

## 5. Проектирование топологии печатных плат и интегральных схем

### 5.1. Введение

Этап проектирования топологии представляет собой переход от схемной информации (логической или электрической схем) к геометрической информации (размещению в поле чертежа печатной платы или площади кристалла ИС элементов схемы и созданию рисунка проводников, соединяющих эти элементы). Одновременно это переход от модельного описания проектируемого изделия к описанию реальной физической его реализации. Только на этом этапе станут известными реальные характеристики проводников, их длина, ширина, площадь и следовательно их емкость, сопротивление и индуктивность, что в конечном счете определит ряд важнейших характеристик изделия, например, его быстродействие.

Топология печатных плат (ПП) представляет собой только рисунок соединительных проводов, размещенных в соответствующем слое платы. Такой рисунок можно создать после того, как намечены места размещения элементов схемы и следовательно известны координаты всех выводов каждого элемента. Однако рисунок самого элемента не является обязательным элементом топологии ПП. Еще одной особенностью ПП является то, что здесь можно вести трассу под элементом схемы. Например, можно провести один или несколько проводников под корпусом ИС и даже между ее выводами.

В случае монолитной ИС ситуация иная. В этом случае элементы схемы сформированы в толще кристалла у его поверхности, а разводка выполнена на поверхности окисла, покрывающего кристалл. Поэтому здесь возможность проведения проводника над элементом схемы сильно ограничена. Если же при проектировании топологии ИС используются стандартные блоки (подсхемы), уже имеющие внутреннюю разводку, внешние проводники можно вести только вне площади блока. Кроме того, рисунок областей элемента схемы, например, транзистора, входит в общее описание топологии ИС. Еще одной особенностью процесса проектирования топологии ИС является ее чрезвычайная сложность (современные микропроцессоры, например, содержат несколько десятков миллионов транзисторов на кристалле), тогда как ПП значительно проще (максимум полторы – две сотни элементов, хотя среди них могут быть элементы, содержащие очень много выводов, например, микропроцессоры).

Таким образом, требования к топологии и соответственно к подсистеме проектирования топологии ИС и ПП сильно различаются, что приводит к тому, что это бывают разные подсистемы. Однако во всех случаях можно выделить некоторые общие задачи, которые решаются подобными методами. Такими задачами являются размещение элементов и последующая разводка соединений. Ниже будут рассмотрены основные методы и алгоритмы решения этих задач.

При проектировании сложных систем на дискретных элементах (такими элементами могут быть ИС высокой степени интеграции) процесс перехода от схемы к топологии включает промежуточный этап - этап компоновки или разбиения. При этом выстраивается следующая иерархия: система (изделие) состоит из блоков (стоек, шкафов), включающих панели (устройства, субблоки) в которых используются отдельные печатные платы (ячейки, ТЭЗ). Для решения этой задачи разработаны соответствующие алгоритмы, позволяющие разбить очень большую схему на упомянутые иерархические элементы. Однако на практике такое разбиение закладывается в проект изначально, уже на системном уровне. И к моменту проектирования ПП такая иерархия уже выстроена.

Аналогичная задача решается и при проектировании ИС сверхбольшой (СБИС) и ультра большой (УБИС) степени интеграции. Уже на системном уровне выделяются блоки (подсистемы), предварительно определяется площадь этих блоков и их размещение на кристалле. Поэтому на этапе проектирования топологии ИС рассматриваются блоки относительно небольшого размера, которые состоят из отдельных элементов. Но такими элементами могут быть как отдельные транзисторы, так и крупные библиотечные элементы, содержащие тысячи транзисторов.

## 5.2. Алгоритмы размещения

Размещение элементов — это задача определения их местоположения на коммутационном поле (КП) в конструктивном модуле. Размещение должно быть таким, при котором создаются наилучшие условия для решения последующей задачи трассировки соединений с учетом конструктивно-технологических требований и ограничений. Следует отметить, что задачи размещения элементов и трассировки соединений тесно связаны и в неавтоматизированных методах конструирования решаются одновременно. Раздельное решение этих задач в САПР объясняется только сложностью их совместного автоматического решения.

В САПР находят применение следующие критерии размещения:

- суммарная длина всех соединений;
- расстояние между элементами, соединенными наибольшим числом связей;
- число пересечений проводников на КП;
- длина наиболее длинных связей;
- число цепей с возможно более простой конфигурацией;
- число перегибов проводников;
- число межслойных переходов;
- параметры паразитных связей между элементами и проводниками;
- равномерность температуры по поверхности КП и некоторые другие.

Можно выделить три типа задач размещения:

1. Размещение однотипных элементов с заранее заданными однотипными установочными местами на КП (под однотипностью понимается, что любой элемент может быть помещен на любое посадочное место).
2. Размещение элементов нескольких разных типов кратных размеров с заранее определенными установочными местами на КП.
3. Размещение разногабаритных элементов, таких как электрорадиоэлементы (ЭРЭ), компоненты ИС, ГИС и т. п., на КП произвольной конфигурации.

Естественно, что наиболее труден третий тип задач. В этом случае, как правило, синтезируют промежуточные псевдомодули (объединяющие ЭРЭ по группам) с определенными геометрическими посадочными размерами.

Исходной информацией для задач размещения являются: габариты и конфигурация КП, геометрические размеры всех типов размещаемых элементов, ограничения на взаимное расположение отдельных элементов.

При размещении элементы представляются точками, что значительно упрощает решение задачи, к тому же принципиальных трудностей при переходе от точек к элементам нет.

