

自由空间光学 Comega 多级互连网络特性研究

李 源 曹明翠 李洪谱 罗风光 万安君 徐 军
(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要 光学 Comega 网络是一种新颖的易于光学实现的多级光互连网络。本文对该网络结构及特性进行了详细分析, 得到了该网络的互连函数, 并给出了它与 Staran、Crossover、Omega、Banyan 及基准等常见网络的拓扑等价证明。

关键词 互连网络, 光互连, 光交换, 并行处理。

1 引 言

随着科学技术的高度发展, 对信息的高速传输与高速处理的要求越来越强烈。现有的光纤通讯网只是在信号的传输过程采用光波, 而在进行信息交换时仍采用的是电子程控交换机, 当光纤通过采用各种时分和波分复用技术使得信号传输速率不断提高时, 数字电子交换系统成了整个通信网信息传输速率进一步提高的“瓶颈”。同时, 计算机处理速度也在向着每秒运算可达一万亿次的高性能并行计算机的方向发展, 要达到如此高的运算速度, 并行计算系统内部将要求每通道每秒约十亿位的通讯互连网络, 这也是采用电子线互连无法到达的。其原因是电子交换网络中“线互连”存在着 R 、 L 、 C 分布参量, 从而使得它在进一步提高信息传递速率时存在着带宽限制、时钟歪斜、严重串话和高功耗等一系列无法克服的缺陷。

在寻找解决这一问题的途径时, 光互连技术成了关注的焦点, 近年来该领域吸引了众多的研究者^[1, 2]。而其中自由空间光学互连网络除了一般光互连所具有的, 如极高的空间和时间带宽积、抗干扰能力强、光互连通道路径的等程、功耗低等优点外, 还具有互连数大、互连密度高、无接触互连等优点。且其采用 FET-SEED 器件构成的开关节点也已接近实用水平, 因而在各种光互连技术中一枝独秀。近年来已实现的了不少拓扑结构的自由空间光互连网络, 如 Crossover、Banyan、Omega 等。但 Crossover 光学网络系统各互连级不相同, 不易做成组件模块^[3]; Omega 网络的实现比较复杂^[4-6]; 而目前用一块位相计算全息光栅实现 Banyan 互连函数的光学交换系统中, 系统运行十分稳定可靠, 但是系统中光学载波信道的利用率只能达到 66.7%^[7]。

本文提出了一种新型的多级互连网络拓扑结构, 称为 Comega 多级互连网络^[8]。该网络光学实现简单, 各级互连函数完全相同, 且光学系统中光学载波信道的利用率可达 100%。本文详细分析了 Comega 网络的结构和特性, 及其与一些常见多级互连网络的拓扑等价性。

2 Omega 网络结构与互连特性

Comega 网络拓扑结构的基本设计思想是, 把网络中每一节点级的 N 个输出全都一分为二, 这样每一信道都可以到达下一级节点级中两个节点的输入端上, 其中第 $i(0 \leq i \leq N - 1)$ 输出到达下一级的第 $N - i$ 和 $N/2 - i$ 端, 通过这样的连接把多级开关节点级连起来, 就能完成一定的交换功能。图 1(a) 为 8 个信道经过一分为二之后的连接关系, 由图中可以看出, 由于进行了一分为二的操作, 因此在下一节点级的入端数是上一节点级出端数的两倍, 网络很适合采用 $(2, 1, 1)$ 节点, 图 1(b) 即为采用 $(2, 1, 1)$ 节点的 8 端口 Omega 网络。 $(2, 1, 1)$ 节点能完成从两个输入中选择一个输出的功能, 其功能及逻辑结构如图 2 所示。

