

## ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА КАНАЛЬНОЙ ТРАССИРОВКИ БИС

Саломатин В.А., Струнилин В.Н., Сульников С.В.

Кафедра ЭВМ ДонГТУ  
vstrun@cs.dgtu.donetsk.ua

### Abstract

*Salomatın V.A., Strunilin V.N., Sulnicov S.V. Optimization of the method of LSI channel routing. The theme of this article is the problem of optimization of the method of LSI (VLSI) channel routing. The first part of the article contains a short survey of main tendencies of development of LSI (VLSI) topology designing. The existing method of LSI (VLSI) channel routing is described in the second part of the article. The third part contains the detailed description of the optimized method of LSI (VLSI) channel routing with grounds of suggested modifications. Both methods are illustrated with examples. The article responds for LSI - design experts.*

### 1. Тенденции развития проектирования топологии БИС (СБИС)

Тенденция к росту степени интеграции микросхем, сохраняющаяся в микроэлектронике, привела к появлению сверхбольших интегральных схем (СБИС). С одной стороны, техника СБИС — это новые возможности создания сложных систем, с другой — увеличение трудностей проектирования.

Создание интегральных схем высокой степени интеграции изменило конструктивное деление устройств. По мере усложнения проектируемых объектов вопросам методологии проектирования придается всё более важное значение. В СБИС уже достигнута степень интеграции  $10^6$  транзисторов [5] и этот показатель продолжает быстро расти. Применение рентгенолитографии, электролитографии, ионного травления, ионной имплантации легирующих примесей позволило получить разрешение при изготовлении СБИС порядка 0.01 мкм [1].

По мере возрастания степени интеграции микросхем их разработка усложняется и дорожает. Усложняется размещение элементов, осуществление соединений, возрастает вероятность ошибки при совмещении различных слоёв микросхем.

Применение методов автоматизированного проектирования элементов, их размещения и соединений резко сокращает время разработки и даёт гораздо меньше ошибок, которые к тому же легче обнаружить и исправить, чем в процессе ручного проектирования. Ручная разработка БИС и СБИС крайне нецелесообразна, а чаще всего вообще невозможна.

Процесс проектирования БИС (СБИС) можно разделить на 4 больших этапа:

- I этап — расчёт всех необходимых параметров активных и пассивных элементов;
- II этап — электрический расчёт схемы, которая составляется разработчиком преимущественно из традиционных, апробированных в других конструкциях фрагментов;
- III этап — топологическое проектирование, где решаются две задачи:
  - а) размещение элементов электрической схемы на поверхности подложки в системе координат кристалла;
  - б) трассировка соединений между элементами и с внешними выводами микросхемы;
- IV этап — логическое моделирование и создание тестовых программ для испытания готовых БИС.

В данной статье рассматривается третий этап — задача трассировки.

## 2. Алгоритмы трассировки соединений

При трассировке соединений БИС требуется реализовать в автоматическом режиме максимально возможное число соединений. В то же время результаты автоматической трассировки должны оставлять возможность для трассировки в интерактивном режиме нереализованных соединений. Поэтому на рабочем поле трассировки должны сохраняться ресурсы для дотрассировки. В современных системах это достигается за счет построения трасс в классе простейших конфигураций (например, с ограниченным числом поворотов и имеющих длину, близкую к минимальной). Для максимизации числа автоматически построенных трасс необходимо предотвращать блокировку выводов элементов, к которым ещё не подведены соединения. Экспериментально установлено, что вероятность блокировки уменьшается при использовании преимущественных направлений трасс в слоях (в одном слое проводятся, в основном, горизонтальные отрезки, в другом — вертикальные) и построении трасс в порядке увеличения сложности.

Большинство современных алгоритмов трассировки БИС является модификацией известных методов трассировки печатных плат, учитывающей перечисленные требования и канальную структуру области трассировки. Для выбора порядка трассировки, уменьшающего вероятность блокировки, электрические цепи предварительно разбиваются на парные соединения применением алгоритма Прима [4]. Для оценки сложности соединений ДРП (дискретное рабочее поле) кристалла разбивается на прямоугольные области, вертикальные границы которых принадлежат границам кристалла, а горизонтальные — совпадают с горизонтальными осями симметрии горизонтальных каналов или рядов макроячеек.

Вводятся четыре типа соединений: соединяемые точки принадлежат одной области; соединяемые точки лежат в соседних рядах макроячеек и в соседних областях; прочие соединения. Введенные типы отражают сложность соединений: чем больше номер типа, тем сложнее соединение. Упорядочение соединений для трассировки выполняется по возрастанию типа. Соединения одного и того же типа упорядочиваются по длине.

