

# 光电 MCM 分割算法的改进

周正伟,陈伟元,王豪才  
(电子科技大学 CAE 中心,四川成都 610054)

**摘 要:** 芯片级分割技术可用于解决光电 MCM(OE MCM)物理设计所面临的散热、系统速度及最大光互连距离等问题.本文给出了光电 MCM 分割的模型,将改进的遗传算法(GAs)用于光电 MCM 的分割问题中.改进算法较标准遗传算法更适合光电 MCM 分割,其应用可使系统功耗降低约 50%.

**关键词:** 光电 MCM; 光电 MCM 分割; 模块; 遗传算法

**中图分类号:** TN36 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)12-1632-03

## Improving on Algorithms for Opto-Electronic MCM Partitioning

ZHOU Zheng-wei, CHEN Wei-yuan, WANG Hao-cai  
(CAE Center, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** Chip-level partitioning technology is used for solving the problems coming from the physical design of Opto-electronic multichip module(OE MCMs): heat dissipation, system speed, and maximum optic interconnect distance. The physical models and algorithms for OE MCM partitioning is given. This paper uses genetic algorithms(GAs) for opto-electronic system partitioning and improving the genetic algorithm. The modified algorithm is more suitable for OE MCM partitioning than standard GAs, and it can decrease the power consumption about 50%.

**Key words:** opto-electronic MCM; OE MCM partition; module; genetic algorithms(GAs)

### 1 引言

多芯片组件(Multi-chip Module, MCM)以其突出的性能优势,已在航空、卫星、计算机、通信等领域获得了广泛的应用. MCM 芯片间的信号传输是以电的形式实现的,随着工作速度的提高,信号传输延迟和相邻信号的串扰成为突出的问题.在组件的芯片间采用自由空间光互连(Free Space Optic Interconnect, FSOI)的光电多芯片组件(Opto-Electronic MCM, OE MCM)技术,具有极高的通信带宽、抗电磁干扰和三维空间的可用性,是微组装领域的一个新兴研究方向,将成为新一代的互连组装技术.但是 FSOI 技术的采用使得光电 MCM 的物理设计面临着三个重要的问题:散热、系统速度和最大光互连距离.系统散热:光电 MCM 总是工作在很高的频率下,其功耗也相当高,减小功耗成为光电 MCM 设计中的一个主要问题.同时,光电系统中采用的光电器件和光源所产生的热成为整个组件的主要热源,解决光电 MCM 的散热问题是其物理设计中最关键的问题之一.系统速度:在 MCM 系统中,有一些关键路径的电互连延迟太大,影响了整个组件的工作速度,在光电 MCM 中成为光互连替代的对象.在光互连数一定的情况下,如何提高系统的速度是光电 MCM 设计的一个难题.最大光互连距离:自由空间光互连采用光学元件或计算机全息图(CGH)作为改变光信号传播方向的器件,它们的尺寸和性能决定了光互连的最大距离.

光电 MCM 物理设计的关键是解决系统功耗问题,而系统

的功耗大小可以认为主要由光互连数决定.因此在保证系统工作速度下,尽量减少光互连数,使光互连均匀分布.光电 MCM 芯片级分割技术,是在芯片间的连接用光互连,而芯片内的连接用电互连的假设下,通过分割算法的优化,使元件的布局在各种苛刻的约束条件(如延时、功耗和 I/O 引脚数等)下,用最少的互连数达到所要求的系统速度.

光电 MCM 的分割算法是在集成电路和 MCM 的分割算法中发展而来,当前较多的采用以迭代算法为基础的二次布尔规划方法、最大流-最小分割算法和光谱分割法,这些方法都不适合大电路的分割,或造成子集大小可能严重不均,或只适用于电路元件数目较少的情况,在众多的约束条件下只能寻到一个次最优解.随着光电 MCM 芯片上电路的复杂度持续增加,算法的搜寻空间相应地变得很大,应寻找更加快速有效的光电 MCM 分割算法.本文在给出光电 MCM 分割的物理模型及数学描述的基础上,将改进的遗传算法用到光电 MCM 分割中,得到的结果比采用其它分割算法的更优.

