

文章编号 1004-924X(2007)08-1220-09

(3,3,2)矩形CC榕树网光学实现方法

杨俊波, 苏显渝

(四川大学 电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要:研究了一种(3,3,2)矩形CC榕树网。根据(3,3,2)CC矩形榕树网的构造原则,得到其网络拓扑结构。然后,提出了(3,3,2)矩形CC榕树网的路由法则,完成了该网络的路径选择。最后,设计并提出了实现(3,3,2)矩形CC榕树网功能的光学实验模块,各级节点开关单元由位相型空间光调制器和偏振分光棱镜组成,级间互连则由光纤实现。分析了(3,3,2)矩形CC榕树网光学实验模块的功能特点,对基本开关单元性能参数进行了实验检测。结果表明,该实验模块能够完成输入信号光的交换和排序等操作,可应用于光通信和光信息处理中。

关键词:光通信;光网络;榕树网;位相型空间光调制器;偏振分光棱镜

中图分类号:TP393.03 文献标识码:A

Optical implementation of (3,3,2) rectangular CC-Banyan network

YANG Jun-bo, SU Xian-yu

(Department of Optoelectronics, College of Electron Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A (3,3,2) rectangular CC-Banyan network was studied. According to the construction principle of the CC-Banyan network, the topological graph of (3,3,2) rectangular CC-Banyan network was obtained, and then the routing rule of (3,3,2) rectangular CC-Banyan network was presented. Finally, a optical experimental setup of (3,3,2) rectangular CC-Banyan network was designed. Each stage of node switches consisted of a phase spatial light modulator and a polarizing beam-splitter, and the connection of neighboring stage was performed by a fiber. The theoretical analysis and experimental result show that the experimental setup can realize these functions including optical signal sorting and permuting etc., which also can be used in the fields of optical communication and optical information processing.

Key words: optical communication; optical network; Banyan network; phase spatial light modulator; polarizing beam-splitter

1 引言

光互连网络在现代通信中具有重要的作用,

它可以有效地消除电子网络中固有的电磁干扰、时钟扭曲、RLC延时及带宽瓶颈等问题,具有并行无干扰、空间带宽高等特点,在未来大容量超高速通信技术中将逐渐发挥其优越的性能。根据其

收稿日期:2007-01-18;修订日期:2007-05-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60527001)

构成介质的不同,光互连网络可以采用光纤互连、波导互连和自由空间互连技术^[1-3];而根据光互连网络的拓扑结构特点,又有全混洗 Omega 网络、Comega 网络、Gamma 网络、Crossover 交叉网络、Banyan 榕树网络等^[4-8]。由于各种光网络的连接函数、时间代价、网络复杂度等各不相同,因此在实际应用中具有不同的特点。与混洗交换网络和全交叉网络相比,榕树网络的结构更简单、实现成本更低、能量损失更小,因此自由空间榕树交换网络在光子交换系统以及并行处理计算机系统中倍受关注。根据网络结构的不同,榕树网一般可分为两类:SW 榕树网络和 CC 榕树网络。其中,SW 榕树网络是一种等价网络,迄今为止已有大量文献^[9-13]对其拓扑等价理论以及光学实现方法进行了详细的研究,做了很多有益的工作。不仅证明了 SW 榕树网络与 Omega 网络、全交叉网络、Benes 等网络的拓扑等价,而且还提出了 SW 榕树网具体的光学实现方式。与之相反,由于 CC 榕树网是一种非等价的网络,所以目前对 CC 榕树网的研究还不是太多。在文献^[14-15]中,作者详细的讨论了(2,2,3)矩形 CC 榕树网(Rectangular CC-Banyan network),提出了一种实现该类榕树网的光学方法。该项工作对于指导通过光学手段实现榕树网的研究具有重要的意义,为后面的工作奠定了很好的基础。不过,这些工作基本上都集中在对(2,2,3)矩形榕树网的讨论上。本文与之不同的是:对另外一种结构和功能更加复杂的(3,3,2)矩形 CC 榕树网进行了研究,并提出了其光学实现方法。本文的工作是对 CC 榕树网结构特点和性能研究的补充和完善,具有一定的实际意义。

