

光计算中全排列无阻塞双 Omega 光互连网络的光学实现方法*

罗风光 徐 军 曹明翠 李洪谱 艾 军

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 本文分析了单个 Omega 光互连网络的局限性, 提出了一种全排列无阻塞双 Omega 光互连网络的光学实现方法。光回路系统由 Ar^{+3} 离子激光器、光束分束器、偏振组合棱镜和液晶空间光开关组成, 能够实现输入信号列阵光束的并行传输和全排列无阻塞光互连。

关键词 光互连, 双 Omega 网络, 无阻塞

1 引 言

在光计算、光互连的研究领域中, 自由空间规则性互连网络是一类重要的光互连网络, 主要有三种互连方式: 全混洗 Omega 互连网络、全交叉 (Crossover) 互连网络和 Banyan 互连网络^[1~3]。这三种互连方式各具特点, 而其中的全混洗互连网络具有简便、快速、灵活的特点, 因而受到国内外光计算研究者的重视。随着光计算、光互连研究的不断深入, 我们在对全混洗 Omega 互连网络的大量研究中发现, 单个全混洗 Omega 互连网络不能完成输入通道与输出通道之间所有全排列方式的光互连, 即在互连网络中存在路径冲突, 造成阻塞, 使有些输出排序得不到实现。为了解决这个问题, 我们在全混洗 Omega 互连网络的基础上加上一个反向 Omega 互连网络, 构成了双 Omega 互连网络, 这种新的互连网络具有无路径冲突的特点, 且具有一定的路径选通简并度, 因而给路径选择带来了灵活性。本文提出了一种二次通行全排列无阻塞双 Omega 互连网络的光学实现方法, 其光回路系统由 Ar^{+3} 离子激光器、光束分束器、偏振组合棱镜和液晶空间光开关组成, 能够实现输入信号列阵光束的并行传输和全排列无阻塞光互连, 它为光互连网络的实用化研究提供了一条较好的途径。

2 全混洗 Omega 网络的局限性和反向 Omega 网络的引入

对于一个输入输出通道数为 $N \times N$ ($N = 2^n$, n 为正整数) 的互连网络, 它由 n 级全混洗交换互连网络组成, 每一级全混洗交换网络都由一个全混洗网络和 $N/2$ 个交换开关构成^[4]。全混洗网络的互连方式可用下列函数定义为

本工作得到国家“八六三”高技术计划、国家自然科学基金、国防科工委预研基金的资助。

收稿日期: 1993 年 6 月 7 日, 收到修改稿日期: 1993 年 9 月 27 日

$$\begin{cases} k' = 2k & (0 \leq k < N/2) \\ k' = 2k - N + 1 & (N/2 \leq k < N) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $k(= 0, 1, 2, \dots, n - 1)$ 为输入端口序号, $k'(= 0', 1', 2', \dots, (n - 1)')$ 为输出端口序号. 交换开关的作用是对两个入射光信号进行直通输出或交换通道输出, 对于 $N \times N$ Omega 互连网络, 它的交换开关个数一共有 $m = (N/2)n = (N/2) \log_2 N$ 个. 从数学排列可知, 对于 N 个数字, 按照不同的次序排列的方式可以有多种, 其最大的排列方式有 $N!$ 种, 称为全排列. 因此, N 个输入端口与 N 个输出端口的非重复排列连接方式共有 $N!$ 种, 但是对一个 $N \times N$ Omega 网络, 它的连接

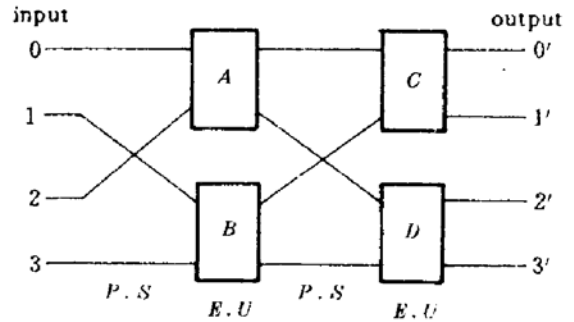


Fig. 1 4×4 Omega interconnection network
P. S.: perfect shuffle network; E. U.: exchange switch unit

