

榕树型互连网络及光学实现

杨李茗 周柯江

(浙江大学光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 讨论了一种用扭曲向列相液晶器件和偏振分光棱镜实现光学榕树互连网络的结构, 这种结构具有直线式传输、无错位、无缩放、并能够实现模块化和集成化的优点。

关键词 光学互连, 榕树网, 液晶。

1 引 言

光计算机是近十年来国际、国内广大科学工作者密切注视和关心的新课题。目前的电子计算机有着很大的弊病, 如冯·诺依曼“瓶颈”问题、互连带宽问题等。光计算机发展潜力很大程度上是由它的并行处理能力和光互连特点决定的, 光学并行处理可以对图象进行单指令多数据流(SIMD)或多指令多数据流(MIMD)处理^[1]。同时由于光学系统的空间带宽和时间带宽乘积很大, 可以实现大量的独立通道连接, 并能实现动态互连, 形成一个无阻塞开关网。

根据最新技术资料表明, 光互连主要可分为两大类, 即自由空间的无规则自由互连和自由空间的规则互连。规则互连网络(regular interconnection networks)主要可分为以下四种, 即榕树网络(banyan network)^[2, 3]、交叉网络(crossover network)^[4]、混洗网络(perfect shuffle network)^[5-7]和交叉棒网络(crossbar network)^[8]。这种规则互连网络还可以应用于光通讯中的光子交换网络, 实现无路径冲突的高速、宽带通讯交换系统。本文提出一种用液晶空间光调制器和偏振分光棱镜组成的光学系统, 实现光学榕树型互连网络。

2 榕树网理论

榕树型互连网络于 1973 年研究电子计算机结构时提出。图 1 为这种结构的连通图。该图是具有 8 个输入输出结点的网络, 每个结点可以是一个 2×2 的切换开关, 总的通道数为 $2N$ 。有 n 级链路和 $(n+1)$ 级结点, $n = \log_2 N$ (规定 N 总是 2 的幂), 每一级链路有 $2N$ 条通道, 每个结点有两个输入和两个输出。用两种连通方式即直通(用虚线表示)和蝶式互连(用实线表示)将相邻的两级结点互连起来。这两种连通形式可以用数学排列来进行描述。定义第 m 级链路($0 \leq m \leq n-1$)的两种数学排列分别为 $\Pi_1^{(m)}$ 和 $\Pi_2^{(m)}$, 将每级结点的地址用二进制编码 (P_{n-1}, \dots, P_0) 形式表示(P 取 0 和 1 值), 可以得到如下表达式:

$$\Pi_1^{(m)}(P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1, P_0)_m = (P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1, P_0)_{m+1} \quad (1)$$

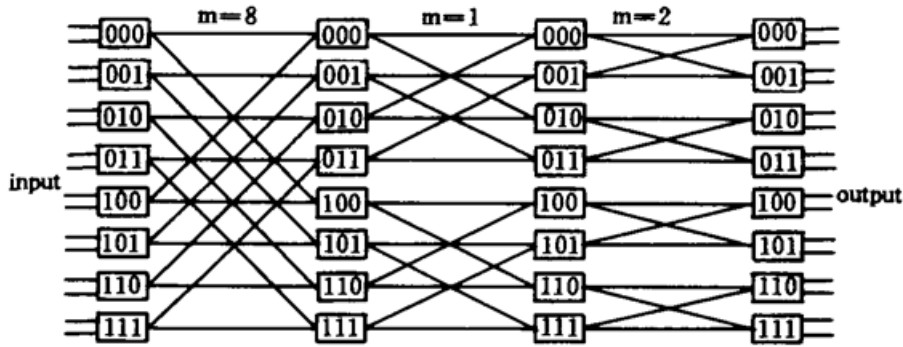


Fig. 1 Banyan network with binary physical addresses

$$\Pi_2^{(m)}(P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1, P_0)_m = (P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, \bar{P}_{n-m-1}, \dots, P_1, P_0)_{m+1} \quad (2)$$

