

数字光开关网络中四功能交换开关光学 Omega 网络*

曹明翠 罗风光 李洪谱 艾军 徐军
(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉 430074)

提 要

本文提出了一种用于数字光开关网络中,四功能交换开关光学 Omega 网络. 文中详细地阐述了用液晶空间光调制方法实现光学四功能交换开关,和 Omega 互连网络的原理,并给出了光学系统和实验结果.

关键词 光互连, 光交换开关, 数字光开关网络.

1 引 言

最近几年来,人们对自由空间规则互连网络,如全交叉、全混洗、榕树型、和全混洗交换 Omega 互连网络,产生了极大的兴趣^[1~5],这有两个方面原因,其一是这些网络与列阵式逻辑器件相结合,可以完成各种光电混合型并行、流水数字运算^[6]. 其二是这些规则光学互连网络可以组成光学数字开关网络通讯系统. 这种光学数字开关网络具有以下一些特点:(1)互连密度高,互连数大;(2)便于用光学方法实现多级互连网络,级连损耗少;(3)容错能力强;(4)便于模块化,灵活性大. 由于以上种种原因,近几年以来,自由空间微光学互连模块,和有关器件得到了高速发展. 用自由空间微光学互连模块,替代电子计算机中各层次线互连,发展光通讯中自由空间光子交换网络,就成为整个信息领域中,极为关注的研究课题.

数字光计算系统中,多个处理器和多个存储体之间的互连网络,和光通讯中自由空间光子交换网络,都是用多级规则互连网络组成的系统^[7]. 其中全混洗交换 Omega 网络组成的数字开关网络系统是十分重要的系统之一. 如果光学数字开关网络中,交换开关具有直通、交换、上播、下播四种功能(至今未见讨论)的话,则光学多级 Omega 网络系统不但可以实现无路径冲突的通讯,而且还可以实现任何输入端同时与全部输出端通讯的目的.

本文提出一种具有四功能交换开关光学 Omega 网络,它是由液晶开关和特殊偏振棱镜所组成的光学系统.

2 全混洗交换 Omega 网络和光学四功能交换开关原理

全混洗交换 Omega 互连网络是一种自由空间多级互连网络. 它是由全混洗互连和交换开

收稿日期:1992年10月13日;收到修改稿日期:1993年1月25日

* 本课题得到国防科工委科学基金和国家自然科学基金资助

关列阵组成的网络. 互连方式可以采用左全混洗,也可以采用右全混洗互连. 如果输入和输出端子数为 $N = 2^n$, 左全混洗互连函数为^[8]:

$$K' = [2K + (2K/N)] \text{ Mod } N \quad (1)$$

$$(K = 0, 1, 2, \dots, N - 1)$$

右全混洗互连函数为:

$$K' = [2K + 1 - (2K/N)] \text{ Mod } N \quad (2)$$

$$(K = 0, 1, 2, \dots, N - 1)$$

式中 K 为输入端序号, K' 为输出端序号. $N = 8$ 时, Omega 网络如图 1 所示. 如果引入输入输出矢量概念, 全混洗互连函数就被定义为全混洗交换矩阵. 左全混洗互连矩阵 P_L 和右全混洗互连矩阵 P_R 的矩阵元可分别表示为:

$$P_L(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } j = [2i + (2i/N)] \text{ Mod } N \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \begin{matrix} i = 0, 1, \dots, N - 1 \\ j = 0, 1, \dots, N - 1 \end{matrix} \quad (3)$$

$$P_R(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{当 } j = [2i + 1 - (2i/N)] \text{ Mod } N \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \begin{matrix} i = 0, 1, \dots, N - 1 \\ j = 0, 1, \dots, N - 1 \end{matrix} \quad (4)$$

当 $N = 8$ 时, P_L 和 P_R 的矩阵表示式为:

$$P_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

多级 Omega 网络系统的级数为 m , 它与输入端子数 N 的关系为:

$$m = \log_2 N \quad (6)$$

Omega 网络中交换开关功能, 根据网络的不同的应用, 其要求也不相同. 如果网络用于并行运算系统中, 一般要求交换开关列阵仅具有直通和交换两种功能. 若网络互连方式为左全混洗时, 当交换开关列阵处于直通状态时, 网络输出和输入按左全混洗方式互连. 而交换开关列阵处于交换状态时, 则网络输出和输入则按右全混洗方式互连. 此时, 多级 Omega 网络系统可直观表示为:

$$OM_{(m)} = [P_L \oplus P_R]_{m-1} [P_L \oplus P_R]_{m-2} \dots [P_L \oplus P_R]_0 \quad (7)$$

