

К. т. н. Г. С. ПЕТРОСЯН, к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

Россия, г. Санкт-Петербург, ООО «Эремекс»
E-mail: serge_luzin@yahoo.com

Дата поступления в редакцию
19.11 2009 г.

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

ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ПРОВОДНИКОВ ПРИ ТРАССИРОВКЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Описана методика выбора предпочтительных слоев для проводников при трассировке многослойных печатных плат, применяемая в САПР ТороR с целью повышения качества и быстродействия разводки.

В отечественной САПР ПП ТороR [1, 2] при трассировке в качестве модели используется совмещенная топология проводников, которая характеризуется тем, что в каждой точке пересекаются не более двух проводников. Эффективный алгоритм расслоения [3] для двухслойной платы точно минимизирует количество межслойных переходов за пропорциональное числу пересечений время.

Для многослойной платы задача расслоения становится *NP*-трудной, поэтому на отыскание полиномиального алгоритма ее точного решения рассчитывать не приходится. ТороR использует эвристический алгоритм, находящий приближенное решение задачи. Существуют некоторые простые приемы, позволяющие увеличить точность и быстродействие эвристического алгоритма. Например, в большинстве САПР есть возможность вручную задать для слоя преимущественное направление трассировки. Такое задание, несомненно, может уменьшить количество «конфликтов» между проводниками и ускорить трассировку, однако в некоторых случаях этот прием может даже ухудшить разводку. Во-первых, на выбор слоя влияет не общее направление проводника (между конечными точками), а направление каждого отдельного его отрезка, что может ощутимо увеличить количество межслойных переходов. Во-вторых, пользователь не всегда обладает необходимой информацией (а иногда и квалификацией) для оптимального назначения преимущественных направлений трассировки в слоях.

Рассмотрим способ решения поставленной задачи, но прежде введем используемые в статье определения.

Угол наклона отрезка, соединяющего начальную и конечную точки проводника (точнее, направление отрезка), будем ставить в соответствие некоторому бисектору круга, в который попадает это направление. Под бисектором здесь понимается фигура, образованная двумя секторами круга, симметричными

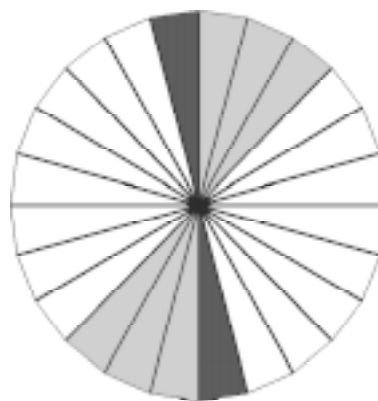


Рис. 1. Кластер, состоящий из четырех бисекторов (головной бисектор — более темный)

относительно его центра. Цепочку из некоторого числа смежных бисекторов будем называть кластером (см. рис. 1).

Суммарную длину проводников, направления которых попадают в бисектор, назовем мощностью бисектора, количество бисекторов в кластере — размером кластера, а сумму мощностей бисекторов в кластере — мощностью кластера.

Крайний против часовой стрелки бисектор будем называть головным бисектором кластера, остальные — хвостовыми. Ведущий кластер — это кластер с мощностью, не меньше требуемой, и при этом минимального размера. Плотность проводников (отношение мощности к размеру) в этом кластере максимальна. Левым крылом будем называть кластеры, соседствующие с ведущим по направлению против часовой стрелки, правым — по часовой.

Объединение направлений в кластеры

Если число внутренних слоев $N > 1$, то можно было бы просто разделить круг на N одинаковых частей (бисекторов). Однако поскольку направления проводников распределены неравномерно (например, в кросс-плате все проводники почти параллельны), то и размеры частей имеет смысл сделать неодинаковыми.

Поставим целью разбить круг на N кластеров, соответствующих числу внутренних слоев, примерно одинаковой мощности, т. е. с примерно одинаковой суммарной длиной проводников. Для этого применим следующий алгоритм.

