

无冲突 4 端口榕树开关网络的实验研究*

李洪谱 曹明翠 罗风光 徐 军 李再光

(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉 430074)

摘 要 提出了一种新型的无冲突 4 端口榕树型开关网络. 采用液晶列阵及偏振棱镜、三角棱镜、波片等光学元件, 在光学上实现了这种网络, 得到了由 4 端进到 4 端出的 24 种全排列方式.

关键词 榕树型(Banyan)互连, 无冲突网络.

1 引 言

在光计算和光通讯系统中, 高效无冲突的数字开关网络是实现数据传输的必要保证. 近年来, 在光数字开关网络中, 自由空间规则互连网络, 如全混洗交换 Omega 网络、全交叉网络和榕树型网络等, 已引起人们的极大重视^[1~6]. 其主要原因是这些网络系统可以利用光的高密度、无电磁干扰的特性, 实现在垂直于被互连列阵器件的第三维空间的互连; 而且网络中, 每一个结点开关器件的扇入和扇出都为 2, 网络系统规则性强, 便于实现模块化; 另外, 还可以实现任一入端与任一出端的连接. 然而在并行多处理计算机系统和光通讯数字交换开关网络中, 不仅要求并行通道无路径阻塞, 而且往往需要能将任一 N 个输入端信息同时传进入到 N 个输出端, 能实现由 N 个输入端到 N 个输出端的 $N!$ 种排列方式. 采用扩展的 $(2 \log_2 N - 1)$ 级自由空间规则互连, 可以完成 N 个输入端到 N 个输出端的 $N!$ 个全排列方式. 本文描述了一种新型的无冲突 4 端口榕树型开关网络, 并采用特殊的偏振棱镜、液晶开关、半波片、 $1/4$ 波片等在光学上实现了这种网络, 得到了 4 端进到 4 端出全排列方式, 即得到了 24 种交换开关功能.

2 无路径冲突的榕树型网络

榕树型网络属于多级互连网络, 当输入/输出端口数为 N (N 为 2 的幂函数), 它有 $\log_2 N$ 级互连. 图 1 是输入/输出端口数为 8 的榕树型互连网络结构示意图. 从图中可以看到, 榕树型互连分为直通和蝶型连接两种方式. 对于 N 个端口的网络, 第一级互连其标号为 1, 对于第 m 级互连, 则应该把输入端分成 2^{m-1} 个部分, 在每一部分内, 仍然实施直通互连和蝶型互连, 直至 $\log_2 N$ 级互连. 从严格的数学定义上考虑, 榕树型网络的每一级互连可以用 $\Pi_i^{(m)}$ 和

* 本课题得到国家 863 高技术基金和国家科工委预研基金的资助.

收稿日期: 1993 年 5 月 24 日; 收到修改稿日期: 1993 年 8 月 3 日

$\Pi_2^{(m)}$ 两个传递函数来描述^[2], 把每一端口的空间地址 $n(0 \leq n \leq N - 1)$ 以二进制形式展开, 如 $N = 8$ 时, 空间地址 n 的二进制表达数为一个三位数 (n_2, n_1, n_0) , 于是

$$n = 4n_2 + 2n_1 + n_0 \tag{1}$$

系数 $n_k (k = 0, 1, 2)$ 的取值或者为 0 或者为 1, 这里可以将 n 的空间地址表示为 $\langle n \rangle = (n_2, n_1, n_0)$, 定义 $\langle n \rangle_k$ 的含意是将 n 二进制展开后, 使第 k 项系数数置反 (即原为 0, 现则为 1), 这样, 榕树型网络的第 m 级互连关系就可以用下面两个函数表示:

$$\Pi_1^{(m)}: \quad \langle n \rangle \rightarrow \langle n \rangle \tag{2}$$

$$\Pi_2^{(m)}: \quad \langle n \rangle \rightarrow \langle n \rangle_{\log_2 N - m} \tag{3}$$

