

УДК 004.932

С.Г. Антощук, д-р. техн. наук, проф.,  
О.Ю. Бабилунга, инженер,  
А.А. Николенко, канд. техн. наук, доц.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КОНТУРНОГО ОПИСАНИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ- БЛИЖЕННЫМИ МЕТОДАМИ

С.Г. Антощук, О.Ю. Бабилунга, А.А. Николенко. Підвищення швидкодії контурного опису напівтонових зображень наближеними методами. Розглянуто алгоритм контурного опису зображень, який дозволив поєднати операції виділення контуру, “скелетизації” та його простеження.

S.G. Antoshchuk, O.Yu. Babilunga, A.A. Nikolenko. Increasing the speed of the edge describing of grayscale images by the approximate methods. The image edge describing algorithm is considered. It has allowed uniting edge detection, skeletonization and edge tracing.

Для ряда практически важных задач, связанных с компьютерным распознаванием полутоновых изображений, важнейшей процедурой является сегментация. Сегментация изображений преследует две основные цели: декомпозицию изображения на части, более удобные для дальнейшего анализа, и изменение формы описания изображения [1]. В результате получают информативные высокоуровневые структуры, упрощающие процесс получения признаков распознавания, обеспечивающие снижение объема обрабатываемой информации и, следовательно, времени анализа изображения. Примером такой структуры является контурное описание объектов. Имея полную информацию о контуре, легко определить площадь, координаты центра тяжести и коэффициенты формы объекта.

В идеале, если в результате применения методов получения контурного препарата [1] на изображении выделены только точки, принадлежащие контуру объекта, описание контура не представляет особых трудностей. К типичным методам описания контура объекта относятся цепное кодирование Фримана, ортогональные представления функции кривизны, сплайн-аппроксимация границ, применение которых требует наличия контурного препарата шириной в один пиксель, без разрывов контурной линии [1].

В практических приложениях, например, в системах контроля качества промышленных изделий, медицинской диагностики, биометрической идентификации, экологического мониторинга и др., наличие шума на изображении, размытость контурных перепадов и особенности используемых алгоритмов могут приводить к получению слишком широких контурных линий, что требует применения процедур уточнения или “скелетизации”, а также могут обнаруживаться ложные контуры или разрывы контурных линий, что требует выполнения специальных процедур прослеживания контуров: интерполяции контуров, обнаружения связанных кривых в множестве выделенных участков контурных линий и т.п. Данные процедуры выполняются по хорошо разработанной технологии морфологического анализа бинарных изображений [1].

Расширение морфологической концепции обработки изображений на полутоновые изображения возможно при выполнении следующих ограничений:

- на изображении должен присутствовать объект с четко очерченными границами на однородном полутоновом фоне;
- объекты и фон изображения должны быть относительно пространственно сглажены;
- необходима предварительная обработка изображения с целью уменьшения помех.

Проведение морфологической обработки полутоновых изображений традиционными методами попиксельного анализа приводит к дополнительному усложнению алгоритмов, увеличению числа операций и вычислительной сложности.

Предлагается для сокращения вычислительных затрат при контурном описании полутоновых изображений переход в пространство гиперболического вейвлет-преобразования (ГВП) [2] с применением приближенных методов [3]. Особенности ГВП, которое сочетает свойства преобразование Гильберта и вейвлет-преобразования, являются хорошая помехоустойчивость, возможность регулирования детальности полученных контурных препаратов и, следовательно, реализации иерархического подхода к контурному анализу изображений [2]. Однако ГВП, реализованное на фильтрах высокого порядка, вследствие выполнения операции свертки обладает низким быстродействием. Повышение быстродействия процедуры получения контурного препарата в пространстве ГВП позволит значительно расширить область ее применения.

Получение контурного препарата с использованием ГВП проводится в два этапа: перевод изображения в пространство ГВП или подчеркивание перепадов интенсивности и нахождение точек контура. Для нахождения точек контура используются дифференциальные (двукратного ГВП и пороговый) и корреляционно-экстремальный методы [2]. Причем задачу нахождения точек контура методом двукратного ГВП можно переформулировать в задачу нахождения корней двумерной функции в условиях помех, а задачу нахождения точек контура пороговым методом — в задачу анализа подчеркнутого изображения на экстремумы с целью выделения контура, т.е. поиск экстремумов двумерной функции в условиях помех. В общем случае корреляционно-экстремальный метод также сводится к задаче поиска экстремума. При таком подходе сокращаются и вычислительные затраты.