方式受到交换开关个数的限制只能有 $2^m = 2^{(N/2)\log_2 N}$ 种, 但由于全排列数 $N! > 2^{(N/2)\log_2 N}$, 故单个 $N \times N$ Omega 互连网络不能完成所有全排列的互连方式, 即某些互连方式由于存在路径冲突, 无论交换开关如何设置均不能实现这些互连方式的连接. 为了叙述方便, 我们来看看 $N = 4$ 时的情况. 图 1 是 4×4 Omega 互连网络的示意图, 它由两级全混洗交换网络组成, 4 个交换开关单元控制方式的不同组合, 可构成 $2^4 = 16$ 种排列方式的输出, 但是, 对 4×4 Omega 互连网络, 其全排列输出方式应该有 $4! = 24$ 种, 这即意味着还有 8 种输出排序方式无法由单个 4×4 Omega 互连网络来实现. 例如, 无论交换开关单元 A, B, C, D 的控制状态如何组合, 都无法实现输入端口和输出端口 0 和 $0'$, 2 和 $1'$, 3 和 $2'$, 1 和 $3'$ 之间的同时互连, 造成了路径冲突, 因而给实际应用带来了困难. 为了解决这个问题, 我们引入了一个反向 Omega 互连网络, 它是将原来的 Omega 网络的输出端作为输入端, 输入端作为输出端构成的一个新的互连网络, 每一级可由一个反向混洗函数和交换开关单元组成. 可以定义一个新的函数作为反向混洗函数的表达式

$$\begin{cases} l' = l/2 & (l \text{ 取 } 0 \text{ 或小于 } N \text{ 的偶数}) \\ l' = (l + N - 1)/2 & (l \text{ 取小于 } N \text{ 的奇数}) \end{cases} \quad (2)$$

其中 N 为反向混洗函数的输入、输出端口数, l, l' 分别为输入、输出端口的序号. 比较(1)式和(2)式, 发现当 $N = 2$ 或 $N = 4$ 的两种特例下, 尽管这两个式子形式上不同, 但所表示的互连方式却是等效的, 这为我们构成无冲突双 Omega 互连网络提供了便利.

3 全排列无冲突双 Omega 互连网络的光学实现方法

将一个 $N \times N$ Omega 互连网络和一个反向的 $N \times N$ Omega 互连网络串接起来, 省掉连接处重复的 $N/2$ 个交换开关单元, 构成了一个双-Omega 互连网络, 该互连网络具有的交换开关个数 m' 为: $m' = 2m - N/2 = (N/2)(2\log_2 N - 1)$ 可以构成 $2^{m'}$ 种路径选通方式

$$2^{m'} = 2^{(N/2)(2\log_2 N - 1)} \quad (3)$$

根据互连网络的拓扑等价性, 这种双 Omega 互连网络与全排列无冲突 Benes 互连网络在连接特性上是等价的^[5,6], 换句话说, 双 Omega 互连网络同样具有实现全排列无冲突光互连的特性. 由于 $2^{(N/2)(2\log_2 N - 1)} > N!$, 即路径选通方式数大于 $N!$ 次输出排列数, 故存在一定的简并度,

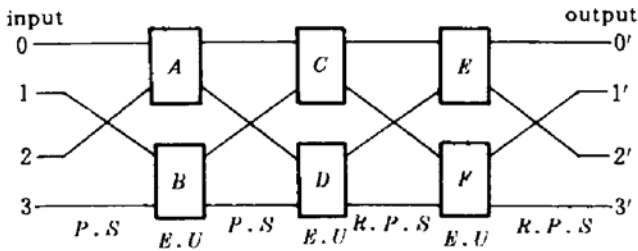


Fig. 2 4×4 double Omega interconnection network

P. S.: perfect shuffle network;

R. P. S.: reverse perfect shuffle network;

E. U.: exchange switch unit

即对一确定的输出排序方式,同时有几种路径通道连接方式加以选择,增加了互连方式的灵活性。图 2 给出了 4×4 双 Omega 互连网络的示意图。

对 $N = 4$ 的情况,由(3)式可知,它可以构成 64 种路径选通方式,共输出 $4! = 24$ 种全排列输出端口排序方式,每种排序最大简并度为 4,最小简并度为 2,如表 1 所示。表中 *A, B, C, D, E, F* 均为各交换开关单元,其控制状态 0 或 1 分别表示处于直通或交换连接状态。输入

端口 0, 1, 2, 3 的不同排列分别表示与输出端口 0', 1', 2', 3' 的不同互连方式。表中具体给出了实现这 24 种全排列互连排序方式所要求的交换开关单元各控制状态的不同组合。路径选通互连方式则由交换开关单元不同的控制状态的组合形式来决定。

