

## ВОСЬМИСВЯЗНЫЙ АСИММЕТРИЧНЫЙ АЛГОРИТМ СКЕЛЕТИЗАЦИИ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**В .С. Молчанова**, ассистент,

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,

ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, 87500, Украина

E-mail: [vp24@yandex.ru](mailto:vp24@yandex.ru)

*В статье рассмотрены основные подходы к решению задачи скелетизации бинарных растровых изображений. Выделены их возможности, недостатки и достоинства. Особое внимание уделяется алгоритму топологического утончения объектов, основанному на применении шаблонов Ву-Цаи. Предложена идея совершенствования этого алгоритма, позволяющая устранить его недостатки. Проверка, произведенная на реальных изображениях, показала работоспособность и эффективность предложенного способа.*

**Ключевые слова:** бинарное изображение, скелет, утончение, шаблон, пиксель, связность, локальная окрестность, угловой пиксель.

### ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается проблема скелетизации бинарного изображения. Скелетизация широко используется во многих задачах обработки изображений, например, распознавание символов, обработка картографических изображений и технических чертежей.

Особенность скелетов объектов состоит в том, что они сохраняют информацию о топологической структуре объекта и сокращают объем памяти, необходимой для их хранения.

Проблема скелетизации объектов активно изучается в течении последних лет. В литературе предлагается множество методов [1, 2]. Эти методы можно условно разделить на две категории: методы, основанные на использовании дистанционных карт (метод Блюма), и методы топологического утончения (метод Розенфельда, метод Зонга-Суня и др.). Идея скелетизации с использованием дистанционных карт подробно рассмотрена в [1]. Основным недостатком таких алгоритмов скелетизации, является то, что они не могут гарантировать корректное восстановление топологии исходного объекта, а полученные скелеты очень чувствительны к любым локальным изменениям и шуму на изображении.

Второй тип алгоритмов скелетизации называется алгоритмами топологического утончения. Эти алгоритмы основаны на использовании шаблонов локальных окрестностей для определения возможности удаления, т. е. перекрашивания в белый цвет, каждого пикселя, принадлежащего объекту на изображении. Существует множество алгоритмов скелетизации, основанных на данном принципе [3, 4]. Однако большинство алгоритмов топологического утончения требуют для своей реализации намного больше времени по сравнению с методами, основанными на использовании дистанционных карт [2], а при построении таким образом скелета не всегда можно учесть все структурные особенности объекта, однако такой подход дает лучшие результаты по сравнению с методами дистанционных карт.

**Цель** данной работы состоит в скелетизации изображений технических чертежей, особое внимание уделяется проблеме сохранения информации о структурных особенностях объекта, поэтому необходимо остановиться на алгоритмах топологического утончения.

В данной работе предлагается новый однопроходный алгоритм параллельного утончения. Этот алгоритм основывается на том факте, что

8-связные точки в Евклидовой метрике лучше аппроксимируются, чем 4-связные. Предложенный алгоритм позволяет существенно увеличить скорость получения результата и несколько улучшить качество полученного скелета.

Работа состоит из 5 разделов. Во втором разделе приводятся необходимые определения и обозначения. В разделе 3 представлен обзор идеи алгоритмов топологического утончения, особое внимание уделяется алгоритму Ву-Цаи. В разделе 4 подробно описывается предлагаемый алгоритм. Результаты сравнения результатов предложенного алгоритма и существующих рассматриваются в 5 разделе.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Определим бинарное изображение как матрицу  $P$ , каждый элемент которой (пиксель) принимает значение 1 (черный) или 0 (белый). Объекты на изображении состоят из черных пикселей.

8-смежность  $p$  в изображении  $P$  определяется как 8 пикселей  $(p_0, p_1, \dots, p_7)$ , окружающих пиксель  $p$ . Они обозначаются  $N_8(p)$ . Множество

$N_4(p) = (p_0, p_2, p_4, p_6)$  называется 4-смежным множеством пикселя  $p$ .