В большинстве случаев основным критерием является суммарная длина соединений (СДС), который косвенно учитывает другие из перечисленных критериев и прост с математической точки зрения.

Расстояние между позициями установки элементов (точками) рассчитывается по одной из следующих формул:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (2)$$

$$d_{ij} = |x_i - x_j|^s + |y_i - y_j|^s \quad (3)$$

где  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_j, y_j)$  — координаты  $i$ -й и  $j$ -й позиций КП.

Формула (1) соответствует прокладке проводных соединений по кратчайшему пути, формула (2) — проведению проводников по каналам или магистралям, параллельным координатным осям КП, формула (3) используется для уменьшения максимальной длины проводников (показатель степени  $s=3, 4, 5$  выбирается экспериментальным путем).

Задача сводится к тому, чтобы на множестве установочных вакантных мест  $\mathbf{K}=\{k_1, k_2, \dots, k_p\}$  разместить множество элементов схемы  $\mathbf{X}=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , добиваясь минимизации целевой функции, которая выражает один или несколько критериев размещения. В большинстве случаев минимизируется общая суммарная длина соединений между размещенными элементами

$$L = \sum_{i=j}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} c_{ij} \quad (4)$$

где  $c_{ij}$  — число связей между элементами  $x_i$  и  $x_j$ .

Часто элементы, наиболее связанные между собой, предварительно объединяются в группы. Группа при размещении рассматривается как один элемент, внутренние связи которого не учитываются.

Все известные и доведенные до практической реализации алгоритмы размещения являются приближенными, что оказывается достаточным, так как величины  $d_{ij}$  в (4) суть расстояния между центрами элементов (точек), а не истинные длины соединений, которые определяются при дальнейшем решении задачи трассировки.

Алгоритмы размещения можно разделить на следующие основные группы.

1. Алгоритмы, использующие силовые функции, в которых задача размещения сводится к задаче определения статического состояния модельной механической системы материальных точек. Элементы интерпретируются как материальные точки, между которыми действуют силы притяжения и отталкивания. Силы притяжения  $F_{ij}$  между точками  $P_i(x_i, y_i)$  и  $P_j(x_j, y_j)$  пропорциональны числу связей  $c_{ij}$ , силы отталкивания  $\Phi_{ij}$  между точками  $P_i$  и  $P_j$  возрастают с уменьшением  $d_{ij}$ . Вводятся силы отталкивания  $G_i$ , от краев КП и силы сопротивления среды  $k\dot{X}_i$ ,  $k\dot{Y}_i$  где  $\dot{X}_i$ ,  $\dot{Y}_i$  — скорости движения точки,  $k$  — экспериментально определяемый коэффициент. Алгоритмы этой группы сложны для реализации на ЭВМ.

2. Алгоритмы последовательного размещения предусматривают первоначальное размещение части элементов. На следующем шаге рассматривается упорядоченное множество неразмещенных элементов, множество свободных позиций и матрица длин связей  $[d_{ep}]$ , где  $d_{ep}$  — длина соединений между элементом  $e$  и другими ранее размещенными элементами при условии размещения элемента  $e$  в позиции  $p$ . Для каждой позиции определяется суммарная длина соединений (СДС) элементов, для которых эта позиция наиболее удобна (в смысле минимальной длины соединений с размещенными элементами). Иногда рассчитывается не абсолютная длина соединений, а приращение длины соединений, т. е. вводится некоторая целевая функция, учитывающая связи данного элемента с размещенными элементами. После размещения очередного элемента (модуля) процесс повторяется для оставшихся элементов и вакантных установочных мест до тех пор, пока не будут размещены все элементы.

Алгоритмы этой группы просты в реализации и наиболее быстродействующие.

3. Алгоритмы перестановки элементов (парные замены, соседние парные замены, частичный перебор) предполагают наличие начального размещения, полученного с помощью алгоритмов первой или второй группы или вручную, и используются для улучшения первоначального размещения. Например, в итерационном алгоритме парных замен каждый элемент меняется с каждым и при каждой пробе проверяется, сокращается ли СДС. Все возможные пробы (их число равно  $n(n-1)/2$ , где  $n$  — число элементов) составляют одну итерацию. Выбирается та замена, которая приводит к наибольшему сокращению СДС. Время решения пропорционально  $n^2$  и при больших размерностях применение алгоритма нецелесообразно. Алгоритм соседних парных замен отличается от предыдущего просмотром только соседних элементов (например, при расстоянии  $k=4$  от первичного элемента просматривается около  $2k(k+1)=40$  элементов). Применяются методы упорядочения просмотра элементов при замене, групповые перестановки.

4. Алгоритмы, использующие принцип случайного размещения, предусматривают решение многокритериальной и многоэкстремальной задачи о назначении. Решение полу-

чается точным, но требует большого машинного времени, так как просматриваются различные варианты (полный перебор) закрепления элементов на посадочные места с вычислением в каждом варианте целевой функции (СДС). Сюда относятся алгоритмы случайного поиска (слепого поиска, случайного блуждания), алгоритмы назначения (линейного назначения, квадратичного назначения).

Рассмотрим несколько конкретных примеров алгоритмов размещения. Алгоритмы первой группы удобно использовать для размещения элементов ИС на кристалле. Контактные площадки, через которые осуществляется доступ к схеме, располагаются по периметру ее кристалла (рис.1) с заданным шагом, определяемым технологическими требованиями. Если связать центры контактных площадок, которые неподвижны, с центрами элементов, размещаемых на кристалле, “пружинами”, моделирующими провода, имеющиеся в схеме, то положение равновесия такой системы обеспечит приемлемое решение задачи размещения. Толщина “пружин” на этом рисунке отражает число связей между элементами.

