УДК 881.3.06

В. В. СЕМЕНЕЦ, канд. техн. наук

ПОСТРОЕНИЕ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ДЛЯ ТРАССИРОВКИ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Проблема проектирования микроэлектронных устройств (МЭУ) — длительный и трудоемкий процесс. Период разработки микроэлектронной аппаратуры может превышать период, в течение которого изделие пользуется спросом. Главной проблемой при проектировании МЭУ является огромное число возможных проектных решений, их необходимо исследовать для того, чтобы выбрать удовлетворительное решение. Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) уменьшает время разработки аппаратуры. Недостатком использования САПР является низкое качество проектирования, которое зачастую значительно уступает проекту, разработанному конструктором вручную. Причина заключается в том, что САПР используют эвристические алгоритмы, хорошо работающие только для узкого класса однотипных задач. При использовании САПР процессом проектирования управляет специалист в данной области.

Выходом из создавшейся ситуации является применение методов искусственного интеллекта. Основная особенность интеллектуального программного обеспечения для проектирования — использование специальных знаний о проблемной области. Знания чаще всего представляются набором эвристических решающих правил в форме «если — то» *.

Процесс трассировки многослойных конструкций с регулярной структурой предполагает решение двух этапов: расслоение и глобальная трассировка; локальная трассировка.

---

* *Паркер Э.С., Хайяти С.* Использование экспертных систем и кремниевой компиляции для автоматизации процесса проектирования СБИС//ТИИЭР. 1987. 75, № 6. С. 43—54.

Данная статья посвящена вопросу определения решающих правил для этапа локальной трассировки.

Зафиксируем прямоугольную декартову систему координат O_{xy}. Рассмотрим прямоугольник, ограниченный прямыми $x=0$, $x=m$, $y=0$, $y=n+1$, где m, n — фиксированные числа. Определим граф, который будем называть каналом M шириной n и длиной m (или просто каналом). В качестве вершины этого графа возьмем все точки вида (x, y) с целочисленными координатами, лежащие в указанном прямоугольнике, т. е. удовлетворяющие условиям

$$x \in \{0, 1, \ldots, m\}; \ y \in \{0, 1, \ldots, n+1\}.$$

Далее для простоты будем рассматривать горизонтальный канал. Для вертикального канала изменится только определение прямоугольной области. Контактные площадки электрических цепей расположены в узлах ортогональной сетки на всех четырех сторонах канала.

Многоконтактные электрические цепи разобьем на двухконтактные, упорядочив координаты контактных площадок по возрастанию координаты x и y. Будем считать, что на сторонах канала контактные площадки одной цепи в соседних узлах сетки располагаться не могут.

Под схемой будем понимать некоторое множество электрических цепей.

Планарная схема — это схема, цепи которой могут быть размещены в одном слое без пересечений.

Трассировкой схемы назовем систему деревьев, построенных на контактных площадках схемы и не имеющих общих точек.

Наша цель — найти условия, при которых задача трассировки планарной схемы в канале разрешима, дать алгоритм нахождения соответствующей трассировки.

Пронумеруем стороны прямоугольника, начиная с левой, по часовой стрелке цифрами от 1 до 4. Тогда для любой двухконтактной цепи координаты контактных площадок обозначим через (x_1^h, y_1^h) и (x_2^d, y_2^d), где h и d номера сторон прямоугольника, на которых расположены контактные площадки. В дальнейшем индексы для простоты записи будем опускать.

Рассмотрим канал, у которого только на горизонтальных сторонах расположены контактные площадки.

Определим длины цепей следующим образом:
при $h=2$, $d=2$

$$L = |x_2 - x_1|; \quad (1)$$

при $h=4$, $d=2$

$$L = 2m + n - (x_1 + x_2) + C_1, \text{ если } x_1 > x_2; \quad (2)$$

$$L = n + x_1 + x_2 + C_1, \quad \text{если } x_1 \leqslant x_2; \quad (3)$$

при $h=2$, $d=4$

$$L = 2m + n - (x_1 + x_2) + C_1, \text{ если } x_1 \leqslant x_2; \quad (4)$$

$$L = n + x_1 + x_2 + C_1, \quad \text{если } x_1 > x_2; \tag{5}$$

при $h = 4$, $d = 4$

$$L = |x_2 - x_1| + C_2, \tag{6}$$

где $C_1 = m$; $C_2 = 2m + 2n$.

