

Сегментация изображений на основе прослеживания контуров применительно к анализу снимков электронных микросхем

П. А. Чочиа

Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 22.06.2009

Аннотация—Рассматривается алгоритм сегментации снимков микросхем, получаемых сканирующим электронным микроскопом. Изображения характеризуются высоким уровнем шума и наличием двух различных типов границ между наблюдаемыми объектами. Сегментация осуществляется прослеживанием контуров на границах между паттернами. Реализуется обнаружение границ первого типа, преобразование границ второго типа к первому и окончательное прослеживание контуров по объединенному синтезированному изображению. Обсуждается вопрос удаления ложных контурных линий и сегментов.

1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке электронных микросхем необходим контроль качества изготавливаемых пластин, для чего может использоваться анализ их поверхности с помощью снимков, формируемых сканирующим электронным микроскопом. Важным этапом такого анализа является сегментация получаемых изображений. Результатом сегментации должно стать разбиение снимка на отдельные области, т.е. присвоение каждому элементу изображения индекса, соответствующего тому или иному объекту.

Исходное изображение представляет собой двумерный монохромный сигнал, содержащий множество областей (паттернов) — образов реальных объектов, разделенных контурными границами. Значения сигнала во внутренних областях паттернов меняются слабо, но характеризуются наличием шума достаточно высокого уровня. Примеры исходных снимков, полученных электронным микроскопом, показаны на Рис. 1.

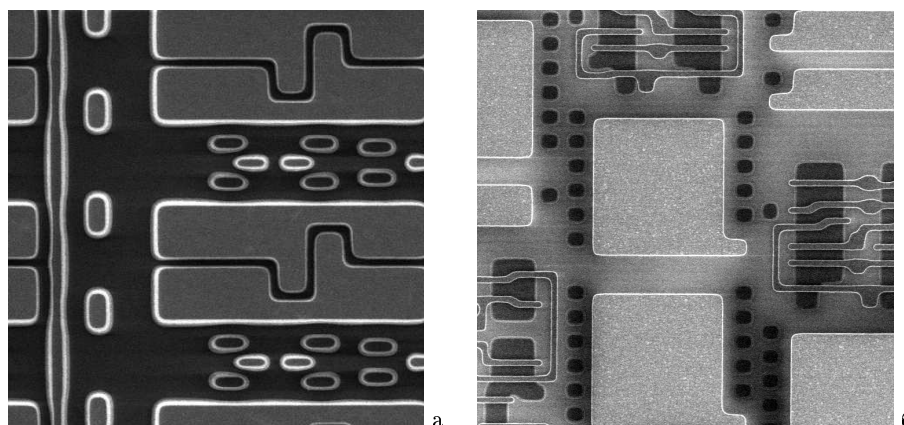


Рис. 1. Исходные изображения.

Проблема сегментации изображений изучается много лет. Разработано много различных методов и алгоритмов [1–3], но применимость каждого из них очень сильно зависит от решаемой

задачи. Для сегментации был выбран подход, основанный на обнаружении и прослеживании замкнутых контурных линий на границах паттернов, построении бинарной контурной карты сегментов и последующей индексации элементов внутри полученных областей. Основным здесь является формирование корректной карты контуров. Особенность рассматриваемой задачи состоит в том, что возможны два различных типа границ между паттернами: границы в виде разделяющих контрастных светлых линий (назовем их границами первого типа), и границы в виде яркостного перепада между паттернами (границы второго типа).

Известно много различных алгоритмов обнаружения контурных границ. Большинство из них основано на фильтрации и преобразовании изображения в некоторый двумерный массив, значения которого отражают вероятности нахождения контура в соответствующей точке. Большинство контурных фильтров (операторов) основаны на вычислении первой производной (операторы Робертса, Собеля [4, 5] и др. [1, 3, 6, 7]) или второй производной (оператор Лапласа [3]). Результаты их применения неплохи с точки зрения визуальной оценки, однако не удовлетворяют ряду формальных критериев, в частности требованиям непрерывности и минимальной толщины контурных линий. Другой известный подход основан на обнаружении точек перехода через ноль второй производной (“zero crossing”) [8]. Он обеспечивает выполнение указанных требований, однако в результате возникает много несвязанных между собой пятен, недостаточно хорошо соответствующих реальным контурам. Имеется также ряд других методов и алгоритмов [1–3, 7], но ни один из них не подходит напрямую для нашей задачи.

Альтернативой алгоритмам фильтрации является метод прослеживания контуров [9]. Для решения поставленной задачи такой подход имеет ряд преимуществ, среди которых: возможность получения карты с непрерывными контурными линиями; прослеживание линии в случае небольших нарушений контурных перепадов (разрывов); проведение контурных линий минимальной толщины. Из недостатков можно отметить: зависимость от шумов на изображении; необходимость предварительного выбора начальных точек прослеживания контуров; определенные сложности в точках пересечения или ветвления контуров; необходимость дополнительного анализа и фильтрации полученной карты контуров.

