

УДК 621.391

## НОРМАЛИЗАЦИЯ ПО ТОЛЩИНЕ И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КОНТУРНЫХ ЛИНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

О.Г. ШЕВЧУК, Д.И. КИРИЛЮК, Е.Г. МАКЕЙЧИК, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 27 октября 2015*

Предложен метод нормализации контурных линий по толщине, основанный на масочном анализе локальных ориентаций их фрагментов. Произведено сравнение предложенного метода с известными методами скелетизации. Показано, что предложенный метод превосходит известные методы скелетизации по быстродействию и качеству. Рассмотрены подходы к параметризации кривых линий.

*Ключевые слова:* нормализация контурных линий по толщине, масочный анализ, скелетизация, параметризация кривых линий.

### Введение

При параметризации и идентификации тонкие линии дают значительно лучший результат. Поэтому после обработки изображения операторами выделения границ (Канни, Робертс и др.) необходима нормализация выделенных линий по толщине, в результате которой происходит удаление избыточных контурных пикселей и формируются контурные линии толщиной в один пиксель. Для этого широко используются методы скелетизации Зонг-Сунь [1], шаблонный [2], волновой [3], Щепина [4], ориентированные на обработку площадных объектов любого размера и использующие итеративные алгоритмы удаления избыточных пикселей до достижения требуемой толщины линии. Ориентация на площадные объекты приводит к росту времени контурной обработки и делает данные методы неэффективными для скелетизации контурных линий, имеющих толщину несколько пикселей. Быстрая нормализация контурных линий по толщине возможна за счет не итеративного анализа локальных ориентаций их небольших фрагментов, образованных смежными контурными пикселями, и удаления избыточных контурных пикселей.

### Метод нормализации контурных линий по толщине на основе масок

Предлагается метод нормализации контурных линий по толщине на основе масочного анализа локальных ориентаций их фрагментов, образованных смежными контурными пикселями, и удаления избыточных контурных пикселей. Метод отличается от известных методов скелетизации, использующих многократную обработку пикселей, однократным анализом каждого пикселя в результате квантования по ориентации фрагментов контурной линии с помощью масок, определением избыточных контурных пикселей в этих фрагментах и их удалении, что позволяет повысить скорость и качество контурной обработки.

Алгоритм нормализации контурных линий по толщине на основе масочного анализа локальных ориентации их фрагментов представлен на рис. 1. На вход алгоритма поступает обрабатываемое полутоновое изображение и стек пикселей, яркостное значение которых на изображении  $p = 255$ . Представленный алгоритм состоит из следующих шагов.

1. Расчет ориентации линии:  $O = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$ , где  $X_1, Y_1$  и  $X_2, Y_2$  – координаты концевых

точек локализованной линии.

2. Формирование бинарных масок размером  $2 \times 2$  для квантования по ориентации фрагментов линии (рис. 2). В маске 1 проверяемый (опорный) пиксель линии находится в левом верхнем углу, если ориентация линии  $O < 0$  (рис. 2, а), и в правом верхнем углу, если  $O \geq 0$  (рис. 2, б). В маске 2 – наоборот.

3. Выбор опорного пикселя  $p(y_0, x_0)$ . Из стека координат контурных точек, образующих линию, выбирается очередной опорный пиксель  $p(y_0, x_0) = 255$ .

4. Поиск связанных пикселей с помощью маски 1. В пределах выбранной на шаге 2 (см. рис. 2) маски ищутся пиксели  $p(y_k, x_k) = 255$ , где  $k = 1 \dots 3$  – порядковый номер найденного пикселя. Если их количество  $k = 1 \dots 3$ , то осуществляется переход на шаг 5, если  $k = 0$  – то на шаг 6.

5. Анализ и удаление избыточных пикселей. Проверяются все найденные пиксели  $p(y_k, x_k)$  на соответствие ориентации линии. При несоответствии ориентации, координаты пикселя удаляются из стека, а на изображении пиксель помечается как удаленный  $p(y_k, x_k) = 0$ .