2 (3,3,2)矩形CC榕树网

2.1 构造原理

榕树网代表了一类光互连网络。我们引入 (S, F, L) 定义榕树网, S 表示榕树网络中节点开关的输出端口数目, F 表示节点开关的输入端口数,而 L 则表示榕树网络的互连级数,对应的节点级数为 $L+1$ 。在榕树网络中,如果各节点级中节点开关的输出端口数相等均等于 S ,而且各输入端口数也相等均等于 F ,这样的榕树网络称为规则(Regular)榕树网络。对于规则榕树网络,如果满足 $S=F$,则这样的榕树网络就是矩形(Rec-

tangular)榕树网络。反之, $S \neq F$ 称为非矩形(Nonrectangular)榕树网络。本文讨论的就是 $S=F=3, L=2$ 的矩形 CC 榕树网络。该网络和文献^[14-15]中讨论的(2,2,3)矩形 CC 榕树网的网络结构、连接特点以及节点开关的端口数都不相同。下面首先讨论(3,3,2)矩形 CC 榕树网的构成原则。

对于(3,3,2)矩形 CC 榕树网,其互连级数为2,节点级为 $2+1=3$ 级,依次标记为 Level 0, Level 1, Level 2。各级节点开关输入输出端口数都是3,即该网络由 3×3 的节点开关按照一定的互连规则连接而成。而且各节点级包含有 $F^L=3^2=9$ 个节点开关,依次标记为0,1,2,3,4,5,6,7和8。各节点开关用 $(L, \text{node number})$ 表示,其中 L 表示该节点开关所处的节点级,node number则表示各节点开关在该级中的位置标记。各节点开关输入端口从右到左依次标记为0,1, ..., $F-1$,即0,1,2。各输出端口从左到右依次标记为0,1, ..., $F-1$,即0,1,2。如图1所示。

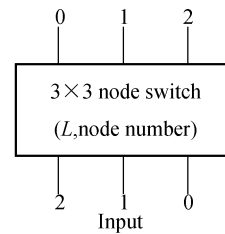


图1 3×3节点开关的标识

Fig. 1 Attributes of 3×3 node switch

利用伪 PASCAL 代码的流程表示 (F, F, L) 矩形 CC 榕树网络的构成原则,也即描述节点开关 (k, n) 的各输出端口与下一级 $k+1$ 级节点开关的输入端口的连接关系。 $0 \leq k < L, 0 \leq n < F^L$ 。

```

begin
for(each level ∈ [0 upto L-1])
begin
delta = Flevel
for(each switch ∈ [0 upto FL-1])
for(each p ∈ [0 upto F-1])
begin
connect pth port of (level, switch) to pth
port of (level+1, (switch + p × delta) mod FL)
end
end
end
end

```

其中 $\text{delta} = F^L$ 表示各节点级循环位移量, mod 表示取余数运算。该伪代码程序表示: 从 $0 \sim L-1$ 各节点级中, 各节点开关(从 $0 \sim F^L-1$) 的第 p 输出端口与下一节点级中位置标志为 $(\text{level} + 1, (\text{switch} + p \times \text{delta}) \bmod F^L)$ 的节点开关的第 p 输入端口连接。对于 $(3, 3, 2)$ 矩形 CC 榕树网, $F = S = 3, L = 2, F^L = 9$, 第 0 级到第 1 级的循环位移量 $\text{delta} = F^L = 1$, 即第 0 级位置标记为 $(0, \text{switch})$ 的节点开关的第 p 输出端口 ($0 \leq p \leq 2$) 与

第 1 级位置标记为 $(1, (\text{switch} + p) \bmod 9)$ 的节点开关的第 p 输入端口连接, $0 \leq \text{switch} \leq 8$ 。第 1 级到第 2 级的循环位移量 $\text{delta} = 3$, 即第 1 级位置标记为 $(1, \text{switch})$ 的节点开关的第 p 输出端口与第 2 级位置标记为 $(2, (\text{switch} + p \times 3) \bmod 9)$ 的节点开关的第 p 输入端口连接。按照这样的构造原则, 可以得到 $(3, 3, 2)$ 矩形 CC 榕树网络的拓扑结构, 如图 2 所示。下面讨论该网络的路由法则。