Трассировка БИС выполняется за несколько итераций. На каждой итерации последовательно рассматриваются области, начиная с нижней. В ходе первой итерации трассируются соединения первых трёх типов с числом поворотов, не превышающим 2 (простейшие конфигурации). Обоснованием такой стратегии явился опыт проектирования печатных плат и БИС, показавший, что реализация трасс сложной конфигурации на начальном этапе трассировки часто ведёт к неоправданно большому расходу ресурсов ДРП.

На второй итерации трассируются нереализованные соединения первых трёх типов с числом поворотов 3 и 4. Последняя итерация включает трассировку соединений четвёртого типа с ограниченным числом поворотов.

Рассмотрим более подробно трассировку соединения первого типа. Для этого введём следующие определения.

*Канал* — область на кристалле прямоугольной формы, на одной или нескольких сторонах которой расположены контакты ячеек. Каналы могут быть 1-, 2-, 3- и 4-сторонними. На практике используются чаще 1- и 2-сторонние каналы. Горизонтальные участки цепей реализуются в одном слое, а вертикальные — в другом.

*Магистраль* — часть канала (отрезок прямой) по которой может проходить соединение в преимущественном направлении. По направлению магистрали бывают горизонтальные и вертикальные.

*Ширина канала* — число магистралей.

*Загрузка канала* — число занятых магистралей. Основной задачей трассировки является выбор минимальной ширины канала, достаточной для размещения в нём всех соединений и для назначения соединений на магистрали.

Опишем модифицированный алгоритм "левого конца", учитывающий наличие вертикальных ограничений [3].

Любая цепь, имеющая  $p$  выводов, содержит 1 горизонтальный и  $p$  вертикальных отрезков, причём горизонтальный отрезок реализуется в одном слое, а вертикальный — в другом. Поэтому цепь полностью определяется горизонтальным отрезком  $X_j = \{x_1, x_2\}$ , где  $x_1 = \min(x_i)$ ;  $x_2 = \max(x_i)$ ;  $x_i$  — абсцисса вывода  $e_i$  и номером  $n_i$  магистрали, на которую этот отрезок назначен (нумерация сверху вниз).

При реализации цепей следует иметь ввиду ограничения на расположение горизонтальных и вертикальных участков.

#### 1) Горизонтальные ограничения.

Вначале безотносительно к магистралям проведём горизонтальные участки всех цепей. В дальнейшем имеем в виду: при назначении на магистрали горизонтальные отрезки не должны соприкасаться:

$$X_i \cap X_j = \emptyset.$$

Таким образом, горизонтальные ограничения можно учесть с помощью графа интервалов  $Z_1 = (V_1, U_1)$ , где  $V_1$  — вершины, соответствующие электрическим цепям, а любое ребро  $u_k \in U_1$  выполняет условие:

$$u_k = (v_i, v_j) \text{ существует, если } X_i \cap X_j \neq \emptyset.$$

Задача трассировки сводится к нахождению раскраски вершин графа  $Z_1$  в минимальное количество цветов [2], которое будет соответствовать минимуму количества магистралей. Если бы канал был односторонним, достаточно было бы решить только эту задачу.

#### 2) Вертикальные ограничения.

В двухстороннем канале возникает ограничение на перекрытие вертикальных отрезков, принадлежащих разным цепям. При нумерации магистралей сверху вниз должно соблюдаться условие:  $n_1 < n_2$ .

Вертикальные ограничения выявляются путём просмотра каналов слева направо. При появлении пары контактов на одной магистрали с выводом  $i$  вверху,  $j$  — внизу формируется ограничение:  $n_i < n_j$ . Строится граф вертикальных ограничений. В этом графе  $Z_2 = (V_2, U_2)$ ,  $n_i < n_j$ ,  $u_{ij} \in U_2$ .

Необходимым и достаточным условием выполнения вертикальных ограничений при трассировке является отсутствие ориентированных циклов (орциклов) в графе  $Z_2$ . Если такие орциклы есть, то необходимо применять один из следующих двух способов их устранения.

а) Изменение координат контактов, участвующих в орциклах.

б) Расщепление цепи. Горизонтальный участок цепи заменяется двумя участками.

Далее необходимо найти упорядоченную раскраску обобщенного графа  $Z_3 = Z_1 + Z_2$  такую, что номера цветов смежных вершин не совпадают,  $n_i < n_j$  и число цветов минимально.