5.1. Расчет ориентации  $d(k)$  для  $k$  найденных пикселей  $p(y_k, x_k)$  относительно опорного пикселя  $p(y_0, x_0)$ :  $d(k) = \frac{y_k - y_0}{x_k - x_0}$ , где  $x_0, y_0$  – координаты опорного пикселя,  $x_k, y_k$  – координаты найденного в маске пикселя.

5.2. Анализ ориентации  $d(k)$  для  $k$  пикселей. Если  $d(k) = 0$  или  $d(k) \rightarrow \infty$ , то осуществляется переход на пункт 5.3, если  $d(k) = 1$  – переход на пункт 5.4.

5.3. Рассчитывается отклонение  $r = \|d(k) - |O|\|$ . При отклонении  $r > 0,1$  координаты найденного пикселя удаляются из стека, а на изображении пиксель помечается как удаленный  $p(y_k, x_k) = 0$ . Осуществляется переход на пункт 5.5.

5.4. В случае  $d(n) = 1$  координаты найденного пикселя удаляются из стека, а пиксель помечается как удаленный  $p(y_k, x_k) = 0$  при  $O = 0$  или  $O \rightarrow \infty$ . Осуществляется переход на пункт 5.5.

5.5 Устранение разрывности. Если найденных пикселей  $k = 2$  и они удалены из стека, то для устранения разрывности линии происходит добавление в стек пикселя  $p(y, x)$ , где

$$y = \begin{cases} y_0, & |O| \leq 0,5 \\ y_0 + 1, & |O| > 0,5 \end{cases}, x = \begin{cases} x_0 - 1, & O = [-2; 0] \\ x_0, & |O| > 2 \\ x_0 + 1, & O = (0; 2] \end{cases}.$$

На изображении пиксель помечается как необработанный  $p(y, x) = 255$ .

6. Поиск связанных пикселей с помощью маски 2. Данный шаг аналогичен шагу 4. Если  $k > 0$ , то осуществляется переход на шаг 5, если  $k = 0$  – на шаг 7.

7. Опорный пиксель на изображении помечается как обработанный  $p(y_0, x_0) = 200$ .

8. Проверка наличия следующего необработанного пикселя. Если в стеке присутствует пиксель, яркостное значение на изображении которого  $p(y_0, x_0) = 255$ , то осуществляется переход на шаг 4, если нет, то происходит выход из алгоритма.

В результате выполнения алгоритма происходит поиск и удаление избыточных пикселей. Избыточными являются пиксели, исключение которых делает контур толщиной в 1 пиксель, не разрывая его.

