

全混洗交换 Omega 互连网络的光学实现

曹明翠 李洪谱 罗风光 梁乐初
(华中理工大学激光研究所, 武汉 430074)

提 要

本文提出了一种由左、右全混洗和空间光开关列阵组成的等效 Omega 网络;成功地设计了一种实现全混洗互连的低损耗,等程的光学组合棱镜。由两块光学组合棱镜和空间光开关列阵组合成的光学系统实现了全混洗交换光学互连网络,该光学互连网络已在实验中得到了证实。

关键词 光学互连网络,光计算。

1 前 言

数学光计算的优势是利用光的高密度,无电磁干扰的特性,消除电子计算机中,由于“线互连”而引入的瓶颈、串话、和时钟歪斜等固有缺点,发展新型的并行、数据流的高速,非冯诺依曼体系结构计算机^[1]。数字光计算机是由能执行并行、数据流算法的光互连网络连接起来的二维光逻辑和光开关列阵,存储体器件等构成的。故光互连网络是数字光计算研究的重要内容之一^[2]。

最近几年以来,全混洗、全交叉、榕树型等自由空间规则光互连网络引起了人们极大的兴趣^[3~5],其主要原因之一是,这些光互连网络不仅可以实现并行、流水的快速运算,对发展全光数字计算的算法和体系结构极为重要,而且它还是发展光电混合巨型并行多处理机,和光通讯光开关系统的重要光互连网络^[6]。另一个主要原因是,此类网络都是多级光互连网络,在互连数很大的情况下,需要的空间-带宽积低,网络中级连器件的扇入和扇出为2,每级都可以用偏振棱镜实现低损耗互连。

全混洗交换 Omega 网络,简称为 Omega 网络,是自由空间规则互连网络的一种。在并行、流水数字运算中,它可以实现各种代数运算,排序运算,快速傅里叶变换,和矩阵运算^[7]。在巨型并行、多处理计算机系统中,可以实现多处理机之间,处理机和存储体之间的互连^[8~10]。Omega 互连网络是由全混洗互连和交换单元列阵组成的光互连网络。而全混洗互连网络已有许多作者进行了详细的研究^[11~14],但光学系统比较复杂,光能量损耗比较大,本文首次提出一种光学实现 Omega 互连网络方法,并在实验中获得了证实。

2 光学全混洗交换 Omega 互连网络

全混洗交换 Omega 互连网络是由全混洗互连和交换单元列阵组成,如图1所示^[15]。

收稿日期:1991年10月17日;收到修改稿日期:1992年2月24日

▪ 本课题由863高技术基金和国防科工委预研基金资助。

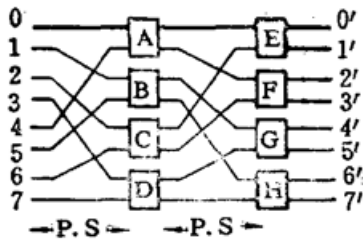


Fig. 1 Perfect shuffle/exchange Omega interconnection network

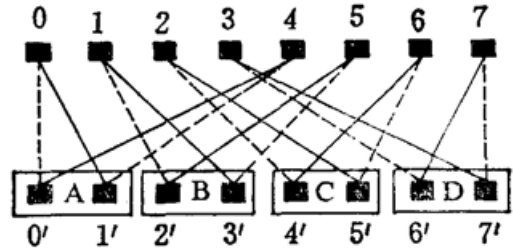


Fig. 2 Equivalent Omega network consists of left, right perfect shuffle interconnects and spatial light switch device

图中 01234567 为输入端, 0'1'2'3'4'5'6'7' 为输出端, PS 为全混洗互连, ABCDEFGH 为交换单元. 由于光学通道自动交换器件的研制十分困难, 而空间光开关列阵器件的性能已接近实用阶段, 本文提出用左、右全混洗互连和空间光开关列阵组成等效的全混洗交换 Omega 互连网络, 如图 2 所示. 图中虚线所示的互连为左全混洗互连, 实线所示的互连为右全混洗互连, ABCD 为空间光开关列阵. 输出端中, 每一个端子都与输入端中两个特定的可交换端子互连, 每一时刻的光通道方式由空间光开关单元控制.