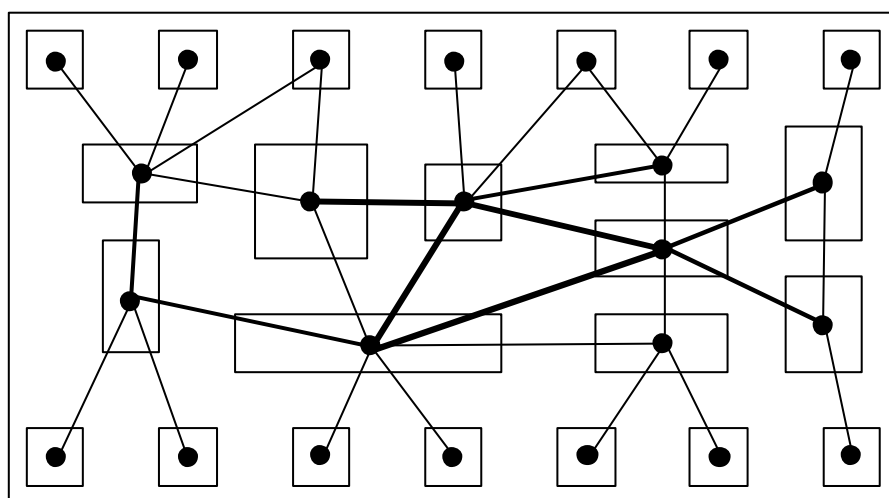


Рис.1

**Метод половинного деления** можно отнести к методам второй группы. Здесь критерием качества размещения является минимизация количества проводников, проходящих через границу области блока. Этот метод предусматривает такое разделение коммутационного поля на две части, при котором общая площадь блоков будет в них приблизительно одинаковой, а число групп проводников, соединяющих эти части, - минимальным. Операции деления (рис. 2) производят до тех пор, пока не будет получен единственный блок или последовательность линейно расположенных блоков. При проектировании топологии ИС алгоритм можно модифицировать следующим образом. Площадь кристалла делится на две части при условии минимального числа проводников, проходящих через границы блоков, но их площадь пропорциональна суммарной площади элементов, входящих в блок. Далее аналогично.

**Метод использования потоков сигналов в логической схеме.** Данный метод отображает последовательность, в которой разработчик, анализируя логическую схему при ручном проектировании, определяет расположение отдельных блоков. Действительно, при вычерчивании логической схемы разработчик размещает логические вентили (блоки) по возможности в соответствии с направлениями потоков сигналов. Во многих случаях такой подход позволяет сократить длину сигнальных шин и количество их пересечений. Включив этот принцип в ориентированный на ЭВМ алгоритм и, например, ранжировав вентили на логической схеме, можно выработать некоторые правила, позволяющие отобразить эти вентили в виде ячеек, упорядоченно расположенных на поверхности кристалла. При этом, однако, следует принимать во внимание необходимость сокращения длины соединительных проводников по критическому пути, определяющему задержку на

передачу сигналов.

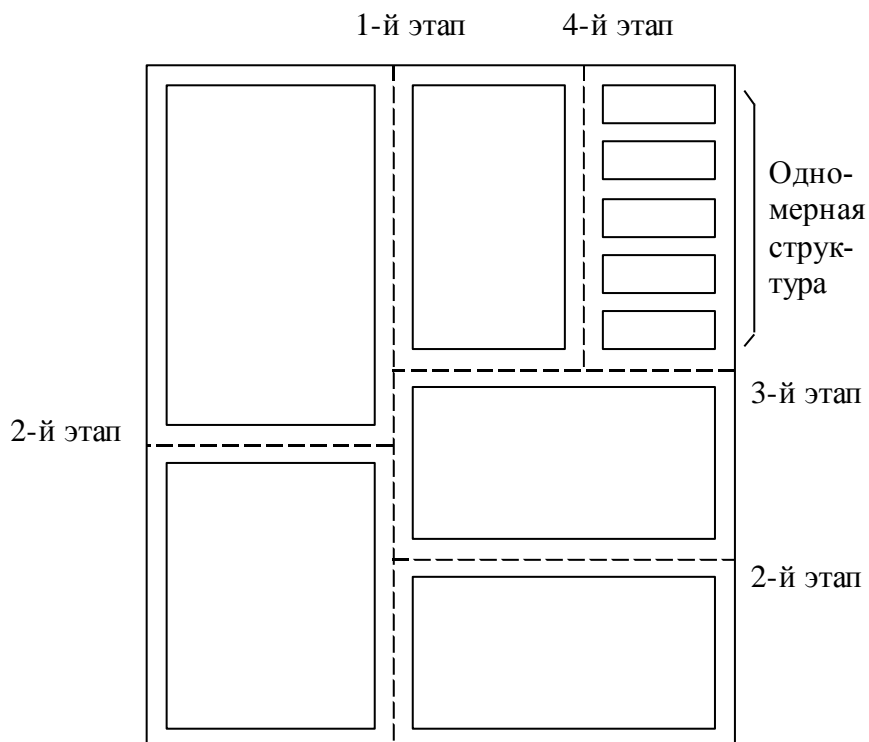


Рис.2

**Метод парных перестановок.** Если выбрав один блок А, можно добиться улучшения топологии путем его перестановки с каким-либо другим блоком, то такая процедура называется перестановкой блоков А и В (если наибольшая эффективность достигается при этой перестановке).