为了在光路上实现 4×4 双 Omega 互连网络,由前面的分析可知,当 $N = 4$ 时的全混洗函数和反向混洗函数实际上是等效的,因此,在光回路系统中,可以用三级 4×4 全混洗交换光互连网络和一级 4×4 全混洗光互连网络构成 4×4 双 Omega 光互连网络,其光路系统如图 3 所示。由 Ar^{+3} 离子激光器发出的光束经光束分束器分光后,构成了输入端口的入射光束,每一级全混洗交换互连模块由偏振组合棱镜 PS_1 、液晶空间光开关 LCSSL 和偏振组合棱镜 PS_2 组成,经 $\lambda/4$ 波片和梯形反射镜后输入到下一级全混洗交换互连模块。液晶空间光开关的作用是控制入射到其上各像元的光束的偏振方向,或者以 *P* 偏振光输出或者以 *S* 偏振光输出^[7,8]。偏振组合棱镜 PS_1 将入射光束分为 *P* 偏振光和 *S* 偏振光,然后将输入端口 0 和 2, 1 和 3 的不同偏振光分量进行重新组合,经 LCSSL 重新调整偏振态后,输入到偏振组合棱镜 PS_2 ,最后以等效固定规格全混洗交换的形式由指定的输出端口输出,从而完成了一级全混洗交换光互连。例如,输入端口 0, 1, 2, 3 输入的信号分别用字母 *G, H, I, J* 表示,当第一级液晶空间光开关上各像元的状态顺次为“1001”时,(此处 1 表示偏振方向旋转 90° , 0 表示偏振态不变),由该级输出的信号排序依次为 *I, G, H, J*,如图 4(a) 照片所示,而当各像元的状态顺次为“0011”时,该级输出的信号排序则为 *G, I, H, J*,如图 4(b) 照片所示。然后,再进入下一级全混洗交换互连网络,经三级全混洗交换网络和一级全混洗网络后,由输出端口 0', 1', 2', 3' 输出,实现无阻塞双 Omega 网络的光互连,把载有数字信号的光束由各输入端口按照全排列的任意一种互连方式连通到各输出端口输出。

4 结束语

光互连网络可以用来代替电子计算机中的“线互连”实现芯片与芯片间、多处理器间、处理器与存储器间的互连。近几年来,美国贝尔实验室和美国科罗拉多大学已先后研制出世界上第一台数字光学信息处理器和光计算机。本文报导的双 Omega 光互连系统,其输入端口与输出端口的互连方式具有全排列、无阻塞的特点,将促进光计算光互连的研究从演示性实验向实用化迈进。

Table 1 Permutation of 4×4 double Omega interconnection network

(Control states: 0; straight connect; 1; cross connect)

No.	Control states						Outputs				No.	Control states						Outputs			
	A	B	C	D	E	F	0'	1'	2'	3'		A	B	C	D	E	F	0'	1'	2'	3'
1.1	0	0	0	0	0	0					13.1	0	0	1	0	0	0	1	0	2	3
1.2	0	1	0	0	0	1	0	1	2	3	13.2	1	1	0	1	1	1				
1.3	1	0	0	0	1	0					14.1	0	0	1	0	0	1	1	3	2	0
1.4	1	1	0	0	1	1					14.2	1	1	0	1	1	0				
2.1	0	0	0	0	0	1					15.1	0	0	1	1	0	0				
2.2	0	1	0	0	0	0					15.2	0	1	1	1	1	0	1	0	3	2
2.3	1	0	0	0	1	1	0	3	2	1	15.3	1	0	1	1	0	1				
2.4	1	1	0	0	1	0					15.4	1	1	1	1	1	1				
3.1	0	0	0	1	0	0	0	1	3	2	16.1	0	0	1	1	0	1				
3.2	1	1	1	0	1	1					16.2	0	1	1	1	1	1	1	2	3	0
4.1	0	0	0	1	0	1	0	2	3	1	16.3	1	0	1	1	0	0				
4.2	1	1	1	0	1	0					16.4	1	1	1	1	1	0				
5.1	0	1	0	1	0	0	0	3	1	2	17.1	0	1	1	0	0	0	3	0	2	1
5.2	1	0	1	0	1	1					17.2	1	0	0	1	1	1				
6.1	0	1	0	1	0	1	0	2	1	3	18.1	0	1	1	0	0	1	3	1	2	0
6.2	1	0	1	0	1	0					18.2	1	0	0	1	1	0				
7.1	0	0	0	0	1	0					19.1	0	1	1	1	0	0				
7.2	0	1	0	0	1	1	2	1	0	3	19.2	0	0	1	1	1	0	3	0	1	2
7.3	1	0	0	0	0	0					19.3	1	1	1	1	0	1				
7.4	1	1	0	0	0	1					19.4	1	0	1	1	1	1				
8.1	0	0	0	0	1	1					20.1	0	1	1	1	0	1				
8.2	0	1	0	0	1	0					20.2	0	0	1	1	1	1	3	2	1	0
8.3	1	0	0	0	0	1	2	3	0	1	20.3	1	1	1	1	0	0				
8.4	1	1	0	0	0	0					20.4	1	0	1	1	1	0	2	0	1	3
9.1	0	0	0	1	1	0	3	1	0	2	21.1	0	0	1	0	1	0				
9.2	1	1	1	0	0	1					21.2	1	1	0	1	0	1				
10.1	0	0	0	1	1	1	3	2	0	1	22.1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	0
10.2	1	1	1	0	0	0					22.2	1	1	0	1	0	0				
11.1	0	1	0	1	1	0	1	3	0	2	23.1	0	1	1	0	1	0	2	0	3	1
11.2	1	0	1	0	0	1					23.2	1	0	0	1	0	1				
12.1	0	1	0	1	1	1	1	2	0	3	24.1	0	1	1	0	1	1	2	1	3	0
12.2	1	0	1	0	0	0					24.2	1	0	0	1	0	0				

