

Список литературы: 1. Автоматизированное проектирование цифровых устройств / С.С. Вадулин, Ю.М. Барнаулов и др. / Под ред. С.С. Вадулина. М.: Радиосвязь, 1981. 240 с. 2. Хаханов В.И. Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров. К.: ГЗМН. 1997. 308 с. 3. Ермилов В.А. Метод отбора существенных неисправностей для диагностики цифровых схем. Общие выражения для неисправностей, возможных при эксперименте // Автоматика и телемеханика. 1971. №1. С. 159-167. 4. Биргер А.Г. Многозначное дедуктивное моделирование цифровых устройств // Автоматика и вычислительная техника. 1982. №4. С. 77-82. 5. Дедуктивный метод кубического моделирования неисправностей цифровых устройств // Радиозлектроника и информатика. 1999. №1. С.77-84. 6. Armstrong D.B. A deductive method for simulation fault in logic circuits // IEEE Trans on Computers. 1972. Vol. C-21, №5. P.464 - 471.

Поступила в редколлегию 02.07.2000

Хаханов Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Шкиль Александр Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: диагностика компьютеров. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Бедратый Роман Анатольевич, аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика вычислительных устройств, сетей. Адрес: 61166, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

Хак Х.М. Джажирул, аспирант кафедры автоматизации проектирования вычислительной техники ХТУРЭ. Научные интересы: техническая диагностика цифровых устройств. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 40-93-26.

УДК 621.3.049:681.3

Н.В. АЛИПОВ, Е.И. ЛИТВИНОВА, В.П. КУКСОВ

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАССИРОВКА ДВУСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Описывается новый алгоритм гибкой трассировки двусторонней печатной платы, который позволяет минимизировать длину соединения, количество переходных отверстий и обеспечивает высокое качество топологического рисунка.

Топологический подход к трассировке печатных соединений на плате позволяет создавать гибкие программы-трассировщики, способные заменить человека-конструктора на наиболее трудоемком и сложном этапе проектирования печатных модулей. Гибкими они называются потому, что могут изменять конфигурацию ранее проложенных трасс в процессе своей работы, что позволяет улучшить качество печатного рисунка и увеличить процент разведенных соединений.

При топологическом подходе к решению задачи трассировки связей используют два основных типа моделей коммутационного поля печатной платы:

- модель с непрерывным топологическим представлением поверхности конструктивного узла - непрерывное топологическое рабочее поле;
- модель с дискретизованным топологическим представлением поверхности конструктивного узла - дискретное топологическое (крупнодискретное) рабочее поле.

Наибольшее распространение получил второй тип модели, так как он позволяет реализовать волновые методы поиска кратчайшего пути между двумя дискретами.

Рассмотрим алгоритм гибкой трассировки печатных соединений, основанный на использовании крупнодискретной топологической модели рабочего поля печатной платы.

Представим коммутационное поле каждого слоя платы в виде совокупности макродискретов так, как это описано в работе*. С этой целью разделим рабочее пространство с размещенными в нем компонентами на макродискреты путем проведения прямых линий по границам установочных мест конструктивных элементов. Полученные совокупности макродискретов назовем соответственно крупнодискретными рабочими полями (КДРП) первого и второго слоев. Эти поля могут быть связаны между собой в процессе трассировки с помощью межслойных переходов и удовлетворяют следующим условиям:

* Алипов Н.В., Литвинова Е.И. Трассировка многослойных печатных плат на основе крупнодискретной модели // Труды УНИИРТ. 1995. №3. С.72-76.

- множество макродискретов конечно;
- объединение макродискретов равно области, ограниченной размерами платы;
- макродискреты пересекаются только по границам;
- каждый макродискрет, за исключением граничных, имеет ровно четыре смежных с ним дискрета;
- КДРП имеют регулярную структуру, представляющую собой совокупность горизонтальных и вертикальных рядов (строк и столбцов соответственно).

Каждый макродискрет КДРП представляет собой канал для трассировки. Внутри этого канала могут быть проложены трассы, соединяющие точки на границах макродискрета. Отдельные фрагменты трасс могут быть расположены на разных слоях и связаны между собой с помощью межслойных переходов. Переходы планируются только на границах макродискрета.

Крупнодискретная модель печатной платы позволяет найти путь между двумя точками с помощью модифицированного волнового алгоритма, в котором волна распространяется по макродискретам. Источником волны является один из смежных каналов, содержащих начальную вершину соединения. Приемником волны будем считать один из смежных дискретов, которым принадлежит очередная вершина рассматриваемой цепи или ранее проложенный ее фрагмент. Подключение вершины к ранее размещенному участку трассы позволяет исключить этап построения минимального связывающего дерева, которое практически невозможно реализовать без изменений в виде топологического рисунка, особенно – при большом числе связей.