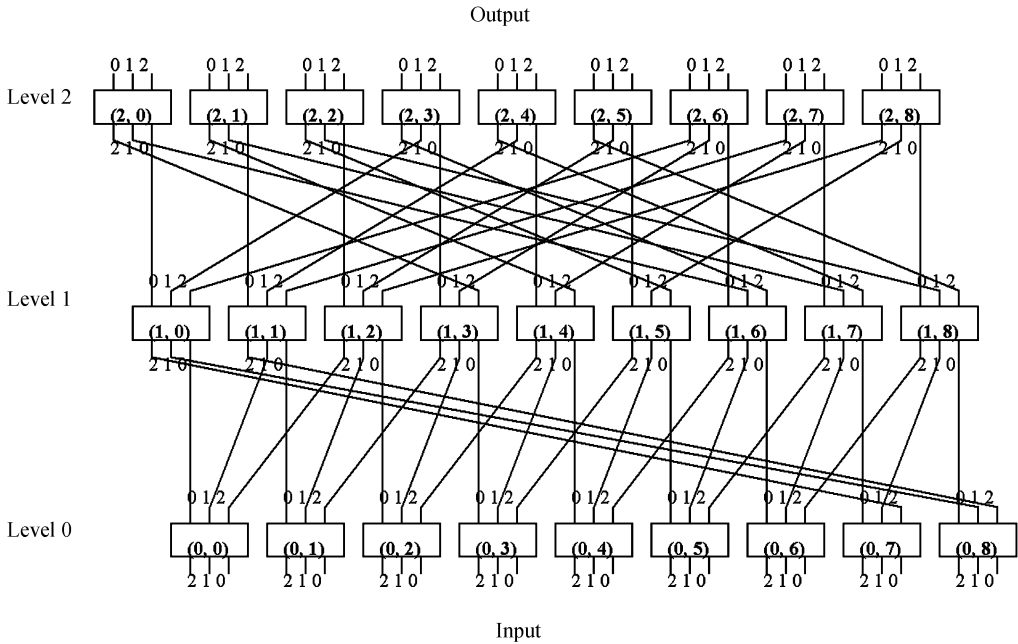


图 2 (3,3,2) 矩形 CC 榕树网拓扑图

Fig. 2 Topological graph of (3,3,2) rectangular CC-Banyan network

2.2 路由法则

建立输入级 Level 0 的节点开关 $(0, n)$ 与输出级 Level 2 节点开关 $(2, m)$ 的连接通道, $0 \leq n, m \leq 8$, 根据榕树网的构造原则和各节点级间的循环移位量, 节点 $(0, n)$ 的 3 个输出端口, 即第 0、第 1 和第 2 输出端口分别与节点 $(1, n \bmod 9)$ 的第 0 输入端口、节点 $(1, (n+1) \bmod 9)$ 的第 1 输入端口、节点 $(1, (n+2) \bmod 9)$ 的第 2 输入端口连接。若将 Level 2 作为输入级, 而 Level 0 作为输出级, 则 Level 2 级中节点开关 $(2, m)$ 的 3 个输出端口, 即第 0、第 1 和第 2 输出端口分别与 Level 1 中节点 $(1, m \bmod 9)$ 的第 0 输入端口、节点 $(1, (m+3) \bmod 9)$ 的第 1 输入端口、节点 $(1, (m+6) \bmod 9)$ 的第 2 输入端口连接。在节点组 $\{ (1, n \bmod 9), (1, (n+1) \bmod 9), (1, (n+2) \bmod 9) \}$ 和节点组 $\{ (1, m \bmod 9), (1, (m+3) \bmod 9), (1, (m+6) \bmod 9) \}$ 中必定存在一共同节点 $(1, q) = \{ (1, n \bmod 9), (1, (n+1) \bmod 9), (1, (n+2) \bmod 9) \} \cap \{ (1, m \bmod 9), (1, (m+3) \bmod 9), (1, (m+6) \bmod 9) \}$ 。该节点就是路由通道中 Level 1 级的交换节点, 该节点的输入输出端口也因此而确定。该操作如图 3 所示, 其中 $0 \leq a, b \leq 2$, 分别表示节点 $(1, q)$ 的输入和输出端口序数。这样便完成了节点 $(0, n)$ 与 $(2, m)$ 间路由通道的连接。

