

# CC 榕树网络及其光学实现\*

彭海峰 刘立人 梁 丰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 利用偏振分光棱镜及一维位相型空间光调制器, 作者成功地实现了光学 CC 榕树网络, 并给出了任意输入输出对间的连接控制方式。它具有能量损耗低, 串扰小, 结构紧凑及高通道密度等优点。

**关键词** CC 榕树网络, 连接控制, 循环右移。

## 1 引 言

互连网络是多处理机系统、电讯系统及其它并行处理结构重要组成部分, 对整机系统的各项性能有着重大影响。考虑到电子互连所存在的固有缺陷(瓶颈效应, 交叉串扰等)以及光学互连所具有的高度并行性、串扰小、高带宽等优点, 近年来, 人们致力于发展各种光学互连网络以代替传统的电子互连网络, 成功地实现并演示了多种光学互连网络(包括交叉网络<sup>[1]</sup>, 洗牌网络<sup>[2]</sup>), 尤其是光学多级互连网络(如 Omega 网络<sup>[3]</sup>, Gamma 网络<sup>[4]</sup>, Crossover 网络<sup>[5]</sup>等), 因它们具有效率高, 性能价格比合理而受到人们的普遍重视。

榕树网络是一类相当通用互连网络的总称<sup>[6]</sup>, 在多处理机系统的划分及资源分配方面有重要应用。对于  $L$  级榕树网络, 它的任意输入输出对间仅存在一条连接路径, 且其对应长度为  $L$ 。由于网络结构的不同, 一般有两类榕树网络: SW 榕树网络及 CC 榕树网络。迄今已证明 SW 榕树网络是等价网络并给出了 SW 榕树网络的光学实现<sup>[7~9]</sup>, CC 榕树网络属于非等价网络, 并具有模块化结构。

本文利用偏振分光棱镜及一维位相型空间光调制器, 成功地实现了光学 CC 榕树网络, 并给出了任意输入输出对间的连接控制方式。它具有能量损耗低, 串扰小, 结构紧凑, 体积小及高通道密度等优点。

## 2 CC 榕树网络

仅考虑矩形 CC 榕树网络, 一般以  $(f, L)$  表示, 其中  $f$  代表各开关元件的扇入扇出数,  $L$  为级数, 它含有  $L$  级路径级及  $L + 1$  级结节点, 且各结节点中有  $N = f^L$  个结点(开始)。设从输入到输出间的各路径级及结点分别标为  $L - 1, L - 2, \dots, 1, 0$  及  $L, L - 1, \dots, 1, 0$ 。于是第

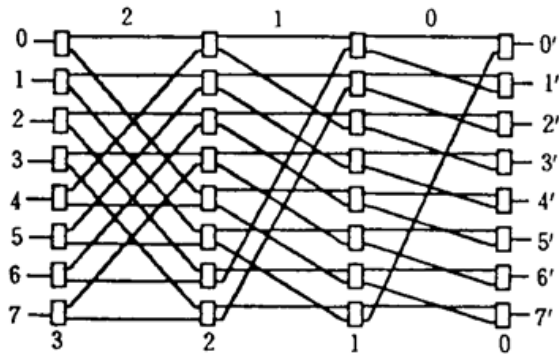
\* 国家自然科学基金委员会及高技术办公室资助项目。

收稿日期: 1995年1月6日; 收到修改稿日期: 1995年6月12日

(k + 1) 结节点级中的第 i 结节点与第 k 结节点级中的第 j 结节点间的连接可表示为

$$j = (i + mf^k) \bmod f^L, \quad m = 0, 1, \dots, f - 1, \quad (1)$$

$$0 \leq i, \quad j \leq N, \quad 0 \leq k \leq L - 1$$



对于光学实现,  $f = 2$ , 于是第  $k + 1$  及第  $k$  结节点级间存在两种连接方式

$$\Pi_1^{(k)}: \quad j = i, \quad (2)$$

$$\Pi_2^{(k)}: \quad j = (i + 2^k) \bmod 2^L, \quad (3)$$

方程(2), (3)分别对应于直通及循环右移连接方式, 且第  $i$  路径级中对应的循环右移长度为  $2^i$ 。图 1 为(2, 3) CC 榕树网络的流程图。

