

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО ДЛЯ ДЕКОМПОЗИЦИИ ОБЪЕКТОВ ТОПОЛОГИИ МИКРОСХЕМ НА МНОЖЕСТВО ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Воронов

ОИПИ НАНБ лаб.222
ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Беларусь
sash_v_oo@tut.by

Рассмотрена проблема покрытия многоугольников прямоугольниками, которая имеет место при подготовке входной информации для устройств, выполняющих изготовление фотошаблонов. Входная информация представляет собой описание последовательности прямоугольников. Выбор этой последовательности во многом определяет производительность этих устройств и качество получаемых фотошаблонов. Предложен эвристический алгоритм который покрывает многоугольник без дыр с острыми внутренними углами при помощи прямоугольников.

Ключевые слова – диаграммы Вороного, покрытие прямоугольниками, фотошаблон.

1 МЕТОД ПОКРЫТИЯ

При производстве интегральных схем, фотоэлектрических преобразователей, ЖК-индикаторов, а также многих других микросистемных устройств возникает задача формирования топологических структур на металлизированных фотошаблонах [1]. Эти структуры формируются с помощью специальных генераторов изображений. Генераторы изображений строят топологию на фотошаблоне из наборных элементов. Наборный элемент представляет собой прямоугольник. Создание посредством таких генераторов произвольных изображений топологических структур требует предварительного разложения (декомпозиции) этих структур на множество прямоугольников, объединение которых с заданной точностью совпадает с описанием соответствующих исходных структур и формирует покрытие. При этом число прямоугольников, входящих во множество, должно быть минимальным или близким к минимальному. На основании полученного множества прямоугольников формируется оптимальная входная последовательность, которая кодируется в соответствии с правилами входного языка соответствующего генератора изображений. Задачи декомпозиции и, как частный случай, покрытия не являются новыми. Разработаны эффективные методы решения этих задач [1, 4-10, 12], однако при проектных нормах меньше 1 мкм возникают значительные трудности при генерации изображений, так как возрастает сложность топологии.

Известные методы декомпозиции многоугольников можно разбить на переборные [5, 6, 7] и сканирующие [1,

8-10]. Переборные методы просты в реализации, но оказываются эффективными лишь при покрытии односвязных и небольших по числу угловых точек контуров многосвязных областей. Методы сканирующего типа [2] являются эффективными как для односвязных, так и для многосвязных областей. Эти методы дают возможность покрывать области как позитивного, так и негативного фотошаблона. Также используются комбинации этих методов [3]. Перечисленные выше методы являются приближенными, т. е. дают возможность получать решения близкие к минимальному.

В настоящей работе рассматривается оригинальный приближенный метод декомпозиции многоугольника в совокупность прямоугольников. Решение задачи декомпозиции осуществляется с использованием одной из модификаций диаграммы Вороного, называемой скелетом многоугольника [11]. Скелет многоугольника получается из обобщенной диаграммы Вороного заменой параболических ребер хордами. Декомпозиция многоугольника начинается с его разбиения на ячейки по найденному скелету с целью покрыть каждую из этих ячеек прямоугольником. Если какая-либо из этих ячеек не покрывается прямоугольником, то она делится на более мелкие ячейки и т. д. Процесс декомпозиции завершается, после того как каждая из найденных ячеек будет покрыта прямоугольником. Для решения задачи декомпозиции используются как специальные, так и универсальные алгоритмы. Специальные алгоритмы решают задачу покрытия окружностей, колец, шин, треугольников. Универсальный алгоритм решает задачу покрытия произвольного многоугольника.

Универсальный алгоритм декомпозиции является эвристическим. Кратко приведем описание эвристического метода покрытия, являющегося развитием метода, описанного в работе [13]. Метод основан на использовании модификации обобщенной диаграммы Вороного, называемой скелетом многоугольника, и позволяет покрывать произвольные односвязные многоугольники. В процессе декомпозиции исходный многоугольник разбивается на всё меньшие и меньшие части, которые обрабатываются независимо до тех пор, пока каждая из этих частей, будет покрыта прямоугольниками, находящимися в пределах исходного многоугольника. Первое деление достигается с помощью генерации скелета многоугольника, также называемого "средней осью".