建立输入级 Level 0 的节点开关 $(0, n)$ 与输出级 Level 2 节点开关 $(2, m)$ 的连接通道, $0 \leq n, m \leq 8$, 根据榕树网的构造原则和各节点级间的循环移位量, 节点 $(0, n)$ 的 3 个输出端口, 即第 0、第 1 和第 2 输出端口分别与节点 $(1, n \bmod 9)$ 的第 0 输入端口、节点 $(1, (n+1) \bmod 9)$ 的第 1 输入端口、节点 $(1, (n+2) \bmod 9)$ 的第 2 输入端口连接。若将 Level 2 作为输入级, 而 Level 0 作为输出级, 则 Level 2 级中节点开关 $(2, m)$ 的 3 个输出端口, 即第 0、第 1 和第 2 输出端口分别与 Level 1 中节点 $(1, m \bmod 9)$ 的第 0 输入端口、节点 $(1, (m+3) \bmod 9)$ 的第 1 输入端口、节点 $(1, (m+6) \bmod 9)$ 的第 2 输入端口连接。在节点组 $\{ (1, n \bmod 9), (1, (n+1) \bmod 9), (1, (n+2) \bmod 9) \}$ 和节点组 $\{ (1, m \bmod 9), (1, (m+3) \bmod 9), (1, (m+6) \bmod 9) \}$ 中必定存在一共同节点 $(1, q) = \{ (1, n \bmod 9), (1, (n+1) \bmod 9), (1, (n+2) \bmod 9) \} \cap \{ (1, m \bmod 9), (1, (m+3) \bmod 9), (1, (m+6) \bmod 9) \}$ 。该节点就是路由通道中 Level 1 级的交换节点, 该节点的输入输出端口也因此而确定。该操作如图 3 所示, 其中 $0 \leq a, b \leq 2$, 分别表示节点 $(1, q)$ 的输入和输出端口序数。这样便完成了节点 $(0, n)$ 与 $(2, m)$ 间路由通道的连接。