Fig. 1 Flow diagram of (2, 3) CC-banyan network

### 3 光学实现及路径控制

光学 CC 榕树网络的每一级(第  $i$  级含第  $i + 1$  级结节点级及第  $i$  级路径级)应能实现方程(2), (3)所表示的两种连接方式, 且可通过一开关选择所需的连接方式。为方便起见, 以(2, 3)CC 榕树网络的光学实现为例进行说明。

图 2(a)为(2, 3)光学 CC 榕树网络第 2 级结构示意图, 由位相型空间光调制器 PSLM, 偏振分光棱镜 PBS1~PBS3, 半波片 HWP1~HWP3 及直角反射棱镜 RP 构成。在外加电压作用下, PSLM 的每一像素处于激活态, 可产生  $\pi$  位相差; 反之, 无外加电压作用时, PSLM 的每一像素处于非激活态, 不产生位相差。

设输入光的偏振方向为 s(平行纸面), PBS1~PBS3 让 p 偏振光(垂直 s 方向)通过, 而反射 s 偏振光。于是对于任意输入, 当其对应的 PSLM 的像素处于非激活态时(无外加电压), 它将被 PBS1 反射, 然后经 RP, PBS3 至输出, 对应于方程(2)所表示的直通连接方式; 反之, 若其对应的 PSLM 的像素处于激活态时, 它将由 PBS1 进入 PBS2, 再经 PBS3 至输出, 对应于方程(3)表示的循环右移连接方式。因此可通过控制 PSLM 上像素的不同状态达到控制不同连接方式的目的。

对图 2(a)稍作改变, 以图 2(b), 图 2(c)中所示的 HWP2 及 PBS3 分别代替图 2(a)中对应的 HWP2 及 PBS3 即可实现网络的第 1 级及第 0 级, 各级结构的不同仅在于各级中 PBS3 的反射面位置及半波片 HWP2 的长度不同, 以分别获得不同的循环右移长度(第  $i$  级为  $2^i$ )。

第 2、第 1 及第 0 级的串联组合即可构成(2, 3)CC 榕树网络。类似地可实现光学(2, L) CC 榕树网络。第  $L - 1$  级结构与上述的图 2(a)相同, 而第  $i$  级结构与第  $L - 1$  级结构的不同

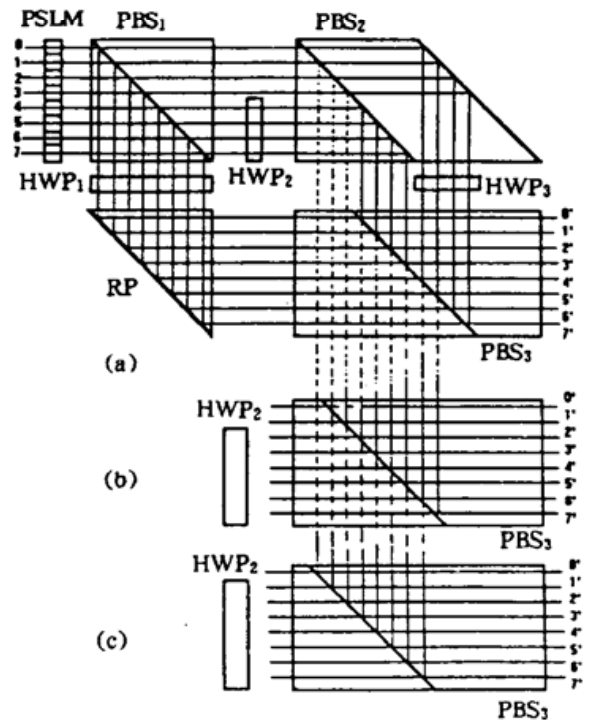


Fig. 2 Optical setup for (2, 3) CC-banyan network  
(a) is the optical implementation for routing stage 2,  
(b) and (c) are the PBS3s and HWP2s for the first and the zeroth stage respectively