1. Разбить круг на какое-то количество (например, 180) одинаковых бисекторов.
2. Вычислить мощность каждого бисектора и суммарную мощность всех бисекторов.
3. Разделив суммарную мощность на N , получить требуемую мощность P одного кластера.
4. Выбрать ведущий кластер. Для этого:
 - Создать кластер, состоящий из одного бисектора с номером 0.
 - Дополнять кластер хвостовыми бисекторами по часовой стрелке до достижения кластером требуемой мощности.
 - Запомнить кластер и его плотность как рекордные.
 - Для бисекторов от 1 до последнего
 - {
 - Добавить в кластер новый головной бисектор против часовой стрелки.
 - Пока разность текущей мощности кластера и мощности последнего из хвостовых бисекторов остается не меньше требуемой мощности кластера,
 - Удалить из кластера последний из хвостовых бисекторов.
 - Если плотность увеличилась,
 - Запомнить новый рекорд.
 - }
- В результате за пропорциональное числу бисекторов время будут проверены все возможные кластеры требуемой мощности и найден ведущий.
5. Текущую мощность положить равной мощности ведущего кластера.
6. Построить остальные кластеры.
 - Для i от 2 до $N-1$
 - {
 - Создать новый кластер.
 - Если мощность левого крыла меньше мощности правого
 - {
 - Повторять
 - {
 - Добавить следующий против часовой стрелки бисектор в новый кластер.
 - Увеличить текущую мощность и мощность левого крыла на мощность бисектора.
 - }
 - Пока текущая мощность меньше iP .
 - }
 - Иначе
 - {
 - Повторять
 - {
 - Добавить следующий по часовой стрелке бисектор в новый кластер.
 - Увеличить текущую мощность и мощность правого крыла на мощность бисектора.
 - }
 - Пока текущая мощность меньше iP .
 - }
 - }
 - }
7. Оставшиеся бисекторы включить в последний кластер.

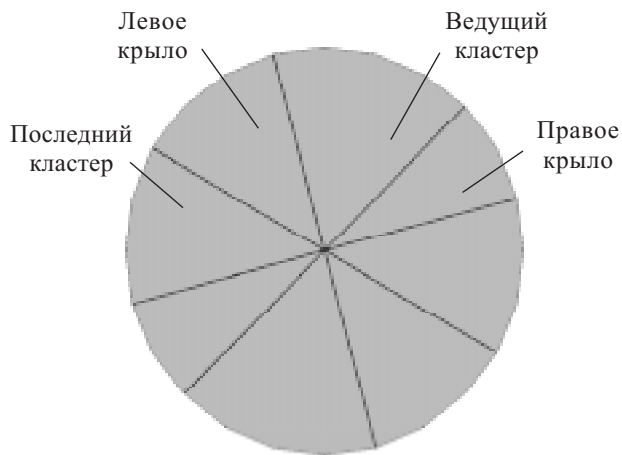


Рис. 2. Разбиение круга на четыре кластера

Примечание. Крылья наращиваются равномерно, для того чтобы избежать проблем в некоторых «экзотических» случаях, например, когда направления всех проводников попадают в один бисектор.

На рис. 2 показано возможное разбиение круга на кластеры.

Назначение кластеров на слои с целью минимизации наводок

Для уменьшения взаимных наводок целесообразно соседним слоям назначать кластеры, имеющие как можно более разные направления.

Пусть ведущий кластер имеет номер 0, а нумерация остальных кластеров — по порядку против часовой стрелки от него. Тогда для разного числа внутренних слоев назначение кластеров, минимизирующее наводки, можно производить исходя из принципа

$$v[i]=i(N+1)/2 \bmod N,$$

где $i=0, 1, \dots, N-1$; $v[i]$ — номер кластера, назначенного на i -й слой; деление — целочисленное, с отбрасыванием дробной части. В этом случае назначение может быть таким:

- 2: 0, 1.
- 3: 0, 2, 1.
- 4: 0, 2, 1, 3.
- 5: 0, 3, 1, 4, 2.
- 6: 0, 3, 1, 4, 2, 5.
- 7: 0, 4, 1, 5, 2, 6, 3.
- 8: 0, 4, 1, 5, 2, 6, 3, 7.
- и т. д.

С помощью формулы $v[i]=(N^2-i(N+1)/2) \bmod N$ можно получить другое назначение, также минимизирующее наводки:

- 2: 0, 1.
- 3: 0, 1, 2.
- 4: 0, 2, 3, 1.
- 5: 0, 2, 4, 1, 3.
- 6: 0, 3, 5, 2, 4, 1.
- 7: 0, 3, 6, 2, 5, 1, 4.
- 8: 0, 4, 7, 3, 6, 2, 5, 1.
- и т. д.