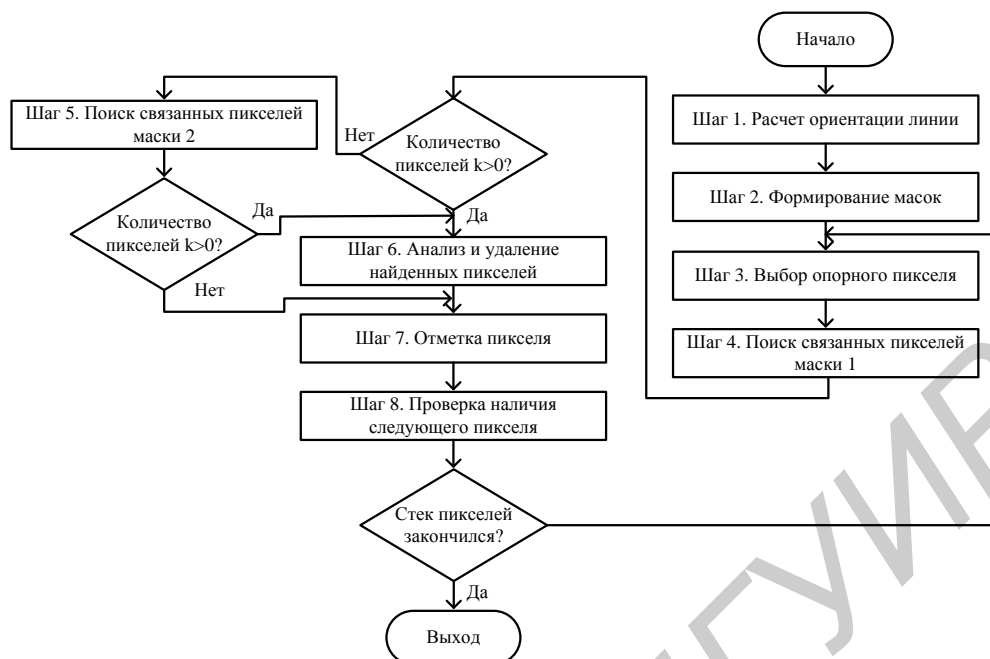


Рис. 1. Блок-схема алгоритма нормализации контурной линии по толщине

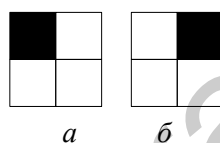


Рис. 2. Маски для квантования по ориентации фрагментов контурной линии:  
 а – для линии с ориентацией  $O < 0$ ; б – для линии с ориентацией  $O \geq 0$

### Подходы к параметризации кривых линий

При описании кривых контуров (линий) устойчивыми параметрами используются следующие подходы:

- приближение кривых линий кривыми второго порядка, в частности, окружности и эллипсы [5] (см. рис. 3, а);
- разложения в ряды Фурье или по другим ортогональным системам [6] (рис. 3, б);
- аппроксимация сплайнами различных степеней [7].

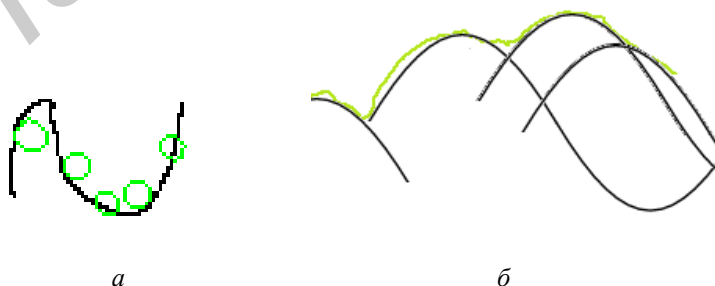


Рис. 3. Приближение кривых линий: а – кривыми второго порядка; б – синусоидами

Общий принцип всех подходов заключается в следующем: описать кривые линии объектами более простой конструкции, свойства которых хорошо изучены.

### Оценка эффективности методов скелетизации и нормализации контурных линий по толщине

Для оценки эффективности методов нормализации контурных линий по толщине использовались следующие линии:

- построенные и повернутые средствами машинной графики;

– выделенные на изображении, полученном с помощью фотокамеры, и повернутые средствами машинной графики;

– выделенные на изображении, полученном с помощью поворачиваемой фотокамеры.

В качестве критериев эффективности методов нормализации линий по толщине использованы время нормализации и дисперсия форм-фактора линии. Форм-фактор линии определен как отношение размера линии, вычисляемого по известным координатам ее конечных точек, к длине линии, определяемой суммой образующих ее контурных точек [4].

Дисперсия форм-фактора рассчитана по формуле: 
$$D = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}}{n}$$
, где  $n$  – количество рассмотренных линий одной длины, для которых рассчитывался форм-фактор;  $x_i$  – значение форм-фактора линии.

Разработанный алгоритм реализован на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV 2.4.10. Для сравнительной оценки работы алгоритма был реализован наиболее известный алгоритм скелетизации – алгоритм Зонг-Сунь. Эксперимент проведен на компьютере со следующими техническими характеристиками: процессор – Intel(R) Core(TM) i7-4700HQ CPU @ 2.40 ГГц; ОЗУ – 6 ГБ; тип системы – 64-разрядная операционная система Windows 8.1. Оценка влияния алгоритмов нормализации и скелетизации линии на определение форм-фактора основана на расчете дисперсии полученных значений форм-фактора для искусственных линий и линий, полученных в результате контурной обработки реальных изображений.

