

С. Ю. МУРОВ

Россия, Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
E-mail: ncdf@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
28.07 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. В. СИБИРЯКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОБЫЧНОЙ РАЗВОДКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ПОЛИГОНАЛЬНУЮ

*Описан метод преобразования традиционной разводки печатной платы в полигональную с предварительным рассмотрением вопросов построения триангуляции Делоне, диаграммы Вороного и эквидистанты к контуру.*

Печатные платы для мощных радиопередающих устройств и устройств силовой электроники имеют свои особенности и существенные отличия от печатных плат устройств другого назначения. Как правило, это двухслойные платы, причем для минимизации перекрестных помех нижний слой выполнен сплошным («земля»). На верхнем — однослойная разводка, полигональная, т. е. когда проводники представлены не линиями определенной ширины, а плоскими фигурами, разделенными зазорами, — многоугольниками, занимающими все доступное свободное пространство.

В мировой практике отсутствуют специализированные средства автоматизированного проектирования мощных радиоэлектронных устройств и устройств силовой электроники, а использование универсальных САПР — SPECCTRA (фирма Cadence, США), EXPEDITION (фирма Mentor Graphics, США), SITUS (фирма Altium, Австралия – США), CADSTAR (фирма Zuken, Япония) — не дает практического эффекта, что приводит к необходимости применения ручных методов, трудоемких и технически ограниченных. В настоящее время разводка подобных плат — исключительно ручной процесс.

В данной работе описан метод преобразования традиционной разводки печатной платы в полигональную с предварительным рассмотрением вопросов построения триангуляции Делоне, диаграммы Вороного и эквидистанты к контуру.

### Триангуляция Делоне

Триангуляция Делоне [1] — это такое разбиение плоскости на треугольники (рис. 1), что окружность, описанная вокруг любого из них не содержит внутри себя вершин других треугольников (рис. 2). Количество ребер в триангуляции меньше, чем утроенное число вершин, а треугольников — меньше чем удвоенное. Триангуляция Делоне может быть получена из любой другой триангуляции с помощью последова-



Рис. 1. Триангуляция Делоне

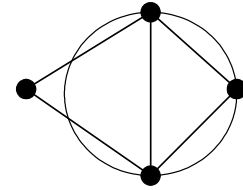


Рис. 2. Круговой критерий

тельности так называемых флипов. Флипом ребра называется замена его на ребро, соединяющее противоположащие вершины инцидентных ему треугольников (рис. 3).

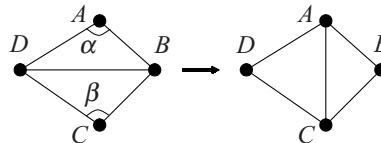


Рис. 3. Флип ребра

Триангуляция Делоне обладает многими полезными свойствами, в том числе и тем, что любая вершина триангуляции всегда соединена ребром с ближайшей к ней вершиной. Это позволяет использовать такую структуру для быстрого определения расстояний от одной вершины до ближайших к ней вершин, причем узнать именно величину этого расстояния, а не только ответить на вопрос, не меньше ли это расстояние, чем заданная величина  $h$ . Вершинами триангуляции выступают контакты и барьеры. Круглые контакты представляются одной вершиной, некруглые — несколькими.

Флип ребра, согласно круговому критерию триангуляции Делоне, выполняется, если сумма противоположащих ребру углов больше  $180$  градусов (см. рис. 3), то есть  $\alpha + \beta > \pi$ .

### Построение триангуляции рабочего поля

Алгоритмов построения триангуляции существует довольно много [1]. Будем использовать алгоритм включения новой вершины в уже имеющуюся триангуляцию.

Начальная триангуляция состоит из четырех вершин прямоугольника, ограничивающего область трассировки (рис. 4). Для включения новой вершины в триангуляцию необходимо определить треугольник, в который она попадает. Для этого используется метод

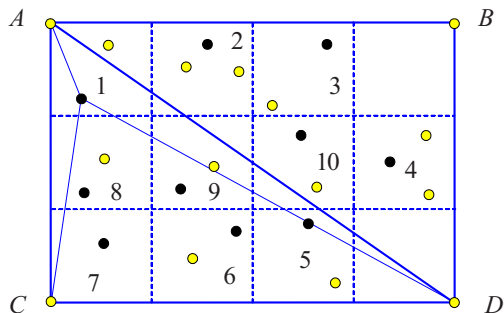


Рис. 4. Построение триангуляции Делоне (толстыми линиями показаны ребра первоначальной триангуляции габаритного прямоугольника  $ABCD$ , опорные точки — черные, цифра рядом — порядок включения)

опорных точек. Опорными точками выступают вершины, уже включенные в триангуляцию. Искомый треугольник определяется следующим образом.