В отличие от диаграммы Вороного, которая строится для множества точек, скелет многоугольника (средняя ось) задает местоположение всех центров кругов, содержащихся в многоугольнике, которые касаются его границы в двух или более точках. Особенностью предлагаемого метода по сравнению с методом из работы [13], является то, что он позволяет находить покрытия для произвольных односвязных многоугольников, в том числе и с острыми внутренними углами. Для покрытия острых углов многоугольника применяется специальный алгоритм, который дополняет основной метод.

Предлагаемый ниже метод декомпозиции состоит из следующих этапов: 1) формирование скелета исходного многоугольника (Рис.1); 2) разбиение многоугольника по его скелету на ячейки; 3) покрытие ячеек прямоугольниками.

Последовательно проиллюстрируем каждый этап.

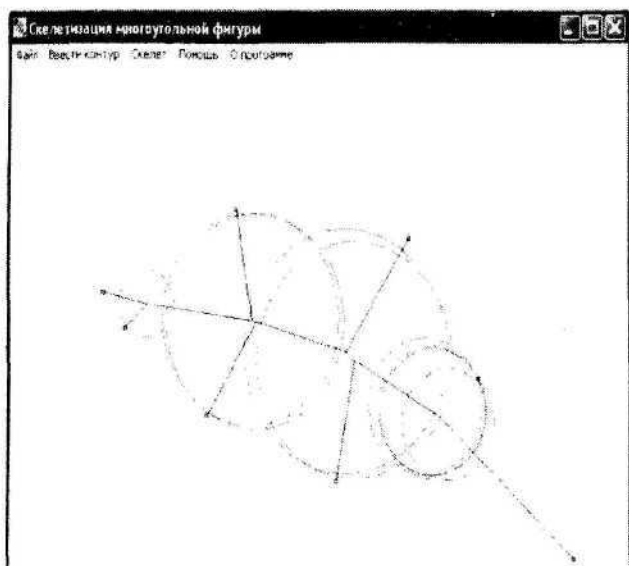


Рис.1. Пример формирования скелета многоугольника

Среди алгоритмов построения диаграммы Вороного для множества отрезков [14-16] следует выделить два алгоритма: Форчуна [15] и Ли [16]. Алгоритм Форчуна весьма сложен для реализации. Кроме того, в силу универсальности, он строит диаграмму Вороного не только внутри, но и вне многоугольника, что является для декомпозиции лишней работой. Более простой (и хронологически более ранний) алгоритм Ли строит диаграмму Вороного внутри многоугольника. Он основан на алгоритмической парадигме «разделяй и властвуй». Исходный многоугольник разбивается на две разомкнутые ломаные линии, для каждой из них рекурсивно строится диаграмма Вороного, а затем осуществляется объединение обеих диаграмм. На практике алгоритм Ли широко используется и работает достаточно надежно. Используемый алгоритм формирования скелета многоугольника является модификацией алгоритма Ли [11]. Скелет используется для исследования топологических и метрических свойств области, что находит применение во многих методах анализа и распознавания изображений [17,18]. Оценка вычислительной

сложности задачи построения скелета многоугольника равна $O(n)$, где n - число вершин многоугольника [9].

Для упрощения дальнейшего формирования покрытия при помощи прямоугольников для ячеек исключаем из многоугольника острые углы и проводим скелетизацию построенного многоугольника без острых углов. Далее опустив на стороны высоты из вершин скелета, получаем разбиение многоугольника на ячейки (Рис.2).

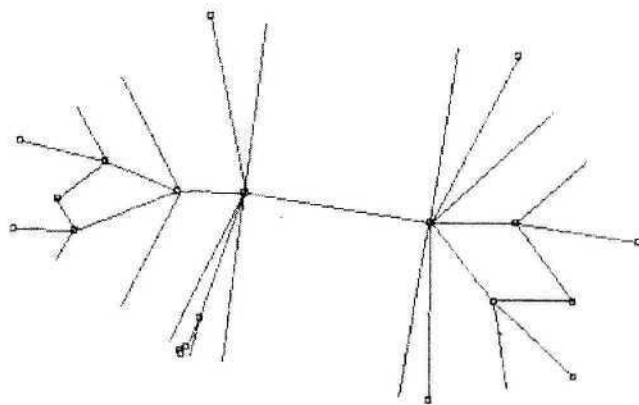


Рис.2. Результат построения ячеек по скелету

Затем производим обработку каждой ячейки независимо и покрываем их прямоугольниками. Возможны следующие варианты ячеек.(Рис.3, 4, 5)