В зависимости от пределов, в которых может выбираться переставляемый блок В, существует несколько методов перестановки:

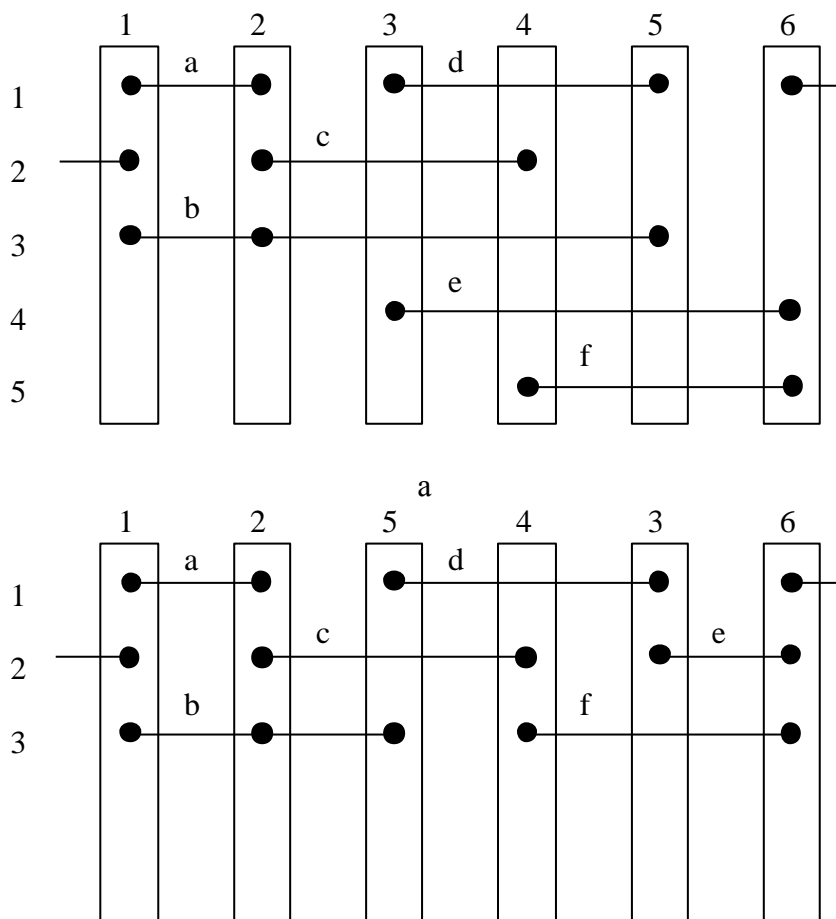
1. Объектом перестановки являются все блоки, кроме А.

2. Объектом перестановки являются только блоки, расположенные поблизости от А.

Степень близости определяется настройками алгоритма.

Используются и другие критерии поиска блока В.

**Одномерная задача размещения.** Если в ряду блоков, входящих в состав группы, расположенной на кристалле или на его части, можно пренебречь их связями с блоками других групп, то локально-оптимальное расположение блоков можно приближенно оценить с помощью модели, показанной на рис. 3. На этом рисунке по горизонтали указаны номера вентилях (микросхем) а по вертикали номера каналов, по которым будет выполняться трассировка. Оценка сводится к задаче минимизации количества необходимых трасс при условии, что все блоки соединяются в горизонтальном направлении. Другими словами, это задача минимизации максимального значения количества и суммарной длины проводников и числа внешних выводов для каждого блока. Отметим, что в примере рис. 3 расположение блоков в варианте б более целесообразно, чем в варианте а. Как и при двумерной топологии, задача может решаться разными методами: методом силовых функций, предусматривающим поочередное сближение блоков с наиболее сильной связью между ними, или методом парных перестановок, согласно которому значение оценочной функции улучшают путем многократной замены и перестановки блоков.



б  
Рис.3

### 5.3 Алгоритмы трассировки монтажных соединений

Трассировка монтажных соединений — это задача геометрического построения на *КП* всех цепей данного конструктива, координаты начала и конца которых определены при размещении элементов. При этом необходимо учитывать различные конструктивно-технологические ограничения (допускаются пересечения или нет, возможен ли переход со слоя на слой, сколько слоев отводится для трассировки, ортогональная трассировка или нет, допустимые ширина проводников и расстояния между ними и т. д.). Алгоритмы трассировки существенно зависят от принятой конструкции и технологии изготовления РЭА.

Трассировка печатных плат и интегральных схем родственны и зависят от метрических (размеры элементов и компонентов, ширина и предельные длины проводников и др.) и топологических (планарность, возможность пересечений, метод перехода со слоя на слой и др.) параметров схемы соединений и *К.П.* Эти соединения (печатные и пленочные) допускают построение цепи не только типа “вывод — вывод”, но и типа “вывод — проводник”.

Самым ответственным при трассировке цепей является определение координат переходных отверстий на печатной плате и подложке ИС (известны конструктивно-технологические решения с регулярным и нерегулярным расположением переходов). В зависимости от технологии можно выделить три способа прокладки цепей на *КП*:

цепь реализуется в одном слое (технология многослойных печатных плат с открытыми контактными площадками, однослойная коммутация ИС);

цепь реализуется на нескольких слоях, но межслойный переход осуществляется через контактные площадки для выводов устанавливаемых элементов (многослойные печатные платы) с металлизацией сквозных отверстий;

цепь реализуется на нескольких слоях и переход осуществляется только через спе-

циальные переходные отверстия, число которых может быть значительным и места расположения их произвольные (двухсторонние и многослойные печатные платы, ИС с несколькими слоями металлизации).

