

Пирютина Галина Александровна – e-mail: pirutina_g@ippm.ru; отдел автоматизации проектирования цифровых схем; инженер-исследователь.

Щелоков Альберт Николаевич – e-mail: schan@ippm.ru; тел.: +74997299845; зам. директора; к.ф.-м.н.

Gavrilov Sergey Vitalievich – The Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Science (IPPM RAS); e-mail: sergey.v.gavrilov@ippm.ru; 3, Sovetskaya, Zelenograd, Moscow, 124365, Russia; phone: +74997299890; department of digital design automation; head of department; dr. of eng. sc.

Pirutina Galina Aleksandrovna – e-mail: pirutina_g@ippm.ru; the department of digital design automation; research engineer.

Schelokov Albert Nikolaevich – e-mail: schan@ippm.ru; phone: +74997299845; deputy director; cand. of eng. sc.

УДК 621.3.049.771.14:004.023

М.В. Лисяк, А.А. Лежебоков

АЛГОРИТМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СБИС*

Рассматривается проблема многокритериального размещения элементов сверхбольших интегральных схем с целью уменьшения временных задержек в межсоединениях и обеспечения трассируемости, что является актуальной задачей в связи с переходом на новые субмикронные и нанометровые нормы проектирования сверхбольших интегральных схем. Предложен гибридный алгоритм размещения на основе генетического поиска. Описаны процедуры локального и глобального поиска. Представлены результаты экспериментов по определению вычислительной сложности и эффективности алгоритма.

Размещение; многокритериальная задача; гибридный алгоритм; глобальный поиск; локальный поиск.

M.V. Lisyak, A.A. Lezhebokov

ALGORITHM FOR MULTICRITERIA PLACEMENT OF VLSI ELEMENTS

The article deals with the problem of multi-deployment of large scale integrated circuits in order to reduce time delays in interconnects and traceability, which is an important task in the transition to the new sub-micron and nanometer design standards VLSI. We propose a hybrid algorithm based on the location of the genetic search. The procedures for the local and global search. The results of experiments to determine the computational complexity and efficiency of the algorithm.

Placement; multicriteria problem; a hybrid algorithm, a global search; a local search.

Введение. Современные тенденции в сфере производства сверхбольших интегральных схем (СБИС), связанные с увеличением степени интеграции и уменьшением размеров топологических элементов, оказывают значительное влияние на средства проектирования СБИС. С переходом в субмикронный и нанометровый диапазоны возрастает трудоёмкость физического синтеза, появляется необходимость использования новых комплексных критериев проектирования топологии, которые учитывали бы тенденции доминирования проводников над соединяемыми элементами по различным показателям на всех уровнях проектирования [1, 2].

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 12-01-31356).

Данная работа посвящена решению задачи размещения элементов СБИС с фиксированным расстоянием между рядами размещения. Число и расположение допустимых посадочных мест для элементов фиксировано, целью размещения в этом случае является минимизация времени прохождения сигнала и достижение трассируемости при заданном расстоянии между рядами.

Постановка задачи многокритериального размещения. Пусть заданы множество элементов V и множество соединяющих элементы цепей U , а также множество P позиций на коммутационном поле:

$$V = \{v_i \mid i = 1, \dots, n\}, U = \{u_i \mid i = 1, \dots, l\}, \\ P = \{p_i \mid i = 1, \dots, m\}, m \geq n,$$

где n – количество размещаемых элементов; l – количество цепей; m – количество позиций на коммутационном поле.

Произвольное размещение элементов в позициях представляет собой перестановку $P^* = p_{(1)}, \dots, p_{(i)}, \dots, p_{(n)}$, где $p_{(i)}$ – номер позиции, в которую назначен элемент $v_{(i)}$. В зависимости от выбранного критерия для оценки результатов размещения вводится целевая функция (ЦФ) $F(P^*) \rightarrow opt$. Таким образом, задача размещения представляет собой задачу оптимизации и состоит в отыскании оптимального значения функции F на множестве перестановок P^* [3]. В общем случае, для оценки качества размещения вводят многокритериальную ЦФ, в которую включают оценки по частным критериям f_i . Тогда целью размещения является определить такое расположение элементов, при котором комплексная функция стоимости будет иметь оптимальное значение $F(f_i) \rightarrow opt$. Классическими целями размещения являются минимизация общей площади кристалла, а также минимизация суммарной оценки длины межсоединений. При размещении элементов наноразмерных СБИС на первый план выходят такие цели, как минимизация задержки сигнала, рассеиваемой мощности и обеспечение трассируемости – создание наилучших условий для трассировки [4].

