

Д. т. н. С. Ю. ЛУЗИН, к. т. н. Г. С. ПЕТРОСЯН,
к. т. н. О. Б. ПОЛУБАСОВ

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

Дата поступления в редакцию
15.01 2009 г.

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

К ВОПРОСУ О МИНИМИЗАЦИИ ЧИСЛА МЕЖСЛОЙНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ТРАССИРОВКЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Предложены способы сокращения числа межслойных переходов за счет подключения к переходу, соединенному с контактом или точкой ветвления проводников.

«Большое количество переходных отверстий на печатных платах понижает процент выхода годных в производстве, увеличивает трудоемкость изготовления и стоимость, а также ухудшает параметры изделия, уменьшая надежность устройства» [1].

Особую сложность в электронных САПР представляет задача минимизации количества межслойных переходов. В [2] утверждается, что если допустить возможность введения переходов в произвольных точках связывающих деревьев, то задача расслоения с минимизацией числа переходов становится чрезвычайно трудной. На практике стараются прокладывать участки проводников строго ортогонально — вертикально в одном слое и горизонтально в другом, а лишние переходы удаляют только после завершения трассировки, причем простейшим способом: фрагмент трассы переносится из одного слоя в другой, если при этом уменьшается число переходов. Возможности такой процедуры весьма скромные, обычно получается в несколько раз больше переходов, чем необходимо.

Трассировка соединений — этап определения путей проводников, соединяющих контакты компонентов в соответствии с электрической схемой при соблюдении заданных конструктивно-технологических ограничений. Ограничения — самые разнообразные: толщина проводников и величина зазоров между ними, число слоев трассировки, максимальная (или минимальная) длина проводника, выравнивание длины проводников, минимизация числа переходных отверстий и длины проводников и т. д.

Принято выделять четыре основных этапа трассировки:

- 1) составление списка соединений;
- 2) распределение соединений по слоям (задача расслоения);
- 3) определение порядка трассировки для всех соединений;
- 4) трассировка проводников.

Следует отметить, что теория и практика автоматизированного проектирования радиоэлектронной

аппаратуры зачастую развиваются параллельными курсами, практически не пересекаясь. Задача расслоения — прекрасная иллюстрация этой ситуации. Фактически, во всех системах автоматизированного проектирования при трассировке эта задача не только не решается, но даже и не ставится. Исключение составляет САПР TороR, в которой сначала все трассы прокладываются в одном коммутационном пространстве (совмещенная топология), а затем решается задача расслоения с минимизацией числа межслойных переходов [3].

Описанные в литературе подходы к решению задачи расслоения абстрагируются от реальностей трассировки. Модель упрощена до предела: все контакты сквозные, т. е. доступны на всех слоях, все проводники — прямые, межслойные переходы не используются. Даже с учетом указанных упрощений предложенные подходы практически не применимы из-за высокой комбинаторной сложности.

Для решения задачи расслоения в разное время предлагались различные подходы, некоторые из них считаем целесообразным рассмотреть в данной статье.

Раскраска вершин графа пересечений (попытка минимизации числа слоев) [2, с. 231].

Поставим в соответствие множеству отрезков множество вершин графа, соединив ребром пары вершин, соответствующих пересекающимся отрезкам. Такой граф принято называть графом пересечений (**рис. 1**).

Требуется раскрасить вершины графа пересечений (отрезки проводников) в минимальное количество цветов таким образом, чтобы не было ни одного ребра, соединяющего вершины одного цвета. Отрезки, соответствующие одноцветным вершинам, назначаются в один слой.

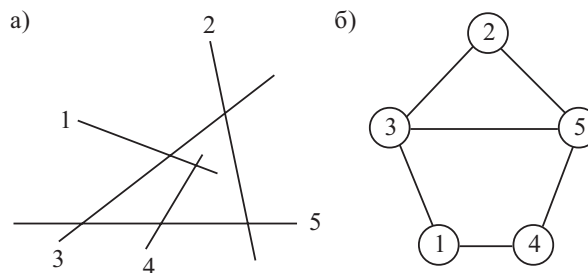


Рис. 1. Пересекающиеся отрезки (а) и граф пересечений (б)

Окрасив, например, вершину 1 в красный цвет, а вершину 5 в синий, получаем, что для окраски вершины 2 необходим еще один цвет, например, зеленый, при этом для вершин 3 и 4 возможны варианты: соответственно зеленый и красный, синий и красный, синий и зеленый.

Задача NP-трудна [4, с. 1085] и не решает проблемы, потому что число слоев, обычно, ограничено, а хроматическое число (минимальное число цветов) может оказаться больше заданного числа слоев, кроме того, не учитывается возможность перехода со слоя на слой в произвольном месте — это совсем другая задача.