也仅在于第  $i$  级中 PBS3 的反射面位置及半波片 HWP2 的长度不同。设第  $L-1$  级中 HWP2 长为  $t$ , 且其对应的 PBS3 中反射面的位置为原点, 则第  $i$  级中 HWP2 长为  $\{t + (2^{L-1} - 2^i)\Delta\}$ , 且其对应的 PBS3 位置相对于原点左移  $(2^{L-1} - 2^i)\Delta$  ( $\Delta$  为通道间隔)。

根据  $(2, L)$  CC 榕树网络所具有的特性, 网络任意输入输出对  $(S, D)$  间的连接可通过一  $L$  位的二进制数  $M$  来实现,  $M = m_{L-1}m_{L-2}\cdots m_0 = (D - S) \bmod 2^L$ ,  $m_i = 1, 0$  分别表示该连接的第  $i$  级为循环右移连接方式及直通连接方式。光学实现中, 即是要利用  $M$  值来确定  $(S, D)$  连接路径上各开关(连接路径所通过的各级中对应的 PSLM 像素)的状态。值得注意的是, 任一级中对应于循环右移连接方式的输出为 s 偏振光, 而直通连接方式的输出为 p 偏振光。

设第  $i$  级中 PSLM 的状态以矢量  $\text{PSLM}_i = (e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^N)$  ( $N = 2^L$ ) 表示,  $e_i^j = 1, 0$  分别表示对应像素处于激活态及非激活态。各级对应输入输出的偏振态以矢量  $IP_i = (IP_i^1, IP_i^2, \dots, IP_i^N)$  及  $OP_i = (OP_i^1, OP_i^2, \dots, OP_i^N)$  表示,  $IP_i^j (OP_i^j) = 1, 0$  分别表示对应光束为 p 偏振光及 s 偏振光。很明显,  $IP_{i-1} = OP_i$ 。在输入为 s 偏振光时,  $IP_{L-1} = (0, 0, \dots, 0)$ 。对于任意输入输出对  $(S, D)$  间的连接路径, 据网络定义和对应的  $M$  值, 它的通过的第  $i$  级中 PSLM 上对应像素的位置,  $c(i)$ , 可计算如下:

$$c(i) = (S + \sum_{k=i+1}^{L-1} m_k 2^k) \bmod 2^L, \quad 0 \leq i \leq L-2, \quad (4)$$

且它所对应的状态可由下述方程获得:

$$e_i^{c(i)} = m_i \oplus IP_i^{c(i)}, \\ IP_{i-1}^{c(i-1)} = OP_i^{c(i-1)} = \overline{e_i^{c(i)} \oplus IP_i^{c(i)}} = \overline{m_i}.$$

式中  $\oplus$  代表逻辑异或操作。

CC 榕树网络是阻塞网络, 但对于其中任意无冲突交换, 均可利用上述方法获得它们所对应的连接控制方式。作为例子, 表 1 示出了无冲突交换

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 5 & 4 & 7 & 6 & 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

所对应的各级中 PSLM 各像素状态。

Table 1. Routing control for conflict free permutation  $\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 5 & 4 & 7 & 6 & 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}$  of  $(2, 3)$  CC-banyan network

	$e_i^0$	$e_i^1$	$e_i^2$	$e_i^3$	$e_i^4$	$e_i^5$	$e_i^6$	$e_i^7$
routing stage 2 ( $i = 2$ )	0	1	0	1	0	1	0	1
routing stage 1 ( $i = 1$ )	0	0	0	0	0	0	0	0
routing stage 0 ( $i = 0$ )	0	1	0	1	0	1	0	1

## 4 实验结果及讨论

本文以所述的  $(2, 3)$  CC 榕树网络进行实验研究。设各级中所有连接均为循环右移连接, 以波长为  $0.6328 \mu\text{m}$  的平行光照明, 以模板作为输入, 且以半波片代替 PSLM 上对应的激活像素, 图 3(a) 为输入, 第一行代表一个通道, 图 3(b), (c), (d) 分别为第 2, 第 1 及第 0 级的对应输出结果。在上述光学 CC 榕树网络中, 由于采用了偏振分光棱镜及位相型空间光调制器, 因而各通道对应的能量损耗都很低, 且通道间的串扰小, 主要由空间光调制器的缺陷及不均匀性决定, 同时, 若以微激光阵列作为输入光源<sup>[10]</sup>, 则通道间隔可以很小, 通道密度高,