Критериями оптимизации для разработанного алгоритма размещения элементов СБИС выбраны следующие: суммарная длина цепей; количество цепей, задержка сигнала в которых превышает критическое значение и трассируемость. В качестве оценки длин межсоединений целесообразно использовать полупериметр описывающего прямоугольника цепи. Для повышения трассируемости СБИС предлагается следующий эвристический критерий: показатель трассируемости тем лучше, чем меньше суммарная площадь пересечения областей, описывающих прямоугольников всех цепей. Тогда комплексный критерий оптимизации примет вид:

$$F = \alpha \cdot f_1^{opt} + \beta \cdot f_2^{opt} + \gamma \cdot f_3^{opt} \rightarrow \min, \\ \alpha + \beta + \gamma = 1, \quad (1)$$

где f_1^{opt} – суммарная длина цепей; f_2^{opt} – количество критических цепей; f_3^{opt} – площадь пересечений прямоугольников, описывающих цепи; α, β, γ – коэффициенты значимости критериев.

Для приведения всех критериев к относительному виду, во избежание подавления одних критериев другими, абсолютное значение частной ЦФ делится на её математическое ожидание, вычисленное на первой итерации алгоритма, где решения генерируются случайным образом.

Гибридный алгоритм размещения. Распространенным методом решения задач многокритериальной оптимизации в САПР является моделирование природных процессов и систем, которое включает эволюционные и генетические алгоритмы, алгоритмы моделирования отжига, различные методы роевого интеллекта

и другие. Основным преимуществом эволюционных методов является параллельная обработка множества альтернативных решений, что является мощным средством выхода из локальных оптимумов [5]. Другим достоинством ГА является линейная оценка временной и пространственной сложности генетических процедур, выполняемых на каждой итерации. Это даёт возможность решать задачи большой размерности за приемлемое время, что особенно важно при проектировании топологии СБИС.

Известно, что скорость изменения качества решений не одинакова на всем протяжении генетического поиска. Она достигает максимального значения на первых итерациях ГА и значительно снижается на последних [6]. Эффективным решением этой проблемы является выполнение определенного количества итераций ГА и последующее улучшение полученного решения менее трудоемкими методами. Использование гибридных методов, сочетающих в себе достоинства нескольких классов алгоритмов, является одним из эффективных подходов к решению NP-сложных задач, к которым относится задача размещения.

Предлагаемая стратегия оптимизации состоит из двух этапов:

- 1) глобальный поиск оптимального решения для максимального охвата пространства решений, осуществляется генетическим алгоритмом (ГА);
- 2) локальный поиск вблизи множества решений, полученных ГА, осуществляются модифицированным алгоритмом парных перестановок (ПП).

Особенность предложенного гибридного алгоритма (рис. 1) состоит в том, что ГА формирует множество промежуточных размещений, которые затем подвергаются локальной оптимизации. Число промежуточных решений определяет число независимых ветвей алгоритма ПП и является параметром поиска, влияющим на его эффективность.

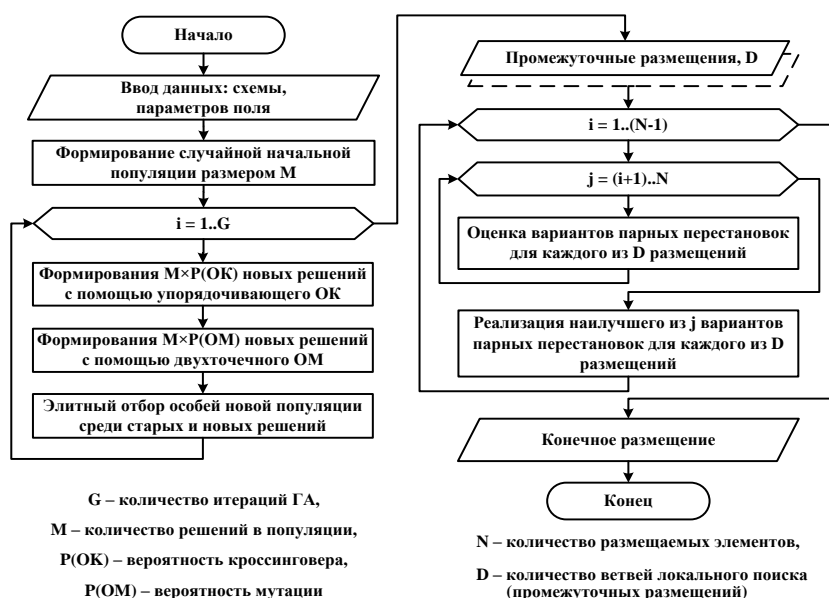


Рис. 1. Схема гибридного алгоритма размещения

Представление и оценка качества решений. Каждое размещение описывается хромосомой, ген которой соответствует определенной позиции рабочего поля. Гены содержат информацию о том, какие топологические элементы назначены в соответствующие им позиции, следовательно, значение гена может изменяться в

пределах диапазона номеров элементов. Значения генов в хромосоме должны быть уникальными (хромосомы негомологичны), а значит, требуют использования модифицированных генетических операторов (ГО), не порождающих нелегальных решений. Качество решения оценивается «приспособленностью» кодирующей его хромосомы в соответствии со значением ЦФ (1). Представление решений и метод оценки их качества одинаковы для ГА и ПП.

