

4. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР. – М.: Радио и связь, 1990.
5. Овчинников В.А. Алгоритмизация комбинаторно-оптимизационных задач при проектировании ЭВМ и систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001.
6. Баринев С.В., Курейчик В.М., Гладков Л.А. Компоновка МЭС на основе итерационной кластеризации с учетом временных задержек. Известия ТТИ ЮФУ, 2006.

С.А. Степаненко, В.Б. Лебедев

АДАПТИВНАЯ ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА ОРИЕНТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ*

Введение. Задача размещения является одним из наиболее важных шагов в процессе проектирования СБИС, поскольку она определяет межсоединения, которые к настоящему времени стали «узким местом», определяющим производительность схем в субмикронных технологиях [1-2]. Проблема размещения интенсивно изучается в течение последних 30 лет. Тем не менее, последние исследования показывают, что существующие методы, применяемые для решения задачи размещения, дают результаты, которые далеки от оптимальных [1,3,4]. Поэтому задача размещения остается по-прежнему актуальной.

Постановка задачи. Задача размещения формулируется следующим образом: имеется множество элементов $M = \{m_i \mid i = 1, \dots, N\}$ с фиксированными размерами и множество цепей $C = \{c_i \mid i = 1, 2, \dots, K\}$, связывающих элементы множества M . Необходимо произвести размещение элементов на плоскости таким образом, чтобы отсутствовали перекрытия элементов, и при этом минимизировалась целевая функция: $F(x) \rightarrow \min$. В качестве критериев оптимизации используются общая площадь схемы, суммарная длина проводников, временные задержки.

Для представления относительного расположения элементов на плоскости используется пара последовательностей (Sequence-Pair), этот метод впервые был предложен Murata и др. в 1996 году [5]. Представление плана топологии с помощью пары последовательностей состоит из двух перестановок целых чисел $\langle 1, 2, \dots, N \rangle, \langle 1, 2, \dots, N \rangle$. Каждый элемент последовательности соответствует номеру прямоугольного элемента, расположенного на плоскости без перекрытий с другими элементами, где общее число элементов равно N .

Эта пара последовательностей определяет относительное расположение элементов в пространстве, но для упаковки элементов необходимо также знать их пространственную ориентацию. Пространственная ориентация элементов задается вектором $O = \{o_i \mid i = 1, 2, \dots, N\}$, $o_i \in \{1, 2, 3, 4\}$, $1 \leq i \leq N$. Таким образом, для каждого элемента существует четыре возможных ориентации (North = 1, East = 2, South = 3, West = 4).

На одном из этапов решения задачи размещения, после того, как получено некоторое субоптимальное решение, применяется адаптивная процедура настройки ориентации элементов, которая подбирает ориентацию элементов таким образом, чтобы дополнительно оптимизировать целевую функцию.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-08-18115, № 07-01-00511) и программ развития научного потенциала высшей школы 2006-2008 гг. (РНП.2.1.2.3193, РНП 2.1.2.2238).

Сформулируем задачу следующим образом: для имеющейся пары последовательностей $\langle S_1, S_2 \rangle$, определяющей относительное расположение элементов на плоскости, требуется подобрать ориентации элементов в пространстве, т.е. значения элементов вектора O , обеспечивающие минимизацию целевой функции $F(x) \rightarrow \min$ (общая площадь кристалла, суммарная длина проводников, временные задержки).

Для решения поставленной задачи используется подход, основанный на моделировании коллективного поведения автоматов адаптации. Этот подход был предложен М.Л. Цетлиным [6], который предложил использовать вероятностный автомат адаптации (АА). АА способен воспринимать два входных сигнала: поощрения при удаче (+) и наказания при неудаче (-). Под действием этих сигналов осуществляется переход АА в новые состояния. Состояние АА соответствует некоторой альтернативе решения задачи. В процессе адаптации на основе откликов внешней среды автомат переходит в состояние, соответствующее лучшей альтернативе. Описанный подход оказался продуктивным при разработке адаптивных поисковых алгоритмов [6,7].

Представим формулировку задачи в виде адаптивной системы, работающей на основе моделирования коллективного поведения автоматов адаптации.

Множество элементов M с фиксированными размерами, пара последовательностей $\langle S_1, S_2 \rangle$ и ориентации модулей O однозначно определяют размещение элементов на плоскости.

Пространство решений составляют решения, отличающиеся друг от друга значениями элементов множества O , задающими ориентацию модулей. Процесс поиска в пространстве решений оптимального решения представим в виде адаптивной системы, работающей в условиях неопределенности. На каждом шаге работы адаптивной системы под действием адаптирующего воздействия осуществляется процесс перехода от одной вершины пространства к другой, т.е. перебор альтернативных значений элементов множества O .