可以看出，直通是将第 m 级结点中二进制地址为 $(P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1, P_0)_m$ 与第 $m+1$ 级中地址为 $(P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1, P_0)_{m+1}$ 的结点相连接。蝶式互连是将第 m 级结点中地址为 $(P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_1, P_0)_m$ 的结点与第 $m+1$ 级中地址为 $(P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, \bar{P}_{n-m-1}, \dots, P_1, P_0)_{m+1}$ 的结点相连接。如图 1 中地址为(010)的 0 级结点与地址为(110)的 1 级结点蝶式互连 (其中 $n = 3, m = 0, n - m - 1 = 2, (010) \rightarrow (\bar{0}10) \rightarrow (110)$)。用二进制编码形式表示结点地址的互连函数来表达榕树网络的互连结果，其形式不仅繁琐，且也不直观。用互连矩阵^[9]表示网络的互连函数，既方便简捷，又清晰直观。

对图 1 所示的榕树互连网络，设输入矩阵为 $X_N^{(m)}$ 。如 $m = 0$ 级的输入矩阵为：

$$X_8^{(0)} = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]^T \quad (3)$$

直通互连矩阵 D 是一个 $N \times N$ 的单位方阵，则 0 级输出矩阵的表达函数可以写成：

$$Y_8^{(0)} = D_8^{(0)} X_8^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix} \quad (4)$$

当然对于 1 级和 2 级链级的直通互连矩阵其形式不变。

0 级的蝶式互连矩阵 B 也是一个 $N \times N$ 的方阵，其形式是将 $N \times N$ 的单位阵列作对称变换，表达式如下：

$$B_8^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

0 级链的输出矩阵表达式为:

$$Y_8^{(0)} = B_8^{(0)} X_8^{(0)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

不难知道, 1 级链和 2 级链的蝶式互连矩阵分别为:

$$B_8^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_8^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

3 光学实现和结果

为了实现光学榕树型互连网络, 作者设计了一种用偏振分光棱镜列阵和扭曲向列相液晶盒组成的光学系统, 如图 2 所示。图中的所有棱镜都镀有波段较宽的偏振分光膜, 其膜系为 $G // H(LH)^{12} // G$ 。H 为 MgO 材料, $n = 1.7$; L 为 MgF_2 材料, $n = 1.38$ 。在 $\lambda = 570 \text{ nm}$ 到 710 nm 范围内 $T_s < 0.5\%$, $T_p > 99.9\%$, m 、 n 、 m' 、 n' 是电控扭曲向列相液晶盒, 它的作用是使入射的偏振光直接通过或使偏振方向旋转 90° 后出射。

有四束光 A 、 B 、 C 、 D 从左侧入射到 m 、 n 液晶盒上(见图 2), 假设入射光束都是 p 偏振光, 此时给 m 、 n 液晶盒施加电压达到饱和状态, p 偏振光直接通过, 入射到偏振分光面 a 和 b , p 偏振光通过。同样给 m' 、 n' 液晶盒施加电压, 最后 A 、 B 、 C 、 D 四束光直接从右侧出射, 实现了榕树网络中的直通功能。如果只给 n 液晶盒施加电压而不给 m 盒加电压, A 、 B 光束通过 m 液晶盒后由 p 偏振光转为 s 偏振光, 经过 a 、 b 面反射后和直通的 C 、 D 光一起射到 n' 液晶盒上。如果 n' 液晶盒仍旧加有电压, 则右侧输出也仍是 A 、 B 、 C 、 D 排列的光束(A 、 B 为 s 偏振光, C 、 D 为 p 偏振), 如果此时 n' 液晶盒去掉电压, s 偏振的 A 、 B 光旋转 90° 变成 p 偏振光, 经 d 面透射后出射。p 偏振的 C 、 D 光旋转 90° 变成 s 偏振光, 经过 d 、 c 面上的两次反射后在 c 面出射。因此, 在右侧的输出面上, 光束的排列顺序是 C 、 D 、 A 、 B , 实现了榕树网络中的蝶式互连。