Между двумя 8-смежными пикселями  $p(x_p, y_p)$  и  $q(x_q, y_q)$ , где  $x_p, y_p, x_q, y_q$  - координаты, расстояние определяется как  $D_8(p, q) = \max(|x_p - x_q|, |y_p - y_q|)$ , а для 4-смежных

$p_5$	$p_6$	$p_7$
$p_4$	$p$	$p_0$
$p_3$	$p_2$	$p_1$

$$d_4(p, q) = |x_p - x_q| + |y_p - y_q|.$$

Рисунок 1 – 4(8)-

смежность пикселя  $p$

Скелет можно считать 8(4)-связным, если между каждыми черными пикселями  $p_0$  и  $p_n$  существует путь  $p_0 p_1 \dots p_{i-1} p_i p_{i+1} \dots p_n$ , такой что  $p_{i-1}$  является 4(8) – смежным пикселем для  $p_i$  для всех  $1 \leq i \leq n$ .

Граничным называется пиксель черного цвета, такой, что один из 4-смежных ему пикселей имеет белый цвет.

Выпуклым угловым пикселем называется пиксель черного цвета такой, что двое из 4-смежных ему пикселей  $p_i$  и  $p_{i+2}$  окрашены в белый цвет.

Вогнутым угловым пикселем называется черный пиксель, такой, что только один из 8-смежных ему пикселей белый.

Утонченным объектом называется объект, не имеющий внутренних пикселей. Утонченный объект не всегда представляет собой простой путь. Например, линия шириной в 2 пикселя не является простым путем [1].

### АЛГОРИТМЫ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО УТОНЧЕНИЯ

Скелетизация путем топологического утончения обычно выполняется путем итерационного удаления граничных пикселей контура изображения. Стираемые пиксели должны соответствовать трем следующим критериям:

- 1) удаляемый пиксель не является конечным;
- 2) при удалении пикселя ни одна связность не нарушается;
- 3) при удалении пикселя не возникает размытие объекта на изображении.

Большинство существующих алгоритмов топологического утончения отличаются только способом тестирования пикселей на соответствие этим критериям. Среди таких алгоритмов наибольший интерес вызывает алгоритм Зонга-Суня. Этот алгоритм выполняется в два этапа. На первом этапе обрабатываются северо-западные граничные и юго-восточные угловые соседи пикселя  $p$ ; на втором – юго-восточные граничные пиксели и северо-западные выпуклые угловые [3]. Использование двухпроходного

итерационного алгоритма позволяет избежать чрезмерной эрозии результирующего изображения.

Недостатками алгоритма Зонга-Суня является проблема остаточной эрозии изображения в некоторых особых ситуациях (например, диагональная линия шириной в 2 пикселя), а также значительные затраты времени, необходимого на обработку изображения. Применение алгоритма Зонга-Суня для обработки конструкторской документации показало, что большая часть времени уходит на обработку белых пикселей, а результирующий скелет не всегда имеет единичную толщину.

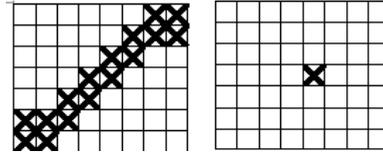


Рисунок 2 – Проблема эрозии: а) исходное изображение; б) изображение, разрушенное в ходе обработки методом Зонга-Суня

Дальнейшее развитие идеи топологического утончения объектов было направлено на устранение этих недостатков. В [4] предлагается множество шаблонов для сопоставления, позволяющих определить возможность удаления каждого пикселя. Эти шаблоны показаны на рисунке 3. Здесь  $x$  показывает, что соответствующий пиксель может иметь значение 0 или 1,  $c$  показывает, что соответствующий пиксель контура может быть удален [4].