В качестве объектов адаптации будем рассматривать модули m_i . Каждый объект может быть в одном из четырех альтернативных состояний $(A_i^1, A_i^2, A_i^3, A_i^4)$. Состояние объекта адаптации соответствует выбранной альтернативе (ориентации).

Глобальная цель коллектива автоматов адаптации определяется целевой функцией задачи размещения. В качестве целевой функции будем рассматривать: 1) общая площадь кристалла; 2) суммарная длина проводников.

Пусть для множества элементов M задана некоторая последовательность пар, по ней построены графы ограничений, задана некоторая случайная ориентация элементов и выполнена начальная упаковка.

Для каждого объекта адаптации m_i средой будет множество взаимодействующих друг с другом и с ним самими модулей $M_i = M \setminus m_i$. Состояние среды определяется выбранными для всех модулей ориентациями. Оценка состояний объекта адаптации зависит как от состояния среды, так и от состояния объекта адаптации в среде.

Глобальная цель коллектива объектов адаптации, т.е. множества модулей M – достичь такого состояния, при котором значение критерия F (площадь микросхемы, суммарная длина проводников) имеет минимальное значение.

Адаптивный алгоритм настройки ориентации элементов с целью минимизации размеров схемы. Очевидно, при минимизации общей площади микросхемы нас будут интересовать только две возможные ориентации модулей: 1) North = South; 2) East = West, таким образом, следующие состояния автоматов адаптации имеют одинаковое предпочтение: $A_i^1 = A_i^3$ и $A_i^2 = A_i^4$.

Оценка состояний объектов адаптации производится следующим образом. В имеющихся графах горизонтальных $H(X, E_H)$ и вертикальных $V(X, E_V)$ ограничений необходимо найти множество критических путей. Критическим путем будем называть такой путь в графе ограничений, который начинается в вершине, не имеющей входящих ребер, и заканчивается в вершине, не имеющей исходящих ребер. Ширина схемы определяется путем максимальной длины (при определении длины пути суммируется ширина элементов) в графе горизонтальных ограничений. Высота схемы определяется путем максимальной длины (при определении длины пути суммируется высота элементов) в графе вертикальных ограничений.

Определим множество критических путей в графе горизонтальных ограничений, в которые входит элемент $m - W_H^m$, также определим множество путей в графе вертикальных ограничений, которые содержат элемент $m - W_V^m$. Для множеств путей W_H^m и W_V^m произведем пересчет их длин, когда для элемента m задана ориентация $o \in \{1,3\}$, также произведем пересчет их длин, когда для элемента m задана ориентация $o \in \{2,4\}$. Пусть ширина и высота схемы, когда для элемента m задана ориентация $o \in \{1,3\}$ обозначается $Width_{1,3}$ и $Height_{1,3}$ соответственно, тогда как ширина и высота схемы, когда для элемента m задана ориентация $o \in \{2,4\}$, обозначается $Width_{2,4}$ и $Height_{2,4}$ (как отмечалось ранее, при определении площади схемы ориентации 1, 3 и 2, 4 равнозначны). Тогда предпочтительной будет та ориентация элемента m , при которой площадь схемы $S = Width \times Height$ имеет наименьшее значение. Если же размеры схемы заданы в качестве ограничений (в этом случае площадь схемы не оптимизируется), то предпочтительной будет та ориентация элемента, при которой эти ограничения не нарушаются. Если ограничения на размеры схемы нарушаются при любой ориентации элемента m , то предпочтительная ориентация та, при которой суммарная величина превышения размеров по горизонтали и вертикали имеет наименьшее значение.

Далее подробно опишем, как реализуется механизм адаптации. Для его реализации каждому модулю m_i ставится в соответствие автомат адаптации AA_i с двумя группами состояний $\{S_1, S_2\}$, соответствующие двум альтернативам A_1 и A_2 . Альтернатива A_1 соответствует ориентации $o \in \{1,3\}$, а альтернатива A_2 соответствует ориентации $o \in \{2,4\}$. Число состояний в группе задается параметром Q_i , называемым глубиной памяти. На вход автомата адаптации AA_i подается сигнал поощрения (+) или наказания (-) в зависимости от состояния объекта адаптации в среде. На рис.1 показана граф схема переходов автомата адаптации. Знаком (+) помечены переходы под действием сигнала поощрения, знаком (-) помечены переходы под действием сигнала наказания.