作者制作了一个具有 $N = 4$ 输入输出端口的 2 级榕树网络, 其结构如图 3 所示, 图 4 是

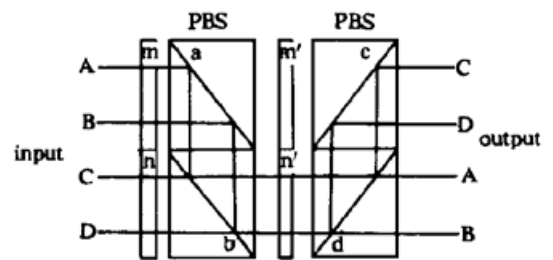


Fig. 2 The hybrid structure of PBS and LCLM banyan network

实物照片, 图 5 是具有四个独立信号的输入图像, 图 6 是第 0 级蝶式互连输出图像, 图 7 是第 1 级蝶式互连输出图像。

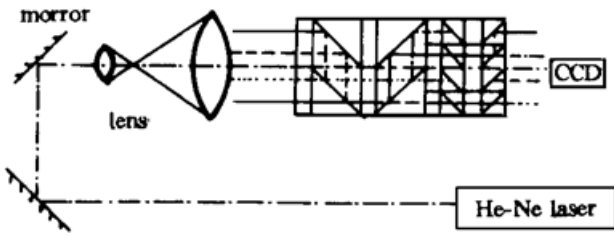
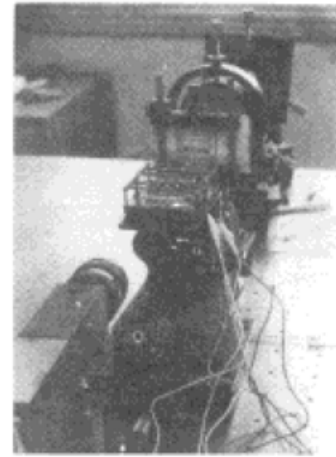


Fig. 3 The structure of optical implementation

Fig. 4 A photo of experimental setup



Fig. 5 Experimental result: input object

Fig. 6 Output of the first stage

Fig. 7 Output of the second stage

4 榕树网络的拓扑性讨论

规则互连网络是通信交换系统、数字光计算系统、并行多处理机的重要组成部分。与交叉网络、混洗网络等相比, 榕树网络的结构简单, 实现容易, 并能与交叉网络和混洗网络实现拓扑等价。作者采用图分析法研究了榕树网络与混洗网络、全交叉网络的拓扑等价性^[10, 11]。具体方法是分别以混洗网络和全交叉网络为参考网络, 标出其全部链路中每一结点的物理地址和输入输出端口位置名。对任何一个物理地址的结点, 都通过四条链路与四个结点或输入输出端口相连接。对于参考网络中每个结点, 在榕树网络中对应地标出相应的物理地址及通过四条链路相连的四个结点。这样就可以得到拓扑等价的榕树网络。

图 8(a) 是 $2N = 16$ 端口数的全交叉网络图, 图 8(b) 是与其拓扑等价的榕树网络图。图 9(a) 是混洗网络图, 图 9(b) 是与其拓扑等价的榕树网络图。显然, 榕树网络的光学硬件具有很好的通用性, 仅需更动很少结点物理地址, 便可实现混洗网络和全交叉网络的连通功能。

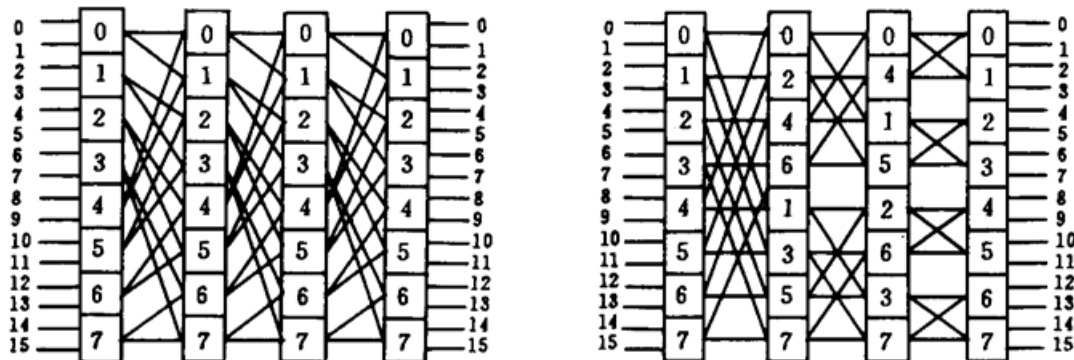


Fig. 8 (a) crossover network $N = 8$, (b) Banyan network topological equivalent with crossover network

