УДК 881.3.06

В. В. СЕМЕНЕЦ, канд. техн. наук, *Г. Г. ФОМИН*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАССИРОВКИ СОЕДИНЕНИЙ В КАНАЛЕ

Проектирование современных микроэлектронных устройств (МЭУ) — сложная и трудоемкая задача для человека-конструктора. Системы автоматизации проектирования (САПР) позволяют сократить сроки создания аппаратуры и облегчить труд конструктора. Для улучшения результатов проектирования МЭУ необходимо, чтобы системы моделировали как можно более точно работу эксперта-конструктора. В статье рассмотрено моделирование трассировки соединений конструктором в однослойном четырехсторонем канале.

Из всех алгоритмов трассировки наиболее широко применяются в САПР МЭУ две группы алгоритмов: модификации волнового алгоритма и алгоритмы на основе канального подхода.

Для узлов с дискретными элементами эффективные результаты можно получить путем использования модификаций волнового алгоритма. Достоинством указанных алгоритмов является то, что они всегда находят путь (если он существует) между двумя точками. Но для сложных, загруженных схем особенно остро проявляются недостатки данной группы алгоритмов: большой расход оперативной памяти, возрастание затрат машинного времени, последовательный характер проведеная соединений, что приводит на определенном этапе к невозможности трассировки оставшихся соединений из-за «блокировки» отдельных выводов элементов.

Для преодоления указанных недостатков применяют гибкую трассировку или трассировку по макродискретам. Трассировка проводится волновым алгоритмом по макродискретам, которые представляют собой связные области правильной конфигурации. При этом указывается лишь пропускная способность ребер каждого макродискрета и контролируется только количество трасс, пересекающих ребра макродискрета [1].

При расположении элементов в узлах регулярной структуры целесообразно применять канальные алгоритмы. Канальная трассировка обычно разбивается на два этапа [2]: предварительная трассировка с целью распределения соединений по каналам с учетом равномерной загрузки последних; окончательная трассировка в каналах, в процессе которой уточняется положение соединений между контактами, расположенных на линейках канала.

Как отмечалось в [3], такой подход предполагает решение нескольких задач меньшей размерности, поэтому кажется весьма перспективным.

При проектировании конструкций с одним слоем коммутации наибольшее распространение получил топологический подход, ко-

торый учитывает основное ограничение в виде требования плоской реализации соединений.

В работах [4, 5] рассматривается общая задача трассировки однослойного канала с двухсторонней линейной последовательностью контактов. Предлагается методика для нахождения множества соединений, которое можно разместить в заданном числе магистралей. В работе [5] было отмечено, что задача нахождения наибольшего множества соединений в однослойном канале с двухсторонней линейной последовательностью контактов и ограниченным числом магистралей не нашла своего оптимального решения.

В данной статье предложено решение задачи трассировки в однослойном четырехстороннем канале и описан алгоритм трассировки данного канала.

Предлагается, что рассматриваемая в канале схема — планарная. Модель канала введем по аналогии с [3]. Зафиксируем прямоугольную декартову систему координат Oxy. Рассмотрим прямоугольник, ограниченный прямыми $x=0$, $x=n$, $y=0$, $y=l+1$, где n, l — фиксированные числа (рис. 1).

Определим граф, который будем называть каналом L шириной l и длиной n (или просто каналом). В качестве вершин этого графа возьмем все точки вида (x, y) с целочисленными координатами, лежащие в указанном прямоугольнике, т. е. удовлетворяющие условиям $x \in \{0, 1, ..., n\}$; $y \in \{0, 1, 2, ..., l+1\}$. Далее будем для простоты рассматривать горизонтальный канал. Для вертикального канала изменится только определение прямоугольной области.

Ребра графа могут проходить по линиям ортогональной сетки или под углом 45° к любой линии сетки.

