 0, 1$  и  $\eta \neq 0, J$ .

С учетом (2) условие (6) будет выполнено для граничных узлов носителя области изображения, если

$$\text{diam } Mask_\zeta \leq \theta^* . \quad (7)$$

Если область изображения представлена диском с дырами  $\omega_i$ , для корректной сегментации граничных узлов этого изображения помимо (7) необходимо выполнение следующего условия:

$$\text{diam } Mask_\zeta \leq \min_i (\text{diam } \omega_i) + 1 . \quad (8)$$

Если правая часть этого неравенства меньше диаметра минимальной маски  $Mask_2$ , используется  $Mask_2$ .

Для большинства практических задач эти условия можно считать выполненными для масок введенных размерностей, а значит и базовое условие устойчивости (6) выполнено. Невыполнение этих условий ведет к росту вероятности частичной сегментации.

Если ни одна маска не удовлетворяет условиям (7), (8) и/или не обеспечивает требуемый уровень устойчивости, тогда для сегментации граничных узлов может использоваться более одной маски, в частности — система масок, образующих окрестность, с обработкой результата по схеме логического “ИЛИ”.

## 9. Метод сегментация граничных узлов

Для решения задачи сегментации граничных узлов изображения предлагается следующий метод яркостно-контрастной сегментации, который состоит в выявлении начального множества узлов, исключая

ющего частичную сегментацию, с последующим удалением из него ложносегментированных узлов. Этапы этого метода следующие.

1. На этапе настройки на типовое изображение рассматриваемого класса объектов определяем параметры маски и критериев сегментации  $C_{r_f}$ ,  $C_{r_u}$ ,  $C_{r_{ind}}$ , а также тип изображения (по контрастности); по ним определяем параметры фильтра по яркости и критериев пост-фильтрации  $C_{r_{dm}}$ ,  $C_{r_p}$ .

2. Для повышения устойчивости сегментации фильтруем входное изображение по яркости, используя фильтры, ориентированные на топологический тип сегментируемого объекта (линия, путь, диск, неодносвязная область) и его диаметр.

3. По критерию  $C_{r_f}$  сегментируем граничные узлы по яркости, объединяем их в 8-связные множества  $D_f = \{D_f^i\}_i$  и фильтруем по критерию  $C_{r_{dm}}$ .

4. Выделяем контрастные узлы  $D_u$ , применяя критерий  $C_{r_u}$  к узлам  $D_f$  следов маски  $Mask_\zeta$  по критерию "ИЛИ". Затем применяем к ним критерий  $C_{r_{ind}}$  для удаления ложносегментированных узлов. Для этого исключаем из множества  $D_u$  те узлы, в спектре которых либо отсутствует неконтрастная разность, либо присутствует, но по спектру они не соответствуют заданному типу  $S_j$ .

5. Разбиваем оставшиеся узлы на 8-связные компоненты и, соответственно типу изображения, фильтруем с использованием критерия  $C_{r_{dm}}$  либо  $C_{r_p}$ .

6. Полученное множество компонент связности узлов  $\{D_u^i\}_i$  относим к граничным узлам сегментируемого изображения.

Применение этого метода к контрастному изображению исключает частичную сегментацию и обеспечивает получение его границы в виде совокупности  $n + 1$  компонент 8-связности, соответствующих границам носителя и  $n$  дыр, которые с определенной вероятностью могут содержать ложносегментированные узлы. Аналогичный результат получаем и для частично-контрастного изображения, если порог  $T_\zeta$  равен  $(c_\zeta^* - 1)$ ; в этом случае вероятность ложной сегментации может существенно возрасти.

Если порог превышает уровень  $(c_\zeta^* - 1)$ , получаем частичную сегментацию границы изображения; в случае нескольких изображений применение критерия  $C_{r_p}$  позволяет разбить компоненты  $\{D_u^i\}_i$  на группы узлов, образующих их частичные границы.

Заметим, что вычислительная трудоемкость сегментации снижается с уменьшением диаметра маски и увеличением порогов, а оперативность настройки параметров определяется степенью ее автоматизации. Задание допустимого типа спектра  $S^i$  позволяет снизить трудоемкость за счет исключения неграничных узлов изображения иного спектра.