Схема глобального поиска. Рассматриваемый ГА содержит операторы кроссинговера (ОК), мутации (ОМ) и селекции. Для работы с негомологичными хромосомами были выбраны следующие модификации основных ГО [7]: одноточечный упорядоченный ОК и двухточечный ОМ, оценки временной сложности (ВСА) которых составляют $O(n)$ и $O(1)$, где n – количество размещаемых элементов.

Создание начальной популяции решений производится случайным образом на основе стратегии «дробовика» [8] с целью максимального охвата области решений и выполняется за время $O(n^2)$, где n – количество элементов схемы. Отбор решений в следующее поколение использует стратегию элитизма: решения из текущей популяции объединяются с новыми решениями, полученными после применения ГО, и ранжируются в соответствии со значениями целевой функции. В новое поколение отбираются лучшие решения, размер популяции в каждом поколении остается неизменным. Отбор в новое поколение осуществляется за время $O(n)$, где n – количество размещаемых элементов.

Оператор селекции производит выбор одного решения из популяции для последующего выполнения операторов кроссинговера и мутации. В данном алгоритме используется селекция на основе колеса рулетки [8], выполняемая за линейное время $O(n)$, где n – количество элементов схемы. Вероятность выбора i -го решения определяется формулой (2):

$$P(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{j=1}^M F(x_j)}, \quad (2)$$

где $F(x_i)$ – ЦФ для i -го решения; M – размер популяции.

После оценки времени выполнения отдельных блоков ГА можно дать теоретическую оценку ВСА всего алгоритма. В худшем случае она составит $O(n^3)$, где n – количество размещаемых элементов.

Схема локального поиска. В ходе работы ПП выполняется параллельная обработка промежуточных решений, полученных ГА. Множество промежуточных решений формируется следующим образом: из последней популяции ГА выбирается D лучших неповторяющихся решений. Оптимизация нескольких промежуточных решений целесообразна, поскольку локальный поиск для начального решения с худшим значением ЦФ зачастую дает лучший результат, чем локальный поиск для наилучшего начального решения. Теоретическая оценка ВСА алгоритма парных перестановок составляет $O(n^2)$, таким образом, ВСА гибридного алгоритма составляет $O(n^3)$, где n – количество размещаемых элементов.

Экспериментальные исследования гибридного алгоритма. Для реализации предложенного алгоритма и выполнения экспериментальных исследований был разработан программный продукт, предназначенный для работы в ОС Windows 7. Разработка выполнена в среде Microsoft Visual Studio 2010 Express на языке C#. Экспериментальные исследования алгоритма проводились на компьютере Intel Pentium Dual, CPU T2410, 2.00 GHz с оперативной памятью 2.00 GB для схем, сгенерированных случайным образом (число элементов ≤ 200 ; число цепей ≤ 800 ; число элементов, объединенных в одну цепь $2 \div 6$), а также для схем стандартных ячеек открытой библиотеки Nangate Open Cell Library 45nm [9]. Результаты экспе-

риментов по определению ВСА гибридного алгоритма (табл. 1) свидетельствуют о кубическом характере ВСА в среднем случае, что согласуется с ранее полученной теоретической оценкой.

Таблица 1

Зависимость времени поиска от количества размещаемых элементов

Число поколений (G)	Время работы программы, с										Среднее значение
	№ эксперимента										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
20	0,38	0,4	0,4	0,57	0,45	0,44	0,45	0,47	0,46	0,45	0,45
40	0,85	0,98	1,09	1,01	1,03	0,94	0,96	1,07	1,07	1,09	1,01
60	2,65	1,85	1,72	1,95	1,79	1,98	1,95	2,28	2,18	2,00	2,03
80	4,07	5,45	3,27	4,03	3,66	3,82	3,71	3,16	3,79	2,36	5,86
100	6,31	6,69	5,50	5,61	7,22	7,32	5,82	6,98	4,82	5,95	6,22
120	8,45	8,52	8,74	10,99	10,85	8,89	10,89	8,76	9,02	7,99	9,31
140	15,88	14,99	14,02	18,05	15,06	15,07	13,01	11,67	10,89	17,14	14,58
160	17,55	17,12	19,42	16,27	17,25	23,43	23,51	18,08	19,98	16,88	18,95
180	23,67	24,57	26,86	23,49	28,01	20,51	28,24	26,46	28,01	29,19	25,91
200	28,82	33,38	27,54	26,80	42,02	34,34	40,57	33,13	33,57	29,67	32,99