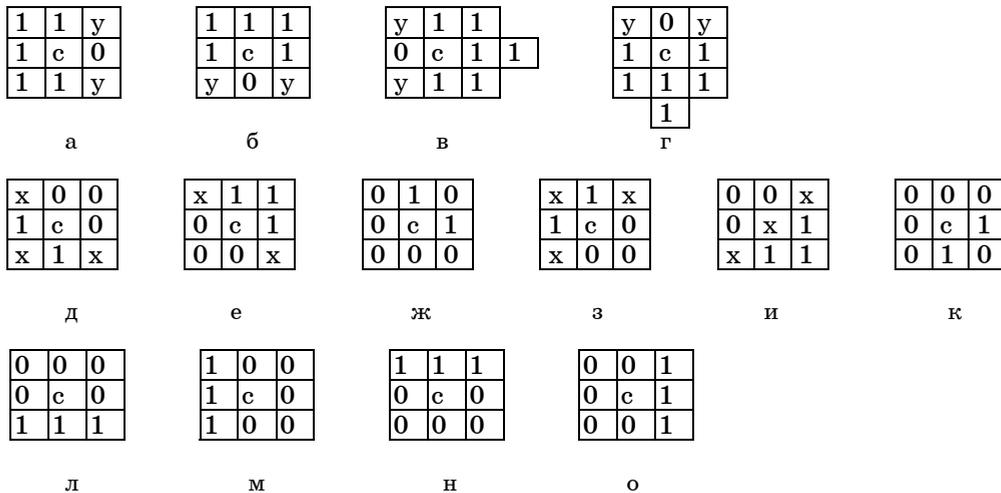


Рисунок 3 – Шаблоны Ву-Цаи

На сегодняшний день алгоритм Ву-Цаи является одним из самых быстрых алгоритмов топологического утончения, кроме того, он не чувствителен к шуму на изображении. Недостатком алгоритма Ву-Цаи является некоторое нарушение структуры исходного объекта, возникающее ввиду некорректной обработки угловых пикселей. Данная проблема является следствием того, что скорость утончения объекта в области выпуклых и вогнутых углов различна. Алгоритм Ву-Цаи использует 4-смежные блоки, для которых расстояние между выпуклым угловым пикселем и фоном всегда равно 1. Такой пиксель считается граничным и может быть удален на текущем шаге. Соответствующее расстояние для вогнутого углового пикселя будет равно 2 и, следовательно, пиксель может быть удален только на последующем шаге.

На рисунке 4а показано некоторое исходное изображение. На рисунках 4б и 4в число в клетках соответствующего пикселя показывает номер прохода, за который пиксель был удален.

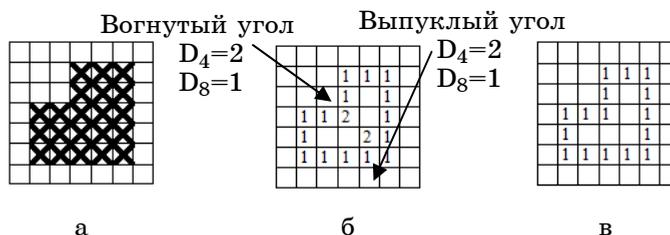


Рисунок 4 – 4-смежная и 8-смежная аппроксимация Евклидовой метрики

### ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА

Проблема некорректной обработки углов может быть решена использованием 8-пути, т. к. все выпуклые угловые пиксели и вогнутый угловой пиксель имеют 8-путь равный 1 и, следовательно, могут быть удалены за один проход.

Шаблоны, предложенные Ву-Цаи, удаляют все граничные пиксели, включая выпуклые угловые. Поскольку вогнутые угловые пиксели не являются граничными, то они не могут быть удалены с использованием этих шаблонов. Поэтому необходимо выявить вогнутые угловые пиксели и найти необходимое условие сохранения связности объекта при их удалении.

Предлагается дополнить алгоритм Ву-Цаи несколькими дополнительными шаблонами и условиями, наложенными на пиксели объекта.

Целесообразно пользоваться следующими соображениями. Каждый вогнутый угловой пиксель имеет два смежных граничных пикселя. Среди шаблонов Ву-Цаи для проверки соответствия пикселя данному условию могут использоваться шаблоны а - ж, и, к. Для каждого из указанных шаблонов определено, какие пиксели и при каких условиях могут быть вогнутыми, например, для шаблона (а): если пиксель  $p_1=1$ , то  $p_0$  – вогнутый угловой; если пиксель  $p_3=1$ , то  $p_4$  – вогнутый угловой.