2. ОБЩАЯ СХЕМА АЛГОРИТМА СЕГМЕНТАЦИИ

Два возможных типа границ объектов на исходных изображениях требуют различных подходов к построению алгоритмов их обнаружения и прослеживания. Чтобы не разрабатывать два самостоятельных алгоритма, было решено применять дополнительное преобразование исходного изображения к виду, при котором границы второго типа приобретают форму границ первого типа, что позволит использовать один и тот же алгоритм прослеживания контуров повторно. Получаемая промежуточная карта контуров затем подвергается необходимым операциям фильтрации и корректировки, и формируется финальная карта контуров.

Алгоритм состоит из следующих этапов.

1. Предобработка. Формирование изображения с выровненным (приведенным к нулю) фоном и сохраненными гребнями между паттернами.
2. Обнаружение и прослеживание границ первого типа по выровненному изображению.
3. Преобразование границ второго типа на изображении к виду границ первого типа и объединение результата с картой контуров, проведенных по границам первого типа.
4. Прослеживание контуров по полученному препарату, получение объединенной карты.
5. Обработка и корректировка полученной промежуточной карты контуров, удаление ложных линий, формирование предварительного множества сегментов изображения.
6. Фильтрация множества сегментов, получение окончательной карты контуров и построение финального разбиения изображения.

3. ПРЕДОБРАБОТКА ИСХОДНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Задача предобработки — получить сигнал, отражающий вероятность нахождения контура в каждой точке изображения. При этом внутренние области паттернов (фоновые элементы) должны иметь близкие к нулю значения, а гребни между паттернами (границы первого типа) — близкие к единице. Будем называть такое изображение *выровненным по нулю изображением* или просто *выровненным изображением*.

3.1. Выровненное изображение с границами первого типа

Для получения выровненного изображения может быть использован метод нерезкого маскирования [1, 3] — разность между изображением и его усредненной копией:

$$M_v(x) = x - S_v(x). \quad (1)$$

Здесь x — элемент исходного изображения X , $S_v(x)$ — сглаживающий оператор (среднее значение X по фрагменту $v \times v$ точек с центром в точке x), а $M_v(x)$ — результат операции. Из-за того, что ширина и контраст гребней варьируются в достаточно больших пределах, возникают некоторые артефакты. Результат удастся улучшить, применяя оператор $S_v(\cdot)$ не к исходному, а к изображению с предварительно удаленными светлыми гребнями. Такой подход реализуется операцией клиппирования с помощью пороговой процедуры: $x_c = x$, если $M_a(x) \leq t$, и $x_c = M_b(x)$, если $M_a(x) > t$. Т.е. если значение M_a , получаемое оператором (1) по окрестности $a \times a$, превосходит порог t , то значение элемента в данной точке (x_c) заменяется значением среднего по окрестности $b \times b$ ($b > a$). Параметры a , b и t подбирались при обработке тестовых снимков. Для снижения иногда возникающего “дребезга” использовалась дополнительная операция медианной фильтрации по окрестности μ из 3×3 элементов:

$$x_m = \text{med}\{x_c \in \mu\}. \quad (2)$$

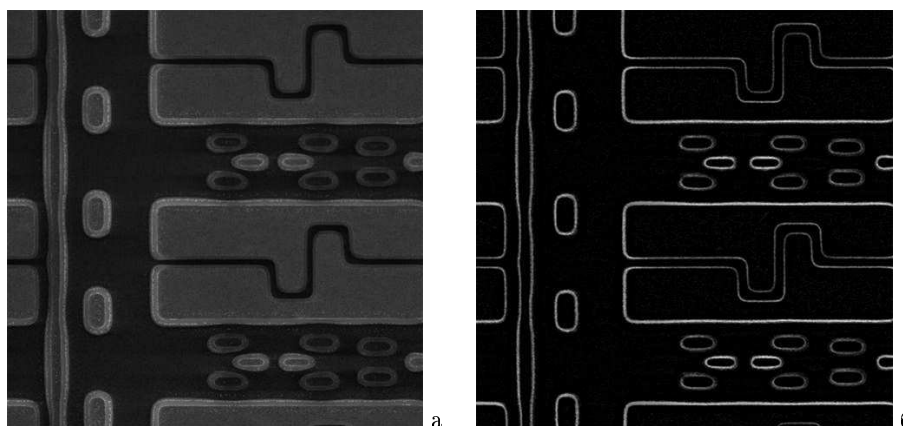


Рис. 2. Результат клиппирования и медианной фильтрации (а) и выровненное изображение (б).