上式中符号 \oplus 表示“或”, 每一节点仅为 P_L 和 P_R 中的一种互连方式, 哪一种方式则由交换开关状态决定. 若 Omega 互连网络用于并行数字开关网络系统, 则要求网络中的每一个交换开关 A, B, \dots, K, L 都独立地具有直通、交换、下播、和上播四种功能, 如图 2 所示. 图中 (a) 为直通, (b) 为交换, (c) 为下播, (d) 为上播状态. 用矩阵方式表示为:

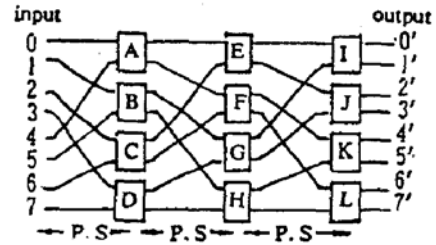


Fig. 1 The Omega interconnecting network ($N = 8$)

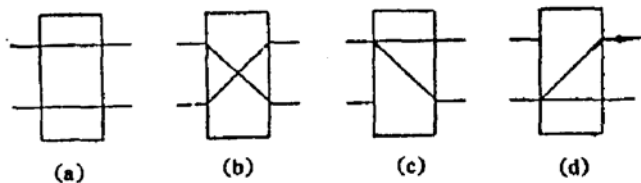


Fig. 2 The exchange-switch with four functions

$$\begin{aligned}
 \text{直通: } \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} & \text{交换: } \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \\
 \text{下播: } \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} & \text{上播: } \begin{bmatrix} a' \\ b' \end{bmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{8}$$

用 Omega 网络组成数字开关网络系统,只要控制网络中的交换开关状态,则输入端每一个信息不但可以同时无路径冲突地传输到输出端,而且还能够让任何输入端,同时与全部输出端通讯.由于 Omega 互连网络系统中,每一级网络结构是完全相同的.故每一级光学系统也完全相同,很便于实现集成模块化,特别适合于光学并行数字开关网络系统.

3 光学 Omega 网络中光学四功能交换开关

这里提出一种由特殊的偏光棱镜和液晶板组成的光学系统,如图 3 所示.该光学系统可以实现直通和交换两功能 Omega 网络,并已在文献[3]中发表.本文进一步论述四功能交换开关的光学实现.图中偏光棱镜 I 将一对输入数据通道,如 0 和 4 通道,先在偏振膜 AB 上正交交于一起,然后再分成两路,偏振光 0, 和 4, 一起通过液晶板象元 C_0 , 偏振光 0, 和 4, 一起通过液晶板象元 C_1 , 再一次由偏光棱镜 II 重新组合,从输出端 $0'$ 和 $1'$ 输出.放置在偏光棱镜 I 和 II 之间的液晶板各象元,通过外加电压,可控制相应的光束偏振状态.实验中采用向列型液晶,设外加电压断开时,为 0 状态,电压接通时,为 1 状态,则液晶象元为 0 状态时,能使通过光束的偏振态旋转 90° ;当象元为 1 状态时,通过的光束偏振态保持不变.若输入端 0 和 4, 用字符 A 和 E 表示,如图 4 所示.图中可知,光学数据通道在液晶各象元电压的控制下,具有四种交换开关状态.当象元 C_0 和 C_1 分别处于 1 和 0 状态时,输出端 $0'$ 和 $1'$ 分别与输入端 0 和 4 相连,表示为 A 和 E,此时开关处于直通状态;当象元 C_0 和 C_1 分别处于 0 和 1 状态时,输出端 $0'$ 和 $1'$ 分别与输入端 4 和 0 相通,表示为 E 和 A,此时开关为交换状态.同理,象元 C_0 和 C_1 都为 1 状态时,交换开关为下播状态;而象元 C_0 和 C_1 都为 0 状态时,则交换开关为上播状态.分别如图 4 中 (a), (b), (c), (d) 所示.