Поскольку угловой вогнутый пиксель имеет ровно 2 граничных пикселя, то пиксель можно считать вогнутым угловым, если для двух его соседей он помечен как вогнутый угловой.

Другой проблемой топологического утончения объектов является нарушение связности объекта.

Эта проблема может быть решена расширением множества шаблонов Ву-Цаи (а-о) новым дополнительным шаблоном (п), представленным на рисунке 5.

	0	1	2	3
0	x	1	x	1
1	1	x	1	1
2	x	1	1	1
3	1	1	1	0

Рисунок 5 – Шаблон для удаления вогнутых углов

Здесь значение пикселей (0, 0), (0, 2), (1, 1) и (2, 0) может быть произвольным, поскольку пиксели (0, 1), (0, 3), (1, 0) и (3, 0) черные в любом случае, а пиксели (1, 2) и (2, 1) не могут быть удалены на данном этапе независимо от того, какие значения имеют пиксели (0, 0), (0, 2), (1, 1) и (2, 0). При удалении вогнутого углового пикселя с связность в этих точках сохраняется благодаря точкам (1, 2) и (2, 1). Шаблоны, полученные путем вращения шаблона (п) на 90, 180 и 270 градусов дополняют алгоритм.

Таким образом, когда пиксель определен как вогнутый угловой, для обеспечения сохранения связности, необходимо выполнить еще 4

дополнительные проверки для того, чтоб убедиться, что удаление пикселя не приведет к нарушению связности.

### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Исходя из приведенных в предыдущем разделе рассуждений, алгоритм будет разработан следующим образом. На каждом этапе будут использованы 14 шаблонов Ву-Цаи для уточнения вогнутых угловых и граничных пикселей. Ситуация, когда пиксель соответствует шаблонам (а)-(ж) или (и) сводится к поиску вогнутого углового пикселя среди 4-х соседних. Если вогнутый угловой пиксель найден, то выполняется проверка на сохранение связности. Если условие сохранения связности объекта выполняется, то пиксель удаляется.

Для поиска вогнутых угловых пикселей в качестве промежуточной структуры данных используется матрица указателей. Каждому пикселю на изображении соответствует некоторый маркер. Псевдокод, описывающий данный алгоритм представлен ниже.

Входные данные: бинарное изображение  $I_0$

Выходные данные: скелет  $S$  как результат уточнения  $I_0$

Шаг 1.  $I=0$

Шаг 2. Выполнять {

Шаг 3.  $flag = ложь; i = i + 1;$

Шаг 4. Для всех пикселей  $p$  в  $I_{i-1}$  {

Шаг 5.  $I_i(p) = I_{i-1}(p);$

Шаг 6. Если  $(p = 1 \ \&\& \text{соседи } p \text{ соответствуют одному из шаблонов Ву-Цаи})$  {

Шаг 7.  $p = 0; flag = истина;$

Шаг 8. Для  $(p_c$  кандидат на вогнутый угловой)

Шаг 9. Если  $p_c$  не помечен помечаем  $p_c;$

Шаг 10. В противном случае

Шаг 11. Если  $(p_c$  соответствует дополнительному шаблону)  $p_c = 0; \}$  }

Шаг 12. До тех пор, пока  $(flag=истина);$

Шаг 13.  $S = I_i.$

В представленном алгоритме  $I_i, i=1, 2, 3, \dots$ , представляет собой промежуточный результат после  $i$ -го прохода. На 4-м шаге обрабатываются все пиксели одновременно. На 5-м шаге копируется промежуточное уточненное изображение, полученное в ходе  $(i-1)$  прохода. Поиск граничных пикселей, которые могут быть удалены, производится на 6-м шаге. На 8-м шаге производится проверка условия, определяющего является ли какой-либо из 4-х соседей пикселя  $p$  потенциальным вогнутым угловым, затем каждый потенциальный вогнутый угловой пиксель обрабатывается дополнительно. На 11-м шаге проверяются все соседи пикселя  $p_c$  на соответствие шаблону (п). Алгоритм завершается, когда ни один пиксель больше не может быть уточнен.