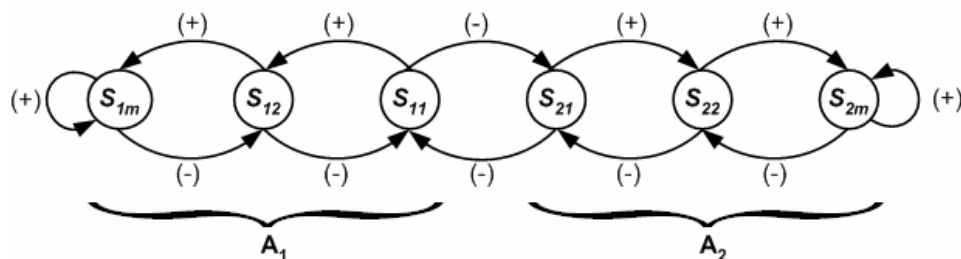


Рис.1. Граф схема переходов автомата адаптации в случае двух альтернатив:
 A_1 и A_2

Если предпочтительная альтернатива совпадает с реализованной в данный момент альтернативой, то вырабатывается сигнал поощрения, в противном случае – сигнал наказания. Отметим, что когда предпочтительная альтернатива отсутствует, управляющий сигнал не вырабатывается (или вырабатывается случайным образом с некоторой вероятностью).

Локальная цель каждого объекта адаптации (модуля m_i) – достичь такого состояния, при котором предпочтительная альтернатива совпадает с реализованной.

Адаптивный алгоритм настройки ориентации элементов с целью минимизации суммарной длины проводников. Оценку состояния объекта адаптации m_i в среде будем производить следующим образом. Для каждого элемента m_i определяем множество цепей Z_i ($Z_i \subseteq C$, C – все множество цепей) связанных с ним. Считая позиции остальных элементов и их ориентации фиксированными, меняем ориентацию элемента m_i и для каждой ориентации из множества $O = \{1,2,3,4\}$ определяем суммарную длину проводников цепей множества Z_i : $HPWL(Z_i)$. Предпочтительная ориентация элемента m_i – ориентация, для которой величина $HPWL(Z_i)$ имеет минимальное значение.

Для реализации механизма адаптации каждому модулю m_i ставится в соответствие автомат адаптации A_i с четырьмя группами состояний S_1, S_2, S_3, S_4 , соответствующих четырем альтернативам. Число состояний в группе задается параметром k , называемым глубиной памяти. На вход автомата адаптации подается сигнал поощрения (+) или наказания (-) в зависимости от состояния объекта адаптации (модуля m_i) в среде. На рис.2 показана граф схема переходов автомата адаптации.

Методика выработки управляющих сигналов заключается в следующем. Если предпочтительная альтернатива (в соответствии со значениями $HPWL(Z_i)$) совпадает с реализованной в данный момент альтернативой, то вырабатывается сигнал поощрения, в противном случае – наказания.

Локальная цель каждого объекта адаптации (модуля m_i) – достичь такого состояния, при котором предпочтительная альтернатива совпадает с реализованной.

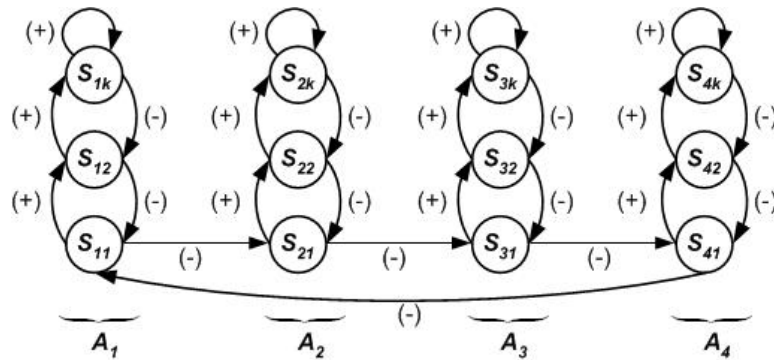


Рис.2. Граф схема переходов автомата адаптации (для четырех возможных альтернатив)

Работа адаптивного алгоритма (для обоих описанных выше случаев) на каждой итерации осуществляется по следующей схеме.

1. Для каждого автомата адаптации определяются предпочтительные ориентации элементов.
2. Производится выработка управляющих сигналов поощрения или наказания.
3. Под действием управляющего сигнала осуществляются переходы в автоматах адаптации.
4. В соответствии с состояниями автоматов адаптации реализуются альтернативы для модулей m_i , т.е. выбираются соответствующие ориентации.

Затем производится размещение элементов.