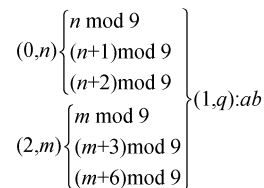


图 3 路由规则操作过程

Fig. 3 Operational process of routing rule

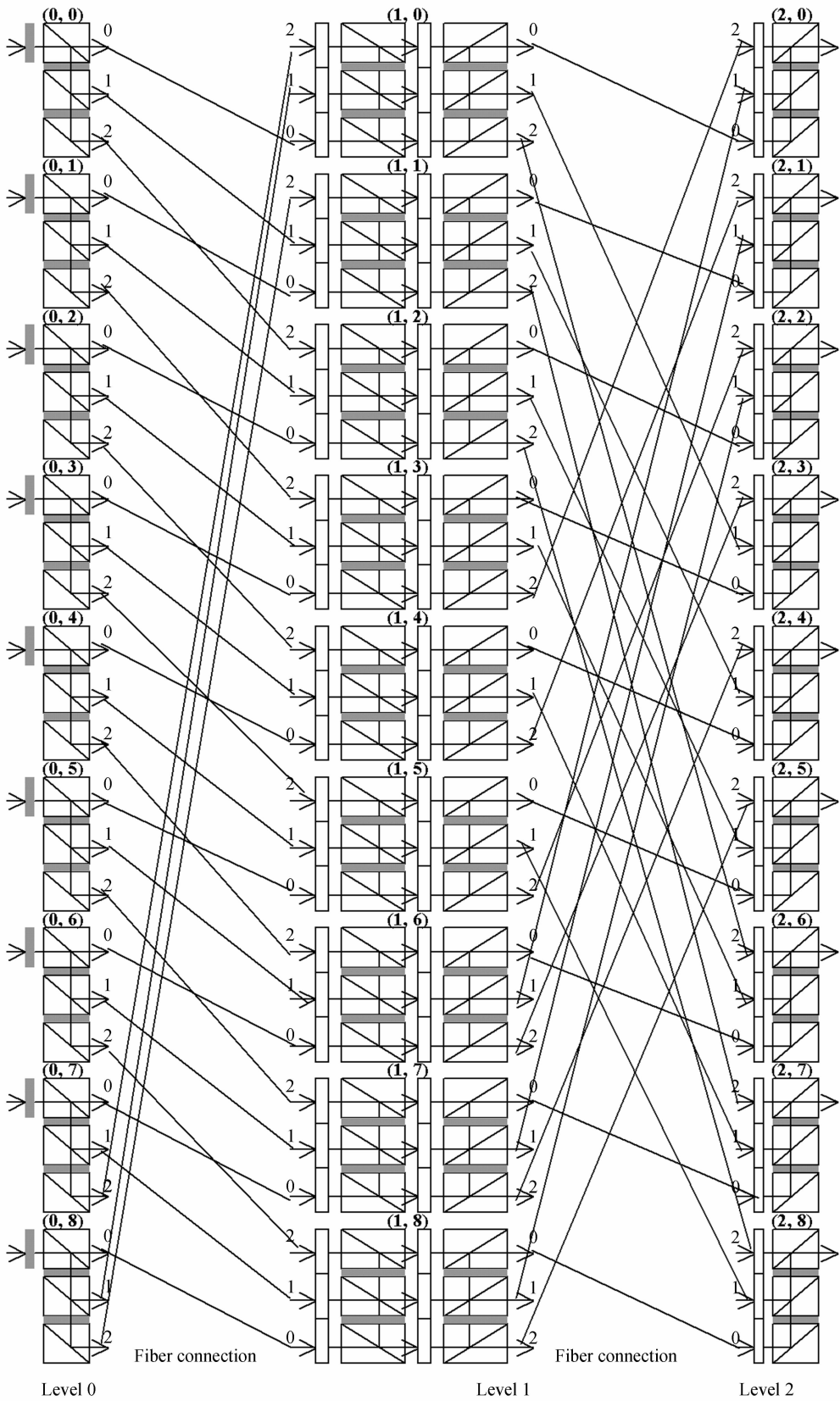


图 4 (3,3,2)矩形 CC 榕树网络实验模块

Fig. 4 Experimental setup of (3,3,2) rectangular CC-Banyan optical network

3 榕树网的光学实现

对于图 2 所示的(3,3,2)矩形 CC 榕树网,设计了如图 4 所示的光电实验模块。偏振分光棱镜(Polarizing Beam-Splitter,PBS)和位相型空间光调制器(Phase Spatial Light Modulator,PSLM)分别构成 Level 0 级的 1×3 、Level 1 级的 3×3 和 Level 2 级的 3×1 节点开关单元,各级节点开关单元间的连接通过光纤实现。下面对该实验模块各级节点开关单元的结构以及功能进行详细的分析。

Level 0 级中各 1×3 节点开关的结构都一样,如图 5 所示。入射光为 P 偏振光,位相型空间光调制器 PSLM 在外加电压作用下,PSLM 的每个像素处于激活态,可以产生 π 的位相差,设此时状态为“1”;反之,无外加电压时,PSLM 的每个像素处于非激活态,不产生位相差,状态为“0”。通过对 PSLM₁、PSLM₂ 和 PSLM₃ 上外加电压的控制,可以方便地调整通过各空间光调制器的偏振光的偏振态,从而实现所需的路由。表 1 为 1×3 节点开关单元各端口输出所对应的 PSLM 的状态以及输出光的偏振态。

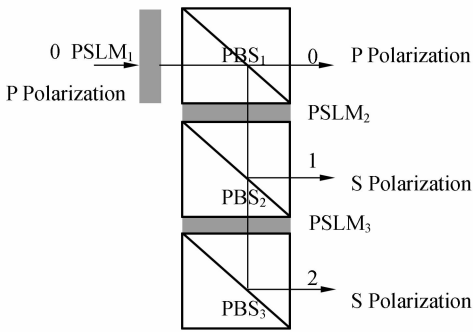


图 5 1×3 光开关

Fig. 5 1×3 optical switch

表 1 1×3 光开关状态表

Tab. 1 State-table of 1×3 optical switch

PSLM ₁	PSLM ₂	PSLM ₃	Output port	Polarization
0			0	P
1	0		1	S
1	1	1	2	S

Level 1 级中各 3×3 节点开关的结构也都一样,如图 6 所示。表 2 为 3×3 节点开关实现光信号路由对应的 PSLM 状态以及各输出端口所对应的偏振态。由表 2 可知,根据对各 PSLM 的状态的调整,该节点开关单元可以实现信号光任意端口的输出,而且有些端口的输出还存在一定的简并度,即从该端口输出的信号光的路径选择方式不只一种,这样就可以有效地避免路径的冲突或阻塞。同样,Level 2 级中的各 3×1 节点开关单元的结构也一样,如图 7 所示。各输入输出端口对应的信号光的偏振态以及各 PSLM 的状态如表 3 所示。

