



Рис. 3

Усилители сигнала, зарядочувствительный усилитель, оконечные каскады временной развертки и подсвета расположены непосредственно в модуле ЭЛТ около ее выводов. Формирование сигналов временной развертки и подсвета осуществляется в модуле развертки (на котором находятся органы ручного управления). Формирователи считывающего раstra и цифровая память размещаются в модуле управления. Передача сигналов управления между модулями производится согласованными кабелями.

Вывод зарегистрированного процесса в разработанном регистраторе осуществляется на стандартный осциллограф через ЦАП.

На рис. 3, а, б представлены фотографии, полученные с экрана осциллографа, на который были выведены результаты кодирования типовых сигналов стандартных генераторов ГСС-12 и Г5-59.

Исследования по выбору и оптимизации режимов показали возможность получения скорости записи в исследовавшейся ЭЛТ $\sim 2 \cdot 10^8$ м/с (приведенные к стандартному осциллографическому экрану), что достаточно для реализации предельной полосы пропускания сигнальной системы ЭЛТ (2,5 ГГц).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хейес, Калгер, Хокен. Запоминающая трубка с кремниевой мишенью для исследования быстрых переходных процессов // *Электроника*.— 1973.— № 18.
2. Прасолов А В., Фомин Э. А. Скоростной генератор линейно изменяющегося напряжения // *ПТЭ*.— 1983.— № 6.

Поступила в редакцию 18 сентября 1987 г.

УДК 681.3.068

И. В. ТЮЧКАЛОВ
(Томск)

МЕТОД ТРАССИРОВКИ СОЕДИНЕНИЙ ПО СЕТИ ЛОКАЛЬНЫХ ЯЧЕЕК

В настоящей работе описано решение задачи трассировки соединений с малым количеством межслойных переходов по сети локальных ячеек.

Предложенный алгоритм учитывает совместное влияние всех соединений и электрических цепей на прокладываемую трассу, а также ис-

пользует воздействие трассируемого соединения на последующие с целью минимизации количества межслойных переходов и равномерного распределения соединений по магистралям. Исходными данными для трассировки являются: матрица P точек, задающих концы соединений, полученная в результате работы программы авторазмещения [1]; двоичный файл, описывающий соединения, найденный в результате предыдущих прогонов модулей трассировки или корректировки соединений с помощью графического редактора [2].

Разработанный метод предлагает использование следующих этапов: построение ориентированного графа обходов пересечений для каждого слоя; модификация орграфов и закрепление кратчайших цепочек ребер за соединениями; реализация матриц соединений по ребрам ориентированного графа и соединений по матрицам трасс.

На первых двух этапах используются лишь топологические характеристики объекта и изменяющиеся пропускные способности локальных областей. Утверждается, что существует топологическое решение задачи трассировки.

Модель трассировки. Пусть заданы: 1) многосвязная область O , покрытая сетью пересекающихся линий таким образом, что все контактные площадки и верхние точки замкнутых контуров попадают в пересечения; 2) основное направление трассировки области для каждого слоя.

Введем в рассмотрение матрицы $P, P^+, P^-, \Gamma^+, \Gamma^-, B, B^+, B^-, \Phi^+, \Phi^-, C$ с первоначально нулевыми компонентами, а также векторы H^+ и H^- и список C^+ . Основному направлению трассировки поставим в соответствие перемещение вдоль строк, а ортогональным направлениям «вверх» и «вниз» — вдоль столбцов матриц. Элементы структур свяжем с узлами сетки следующим образом.

Количество магистралей, которые пересекают линию между узлами сетки i, j и $i+1, j$, опишем элементом $\Gamma_{i,j}^+$ матрицы Γ^+ , а для узлов i, j и $i, j+1$ — элементом $\Gamma_{i,j}^-$ матрицы Γ^- .

Просуммируем компоненты Γ^+ и Γ^- и присвоим их элементам векторов H^+, H^- :

$$H_i^+ = \sum_j^{k_i} \Gamma_{i,j}^+, \quad i = \overline{1, k_s}; \quad H_j^- = \sum_i^{k_s} \Gamma_{i,j}^-, \quad j = \overline{1, k_l}, \quad (1)$$

где k_l, k_s — количество строк и столбцов матриц Γ^+ и Γ^- . Соотношение (1) связывает локальные геометрические ограничения Γ^+ и Γ^- с пропускной способностью области O вдоль основного и ортогонального направлений трассировки.

Количество магистралей между узлами сетки, по которым «втекают» в локальную область и «вытекают» из нее существующие соединения, свяжем с элементами матриц B (для соединений, пересекающих линию $i, j-i+1, j$), B^+ (для линии $i+1, j-i+1, j+1$), B^- ($i, j-i, j+1$).

Если в пересечение попадает точка, поименованная по ее принадлежности цепям электрической схемы, то ее имя присвоим компоненте матрицы P .