## 2 光电 MCM 分割的物理模型及数学描述

### 2.1 光电 MCM 分割的物理模型

光电 MCM 的物理模型决定了分割算法所用的代价函数.图 1 所示为有  $N-1$  个互连级的光电 MCM 的物理传输模型,芯片基板上排列着处理元件 PEs 的三维阵列.每级有两个计算机全息图(Computer Generated Holograms,简称 CGH)平面,每个计算机全息图由离轴全息镜片的阵列组成,被放置在距离

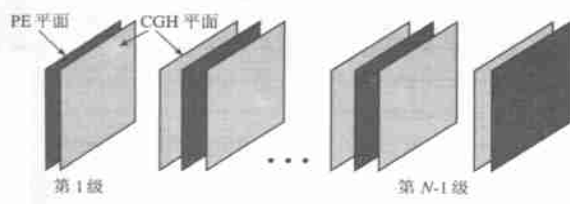


图1 光电 MCM 的物理传输模型

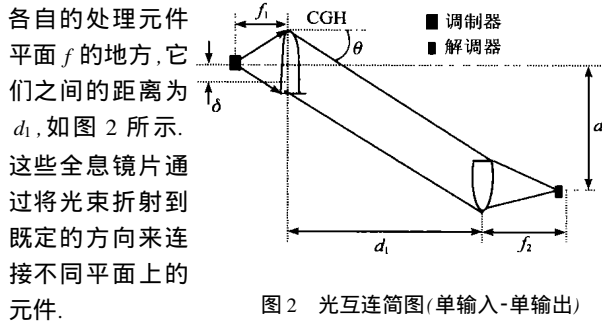


图2 光互连简图(单输入-单输出)

各自的处理元件平面  $f$  的地方,它们之间的距离为  $d_1$ ,如图 2 所示.这些全息镜片通过将光束折射到既定的方向来连接不同平面上的元件.

### 2.2 光电 MCM 分割的数学描述

光电 MCM 上的电路可以用拓扑图  $T = (E, C)$  来作其模型,这里  $E = \{e\}$   $e$  是电路系统的元件/代表元件集;  $C = \{c_{ij}\}$   $c_{ij}$  是元件  $e_i, e_j$  之间的互连/代表互连集.假如每一个顶点有一条输入边和一条输出边,则每条边  $c_{ij}$  有一个权  $w_{ij}$  与之对应,  $w_{ij}$  代表  $e_i$  与  $e_j$  之间信号网中的互连线的数目.这样建立的拓扑图使得光电 MCM 的分割可以完全转化为拓扑图的分割问题.

现将一个大电路系统分割成  $N$  个子电路系统,并将它们分布在有  $M$  个芯片模块上  $M = (m_1, m_2, \dots, m_m)$ . 在一定的约束条件下,拓扑分割元件集  $E$  中的元件于  $M$  个芯片模块上,且满足:

$$m_i = E \text{ 且 } m_i \cap m_j = \phi \quad \forall i \neq j \quad (1)$$

其中,  $\phi$  为空集.

假设  $S_i, P_i, IO_i$  分别表示芯片  $m_i$  的面积、散热量和 I/O 数.目标是要找到一种最佳映射  $f: E \rightarrow M$  使代价函数  $W$  的值最小.

$$W = \sum_{(e_i, e_j) \in C} w_{ij} \quad (2)$$

这里  $w_{ij}$  也表示元件  $e_i$  和  $e_j$  之间互连的代价值;代价函数  $W$  受以下几个条件的约束:

R1: 面积约束.所有芯片面积  $S_i$  的总和受基板总面积  $S$  的限制:

$$S_i \leq S, \quad \forall i \in m_i \quad (3)$$

R2: 时间约束.两个不同芯片间的实际互连延迟  $delay(e_i, e_j)$  应当小于其允许的延时值  $T_{e_i, e_j}$ . 对某些关键路径尤为重要:

$$delay(e_i, e_j) < T_{e_i, e_j} \quad (4)$$

$$e_i, e_j \in E, \quad (e_i) \cap (e_j) = \emptyset$$

R3: 热约束. MCM 电路较传统的 HIC、PCB 电路更为复杂和集中,其功耗是关键的问题,每一个芯片上的功耗  $P_i$  和应当不大于整个电路的功耗约束  $P_M$ :

$$P_i \leq P_M \quad \forall i \in (e_i) \in M \quad (5)$$

R4: I/O 引脚数约束.布线密度影响工艺选择,而线密度取决于 MCM 中不同芯片的 I/O 引脚数,故分割问题的任何解必须满足芯片的 I/O 约束.文献[3]提出的 Rent 参数规则给出了芯片的 I/O 数与芯片上的电路逻辑门数之间的关系:

$$IO = aG^b \quad (6)$$

其中,  $IO$  是信号互连数,  $G$  是逻辑门的个数,  $a, b$  分别为常数 ( $a = 2 \sim 4, b = 1/2 \sim 2/3$ ).于是 I/O 约束条件可写成

$$a(G_i)_j^b \leq IO_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

分割问题的数学描述为:

$$\begin{aligned} & \text{Minimization} && W \\ & \text{Subject to} && R1, R2, R3, R4 \end{aligned} \quad (8)$$

光电 MCM 的芯片级分割问题,除了以上讨论的四个约束条件外,对于代价函数还需注意:分割块(即芯片)间的光互连数的减少是分割算法的一个最主要的目标,减少光互连数将缩短延时和降低功耗,提高系统的工作效率.