Результат клиппирования изображения и медианной фильтрации показан на Рис. 2а. Выравнивание фона изображения до нулевого уровня осуществляется аналогично (1) вычитанием из исходного изображения X сглаженного по фрагменту клиппированного изображения:

$$A(x) = x - S_v(\text{med}(x_m)).$$

Если полученная разность меньше нуля, то $A(x)$ приравнивается нулю. Выровненное изображение показано на Рис. 2б. Далее оно используется для прослеживания контуров.

3.2. Выровненное изображение с границами второго типа

Для работы с границами второго типа необходим алгоритм их преобразования в границы первого типа, чтобы в дальнейшем использовать единый алгоритм прослеживания контуров. В качестве исходных данных для такого преобразования было выбрано изображение с клипшированными гребнями, полученное выше по формуле (2), а в качестве преобразования — вариант градиентного фильтра, вычисляемый как величина размаха в окрестности 3×3 элементов, т.е. разность максимального и минимального значений элементов:

$$x_g = \max\{x_m \in \mu\} - \min\{x_m \in \mu\}. \quad (3)$$

Использование в (3) клипшированного изображения позволяет заметно подавить влияние границ первого типа, но даже и при этом еще не обеспечивается идеального решения. Результат показан на Рис. 3.

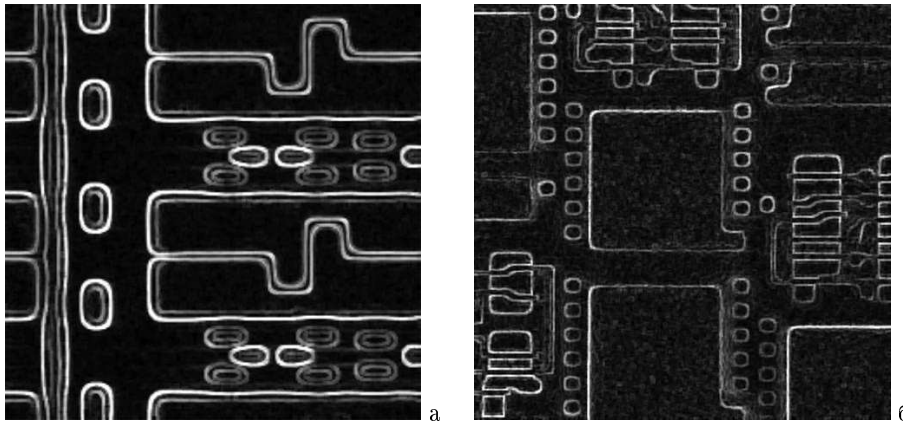


Рис. 3. Вид изображений после фильтра (3).

Видно, что на изображении Рис. 3б границы второго типа превратились в белые гребни на выровненном фоне; в то же время на Рис. 3а рядом с границами первого типа возникли ложные линии, а некоторые границы первого типа исчезли. Ниже будет рассмотрено, как использовать полученное выровненное изображение с границами второго типа.

3.3. Поле направлений контуров

При прослеживании границ требуется информация о направлении контуров; для этого строится поле направлений, содержащее информацию о направлении контура в каждой точке изображения. Известно, что максимальная изменчивость значений элементов наблюдается в перпендикулярном контуру направлении, а минимальная — вдоль контура, поэтому направление контурного перепада определяется как направление максимума вариации значений пикселей. Для анализа были приняты достаточными 4 направления: 0° , 45° , 90° и 135° .

Выберем некоторое направление анализа p . Пусть x , x_- и x_+ — значения в точках вдоль направления p , подсчитанные как средние по окрестностям, вытянутым по направлению, перпендикулярному p (средние значения считаются по окрестностям 5×1 пикселей). Подсчитаем функционал, равный сумме модулей разностей вдоль направления p : $f_p(x) = |x_- - x| + |x - x_+|$. Вычисляются 4 значения функционала $f_p(x)$: $f_0(x)$, $f_{45}(x)$, $f_{90}(x)$ и $f_{135}(x)$ по выровненному по нулю изображению. Направление, на котором достигается максимум $f_p(x)$, указывает направление контурного перепада в данной точке, а сама контурная линия располагается в

перпендикулярном направлении. Разность $(\max f_p(x) - \min f_p(x))$ отражает степень выраженности контура. Полученные значения составляют поле направлений, используемое для прослеживания контурных линий.

4. АЛГОРИТМ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ КОНТУРОВ

Прослеживание контуров осуществляется по выровненному по нулю изображению при использовании сформированного поля контуров. Алгоритм включает следующие этапы:

1. Определение контурного порога и отыскание начальных точек прослеживания контурных линий на выровненном по нулю изображении.