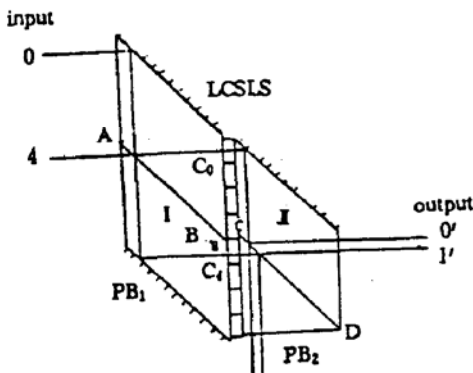


Fig. 3 The principle diagram of optical Omega network for the optical exchange-switch with four functions

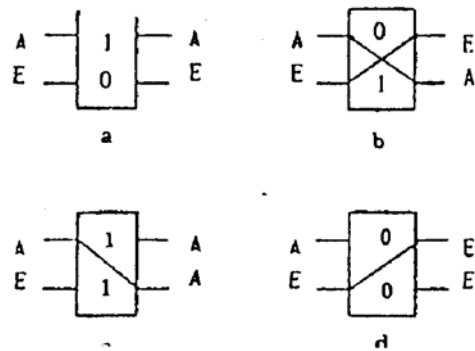


Fig. 4 The four states of the exchange-switch corresponding to the different states of liquid crystal pixels. (a) the straight-through connection, (b) the exchange connection (c) the down-spread connection, (d) the up-spread connection

实验中向列型液晶板制作成 8×4 象元.用平面平行薄膜分束器,将一束氩离子激光束分为 8×2 光束列阵.液晶板上 8×2 象元与光束列阵一一相互对应.为了演示四种功能的交换开关状态,仅用 8×1 的光束列阵.分别对应液晶象元 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$.图 5 是一组

实验结果. 在输出光束列阵 8×1 中 0 和 4 插入字符 *A* 和 *E* 如图 5(a)所示; 象元 C_0 和 C_4 分别处于 1 和 0 状态时, 输出为 *AE* 如图 5(b)所示; 象元 C_0 和 C_4 分别于 0 和 1 状态时, 输出为 *EA* 如图 5(c)所示; 象元都为 1 时, 输出为 *AA* 如图 5(d)所示; 象元都为 0 时, 输出为 *EE*, 如图 5(e)所示.

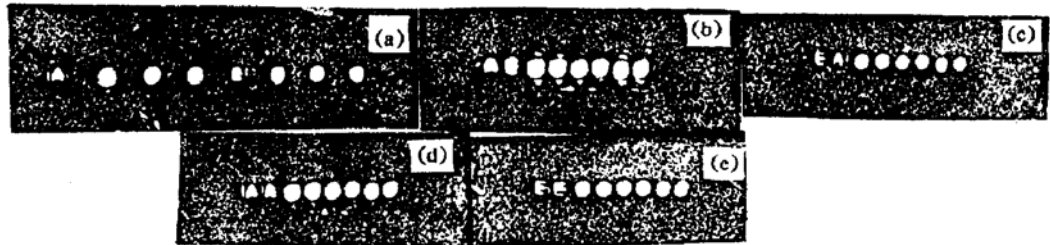


Fig. 5 The experiment results of the optical exchange-switch with four functions. (a) the input light beam permutation, (b) the straight-through connection, (c) the exchange connection, (d) the down-spread connection, (e) the up-spread connection

光学四功能 Omega 互连网络原理图如图 6 所示. 根据网络要求, $N = 8$ 的网络中有四组交换开关, 它们是 0 和 4, 1 和 5, 2 和 6, 3 和 7, 分别受 C_0 和 C_4 , C_1 和 C_5 , C_2 和 C_6 , C_3 和 C_7 控制. 实验结果在图 7 中给出. 输入列阵 8×2 , 第二列用字符 *A, B, C, D, E, F, G, H* 标志, 如图 7(a)所示, 光束之间间距为 4 mm, 输出光束之间的间距为 2 mm; 图 7(b)为象元 C_0, C_1, C_2, C_3 为 1, 而 C_4, C_5, C_6, C_7 处于 0 状态时, 即四组交换开关都处于直通状态, 输出端字符排列为 *A, E, B, F, C, G, D, H*. 这就是左全混洗互连方式; 当象元 C_0, C_1, C_2, C_3 为 0 状态, 而 C_4, C_5, C_6, C_7 为 1 状态, 即四组交换开关都处于交换状态. 输出端字符排列为 *E, A, F, B, G, C, H, D*, 如图 7(c)所示. 这就是右全混洗互连方式; 当象元 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ 全部为 1 状态, 交换开关都处于下播状态时, 字符排列为 *A, A, B, B, C, C, D, D*, 如图 7(d)所示; 当象元 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ 全部为 0 状态, 交换开关都处于上播状态时, 输出端字符排列为 *E, E, F, F, G, G, H, H*, 如图 7(e)所示. 可见, 通过控制液晶各象元状态该光学系统是一种四功能交换开关的光学 Omega 互连网络.