Для искусственно созданных линий использованы размеры 5, 11, 15, 25, 41, 65 и 101 пикселей с кривизной  $k = 0...3$  пикселей относительно идеальной прямой линии. Каждая линия поворачивалась на угол от 0 до 180 град относительно оси  $Y$ .

Графики зависимости дисперсии форм-фактора от кривизны линии различной длины приведены на рис. 4. Обозначения на рис. 4: 1 – значение дисперсии форм-фактора при использовании метода нормализации линии по толщине; 2 – значение дисперсии форм-фактора при использовании алгоритма Зонг-Сунь; 3 – значение дисперсии форм-фактора без применения алгоритмов скелетизации. Искусственная линия длиной 5 (рис. 4, а), 11 (рис. 4, б), 15 (рис. 4, в), 25 (рис. 4, г), 41 (рис. 4, д), 65 (рис. 4, е), 101 (рис. 4, ж) пикселей поворачивалась на угол от 0 до 180 град с шагом 1 град. Для линии длиной 5 пикселей использована кривизна  $k = 0..1$  пикселя, для линии длиной 11 пикселей –  $k = 0...2$  пикселя, для линии длиной 15, 25, 41, 65 и 101 пикселя –  $k = 0...3$  пикселя.

Из рис. 4 следует, что использование метода нормализации или скелетизации улучшает дисперсию форм-фактора при повороте линии. Показано, что при использовании предложенного метода нормализации дисперсия форм-фактора  $D$  в зависимости от длины и кривизны линии в 1,6...4,2 раза ниже, в сравнении с методом скелетизации Зонг-Сунь и в 3,4...7,8 раз ниже, в сравнении со случаем без использования методов нормализации или скелетизации. С увеличением кривизны  $k$  линии дисперсия  $D$  для метода нормализации линии по толщине незначительно увеличивается или уменьшается в зависимости от длины линии, а при использовании метода Зонг-Сунь или варианта без использования методов нормализации или скелетизации, уменьшается в среднем на 10 %.

Для экспериментов использовались также реальные изображения размером  $3920 \times 2204$  пикселей, полученные с помощью фотокамеры при ее повороте на угол от 0 до 90 град (рис.5). Для реальных изображений произведена оценка дисперсии количества выделенных линий (рис. 6) с помощью выражения  $F(\alpha) = (f(\alpha_i) \times 100\%) / f(\alpha_1)$ , где  $f(\alpha_1)$  – множество прямых линий с заданным значением форм-фактора на эталонном изображении при повороте камеры на угол  $\alpha_1 = 0$  град,  $f(\alpha_i)$  – множество прямых линий с заданным значением форм-фактора на изображении  $i$  при повороте камеры на угол  $\alpha_i$  град. Линии на изображениях выделены по значению форм-фактора в пределах  $[0,8, 1,2]$ . При использовании метода нормализации линии по толщине количество выделенных прямых линий увеличивается до 186 раз.