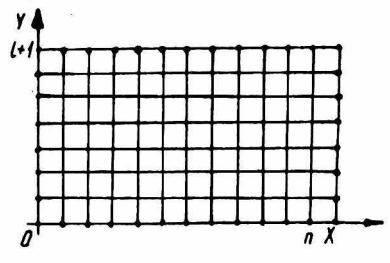

Рис. 1.

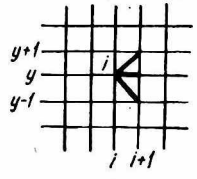

Рис. 2.

Множество контактов электрической схемы X отображается в множество вершин $\{(x, 0), (x, l+1) \mid x=1, ..., n-1\} \cup \{(0, y), (n, y) \mid y=1, ..., l\}$ канала. Другими словами, множество контактов электрической схемы может располагаться на всех четырех границах канала, т. е. образуется четырехсторонний канал. Цепи, выходящие на боковые стороны канала, могут соединяться с кон-

тактами разъема или цепями, принадлежащими перпендикулярно расположенным другим каналам.

Трассы могут проходить через вертикаль канала только один раз и проводиться в пределах канала, не включая его границ. Будем считать, что на сторонах канала контактные площадки одной цепи в соседних узлах сетки располагаться не могут.

Все цепи разобьем на двухконтактные фрагменты (далее просто фрагменты) последовательным просмотром канала слева направо. Наша цель заключается в определении условий, которые гарантируют 100 %-ую трассировку всех цепей схемы в канале.

Введем понятие кратности схемы в канале. Для рассматриваемого в данной статье типа трасс (трассы могут прокладываться под углом 45° в любом месте канала, в том числе и от его границ) кратность схемы определяется следующим образом.

Пусть $x_0 \in \{0, 1, 2, ..., n\}$. Выделим в этом множестве два подмножества: $x_0' \in \{1, 2, ..., n-1\}$; $x_0'' \in \{0, n\}$. Кратностью схемы X в точке x_0' называется число $K'(x_0)$, равное числу фрагментов, у которых существуют контакты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) такие, что $x_1 < x_0 < x_2$. Кратностью схемы X в точке x_0'' называется число $K''(x_0)$, равное числу фрагментов, которые имеют контакты на вертикале x_0'' канала. Кратностью схемы X называется число

$$K = \max \{(K'(x_0')) \mid x_0' \in \{1, 2, ..., n-1\}, (K''(x_0'')) \mid x_0'' \in \{0, n\}\}.$$

Теорема. *Пусть схема X размещена без пересечений в четырехстороннем однослойном канале L шириной l (l — число магистралей, разрешенных для трассировки). K — кратность схемы. Задача трассировки в канале разрешима, если $l \geqslant K$.*

Доказательство. Будем просматривать каналы слева направо путем последовательной обработки каждой вертикали. На каждой вертикали трассы могут располагаться в двух зонах — верхней и нижней. Если контактная площадка (КП) цепи находится на верхней или боковых сторонах, то на всех остальных вертикалях эта трасса будет располагаться в верхней зоне, а если КП цепи находится на нижней стороне канала, то на всех остальных вертикалях данная трасса будет находиться в нижней зоне. Цепи, контакты которых расположены на боковых сторонах канала, относятся к цепям верхней зоны. Каждая зона должна заполняться плотно, чтобы между цепями не оставались незаполненные магистрали.

Если j-цепь находится на i-й вертикали и на y-й магистрали, то ее координаты будем обозначать следующим образом: x_i^j, y_i^j. По сути $x = i$.