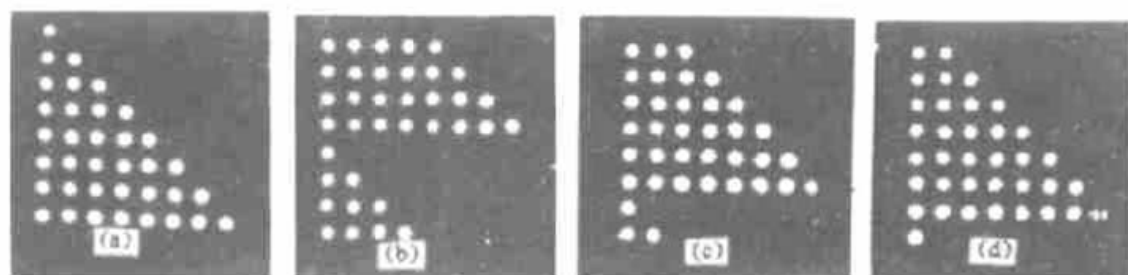


Fig. 3 Experimental results of (2, 3) CC-banyan network. All connections are set to be cyclic right shifting.

(a) is the input, (b), (c), (d) are the output results after passing through the second, first and zeroth stages respectively

更有利于实际应用。

**结 论** 利用偏振分光棱镜及位相型空间光调制器,成功地实现了光学 CC 榕树网络,并给出了任意输入输出对 ( $S, D$ ) 间的路径连接控制方式。各连接级结构相似,它们之间差异仅在于各级中偏振分光棱镜 PBS3 的反射面位置及半波片长度的不同,以获得不同的循环右移长度。它具有如下优点:能量损耗低,串扰小,结构紧凑及通道密度高。

### 参 考 文 献

- [1] W. Stork, Optical crossbar. *Optik*, 1987, 78(4): 173~175
- [2] A. W. Lohmann, W. Stork, G. Stucke, Optical perfect shuffle. *Appl. Opt.*, 1986, 25(10): 1530~1531
- [3] L. Cheng, A. A. Sawchuk, Three dimensional omega networks for optical implementation. *Appl. Opt.*, 1992, 31(26): 5468~5479
- [4] Y. Wu, L. Liu, Z. Wang, Modified gamma network and its optical implementation. *Appl. Opt.*, 1993, 32(35): 7194~7199
- [5] J. Jahns, M. J. Murdoch, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1988, 27(15): 3155~3160
- [6] L. Goke, G. Lipovski, Banyan networks for partitioning multiprocessor systems. *Proc. 1st Ann. Comput. Architecture Conf.*, 1973: 21~28
- [7] V. Cherkassky, M. Malek, Partitioning and permuting properties of CC-banyan networks. *IEEE Trans. Comput.*, 1989, 38(2): 274~278
- [8] R. S. Roberts, S. C. Kothari, On computing the combinatorial power of SW-banyan networks. *IEEE Trans. Comput.*, 1989, 38(5): 761~765
- [9] J. Jahns, Optical implementation of the banyan network. *Opt. Commun.*, 1989, 78(5): 321~324
- [10] J. L. Jewell, Y. H. Lee, A. Scheres *et al.*, Surface-emitting microlasers for photonic switching and interchip connections. *Opt. Eng.*, 1990, 29(3): 210~213

## CC-Banyan Network and Its Optical Implementation

Peng Haifeng    Liu Liren    Liang Feng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 6 January 1995; revised 12 June 1995)

**Abstract** Optical CC-banyan network has been implemented by using polarizing beam splitters and 1-D phase spatial light modulators, and the routing control between any input-output pair is given. Its corresponding energy loss and crosstalk are low, and its channel density is high. It is compact in structure and effective in performance.

**Key words** CC-banyan network, routing control, channel density.