输入输出端子数为偶数 N 的一维列阵, 其左、右全混洗互连数学表示式为

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

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

上式中, K 为输入端子序数 $012 \dots (N-1)$, K' 为输出端子的序数 $0'1'2' \dots (N-1)'$. 当输入和输出的端子数为 8 时, 图 3 为 (1) 式所示的左全混洗互连. 图 4 为 (2) 式所示的右全混洗互连. 为了实现光学全混洗互连, 作者研制了一种组合棱镜, 它是由一块 45° 的直角棱镜 P_1 , 和一块偏振棱镜 BS_1 组成, 如图 5 所示. 如果输入光是 p 偏振光, 序数为 $0, 1, \dots, [(N/2) - 1]$ 的输入光学通道, 经过 45° 直角棱镜 P_1 , 而序数为 $(N/2), \dots, (N-1)$ 的输入光学通道, 经过偏振棱镜 (在偏振棱镜前放置一片 $\lambda/2$ 波片), 将偏振面旋转 90° , p 变成 s 偏振光. 调整直角棱镜 P_1 相对于偏振棱镜 BS_1 的位置, 让序数为 $0, 1, \dots, [(N/2) - 1]$ 的光学通道分别插入序数为 $(N/2) \dots (N-1)$ 的光学通道之前. 为了使所有的光学通道的光程相等, 在偏振棱镜前放置一片折射率较大的光程补偿平面平行玻璃 O_1 . 这一组合棱镜实现了左全混洗互连. 图 6 中的组合棱镜完成图 4 所示的右全混洗互连. 它与图 5 不同

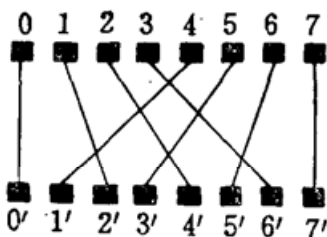


Fig. 3 Left perfect shuffle interconnection network



Fig. 4 Right perfect shuffle interconnection network

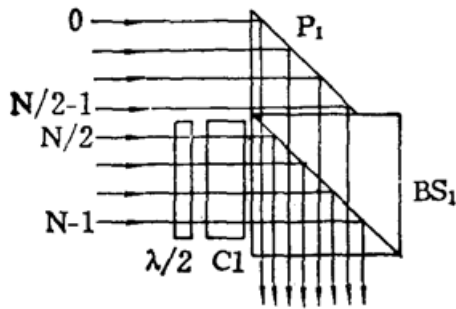


Fig. 5 Optical combination prism of left perfect shuffle interconnection

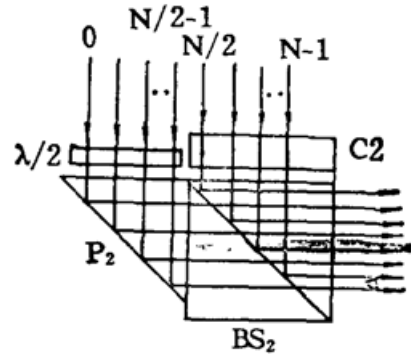


Fig. 6 Optical combination prism of right perfect shuffle interconnection

的是直角棱镜 P_2 与偏振棱镜 BS_2 的相对位置, 要让序数为 $0, 1, \dots, [(N/2) - 1]$ 的光学通道, 分别插入序数为 $(N/2) \dots (N - 1)$ 光学通道之后. 为了和实验中光路相一致, 设入射光为 s 偏振光, 故在直角棱镜 P_2 之前放置一片 $\lambda/2$ 波片.