При переходе от i-й вертикали к $(i+1)$-й должны выполняться следующие правила:

1) если на i-й вертикали на верхней стороне канала появилась первая КП фрагмента j-й цепи, то на $(i+1)$-й вертикали эта

цепь будет иметь координату (x_i^j+1, l_i^j). Для остальных цепей верхней зоны на $(i+1)$-й вертикали координаты будут (x_i^j+1, y_i^j-1), $j=\overline{1, N_v}$, где N_v — количество цепей в верхней зоне;

2) если на i-й вертикали на верхней стороне канала нет КП, то на $(i+1)$-й вертикали координаты цепей верхней зоны станут равными (x_i^j+1, y_i^j), $j=\overline{1, N_v}$;

3) если на i-й вертикали на верхней стороне канала находится вторая КП фрагмента j-й цепи, то на $(i+1)$-й вертикали все цепи верхней зоны будут иметь координаты (x_i^j+1, y_i^j+1), $j=\overline{1, N_v}$;

4) если на i-й вертикали на нижней стороне канала появилась первая КП фрагмента j-й цепи, то на $(i+1)$-й вертикали эта цепь будет иметь координаты $(x_i^j+1, 1)$. Для остальных цепей нижней зоны на $(i+1)$-й вертикали координаты будут (x_i^j+1), $y_i^j+1)$, $j=\overline{1, N_n}$, где N_n — количество цепей в нижней зоне;

5) если на i-й вертикали на нижней стороне канала нет КП, то на $(i+1)$-й вертикали координаты цепей нижней зоны станут равными (x_i^j+1, y_i^j), $j=\overline{1, N_n}$;

6) если на i-й вертикали на нижней стороне канала находится вторая КП фрагмента j-й цепи, то на $(i+1)$-й вертикали все цепи нижней зоны будут иметь координаты (x_i^j+1, y_i^j-1), $j=1, N_n$.

Если на вертикали возникает какая-либо комбинация контактов, то следует применять суперпозицию соответствующих правил. Например, если на i-й вертикали на верхней стороне находится первая КП фрагмента, а на нижней КП отсутствует, то следует применять 1 и 5 правила. Очевидно, что при любых комбинациях контактов на сторонах канала все описанные правила могут быть выполнены при соблюдении условия $l \geqslant K$. Следовательно, теорема доказана.

Доказанная теорема имеет значение не только для канальных алгоритмов. Как уже отмечалось, при гибкой трассировке в существующих алгоритмах контролируется лишь количество трасс, пересекающих ребра макродискрета. Если в качестве макродискрета выбрать прямоугольник — канал, то зная количественную оценку схемы в канале (в соответствии с доказанной теоремой), можно точно определить число цепей, которые могут пересекать ребра макродискрета — стороны канала, чтобы схема могла быть реализована в канале без пересечений.

Рассмотрим алгоритм трассировки четырехстороннего однослойного канала. Пусть S — множество всех фрагментов. Выделим из множества S подмножество фрагментов S', которые имеют КП на правой боковой границе канала.

Отличительной чертой алгоритма является применение принципа параллельности. Это значит, что трассировка всех соедине-

ний проводится одновременно, последовательной обработкой всех вертикалей канала. Последовательный алгоритм трассировки для двухстороннего однослойного канала описан в [5]. Недостатком такого алгоритма является многоэтапность; разбиение всех соединений на классы; ранжирование соединений в пределах класса; трассировка выбранного соединения.

Применение параллельного алгоритма позволяет сократить используемый объем оперативной памяти и затраты машинного времени.

Пусть j-й фрагмент расположен на i-й вертикали в узле с координатами (x_i^j, y_i^j). Проведение j-го фрагмента до $(i+1)$-й вертикали возможно к трем узлам с координатами: (x_i^j+1, y_i^j+1); (x_i^j+1, y_i^j); (x_i^j+1, y_i^j-1) (рис. 2).

Для каждого фрагмента определяется приоритетное направление проведения трасс. Приоритет определяется положением ключевого контакта фрагмента. Ключевым контактом называется вторая (правая) КП для фрагментов подмножества $\overline{S=S}$, S' и первая (левая) КП для фрагментов подмножества S'.