В случае, когда размеры схемы и длина проводников оптимизируются совместно, граф схема переходов в автоматах адаптации будет такой же, как изображена на рисунке (см. рис.2), а определение предпочтительной ориентации производится на основе учета как размеров схемы, так и длины проводников.

Заключение. Алгоритмы решения задачи крупномасштабного размещения играют жизненно важную роль в современных нанометровых стилях проектирования, в которых производительность полученных схем в значительной степени зависит от межсоединений проводников. В данной статье рассматривалась задача размещения разно габаритных элементов, в качестве критериев оптимизации рассматривались размеры схемы и суммарная длина проводников. Относительное размещение элементов на плоскости задавалось методом пары последовательностей (Sequence-Pair). Для определения пространственной ориентации элементов был предложен адаптивный алгоритм, основанный на моделировании коллективного поведения автоматов адаптации. Алгоритмы, основанные на моделировании поведения автоматов адаптации, являются продуктивным при разработке адаптивных поисковых алгоритмов. На основе проведенных экспериментальных исследований установлена эффективность предложенного метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jason Cong, Joseph R., Shinnerl u Min Xie (UCLA Computer Science), Tim Kong (Magma Design Automation) u Xin Yuan (IBM Corporation, Microelectronics Division). Large-Scale Circuit Placement. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems, Vol. 10, No. 2, April 2005.

2. *Adya S. N., Yildiz M., Markov I. L., Villarrubia P. G., Parakh P. N., Madden P. H.* Benchmarking for large-scale placement and beyond. In Proceedings of the International Symposium on Physical Design. ACM, Monterey, 95–103., 2003.
3. *J. Cong, T. Kong, J. R. Shinnerl, M. Xie, and X. Yuan.* Large-scale circuit placement: Gap and promise. in Proc. of the International Conference on Computer-Aided Design, November 2003.
4. *Chang C. C., Cong J. u Xie M.* 2003. Optimality and scalability study of existing placement algorithms. In Proceedings of the Asia South Pacific Design Automation Conference. 621–627.
5. *Hiroshi Murata, Kunihiro Fujiyoshi, Shigetoshi Nakatake, Yoji Kajitani.* VLSI Module Placement Based on Rectangle-Packing by the Sequence-Pair. IEEE “Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems”, vol. 15, no. 12, december 1996.
6. *Цетлин М.Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969. – 316 с.
7. *Лебедев Б.К.* Адаптация в САПР. Монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 160 с.

Е.А. Зубков, О.Б. Лебедев

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВРЕМЕННОМУ АНАЛИЗУ ЦЕПЕЙ*

Введение. Развитие технологии производства СБИС в направлении уменьшения размера активных элементов и повышения степени интеграции привносит новые проблемы в процесс проектирования и разработки. Некоторых проблем не было ранее, некоторые приобрели большую значимость. Эффект емкостных перекрестных помех не перестает быть доминирующей проблемой при проектировании как на уровне блоков, так и на уровне интеграции кристаллов в «системах на чипе» (SoC). Несмотря на то, что длина соединений уменьшается, требование к низкому шумовому порогу в устройствах с низковольтным питанием, увеличившееся отношение паразитной емкости к емкости относительно «земли» ввиду тонких и узких металлических дорожек и жесткие требования к функционированию специфических схем и сигналов делают перекрестные помехи одним из важнейших параметров проектирования.

Временной анализ поведения схем осложнен так же тем, что при приближении к нано-метровым масштабам, разброс параметров кристаллов увеличивается (ввиду технологических особенностей изготовления СБИС, например, неравномерности распределения присадок в полупроводнике, неоднородности толщины слоя металлизации, изменения геометрических размеров вентиляей), приводя к значительному отклонению реальных и рассчитанных инструментальными средствами задержек сигнала. Как показывает практика промышленного изготовления, такое отклонение может достигать 30%, что не допустимо увеличивает стоимость готовых кристаллов, вследствие меньшего числа выхода «годных» кристаллов 1.

Кроме того, в виду статической природы анализа перекрестного шума всем современным промышленным средствам учитывающим данный эффект присущ значительный уровень пессимизма, что диктует необходимость иного подхода к оценке временного поведения схем.

1. Вероятностная формулировка проблемы. В традиционном статическом временном анализе (СВА) задержка элементов считается постоянной величиной, не учитывающей отклонения технологических параметров базовых процессов 2.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-08-18115, № 06-01-00272) и программ развития научного потенциала высшей школы 2006-2008 гг. (РНП.2.1.2.3193, РНП 2.1.2.2238).