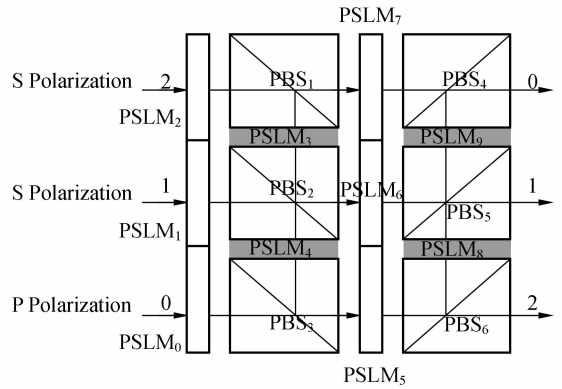


图 6 3×3 光开关

Fig. 6 3×3 optical switch

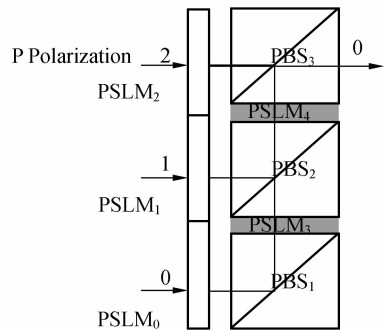


图 7 3×1 光开关

Fig. 7 3×1 optical switch

表 2 3×3 光开关状态表

Tab. 2 State-table of 3×3 optical switch

Input port	Input polarization	PSLM									Output port	Output polarization	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8			9
0	P	0					1			1	1	0	S
		0					1			0		1	S
		0					0					2	P
1	S		1					1			0	0	S
			0			0	0			1	1		
		1						0				1	P
		0				0	0			0			S
		0				0	1					2	P
2	S			1					0				P
			0	0				0			0	0	S
		0	1	1	0					1	1		S
		0	0				1					1	P
		0	1	1	0					0			S
		0	1	1	1						2	P	

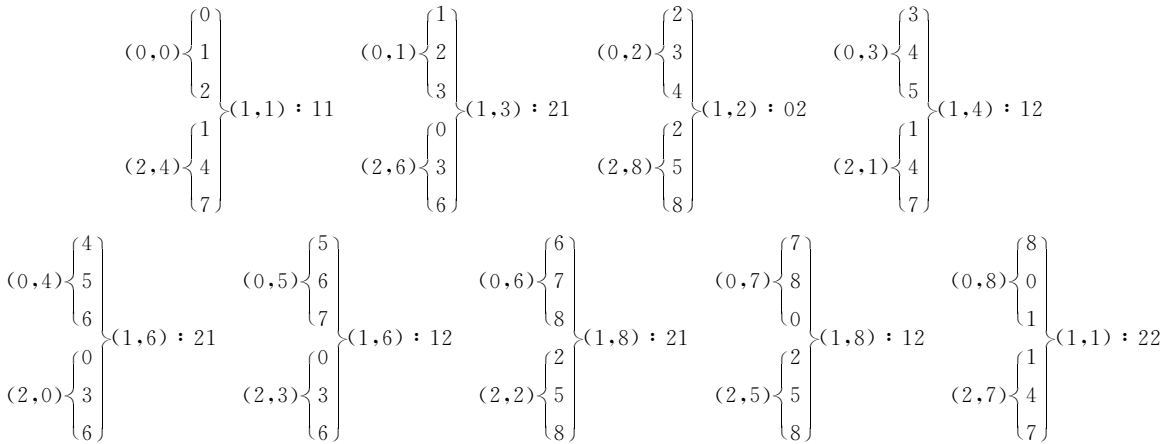


图 8 路由操作过程

Fig. 8 Operational process of routing

表 3 3×1 光开关状态表

Tab. 3 State-table of 3×1 optical switch

Input port	Input polarization	PSLM				Output polarization
		0	1	2	3	
0	S	0		1	1	S
	P	1		1	1	S
1	S		0		0	S
	P		1		0	S
2	P			0		P

4 讨论与分析

现在对图 4 所示的 (3,3,2) 矩形 CC 榕树网光电实验模块的功能进行讨论与分析。为了简单起见,这里仅分析实验模块实现信号光的交换与排序操作。例如,输入信号光的序列为 (0 1 2 3 4 5 6 7 8), 通过实验模块的作用实现任意序列 (4 6 8 1 0 3 2 5 7) 的输出, 即完成如下的操作:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 4 & 6 & 8 & 1 & 0 & 3 & 2 & 5 & 7 \end{pmatrix}$$