Последовательное выделение в графе максимальных плоских суграфов [5, с. 226].

Простейший способ — последовательное удаление отрезков, имеющих максимальное число пересечений с другими отрезками. Оставшееся после удаления множество отрезков назначается на очередной слой.

Рассмотрим множество отрезков на рис. 1, а. Сначала убираем отрезки 3 и 5 (имеющие по три пересечения) и 4 (рис. 2), затем убираем отрезок 5. Таким образом, получаем, что отрезки 1 и 2 располагаются на первом слое (рис. 2, а), 3 и 4 — на втором (рис. 3, а), отрезок 5 — на третьем (рис. 3, б).

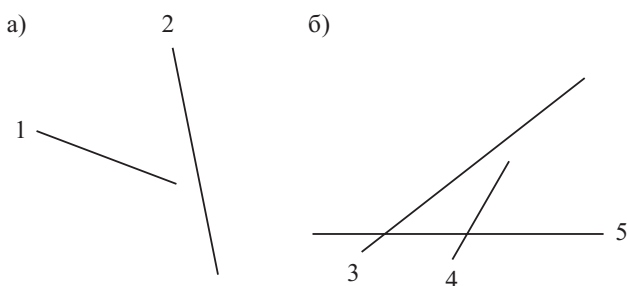


Рис. 2. Расслоение:

а — отрезки, назначенные в первый слой; б — оставшиеся отрезки

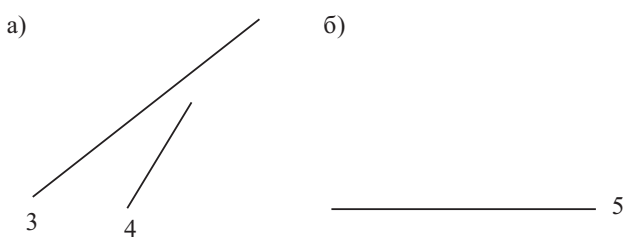


Рис. 3. Расслоение: отрезки, назначенные во второй (а) и в третий (б) слой

Недостатки способа — те же, что и у первого, кроме того, вероятна существенная погрешность решения, поскольку используется «жадный» алгоритм, при этом нахождение максимального плоского суграфа — задача не проще первой.

Нахождение кликового покрытия графа, в котором вершины, соответствующие непересекающимся отрезкам, соединены ребром [6].

Граф пересечений (рис. 4, а), построенный для отрезков на рис. 1, а, дополним до полного графа. Для этого вершины, соответствующие непересека-

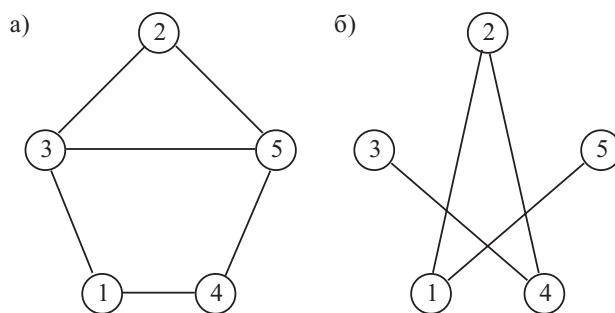


Рис. 4. Граф пересечений (а) и его дополнение до полного графа (б)

ющимся отрезкам, соединяем ребром (рис. 4, б). В этом графе любая клика соответствует максимальному множеству взаимно непересекающихся отрезков, которые могут быть размещены на одном слое. Минимизировать число слоев можно, решив задачу о покрытии кликами множества вершин графа.

Граф содержит четыре клики: {3,4}, {2,1}, {2,4} и {1,5}. Клика {3,4} входит в ядро покрытия (вершина 3 не входит ни в одну другую клику). После удаления покрытой вершины 4 из клики {2,4}, последняя поглощается кликой {2,1}. Таким образом получаем покрытие {3,4}, {2,1}, {5}.

В подобной постановке оценкой комбинаторной сложности является двойная экспонента: задача о покрытии NP-трудна, при этом входная цепочка — число клик графа (в худшем случае — $3^{n/3}$).

Очевидна практическая нереализуемость решения задач в указанных постановках, а самое главное, они фактически не имеют отношения к задаче минимизации переходов.

Эффективный алгоритм решения задачи минимизации числа межслойных переходов для двух слоев приведен в [3]. Пусть имеется совмещенная топология. Пусть также в каждой точке пересекаются только два проводника. Тогда для любой такой точки возможны два варианта: либо одна трасса проходит через точку пересечения в первом слое, а другая — во втором, либо наоборот. Эти два варианта можно соотносить с двумя возможными ориентациями домена. Если концы участка трассы между двумя соседними точками пересечения принадлежат разным слоям, то на участке необходим переход с одного слоя на другой, если одному слою — переход на участке не нужен.