图 7 是实现图 2 所示的等效 Omega 互连网络的光学系统. 8×1 的激光束列阵通过 $\lambda/4$ 波片进入偏振棱镜 BS_0 , 分成 P 光束列阵和 S 光束列阵. P 光束列阵进入右上角组合棱镜, 完成左全混洗互连, 光路与图 5 相同. 而 S 光束列阵进入左下角组合棱镜, 完成右全混洗互连, 参看图 6. 右下角偏振棱镜 BS_3 将左、右全混洗的输出光束列阵依次合在一起, 从两个方向输出. 设向右的光束列阵为输出端. 其输出端的每一个端子都分别与对应的两个交换的输入端互连. 参看图 2, 输出端序号为 $0'$ 和 $1'$ 的端子, 都与输入端 0 和 4 互连. 输出端 $2'$ 和 $3'$, $4'$ 和 $5'$, $6'$ 和 $7'$ 分别与序号为 1 和 5 , 2 和 6 , 3 和 7 的两个输入端子互连. 而每一个时刻光信息通道的方式, 由空间光开关列阵 M_1 和 M_2 中各单元控制.

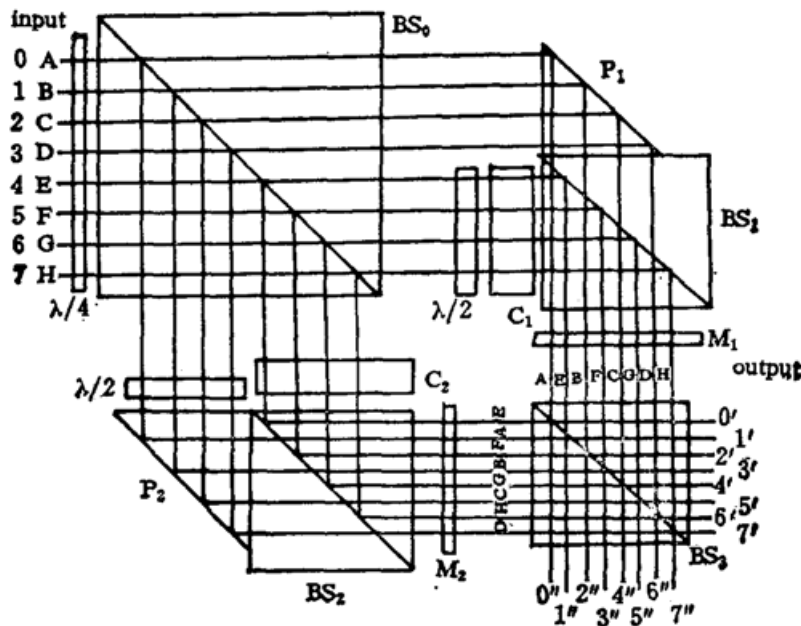


Fig. 7 The optical system of perfect shuffle/exchange Omega interconnection network

3 实验结果

实验中, 输入光束是用平行平面薄膜分束器, 将一束氩离子激光分为 8×2 列阵, 其中下

面一行作为光学通道序数的标志: A, B, C, D, E, F, G, H 分别表示输入端口的序数 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 如图 8 所示. 用向列性液晶作成的空间光开关器 M_1 和 M_2 控制光学通道开或断. 本实验的液晶特性为, 当液晶象元上电压为 0 时, 可将经过的光束偏振态旋转 90° , 能使 p 变成 s , 或使 s 变成 p 偏振光. 象元上的电压为 1 时, 通过该象元光束偏振态不变. 在图 7 所示的光学 Omega 互连网络中, 当 M_2 中象元 E, A, F, B, G, C, H, D 的电压分别为 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 而 M_1 中象元 A, E, B, F, C, G, D, H 的电压分别为 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1 时, 则左下角组合棱镜输出的光学通道的光束列阵通过空间光调制开关列阵 M_2 后, 全变成 S 偏振光, 经过偏振棱镜 BS_3 , 全部光学通道被截住向下. 而右上角组合棱镜光学通道中的光束列阵通过空间光调制开关列阵 M_1 后, 全部变成 s 偏振光, 进入偏振棱镜 BS_3 后, 全部光学通道向右, 从输出端输出. Omega 光学互连网络输出列阵为 A, E, B, F, C, G, D, H , 如图 9 所示, 实现了左全混洗互连. 当 M_2 中的象元之电压为 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 而 M_1 中的象元之电压为 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0 时, 则右上角组合棱镜输出的光学通道被截住向下, 而左下角组合棱镜输出的光学通道被打开, 从输出端输出. 则光学 Omega 互连网络输出的列阵为 E, A, F, B, G, C, H, D , 如图 10 所示, 实现了右全混洗互连. 如果输出端中 $0'$ 和 $1'$ 端子, $4'$ 和 $5'$ 端子某个时刻分别连接输入端子 0 和 4, 2 和 6, 而另一个时刻分别连接 4 和 0, 6 和 2, 这就要在执行运算之前某一时刻, 控制改变空间光调制器 M_1 中象元 A, E, C, G , 和 M_2 中象元 E, A, G, C 的电压. 如 M_1 各象元电压分别为 01100110, 而 M_2 各象元电压分别为 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1 时, 则光学 Omega 互连网络输出光束列阵的序数为 A, E, F, B, C, G, H, D , 如图 11 所示. 与图 10 相比较, 互连网络输出端子 $0'$ 和 $1'$, $4'$ 和 $5'$, 通过控制 M_1 和 M_2 象元上的电压, 对输入端子 0 和 4, 2 和 6 的互连是可以交换的. 其它的输出端子与图 2 所示的两两对应的输入端子都具有交换功能.