Действительно, пусть на интервале поиска экстремума функция  $U(x_1, x_2)$  дважды непрерывно дифференцируема в  $\delta$ -окрестности стационарной точки  $(x_1^*, x_2^*)$ , т.е.  $U(x_1, x_2) \in C^2 U_\delta(x_1^*, x_2^*)$ , поэтому она является четной функцией по  $x_1$  и  $x_2$ . Рассмотрим покоординатные ГВП функции  $U(x_1, x_2)$ :

$$\Phi_1(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(\tau, x_2) \psi(x_1 - \tau) d\tau, \quad \Phi_2(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(x_1, \tau) \psi(x_2 - \tau) d\tau,$$

где  $\psi(x)$  — базисная функция, обладающая свойством нечетности;

$\tau$  — переменная интегрирования.

Функции ГВП в стационарной точке равны нулю как интегралы от нечетной функции в симметричных пределах, т.е.  $\Phi_1(x_1^*, x_2^*) = 0$ ,  $\Phi_2(x_1^*, x_2^*) = 0$ , или в операторном виде [3]

$$\Phi(\mathbf{X}) = 0. \quad (1)$$

Следовательно, для нахождения точек экстремума необходимо решить операторное уравнение (1). Для нахождения следующего приближения по предыдущему можно использовать правило Ньютона в соответствии с выражением

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - [\nabla \Phi(\mathbf{X}_k)]^{-1} \Phi(\mathbf{X}_k), \quad (2)$$

где  $k$  — номер итерации,

$\nabla \Phi(\mathbf{X}_k)$  — градиент  $\Phi$  в точке  $\mathbf{X}_k$ .

Предлагается заменить нахождение  $\nabla \Phi(\mathbf{X}_k)$  вычислением покоординатного ГВП  $\Phi(\mathbf{X})$  с нечетной базисной функцией  $\psi(x)$ , не обязательно такой же, как для получения  $\Phi(\mathbf{X})$ , тогда уравнение (2) приобретает вид

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - [\Phi\{\Phi(\mathbf{X}_k)\}]^{-1} \Phi(\mathbf{X}_k). \quad (3)$$

Последнее выражение представляет математическое описание алгоритма получения контурного препарата методом двукратного ГВП.

Для математического описания алгоритма получения контурного препарата пороговым методом воспользуемся градиентным итеративным методом, в соответствии с которым

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - \alpha \nabla U(\mathbf{X}_k), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — скалярный коэффициент, регулирующий величину шага итерации;  
 $\nabla U(\mathbf{X}_k)$  — градиент функции  $U$  в точке  $\mathbf{X}_k$ .

После аналогичной замены градиента, уравнение (4) преобразуется к виду

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_k - \alpha \Phi(\mathbf{X}_k) = \mathbf{X}_k - \frac{h}{\|\Phi(\mathbf{X}_k)\|} \Phi(\mathbf{X}_k), \quad (5)$$

где  $h$  — величина шага итерации, для которой выполняется соотношение  $\alpha = \frac{h}{\|\Phi(\mathbf{X}_k)\|}$ .

От величины шага зависит скорость сходимости и устойчивость итерационного процесса.

Изображение следует рассматривать как двумерную функцию  $U(x_1, x_2)$ , значение которой в точке с пространственными координатами  $(x_1, x_2)$  является положительной скалярной величиной, физический смысл определяется источником изображения. Функция  $U$  является решетчатой, заданной на сетке с единичным шагом  $x_1 = i, x_2 = j, i = \overline{1, x_{1\max}}, j = \overline{1, x_{2\max}}$ . В случае одномерной обработки по строкам либо по столбцам  $u(x)$  оператор  $A$  нахождения точек контура осуществляет преобразование  $Au(x) \rightarrow K(x)$ , где  $K(x)$  — контурный препарат строки, либо столбца исходного изображения (рис. 1). В качестве оператора  $A$  применяются градиентные операторы, гауссианы и их производные и др. [1]. Применение таковых для сглаживания и подчеркивания контуров приводит к размытию последних (иногда и к потере), возникновению контуров шириной в несколько пикселей, что требует дополнительной морфологической обработки контурного препарата.