Введем следующие определения:

- $V^*$  - множество распределенных вершин;
- $V$  - множество вершин, не имеющих входящих дуг;
- $X_r$  - совокупность отрезков, назначаемых на магистраль  $n_r$ ;
- $L$  - рабочий список;
- $X_{L_{\max}} = \max_{x \in L} \{x_i^{(2)}\}$  - правая координата самого правого отрезка, принадлежащего множеству  $L$ .

#### Модифицированный алгоритм "левого конца"

1.  $r := 0$  и определяем множество  $V$ . Переход к шагу 2.

2. Упорядочиваем горизонтальные отрезки, соответствующие цепям множества  $V$  в порядке возрастания координат их левых концов.

$r := r + 1$ ;  $L := \emptyset$ ;  $X_{L_{\max}} := 0$ . Переход к шагу 3.

3. Определяем  $X_i \in V^*$ , для которого  $X_i > X_{L_{\max}}$  и разность  $X_i - X_{L_{\max}}$  минимальна. Если отрезок, у которого  $X_i > X_{L_{\max}}$  существует, то переход к шагу 5, иначе переход к шагу 4.

4.  $X_i \rightarrow L$ ;  $X_{L_{\max}} := X_i^2$ . Переход к шагу 3.

5.  $V_i := L$ , удалив из графа  $Z_3$  все вершины, составляющие  $V_i$  и инцидентные им звенья и дуги. Определяем  $V^*$ . Если  $V^* = \emptyset$ , то переход к шагу 6, иначе переход к шагу 2.

6. Конец.

При расщеплении цепей следует помнить, что вводить изломы нужно только при необходимости, так как это повышает площадь канала. Это связано с тем, что не всегда можно провести излом с использованием сечений, проходящих через выводы.

Пусть задан двухсторонний канал (рис. 1). Выводы пронумерованы инцидентными. Результат работы алгоритма представлен на рис. 2. Полученный канал имеет ширину 6 условных единиц при минимально возможной ширине, равной 5.

### 3. Оптимизация модифицированного алгоритма "левого конца"

Модифицированный алгоритм "левого конца" не дает оптимального результата. Поэтому возникает необходимость его доработки с целью максимально возможного уменьшения ширины канала в результате работы алгоритма.

Существующий алгоритм распределяет участки цепи по магистралям, сортируя их в порядке возрастания координат левых концов отрезков. Однако при этом не учитывается количество связей участка цепи с первой и второй сторонами двухстороннего канала.

Авторами сделано предположение, что это и является главной причиной неоптимального распределения отрезков цепи по магистралям. Отрезок, имеющий большое количество связей с одной из сторон канала, может оказаться от нее на значительном расстоянии. При этом отрезок, имеющий связи с другой стороной канала с той же абсциссой вынужден располагаться между ней и первым отрезком вследствие вертикальных ограничений. Если таких отрезков много, то возрастает вероятность того, что части магистралей, расположенных между первым отрезком и первой стороной канала, окажутся незанятыми, что крайне нежелательно.

Кроме того, длинные вертикальные отрезки, проходящие через большое количество магистралей, повышают паразитные емкости, так как могут пересекать большое количество горизонтальных участков цепи. Это приводит к снижению быстродействия и, как следствие, производительности разрабатываемой БИС.

Для ликвидации этого недостатка предлагается для каждого участка цепи, подлежащего распределению на магистраль, ввести весовой коэффициент, характеризующий количество связей этого участка с каждой стороной канала. При формировании магистралей сверху вниз отрезки цепи должны распределяться на магистраль с учетом этого коэффициента, причем более высоким приоритетом должны пользоваться участки, имеющие максимальное количество связей с первой стороной канала и минимальное — со второй. Отрезки, имеющие одинаковые коэффициенты, располагаются в соответствии с алгоритмом "левого конца".

При таком распределении участков цепи может оказаться, что отрезок с высоким приоритетом имеет большое значение координаты левого конца. В этом случае часть магистрали, лежащая левее отрезка, окажется незаполненной. Для устранения этого недостатка необходимо незаполненному участку магистрали распределить отрезки с меньшим весовым коэффициентом, правые концы которых имеют меньшее значение абсциссы, чем левый конец уже распределенного отрезка.

Назначение отрезков цепи на участок магистрали должно происходить по тому же предлагаемому алгоритму, что и для всей магистрали. Если по окончании распределения левее крайнего левого отрезка осталось достаточно много места, снова производится распределение до тех пор, пока это возможно. Таким образом в последовательный алгоритм "левого конца" вводится итерационная часть.