2. Проведение контурных линий:

- выбирается начальная точка и воспринимается как текущая точка прослеживания;
- выбирается направление контура в текущей точке;
- определяется ширина гребня и координаты следующей точки;
- проводится сегмент линии в следующую точку прослеживания;
- вычисляются параметры профиля контурной линии;
- осуществляется переход к новой точке прослеживания.

4.1. Контурный порог

Прослеживание контура может начинаться с любой принадлежащей ему точки, поэтому нет необходимости обнаруживать все или большинство точек контурной линии, а достаточно лишь одной *начальной точки* для прослеживания всего контура. Множество начальных точек прослеживания контуров находится сравнением значений элементов выровненного по нулю изображения с *контурным порогом*. Поскольку уровень шума на изображениях сильно варьируется — среднееквадратическое отклонение шума может быть от 6–10 градаций на изображении с контрастными деталями до 25–35 градаций на изображении без деталей, то подобрать единый порог невозможно, и его выбор осуществляется автоматически.

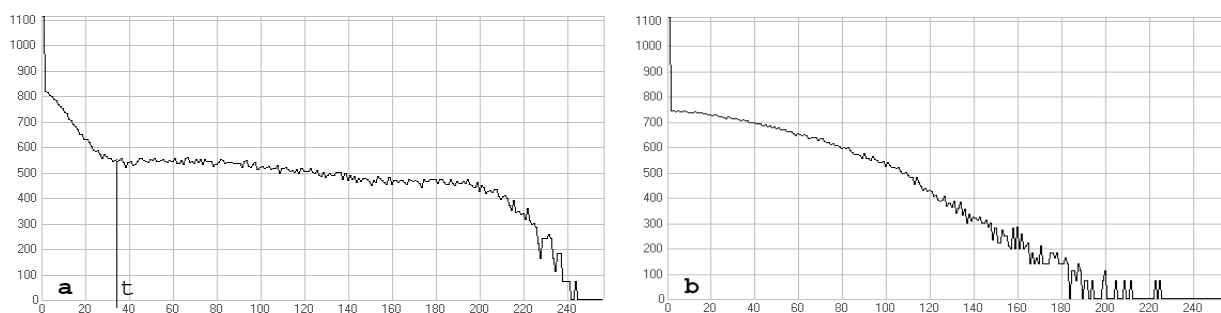


Рис. 4. Гистограмма изображения с деталями (а), и без (б) в логарифмическом масштабе.

На Рис. 4 показаны гистограммы двух выровненных по нулю изображений; первое из них содержит детали (а), а второе (б) не содержит. Хорошо видно, что график (а) имеет характерную точку перегиба в районе значения яркости 35 — точка *t*. На втором же графике подобной точки не имеется. Согласно модели изображения [11] такой перегиб возникает в случае, когда наблюдается смесь двух случайных процессов со значительно различающимися распределениями (дисперсиями). В нашем случае — это смесь значений элементов на светлых гребнях и шума на ровных участках фона.

Точка перегиба графика отыскивается как точка, где график существенно отклоняется в сторону больших значений от прямой линии, аппроксимирующей график в области малых яркостей. Найденная величина t используется как значение контурного порога. Результатом порогового обнаружения является двоичное изображение, в котором ненулевые точки суть кандидаты на начальные точки прослеживания контурных линий.

4.2. Направление контура

Первым шагом на пути отыскания следующей точки контура является выбор направления контура. Для этого окрестность точки прослеживания с радиусом 5 элементов делится на 8 секторов по 45° , биссектрисы которых расположены под углами $n \times 45^\circ$ ($n = 0, \dots, 7$) (Рис. 5); т.е. каждый сектор захватывает область с углами $n \times 45^\circ \pm 25.5^\circ$. Вычисляются средние значения элементов внутри трех секторов: сектора, направление которого совпадает с текущим направлением контура, и двух соседних. Для уменьшения флуктуаций среднее значение в секторе, совпадающем по углу с текущим направлением контура, умножается на коэффициент 1,2. Направление, на котором достигается максимум, выбирается как новое направление контура (в начальной точке прослеживания линии в качестве направления контура выбирается то, которое записано в карту направлений). На основании этого определяются предварительные координаты следующей точки прослеживания.

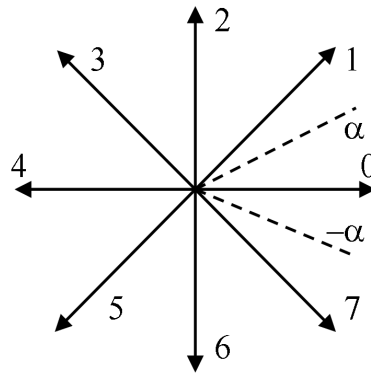


Рис. 5. Направления контура и сектор анализа.