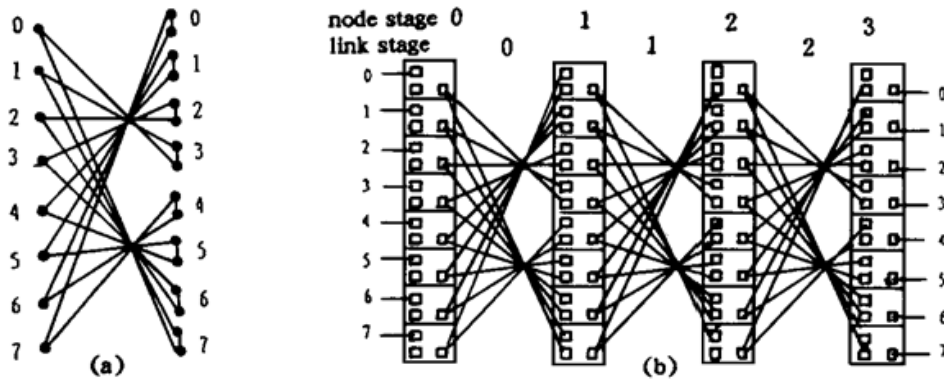


Fig. 1 Omega network composed of $(2, 1, 1)$ nodes

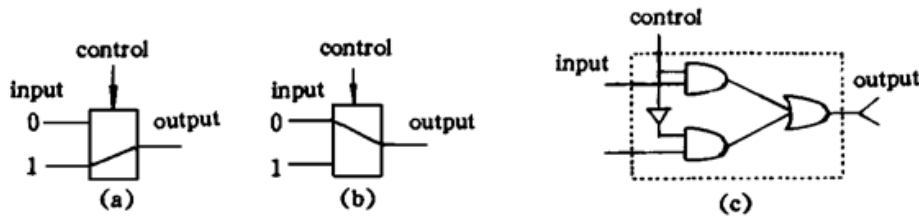


Fig. 2 The functions and logical structure of $(2, 1, 1)$ node

如果一个节点能完成对两个输入进行直通、交换和上下广播输出的功能, 则称为 $(2, 2, 2)$ 节点, 其逻辑结构如图 3 所示。原则上两个 $(2, 1, 1)$ 节点可组成一个 $(2, 2, 2)$ 节点, 如图 4(a) 所示, 把两个 $(2, 1, 1)$ 节点的两对输入端相连, 则可完成 $(2, 2, 2)$ 节点的功能。如果把图 1(b) 中的相邻两个 $(2, 1, 1)$ 节点组合起来, 增加控制信号, 则可得到图 4(b) 所示的 $(2, 2, 2)$ 节点。于是可得到节点级由 $(2, 2, 2)$ 节点构成的 Omega 多级互连网络, 图 5(a) 为 16 端

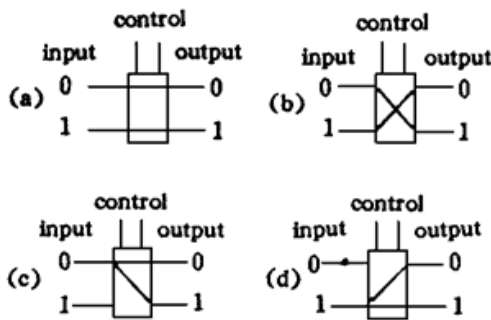


Fig. 3 The functions of $(2, 2, 2)$ node. (a) straight, (b) cross, (c) upper broadcast, (d) lower broadcast