Для реализации алгоритма введем следующие определения:

- |          |  |
|----------|--|
| $V_i$    | - множество распределенных вершин;                         |
| $V_1$    | - множество вершин, не имеющих входящих дуг;               |
| $X_i$    | - совокупность отрезков, назначаемых на магистраль $n^i$ ; |
| $L, V_2$ | - рабочие списки;  |

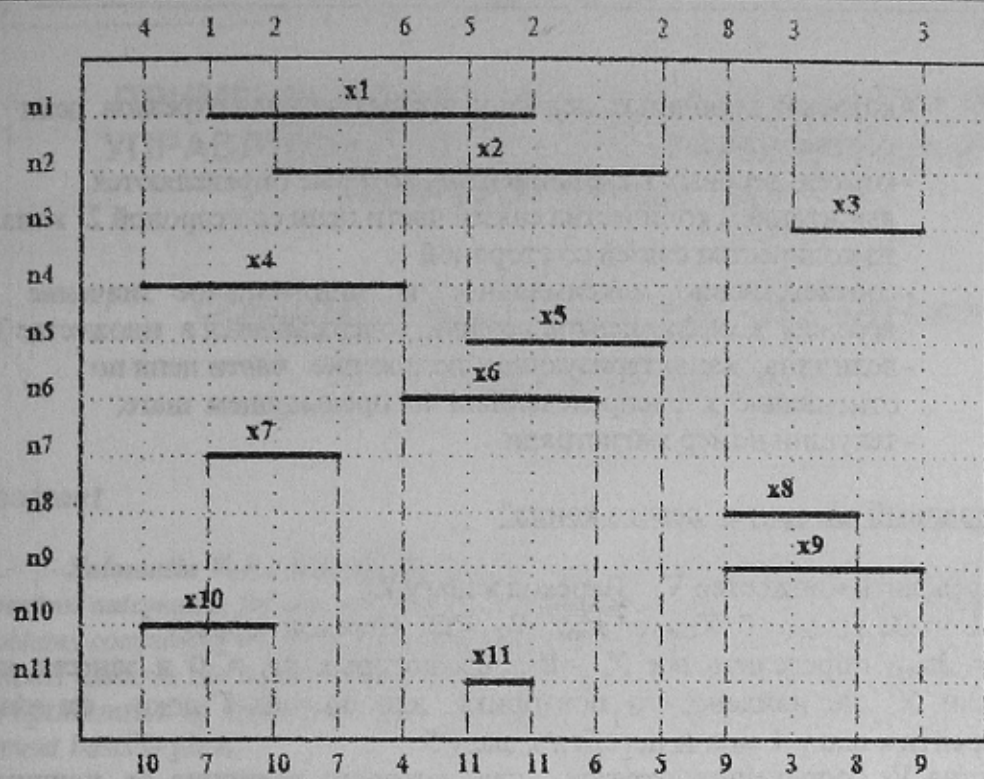


Рис. 1. Фрагмент канала проектируемой БИС

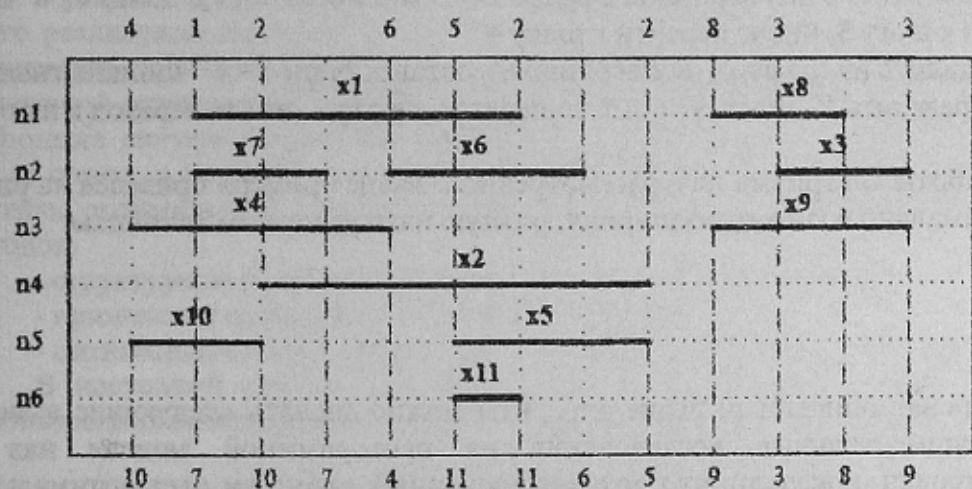


Рис. 2. Результат трассировки по алгоритму "левого конца"