Основными критериями качества трассировки монтажных соединений являются следующие:

- суммарная длина соединений;
- длина самой длинной связи;
- число слоев;
- число переходных отверстий или межслойных переходов;
- число пересечений проводников и т.д.

Трассировка межсоединений в интегральных схемах большой степени интеграции является наиболее сложной задачей. В отличие от печатных плат и малогабаритных ИС количество групп соединительных проводников в данном случае чрезвычайно велико, и поэтому задачу трассировки обычно делят на две части: операции по определению общей структуры каналов, т. е. без детализации маршрута каждого проводника и их пересечений (операции по *“глобальной трассировке”*, *“приближенной трассировке”* или *“канальной трассировке”*), и на операции по определению детальной структуры межсоединений в соответствии с правилами проектирования в каждом канале. Применяя подобную двухэтапную обработку, задачу трассировки межсоединений, требующую огромных затрат времени и объема памяти, представляется возможным свести к задачам, которые могут быть решены на уровне современных рабочих станций.

### 5.3.1. Распределение каналов

Канал это свободная область кристалла ИС, по которой можно прокладывать межсоединения. На рис.2 каналы образованы промежутками между размещенными блоками. В БИС типа вентиляльных матриц, в которых матричную структуру образуют ячейки одинаковых размеров, в качестве каналов можно рассматривать узкие вытянутые области между рядами ячеек. В БИС с нерегулярной структурой (микропроцессоры) каналы можно определить аналогично, если пренебречь некоторыми отклонениями ширины канала от номинальной. В тех случаях, когда длина канала оказывается слишком большой и отклонениями ширины канала от необходимой при детальной трассировке пренебречь нельзя, а также тогда, когда блоки имеют различную геометрию и конфигурация проводников на границах каналов претерпевает резкие изменения, области трассировки, как показано на рис. 4.28, делят на вытянутые прямоугольники и рассматривают их как каналы; после этого можно переходить к дальнейшим операциям.

Целью распределения соединительных проводников по каналам является определение для каждого из них номеров каналов, по которым этот проводник должен пройти (маршрут прохождения). Оно выполняется с таким расчетом, чтобы наиболее эффективно использовать области, отведенные для межсоединений. Указания о маршрутах групп соединительных проводников ограничены информацией о системе каналов, по которым они должны пройти, при этом указания о расположении проводников в канале и об их возможных пересечениях отсутствуют. Так, например, в схеме рис. 4 маршрут проводника, соединяющего выводы *a* и *b*, определяется с точностью до областей его прохождения, т. е. указывается, что он должен проходить через каналы 3, 4, 7. В тех случаях, когда задача трассировки каждого проводника становится чрезвычайно сложной, как, например, в случае СБИС, целесообразно проводить глобальную трассировку, объединяя в одну группу несколько соседних выводов одного и того же блока.

Критерии оценки эффективности распределения соединительных проводников по каналам зависят от особенностей топологии. В нерегулярных БИС геометрия каждого канала не задается, поэтому пути соединительных проводников целесообразно определять таким образом, чтобы ограничить увеличение самого длинного пути.

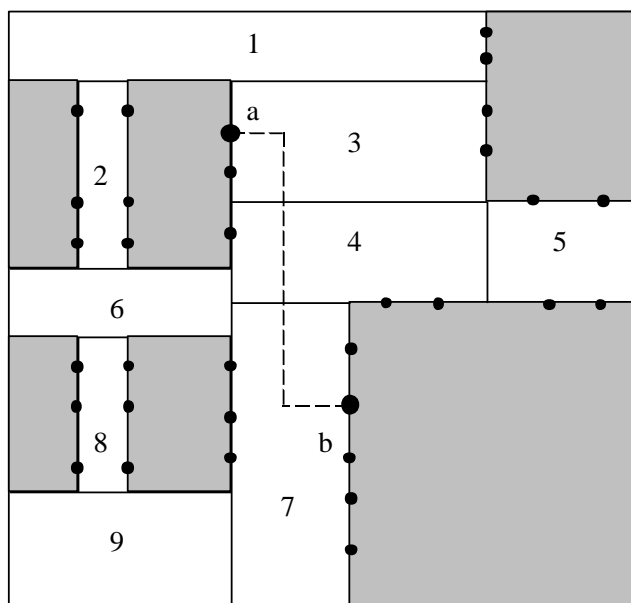


Рис.4

В БИС типа вентиляльных матриц геометрия каналов известна заранее, поэтому эффективное использование отводимой под межсоединения площади достигается уменьшением общей ширины соединительных проводников на единицу ширины канала до величины, меньшей некоторой заданной, именуемой емкостью канала. Таким образом, при индивидуальном определении маршрутов соединительных проводников в отведенных для межсоединений областях, разделенных на прямоугольники (каналы), критерием оценки является условие неперевышения емкости каждого канала при сокращении длины маршрута. Для длинных каналов небольшой ширины емкость канала следует нормировать особенно жестко.

### 5.3.2. Метод трассировки с распространением по сетке (волновой алгоритм)

Метод трассировки с распространением по сетке, называемый также методом трассировки лабиринтов – это в сущности общее наименование группы методов, объединяемых использованием алгоритма поиска самого короткого пути в лабиринте. Основным алгоритмом, используемым в рассматриваемом методе, является алгоритм Ли. Интуитивно его можно уподобить процессу распространения волн на поверхности воды от бросаемых в воду камешков.