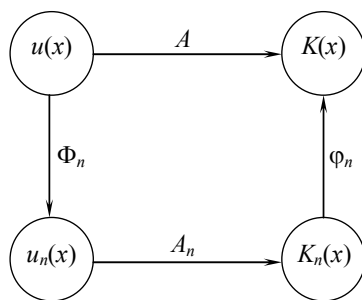


Рис. 1. Общая схема получения контурного препарата  $K_n(x)$  с использованием приближенных методов ( $\Phi_n$  —  $A_n$ ) и контурного препарата  $K_n(x)$  — без них ( $A$ )

Таких недостатков лишены методы выделения контуров в пространстве ГВП. Оператор  $\Phi_n$  осуществляет преобразование  $u_n(x) = \Phi_n u(x)$ :

$$u_n(s, x_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) \psi\left(\frac{x-x_0}{s}\right) dx, \quad (6)$$

где  $\psi\left(\frac{x-x_0}{s}\right)$  — двухпараметрическая базисная функция, получающаяся из материнского вейвлета  $\psi_0(x)$  в результате масштабирования с множителем  $s \in R^+$  и сдвига с параметром  $x_0 \in R$  [2].

В пространстве ГВП контур объекта представляется совокупностью локальных экстремумов. Обозначим через  $A_n$  оператор нахождения точек контура, осуществляющий преобразование  $A_n u_n(x) \rightarrow K_n(x)$ , где  $K_n(x)$  — контурный препарат строки, либо столбца изображения в пространстве ГВП.

Поскольку в результате преобразования (6) происходит “нарастающее” подчеркивание границ, причем положение контура не изменяется, т.е. его размытия или сглаживания перепа-

дов интенсивности не происходит, и положение точки контура соответствует локальному экстремуму ГВП, то для его нахождения можно использовать приближенные методы, реализующие оператор  $A_n$ .

Точность получения контурного препарата можно проверить на эталонных изображениях на основании минимизации нормы разности  $\|\varphi_n A_n \Phi_n u(x) - Au(x)\| \rightarrow 0$ . Оператор  $\varphi_n$  является масштабирующим оператором.

Для реализации  $A_n$  применимы, например, алгоритмы (3) либо (5), которые для одномерных функций соответственно приобретают вид

$$x_{k+1} = x_k - [\Phi\{\Phi(x_k)\}]^{-1} \Phi(x_k), \quad (7)$$

$$x_{k+1} = x_k - h\Phi(x_k), \quad (8)$$

где  $\Phi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x)\psi(x-\tau)d\tau$ .

Рассмотрим работу алгоритма (8) получения контурного препарата по строкам  $u(x)$  изображения, например, пороговым методом. Предварительно производится инициализация: задается величина шага  $h = 0,001 \dots 0,5$ , принимается номер строки  $i = 1$ ,  $i = 1, i_{\max}$ :

- для принятого номера строки задается начальное значение  $k = 0$  и выбирается  $x_k$ ;
- определяется ГВП  $\Phi_n(x_k)$  функции  $u(x)$ ;
- находится  $k+1$  приближение  $x_{k+1}$  по алгоритму (8);
- проверяется условие  $|x_{k+1} - x_k| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданная погрешность вычислений, если условие не выполнено, то производится следующая итерация, повторяются два предыдущих шага;
- отмечается на контурном препарате точка с координатами найденного экстремума; увеличивается номер строки на единицу, и алгоритм повторяется до завершения обработки, пока  $i \leq i_{\max}$ .

Аналогично формируется контурный препарат по столбцам изображения.

Преимуществом предлагаемого метода является устойчивость к выбору значения начального приближения  $x_k$ , основной недостаток связан с необходимостью подбора величины шага  $h$ .

Отличие алгоритма (7) от (8) состоит в том, что вычисляется повторное ГВП функции  $u(x)$  в точке  $x_k$ , т.е.  $\Phi_n\{\Phi_n(x_k)\}$ .

Преимуществом предложенного метода является более быстрая сходимость, основной недостаток связан с необходимостью выбора начального приближения в достаточно близкой окрестности к экстремуму.

Эффективность алгоритмов можно повысить, если учитывать при выборе начального приближения  $x_k$  значения, полученные на предыдущем шаге, и предположить непрерывность контура, т.е. последующая точка контура должна лежать в пределах детерминированной, например, единичной окружности, по отношению к найденной точке контура. Это позволяет получить последовательное описание контура путем его пространственной морфологической обработки, т.к. описание точек контура осуществляется путем поиска последовательных локальных экстремумов функции двух переменных.

Предлагается алгоритм морфологического контурного описания полутонового изображения в пространстве ГВП приближенными методами (рис. 2):

- находится номер  $i$  строки изображения, пересекающей первый объект (рис. 2, а), и выполняется ГВП этой строки (рис. 2, б);
- определяются координаты точки максимума  $(x_{\max}, y_{\max})$  —  $u_{n_{\max}}(x)$ ;

- выполняется ГВП в единичной окрестности точки с координатами  $(x_{\max}, y_{\max})$  по строкам и по столбцам, объединяются составляющие;
- находится максимальное значение ГВП  $u_{n_{\max}}(x)$ , и определяются координаты новой точки контура  $(x'_{\max}, y'_{\max})$ ;
- проводится анализ направления контура и принимается решения о координатах следующей точки, принадлежащей контуру;
- алгоритм повторяется до возврата в начальную точку с координатами  $(x_{\max}, y_{\max})$ , т.е. до получения координатного описания контура первого объекта;
- находится точка контура следующего объекта и алгоритм повторяется.