Для любых двух пикселей  $p$  и  $q$  на изображении выполняется условие  $d_8(p, q) = d_4(p, q)$ , что означает, что 4-путь от пикселя объекта до фона больше, чем 8-путь от того же пикселя до фона. Таким образом, алгоритм, использующий 8-путь, выполнится за равное или меньше количество проходов, по сравнению с алгоритмом, использующим 4-путь.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Каждый из описанных алгоритмов: алгоритм Зонга-Суня, алгоритм Ву-Цаи и предложенный в работе алгоритм реализованы в среде программирования C++ Builder 2010.

Результаты сравнения трех алгоритмов для нескольких бинарных изображений представлены на рисунках 6-8. Скелеты изображений

отмечены черным цветом. На всех примерах (а), (б) и (в) соответственно результаты применения алгоритма, предлагаемого в данной работе, алгоритма Ву-Цаи и алгоритма Зонга-Суня, сравнение алгоритмов выполнялось по следующим критериям:

- 1) сохранность структуры исходного объекта;
- 2) эрозия полученного скелета;
- 3) сопротивление шуму.

Иллюстрация тестирования алгоритмов на сохранность структуры исходных объектов представлена на рисунке 6. Предлагаемый 8-смежный алгоритм генерирует скелет, который сохраняет углы исходного изображения. Результат алгоритма Ву-Цаи имеет значительные отклонения от исходного изображения. Алгоритм Зонга-Суня также дает некоторое отклонение результата от исходной топологии объекта.

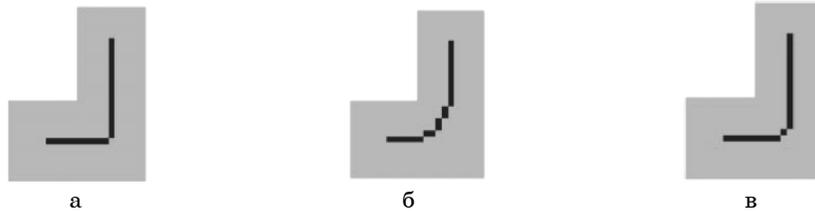


Рисунок 6 – Обработка углов

Иллюстрация тестирования алгоритмов на эрозию представлена на рисунке 7. С данным изображением не справился только алгоритм Зонга-Суня, в результате которого две пересекающиеся линии преобразовались в одну линию длиной 3 пикселя. Предлагаемый в работе алгоритм, а также алгоритм Ву-Цаи способны обеспечить отсутствие эрозии результирующего изображения.

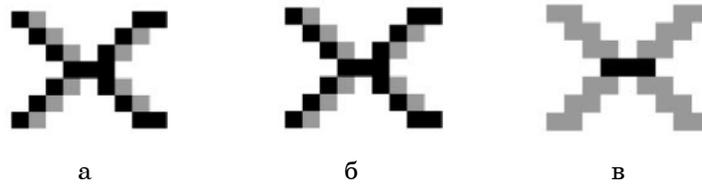


Рисунок 7 – Пример эрозии

Иллюстрация тестирования алгоритмов на устойчивость к шуму на изображении представлена на рисунке 8. Результаты тестирования показывают, что все 3 алгоритма справляются с обработкой шума вдоль границ объекта. С обработкой шума в углах объекта лучше всего справляется алгоритм Зонга-Суня. Алгоритм Ву-Цаи и предлагаемый в работе алгоритм, не способен корректно справиться с таким шумом. Решением этой проблемы может служить предварительная обработка изображения и устранение этой проблемы перед скелетизацией изображения.