操作过程如图 8 所示,对应的各级 PSLM 的状态和输出光的偏振态如表 4 所示。图 8 所示的路由操作过程确定了 Level 1 级中的节点开关单元,以及对应的输入输出端口序号。表 4 则表明了通

过对各级空间光调制器状态的调整,完成了需要的选路。从最后的结果来看,该实验模块很好地实现了输入信号的交换与排序。由于 3×3 节点开关设计的灵活性,在模块功能的实现过程中通过不同路径的选择,可以较好地避免路径的冲突与阻塞,实现信号光所需要的操作。

表 4 各级位相型空间光调制器的状态表

Tab. 4 State-table of each stage of PSLM

Input signal	1×3 switch PSLM				3×3 switch PSLM								3×1 switch PSLM				Output signal	Polarization		
	1	2	3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2			3	4
(0, 0)	1	0			1										1		0		(2, 4)	S
(0, 1)	1	1	1			0	0				1				1		0		(2, 6)	S
(0, 2)	0			0						0						0			(2, 8)	P
(0, 3)	1	0			0			0	1							0			(2, 1)	P
(0, 4)	1	1	1			0	0				1				1		0		(2, 0)	S
(0, 5)	1	0			0			0	1							0			(2, 3)	P
(0, 6)	1	1	1			0	0				1				1		0		(2, 2)	S
(0, 7)	1	0			0			0	1							0			(2, 5)	P
(0, 8)	1	1	1			0	1	1	1							0			(2, 7)	P

表 5 实验结果

Tab. 5 Experimental results (operating wavelength: 1 550 nm)

Switch unit	Interchannel crosstalk (dB)	Insertion loss (dB)	Return loss (dB)	Driving power (V)
1×3	0-0	-50.28	0.82	-46.81
	0-1	-48.22	0.91	-45.08
	0-2	-42.68	0.98	-43.26
	0-0	-41.16	1.26	-41.34
3×1	1-0	-46.38	0.95	-42.51
	2-0	-48.34	0.87	-44.31

5 实验测试

针对上面设计的 1×3 和 3×1 光开关单元,对其插入损耗、串扰、回波损耗等参数进行了初步的实验检测。实验中采用的位相型空间光调制器的对比度大约为 $100:1$,光隔离度大约是 30 dB 左右,插入损耗 $< 1.5 \text{ dB}$,阈值电压约为 $4 \sim 4.5 \text{ V}$ 。偏振分光棱镜的参数为:对于 P 光,对比度 $S/P = -30 \text{ dB}$,透过率大约是 96.8% ;对于 S 光,对比度 $P/S = -30.2 \text{ dB}$,反射率大约为 96.2% 。

在实验中,以 1550 nm 波长作为信号光源,采用截断法进行测量,测得各开关单元实现信号光交换动作时各端口对应的串扰,以及利用回波损耗测试仪对光开关各输出端口光功率分别进行测试时,测得的插入损耗和回波损耗分别如表 5 所示。各开关单元的交换时间取决于所采用的位相型空间光调制器的响应速度,目前可以达到毫秒级。

从表 5 中可看出, 1×3 和 3×1 光开关单元的主要性能指标均较好,具有插损小、串扰低,可靠性高等特点。利用相同的测试手段也可以对 3×3 开关的性能参数进行测定。由于各光开关单元还处于初步的调试阶段,随着实验的继续深入和有关实验设备的调整完毕,该光开关相关性能参数的测试指标将会进一步提高,相信在下一阶段对 $(3, 3, 2)$ 矩形 CC 榕树网实验模块整体性能参数的测试过程中,通过选择消光比好,插损小的位相型空间光调制器和偏振分光棱镜,精密控制各光学元件的对位、装配、调试和封装,将有效地提高各单元器件间的耦合效率和减小光能量的损

耗,从而提高(3,3,2)矩形CC榕树网实验模块的实用性。

6 结 论

本文对(3,3,2)矩形CC榕树网进行了详细的研究,根据其构造原则得到了该榕树网的网络拓扑图,并由榕树网的路由法则,解决了信号光路径选择的问题。最后,设计了实现(3,3,2)矩形CC榕树网功能的光学实验模块。该实验模块由位相型空间光调制器和偏振分光棱镜构成各级节