Количества магистралей, по которым «втекают» и «вытекают» существующие соединения в поименованную узловую точку (контактную площадку), присвоим элементам матриц P^+ (для соединений, пересекающих линию $i+1, j-i+1, j+1$), P^- (для линии $i, j-i, j+1$). По определению справедливы следующие соотношения между компонентами данных матриц:

$$B_{i,j} \leq \Gamma_{i,j}^+; \quad P_{i,j}^+ \leq B_{i,j}^+; \quad P_{i,j}^- \leq B_{i,j}^-; \quad B_{i,j}^- + B_{i-1,j}^+ \leq \Gamma_{i,j}^-, \quad (2)$$

где

$$i = \overline{1, k_l}; \quad j = \overline{1, k_s}.$$

Матрицы Φ^+ и Φ^- задают плотности соединений. Для учета существующих соединений выберем очередной прямолинейный отрезок с координатами $(i_1, j_1 - i_2, j_2)$ и модифицируем компоненты Φ^+ и Φ^- , пользуясь соотношения

$$\Phi_{i,j}^+ = \Phi_{i,j}^+ + \sum_{\min(i_1, i_2)}^{\max(i_1, i_2)} 1/\Gamma_{i,j}^+; \quad \Phi_{i,j}^- = \Phi_{i,j}^- + \sum_{\min(j_1, j_2)}^{\max(j_1, j_2)} 1/\Gamma_{i,j}^-. \quad (3)$$

Матрица C и список C^+ определяют ориентированный вдоль основного направления граф обхода пересечений трассируемых соединений. Начальное значение графа установим следующим образом. Для каждой электрической цепи из одноименных точек построим минимальное связывающее дерево и запишем в матрицу C в виде ссылок из вершины с меньшим номером столбца на точку с большим номером. Если компоненте C уже присвоено значение, то оно переписывается в список C^+ , а ссылка на C^+ записывается на ее место. В C^+ также записывается и ссылка на очередную вершину. Если соединение уже существует, то ориентированное ребро, соответствующее ему, маркируется.

Постановка задачи. Необходимо в области с пропускной способностью, определяемой компонентами векторов H^+ и H^- и ограничениями Γ^+ , Γ^- , построить матрицы B^+ , B^- , B , P^+ , P^- , описывающие соединения одноименных элементов матрицы P минимальной длины и с минимальным количеством поворотов.

Если ограничения Γ^+ , Γ^- и H^+ , H^- отсутствуют, то справедливо утверждение: существует метод построения матриц B^+ , B^- , B , P^+ , P^- , описывающих соединения, связывающие все одноименные точки из P .

Метод трассировки. Матрицы B , B^+ , B^- описывают соединения без петель, поэтому в процессе трассировки могут возникнуть тупиковые ситуации. Часть тупиков удаляется сдвигом мешающих соединений. Для осуществления таких операций воспользуемся рекурсивным методом, т. е. часть препятствующего соединения записывается в стек и делается попытка его сдвинуть; если вновь существует препятствие, то процедура повторяется со следующим мешающим соединением, и так до успешного осуществления операции или появления препятствующего соединения, которое невозможно сдвинуть. Использование матриц плотности Φ^+ и Φ^- позволяет предупредить такие ситуации. Перед предварительным закреплением любого соединения в каждой локальной ячейке проверяются соотношения

$$\sum_{\min(i_1, i_2)}^{\max(i_1, i_2)} (1 - \Phi_{i,j}^+) > 0; \quad \sum_{\min(j_1, j_2)}^{\max(j_1, j_2)} (1 - \Phi_{i,j}^-) > 0, \quad (4)$$

где i_1, i_2 — эффективная ширина области для столбца j ; j_1, j_2 — то же для строки i ; i, j — локальная ячейка, в которой размещается отрезок соединения; $i_1, j_1; i_2, j_2; i, j_1; i, j_2$ — локальные ячейки, соответствующие поименованным узловым точкам матрицы P , в которых начинаются либо заканчиваются ранее размещенные соединения.

Тупиковые ситуации возникают и не вследствие локальных ограничений. Перекрещивание трасс может появиться тогда, когда соединения начинаются либо заканчиваются элементами, стоящими в одинаковых строках, но пересекающихся позициях. Геометрическими образами такого рода соединений будут трассы с петлями. Для элиминации тупиков первого рода введем дополнительные столбцы в матрицы P . Переместим половину пересекающихся точек в них. Введем дополнительные столбцы и пересчитаем матрицы B , B^+ , B^- , Γ^+ , Γ^- , Φ^+ , Φ^- . Положим:

$$\begin{aligned} B'_{i,j} &= B'_{i,j+1} = \dots = B'_{i,j+k} = B_{i,j}; \\ B'^{(\pm)}_{i,j} &= B'^{(\pm)}_{i,j+1} = \dots = B'^{(\pm)}_{i,j+k} = B_{i,j}^{(\pm)}/(k+1); \\ \Gamma'^{(+)}_{i,j} &= \Gamma'^{(+)}_{i,j+1} = \dots = \Gamma'^{(+)}_{i,j+k} = \Gamma_{i,j}^+; \end{aligned}$$

количество вновь введенных столбцов.