## 10. Заключение

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем.

1) На основе анализа основных особенностей задач сегментации изображений построена базовая топологическая система моделей изображений (диск с дырами и линия), которая отражает особенности их дискретного представления, причем топологические и метрические свойства введенной системы моделей с требуемой точностью отражают рассматриваемые континуальные аналоги на плоскости.

2) На основе введенных дискретных топологических и геометрических моделей построена радиально-параметрическая модель адаптивной маски; ее структура позволяет обрабатывать изображения всех требуемых типов (дисков с дырами и линий), обеспечивая устойчивость сегментации за счет настройки параметров на метрические особенности изображений.

3) В целях обеспечения полноты и адекватности сегментации введены три основных критерия с параметрами, настраиваемыми на особенности изображения. Первый из них,  $C_{r_f}$ , обеспечивает сегментацию граничных узлов в области покрытия изображения по яркости, а второй и третий,  $C_{r_u}$  и  $C_{r_{ind}}$ , — по контрастности, на основе применения адаптивной маски.

В отличие от традиционного подхода, когда порог контрастности для маски фиксирован (а значит, значения контрастности не нормированы по расстоянию соответственно классу функции яркости и степени ее искажения), в предлагаемом методе порог выбирается для каждого следа маски (с учетом равного удаления узлов следа относительно центра маски это позволяет исключить необходимость нормировки по расстоянию). Кроме того, настройка параметров маски и критериев сегментации позволяет минимизировать вероятности частичной и ложной сегментации граничных узлов, а использование критериев пост-фильтрации позволяет произвести дополнительную минимизацию числа ложносегментированных групп узлов.

4) Предложен метод яркостно-контрастной сегментации граничных узлов изображения, основанный на использовании маски и указанных критериев сегментации. Применение этого метода к контрастному изображению исключает частичную сегментацию, как и в случае частично-контрастного изображения для минимального порога; при ином пороге получаем частичную сегментацию границы. В случае нескольких изображений их частичные границы могут быть получены из нее применением критерия  $C_{r_p}$ .

Данный метод, в отличие от родственных подходов, использующих типовые неадаптивные маски ("матрица" размерностью  $3 \times 3$ ), позволяет дискриминировать граничные точки, исключая частичную сегментацию, в то время как типовые маски имеют недопустимо высокую вероятность частичной сег-

ментации при том же уровне ложной. Экспериментальная проверка подтвердила и вычислительную эффективность этого метода.

Практическая значимость предложенных моделей и методов определяется возможностью решения новых классов прикладных задач автоматизированного распознавания изображений; прежде всего – для сегментации изображений микробиологических объектов, которые, при существующих подходах, не могли быть адекватно сегментированы ввиду их неконтрастности. При этом метод яркостно-контрастной сегментации позволяет управлять таким существенным для приложений показателем, как соотношение качества и оперативности решения на основе варьирования параметров маски и введенных критериев.

Предложенная в работе система топологических моделей изображений и прежде всего линий может использоваться в целях построения адаптивных фильтров для линейных объектов и границ областей, для повышения резкости изображения путем устранения контрастных узлов тени. Кроме того, топологические модели областей, критерии сегментации и пост-фильтрации могут быть применены для повышения эффективности синтеза границ изображения за счет возможности учета интегральных и дифференциальных (по окрестностям) характеристик сегментированных узлов.

Предложенный подход также допускает распространение на сегментацию цветного изображения с адаптацией по компонентам цветовой модели.