Все остальные назначения, минимизирующие наводки, получаются из этих двух путем циклического сдвига нумерации кластеров на величину от 0 до $N-1$. Таким образом, таких назначений может быть всего $2N$, и все они описываются формулами

$$v[i] = (i(N+1)/2 + S) \bmod N;$$

$$v[i] = (N^2 - i(N+1)/2 + S) \bmod N,$$

где $S=0, 1, \dots, N-1$; $i=0, 1, \dots, N-1$.

Назначение кластеров на слои с учетом пользовательских предпочтений

Для некоторых цепей пользователем могут быть заданы предпочтительные слои. Логично, чтобы как можно больше направлений проводников этих цепей попадали в кластеры, назначенные соответствующим слоям. Для того чтобы качественно оценить назначения кластеров на слои недостаточно определить, попадает направление проводника в кластер или нет. Необходимо знать насколько хорошо попадает или насколько далеко не попадает направление проводника в кластер. Определим критерий для такой оценки.

Назовем директором вектор, лежащий на оси симметрии кластера. Длину директора примем обратно пропорциональной косинусу половины угла раствора кластера.

Ковариацией директора и вектора направления проводника (его длина — произвольная константа) здесь является модуль их скалярного произведения (модуль, потому что начало и конец проводника равноправны). При указанном выборе директоров направление проводника всегда попадает именно в тот кластер, с директором которого у него наибольшая ковариация (рис. 3). Таким образом, определенная выше ковариация является подходящим критерием оценки близости направления проводника к кластеру.

Заметим, что нельзя вычислить какое-то «среднее» направление проводников на слое, «среднее» направление не определено, т. к. у проводников нет ориентации, и просуммировать направления проводников можно 2^{n-1} способами. Зато можно однозначно вычислить суммарную ковариацию направлений проводников в слое с директором кластера, назначенного этому слою. Так как для цепи пользователем может быть задано несколько, пусть k , предпочтительных слоев, то ковариация каждого проводника этой цепи с соответствующим директором должна входить в суммарную ковариацию с весом $1/k$. Конечно, хотя бы один слой проводнику должен быть разрешен всегда.

Если для каждого слоя вычислить суммарную ковариацию направлений проводников с каждым директором, то получится матрица цен назначения кластеров на слои. Для решения задачи о назначениях [4, с. 400] существуют полиномиальные, но довольно трудоемкие алгоритмы. С другой стороны, нет смысла точно решать задачу с неточным,

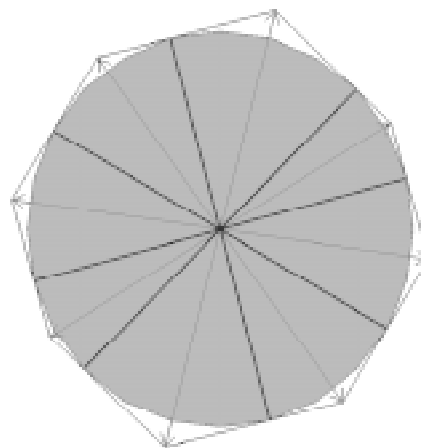


Рис. 3. Директоры

статистическим критерием. Поэтому проверим только $2N$ назначений, минимизирующих наводки, и выберем назначение, максимизирующее суммарную ковариацию.

Назначение проводникам предпочтительных слоев

Так как на внешних слоях современных многослойных печатных плат значительную площадь обычно занимают SMD-компоненты (в том числе BGA), для проводников остается мало места, поэтому для проводников назначать предпочтительными внешние слои нецелесообразно. Назначение слоя для каждого проводника производится следующим образом.

1. Определить цепь.
2. Если для цепи задано множество предпочтительных слоев, назначить проводнику заданное множество слоев.
3. В противном случае найти кластер, в который попадает общее направление проводника, и назначить проводнику слой, на который назначен найденный кластер.

Описанная методика выбора предпочтительных слоев для проводников при трассировке многослойных печатных плат используется в САПР ТороR.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лузин С. Ю., Лячек Ю. Т., Полубасов О. Б. Автоматизация проектирования печатных плат. Система топологической трассировки ТороR.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.
2. Полубасов О. Б., Дмитриев П. И., Зудин С. В. и др. Система топологической трассировки печатного монтажа «ТороR» // Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005611370.— М.: РОСПАТЕНТ, 2005.
3. Полубасов О. Б. Глобальная минимизация количества межслойных переходов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 2.— С. 3—9.
4. Свами М., Тхуласираман К. Графы, сети, алгоритмы.— М.: Мир, 1984.