4.3. Ширина гребня и координаты следующей точки прослеживания

На реальных снимках ширина гребней варьируется в пределах от 1 до 10 пикселей и может вдвое превышать размеры секторов анализа, поэтому выбранное на предыдущем шаге направление контура не всегда оказывается верным. Требуется уточнение координат точки прослеживания; это осуществляется отысканием точки середины гребня. Рассмотрим профиль выровненного по нулю изображения вдоль перпендикуляра к направлению гребня. Идеальная форма такого сигнала — колокол с максимумом в точке середины гребня. Обозначим набор точек, расположенных вдоль такой секущей, как $x(n)$, $-k \leq n \leq k$; $k > 2w$, где $w = 2u + 1$ — предсказываемая ширина светлого гребня. Возьмем функцию $h_u(n)$ с прямоугольным всплеском шириной $2u + 1$: $h_u(n) = 1$, если $-u \leq n \leq u$ и $h_u(n) = 0$, если $n < -u$ или $n > u$. Рассмотрим функционал:

$$f(u, v) = \frac{1}{w} \sum_n x(n+v) h_u(n+v).$$

Максимум этого функционала (по всем возможным u и v) достигается в точке (u', v') , где v' — положение центра, а u' — полуширина гребня. Перевод точки оптимума в координаты изображения дает координаты (i_{n+1}, j_{n+1}) следующей точки прослеживания.

4.4. Проведение контурной линии к следующей точке прослеживания

Проводится сегмент контура из предыдущей (i_n, j_n) в следующую точку прослеживания (i_{n+1}, j_{n+1}) . Контурная линия должна иметь толщину в один пиксель и проходить через границы вертикального/горизонтального соседства пикселей (Рис. 6а). Такой вариант проведения контурной линии гарантирует, что соседние области, разделенные контуром, не будут иметь диагональных контактов пикселей. Процесс проведения контура прекращается в случае касания другого контура или границы изображения.

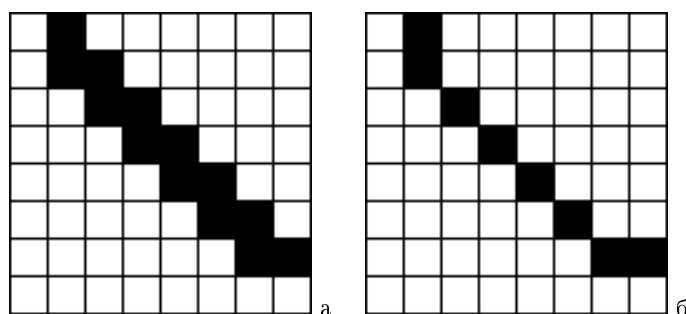


Рис. 6. Допустимый (а) и недопустимый (б) варианты контурной линии.

Как отмечалось выше, набор начальных точек — кандидатов прослеживания контурных линий — включает значительно больше точек, чем необходимо; проводимый контур может пройти вблизи таких точек, а не через них. Поэтому в процессе проведения контура необходимо обеспечить обнуление некоторого “коридора” вблизи проводимого контура и удалить лишние начальные точки. Ширина такого коридора d выбирается в зависимости от локальной ширины гребня: $d = 2w + 4$, где w — ширина гребня.

Если контурная линия коснулась границ изображения, другой линии или самой себя, процесс прослеживания данной линии прекращается и осуществляется переход к следующей начальной точке-кандидату и прослеживанию новой линии. В противном случае алгоритм заменяет координаты терминальной точки (i_n, j_n) новыми (i_{n+1}, j_{n+1}) и продолжает процедуру прослеживания линии.

4.5. Параметры профиля линии границы

При последующем анализе корректности контурных линий требуются некоторые измеряемые параметры. Наиболее удобно их получать на этапе прослеживания контурных линий. Такими параметрами являются функционалы асимметрии и выпуклости профиля линии границы, которые вычисляются во время прослеживания контура.

Пусть $x(n)$ — элементы исходного изображения, лежащие на прямой, перпендикулярной контуру в некоторой точке. Пусть также $2u + 1$ — ширина светлого гребня, а v — размеры левого и правого “хвостов”. Тогда можно вычислить следующие суммы:

$$\begin{aligned} S_{left} &= x(-u - v) + \dots + x(-u - 1); \\ S_{center} &= x(-u) + \dots + x(u); \\ S_{right} &= x(u + 1) + \dots + x(u + v). \end{aligned}$$

Асимметрия профиля A будет равна $A = |S_{right} - S_{left}|/v$, а выпуклость профиля C составит $C = S_{center}/(2u + 1) - (S_{right} + S_{left})/2v$. Средние значения асимметрии и выпуклости профиля линии будут равны:

$$A_{aver} = (A_1 + \dots + A_N)/N, \quad (4)$$

$$C_{aver} = (C_1 + \dots + C_N)/N. \quad (5)$$

Здесь N — число точек в линии. Средние значения асимметрии и выпуклости профиля используются по окончании процесса прослеживания линий. Выпуклость используется для оценки достоверности границ первого типа, а асимметрия — для оценки достоверности границ второго типа. Эти значения используются ниже.