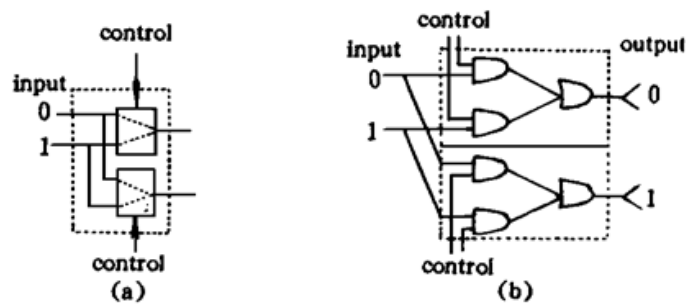


Fig. 4 $(2, 2, 2)$ node composed by two $(2, 1, 1)$ nodes

口的(2, 2, 2)节点 Omega 多级网络的拓扑结构图。

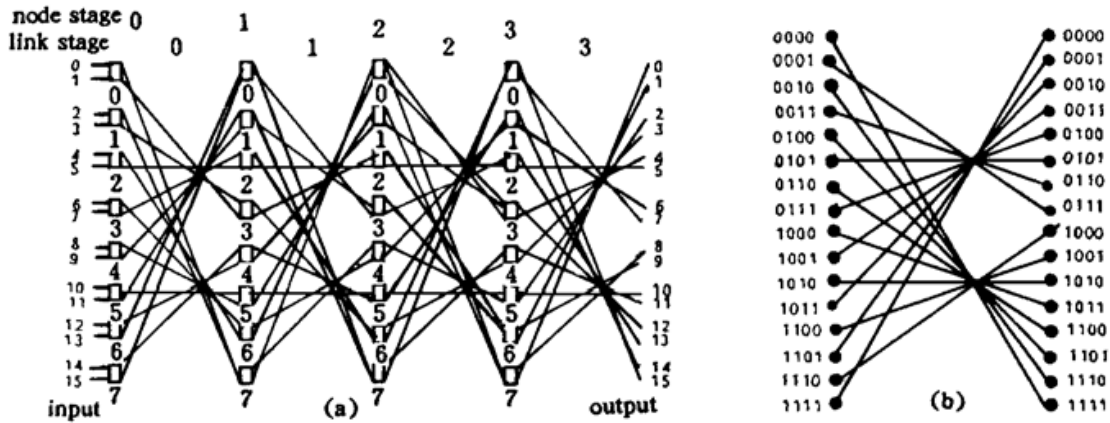


Fig. 5 Omega network composed of (2, 2, 2) nodes

由于(2, 2, 2)节点的功能更强,且可以分解为(2, 1, 1)节点,所以在研究网络特性时一般以(2, 2, 2)节点构成的网络为研究对象。下面以由 $\log_2 N$ 级(2, 2, 2)节点构成的 Omega 多级网络来研究 Omega 网络的特性。

如把 Omega 网络的端口号 $0 \sim N - 1$ 都用二进制数 $x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0$ ($n = \log_2 N$) 表示,则序号为 $x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0$ 的输入端将到达序号为 $x_0x_{n-1}\dots x_2x_1$ 的输出端,即对于 N 端口的 Omega 互连,其级间互连函数为:

$$C_o(x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0) = \overline{x_0x_{n-1}\dots x_2x_1} \tag{1}$$

多级网络的连接级之间为节点级,节点级所完成的变换用 E_0 表示,则一个有多级 Omega 网络的函数描述为:

$$C = E_0C_oE_0C_o\dots E_0C_o \tag{2}$$

由一个输入端来的信号通过一(2, 2, 2)节点后,可以达到下一节点级某两个输入端中的一个,因此一个信号经过 N 级节点后可以到达的端口数为 2^N 个,所以,对于 $N \times N$ 的 Omega 网络,需要 $\log_2 N$ 级节点级,才能使一个输入端来的信号能到达 N 个输出端中的任一个。从图 5(a)中的粗线也可以看出, $\log_2 N$ 级的 Omega 网络能完成任意输入端到任意输出端的连接,也能完成任一输入端到所有输出端的广播连接,互连能力很强。

3 Omega 网络与各种常见网络的拓扑等价证明

两个网络的拓扑等价是指对于其中的一个网络,存在一个逻辑名结构,使得它带有逻辑名连线的连接关系可以用另一个网络的拓扑描述规则来描述。两个网络拓扑等价,则可以通过一个网络的特性对另一网络进行研究,从而简化工作量,并有利于网络控制等方面的研究工作。下面证明 Omega 网络与几种常见网络的拓扑等价关系。

图 6(a)为 Staran 网络,它的级间互连函数为逆全混洗互连,即为:

$$\delta^{-1}(x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0) = x_0x_{n-1}\dots x_2x_1 \tag{3}$$