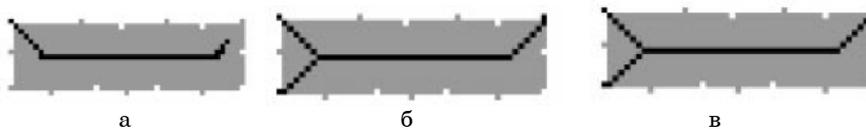


Рисунок 8 – Подавление шума

Таблица 1 – Сравнение времени, затраченного на выполнение алгоритма

Время/итераций	Пересекающиеся прямые	Эрозия	Шум
Размер	24x30	8x9	50x30
Метод Зонга-Суня	15.08/14	0.98/8	21.01/14
Метод Ву-Цаи	11.64/9	0.35/2	15.58/8
Предлагаемый метод	10.59/7	0.35/2	16.17/8

Время, затраченное на обработку каждого из приведенных изображений, представлено в таблице 1

Таким образом, можно сделать вывод, что методы Ву-Цаи и метод, предлагаемый в работе, выполняются быстрее, чем метод Зонга-Суня. Сравнение алгоритма Ву-Цаи и предлагаемого в работе алгоритма дает переменные результаты зависимо от индивидуальных характеристик тестовых изображений.

## ВЫВОДЫ

В данной работе предлагается новый параллельный асимметричный алгоритм утончения объектов на изображении. Благодаря использованию 8-направленности результирующий скелет сохраняет топологическую и структурную информацию исходного объекта лучше, чем 4-направленные утончающие алгоритмы. При решении задачи обработки технических чертежей это качество очень важно. Таким образом, предложенный алгоритм может с успехом использоваться при решении задачи обработки и скелетизации технических чертежей.

Эксперименты показали, что ввиду необходимости выполнения дополнительных проверок на некоторых изображениях представленный алгоритм работает несколько медленнее, чем алгоритм Ву-Цаи. Этот недостаток не является существенным, поскольку современные ПК обладают такой вычислительной мощностью, что разница во времени выполнения обоих алгоритмов будет неощутимой.

### 8-CONNECTED ASYMMETRIC ALGORITHMS OF SKELETONIZATION OF BINARY IMAGES

**V. S. Molchanova,**

*Priazovskiy State Technical University,  
7, Universitetskaya Str, 87500, Mariupol, Ukraine  
E-mail: [vp24@yandex.ru](mailto:vp24@yandex.ru)*

*The article describes the main approaches to the problem of skeletonization of binary raster images. Their capabilities, advantages and disadvantages are highlighted. Special attention is paid to the topological thinning algorithm objects based on the use of templates Wu Tsai. The proposed is the idea of improving the algorithm, which can eliminate the disadvantages. Tests are made on real images that shows the efficiency and effectiveness of the proposed method.*

**Key words:** *binary image, skeleton, thinning, pattern, pixel, connectivity, local neighborhood, corner pixel.*

### 8-ЗВ'ЯЗНИЙ АСИМЕТРИЧНИЙ АЛГОРИТМ СКЕЛЕТИЗАЦІЇ БІНАРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

**В. С. Молчанова,**

*ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»  
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87500, Україна  
E-mail: [vp24@yandex.ru](mailto:vp24@yandex.ru)*

*У статті розглянуто основні підходи до вирішення проблеми скелетизації бінарних растрових зображень. Виділено їх можливості, недоліки і переваги. Особлива увага приділяється алгоритмам топологічного стоншення об'єктів, заснованим на застосуванні шаблонів Ву-Цаї. Запропонована ідея вдосконалення цього алгоритму дозволяє усунути*

його недоліки. Перевірка, проведена на реальних зображеннях, показала працездатність і ефективність запропонованого способу.

**Ключові слова:** бінарне зображення, скелет, потоншення, шаблон, піксель, зв'язність, локальна околиця, кутовий піксель.

#### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений. Фигуры. Скелеты. Циркуляры / Л. М. Местецкий. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2009. – 287 с.
3. Zhang T. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T. Zhang, C. Suen // Communications of the ACM, 1984. – №3, Vol. 27. – P. 236-239.
4. Wu R.-Y. A new one-pass parallel thinning algorithm for binary images / R.-Y. Wu , W.-H. Tsai // Pattern Recognition Letters. - 1992. – № 10, Vol. 13. – P. 715-723.

*Поступила в редакцию 14 марта 2013 г.*