Проранжируем цепи по возрастанию их длин. Если цепи разрешается проводить только с одним горизонтальным сегментом, условие трассировки выражает следующая теорема. Здесь и далее r — число двухконтактных цепей. Перенумеруем цепи последовательно от 1 до r в соответствии с возрастанием их длины.

Правило 1. Задача ортогональной трассировки планарной схемы в канале с минимальным числом поворотов трасс разрешима, если

$$n \geqslant \max\{p_i^r\},$$

где

$$p_i^j = a + 1, \quad \text{если} \quad i \in [x_н^j, x_к^j];$$

$$a = \max\{p_k^{j-1}\}, \text{ где } k \in [x_н^j, x_к^j];$$

$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае};$$

$$p_i^0 = 0; \; j = 1, r; \; i = \overline{1, m};$$

$$x_н^j = \min\{x_1^h, x_2^d\}; \quad x_k^j = \max\{x_1^h, x_2^d\}.$$

Если трассировка разрешена с максимальным числом поворотов трасс, то условие трассировки схемы в двухстороннем канале отражает следующая теорема.

Правило 2. Задача ортогональной трассировки планарной схемы в канале разрешима, если

$$n \geqslant \max\{p^r\},$$

где

$$p_i^j = \max\{p_{i-1}^{j-1}, p_{i+1}^{j-1}\} + 1, \text{ если } i \in [x_н^j + 1, x_к^j - 1];$$

$$p_i^j = p_{i+1}^{j-1} + 1, \text{ если } i = x_н^j;$$

$$p_i^j = p_{i-1}^{j-1} + 1, \text{ если } i = x_к^j;$$

$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае};$$

$$p_i^0 = 0; \; i = \overline{1, m}; \; j = \overline{1, r};$$

$$x_н^i = \min\{x_1^h, x_2^d\}; \quad x_к^j = \max\{x_1^h, x_2^d\}.$$

При трассировке многослойных печатных плат часто сложно выделить каналы прямоугольной формы. В этом случае выделяют области с непрямолинейными краями. Такие области будем называть криволинейными каналами.

Пусть криволинейный канал задан вектором $L=\{l_i\}$, $i=\overline{1,m}$, где l_i — ширина канала на i-й вертикале; m — длина канала.

Криволинейный канал может быть представлен как прямолинейный канал с постоянной шириной, но с запрещенными для трассировки областями. Преобразуем криволинейный канал в односторонне прямолинейный канал, который будет задаваться векторами

$$L_п=\{l_п\},\ P=\{p_i\},$$

где $l_{пi}$ — ширина преобразованного канала на i-й вертикале; p_i — ширина запрещенной для трассировки области на i-й вертикале. Заметим, что $l_{пi}=l_i+p_i$.

Правило 3. Задача ортогональной трассировки планарной схемы в криволинейном канале разрешима, если

$$l_{пi}\geqslant p_i^r,\ i=\overline{1,m},$$

где

$$p_i^j=\max\{p_{i-1}^{j-1},\ p_{i+1}^{j-1}\}+1,\ \text{если } i\in[x_н^j+1,\ x_к^j-1];$$

$$p_i^j=p_{i+1}^{j-1},\ \text{если } i=x_н^j;$$

$$p_i^j=p_{i-1}^{j-1}+1,\ \text{если } i=x_к^j;$$

$$p_i^j=p_i^{j-1},\ \text{в противном случае};$$

$$p_i^0=p_i;\ i=\overline{1,m};\ j=\overline{1,r};$$

$$x_н^j=\min\{x_1^h,\ x_2^h\};\ x_к^j=\max\{x_1^h,\ x_2^d\}.$$

Трассы электрических соединений можно выполнять под углом 45° к любой прямой ортогональной сетки, т. е. из точки с координатами $(x,\ y)$ возможен переход в соседние точки с координатами

$$(x+1,\ y),\ (x-1,\ y),\ (x,\ y+1),\ (x,\ y-1),\ (x+1,\ y+1),$$
$$(x+1,\ y-1),\ (x-1,\ y-1),\ (x-1,\ y+1).$$

Рассмотрим канал, на горизонтальных сторонах которого размещены контактные площадки r цепей. Цепи могут выбираться в произвольном порядке.

Правило 4. Задача трассировки планарной схемы в канале разрешима, если

$$n\geqslant\max\{p_i^r\},$$

где

$$p_i^j=p_i^{j-1}+1,\ \text{если } i\in[x_н^j+1,\ x_к^j-1];$$

$$p_i^j=p_i^{j-1},\ \text{в противном случае};$$

$$p_i^0=0;\quad i=\overline{1,m};\ j=\overline{1,r};$$

$$x_н^j=\min\{x_1^h,\ x_2^h\};\quad x_к^j=\max\{x^h,\ x_2^d\}.$$

В том случае, когда контактные площадки схемы расположены на всех четырех сторонах канала, условия трассировки вытекают из следующей теоремы.