上面简单讨论了榕树型网络. 与其它自由空间规则互连网络一样, 榕树型互连网络能够实现任一输入端口与任一输出端口的连接, 但是要实现两对或两对以上输入端与输出端间的连接就会发生连接路径上的冲突, 不可能实现无冲突的任意排列. 实现全排列网络有多种途径, 一般可采用的方法是把两个 $\log_2 N$ 级互连网络背靠背串连起来, 然后省去中间重复的一级^[7], 便得到 $2\log_2 N - 1$ 级的无冲突互连网络, 图 2 为 $N = 4$ 时, 3 级无冲突榕树型网络结构示意图. 其中 m 表示级数, $C_i^{(m)}$ 表示各接点处的开关控制. $C_i^{(m)} = 1$, 表示接点与下一接点的连接为直通, 反之 $C_i^{(m)} = 0$, 则按蝶型方式连接下一接点.

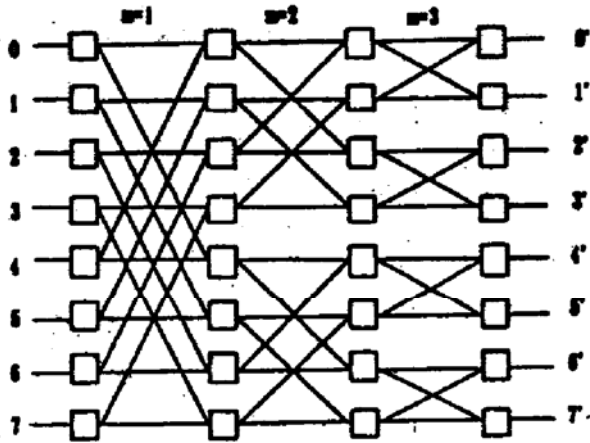


Fig. 1 The Banyan network for $N = 8$

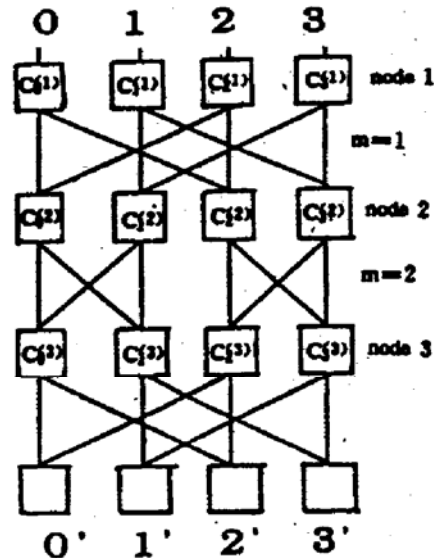


Fig. 2 The nonblock banyan interconnection network for $N = 4$

3 光路系统与实验结果

图 3 是实现 $N = 4$ 时榕树型网络第一级互连的光学系统. 它由两块形状不同的偏光棱镜 PB_1 、 PB_2 和一向列型液晶列阵开关 (LCS_1) 组成. 假设初始入射光为圆偏振光, 4 束光 0, 1, 2, 3 经 PB_1 后 (其中 AE 面镀了 45° 偏振膜), 每一输出通道都分别包括两个输入端口的信息, 例如 0 输出端口就包含 0 输入端口的 s 偏振分量和 2 输入端口的 p 偏振分量; 3 输出端口就包含 1 输入端口的 p 偏振分量和 3 输入端口的 s 偏振分量. 每一输出端口的两种分量, 偏振方向正好互相垂直, 而且是榕树型网络第一级各接点所对应的关系, 再通过液晶开关 LCS_1 以及偏振棱镜 PB_2 , 就可以实现各接点的开关选通作用 (即决定是直通, 还是蝶型互连方式), 其机理就是向列型液晶起着偏振开关的作用, 它本身具有如下特性^[8]; 在液晶像元上所施加的电压为零时, 它可将经过该像元的光束偏振态旋转 90° , 使 p 偏振光变成 s 偏振光, 或使 s 偏振光变成 p 偏振光, 此时设液晶像元的控制状态 $C_i = 0$; 当液晶像元上所施加的电压超过