而 Omega 网络的互连函数由(1)式表示,显然它与逆全混洗函数互为取反的关系,即有:

$$C_o(x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0) = \overline{x_0x_{n-1}\dots x_2x_1} = \overline{\delta^{-1}(x_{n-1}x_{n-2}\dots x_1x_0)} \tag{4}$$

因此,只需把 Omega 网络中序号为奇数的节点级中的节点序号反过来排,即可得到一

拓扑等价的 Staran 网络, 图 6(b) 即为与 Staran 网络拓扑等价的 Omega 网络的逻辑名结构。

Comega 网络的互连函数与其它一些常见多级网络的互连函数的相互关系则没有那么简单明了, 作者采用互连网络拓扑等价的图分析法^{9, 10}来证明 Comega 网络与它们的拓扑等价。图分析法是建立在伙伴节点对的概念上, 从图 7(a) 可以看出, Crossover 网络第 0 级节点的位置名为 0 和 7 的一对节点仅仅与第一级节点的位置名为 0 和 7 的一对节点和连接, 把具有这种伙伴连接性质的两对节点称为伙伴节点对(BNP)。

下面给出采用图分析法证明 Comega 网络(甲网络)Crossover 网络(乙网络)拓扑等价的步骤:

- 1) 选择乙网络[图 7(a)]为参考网络, 即乙网络的逻辑名结构与相应的位置名结构相同;
- 2) 选择甲网络[图 7(b)]第 0 级的位置名为 0 的节点为初始节点, 令其逻辑名为 0, 分别在甲乙网络中找到包含 0 级节点中逻辑名为 0 的节点的伙伴节点对, 如图 7(a)、图 7(b)中的 BNP “A”, 并使两个 BNP “A”包含的另外三个节点的逻辑名对应相等。