**Литература:** 1. Rudel T.K., Bates D., Machinguiashi R. A Tropical Forest Transition // *Annals of the Association of American geographers*. 2002. №92. N.1. P.87-102. 2. Стан навколосемного простору, екологія Землі, її зв'язок з проблемами озоносфери і зміни клімату // *Вісник НКА України*. 2001. №1. С.50-59. 3. Верескун О.В., Мегель Ю.Е., Путятин В.П. Моделирование эталонов эмбрионов // *Проблемы бионики*. 2002. №53. С.79-86. 4. Стрелец В.М. Имитационный анализ системы “человек-машина” как метод эргономической оценки функционирования аварийных служб // *Радиоэлектроника и информатика*. 2001. №3. С.125-128. 5. Итенберг И.И. Мультипроцессоры для цифровой обработки изображений в системе реального времени // *Электроника*. 2002. №4. С.71-78. 6. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990. 320с. 7. Бобков В.А., Казанский А.В., Морозов М.А. Выделение размытых контуров на примере определения скорости течений по спутниковым изображениям // *Автометрия*. 2001. №2. С.3-12. 8. Бобков В.А., Казанский А.В. и др. Релаксационно-контурный алгоритм определения векторов морских течений по спутниковым изображениям и его сино-

птическая верификация // *Автометрия*. 2003. №1. С.73-81. 9. Бессарабов И.И. Использование ориентационной сегментации контуров с целью описания объектов на изображении в терминах отрезков // *Автометрия*. 2002. №2. С.67-72. 10. Семенов С.И. Теория неадаптивных масок для обработки изображений // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2002. №12. С.33-40. 11. Злобин В.К., Еремеев В.В., Новоселов В.Г. Алгоритм высокоточного фотометрического совмещения разновременных космических изображений // *Автометрия*. 2000. №3. С.71-76. 12. Воскобойников Ю.Е., Мухина И.Н. Локальный регуляризирующий алгоритм восстановления контрастных сигналов и изображений // *Автометрия*. 2000. №3. С.45-53. 13. Клочко В.К., Ермаков А.А. Алгоритмы фильтрации и сегментации трехмерных радиолокационных изображений поверхности // *Автометрия*. 2002. №4. С.41-48. 14. Трифонов А.П., Зимовец К.А. Эффективность обнаружения изображений на фоне шума // *Автометрия*. 2003. №1. С.19-27. 15. Белявцев В.Г., Воскобойников Ю.Е. Векторные локальные фильтры с адаптацией размера апертуры // *Автометрия*. 2001. №6. С.32-45. 16. Воскобойников Ю.Е., Колкер А.Б. Адаптивный алгоритм фильтрации и преобразования изображений в векторный формат // *Автометрия*. 2002. №4. С.3-11. 17. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. *Image processing, analysis, and machine vision*. - London, Toronto, Boston: PWS Publ. An International Thomson Publishing Company. 1990. 770 p. 18. Новожилова М.В., Холодная З.Б., Яловкина Е.Б. Основы работы с графическими файлами. Харьков: ХГПУ, 2000. 126с. 19. Сергієчко І.В. Про основні напрями створення інтелектуальних інформаційних систем // *Системи дослідження та інформаційні технології*. 2002. №1. С.39-64. 20. Климко Е.Г. Программно-алгоритмические средства интеллектуального анализа данных // *Радиоэлектроника и информатика*. 2001. №3. С.64-67. 21. Батий Л.В., Левагина С.И. Анализ математических методов поддержки принятия решений // *АСУ и приборы автоматки*. 2002. Вып. 120. С.72-76. 22. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1981. 720с. 23. Кроуэлл Р., Фокс Р. Введение в теорию узлов. М.: Мир, 1976. 348с. 24. Мищеряков Ю.В. Методы распознавания прямолинейных отрезков на чертежах // *АСУ и приборы автоматки*. 2002. Вып. 120. С.77-84. 25. Митчелл Э. Руководство по ГИС анализу / Часть 1: Пространственные модели и взаимосвязи: Пер. с англ. Киев: Стилос, 2000. 198с. 26. Грибов М.Г., Хачумов В.М. Определение геометрических параметров объектов по растровым изображениям // *Автометрия*. 2001. №1. С.40-49.

Поступила в редколлегию 21.01.2004

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Путятин В.П.

**Смеляков Кирилл Сергеевич**, аспирант кафедры информатики ХНУРЭ. Научные интересы: распознавание образов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Лепнина, 14, тел. 702-14-19.