Промежуточный результат прослеживания контурных линий по границам первого типа показан на Рис. 7. Обнаружение контуров на изображении (а), содержащем исключительно границы первого типа, вполне удовлетворительное, в то время как на изображении (б) отсутствует целый ряд деталей, имеющих границы второго типа.

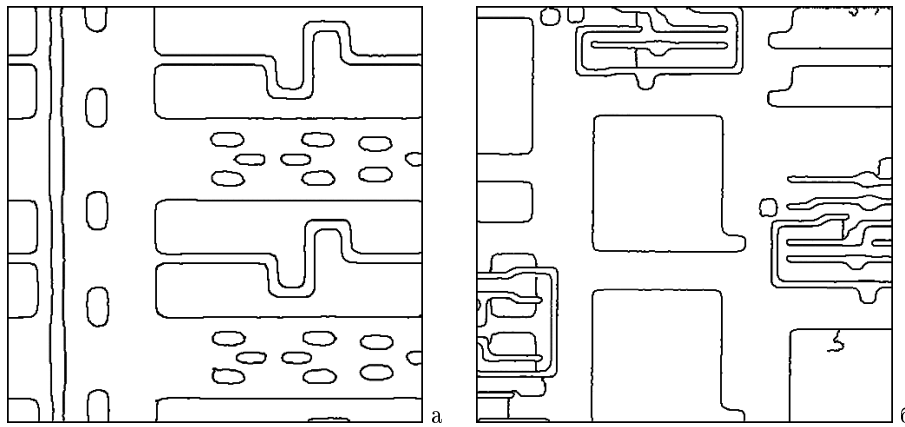


Рис. 7. Вид промежуточной карты контуров изображений, показанных на Рис. 1.

5. ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕДИНЕННОЙ КАРТЫ КОНТУРОВ

Объединенное прослеживание контуров по границам первого и второго типов производится на основе анализа следующей комбинации данных. Промежуточная карта контуров X_1 , полученная прослеживанием границ первого типа, объединяется с выровненным изображением, содержащим границы второго типа X_2 (раздел 3.2). Одновременно, как и при проведении линии в разделе 4.4, осуществляется обнуление “коридора”, окружающего уже прослеженные контуры X_1 той же ширины: $d = 2w + 4$. Тем самым на выровненном изображении с границами второго типа X_2 удаляются паразитные линии вблизи границ первого типа. Эту операцию можно записать как:

$$x = \begin{cases} x_1, & \text{если } x_1 > 0, \\ 0, & \text{если } x \text{ в } w\text{-окрестности контура,} \\ x_2, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

По полученному объединенному изображению X вновь осуществляется прослеживание контуров тем же самым алгоритмом. Получаемый результат представлен на Рис. 8.

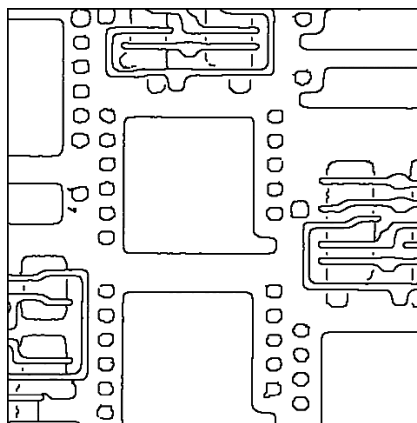


Рис. 8. Результат прослеживания контурных линий по объединенному изображению.

Условия корректности карты контуров предусматривают, что каждый объект должен быть окружен контурной линией, которая должна быть непрерывной и замкнутой. Только что полученная объединенная карта контуров может не удовлетворять этим требованиям. Из-за наличия шумов и особенностей самого алгоритма некоторые контурные линии оказываются незамкнутыми или “оборванными” (см. Рис. 8). Такие линии должны быть либо продолжены и соединены с той или иной контурной линией, либо удалены. Коррекция осуществляется с помощью фильтрации карты контуров.

6. ОБРАБОТКА И ФИЛЬТРАЦИЯ КАРТЫ КОНТУРОВ

Обработка и фильтрация карты контуров включает: утончение контурных линий, прослеживание оборванных линий, нумерацию сегментов и удаление ложных линий и сегментов.