### 3 光电 MCM 分割的改进遗传算法

传统遗传算法的位串编码方式不适合结构设计,因为其位串交叉算子可能破坏结构设计中的一些结构而使得新生成的一些结构不合理,如在实施交叉算子以后,分割结果中可能出现有的芯片中没有节点,而有的分割块中出现过多的节点,这有违于设计要求,更不能反映实际情况.图 3 所示的编码方式较适合于光电 MCM 的分割问题,它描述了一个电路被分割到三个芯片上:第 1 个芯片  $M_0$  上有元件  $e_3, e_7$  和  $e_{16}$ ,第二个芯片  $M_1$  上有元件  $e_1, e_6, e_{10}$  和  $e_{13}$ .第三个芯片  $M_2$  上有元件  $e_5, e_9, e_{12}$  和  $e_{15}$ .这种表达自然直观地描述了元件在芯片上的分布情况,即有几个芯片,芯片上有那些元件,这比位串来得直接,在这种直接的编码方式下,用传统的交叉算子得到的结果很糟,可能造成有的芯片上有两个相同的元件或者整个分割结果中有的元件不止一个,而有的元件丢失了.这样得到的结果不合理,需对交叉算子进行改进.

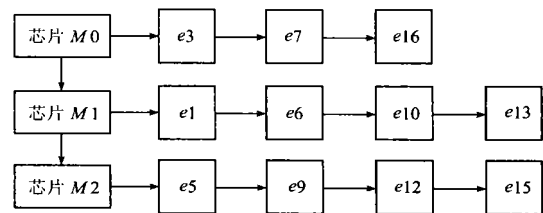


图3 光电 MCM 的一种编码方式

在交叉之前生成一个任意的由 0 和 1 组成的模板,这个模板的大小和种群中的任何一个个体相同.然后选出两个准备交叉的父代,通过模板来生成子代.具体方法是:

子代 1:当模板上对应子代 1 的某个元件位置上的数为 1 时,则把父代 1 中相应位置上的元件移到子代 1 的相应位置;若模板上对应子代 1 的某个元件位置上的数为 0 时,则把父代 2 中相对应位置上的元件移到子代 1 的相应位置上.

子代 2:当模板上对应子代 2 的某个元件的位置上的数为 1 时,则把父代 2 中相应位置上的元件移到子代 2 的相应位置;若模板上对应子代 2 的某个元件的位置上的数为 0 时,则把父代 1 中相应位置上的元件移到子代 2 的相应位置上.

为预防算法过早收敛,需经过一定数目的进化代后对适值相等的个体进行变异——算法过程中的突变.光电 MCM 分割问题中遗传算法的实施关键是将代价函数恰当地映射到遗传算法所用的适值上,通过对适值的最小化而求得代价函数的最小.光电 MCM 分割中遗传算法的算法结构如下:

(a) 开始 main(); (b) 任意生成  $N$  个分割结果组成初始种群; (c) 计算每个分割结果的适值; (d) 从现有种群中按百分比选取部分个体到新种群中; (e) 通过交叉算子从现有种群中生成部分个体到新种群中; (f) 用新种群代替现有种群; (g) 对现有种群按百分比进行变异; (h) 对现有种群中的个体进行适值计算; (i) 保存适值最高的个体; (j) 结束.

#### 4 应用

将改进的遗传算法用于有 32 个节点蝶形网络的光电 MCM 芯片级分割.表 1 是该网络的网表.

表 1 32 个节点的蝶形网络的网表

1	9 11 13 15	17	9 10 11 12 25 25 26 26
2	9 10 13 14	18	9 10 11 12 25 25 26 26
3	11 12 15 16	19	9 10 11 12 27 27 28 28
4	10 12 14 16	20	9 10 11 12 27 27 28 28
5	9 10 13 14	21	13 14 15 16 29 29 30 30
6	10 12 14 16	22	13 14 15 16 29 29 30 30
7	9 11 13 15	23	13 14 15 16 31 31 32 32
8	11 12 15 16	24	13 14 15 16 31 31 32 32
9	1 2 5 7 17 18 19 20	25	17 17 18 18
10	2 4 5 6 17 18 19 20	26	17 17 18 18
11	1 3 7 8 17 18 19 20	27	19 19 20 20
12	3 4 6 8 17 18 19 20	28	19 19 20 20
13	1 2 5 7 21 22 23 24	29	21 21 22 22
14	2 4 5 6 21 22 23 24	30	21 21 22 22
15	1 3 7 8 21 22 23 24	31	23 23 24 24
16	3 4 6 8 21 22 23 24	32	23 23 24 24

设这 32 个节点代表的元件分配到  $2 \times 2$  个芯片上,每个芯片上元件的个数取平方数,这里取  $9(9 \times 4 = 36)$ ,这样可以自然满足芯片面积的约束条件.