Правило 5. Задача трассировки планарной схемы в канале разрешима, если $n \geqslant \max\{p_i^r\}$, $m \geqslant \max\{B_к^r\}$,

где
$$p_i^j = p_i^{j-1} + 1, \text{ если } i \in [x_н^j + 1,\ x_к^j - 1];$$
$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае};$$
$$B_к^j = B_к^{j-1} + 1, \text{ если } к \in [y_н^j + 1,\ y_к^j - 1];$$
$$B_k^j = B_k^{j-1}, \text{ в противном случае};$$
$$p^0 = 0,\ B_i^0 = 0;$$
$$i = \overline{1, m};\ к = \overline{1, n};\ j = \overline{1, r};$$
$$x_н^j = \min\{x^h,\ x^d\};\ y_н^j = \min\{y_1^h,\ y_2^d\};$$
$$x_к^j = \max\{x_1^h,\ x_2^d\};\ y_к^j = \max\{y_1^h,\ y_2^d\}.$$

В случае криволинейного канала преобразуем его в односторонне прямолинейный (как это делалось для ортогональной трассировки), который будет задаваться векторами $L_п = \{l_{пi}\}$, $P = \{p_i\}$. Дополним вектор $P = \{p_i\}$ таким образом, чтобы значение двух соседних элементов p_i, p_{i+1} отличались не более чем на единицу. Вновь полученный вектор обозначим $P^м = \{\beta_i^м\}$.

Правило 6. Задача трассировки планарной схемы в криволинейном канале разрешима, если $l_{пi} \geqslant p_i^r$,

где
$$p_i^j = p_i^{j-1} + 1, \text{ если } i \in [x_н^j + 1,\ x_к^j - 1];$$
$$p_i^j = p_i^{j-1}, \text{ в противном случае};$$
$$p_i^0 = p_i^м,\ j = \overline{1, r},\ i = \overline{1, m};$$
$$x_н^j = \min\{x_1^h,\ x_2^d\};\quad x_к^1 = \max\{x_1^h,\ x_2^d\}.$$

Ниже будет описан универсальный алгоритм трассировки каналов любых модификаций и независящий от типа проведения трасс. Рассмотрим общий случай, когда контактные площадки расположены на всех четырех сторонах канала.

В зависимости от значений h и d длину цепи L будем определять с помощью следующих выражений:

при $h = 2$, $d = 4$ или $h = 4$, $d = 2$
$$L_1 = 2m + n - (x_1 + x_2),\quad L_2 = n + x_1 + x_2,\ L = \max\{L_1,\ L_2\}; \tag{7}$$
при $h = 2$, $d = 2$ или $h = 4$, $d = 4$
$$L = |x_2 - x_1|; \tag{8}$$
при $h = 1$, $d = 1$ или $h = 3$, $d = 3$
$$L = |y_2 - y_1|; \tag{9}$$
при $= 1$, $d = 3$ или $h = 3$, $d = 1$

$$L_1 = y_2 + y_1 + m, \quad L_2 = m + 2n - (y_2 + y_1),$$

$$L = \min\{L_1, L_2\}; \tag{10}$$

при $h=1$, $d=2$

$$L = n + x_2 - y_1; \tag{11}$$

при $h=1$, $d=4$

$$L = y_1 + x_2; \tag{12}$$

при $h=2$, $d=3$

$$L = m - x_1 + n - y_2; \tag{13}$$

при $h=3$, $d=4$

$$L = y_1 + m - x_2; \tag{14}$$

при $h=2$, $d=1$

$$L = n + x_1 - y_2; \tag{15}$$

при $h=4$, $d=1$

$$L = x_1 + x_2; \tag{16}$$

при $h=3$, $d=2$

$$L = n - y_1 + m - x_2; \tag{17}$$

при $h=4$, $d=3$

$$L = m - x_1 + y_2. \tag{18}$$

Алгоритм.

Трассировка цепей осуществляется по возрастанию их длины (формулы (7)—(18)) и ведется с максимальным приближением к зоне, по которой определялась ее длина. Процедурой обратной перетрассировки удаляются лишние изломы.

Поступила в редколлегию 04.12.89