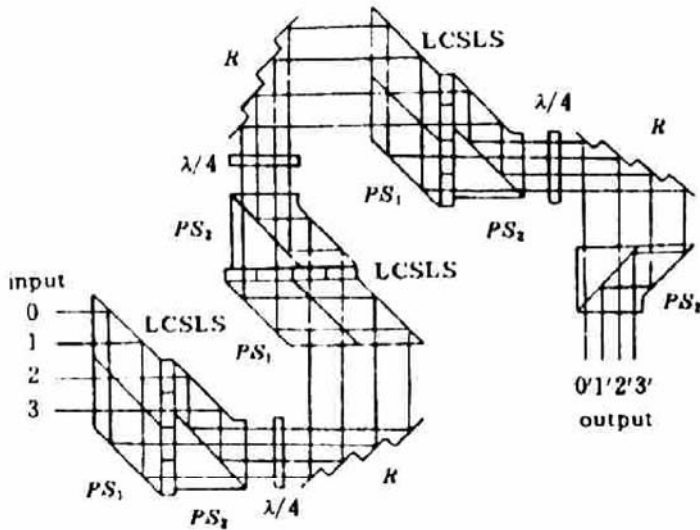


Fig. 3 Light circuit system of 4×4 full permutation non-blocking double Omega network

PS_1, PS_2 , polarization compound beamsplitters,
 $\lambda/4$, $\lambda/4$ waveplate, R , step-reflector,
 LCSLs, liquid crystal spatial light switch,
 R , step-reflector

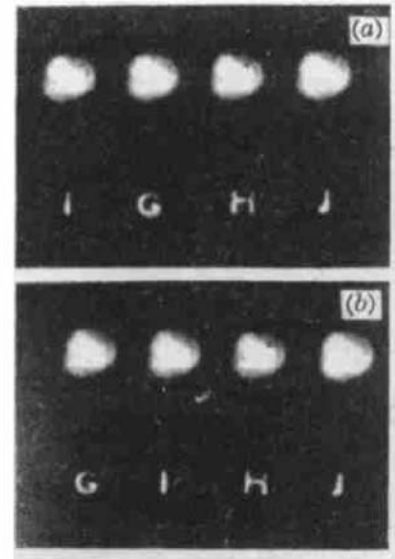


Fig. 4 The photos of two kinds of output permutation

(a) output permutation is I, G, H, J ;
 (b) output permutation is G, I, H, J

参 考 文 献

- 1 Mingcui Cao, Fengguang Luo *et al.*. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(32): 6817
- 2 J. Jahns, M. J. Murdocha. *Appl. Opt.*, 1988, **27**: 3155
- 3 J. Jahns. *Opt. Commun.*, 1990, **76**: 321
- 4 T. Lang, *IEEE Trans. Comput.*, 1976, **C-25**: 496
- 5 D. Nassimi, S. Sahni. *IEEE Trans. Comput.*, 1981, **C-30**(5): 332
- 6 艾 军, 曹明翠, 罗风光, 李洪谱. 光子学报, 待发表
- 7 K. M. Johnson, M. R. Surette *et al.*. *Appl. Opt.*, 1988, **27**: 1727
- 8 罗风光, 曹明翠, 李洪谱, 艾 军. 光子学报, 1992, **21**(5): 119

Optical Implementation Method of Full-permutation Non-blocking Double Omega Optical Interconnection Network in Optical Computing

Luo Fengguang Xi Jun Cao Mingcui Li Hongpu Ai Jun

(National Lab. of Laser Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)

Abstract The shortage of signal Omega optical interconnection network is analyzed, and a optical implementation method of full-permutation non-blocking double Omega interconnection network is proposed in this paper. The light circuit system is composed of Ar^{+3} ion laser, beamsplitter, compound polarization beamsplitter and liquid crystal spatial light switch, parallel transfer for input signal beam array and full-permutation non-blocking optical interconnection are realized.

Key words optical interconnection, double Omega network, non-blocking