

文章编号: 0258-7025(2006)03-0351-05

一种低成本智能全光波长交叉交换连接器的设计和实现

李 蔚, 刘德明, 杨春勇, 吴春雨, 朱积砚, 周 鑫, 毛忞婧

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 报道了一种采用多个 4×4 , 一个 8×8 光开关以及固定波长转换器组成的大容量全光波长交叉交换连接器 (OWXC) 的新颖结构, 可以实现低串扰、低延迟的无阻塞光信号交换和转换, 降低成本 30% 左右。同时, 提出了应用于该结构的智能控制信号传输帧结构以及通过设置可用波长被锁定的时间门限来实现三种具有服务等级的智能光链路建立方式。实验结果显示, 一条光链路从被断开到自动重新建立的时间是 22 ms, 可以实现人工、自动和半自动三种链路建立方式以及三根光纤, 24 个波长的全无阻塞交换, 交换容量达到 960 Gb/s。对组建大容量的光交叉连接 (OXC) 具有参考意义。

关键词 光通信; 全光波长交叉交换连接器; 新型光开关矩阵结构; 波长转换器; 光链路建立; 资源锁定时间门限
中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Design and Implementation of a Novel Low Cost Intelligent Optical Wavelength Cross Converter Connect

LI Wei, LIU De-ming, YANG Chun-yong, WU Chun-yu,
ZHU Ji-yan, ZHOU Xin, MAO Min-jing

(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Based on 4×4 and 8×8 optical switches and static wavelength converters in a novel optical switch matrix, a large capacity intelligent all-optical wavelength cross and converter connect (OWXC) is proposed. It can realize a low crosstalk and low delay zero-blocking probability for a link setup which can reduce cost to 30%. In the intelligent control software, a very simple control frame for control information transportation is proposed along with an optical link setup method by using three kinds of resource lock threshold to realize a classification of service (CoS) of link establishment. The experiment shows that the time from a link blocking to establishing is 22 ms. And it can realize automatic, self-automatic and human modes three link establishment methods. The whole cross capacity is 960 Gb/s with three fibers and 24 wavelengths and zero-blocking probability which is very useful for automatic switching optical network (ASON).

Key words optical communication; all-optical wavelength cross converter connect; novel optical switch matrix architecture; wavelength converter; optical link establishment; resource lock time threshold

1 引 言

智能全光光交叉连接 (OXC) 是第三代光交叉连接, 具有光信号 (波长、分组和突发包) 动态交叉连接、转换、链路建立、保护和恢复功能等智能功能, 是

实现自动光网络 (ASON) 的核心器件。光交叉连接中的核心光电子器件是光开关矩阵 (OSM) 和波长转换器 (WC)^[1]。如果光开关矩阵的结构设计不好, 会导致信号的劣化, 引起信号的串扰、延时^[2]。

光交叉连接中光开关矩阵有多种结构, 常见的

收稿日期: 2005-06-29; 收到修改稿日期: 2005-11-28

基金项目: 国家 973 计划 (2000036605), 863 计划 (2003AA312060) 和武汉市科技攻关项目 (2002100513004) 资助课题。

作者简介: 李 蔚 (1968—), 女, 湖北武汉人, 华中科技大学光电子工程系副教授, 博士研究生, 主要从事全光网网络的研究。E-mail: weilee020116@tom.com

有交叉交换矩阵(crossbar)和贝奈斯结构。在这些结构中,输入光信号经过解复用后,直接送入光开关矩阵中进行交换,有的再送入波长转换器中实现波长的转换,串扰很大。这些大型的光开关矩阵为了控制串扰,需要一些特别的算法来控制信号的交叉连接^[2,3]。控制复杂,同时,带来信号的延迟等,对光分组和突发交换是不能容忍的。文献[3]进行改进,采用小端口的 1×2 和 2×1 光开关与小规模的光开关矩阵组合实现大容量的光交叉连接以减少串扰。文献[4]进一步改进,可以采用多个 16×16 的微机电系统(MEMS)-光开关矩阵组合代替交叉交换矩阵,但是其中每个光链路的建立都需要通过几次光开关的操作才能完成,每次开关的动作时间在毫秒量级,从而导致信号延迟。