Предположим (рис. 5), что требуется соединить две точки А и В, причем А – исходная точка, В – целевая. Известны запретные участки (области, в которых трассировка или невозможна или уже проведена, ломаные линии CD и EF). Покроем участок схемы прямоугольной или квадратной сеткой. Из точки А “распространяем волну”, вставляя в каждую свободную ячейку число по следующему правилу: все ячейки, окружающие точку А имеют номер 1 (4 ближайшие ячейки), следующие ближайшие ячейки (кроме запретных) имеют номер на 1 больший (т.е. 2) и т.д. В общем случае эту процедуру повторяют до тех пор, пока меткой не будет идентифицирована целевая точка В, или до тех пор, пока не исчезнут узлы, которым можно присваивать метки. В первом случае считается, что маршрут существует, во втором – что его нет. Так, в частности, в примере рис. 5 целевой точке В присваивается метка 13, и на этом первый этап поиска (поиск в прямом направлении) завершается. Далее, на втором этапе поиска (поиск в обратном направлении) операцию выбора узлов (существует по меньшей мере один узел) с меньшим значением метки повторяют до тех пор, пока по обратному маршруту не будет достигнута точка А. На рис. 5 подтверждается наличие маршрута из точки В в точку А в направлении, указанном стрелками.



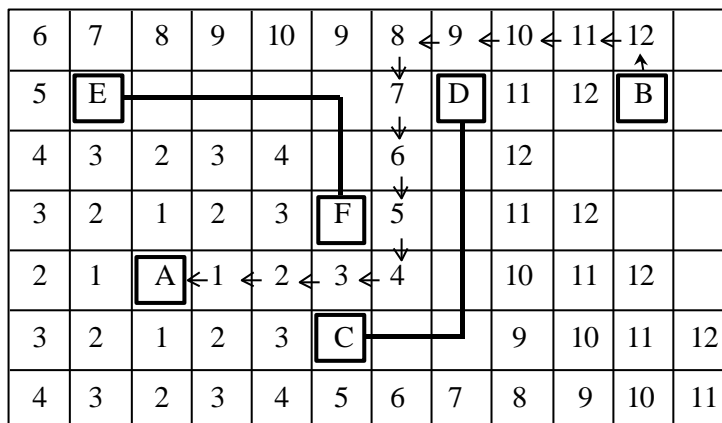


Рис.5

Выше алгоритм Ли был рассмотрен применительно к однослойной топологии с горизонтальным и вертикальным расположением проводников. Однако этот алгоритм легко можно распространить и на случай многослойной топологии и расположения проводников под углом (45 или 135°). Последнее достигается, если при обратном ходе выбирать ячейку с минимально возможным номером. Например, из ячейки В следует перейти в ячейку 11, из 9 – в 7 и т.д.

Значения меток, присваиваемых согласно алгоритму Ли при поиске в прямом направлении, указывают длину самого короткого маршрута, по которому можно пройти из исходной точки в его вершины (узлы сетки). Эта длина называется “манхэттенским расстоянием”. Отметим, также, что узлы с одинаковыми значениями меток образуют фронт волны, распространяющейся из точки А как из центра. Таким образом, особенностью алгоритма Ли является то, что если маршруты существуют, то из них обязательно будет выделен единственный и при этом самый короткий. Утверждение обязательно будет выделено справедливо при условии, что уже известные маршруты соединительных проводников остаются неизменными.

Как следует из рассмотренной выше последовательности обработки, время, затрачиваемое на решение задачи, и объем памяти при использовании алгоритма Ли пропорциональны количеству узлов сетки, что в случае топологии современных СБИС потребует очень больших затрат. Известен ряд предложений, направленных на решения некоторых характерных для алгоритма Ли проблем, как в отношении времени обработки, так и в отношении объема памяти. В частности, для того чтобы сократить число двоичных разрядов, необходимых для хранения данных о значениях меток при поиске, вместо присвоения меток в соответствии с рис. 5 можно присваивать метки в последовательности 1, 2, 3, 1, 2, 3... и производить поиск в обратном направлении (рис.6).

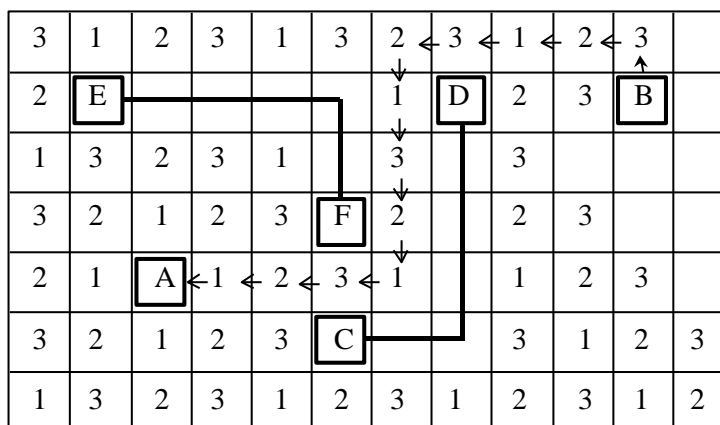


Рис.6

Еще одним фактором, оказывающим влияние на объем памяти при использовании алгоритма Ли, является количество узлов сетки, образующих фронт волны. Если объем памяти ограничен, то в этом случае целесообразно использовать модифицированный метод, согласно которому при любом распространении фронта волны будет запоминаться информация только о строго определенном количестве узлов сетки. В данном случае нахождение самого короткого маршрута не гарантируется и смысл обработки несколько теряется. Вместе с тем сохраняется справедливость утверждения, что если маршрут существует, то он обязательно будет найден.