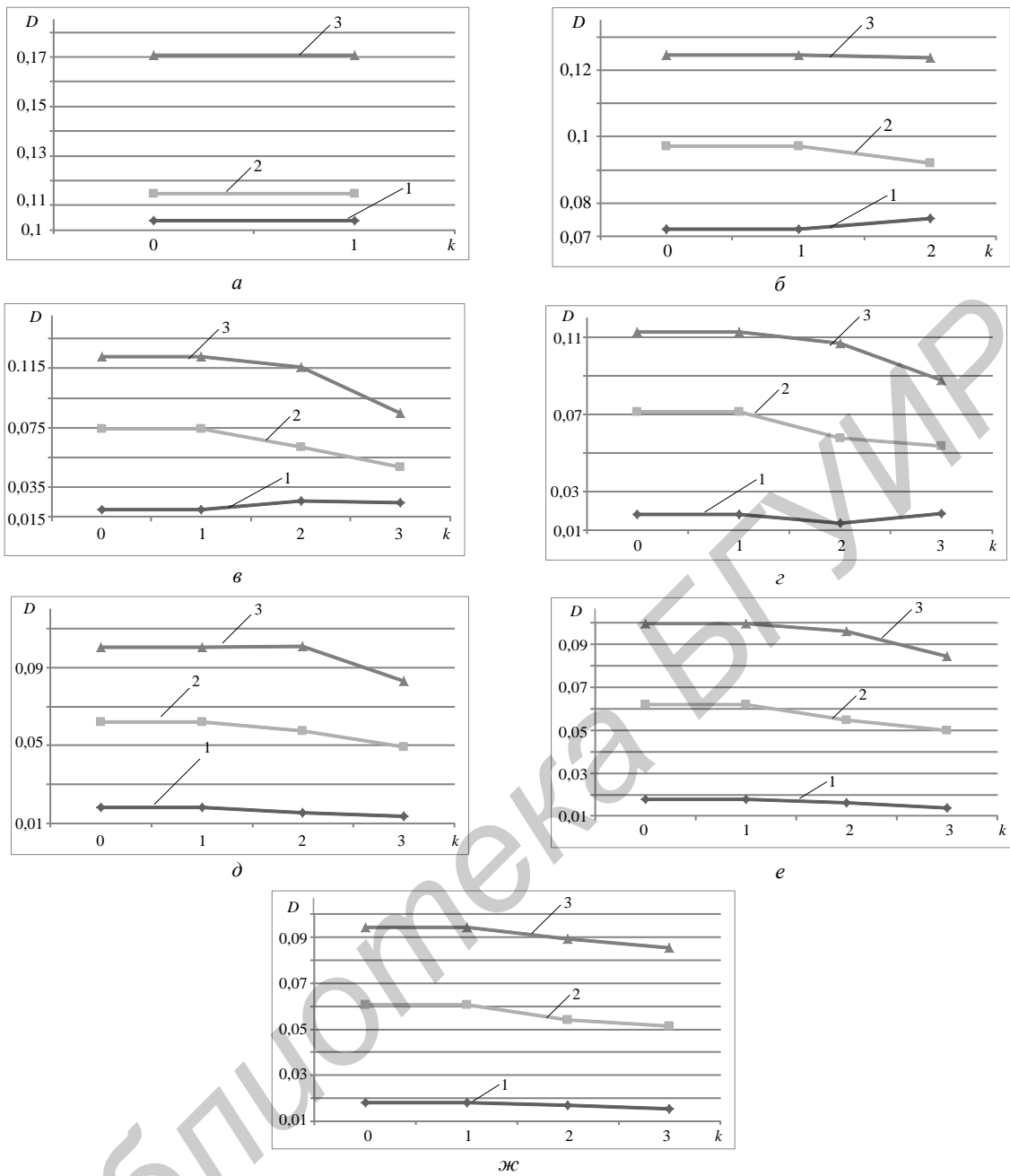


Рис. 4. Дисперсия форм-фактора для линии различной длины: а – длина 5 пикселей; б – длина 11 пикселей; в – длина 15 пикселей; г – длина 25 пикселей; д – длина 41 пиксель; е – длина 65 пикселей; ж – длина 101 пиксель

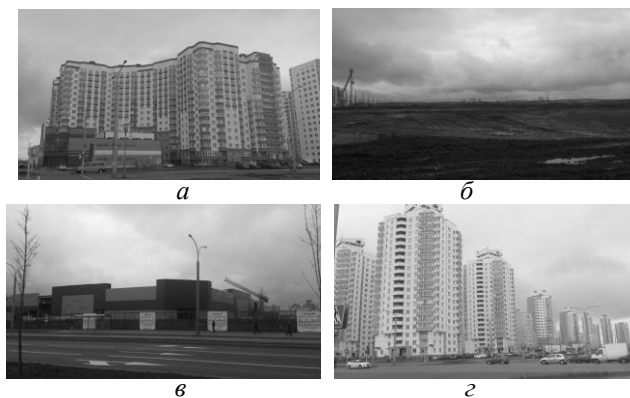


Рис. 5. Реальные эталонные изображения, полученные с помощью фотокамеры: а – изображение 1; б – изображение 2; в – изображение 3; г – изображение 4