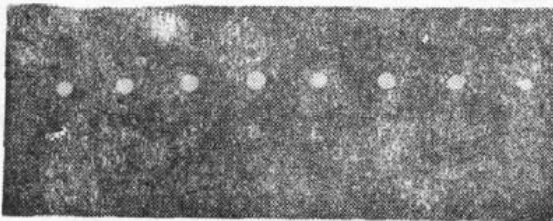


Fig. 8 The order of input beam array:
 A, B, C, D, E, F, G, H

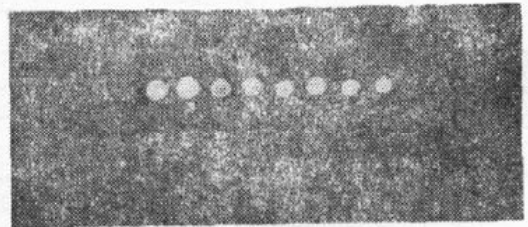


Fig. 9 The beam array of left perfect shuffle:
 A, E, B, F, C, G, D, H



Fig. 10 The beam array of right perfect shuffle:
 E, A, F, B, G, C, H, D



Fig. 11 The exchange beam array of perfect shuffle:
 A, E, F, B, C, G, H, D

4 讨论和结论

全混洗交换 Omega 互连网络, 在并行、流水数字光运算系统, 光电混合巨型并行、多处

理计算机系统, 和光通讯开关网络系统中, 是一种十分重要的多级互连网络. 本文首先提出了一种等效的 Omega 网络系统, 并研制了二块全混洗互连组合棱镜和液晶空间光开关列阵实现了光学 Omega 互连网络. 该互连网络具有简单、等程、低损耗、和模块结构等特性. 系统具有两个输出端口, 其一作为输出结果, 另一个作为反馈信息, 特别适用于并行、流水数字光运算系统. 它将大大简化系统中硬件、使运算系统更为简单. 该互连网络是光学实现 Omega 网络的原理性的实验. 光互连网络的密度和传递时间, 主要决定于正在研制和发展的微米到几十微米量级的面激光列阵^[16]、微型透镜列阵^[17]、微防楞反射镜^[18], 等微光学器件, 以及高速空间光开关列阵和光双稳 S-SEED 逻辑开关列阵级连器件^[19]. 上述器件的发展, 为发展高密度并行光束列阵, 和适用于多功能的模块式互连网络器件创造了很好的条件. 在本文提出的网络结构中, 其光源可用高密度并行光束列阵替代, 液晶空间光开关可用高速的铁电液晶或其他空间光开关器件替代, 这种简单、等程、低损耗的互连网络可研制成一种十分实用的多功能、可编程, 模块式的微型互连网络器件.