Определение оптимального по числу межслойных переходов расслоения в [3] сводится к выявлению в графе доменов наиболее отрицательного разреза [4, с. 747].

Приведенные в работе преобразования уменьшают размер графа доменов за линейное число операций [4, с. 91] без потери оптимального решения. Число межслойных переходов минимизируется за счет переназначения слоя для того или иного отрезка проводника. Однако некоторые лишние межслойные переходы таким алгоритмом не удаляются. Подобная ситуация возникает, например, на многослойных печатных платах, если от контактной площадки или точки ветвления отходят три и более проводника (рис. 5).

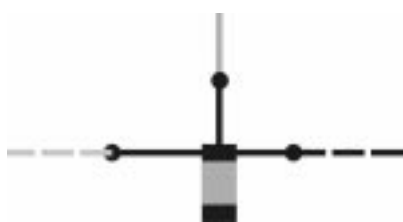


Рис. 5. Контактная площадка с тремя проводниками с переходами на разные слои

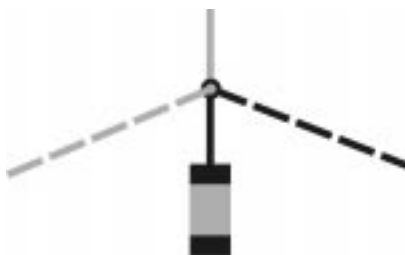


Рис. 6. Сокращение числа переходов при увеличении штрафа за подключение к контактной площадке

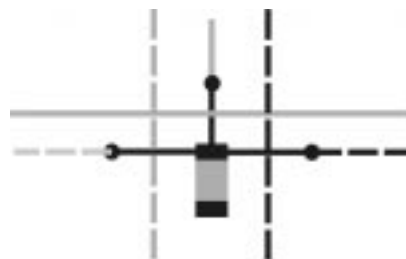


Рис. 7. Подключению проводника к переходу мешают другие проводники



Рис. 8. «Оттяжка» проводников за межслойные переходы

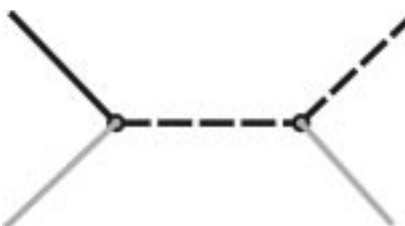


Рис. 9. Перенесение сегмента между парой переходов в любой из слоев не уменьшает числа переходов



Рис. 10. Добавление в «сером» слое сегмента, соединяющего межслойные переходы, позволяет убрать один из переходов

Ситуация легко разрешается путем перекладки трасс при увеличении штрафа за подключение к контактной площадке (**рис. 6**).

Однако подключению проводника к переходу могут мешать другие проводники (**рис. 7**) в том же слое.

В этом случае может помочь «оттяжка» соответствующего проводника за межслойный переход (**рис. 8**). Ситуация становится аналогичной рис. 5.

Рис. 9 иллюстрирует ситуацию, когда перенесение сегмента между парой переходов в любой из слоев не уменьшает числа переходов, однако добавление в «сером» или «черном» слое сегмента, соединяющего межслойные переходы, позволяет убрать один из переходов (соответственно правый или левый).

Следует отметить, что добавление сегмента не обязательно сопровождается увеличением суммарной длины проводников, поскольку удаление перехода позволит оптимизировать не только трассы инцидентных ему цепей [4, с. 613] (**рис. 10**), но также, возможно, и трассы цепей в других слоях, спрямлению которых мешал переход.

Учет при трассировке указанных дополнительных возможностей сокращения числа межслойных пере-

ходов кардинально статистику не изменит, поскольку таких возможностей не очень много, однако при трассировке плат с высокой плотностью монтажа даже небольшое высвобождение ресурсов монтажного пространства может оказаться решающим.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ревков А. Факторы, влияющие на стоимость печатных плат // Электронные компоненты.— 2006.— № 8.— С. 43—45.
2. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств.— М.: Советское радио, 1977.
3. Полубасов О. Б. Глобальная минимизация количества межслойных переходов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 2.— С. 3—9.
4. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ.— М.: Издат. дом «Вильямс», 2007.
5. Мелихов А. М., Берштейн Л. С., Курейчик В. М. Применение графов для проектирования дискретных устройств.— М.: Наука, 1974.
6. Базилевич Р. П. Декомпозиционные и топологические методы автоматизированного конструирования электронных устройств.— Львов: Вища школа, 1981.