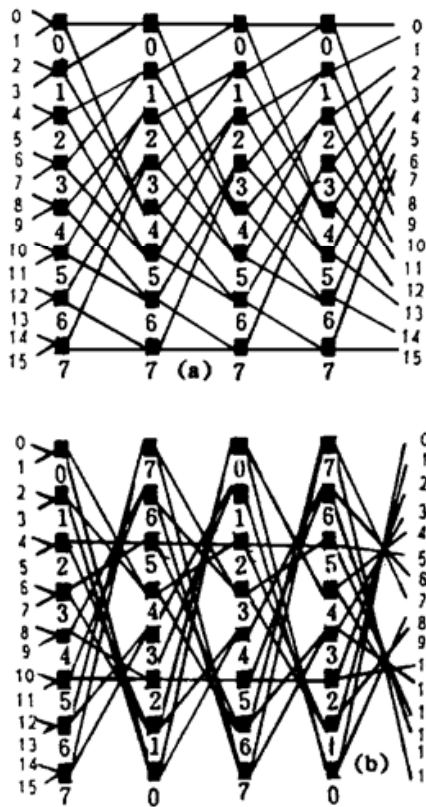


Fig. 6

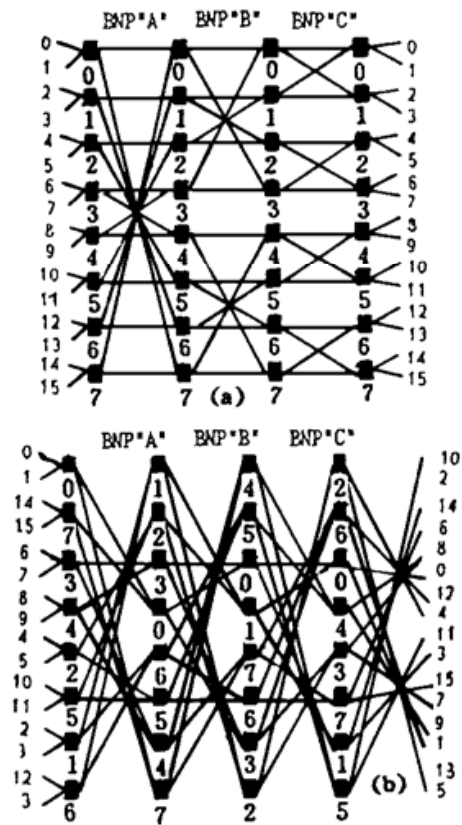


Fig. 7

- 3) 从两个 BNP “A”所包含的其余三个节点中任选一个节点, 找出该节点所涉及的下一个伙伴节点对, 如 BNP “B”, 并使甲乙网络的 BNP “B”所包含的另外三个节点的逻辑名对应相同。这样依次标出甲网络的 BNP “C”、BNP “D”……所包含的节点的逻辑名, 直到全部节点的逻辑名确定为止。

- 4) 甲网络链路的逻辑名可按如下规则确定: 甲乙网络中位于同一节点级的带有相同逻辑名的节点所连接的链路的逻辑名分别对应相同。

图 7(b) 即为与 Crossover 网络拓扑等价的 Comega 网络所具有的逻辑名结构。按上面的方法, 同样可得到 Comega 网络与 Omega、Banyan 和基准网络拓扑等价的逻辑名结构, 如图 8、图 9、图 10 所示。

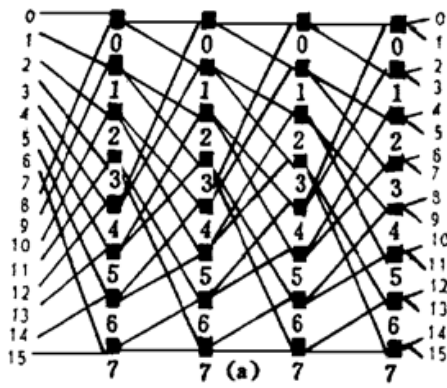


Fig. 8

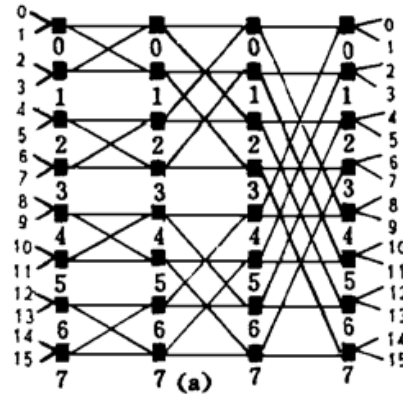


Fig. 9

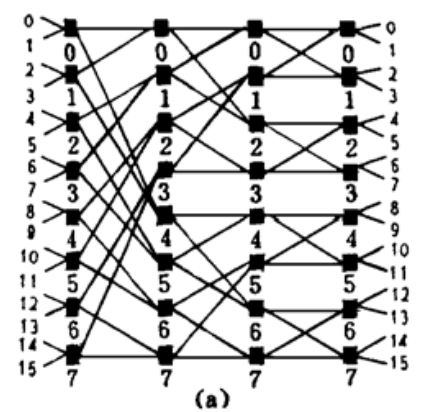


Fig. 10

4 实 验

实现 Omega 互连的光路图如图 11 所示。整个光路经过一个 4F 系统，输入的信道经过 1×2 的计算机源生位相光栅(BPG)，每一信道都分成两路。实验中采用 Ar^+ 激光器发出的激光，经过滤光并扩束后所得到的波长为 $514.5nm$ 的单色平行光作为光源，用一片 8×8 的计算机源生光栅产生的光点阵作为 8 个输入信道，为了使输出点阵与输入点阵的大小相同(以利于级连)，在 BPG 后加入了一对柱面镜，把光点阵大小压缩一半，然后再输出。图 12 为输入和输出的光点阵照片。为了便于分析二者的关系，对输入光点阵采用遮光的方式进行了空间编码，其中一个光点代表信道 0，二个光点代表信道 1，.....，八个光点代表信道 7。由照片可以看出，输入与输出之间实现了前面所述的 Omega 互连关系。