Эффективность эвристического алгоритма измеряется степенью достижения требуемого качества решений и необходимым для этого временем, и зависит от значений параметров алгоритма. В соответствии с выбранной методикой определения оптимальных параметров алгоритма [5] эффективность алгоритма оценивалась вероятностью получения оптимального решения в единичном запуске и количеством независимых запусков, необходимых для достижения оптимума с вероятностью 99%. Поскольку глобальный оптимум в задаче размещения не известен, оптимальными при проведении оценок было принято считать решения, которые хуже наилучшего из решений, полученных в серии экспериментов (для одной и той же схемы) не более, чем на 5 %.

Для определения оптимальных значений параметров (количества итераций $GA - G$, размера популяции – M , количества ветвей ПП – D) были проведены серии экспериментов для схем с разным количеством элементов (табл. 2). Для 25 элементов оптимальной комбинацией параметров с точки зрения минимизации временных затрат и получения качественных решений является $G = 142$, $M = 50$, $D = 4$. Для 50 элементов оптимальной комбинацией параметров с точки зрения минимизации временных затрат и получения качественных решений является $G = 190$, $M = 60$, $D = 5$.

Таблица 2

Определение оптимальных параметров работы алгоритма

Размер популяции, M	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Оптимальное число итераций, G	25 элементов									
	200	182	187	173	142	163	180	180	149	143
	50 элементов									
	198	199	196	199	199	190	199	194	198	197
Вычислительная сложность, $I, \times 10^4$	25 элементов									
	0,649	1,16	1,58	2,00	2,29	3,08	3,12	3,64	4,18	4,72
	50 элементов									
	0,574	0,98	1,38	1,88	2,21	2,83	2,98	3,54	3,98	4,40
Вероятность достижения оптимума в одиночном запуске, $P, \%$	25 элементов									
	75,8	76,4	80,6	79,6	76	76	84,4	83,8	72,2	75,2
	50 элементов									
	75,8	76,4	80,6	79,6	76	76	84,4	83,8	72,2	75,2

Заключение. Предложенный гибридный алгоритм размещения элементов СБИС основан на использовании генетического алгоритма в целях охвата различных областей пространства решений и модифицированного алгоритма парных перестановок, улучшающего решения, найденные генетическим алгоритмом. Использование такой стратегии позволяет снизить временные затраты на получение качественных решений, по сравнению с использованием только генетического поиска. Оптимизация происходит одновременно по трем критериям, актуальным в контексте увеличения степени интеграции СБИС и возникающих в этой связи тенденций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Суетин Н.* Полупроводниковые технологии: современное состояние, проблемы и перспективы [Электронный ресурс] – 2010. URL: <http://nano.msu.ru/files/conferences/school-2010-04/SuetinNV.pdf>.
2. *Курейчик В.В., Курейчик Вл.Вл.* Архитектура гибридного поиска при проектировании // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 22-27.
3. *Sapatnekar S.* Handbook of Algorithms for Physical Design Automation. – NY: CRC Press, 2009. – P. 1049.
4. *Рабан Ж., Чандракасан А., Николитч Б.* Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 911 с.
5. *Курейчик В.В., Запорожец Д.Ю.* Современные проблемы при размещении элементов СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 7 (120). – С. 68-73
6. *Курейчик В.М.* Биоинспирированный поиск с использованием сценарного подхода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 7-12.
7. *Курейчик В.М.* Модифицированные генетические операторы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 12 (101). – С. 7-14.
8. *Курейчик В.М., Курейчик В.В., Родзин С.И.* Модели параллелизма эволюционных вычислений // Вестник ростовского государственного университета путей сообщения. Научно-технический журнал. – 2011. – № 3. – С. 91-96.
9. *Nangate Open Cell Library* [Electronic resource] – 2011. – URL: <http://www.nangate.com>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.С. Лисицына.

Лисяк Мария Владимировна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: maria-lisyak@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634360524; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирантка.

Лежебоков Андрей Анатольевич – e-mail: legebokov@gmail.com; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.; ассистент.

Lisyak Maria Vladimirovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: maria-lisyak@yandex.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360524; the department of computer aided design; postgraduate student.

Lezhebokov Andrey Anatol’evich – e-mail: legebokov@gmail.com; phone: +78634371651; the department of computer aided design; cand. of eng. sc.; assistant.