如果能够减少在一个光开关矩阵上进行交换的光信号的数量,就可以减少串扰。同时减少一条光链路在通过一个光交叉连接需要光开关动作的次数就可以减少信号的延迟,缩短光链路建立的时间。

基于上述的思路,本文提出了一种新的光开关矩阵结构,采用目前技术成熟的 4×4 和 8×8 光开关^[5]组成许多小的光开关矩阵,通过将输入光信号分别送入这些小的光开关矩阵同时进行交叉选路的方式来实现大容量的波长交换,以达到减少串扰和交换时间的目的。同时,采用自行研制的基于半导体光放大器(SOA)的固定波长转换器取代动态波长转换器,以减少成本,实现无阻塞的链路建立。

2 新颖的光开关矩阵结构以及对串扰的减少

一般地,一个光交叉连接系统中的串扰主要由光开关、解复用器、复用器等三部分引入。以普通的 $N \times M$ 交叉交换矩阵结构为例,得到节点的串扰总系数为^[2]

$$R_{\text{node}} = M_{\text{sw}}^2 \sum_{i=1}^{2k-1} i + (N_k - 1)M_{\text{dmux}}M_{\text{mux}} + (M_{\text{sw}}^2 \sum_{i=1}^{2k-1} i + 1)M_{\text{mux}}(N_\lambda - 1) + (N_\lambda - 1)M_{\text{dmux}}M_{\text{mux}},$$

式中 M_{dmux} , M_{mux} , M_{sw} 分别为光交叉连接节点中复用器、解复用器和光开关带来的串扰系数,与器件有关。 N_k , N_λ 分别为输入到光交叉连接节点中的端口数和波长数量。显然,当 N_k/N_λ 减小后,总的串扰就会减少。

但是,当实现大容量交换时,输入的波长数是巨大的。同时由于掺铒光纤放大器(EDFA)增益带宽的限制,所有的波长又都集中在很小的一个范围内,必然导致带内和带外串扰。如果能把一个大的节点分成若干小的节点,每个节点的输入波长和端口数量即 N_k/N_λ 将大大减少,那么总串扰将减少。基于上述考虑,提出了一种新颖的光开关矩阵结构,如图1所示。这里所示意的是三纤输入,每个光纤中波长数相同,都是8个不同波长的结构,这种输入情况比较符合ITU-TG. 692建议中的有限波长数。