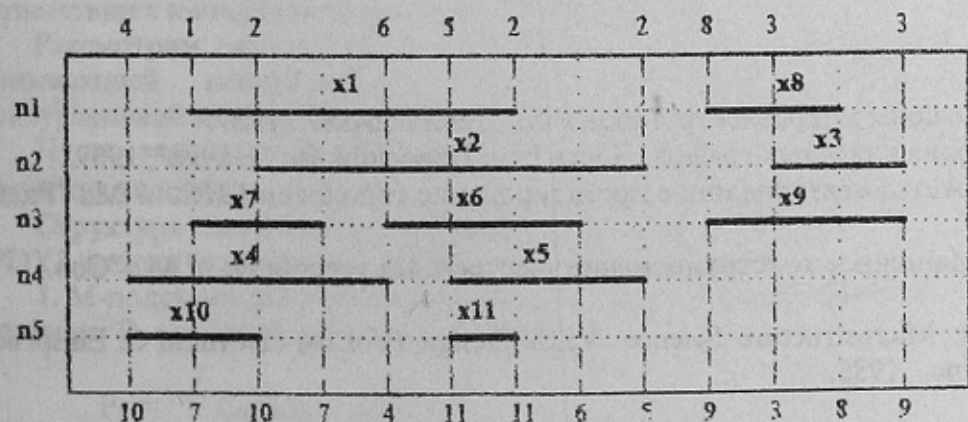


Рис. 3. Оптимальный вариант трассировки

$x_l, x_r$	- кортежи координат левых и правых концов отрезков цепи соответственно;
$dn$	- кортеж весовых коэффициентов, которые определяются вычитанием количества связей части цепи со стороны 2 канала из количества связей со стороны 1;
$dn_{max}, dn_{min}$	- соответственно максимальное и минимальное значение весовых коэффициентов вершин, содержащихся в множестве $V_1$ ;
$dx_i = x_{li} - X_{Lmax}$	- величина, характеризующая положение части цепи по отношению к распределенным на предыдущем шаге;
$r$	- текущий номер магистрали.

### Оптимизированный алгоритм "левого конца"

1.  $r := 0$  и определить множество  $V_1$ . Переход к шагу 2.
  2.  $r := r + 1$ ;  $L := \emptyset$ ;  $X_{Lmax} := 0$ ;  $X_{Lmin} := x_{max}$ ;  $V_2 := \emptyset$ . Переход к шагу 3.
  3. Для  $dn = dn_{max}$  определить все  $X_i \in V_1$ , для которых  $dx_i > 0$  и занести их в множество  $V_2$ . Если  $X_i$  не найдено, то повторить для  $dn = dn - 1$  пока  $dn \neq dn_{min}$ . Если  $V_2 \neq \emptyset$ , то перейти к шагу 4, иначе перейти к шагу 5.
  4. Из множества  $V_2$  определить отрезок, для которого величина  $dx_i$  принимает положительное и минимальное значение.  
 $X_i \rightarrow L$ ;  $X_{Lmax} := x_r$ .
  - Удалить  $X_i$  и все смежные с ней вершины в графе  $Z_1$  из множеств  $V_1, V_2$ . Если  $V_2 = \emptyset$ , то  $X_{Lmax} := 0$ ; перейти к шагу 3, иначе перейти к шагу 4.
  5.  $V^r := L$ , удалить из графа  $Z_2$  все вершины, составляющие  $V^r$  и инцидентные им звенья и дуги. Определить  $V_1$ . Если  $V_1 = \emptyset$ , то переход к шагу 6, иначе переход к шагу 2.
  6. Конец.
- Результат работы алгоритма для рассмотренного выше примера приведен на рис. 3. Канал имеет минимально возможную ширину, равную пяти условным единицам.

### **Выводы**

Проанализировав описанный выше алгоритм можно сделать следующие выводы. Во-первых, экспериментальные исследования на проگرامмной модели над 50 примерами трассировки показали, что оптимизированный алгоритм дает оптимальную ширину канала БИС. Во-вторых, в результате работы алгоритма значительно снижается количество пересечений горизонтальных и вертикальных частей цепей в соседних слоях и суммарная длина проводников, что улучшает характеристики проектируемых БИС.

### **Литература**

1. Бондарь Б. Г. Основы микроэлектроники. // К.: "Вища школа", 1987.
2. Зыков А. А. Теория конечных графов. Часть I. // Новосибирск: "Наука", 1969.
3. Селютин В. А. Автоматизированное проектирование топологии БИС. // М.: "Радио и связь", 1983.
4. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. // М.: "Сов. радио", 1977.
5. VLSI Electronics. Microstructure Science. VLSI Design (Vol.14) - Norman G. Einspruch // Academic Press, Inc., 1986.