阈值(一般为 3~5 V),通过该像元的光束偏振状态不变,设此时液晶像元的控制状态 $C_i = 1$. 对 4 端口榕树型网络第一级互连,设液晶像元 $C_0^{(1)}, C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_3^{(1)}$, 分别与 4 个通道对应. 由榕树型网络的互连规律,可知 $C_0^{(1)}, C_2^{(1)}$ 为一对开关(即同为 0, 或同为 1), $C_1^{(1)}$ 与 $C_3^{(1)}$ 为一对开关,控制这二对开关,就可以在 PB_2 的 $0', 1', 2', 3'$ 位置上实现榕树型网络的第一级开关互连. 对于榕树型网络 ($N = 4$) 第二级互连,可以采用图 4 所示装置来实现,其中 PB_3 和 PB_4 为偏振棱镜, LCS_2 亦为液晶开关,控制像元为 $C_0^{(2)}, C_1^{(2)}, C_2^{(2)}, C_3^{(2)}$, 光束由 0, 1, 2, 3 端输入,经 PB_3 , 三角组合棱镜 T_2 、 $\lambda/4$ 波片、全反镜 R_2 等,在液晶开关 LCS_2 左侧,每一通道都

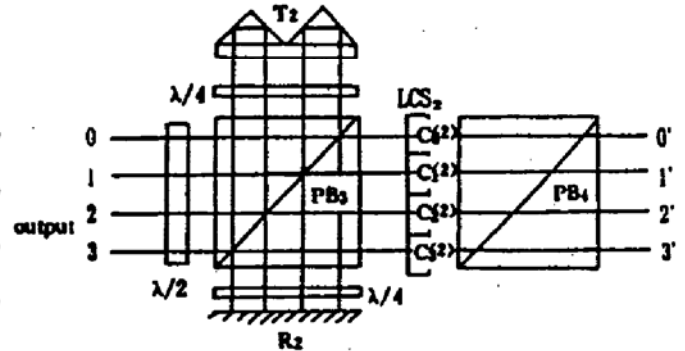
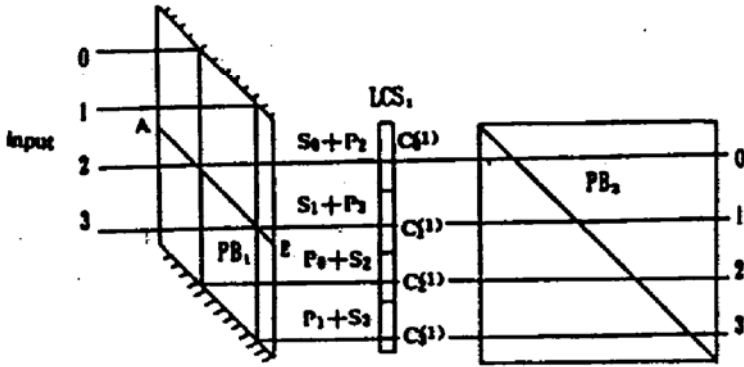


Fig. 3 The optical implement for the first stage Banyan interconnection network for $N = 4$

Fig. 4 The optical implement for the second stage of the Banyan interconnection network for $N = 4$