Формулы (5) означают, что после коррекции элементы столбцов $j, j+1, \dots, j+k$ должны иметь локальные пропускные способности, удовлетворяющие соотношению

$$\Gamma'_{i,j} + \Gamma'_{i,j+1} + \dots + \Gamma'_{i,j+k} = \Gamma^-_{i,j}, \quad (6)$$

а существующие соединения распределяются равномерно по столбцам.

Пользуясь матрицей C и списком C^+ , построим ориентированный граф обходов пересечений, разбив на этапы процесс его создания.

1. Если имеет место пересечение двух ребер, то на концевых вершинах этих граней строится полный граф, из которого удаляются неустраиваемые пересечения, а также грани, по которым невозможно построить ориентированный путь между указанными точками. При этом вновь построенные грани могут, в свою очередь, пересекаться с какими-либо ориентированными ребрами.

2. При построении новых граней степени некоторых вершин графа резко увеличиваются и начинают превышать суммарные локальные ограничения. Поэтому для таких вершин рассчитывается количество свободных магистралей и сравнивается с числом огибающих в данном слое вершину $C_{l,k}$ соединений ($\deg C_{l,k}$):

$$\sum_{\min(l,m)}^{\max(l,m)} \Gamma_{i,k}^+ (1 - \Phi_{i,k}^+) - \deg C_{l,k} > 0, \quad \sum_{\min(k,n)}^{\max(k,n)} \Gamma_{l,j}^- (1 - \Phi_{l,j}^-) - \deg C_{l,k} > 0, \quad (7)$$

где l, k — координаты вершин. Процесс построения новых граней упорядочивается по данному критерию и заканчивается, если соотношение (7) начинает не выполняться. Разделим множество вершин орграфа C на два подмножества. В первое включим вершины с максимальным значением критерия (7).

3. Степень взаимовлияния цепочек, проходящих через вершины, принадлежащие разным множествам, минимальна, поэтому выберем цепочки, использующие вершины первого множества. Если имеется несколько вариантов соединений, то выбирается цепочка, удовлетворяющая оптимальному значению функции критерия, учитывающей влияние ранее распределенных соединений:

$$\sum_{n=2}^k \sum_{\min(i_{n-1}, i_n)}^{\max(i_{n-1}, i_n)} \sum_{\min(j_{n-1}, j_n)}^{\max(j_{n-1}, j_n)} \left(\frac{1}{\Gamma_{i,j}^+ (1 - \Phi_{i,j}^+)} + \frac{1}{\Gamma_{i,j}^- (1 - \Phi_{i,j}^-)} \right), \quad (8)$$

где $i_1, j_1 - i_2, j_2 - \dots, i_k, j_k$ — координаты вершин, огибаемых цепочкой.

Закрепим за соединением все грани выбранной цепочки, промаркировав их. Остальные цепочки граней удаляются из орграфа. Используя формулы (3), модифицируем элементы матриц Φ^+ и Φ^- . Пересчитаем функции критерия (7) для вершин второго множества. Расширим первое подмножество вершин. Повторим действия этапов 1—3 до тех пор, пока возможно построение новых граней.

4. Для соединений, которые невозможно распределить, последовательно применяем способы разделения их на прямолинейные отрезки с одним или двумя межслойными переходами и выбираем такие формы, которые дают максимальную функцию критерия (7). Затем проводим распределение по ячейкам, удовлетворяющее критерию (4), и повторяем действия этапов 1—3.

Полученная топологическая модель является первым шагом решения задачи трассировки многосвязной области. Осуществим построение матриц B , B^+ , B^- , пользуясь процедурой, описанной в начале раздела.

Процесс трассировки завершается расчетом соединений. Эта задача имеет однозначное решение, так как трассы не пересекаются.

ВЫВОДЫ

Подход, реализованный в данной работе, позволил разбить решение задачи трассировки на последовательность модулей, частично использующих описанные структуры данных, и сократить отводимый им пул до 4 байт общих и 6 байт для каждого слоя на локальную ячейку.

Модули входят в систему автоматизированного проектирования печатных плат [1]. Программы реализованы на языке PL-11 и могут работать как в операционном окружении на ЭВМ класса СМ-4, так и в индивидуальных графических станциях на базе микроЭВМ «Электроника 60» совместно с модулями графического редактора [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тючкалов И. В. Структурный подход к задаче размещения разногабаритных элементов // Автометрия.— 1984.— № 6.
2. Талыкин Э. А. РЕД — графический редактор в системе проектирования печатных плат // Автометрия.— 1984.— № 5.

Поступила в редакцию 16 января 1986 г.