参 考 文 献

- [1] A. Huang, Parallel Algorithms for Optical Digital Computers. New York: Tenth International Optical Computing, *IEEE Computer Society*, 1983: 13~17
- [2] M. E. Prise, N. Streibl, M. M. Downs, Optical Considerations in the Design of a Digital Computer. *Opt. Quantum Electron.*, 1988, **20** (1): 49~77
- [3] K. H. Brenner, A. Huang, N. Streibl, Digital Optical Computing with Symbolic Substitution. *Appl. Opt.*, 1986, **25** (18): 3054~3060
- [4] M. J. Murdocea, A. Huang, J. Jahns, *et al.*, Optical design of programmable logic arrays. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (9): 1651~1660
- [5] J. Jahns, M. J. Murdocea, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (15): 3155~3160
- [6] M. Murdocea, T. J. Cloonan, Optical design of a digital switch. *Appl. Opt.*, 1989, **28** (13): 2505~2517
- [7] T. Lang, H. S. Stone, A Shuffle-Exchange Network with Simplified Control. *IEEE Trans. Comput.*, 1976, **C-25** (1): 55~65
- [8] T. Lang, Interconnections Between Processors and Memory Modules Using the Shuffle-Exchange Network. *IEEE Trans. Comput.*, 1976, **C-25** (5): 496~503
- [9] D. H. Lawrie, Access and Alignment of Data in an Array Processor. *IEEE Trans. Comput.*, 1975, **C-24** (12): 1145~1155
- [10] C. Wu, T. Feng, The Universality of the Shuffle-Exchange Network. *IEEE Trans. Comput.*, 1981, **C-30** (5): 324~332
- [11] M. T. Tsao, H. P. Li, X. A. Liu, Optical hardware for the perfect shuffle interconnection. *Optical Computing and Processing*, 1991, **1** (1): 23~27
- [12] J. W. Goodman, J. F. Leonberger, S. Y. Kung *et al.*, Optical interconnections for VLSI system. *Proc. IEEE*, 1984, **72**: 850
- [13] A. W. Lohmann, S. Stork, G. Syucke, Optical perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1986, **25** (9): 1530
- [14] K. H. Brenner, A. Huang, Optical implementations of perfect shuffle interconnection. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (1): 135~137
- [15] C. Wu, T. Feng, On a Class of Multistage Interconnection Networks. *IEEE Trans. Comput.*, 1980, **C-29** (8): 694~702
- [16] Y. H. Lee, J. L. Jewell, A. Scherer *et al.*, Room-temperature continuous wave vertical cavity single quantum well-microlaser diodes. *Electron. Lett.*, 1989, **25** (20): 1377~1378
- [17] D. Parabowski, L. G. Mann, R. H. Bellman *et al.*, Photothermal technique generate lens arrays. *Laser Focus World*, 1989, **25** (11): 139~143
- [18] A. W. Lohman, F. Sauer, Staircase telescope arrays for local beam compression in one dimension. *Appl. Opt.*, 1989, **28** (18): 3830

- [19] D. A. B. Miller, J. E. Henry, A. C. Gossard *et al.*, Integrated quantum well self electro-optic effect device: 2×2 array of optically bistable switches. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**: 821~823

Optical implement of perfect shuffle/exchange omega interconnection network

CAO MINGGUI LI HONGPU LUO FENGGUANG LIANG LECHU

(*Laser Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

(Received 17 October 1991, revised 24 February 1993)

Abstract

The perfect shuffle/exchange Omega interconnection network is a free-space regular multistage interconnection network. It is one of great important networks to develop novel architectures of digital optical computer in parallel and data flow and optoelectronic hybrid computer in parallel multiprocessor system. This paper presents a equivalent omega network which consists of left and right perfect shuffle interconnection as well as a spatial light switch device. A optical combination prism with the properties of low loss, and equal path length of all optical channels to implement perfect shuffle interconnection has be designed. The optical system of perfect shuffle/exchange Omega network composed of two optical combination prisms and a spatial light switch device is realized in our experiment.

Key Words optical interconnection network, optical computing.