总 结 本文设计的榕树互连网络光学实现是一种可编程控制的榕树型互连网络, 并具有一定的模块化和集成化潜力。与用迈克尔逊(Michelson)干涉仪改装的全交叉网络、混洗网络和

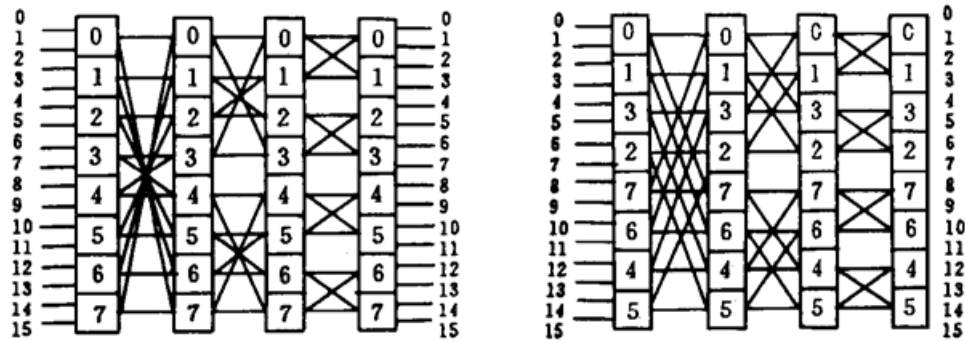


Fig. 9 (a) Perfect shuffle network $N = 8$, (b) Banyan network topological equivalent with perfect shuffle 榕树网络相比, 它实现了直线式结构, 同时避免了使用棱镜外的各类反射镜, 使结构可以缩小并趋于规则, 容易实现链级与链级间的连接; 与用棱镜实现混洗网络的装置结构相比, 它无侧向位移, 更避免了输出图像的缩小; 其完成一级链级互连所需的结构和成本远比交叉棒简单、容易和便宜。本系统的缺陷在于其响应时间受扭曲向列相液晶器件的响应速度限制, 结构上也受到分光棱镜体积的限制, 目前还难以实现微结构。但随着铁电液晶器件的进一步研制和微光学器件加工工艺的提高, 相信可以实现集成化和微小结构的光学榕树网络。

参 考 文 献

- [1] Miles J. Murdocca, Alan Huang, Optical design of programmable logic arrays. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (9) : 1651~ 1660
- [2] J. Jahns, Optical implementation of the banyan network. *Opt. Commun.*, 1990, **76**(5, 6) : 321~ 324
- [3] Daisuke Miyazaki, Jun Tanida, Yoshiki Ichioka, Optical implementation of the Banyan network using a Sagnac inverter with a patterned mirror. *Opt. Commun.*, 1992, **93**(5, 6) : 283~ 288
- [4] Jurgen Jahns, M. J. Murdocca, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1994, **32**(2) : 175~ 178
- [5] Karl Heinz Brenner, A. Huang, Optical implementations of the perfect shuffle interconnection. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(1) : 135~ 137
- [6] 曹明翠, 李洪谱等, 全混洗交换 Omega 互连网络的光学实现. 光学学报, 1992, **12**(12) : 1129~ 1234
- [7] 曹明翠, 罗风光等, 数字光开关网络中四功能交换开关光学 Omega 网络. 光学学报, 1993, **13**(12) : 1105~ 1109
- [8] Yaming Wu, Liren Liu, Zhijiang Wang, Optical crossbar elements used for switching networks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2) : 175~ 178
- [9] Mingcui Cao, Hongpu Li, et al., Free-space regular optical interconnections: a mathematical analysis. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14) : 2960~ 2967
- [10] Thomas J. Cloonan, Topological equivalence of optical crossover networks and modified data manipulator networks. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(13) : 2494~ 2498
- [11] 艾 军, 曹明翠, 李再光, 光互连 Omega 网络与榕树网络拓扑等价性的多样性. 光学学报, 1994, **14**(7) : 724~ 728

The Banyan Network and Optical Implementation

Yang Liming Zhou Kejiang

(State Key Laboratory of Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 25 May 1996; revised 9 September 1996)

Abstract A structure of the optical banyan interconnection network using TN liquid crystal light modulations and polarized beam splitter are discussed. The structure has many advantages, such as directly transmission, no aligned error, no zooming, and can realize modularization and integration.

Key words optical interconnection, banyan network, liquid crystal.