包含两个输入端口的信息. 例如,从端口 0 输入的光束,经 PB_3 的偏振面后, p 偏振分量直接输到液晶控制开关 $C_0^{(2)}$ 上,而 s 偏振分量则经 $\lambda/4$ 波片 $\rightarrow T_2 \rightarrow \lambda/4$ 波片 $\rightarrow PB_3 \rightarrow \lambda/4$ 波片 $\rightarrow R_2 \rightarrow \lambda/4$ 波片 $\rightarrow PB_3$ 后,输到液晶控制开关 $C_1^{(2)}$ 上,与 1 端口输入光束的 p 偏振分量重合,因此每一输出端口(在 LCS_2 左侧)所包含的信息是两互相垂直的偏振光,而且正好是榕树型网络第二级(见图 2)各接点所对应的关系. 与图 3 系统一样,用液晶开关 LCS_2 与偏振棱镜配合,在 $0', 1', 2', 3'$ 输出端口实现榕树型网络 ($N = 4$) 第二级的开关互连. 根据榕树型网络第二级的互连规律,液晶开关 LCS_2 的四个控制像元 $C_0^{(2)}$ 与 $C_1^{(2)}$ 是一对开关, $C_1^{(2)}$ 与 $C_3^{(2)}$ 是一对关系. 这样,采用图 3、图 4 所示系统,可以分别实现榕树型网络的第一、第二级互连与开关选通. 从图 2 中,可以看到 $N = 4$ 时,榕树型无冲突网络第一级与最后一级(即第三级)互连结构完全相同. 因此将图 3、图 4 结合起来,构成图 5 所示系统,就可以实现图 2 所示端口数为 4 的无冲突榕树型开关网络,系统中加入两块半波片,目的是使上一级输出的偏振光变成圆偏振光. 假设在 4 个输入端口的信息为 0, 1, 2, 3, 通过控制三块液晶开关 LCS_1, LCS_2, LCS_3 上 12 个液晶像元的状态,可以在输出端口 $0', 1', 2', 3'$ 的位置上得到 0, 1, 2, 3 四种信息的 24 种无路径冲突排列方式,其控制状态参数与相应的输出排列方式见表 1. 按图 5 所示系统进行实验. 实验中,输入光束是采用两块平行平面薄膜分束器,将一束氩离子激光分为 4×2 列阵,其中下面一行 A, B, C, D 分别表示输入端口序号 0, 1, 2, 3, 如图 6 所示. 按照表 1 给出的 24 种控制方式,分别设定各液晶像元的控制状态,结果在输出端 $0', 1', 2', 3'$ 位置上,得到了 A, B, C, D 的 24 种排列方式. 图 7 给出了按照表 1 中第 6, 8, 15, 24 号液晶控制方式得出的输出结果,与表 1 所列的输出结果完全相符.

Table 1 24 kinds of permutations of the four port nonblock Banyan interconnection network

number	control of each image element for liquid crystal switch												output			
	$C_0^{(1)}$	$C_1^{(1)}$	$C_2^{(1)}$	$C_3^{(1)}$	$C_0^{(2)}$	$C_1^{(2)}$	$C_2^{(2)}$	$C_3^{(2)}$	$C_0^{(3)}$	$C_1^{(3)}$	$C_2^{(3)}$	$C_3^{(3)}$	0'	1'	2'	3'
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	3
2	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	3	2
3	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	2	1	3
4	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	2	3	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	3	2	1
6	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	3	1	2
7	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	2	3
8	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	3	2
9	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	0	3
10	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	3	0
11	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	3	0	2
12	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	3	2	0
13	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	2	0	1	3
14	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	2	0	3	1
15	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	3
16	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	2	1	3	0
17	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	0	1
18	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	2	3	1	0
19	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	0	1	2
20	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	3	0	2	1
21	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	3	1	0	2
22	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	3	1	2	0
23	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	3	2	0	1
24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	2	1	0

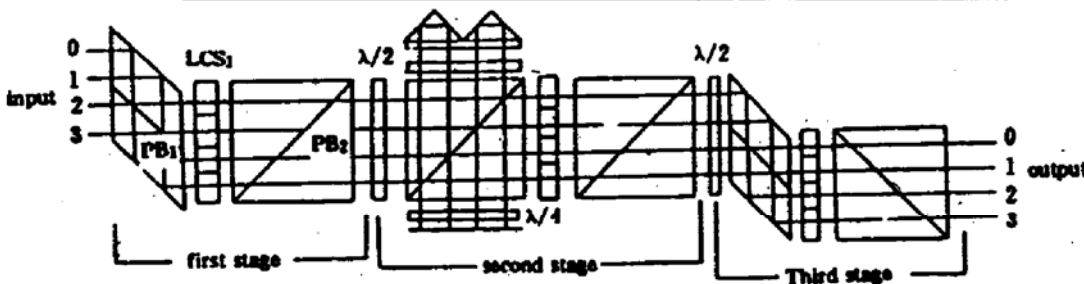


Fig. 5 The optical implement for the four port nonblock Banyan interconnection network