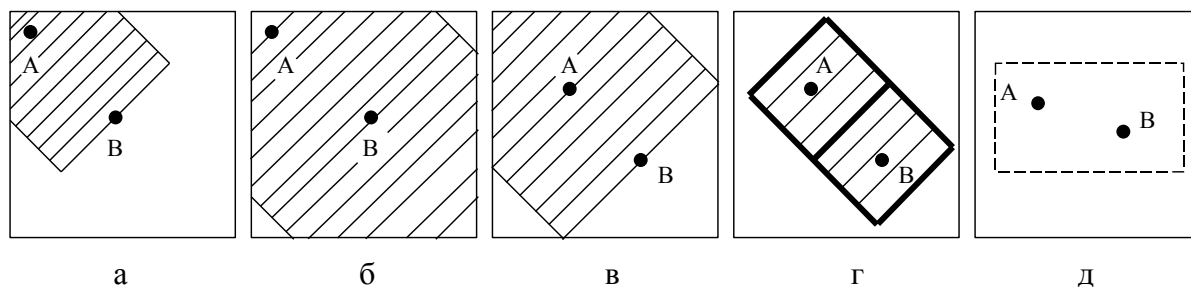


Рис. 7

Существенный практический эффект можно получить используя следующие приемы:

1. Выбор исходной точки. При поиске маршрута, соединяющего точки A и B, в качестве исходной выбирают точку, лежащую ближе к краю. В примере рис. 7а и 7б выбор точки A в качестве исходной дает более узкое поле поиска.

2. Двойное распространение. Если из двух исходных точек (A и B), как из центров, распространяются два фронта, то поле поиска, осуществляемого до момента столкновения двух этих волн, приблизительно в два раза уже, чем при наличии только одной исходной точки (рис. 7в и 7г).

3. Ограничения на размеры поля поиска. В этом случае, как показано на рис. 7д, площадь прямоугольника, содержащего точки A и B, заранее ограничена, так что полем поиска является только внутренняя область прямоугольника. Если маршрут в этом поле не может быть обнаружен, размеры прямоугольника следует увеличить.

4. Приоритеты направлений в отношении перемещения к целевой точке. При условии, что положение целевой точки заранее известно, метки присваиваются в соответствии со следующей последовательностью приоритетов.

4.1. Предпочтительно перемещение в сторону точки B.

4.2. Если имеется степень свободы, предпочтительно перемещение по прежнему направлению.

4.3. Если перемещение по прежнему направлению невозможно, следует вернуться в узел сетки, последним получивший новую метку.

4.4. Если движение в направлении точки B невозможно, то, допустив возможность перемещения в направлении от точки B, следует перемещаться с последовательностью приоритетов 4.2, 4.3.

Особенностью данного метода поиска является очень высокая скорость перемещения в направлении к целевой точке, и поэтому его эффективность в случае сложных лабиринтообразных структур оказывается весьма низкой. Тем не менее число ячеек, задействованных при поиске, в данном случае обычно меньше, чем при использовании алгоритма Ли, а скорость достижения целевой точки выше. При использовании данного метода в примере, представленном на рис. 5, узлы сетки, помеченные так, как показано на рис. 8, получают метки именно в такой последовательности. Здесь наиболее приоритетным выбрано направление движения по вертикали, если таковым выбрать горизонтальное направление – скорость будет еще выше. Метод трассировки с распространением по сетке, представляющий собой модифицированный алгоритм Ли, иногда также называют

быстрым методом трассировки лабиринтов или методом поиска в глубину.

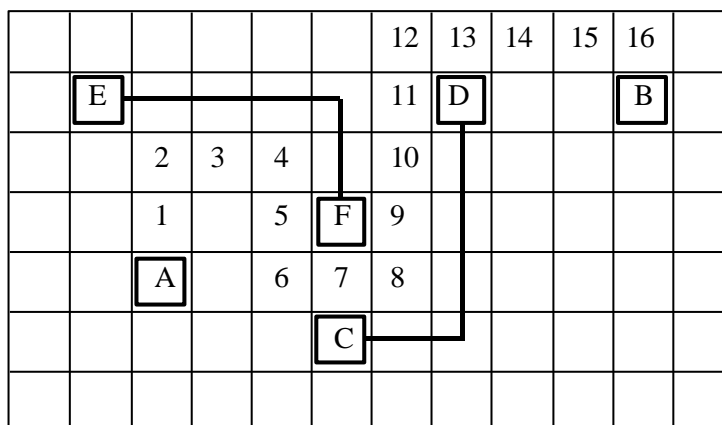


Рис. 8

### 5.3.3. Метод поиска по отрезкам прямых и метод ограниченного поиска (лучевой алгоритм)

Будем считать, что области, отведенные под межсоединения, определяются отрезками горизонтальных и вертикальных прямых, являющихся одновременно границами запретных областей. Выберем точки A и B в качестве исходных. Через точку A проведем горизонтали и вертикали, до их пересечения с границами кристалла или запретных областей. Эти линии называются отрезками уровня 0.