点开关单元,由光纤完成级间互连。通过对各级节点开关单元功能特点的分析可知,对各级位相型空间光调制器的状态进行调整,该光学实验模块可以很好地完成(3,3,2)矩形CC榕树网络所具备的功能。理论分析和实验检测表明,该实验模块具有插损小、串扰低、可靠性高等特点。相信在光通信和光互连网络技术中应该会有有一定的应用。作者下一步的工作是完成该光学实验模块的封装与测试,由于该实验模块的结构和控制比较复杂,要实现这一步还有很多问题需要解决。

参考文献:

- [1] 刘泽文, 宣云, 雷啸锋, 等. 高阻硅上 RF-MEMS 共面波导设计及测量研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 158-164.
LIU Z W, XUAN Y, LEI X F, *et al.*. Design and measurement of RF-MEMS CPW on HRS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2):158-164. (in Chinese)
- [2] 张燕君, 陈才和, 吴波, 等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):77-82.
ZHANG Y J, CHEN C H, WU B, *et al.*. Structure design of Mach-Zehnder interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):77-82. (in Chinese)
- [3] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(1):43-47.
SHAO B, SUN L N, QU D SH, *et al.*. Design of fine pointing tip/tilt mirror of ATP system for free space optical communication[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):43-47. (in Chinese)
- [4] 王健全, 顾皖仪. 光网络中的分布式故障定位方法[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 69-73.
WANG J Q, GU W Y. Distributed fault location in MESH optical networks[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(1): 69-73. (in Chinese)
- [5] 何军, 刘德明, 李薇, 等. 混合光波长转换在波分复用光网络中的应用[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 963-966.
HE J, LIU D M, LI W, *et al.*. Utilization of hybrid optical wavelength conversion in wavelength division multiplexing optical networks[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(8):963-966. (in Chinese)
- [6] 纪越峰, 柏琳, 徐大雄. 全光地址识别机理的研究[J]. 光学学报, 2004, 24(1):37-41.
JI Y F, BAI L, XU D X. Study of address recognition by all-optical method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(1): 37-41. (in Chinese)
- [7] 罗风光, 曹明翠, 谢胡, 等. 4×4 自由空间光开关结构及其矩阵分析[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1677-1682.
LUO F G, CAO M C, XIE H, *et al.*. 4×4 free-space optical switch structure and its matrix analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1677-1682. (in Chinese)
- [8] WEI L, JUN H, YUAN L, *et al.*. An efficient algorithm for optimal allocation of wavelength converters in wavelength routing optical network[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(8):449-452.
- [9] 刘中林, 曹明翠, 李洪谱, 等. 光学榕树网络与全混洗网络之间的转换及实现[J]. 中国激光, 1996, 23(9):852-856.
LIU ZH L, CAO M C, LI H P, *et al.*. Transformations between optical banyan networks and perfect shuffle networks and their implementation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1996, 23(9):852-856. (in Chinese)
- [10] JAHNS J. Optical implementation of the banyan network[J]. *Opt. Commun.*, 1990, 76(5/6):321-324.
- [11] MIYAZAKI D, TANIDA J, ICHIOKA Y. Optical implementation of the banyan network using a sagnac inverter with a patterned mirror[J]. *Opt. Commun.*, 1992, 93(5/6):283-288.

- [12] SEO S W, FENG T Y. Composite banyan network[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 1995, 6(10):1043-1054.
- [13] JIANG X H, HO P H, HORIQUCHI S. Performance modeling for all-optical photonic switches based on the vertical stacking of banyan network structures[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(8): 1620-1631.
- [14] 彭海峰, 刘立人, 梁丰. CC 榕树网络及其光学实现[J]. *光学学报*, 1996, 16(6): 889-892.
PENG H F, LIU L R, LIANG F. CC-Banyan network and its optical implementation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(6):889-892. (in Chinese)
- [15] PENG H F, LIU L R, WANG B Q, *et al.*. Optical implementation of regular rectangular CC-Banyan network by using polarizing beam splitters[J]. *Opt. Commun.*, 1995, 117:37-42.

作者简介:杨俊波(1974—),男,四川西昌人,四川大学电子信息学院博士研究生,主要研究方向为信息光学,光通信,光互连;E-mail:yangjunbo008@sohu.com

苏显渝(1944—),男,四川大学电子信息学院教授,博士生导师,研究领域为信息光学,光学三维传感。