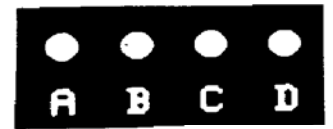


Fig. 6 The input ports labeled by A, B, C, D



Fig. 7 output permutations under different control states of liquid crystal switch

- (a) output permutations under the No. 6 control manner in table 1
- (b) output permutations under the No. 8 control manner in table 1
- (c) output permutations under the No. 15 control manner in table 1
- (d) output permutations under the No. 24 control manner in table 1

4 结论与讨论

榕树型无冲突网络在并行多处理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. 本文采用偏振棱镜, 三角棱镜, 液晶开关、波片等光学元件在光学上实现了 4 端口的榕树型无冲突网络, 得到了 4 端进到 4 端出的 24 种全排列方式, 实现了 24 种交换开关功能. 值得提出的是, 本文所设计的光学系统, 是针对 4 端口的榕树型无冲突网络, 对于多端口, 本文设计的系统作为一基本模块仍可以采用. 例如对 8 端口的榕树型无冲突网络, 由于新构成的网络为 5 级, 而 4 端口的榕树型无冲突网络只需要 3 级, 因此可以将 4 端口的榕树型无冲突网络作为基本模块, 采用 2 个这样的基本模块, 再在两头加上 8 通道端口的榕树型网络第一级互连, 就可以构成 8 通道的无冲突榕树型网络, 而 8 通道榕树型网络第一级互连, 也可以采用图 3 的系统实现. 依次类推, 可以推广到多端口的榕树型无冲突网络. 由于本系统具有简单, 易模块化特性, 新采用的光场为平行光束, 非常便于级连. 如果采用高密度面发光激光阵列作光源, 以及相应的阵列微准直透镜取代, 液晶开关用高速的铁电液晶或多量子阱空间光调制器替代, 每一模块间的级连采用光电混合型的方式(即将光信号用阵列探测器接收, 所得电信号经整形后再驱动下一模块的阵列激光器), 则本方法不仅可以推广到多端口的榕树型无冲突网络, 甚至可以推广到二维的榕树型无冲突网络, 只不过二维的无冲突网络所需的级数需要增加一倍, 系统稍为复杂一些.

参 考 文 献

- [1] J. Jahns, Miles. J. Murdocca, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1988, 27(15): 3155~3160
- [2] J. Jahns, Optical implement of the Banyan networks. *Opt. Commun.*, 1990, 76(5~6): 321~325
- [3] M. J. Murdocca, A. Huang, J. Jahns et al., Optical design of programmable logic arrays. *Appl. Opt.*, 1988, 27(9): 1651~1660
- [4] Mingcui Cao, Hongpu Li, Optical hardware for perfect shuffle interconnection. *Optical Computing and Processing*, 1991, 1(1): 23~27
- [5] 曹明翠, 李洪谱, 罗风光. 全混洗交换 OMEGA 互连网络的光学实现. *光学学报*, 1992, 12(12): 1129~1134
- [6] Karl-Heinz Brenner, A. Huang, Optical implementation of the perfect shuffle interconnection. *Appl. Opt.*, 1988, 27(1): 135~137
- [7] Krishnan Padmanabhan, Aran N. Netravali, Dilated networks for photonic switching. *IEEE Trans. Commun.*, 1987, COM-35(12): 1357~1365
- [8] R. A. Athale, S. H. Lee, Development of an optical parallel logic device and a half-adder circuit for digital optical processing. *Opt. Engng.*, 1979, 18(5): 513~515

Implement of the Optical Banyan Nonblock Four Port Switching Network

Li Hongpu Cao Mingcui Luo Fengguang Xu Jun Li Zhaiguang

(The National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074)

(Received 24 May 1993; revised 3 August 1993)

Abstract In this paper, a new kind of the nonblock four-port Banyan switching network is proposed. Using some classical optical elements, such as polarized prism, triangular prism, wavelength plates, and liquid crystal array polarized switch, we have demonstrated it in optical experiment. 24 kinds of switching functions for the four-port Banyan network have been obtained.

Key words Banyan interconnection, nonblock network.