Для поиска пути между двумя точками начнем распространение волны от дискрета-источника. Для описания процесса распространения волны в текстом КДРП сформируем такие рабочие массивы:

$KAN\ 1[I, J]$, где $I = \overline{1, Q}$; $J = \overline{1, 5}$; Q – количество каналов. Используется для хранения веса, индекса направления, индексов переходов и номеров начальных дискретов на каждом шаге распространения волны.

$KAN\ 2[J]$, где $J = \overline{1, P}$; $P = 2 * P_1 + 2 * P_2 + 4$; P_1, P_2 – пропускные способности дискрета по горизонтали и вертикали соответственно; константа "4" резервирует четыре служебные ячейки для хранения значений пропускных способностей для каждой из четырех сторон дискрета. В зарезервированные ячейки на этапе трассировки будут внесены номера выводов элементов со знаком "минус", номера трасс, закрепляемых на границах канала, и признак установки переходного отверстия (номер трассы, которой принадлежит переходное отверстие, со знаком "минус").

$KAN\ 3[I, J]$, где $I = \overline{1, Q}$; $J = \overline{1, 12}$; Q – количество каналов. Первые четыре элемента строки массива (код стороны-источника трассы в дискрете, номер магистрали-источника, код стороны-приемника, номер

магистрали-приемника) отображают прохождение трассы в направлении противоположных ребер дискрета. Аналогично, с пятого по восьмой и с девятого по двенадцатый элементы строки массива отображают соответственно прохождение трассы в направлениях смежных ребер дискрета.

$KAN\ 4[J]$, где $J = \overline{1, K}$; $K = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + 4$; n_1, n_2, n_3, n_4 – количество контактных площадок на соответствующей стороне дискрета; константа "4" резервирует четыре служебные ячейки, в которые записывается количество контактов на данной стороне дискрета. В зарезервированные ячейки в процессе трассировки будут записаны номера трасс, которым принадлежат контактные площадки.

$FRONT\ [I]$ – одномерный массив, элементами которого являются номера каналов, смежных с текущим дискретом и включаемых в k -й фронт волны. Для работы с этим массивом введем две переменные: $CR\ 1$ и $CR\ 2$. В первой из них будет храниться номер элемента массива, относительно которого рассматривается смежный канал, во второй – номер свободного элемента.

Будем распространять волну одновременно в двух КДРП, последовательно заполняя используемые массивы. В первый фронт волны (в дальнейшем словосочетание "фронт волны" заменим на слово "фронт") включают каналы, смежные с дискретом-источником по одной из четырех граней. Каждому каналу приписывают некоторый вес p , значение которого для первого фронта волны равно единице, и индекс перехода v_p ($p = 1, 2$). Индекс перехода v_1 определяет число переходов из второго слоя, индекс v_2 – число переходов из первого слоя. Начальное значение индекса перехода равно нулю. При распространении волны в канале учитывают возможность прокладки трассы в направлении каждого из смежных дискретов. Направление прохождения волны через канал характеризуется индексом AP , значения которого определим в соответствии с правилом: $AP = 1$, если волна проходит через противоположные ребра дискрета; $AP = 2$, если волна проходит через смежные ребра дискрета в направлении по часовой стрелке; $AP = 3$, если волна проходит через смежные ребра дискрета в направлении против часовой стрелки. Если прохождение волны через рассматриваемый канал в данном направлении возможно и канал не включен ни в один из ранее сформированных фронтов, то его включают в текущий фронт. Номер дискрета записывают в массив $FRONT\ [I]$ на свободную позицию. Если построение пути в данном направлении невозможно без конфликтов с ранее назначенными в канал трассами, то дискрет не может быть включен в текущий фронт. Процесс продолжают до тех пор, пока не будет достигнут один из смежных каналов, содержащих точку-приемник волны, в направлении которой внутри канала возможно построение трассы без пересечений.

Поиск пути между двумя точками при топологической трассировке двусторонних печатных плат производится одновременно на двух слоях и описывается алгоритмом 1:

1. Присвоить начальные значения параметрам $CR 1$ и $CR 2$, v_1 , v_2 , обнулить массивы $KAN 1[I, J]$, $KAN 3[I, J]$, $FRONT [I]$.