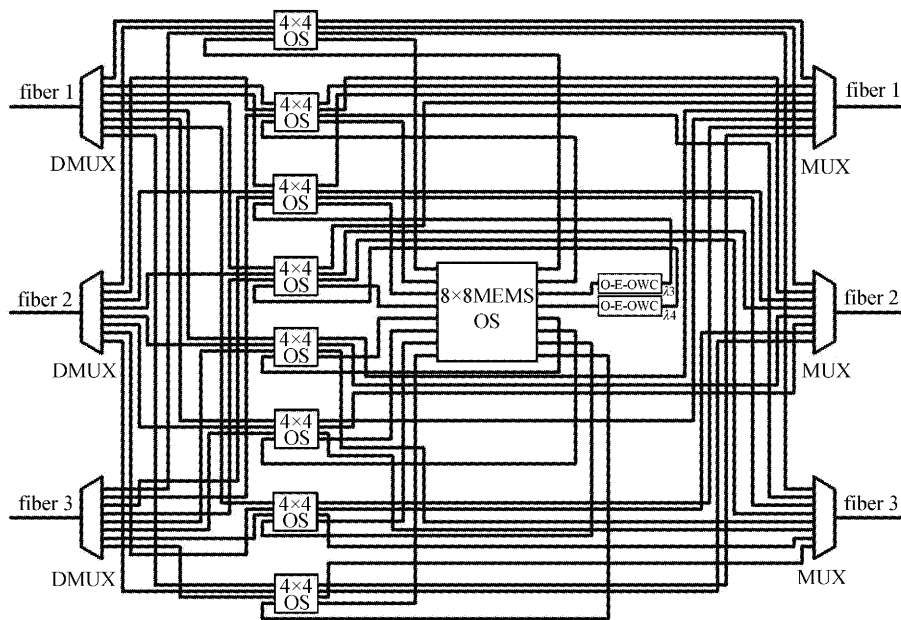


图1 一种新颖的低成本、低串扰、低延迟的光交叉连接

Fig. 1 A novel low cost crosstalk and delay OXC architecture

工作原理如下：三根光纤中的波长解复用后，每个波长将连接到一个对应的 4×4 机械光开关的一个端口， 4×4 光开关的三个端口连接到三根输入光纤的同一个波长，第四个连接到一个固定波长转换器的输出端口，当输入的信号不需要交换时，可以直接通过 4×4 光开关输出连接到对应的复用器的光纤上，这时不需要开关动作，信号的延迟非常小；如果发生波长冲突，就通过 4×4 光开关的操作输出连接到 8×8 光开关的输入端口，由 8×8 光开关根据网络和节点的资源状态，选择一个空闲的波长，连接到该波长的固定波长转换器的输入端口，将需要转换的信号转换到新的波长上，从而避免了波长的冲突，这时一条光链路的建立需要通过两次开关动作，与直通相比，有一些延迟，但是与普通的光交叉连接结构相比，可以减少一次开关的动作，这样就减少了信号延迟。这里， 4×4 开关起路由选择的功能， 8×8 实现需要转换的波长选择的功能。

由于每个 4×4 光开关的输入都是相同的三个波长，没有别的波长，所以串扰只与三个波长有关，是带内串扰，无带外串扰。一般的光交叉连接中，根据式(1)，由于每个波长信号都直接进入光开关矩阵，而不是像本文这样分别进入不同的 4×4 ，所以每个信号除了带内串扰外，还有大量的带外串扰，所以本结构中串扰将大大减少。需要波长转换的信号在进入 8×8 开关后，因为输入的是 8 个不同的信号，所以只有带外串扰，无带内串扰，总的串扰将大大减少。

如果扩展到 N 根光纤，每根光纤上有 M 个波长，则需要 M 个 $(N+1) \times (N+1)$ 光开关以及一个 $M \times M$ 光开关，以及 M 个固定的波长转换器。同时如果采用普通的结构，需要一个交换容量是 $(N \times M) \times (N \times M)$ 的巨大的光开关矩阵，以及 M 个动态全光谱的波长转换器才能实现无阻塞交换。可以计算它们的成本，目前光交叉连接的价格在 128×128 端口以下，每端口价格 1000 美元，以本文实验的光交叉连接为例，8 个 4×4 开关(已经国产化)和一个 8×8 微机电系统开关需要 18000 美元，8 个静态波长转换器(自己研制)需要 12000 美元，共 30000 美元。如果是普通光交叉连接需要一个 24×24 开关矩阵，要 24000 美元，8 个动态波长转换器，需要 24000 美元，共需要 48000 美元。本结构成本减低了 30% 以上。当交换的端口数在 128 以上时，随着端口数量的增加光交叉连接的价格是呈现指数增加的，所以大容量时，本文的结构将更具有成本优势。

3 控制软件的设计以及三种服务等级 (CoS) 的光链路建立

本文提出的智能全光波长交叉交换连接器 (OWXC) 包括光波长复用、解复用器、核心光开关矩阵、固定波长转换器、光功率均衡器、光放大器、控制系统和网管系统。

在自动光网络中，无论集中式还是分布式网管系统，各个节点或中央控制器必须实时动态了解网络的资源，可用的波长数，光链路数等，才能快速地为连接请求建立光链路并分配动态带宽^[6~8]。