Опорная точка соединяется с новой вершиной отрезком. Определив, которое из трех ребер пересекает этот отрезок, переходим из треугольника, содержащего опорную точку, в соседний, и так до тех пор, пока отрезок пересекает ребра. Очевидно, для того чтобы алгоритм работал быстрее, опорная точка должна находиться как можно ближе к включаемой вершине. Для этого рабочее поле разбивается на некоторое количество областей — карманов, каждому карману назначается опорная вершина, находящаяся внутри него (см. рис. 4). Опорной точкой для верши-

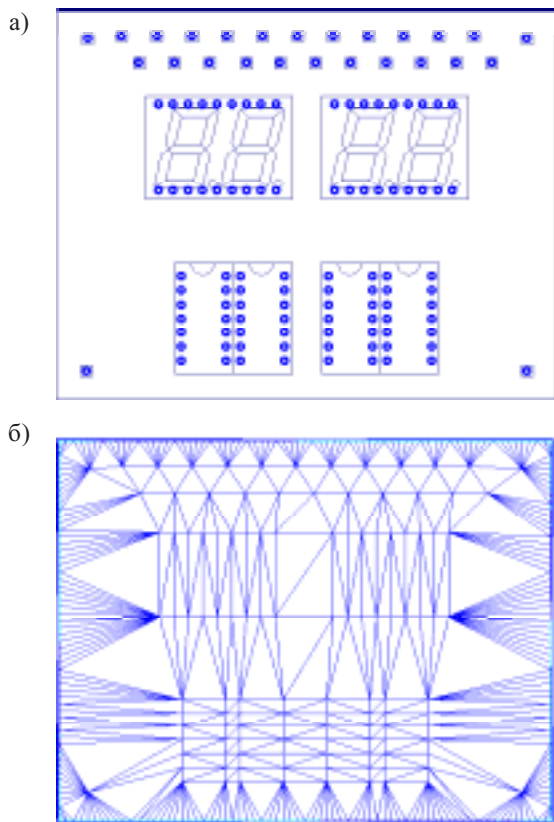


Рис. 5. Внешний вид (а) и триангуляция рабочего поля (б) печатной платы

ны кармана служит опорная вершина предыдущего кармана, а опорной вершиной первого кармана выступает одна из вершин габаритного прямоугольника. Опорные вершины карманов включаются в триангуляцию первыми, в порядке, указанном на рис. 4. Включение вершины в триангуляцию заключается в том, что она соединяется тремя ребрами с вершинами найденного треугольника, а затем противоположные этой вершине ребра проверяются на соответствие критерию триангуляции Делоне. Если ребро не соответствует критерию, осуществляется флип этого ребра. После включения опорных вершин карманов в триангуляцию добавляются все оставшиеся вершины. На рис. 5 приведен пример триангуляции рабочего поля реальной печатной платы.

### Диаграмма Вороного

Диаграмма Вороного [2, с. 295] конечного множества точек  $S$  на плоскости представляет такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества  $S$ , чем к любому другому элементу множества.

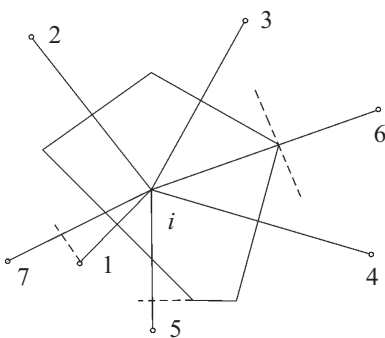


Рис. 6. Многогранник Вороного для центра  $i$  двумерной системы

Двумерный многогранник (многоугольник) Вороного показан на рис. 6. Плоскости Вороного, которые породили грани у данного многогранника, называются образующими плоскостями Вороного, а соответствующие центры системы — геометрическими соседями данного центра  $i$ . Среди геометрических соседей различают основные (естественные) и неосновные. Для первых середина отрезка, соединяющая его с центральным узлом, лежит на грани многогранника Вороного. Для вторых — вне грани и, следовательно, вне самого многогранника.

Многогранники Вороного, построенные для каждого центра  $\{i\}$  системы, дают мозаику многогранников — разбиение Вороного (рис. 7).