2. Определить номера дискретов, которым принадлежат соединяемые элементы. Смежные каналы, на границе которых расположена начальная вершина трассы, формируют начальный фронт волны, фиксируемый в массиве $FRONT [I]$. Смежные каналы, которым принадлежит конечная вершина, образуют множество приемников волны.

3. Определить и сохранить в массиве $KAN 3[I, J]$ координаты начальной вершины в строках, номера которых соответствуют номерам каналов, образующих начальный фронт волны (код стороны и номер магистрали).

4. Выбрать дискрет-источник волны, присвоить ему вес, равный нулю (массив $KAN 1[I, J]$).

5. Если текущий дискрет принадлежит множеству приемников волны, то перейти к процедуре построения пути. В противном случае – выполнить пункт 5.

6. Присвоить параметру AP значение, равное единице.

7. Осуществить поиск пути в направлении AP .

8. Произвести анализ топологической ситуации в текущем дискрете на предмет наличия конфликтов между прокладываемой трассой и ранее зафиксированными трассами путем просмотра элементов массива $KAN 2[J]$.

9. Если путь найден, то зафиксировать точки пересечения прокладываемой трассы со сторонами канала, используя массив $KAN 3[I, J]$. В противном случае осуществить поиск возможностей прокладки трассы в направлении AP в текущем дискрете путем сдвига ранее зафиксированных участков трасс. Если таких возможностей нет – перейти к пункту 13.

10. Присвоить параметру $CR 1$ значение, равное $CR 1+1$. Включить в массив $FRONT [I]$ номер смежного с текущим дискрета, в направлении которого возможно построение пути.

11. Присвоить дискрету, которого достигла волна в пункте 10, вес $p = p + 1$.

12. Сохранить в массиве $KAN 1[I, J]$ вес, полученный в пункте 11, значение параметра AP и номер текущего канала в строке, соответствующей номеру канала, в направлении которого возможна прокладка трассы.

13. Присвоить параметру AP значение, равное $AP + 1$. Если $AP \leq 3$, перейти к выполнению пункта 7. В противном случае выполнить пункт 14.

14. Присвоить параметру $CR 2$ значение, равное $CR 2+1$. Выбрать элемент массива $FRONT [CR 2]$. Если выбранный элемент не равен нулю, то перейти к выполнению пункта 15. В противном случае пути для данной трассы на текущем слое не существует, перейти к пункту 17.

15. Если $FRONT [CR 2]$ не принадлежит множеству приемников волны, то перейти к выполнению пункта 6. В противном случае перейти к пункту 16.

16. Определить координаты очередной вершины прокладываемой трассы в канале-приемнике волны (код стороны и номер магистрали), а также возможность прокладки пути в направлении указанной вершины. Если такая возможность существует – зафиксировать номер трассы в массиве $KAN 4[J]$ в зонах, в которых хранится информация о принадлежности соединяемых вершин определенной цепи и перейти к следующему пункту. В противном случае – исключить данный дискрет из множества приемников волны и перейти к выполнению пункта 14.

17. Конец алгоритма 1.

Если путь между двумя точками найден хотя бы на одном КДРП, можно переходить к этапу построения пути. Построение пути осуществляется с точностью до точек пересечения сторон дискретов при движении в обратном направлении от дискрета-приемника к дискрету-источнику волны по смежным каналам, вес которых уменьшается на единицу. Для этого используется массив $KAN 1[I, J]$. Информация о точках пересечения трассой сторон каналов, записанная в массиве $KAN 3[I, J]$, сохраняется в массиве $KAN 2[J]$ в виде номера трассы, пересекающей стороны дискрета на определенных магистралях.

Если построение пути в пределах одного КДРП невозможно, необходимо планировать переход в другой слой и продолжить на нем поиск пути. Планирование переходов осуществляется в соответствии с алгоритмом 2:

1. Сформировать множество дискретов текущего фронта первого КДРП.

2. Выбрать дискрет из полученного в пункте 1 множества.

3. Присвоить параметру AP значение, равное единице.

4. С помощью массивов $KAN 1[I, J]$ и $KAN 3[I, J]$ убедиться в том, что дискрет, через который должна пройти волна, не включен ни в один фронт во втором КДРП и перейти к выполнению пункта 5. Если рассматриваемый дискрет включен хотя бы в один фронт во втором КДРП, перейти к выполнению пункта 6.