初始种群是算法优化的对象,其大小对算法的收敛时间及算法的质量有直接的影响.初始种群中的个体应较优良,其选择应具有较大的随机性.用随机数模上分割块的数目来生成初始种群中的个体,尽量做到个体的多样化.表 2 是生成的初始种群的个体之一.

表 2 初始种群中的一个个体

芯片	节 点
芯片 0	6 12 18 26 30 32 0 0 0
芯片 1	3 5 7 10 15 19 22 24 27
芯片 2	1 2 8 11 13 16 21 25 29
芯片 3	4 9 14 17 20 23 28 31 0

表 3 优化的结果

芯片	节 点
芯片 1	7 27 11 0 28 1 20 9
芯片 2	31 24 32 6 23 2 5 13
芯片 3	22 15 29 8 3 21 30 16 0
芯片 4	10 25 17 26 18 4 12 0 0

光电 MCM 分割算法的最主要目的是优化光互连数,光互连数的减少可以降低组件的功耗,这是与电互连的 MCM 所不同的.将光互连数作为优化分割的代价函数值,由式(2)可求得,其倒数即为适值.

在 Sun 工作站上 C 编程实现此算法.32 个节点蝶型网络的光电 MCM,其初始分割时光互连数的最小值为 64,经用此算法优化后,光互连数减少到 33,减少近 50%,光电 MCM 系

统的功耗也减少近 50%.表 3 是得到的最优布局结果.

同理,将此算法应用于 64, 128, 256 和 512 等节点双蝶形网络的光电 MCM 进行芯片级分割,几种不同算法所得的光互连数结果如表 4 所示.

表 4 不同节点不同分割算法的光互连数计算结果

节点数	直接分割法	改进迭代法	本文的改进分割算法
64	233	125	99
128	679	361	293
256	1256	642	527
448	1532	799	632

由表 4 可知,同直接分割法与改进迭代法相比,本文的算法进行光电 MCM 分割,可减少光互连数约 50%和 20%.

#### 5 结论

本文提出的受芯片面积、光互连距离和系统功耗约束的光电 MCM 分割模型,其核心是芯片间的光互连数;改进的遗传算法在结构化设计和面向对象设计中能较好地使用,应用于光电 MCM 进行分割,取得了较好的结果.

#### 参考文献:

- [1] Toshio Sudo. Present and future directions for multichip module technologies [J]. IEEE Journal of solid-state circuits, April 1995, 30(4): 436 - 442.
- [2] R R Tummala. Multichip packaging-A Tutorial [A]. Proc. IEEE, Dec. 1992:1924 - 1941.
- [3] Soungug Koh, Harold W. Synchronous global clock distribution on multichip modules using optical waveguides [J]. Optical engineering, 1994, 33(5):1587 - 1595.
- [4] J Fan, B Catanzaro, C K Cheng, S H Lee. Partitioning of opto-electronic multichip modules [A]. IEEE on MCMC, 5. 1994.
- [5] Minishine Shih, Ernest S Kuh. Quadratic boolean programming for performance-driven system partitioning [A]. 30<sup>th</sup> ACM/ IEEE design automation conference, 1993:761 - 765.
- [6] Charles J. Alpert, So-Zen Yao. Spectral partitioning: the more eigenvectors, the better [A]. 32<sup>th</sup> design automation conference, 1994:195 - 200. Charles J. Alpert, So-Zen Yao. Spectral partitioning: the more eigenvectors, the better. 32<sup>th</sup> design automation conference, 1994:195 - 200.
- [7] C M Fiduccia, R M Mattheyses. A linear time heuristic for improving network partitions [A]. Proc. of the 19<sup>th</sup> design automation conf [C]., 1982:175 - 181.
- [8] S Kirkpatrick, C D Gelatt Jr., M P Vecchi. Optimization by simulated annealing [J]. Science 221, 4598, 1983:671 - 680.

#### 作者简介:



周正伟 男. 1967 年生于四川广安. 1991 年获工学硕士, 现为电子科技大学计算机辅助工程中心(CAE)博士研究生, 从事 MCM 和 ASIC 的 CAD 研究.