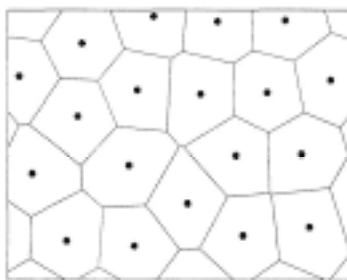


Рис. 7. Диаграмма Вороного на плоскости

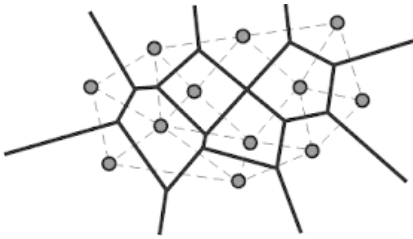


Рис. 8. Диаграмма Вороного и триангуляция Делоне (пунктир)

Диаграмма Вороного — структура, двойственная триангуляции Делоне и которая может быть построена на ее основе: каждый из многоугольников Вороного образован точками пересечения серединных перпендикуляров к ребрам триангуляции Делоне (рис. 8).

**Эквидистанта**

Эквидистанта для данной плоской кривой  $L$  — это множество концов равных отрезков, отложенных в определенном направлении (внешняя и внутренняя эквидистанты) на нормалях к  $L$ .

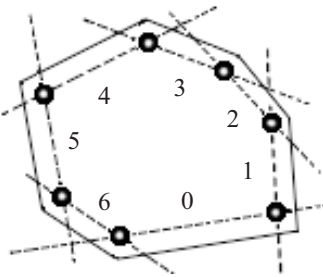


Рис. 9. Метод последовательного пересечения эквидистантных линий

Задача построения эквидистанты к выпуклому контуру достаточно проста. Необходимо для каждого из ребер контура построить параллельные линии на заданном расстоянии и найти точки пересечения линий, соответствующих смежным отрезкам контура (рис. 9).

**Метод преобразования обычной разводки в полигональную**

Исходная информация — топология слоя печатной платы, включающая контактные площадки компонентов, проводники и запреты трассировки (рис. 10).

Существующие программы заливки полигонов автоматически “выкусывают” с заданным зазором не принадлежащие цепи контакты и зоны запрета трассировки. Поэтому задача состоит в том, чтобы получить контуры металлизированных многоугольников, охватывающих эквипотенциальные контактные площадки, и уменьшить их на заданную для обеспечения требуемых зазоров величину. Решается задача в три этапа.

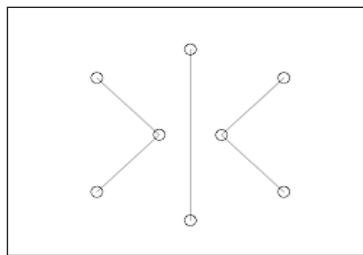


Рис. 10. Топология печатной платы

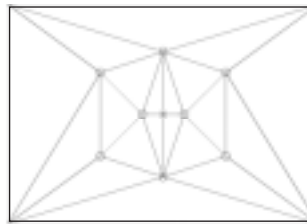


Рис. 11. Триангуляция Делоне

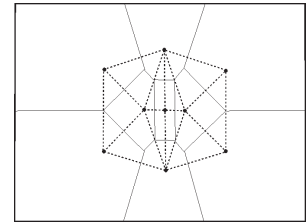


Рис. 12. Диаграмма Вороного

1. Построим триангуляцию Делоне, используя в качестве множества вершин контакты и вершины многоугольников, задающих зоны запрета (рис. 11). Введем дополнительные вершины, соответствующие точкам пересечения проводников и ребер полученной триангуляции (крестик в центре на рисунке), и перестроим триангуляцию с учетом добавленных вершин. Затем исключим вершины, соответствующие неподключенным на данном слое контактам и зонам запрета трассировки, и ребра, соединяющие вершины триангуляции с виртуальными вершинами на контуре платы.

2. На полученном в результате множестве вершин построим диаграмму Вороного (рис. 12). На этой диаграмме удаляются общие ребра смежных многоугольников, если эти многоугольники описаны вокруг эквипотенциальных вершин.

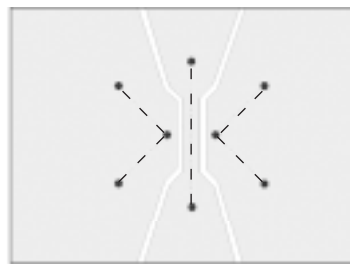


Рис. 13. Топология печатной платы с полигональной разводкой

3. Для каждой из полученных на плате областей строится внутренняя эквидистанта к контуру, отстоящая от него на половину величины заданного зазора. Контуры полученных полигонов передаются в программу, осуществляющую заливку полигона с выкусыванием не принадлежащих полигону областей (рис. 13).

\*\*\*

Описанный метод позволяет автоматизировать процесс полигональной разводки печатных плат, которая нужна при проектировании мощных радиопередающих устройств, а также многослойных печатных плат, когда на опорном слое присутствует несколько различных цепей питания.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применения. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002.  
2. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. — М.: Мир, 1989.