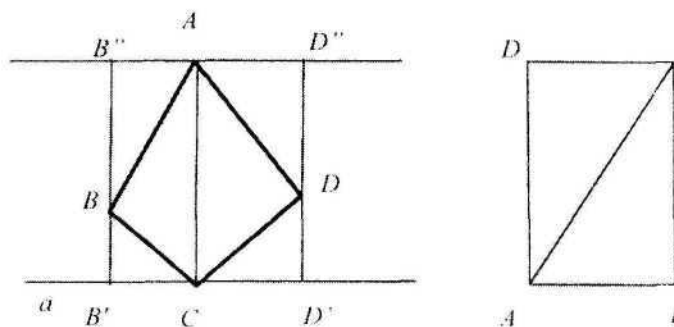


Рис.3. Примеры покрытия: покрытие ячейки-четыреугольника ABCD порожденной вершиной; покрытие ячейки-треугольника ABC

Ячейки-четыреугольники как правило возникают в местах исключения острых углов из исходного многоугольника. Возможны так же ячейки прямоугольники и они соответственно покрыты как только сгенерирована такая ячейка. У ячейки-трапеции возможны два варианта покрытия в зависимости от вида порожденной ячейки-трапеции.

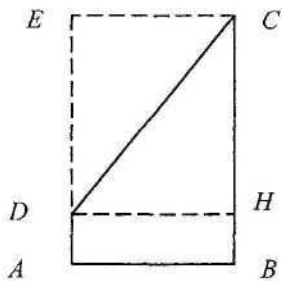


Рис.4. Примеры покрытия ячейки – трапеции,
угол (A, D, C) - по крайней мере 135°

Остался один случай, когда угол (A, D, C) больше чем 90° и меньше чем 135° . Оценивая максимальную высоту любого прямоугольника в пределах многоугольника с основой AB можно сказать она будет $> |BC|$, повернув ячейку вокруг ее вершины (с конечными точками C и D), получим симметричное изображение ячейки относительно ее вершины. (Рис. 5) Пусть A' и B' , будут симметричным изображением A и B соответственно. Пусть E будет точкой на $A'B'$ или на $B'C$, такой, что отрезок AE проходит через $с$. Если $|AE| > |BC|$, то ячейка - тривиально покрываема. Еще остается рассмотреть случай $|AE| < |BC|$. Сформулируем следующее определение.

Если $|AE| < |BC|$, то ячейка $ABCD$ называется ячейкой-тоннелем для многоугольника P . Многоугольник, определенный вершинами $ABCB'A'$ (Рис. 5) следующими в порядке против часовой стрелки, называется тоннелем.

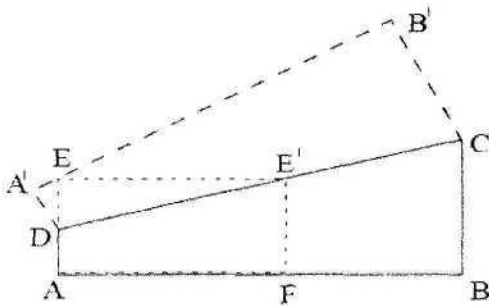


Рис.5. Примеры покрытия ячейки – трапеции,
угол (A, D, C) - меньше 135° и больше 90°

Если $|AE| < |BC|$, то E находится на $A'B'$. Пусть α будет угол (A, D, C) минус 90° . Мы получаем что угол $(A', D, E) = 2\alpha$. Кроме того, мы вычисляем $|DE| = |A'D| / \cos(A', D, E)$. Так как $|A'D| = |AD|$ то из этого следует что $|AE| = |AD| + |DE| = |AD| * (1 + 1/\cos 2\alpha)$. Определяем коэффициент тоннеля как $(1 + 1/\cos 2\alpha)$. Теперь алгоритм разбивает ячейку в две подячейки, $AFE'D$ и $FBCE'$, где EE' является параллельной AB , и E' лежит на DC . Подячейка $AFE'D$ покрыта тривиально. Если подячейка $FBCE'$ не является тривиально покрываемой, то обрабатывается таким же образом как ячейка-тоннель. Таким образом, первоначальная ячейка $ABCD$ в конечном счете разделена на $[(\lg(|BC/AD|))/\lg c]$ тривиально покрываемые подячейки, где c - коэффициент тоннеля.