6.1. Утончение контурных линий

В некоторых случаях ширина проводимой контурной линии может оказаться больше, чем один элемент. Кроме того, на зашумленных изображениях возможно замыкание линии на саму себя, в результате чего возникают небольшие петли или “капли” на незамкнутых концах линий. Такие линии должны быть утончены. Для этого анализируется 3×3 окрестность каждого элемента контурной линии, и если элемент граничит с внутренними элементами области и толщина линии больше, чем 1 пиксель, то такой элемент присоединяется к элементам области. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Из значений 8 ближайших точек окрестности формируется циклический массив. Он рассматривается как состоящий из некоторого числа подразделов, каждый из которых включает пару множеств: набор контурных точек, принадлежащих контурной линии, и набор точек внутренней области. Заметим, что число таких подразделов не может превышать 4.
2. Подсчитывается число таких подразделов и общее число контурных элементов.
3. Если контурных элементов не обнаружено, то значит, центральный элемент является изолированной контурной точкой, которая удаляется.
4. Если имеется один подраздел и а) число контурных элементов более чем 2, или б) число контурных элементов равно 2 и имеется контурный элемент непосредственно над или под обрабатываемым, то считается, что контур “толстый” и контурный элемент удаляется.

Алгоритм применяется итеративно. Он позволяет утончить линии и привести возможные “капли” на концах некоторых линий в статус “оборванных” линий. После этого становится возмож-

ным использование операций по обнаружению оборванных линий и последующему продлению их до касания других контурных линий.

6.2. Продление и замыкание оборванных линий

Продление и замыкание оборванных линий осуществляется вышеописанным алгоритмом прослеживания контуров, начиная с точек обрыва и до замыкания на тот или иной контур. Для анализа используется синтезированное изображение X , получаемое взвешенным суммированием выровненных изображений с границами первого и второго типов, а также карты уже прослеженных контуров:

$$x = k_1 z_1 + k_2 z_2 + k_3 t.$$

Здесь z_1 и z_2 — элементы выровненных изображений с контурами первого и второго типов, t — элемент карты обнаруженных контуров, k_1 , k_2 , k_3 — весовые коэффициенты, а x — элемент формируемого изображения.

6.3. Нумерация сегментов и фильтрация карты контуров

Нумерация сегментов осуществляется прогрессивным сканированием полученного изображения карты контуров (слева направо и сверху вниз) с присвоением каждому элементу области некоторого номера. Производится проверка и нумерация образовавшихся сегментов (внутренних областей, ограниченных контурами) и удаляются оставшиеся незамкнутыми “оборванные” контурные линии.

Алгоритм нумерации приписывает каждому внутреннему (не контурному) элементу тот или иной сегментный номер. Для этого анализируются 4 предыдущих уже обработанных соседних элементов — 3 сверху и один слева. При этом возможны следующие ситуации.

1. Все 4 элемента являются внутренними и имеют одинаковые сегментные номера. В этом случае текущий обрабатываемый элемент получает тот же номер.
2. Предыдущие элементы имеют различные номера. Текущему элементу присваивается минимальный из этих номеров, и в таблице списка сегментов появляются соответствующие связи, указывающие на ассоциацию одного сегментного номера с другим, означающие, что фрагменты сегментов с этими номерами составляют один большой сегмент.
3. Предыдущие элементы являются контурными или граничными. Тогда текущему элементу присваивается новый сегментный номер.

После такой нумерации различные части сегмента сложной формы (фрагменты) могут получить разные номера, а в сложных случаях может возникнуть цепочка ассоциаций. Полный список всех ассоциаций представляет собой *таблицу контактов и ассоциаций фрагментов*. Число входов таблицы совпадает с полным числом обнаруженных фрагментов. Значение в точке таблицы, соответствующей каждому номеру фрагмента, есть номер сегмента, с которым ассоциирован данный фрагмент; большие номера ассоциируются с меньшими. После упрощения и установления всех ассоциаций, данная таблица превращается в таблицу перенумераций, в каждой ячейке которой содержится новый номер, который должен быть приписан элементам данного фрагмента. При последующем сканировании номера элементов поправляются в соответствии с данной таблицей, и сегментация изображения становится корректной. Одновременно подсчитывается число пикселей в каждом сегменте, и определяются координаты прямоугольника, описанного вокруг сегмента.

6.4. Удаление ложных контурных линий и сегментов

Ложные контурные линии могут быть двух типов. Первый тип — “оборванные линии” — характеризуются концами, не замкнутыми на другие контурные линии. Второй тип — кор-

ректные с точки зрения замыкания линии, но лежащие целиком внутри одного сегмента. Для пояснения данного случая рассмотрим два замкнутых контура, соединенных третьей линией (“перемычкой”); топологически это выглядит как структура вида: \bigcirc — \bigcirc . Поскольку она возникает внутри некоторой большой области, то элементы с обеих сторон перемычки имеют один и тот же номер. Это может служить признаком ложных линий обоих типов.