在目前基于客户请求建立光链路的方式下，任一光交换节点一旦对到来的请求进行响应后，立即对其下游节点发送命令，要求为其准备空闲资源，下游节点收到请求后，会调用波长路由算法，查找可用的网络资源，包括：空闲光纤，波长等。一旦查找到了可用资源后，向上游节点反馈信息，建立连接，上下游节点之间就可以进行正式通信^[9]。

通常采用排队论为需要建立连接的呼叫请求进行处理，不具有服务等级。为了实现具有服务等级的光链路，通过设置资源被锁定的时间门限为连接请求设置等级。

具体原理如下：如果是最高等级的请求，一旦响应，将所有的空闲的资源锁定，并设定最长时间的资源锁定，以保证能将最好的资源(比如：光信噪比最高的链路)分配给呼叫，得到一种最高服务等级的光链路建立。

如果是次等级的请求，锁定的时间减少，如果在该时间段内，能找到可用资源则为其分配，同时，可以在可分配的次等级的资源中去查找，得到次等级的链路建立；如果超过设置的时间片，还没有找到可用的资源，就阻塞掉该请求。

最后是自动路由，节点响应后，设置一个最短的资源时间锁定门限，对可用分配的资源不加限制，在该时间片中，全光波长交叉交换连接器自动地查找可用资源，找到什么资源，就分配，得到最低等级的光链路建立。如果在这个最短的时间片内，没有可用资源就直接阻塞掉。通过这种方案，能实现一种简单的具有服务等级的光链路的查找。

在正式通信前，全光波长交叉交换连接器可能存在的四种状态：

1) 静止状态：全光波长交叉交换连接器没有从任何节点或路由器收到请求信息，并且它没有收到任何向前进行的响应或处理任何响应。

2) 请求状态:全光波长交叉交换连接器已经收到请求信号,它需要处理这个请求。

3) 初始化响应状态:节点已经收到请求信号,它需要产生一个相应的响应。

4) 进行状态:节点已经收到响应,它需要把过程进行下去。

每个全光波长交叉交换连接器通过管理数据结构来维持三个队列 Q_1, Q_2, Q_3 , 其中 Q_1 为还未处理的已收到信息的队列, Q_2 为已收到的即将处理的响应信号, Q_3 是指因暂时没有可用波长而处于等待状态的节点。 Q_3 中的每个请求都有一个保存的时间限制, 保存的时间与前面介绍的资源锁定时间一致, 这个时间的设置与网络的状态关联, 可以根据网络的状态动态调整。当时间限制达到后, 节点将收到一个超时信号。

具体的路由算法包括两个部分:一个部分是主体路由, 一个部分是刷新程序。主体路由:对资源可以直接满足的节点打开通道设置路由。刷新程序:包括通信的刷新和等待的刷新。通信的刷新主要是为了及时释放资源。等待的刷新的主要功能是及时考察阻塞的请求, 看其需要的资源是否空闲, 判断是否能进入通信。

在节点中, 由于呼叫请求建立连接具有突发性, 往往会造成控制信息处理不及时而导致阻塞^[6]。为了提高处理速度, 提出了一种简单的控制帧来传送控制信息, 该帧结构中有表示不同类型的请求和响应, 在接收节点处, 读出命令代码, 判断响应的请求类型。控制帧结构如表 1 所示, 表 2 为控制帧中连接信息的具体含义。

表 1 控制帧结构

Table 1 Frame structure of control information

Head	Connect information	Control information	CRC	End

表 2 连接信息的命令代码

Table 2 Detail code of the connect information in control frame structure

Operation name	Code
Human setup	$X \times 00$
Local upgrade	$X \times 01$
Lock time	$X \times 02$
Self-automatic setup	$X \times 03$
Type of establishment	$X \times 04$
CRC of address information	$X \times 05$