Исходя из вышесказанного мы можем сказать что после построения скелета, за время $O(n)$, любой многоугольник без дыр P , кроме его ячеек-тоннелей, может быть покрыт $O(n)$ прямоугольниками за время $O(n)$. В пределах того же времени, все ячейки-тоннели в P , если они есть, могут быть обнаружены. В частности может быть $O(n)$ ячеек-тоннелей в P .

Результат совмещения покрытия прямоугольниками всех сгенерированных ячеек имеет следующий вид (Рис.6).

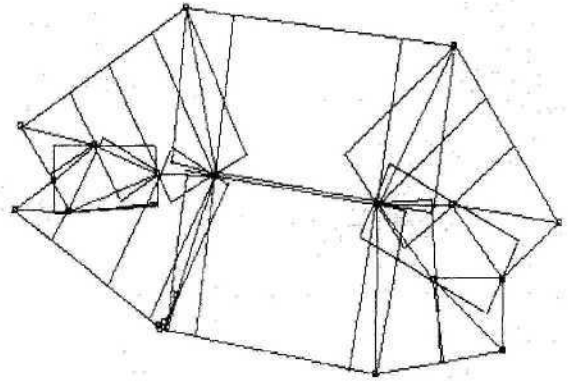


Рис.6. Пример покрытия прямоугольниками многоугольника
с исключенными острыми углами

2 ПОКРЫТИЕ ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНИКА С ОСТРЫМ УГЛОМ ПРИ ПОМОЩИ ПРЯМОУГОЛЬНИКОВ

Для четырехугольника с острым углом, используется следующий алгоритм его покрытия прямоугольниками.

Производим построение первого прямоугольника, две вершины которого лежат на одной стороне острого угла четырехугольника – вершины N и V , третья – на другой стороне – вершина Z , а четвертая – на биссектрисе острого угла (ребро скелета) – вершина M (рисунок 7,а). Для следующего прямоугольника одной из вершин будет точка X – точка пересечения стороны построенного прямоугольника с биссектрисой острого угла. Найдя ее, производим далее построение прямоугольника.

Строим прямоугольники исходя из указанной последовательности действий на одной стороне острого угла четырехугольника до тех пор, пока меньшая сторона прямоугольника не станет меньше чем величина d – минимально допустимый размер, который может позиционировать лазерный генератор. Производим точно такое же построение прямоугольников на другой стороне угла (рисунок 7,б).

Оценка искажения, получаемого в рассмотренном выше алгоритме покрытия острого угла, равна величине $d^2 \operatorname{ctg}(0,5\alpha)$, где d – минимально допустимый размер, который может позиционировать лазерный генератор, α – величина острого угла [19]. С учетом технологии изготовления интегральных микросхем это искажение еще меньше. Острые углы, как правило, не функциональны и подобная аппроксимация в них вполне допустима, а иногда даже и полезна [19].