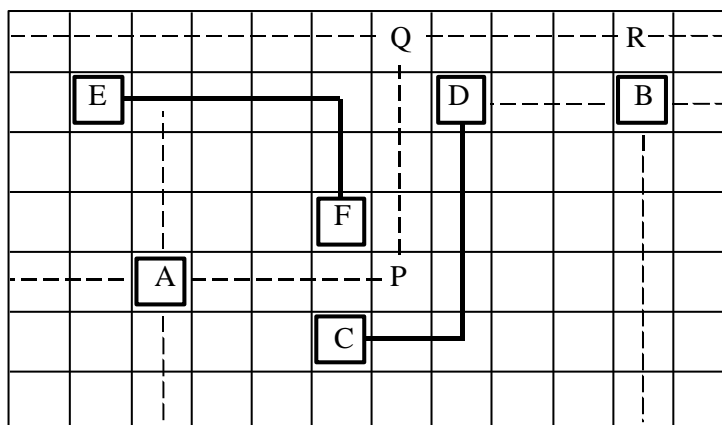


Рис. 9

Одновременно два отрезка уровня 0 проведем через точку B. Затем из прямых, ортогональных указанным отрезкам, отбираем те, которые, минуя запретные зоны, проходят через более широкую область, чем определяемая первоначальными границами. Эту новую группу отрезков прямых назовем отрезками уровня 1. Данную операцию многократно повторяем и со стороны A, и со стороны B, и определяем маршрут по точкам пересечения двух групп отрезков. В примере, показанном на рис. 9, вертикальный отрезок уровня 1, порождающей исходной точкой для которого является A, и горизонтальный отрезок уровня 1, исходной точкой для которого является точка B, пересекаются в точке Q, т. е. в итоге получается маршрут APQRB. Поскольку, отрезки, формируемые на уровне 1, минуют запретные области, в границы которых ранее упирались отрезки с уровнем 0, их можно использовать как элементы маршрута. Если найти таким образом все возможные отрезки, которые могут претендовать на эту роль, и тщательно проверить все возможности, продолжая поиск до тех пор, пока не будет получена уверенность в том, что других таких отрезков быть не может, это будет означать, что в принципе маршрут существует и, следо-

вательно, его можно выявить. Однако затраты времени на трассировку оказываются при этом чрезмерными, и поэтому обычно уровень поиска ограничивается сверху. Кроме того, поле поиска ограничивают выбором (из числа отрезков, которые могут быть выбраны в качестве элементов маршрута) отрезка, наиболее близкого к исходной точке (А или В), или наиболее длинного отрезка.

Использование рассматриваемого метода при ограничении поля поиска не дает гарантий того, что существующее решение может быть найдено. Однако, если рисунок межсоединений будет достаточно простым, емкость памяти и временные затраты оказываются при этом гораздо ниже, чем при использовании волнового метода. Следовательно, если маршруты соединительных проводников должны быть получены индивидуально на базе программы автоматизированной трассировки, то в этом случае желательно применять модифицированный метод, на первой стадии которого следует использовать поиск по отрезкам прямых, поскольку маршруты нередко оказываются весьма простыми, а затем, когда по мере роста количества уже известных маршрутов структура области межсоединений начинает напоминать лабиринт, переходить к волновому методу.

Характерной особенностью маршрутов соединительных проводников, полученных по данному методу, является то, что почти во всех случаях количество их перегибов минимально.

Если ограничить уровень выбора лучей, среди найденных окажутся только маршруты с ограничениями на структуру рисунка. Этот метод в сущности представляет собой особый случай метода поиска по отрезкам прямых. Он несколько отличается от последнего и называется методом ограниченного поиска.

При использовании лучевого метода – в отличие от волнового алгоритма – отпадает необходимость в разбиении области с помощью густой сетки и построении фронта волны. В принципе в память достаточно ввести данные только об отрезках, определяющих границы запретных областей, и отрезках, формируемых в процессе поиска. Отличительной особенностью метода является то, что он не требует использования большого объема памяти.

#### **5.4 Особенности подсистем проектирования топологии современных САПР**

В настоящее время почти все микропроцессоры и ЗУ проектируются так называемым ручным способом, т. е. способом, при котором ограниченно используются программы автоматического размещения элементов и трассировки проводников. Применение систем автоматического проектирования приводит к существенному увеличению размеров кристаллов, поскольку формализация задачи разработки топологии производится на базе очень простых моделей. При ручном проектировании число степеней свободы оказывается больше, и поэтому при достаточно больших затратах времени этот вид проектирования позволяет получить топологию с более высокой плотностью.

В случае упомянутых СБИС стоимость процесса их изготовления выше стоимости их проектирования. Сроки их проектирования довольно велики, и вместе с тем значительные усилия прикладываются в направлении сокращения размеров кристалла. Для этого используются универсальные системы диалогового проектирования, задачей которых является сокращение объема операций, ранее производившихся разработчиком на бумаге. Такие системы функционируют на мощных рабочих станциях и их основой являются специализированные графические редакторы, которые позволяют не только разработать топологию СБИС, но и выполнить ее контроль и верификацию. Вместе с тем, в состав таких редакторов входят подпрограммы автоматического размещения и трассировки, позволяющие, например, получить вариант автоматически сгенерированной топологии и затем выполнить ее ручную доработку.

С другой стороны, при многономенклатурном производстве БИС мелкими сериями (например, БИС типа вентиляционных матриц) стоимость их проектирования превышает стоимость процесса их изготовления, и основной задачей является задача максимального со-

кращения стоимости и сроков проектирования. В этом случае используются специализированные САПР, где основной задачей разработчика является проектирование логической схемы, а процесс проектирования топологии выполняется автоматически.