Из рис. 6 следует, что в зависимости от угла поворота реальных изображений использование разработанного алгоритма уменьшает дисперсию  $F(\alpha)$  количества выделенных прямых линий по заданному форм-фактору в 1,04...1,62 раз по сравнению с методом Зонг-Сунь, и 1,52...2,3 раз по сравнению с вариантом без нормализации или скелетизации линий. Обозначения на рис. 6: 1 – значение дисперсии форм-фактора без применения алгоритмов скелетизации; 2 – значение дисперсии форм-фактора при использовании алгоритма Зонг-Сунь; 3 – значение дисперсии форм-фактора при использовании метода нормализации линии по толщине.

Оценка времени выполнения разработанного алгоритма в сравнении с методом Зонг-Сунь для искусственной линии приведена в таблице, а также время выполнения локализации для искусственной линии при использовании каждого из методов. Метод нормализации контурной линии по толщине используется после локализации, а метод Зонг-Сунь – до.

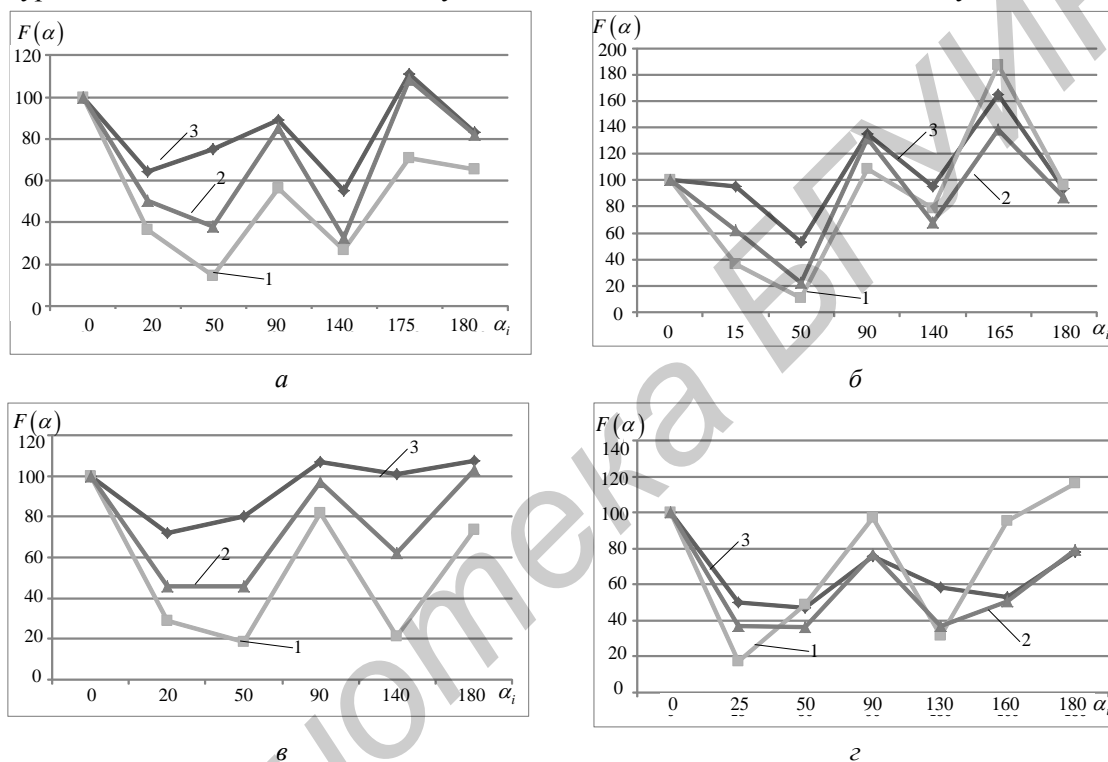


Рис. 6. Дисперсия количества выделенных линий по форм-фактору: а – для изображения 1; б – для изображения 2; в – для изображения 3; г – для изображения 4