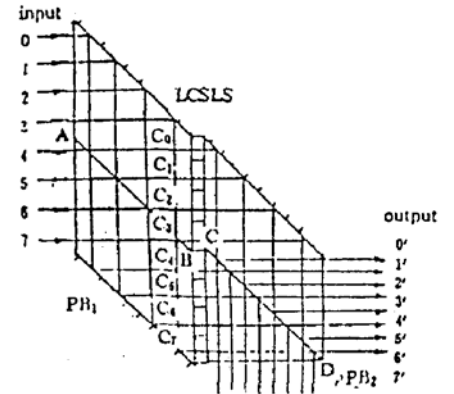


Fig. 6 The optical Omega interconnection network of the optical exchange-switch arrays with four functions

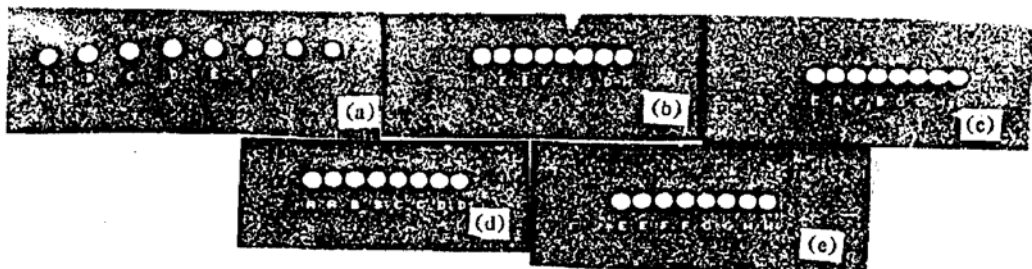


Fig. 7 The experiment results of optical Omega network with optical exchange-switch of four functions. (a) the input light beam permutation, (b) the left perfect shuffle connection, (c) right perfect shuffle connection, (d) the down-spread connection, (e) the up-spread connection

4 结 论

光学全混洗交换 Omega 互连网络是一种应用十分广泛的互连网络. 它应用于并行流水算法中, 可完成多项式代数运算, 排序运算、快速傅里叶变换, 和矩阵运算. 可应用于光学数字开关通讯系统, 组成自由空间光子交换网络. 该网络不但可实现无路径阻塞的网络, 而且具有很强的容错能力. 仅单级 8 个输入端和输出端的互连方式, 若每个交换开关都独立具有四种功能, 则可实现 256 种互连方式.

本文提出的四功能光学交换开关 Omega 网络很容易研制成微光学互连模块, 液晶材料若选用铁电液晶材料, 开关速度可提高到亚微秒量级. 根据这种基础性的研究, 很容易研制成较实用的光学互连器件.

参 考 文 献

- [1] J. Jahns, M. J. Murdocca, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1988, 27(15): 3155~3160
- [2] Cao Mingcui, Li Hongpu, Liu Xiaan *et al.*, Optical hardware for the perfect shuffle interconnection. *Optical Computing and Processing*, 1991, 1(1): 23~27
- [3] Mingcui Cao, Fengguang Luo, Hongpu Li *et al.*, Optical perfect shuffle-exchange interconnect network using liquid crystal light switch. *Appl. Opt.*, 1992, 31: 6817~6819
- [4] 曹明翠, 李洪谱, 罗风光等, 全混洗交换 Omega 互连网络的光学实现. *光学学报*, 1992, 12(12): 1129~1133
- [5] K. H. Bremer, A. Huang, Optical implementations of perfect-shuffle interconnection. *Appl. Opt.*, 1988, 27(1): 135~137
- [6] M. J. Murdocca, A. Huang, J. Jahns *et al.*, Optical design of programmable logic arrays. *Appl. Opt.*, 1988, 27(9): 1650~1660
- [7] M. Murdocca, T. J. Cloonan, Optical design of a digital switch. *Appl. Opt.*, 1989, 28(13): 2505~2517
- [8] G. Eichmann, Yao Li, Compact optical generalized perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1987, 26(7): 1167~1169

An optical Omega network with optical exchange-switch of four functions for digital optical switch network

CAO Mingcui Luo Fengguang LI Hongpu AI Jun XU Jun

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

(Received 13 October 1992; revised 25 January 1993)

Abstract

An optical Omega network with optical exchange-switch of four functions for the digital optical switch network is presented. The principle of the optical implementation of exchange-switch with four functions and Omega network by liquid crystal spatial light modulator are described in detail. The optical system and experiment results are given.

Key words optical interconnection, optical exchange-switch, digital switch network.