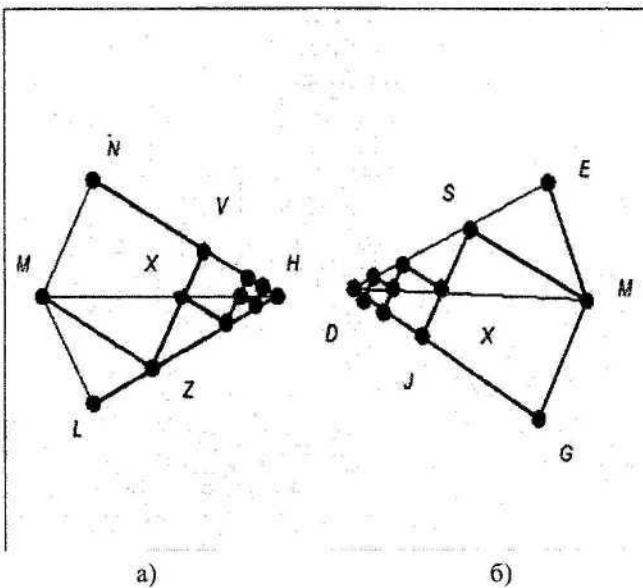


Рис. 7. Пример четырехугольника с острым углом:
а) б) покрытие его

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый алгоритм решения задачи декомпозиции позволяет находить покрытие более высокого качества, так как за счет предварительной скелетизации многоугольника, в результирующем покрытии минимизирована площадь взаимных пересечений прямоугольников, что снижает вероятность переэкспонирования резиста и как следствие его вздутия и выбраковки фотошаблонов. Следовательно предлагаемый алгоритм дает возможность формировать более качественные входные последовательности для лазерных генераторов изображений.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Фейнберг, В.З. Геометрические задачи машинной графики больших интегральных схем // М.: Радио и связь 1987.-178 с.
 [2] A. Hegedus, Algorithms for covering polygons by rectangles, Computer Aided Design, vol. 14, no 5, 1982
 [3] Та. Asano, Те. Asano, and Н. Imai. Partitioning a polygonal region into trapezoids. J. ACM, 33:290-312, 1986.
 [4] L. Ferrari, P. V. Sankar, and J. Sklansky. Minimal rectangular partitions of digitized blobs. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 28:58-71, 1984
 [5] Забродская В.П., Котов Б. А., Серпов И. С. Машинное проектирование фотошаблонов для телевизионных ФЭП //Электронная промышленность. – 1974. - № 3. – С.56- 59

[6] Казеннов Г. Г., Осипов Л. Б., Щемелинин В. М., Стемпковский А. Л. Алгоритм подготовки данных для микрофотонаборных установок // Электронная промышленность. – 1974. - № 6. – С. 84 – 87
 [7] Носова Е. Г., Свердлов А. Г., Фейнберг В. З. Алгоритмы разбиения плоских фигур в системах машинного проектирования интегральных схем // Изв. АН БССР. Сер. физ.- мат. наук. – 1978. № 5. – С. 16-23.
 [8] Осипов Л. Б., Широ Г. Э. Программа фотонабора топологий, содержащих многосвязные фигуры и наклонные линии// Автоматизация РЭА и ЭВА. – Пенза: 1977. – С. 50-53.
 [9] Осипов Л. Б., Широ Г. Э. Алгоритмические методы подготовки и контроля информации для микрофотонаборных установок// Электронная техника. Сер. 10, Микроэлектронные устройства. – 1978. – Вып. 2. – С. 89-103.
 [10] Стемпковский А. Л. Универсальный алгоритм подготовки данных для микрофотонаборных установок// Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектронника. – 1978. – Вып. 6. – С. 74-80.
 [11] Местецкий Л. М. Скелетизация многоугольной фигуры на основе обобщенной триангуляции Делоне. – Программирование, NO. 3, с. 16-31, 1999.
 [12] T. Ohtsuki. Minimum dissection of rectilinear regions. In Proceedings of the 1982 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Rome, pages 1210-1213, 1982.
 [13] J. Gudmundsson, C. Levcopoulos. Close approximations of minimum rectangular coverings. In FST & TCS'96, volume 1180 of LNCS, 1996, 135-146.
 [14] Kirkpatrick D.G. Efficient computation of continuous skeletons. In Proceedings of the 20th Annual IEEE Symposium on FOCS, 1979, 18-27
 [15] Fortune S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. Algorithmica, 2 (1987), 153-174
 [16] Lee D.T. Medial axes transform of planar shape. IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell. PAMI-4 (1982), 363-369.
 [17] Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: введение. Москва, Мир, 1989
 [18] T.Pavlidis. Algorithms for Graphics and Image Processing. Computer Science Press, Rockville,MD, 1982.
 [19] Техническое описание и инструкция по эксплуатации генератора изображений ЭМ-5109. // Минск, КБТЕМ-ОМО, 2001.-323 с.