5. Проверить, свободна ли магистраль, по которой подошла волна к дискрету в направлении AP , с помощью массива $KAN 4[J]$. Если

магистраль свободна, то параметру v_2 присвоить значение, равное $v_2 + 1$, и распространять волну в дискрете второго КДРП в соответствии с алгоритмом 1 (пункты 7–17). Если магистраль занята трассой, необходимо последовательно просмотреть все остальные магистрали рассматриваемой стороны дискрета и определить, какие элементы топологии расположены на них: трассы, контактные площадки выводов элементов или межслойные переходы. Если на указанных магистралях находятся только ранее проложенные трассы и на текущей стороне канала имеются свободные магистрали, можно осуществить параллельный сдвиг трасс и освободить магистраль, к которой подошла волна, для размещения межслойного перехода. После этого распространять волну в дискрете второго КДРП в соответствии с алгоритмом 1 (пункты 7–17). Если на магистралях рассматриваемой стороны дискрета установлены межслойные переходы, то для осуществления параллельного сдвига ранее проложенных трасс и дальнейшего распространения волны в соответствии с алгоритмом 1 (пункты 7–17) должны быть свободными магистрали в первом и втором КДРП. Если между проложенными трассами установлены контактные площадки, ранее включенные в топологический рисунок, то сдвиг фрагментов топологии невозможен, перейти к выполнению пункта 6.

6. Выбрать следующий дискрет из множества дискретов текущего фронта первого КДРП, и повторить пункты 3–5. Если во множестве дискретов текущего фронта первого КДРП нет невыбранных дискретов, то перейти к пункту 7.

7. Сформировать множество дискретов текущего фронта второго КДРП.

8. Выбрать дискрет из полученного в пункте 7 множества.

9. Присвоить параметру AP значение, равное единице.

10. С помощью массивов $KAN\ 1[I, J]$ и $KAN\ 3[I, J]$ убедиться в том, что дискрет, через который должна пройти волна, не включен ни в один фронт в первом КДРП, и перейти к выполнению пункта 11. Если рассматриваемый дискрет включен хотя бы в один фронт в первом КДРП, перейти к выполнению пункта 12.

11. Проверить, свободна ли магистраль, по которой подошла волна к дискрету в направлении AP , с помощью массива $KAN\ 4[J]$. Если магистраль свободна, то параметру v_1 присвоить значение, равное $v_1 + 1$, и распространять волну в дискрете первого КДРП в соответствии с алгоритмом 1 (пункты 7–17). Если магистраль занята, то проверить возможность ее освобождения путем сдвига ранее проложенных трасс так, как описано в пункте 5. Если возможность сдвига трасс отсутствует, то волну в данном дискрете распространять нельзя, перейти к выполнению пункта 12.

12. Выбрать следующий дискрет из множества дискретов текущего фронта второго КДРП и повторить пункты 9–11. Если во множестве дискретов текущего фронта второго КДРП нет невыбранных дискретов, то перейти к пункту 13.

13. Конец алгоритма 2.

Если путь между двумя точками найден и имеются переходы из слоя в слой, то построение пути выполняется в соответствии с алгоритмом 3:

1. Включить дискрет с индексом p , содержащий конечную точку пути, в трассу.

2. Выбрать дискрет с наименьшим индексом переходов и весом $p = p - 1$. Если дискрет с указанным весом не существует в текущем КДРП, то перейти к рассмотрению дискретов смежного КДРП.

3. Включить дискрет, выбранный в пункте 2, в трассу.

4. Значение индекса p уменьшить на единицу.

5. Повторять пункты 2–3 до тех пор, пока дискрет, содержащий начальную точку пути, не будет включен в трассу.

6. Конец алгоритма 3.

Разработанный алгоритм позволяет найти путь между двумя соединяемыми элементами в двухслойном коммутационном пространстве, в котором слои связаны между собой межслойными переходами. Алгоритм позволяет минимизировать длину соединения и количество переходных отверстий, что является важным показателем качества топологического рисунка.

Поступила в редколлегию 21.05.2000

Алипов Николай Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХТУРЭ. Научные интересы: алгоритмизация задач автоматизированного проектирования электронных вычислительных средств, защита информации. Адрес: Украина, 61089, Харьков, ул. Иртышская, 8, тел. 40–94–94.

Литвинова Евгения Ивановна, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХТУРЭ. Научные интересы: алгоритмизация задач автоматизированного проектирования электронных вычислительных средств. Адрес: Украина, 61018, Харьков, ул. Деревянко, 48, кв.43, тел. 40–94–94.

Куксов Виктор Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации электронных аппаратов ХТУРЭ. Научные интересы: алгоритмизация задач автоматизированного проектирования электронных вычислительных средств. Адрес: Украина, 61135, Харьков, ул. Героев Труда, 38, кв.120, тел. 40–94–94.