表 2 中的自动刷新时间等参数的设置与网络的拓扑结构等有关。将控制帧中的源地址、目的地址和连接建立的等级请求(表 2 中的建立连接类型)编成 2B 字节的连接信息, 取代原有的地址信息; 这样在目的节点处所处理的有关呼叫的连接请求的速度就加快。控制信息是将低层的信令和上层信令信息合并, 删除与光网络无关的信令字节, 得到与使用的波长标号、波长占用时间以及配置上告信息等控制信息。误码检验采用奇偶校验和的方法得到; 帧头和帧尾设定为两个不同的字节以便于程序中进行鉴别, 分别为 0×55 (即 01010101) 和 $0 \times AA$ (即 10101010)。这样在上层链路协议中即保留了与底层物理光网络资源有关的信息, 又具有 CoS 的自动链路建立信息。对实现自动光网络中一体化网管具有参考意义^[10]。

4 实验测试结果及讨论

智能的全光波长交叉交换连接器的实物如图 2 所示, 这里分别测试了 40 Gb/s 信号在光交叉连接中交换时, 信号的误码率、眼图等。40 Gb/s 信号由 40 Gb/s 的误码仪器产生, 8 个满足 ITU-TG. 692 建议波长的密集波分复用-连续 (DWDM-CW) 光波长, 通过掺铒光纤放大器放大后, 送入 40 Gb/s 外调制器, 产生 40 Gb/s 信号光后, 再通过分路器分成三路, 送入到全光波长交叉交换连接器中, 实现自动、半自动和人工控制三种方式的交换、转换, 分别测试信号的误码率和眼图。交换前后的 40 Gb/s 眼图如图 3(a), (b) 所示, 可以看到, 信号没有劣化, 可以实现全透明交换。

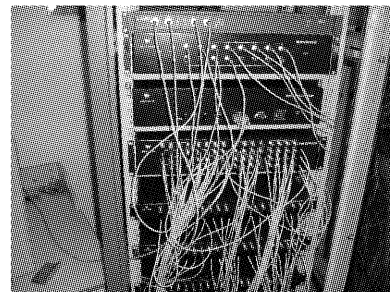


图 2 智能全光波长交叉交换连接器的实物图

Fig. 2 Photo of intelligent OWXC

图 4 显示的是一条光链路从断开到自动恢复、重新建立的时间测试结果图。

测试的方法是: 将输入的光信号分成两路, 一种经过光探头转换后送入示波器, 一路送入全光波长

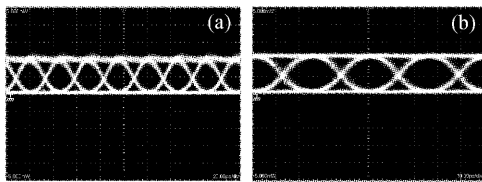


图 3 40 Gb/s 信号通过光交叉连接前(a)和后(b)的信号眼图

Fig. 3 40 Gb/s signal before (a) and after (b) OWXC

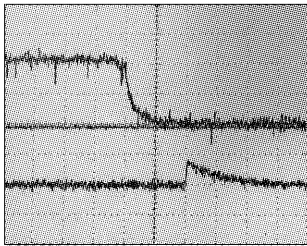


图 4 自动光链路建立时间的测试

Fig. 4 Test result of optical link automatic restoration and establishment time

交叉交换连接器。建立连接后,得到图 4 示波器上的上面一条曲线。再人为阻塞掉输入信号(可以断开输入光纤、关断输入信号的激光器或增加解复用器线路的衰减使信号恶化等),同时在示波器上监测被阻塞掉的信号交换或转换到另外一个波长和通道后产生的波形,如图 4 所示的下面的一条曲线,该曲线显示的是另外一个波长通道,这个通道原来是没有信号的,当被阻塞掉到的信号自动转换到该通道后,该通道出现光信号,并检测到光功率,从第一个通道信号消失到第二个通道信号建立所需要的时间就是信号自动恢复和连接建立的时间。

测试结果为 22 ms,该时间还包括示波器的光电探头的光电转换时间。这是采用自动光路由的方式恢复和建立的。在人工方式建立过程中,需要增加人工控制的时间。示波器下面一条曲线的输入通道是连接到全光波长交叉交换连接器中除了输入端口外的所有输出通道经过合波后的端口,所以单从示波器上无法确定是哪个全光波长交叉交换连接器的输出端口,但是可以从网管界面上得到到底是那个端口有输出。