Приведен результат морфологического контурного описания изображения приближенными методами (рис. 2, в, з, д).

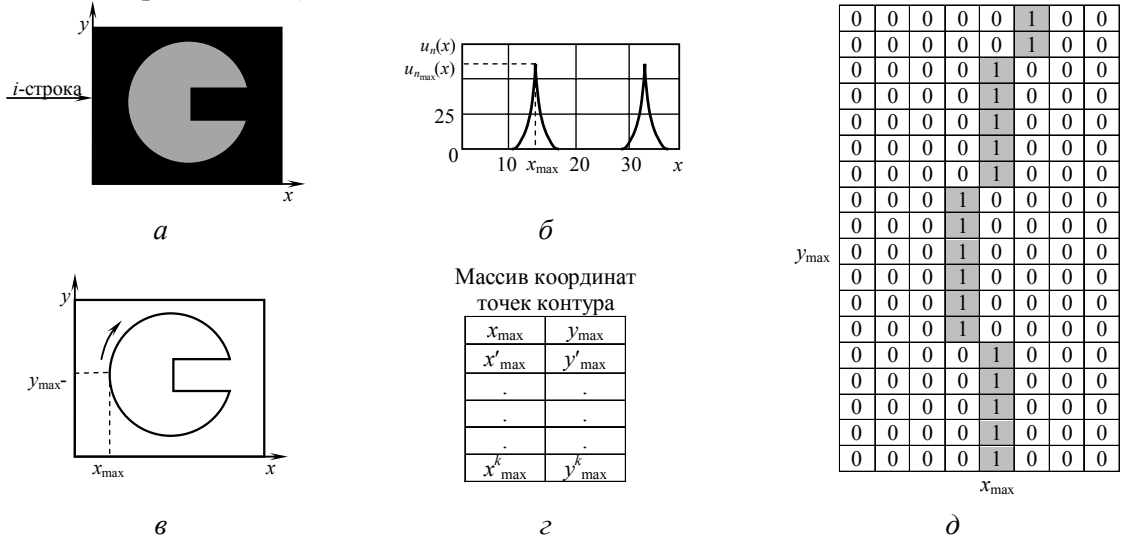


Рис. 2. Морфологическое контурное описание изображения приближенными методами: исходное полутоновое изображение (а); ГВП  $i$ -й строки изображения (б); полученный контурный препарат (в); контурное описание(з); фрагмент контурного препарата (д)

В качестве тестового изображения использовались полутоновые изображения типа “квадрат” разного размера. Результаты моделирования показали, что предложенные алгоритмы обработки в пространстве ГВП приближенными методами сокращают временные затраты на получение контурного описания в среднем на порядок. Сокращение времени обработки по предложенному алгоритму зависит от количества точек, составляющих границу обрабатываемого объекта.

*Временные затраты на получение контурного описания полутонового изображения размером 512×512 пикселей*

Метод контурной обработки	Количество точек	Временные затраты, с				
		порядок фильтра				
		2	4	8	16	
В пространстве ГВП с использованием приближенных методов	в контуре	1024	2,253	2,304	2,350	2,383
		512	1,321	1,342	1,398	1,437
		256	0,811	0,831	0,871	0,901
Пороговый	в изображении	512×512	10,705	11,176	12,324	13,746

Выполнение контурного описания полутоновых изображений в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования по схеме приближенных методов позволило объединить операции получения контурного препарата, “скелетизации” и прослеживания контура, сократить вычислительные затраты на получение контурного описания изображений. Полученное повы-

---

шение быстродействия позволит использовать предложенный подход при разработке широкого класса систем обработки изображений, работающих в реальном масштабе времени.

### Литература

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.
2. Антощук С.Г. Теоретические и реализационные основы создания адаптивно-критериальных систем построения информационных технологий обработки визуальной информации в АСУ: Автореф. дис. . . . д-ра техн. наук / Одес. нац. политехн. ун-т. — Одесса, 2005. — 34 с.
3. Крылов В.И. Вычислительные методы. Т. II / Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. — 399 с.

Поступила в редакцию 5 марта 2007 г.