Если ключевой контакт расположен на верхней (нижней) границе канала, то приоритетное направление проведения трассы верхнее (нижнее). Это значит, что при проведении j-го фрагмента с верхним приоритетом слева направо сперва анализируется узел с координатами x_i^j+1, y_i^j+1). Если он свободен (через него не проходят другие фрагменты), то трасса прокладывается к данному узлу. В противном случае анализируется узел с координатами x_i^j+1, y_i^j) и т. д. Аналогично для фрагментов с нижним приоритетом. Следует заметить, что один из трех указанных узлов обязательно будет свободен — это гарантируется теоремой.

На вертикали можно выделить две зоны, в общем случае не плотно заполненные, в которых фрагменты имеют одинаковый приоритет. В верхней и нижней зонах просмотр фрагментов будем проводить последовательно от верхней и нижней границ канала соответственно.

Приведем алгоритм обработки одной магистрали.

Алгоритм 1. Анализ i-й вертикали.

1. Просмотр фрагментов нижней зоны. Если фрагмент не принадлежит Q, то переход к п. 3, иначе — к п. 2.

2. Проведение трассы до $(i+1)$-й вертикали.

3. Анализ следующего фрагмента нижней зоны. Если следующего фрагмента в зоне нет, то переход к п. 4, иначе — к п. 2.

4. Просмотр фрагментов верхней зоны. Если фрагмент не принадлежит Q, то переход к п. 6, иначе — к п. 5.

5. Проведение трассы до $(i+1)$-й вертикали.

6. Анализ следующего фрагмента верхней зоны. Если следующего фрагмента в зоне нет, то переход к п. 7, иначе — к п. 4.

7. Конец.

С учетом указанного запишем алгоритм трассировки канала. Алгоритм трассировки состоит из двух этапов: на первом этапе трассируются фрагменты подмножества S, на втором — фрагменты подмножества S'.

Алгоритм 2. Трассировка четырехстороннего однослойного канала.

1. Просмотр канала слева направо — трассировка цепей подмножества S.

1.1. Анализ i-й вертикали в соответствии с Алгоритмом 1, $Q=S$.

1.2. Переход к $(i+1)$-й вертикали. Если i-я вертикаль последняя, то переход к п. 2, иначе — к п. 1.1.

2. Просмотр канала справа налево — трассировка цепей подмножества S'.

1.3. Анализ i-й вертикали в соответствии с Алгоритмом 1, $Q=S'$.

1.4. Переход к $(i+1)$-й вертикали. Если i-я вертикаль последняя, то переход к п. 3, иначе — к п. 1.3.

3. Конец.

На рис. 3 показан вид канала, протрассированного в соответствии с Алгоритмом 2. Недостатком такой трассировки является

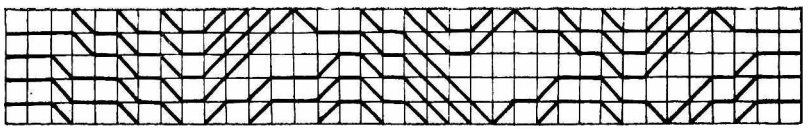

Рис. 3. Протрассированный канал

наличие лишних изломов на трассах, которые могут быть устранены простой процедурой перетрассировки.

Список литературы: 1. *Петренко А. И., Тетельбаум А. Я.* Формальное конструирование ЭВА. М., 1979. 256 с. 2. *Селютин В. А.* Машинное конструирование электронных устройств. М., 1977. 383 с. 3. *Яковлев Н. Н., Асанов М. О., Баранский В. А.* Развитие канального подхода в конструировании микроэлектронной аппаратуры. Свердловск, 1987. 127 с. 4. *Маркосян С. Е., Газарян Г. А.* О некоторых задачах линейной трассировки//Вопр. радиоэлектроники, сер. ЭВТ. 1974. Вып. 9. С. 16—21. 5. *Газарян Г. А.* О задаче трассировки линейного канала//Вопр. радиоэлектроники, сер. ЭВТ. 1979. Вып. 9. С. 57—62.

Поступила в редколлегию 20.03.89