实验结果显示,本智能全光波长交叉交换连接器具有快速的节点光链路保护和恢复功能。

5 结论

分别从智能型光交叉交换连接器的硬件设计和

控制软件上描述了一种新颖的低成本、低串扰、低延迟的全光波长交叉交换连接器的实现。

在结构设计上,试图通过硬件设计来减少信号延迟、串扰等非线性现象对信号的影响。提出了一种利用固定波长转换器与多个低成本小端口的 4×4 和 8×8 光开关实现大容量的光交换交叉矩阵光开关矩阵的方法,可以降低成本 30% 以上。设计并实现 24 个波长三根光纤总交换容量 960 Gb/s 的无阻塞、低串扰、低成本的波长交叉交换连接器。对构建大容量的光交叉连接具有一定的参考意义。

在软件控制上,通过设置可用资源被锁定的时间门限来实现一种具有服务等级的光链路建立方法,并提出了一种简化的控制信号传输帧结构,提高了光交叉连接对控制信息的处理速度,最终实现了 22 ms 自动光链路快速恢复建立时间。

参 考 文 献

- 1 Wei Li, Jun He, Yuan Li *et al.*. An efficient algorithm for optimal allocation of wavelength converters in wavelength routing optical network [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, 2(8):449~452
- 2 Li Fanlong, Sun Junqiang. Influence of crosstalk on the scalability of dense wavelength division multiplexing networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2):208~214
李凡龙,孙军强. 串扰对密集波分复用网络扩展性的影响[J]. *光学学报*, 2004, 24(2):208~214
- 3 Zong Lei, Li Yanhe, Zheng Xiaoping *et al.*. Study on homodyne crosstalk reduction in integrative OADM/OXC node [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, A29(1):57~60
宗磊,李艳和,郑小平等. 一体化 OADM/OXC 节点降低串扰结构研究[J]. *中国激光*, 2002, A29(1):57~60
- 4 Pin-Han Ho, H. T. Mouftah, Wu Jing. A scalable design of multigranularity optical cross-connects for the next-generation optical internet [J]. *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, 2003, 21(7):1133~1142
- 5 L. Wosinska, L. Thylen, R. P. Holmstrom. Large-capacity strictly nonblocking optical cross-connects based on microelectrooptomechanical systems (MEOMS) switch matrices: reliability performance analysis [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, 19(8):1065~1075
- 6 Wang Jianquan, Gu Wanyi. Distributed fault location in MESH optical networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(1):69~73
王健全,顾婉仪. 光网络中的分布式故障定位方法[J]. *中国激光*, 2004, 31(1):69~73
- 7 Li Wei, He Jun, Li Yuan *et al.*. A novel fast distributed dynamic lightpath setup algorithm [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(11):1329~1333
李蔚,何军,李源等. 一种快速动态分布式光链路建立方法[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(11):1329~1333
- 8 Zhao Jijun, Lei Lei, Ji Yuefeng *et al.*. A novel ASON-based dynamic restoration path setup protocol [J]. *Journal of Chinese Institute of Communications*, 2003, 24(5):85~93
赵继军,雷蕾,纪越峰等. 一种基于 ASON 的新型动态恢复路径建链协议[J]. *通信学报*, 2003, 24(5):85~93
- 9 Li Wei, He Jun, Liu Deming *et al.*. Wavelength assignment algorithm with load balance in a DWDM WRON [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(2):173~177
李蔚,何军,刘德明等. DWDM 波长路由网络光链路负载均衡的波长路由算法[J]. *光电子·激光*, 2004, 15(2):173~177
- 10 Wang Yun, Zeng Qingji, Yang Xudong. Integrated management of optical transport networks [J]. *Communications Technology*, 2002, 1:30~34
王云,曾庆济,杨旭东. 光传送网的一体化网管研究[J]. *通信技术*, 2002, 1:30~34