**Время выполнения алгоритма локализации и методов нормализации и локализации для искусственной линии**

Длина линии, пиксели	Метод нормализации линии по толщине		Метод Зонг-Сунь, мс	
	Время выполнения, мс	Время локализации, мс	Время выполнения, мс	Время локализации, мс
5	0,0570065	0,0387545	0,110769	0,0395215
11	0,101445	0,062543667	0,35529033	0,063474
15	0,1306015	0,078612	0,593886	0,0808365
25	0,19512325	0,11609525	1,560834	0,118144
41	0,29332025	0,179705	4,1196445	0,1839628
65	0,44578175	0,290381	10,0513325	0,2928783
101	0,6689235	0,4771175	24,203958	0,4819805

Из таблицы следует, что при одинаковом времени локализации линий в зависимости от их длины разработанный метод обеспечивает быстроедействие в 1,9...36 раз по сравнению с методом Зонг-Сунь. Это происходит за счет меньшего количества итераций разработанного алгоритма и однократного анализа каждого пикселя контурной линии.

## Заключение

Разработан метод нормализации контурной линии по толщине на основе анализа ориентации связанных и удалении избыточных контурных пикселей. Показано, что метод эффективнее в быстродействии в 1,9...36 раз по сравнению с методом Зонг-Сунь при обработке искусственной линии длиной от 5 до 101 пикселя: чем больше длина линии, тем выше скорость обработки представленного метода нормализации. Для линии на реальном тестовом изображении метод Зонг-Сунь уступает разработанному методу нормализации линии по толщине в 30 раз. Показано, что при обработке реальных изображений метод нормализации превосходит метод Зонг-Сунь в 29...101 раз, в зависимости от количества выделенных линий. Оценка форм-фактора показала, что представленный метод способствует лучшей идентификации прямых линий по форм-фактору. Для разработанного метода дисперсия форм-фактора  $D$  при обработке искусственной линии длиной от 5 до 101 пикселя в 1,6...4,2 раза ниже, по сравнению с метод Зонг-Сунь и в 3,4...7,8 раз ниже, по сравнению с вариантом без использования метода нормализации. Дисперсия количества выделенных прямых линий по форм-фактору  $F(\alpha)$ , в зависимости от угла поворота реальных изображений, в 1,04...1,62 раз лучше по сравнению с алгоритмом Зонг-Сунь, и 1,52...2,3 раза – по сравнению с вариантом без нормализации или скелетизации линий. Количество выделенных прямых линий при использовании метода нормализации линии по толщине до 186 раз больше, чем без использования методов скелетизации или нормализации.

## NORMALIZATION BASED ON THICKNESS AND PARAMETRIZATION OF CONTOUR LINES ON IMAGES

A.G. SHAUCHUK, D.I. KIRYLIUK, E.G. MAKEICHYK, V.Yu. TSVIATKOU

### Abstract

The method of normalization of planimetric lines on thickness based on the mask analysis of local orientations of their fragments is offered. Comparison of the offered method with known methods of a skeletization is made. It is shown that the offered method surpasses known methods of a skeletization in speed and quality. Approaches to parametrization of curves are considered.

### Список литературы

1. Zhang T.Y., Suen C.Y. // Commun. ACM. 1984. Vol. 27, № 3. P. 236–239.
2. Молчанова В.С., Грунский В.С. // Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС КМ 2013). 2013. С. 743–747.
3. Клубков И.М. // Вест. ДГТУ. 2001. Т. 1, № 1 (7). С. 126–133.
4. Щепин Е.В., Непомнящий Г.М. // Геометрия, топология и приложения. 1990. С. 13–25.
5. Канатников А.Н., Крищенко А.П. Аналитическая геометрия. М., 2002.
6. Жук В.В., Натансон Г.И. Тригонометрические ряды Фурье и элементы теории аппроксимации. Л., 1983.
7. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М., 2001.