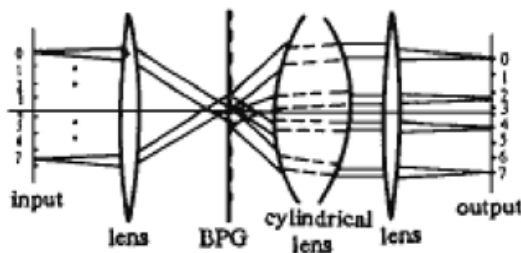


Fig. 11 The optical implementation of Omega inter-connection

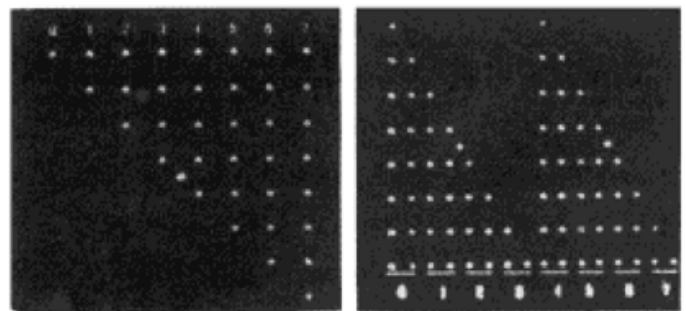


Fig. 12 The photos of input/output optical array. (a) input, (b) output

结束语 光学 Omega 多级互连网络是一种新颖的自由空间光互连网络，它的光学实现简单，光学系统中的光学通道的利用率理论值达 100%，各级互连完全相同，因而易于实现高密度组合模块，是一种有很大的实用前景的光互连网络。本文对该网络的结构及特性进行了

详细的研究,得到了它的互连函数,并证明了它与 Staran、Crossover、Omega、Banyan 及基准网络的拓扑等价性,得到了相应的逻辑名结构。为进一步研究该网络的控制算法,采用该网络实现实用化的光互连模块打下了理论基础。这种光互连模块在大规模并行计算机与电信交换系统等领域中有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Shuji Suzuki, Trend of photonic switching system. *IEEE. Trans. Commun.*, 1992, **E75-B**(4): 235~241
- [2] K. T. Huang, K. S. Huang, Parallel architecture of digital optical computing and their design principles. *Proc. SPIE*, 1990, **1230**: 714~ 720
- [3] J. Jahns, M. J. Murducca, Crossover networks and their optical implementation. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(15): 3155~ 3160
- [4] M. Cao, H. Li, F. Luo *et al.*, Optical hardware for the perfect shuffle interconnection. *Optical Computing & Processing*, 1991, **1**(1): 23~ 27
- [5] M. Cao, F. Luo, H. Li *et al.*, Optical perfect shuffle-exchange interconnection network using liquid crystal spatial light switch. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(32): 6817~ 6819
- [6] 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
- [7] J. Jahns, Optical implementation of the Banyan. *Opt. Commun.*, 1990, **76**(5/6): 321~ 324
- [8] M. Cao, H. Li, Y. Li *et al.*, A novel free-space interconnection network and its optical implementation. *International Conference on Photonics in Switching*, Sendai, Japan, Information and Communication Engineers. April 21~ 25, 1996, 118~ 119
- [9] 艾 军, 曹明翠, 李再光, 互连网络拓扑等价的图分析法. *计算机研究与发展*, 1994, **31**(3): 29~ 33
- [10] J. Ai, M. Cao, H. Li, *et al.*, A general algorithm to determine the topological equivalence of optical interconnection networks. *Opt. Commun.*, 1994, **105**(1/2): 39~ 46

Property of a Novel Free-Space Optical Omega Network

Li Yuan Cao Mingcui Li Hongpu Luo Fengguang

Wan Anjun Xu Jun

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

(Received 30 October 1995)

Abstract Optical Omega network is a novel multistage interconnection network which is suitable to optical implementation. In this paper, the property and architecture of the network is analyzed in detail, its interconnection function and feature matrix are obtained, It is shown that the optical Omega network is topologically equivalent to frequent networks such as Staran, Crossover, Omega, Banyan and Baseline network.

Key words interconnection network, optical interconnect, photonic switching, parallel processing.