Для удаления таких ложных линий алгоритм проверяет сегментные номера областей по обе стороны каждой контурной линии. Если они одинаковые, то линия считается ложной и удаляется. Это осуществляется простой заменой значений элементов контурной линии на значения окружающих элементов сегмента.

Одной из особенностей прослеживания контуров является то, что эта процедура может прерваться только в случае, если произошло касание другого контура, границы изображения, или произошло замыкание контура на самого себя. Как результат, из-за влияния шума в некоторых случаях на изображениях могут возникать ложные сегменты, очерченные формально корректными контурными границами. Для обнаружения и удаления подобных ложных сегментов используется следующий способ.

Рассматриваются сегменты, целиком расположенные внутри некоторого большего, окружающего их сегмента. Осуществляется обход вдоль границы каждого сегмента, и по формулам (4) и (5) вычисляются средние значения асимметрии A_{aver} и выпуклости C_{aver} , которые затем сравниваются с эмпирически найденными порогами T_A и T_C . Если $C_{aver} < T_C$ или $A_{aver} < T_A$, то сегмент считается ложным и удаляется вместе со своей границей. В этом случае значения внутренних элементов сегмента и его границы изменяются на значение номера сегмента, их окружающего.

6.5. Формирование результата сегментации

Результатом сегментации является разбиение исходного изображения, т.е. массив того же размера, в котором каждому элементу приписан тот или иной номер сегмента. Способы визуализации могут быть различными; мы выбрали вариант, при котором внутренним элементам областей присвоены значения, равные средней яркости по сегменту, а контуры проведены тонкими белыми линиями между ними. На Рис. 9 показаны результаты сегментации изображений, представленных на Рис. 1.

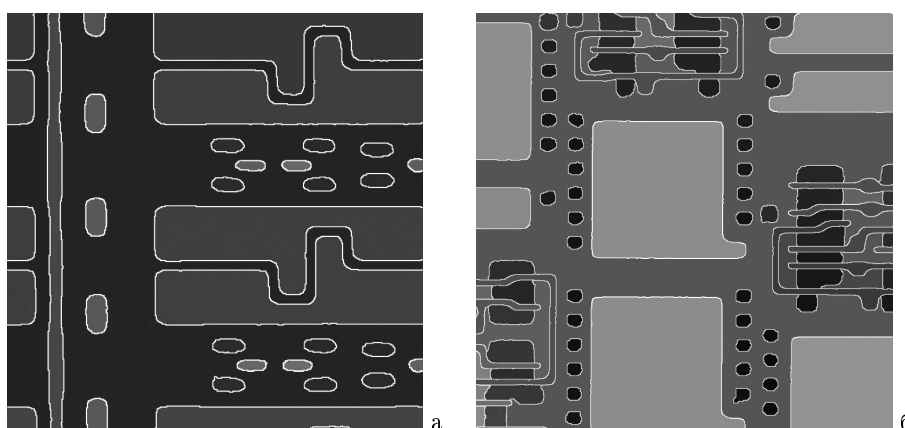


Рис. 9. Результаты сегментации изображений на Рис. 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прэйтт У. *Цифровая обработка изображений. т. 1 и 2.* М.: Мир, 1982.
2. Rosenfeld A., Kak A. C. *Digital Picture Processing. vol. 1 and 2.* New York: Academic Press, 1982.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений.* М.: Техносфера, 2005.
4. Робертс Л. Автоматическое восприятие трехмерных объектов. В кн.: *Интегральные роботы. т.1.* М.: Мир, 1973, стр. 162–208.
5. Sobel I. E. *Camera Models and Machine Perception.* Ph.D. thesis. Palo Alto, Calif.: Stanford University, 1970.
6. Prewitt J. M. S. Object Enhancement and Extraction. *Picture Processing and Psychopictorics.* New York: Academic Press, 1970, pp. 75–150.
7. Фурман Я. А., Кревецкий А. В., Передреев А. К., и др. *Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов.* М.: Физматлит, 2003.
8. Clark J. J. Authenticating Edges Produced by Zero-Crossing Algorithms. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1989, vol. 12, no. 8, pp. 830–831.
9. Roberts J. M. *Attentive Visual Tracking and Trajectory Estimation for Dynamic Scene Segmentation.* Ph.D thesis. Southampton: University of Southampton, 1994.
10. Smith P., Drummond T., Cipolla R. Edge tracking for motion segmentation and depth ordering. *Proc. 10th British Machine Vision Conf., v. 2.* Nottingham: 1999, pp. 369–378.
11. Чочиа П. А. Двухмасштабная модель изображения. *Кодирование и обработка изображений.* М.: Наука, 1988, стр. 69–87.

Статью представил к публикации член редколлегии Н. А. Кузнецов