

# 光交换的时间及空间结构分析

胡卫生 孙卫强 何浩 金耀辉 郭薇 肖石林

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要** 拓扑学上的光网络由边(光传输)和节点(光交换)组成。从业务属性出发,基于连接和无连接方式,分析了光交换的时间结构,包括光分组和光突发的时间结构,以及不同动态性的光电路交换的时长及其度量标准,结合实验结果分析了最短光电路交换的时长极限。从多端口和大容量的要求出发,重点讨论了基于微电子机械系统(MEMS)开关、波长选择开关(WSS)和阵列波导光栅(AWG)的三种光交换结构。分析了光交换结构的扩展方法,并讨论了光交换的几个具有挑战性的问题,包括缓存和能耗问题。通过分析,希望从时间和空间两个维度更清晰地认识光交换的本质及其与电交换的异同。

**关键词** 光通信;光交换;时间结构;空间结构

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.010001

## Time Structure and Space Architecture of Optical Switching

Hu Weisheng Sun Weiqiang He Hao Jin Yaohui Guo Wei Xiao Shilin

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communications Systems and Networks,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** In topology, an optical network is composed of multiple edges (optical transmission) and nodes (optical switch). The service features and the time structure of optical switch stream supporting the service are discussed based on the connection and connectionless patterns. Examples include the length of optical packet and burst, and the length of optical circuit with high dynamic degree, which is defined in the internet engineering task force (IETF) standard. The measured results imply the achievable shortest length of optical circuits. The space architecture of optical switch is discussed. Examples include three architectures in terms of large port number and capacity, i. e., the optical switching structures based on micro-electro-mechanical system (MEMS), wavelength-selective switch (WSS), and arrayed waveguide grating (AWG). The architectural scalability of three ones discussed above is addressed. Some other challenging issues are also discussed, including optical buffer and power consumption. Hopefully, the paper is helpful for understanding the essence of optical switching and the relationship with the counterpart electronic switching.

**Key words** optical communications; optical switching; time structure; space architecture

**OCIS codes** 060.1155; 250.6715; 060.6718; 060.6719

## 1 引言

马克·吐温的小说“百万英镑”世人皆知,本文试图从光交换的视角来解读“百万英镑”。小说描写英格兰银行曾经发行两张百万英镑的大钞,用于和某国公对公交易之类的特殊目的,其中只有一张用过后就注销了,另一张则一直躺在英格兰银行的金库里。因打赌起兴,两位富豪兄弟到英格兰银行把另一张大钞买了回来,交给身无分文的小说主人公,戏剧故事就此展开了。主人公首先到小吃店一顿猛吃,末了掏出那张钞票,主人公虽然一贫如洗,囊中却并不羞涩。“请找钱吧。”小吃店当然找不开百万英镑,结果可想而知,一顿白

**收稿日期**: 2011-09-06; **收到修改稿日期**: 2011-11-07; **网络出版日期**: 2011-12-07

**基金项目**: 国家 863 计划(2008AA01A329)、国家自然科学基金(60825103)和上海市优秀学科带头人计划(09XD1402200)资助课题。

**作者简介**: 胡卫生(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信与光交换等方面的研究。

E-mail: wshu@sjtu.edu.cn

吃,还赚来惊羡的目光。往后的事不言自明,主人公想买什么就买什么,买完了,吆喝一声“找钱!”<sup>[1]</sup>。

就此打住。引述这个故事只是想说明光交换的粒度特性与钞票的面值有着极为相似的属性。过大面值的钞票是流通不了的。光交换的粒度也一样,需要增强“服务意识”,采取合适的粒度来提供服务。本文从光交换的业务属性和时间结构、光交换的空间结构以及光交换结构的扩展几方面进行分析,希望以此更好地认识光交换的本质。

## 2 光交换的业务属性和时间结构

### 2.1 光交换的业务属性

业务在不同的网络层次上表现出不同的属性,不妨从传输层、承载层、应用层三个方面来分析业务属性<sup>[2]</sup>。传输层业务:主要提供网络物理可靠保证以及业务承载节点之间的连接功能,提供光纤基础设施和波长出租业务、带宽和电路批发业务、物理层虚拟子网业务等。承载层业务:主要提供分组寻址、统计复用及路由功能,为不同业务或用户提供网络 QoS 保证和安全保证,也可以提供宽带专线、第 2 层和第 3 层虚拟专网等互联网接入和承载业务。应用层业务:主要提供各种网络应用,包括数据类业务、语音类业务、视频类业务、消息类业务、远程控制类业务等。

从交换方式上,可分为电路型和分组型交换属性的业务<sup>[3]</sup>。电路型业务:包括 SDH 业务及支持 G. 707 定义的 SDH 连接颗粒 VC-n 和 VC-n-Xv, OTN 业务及支持 G. 709 定义的 OTN 连接颗粒 ODUk 和 ODUk-n-Xv,透明或不透明的光波长业务等。分组型业务:包括各种速率的以太网业务、数据业务、存储局域网络业务等。

### 2.2 光交换的时间结构

任何业务都可以看成是时间上的一个信息流,最小的信息单位是比特,以 40 Gb/s 速率为例(下同),每比特时长 25 ps,每字节时长 200 ps,均处于皮秒量级。ATM 信元 53 Byte,时长 11 ns,以太网帧 64~1500 Byte,时长 13~300 ns,均处于纳秒量级<sup>[3,4]</sup>。ATM 信元和以太网或 IP 分组的时间结构参见标准定义,包括开销和载荷两部分,如图 1(a)所示,不必赘述<sup>[3]</sup>。

光交换的最小信息流是光分组交换(OPS)的一个光分组,目前没有统一的时长定义,但是,考虑到其突发特性,需要安排一定的保护字节和同步字节(大约 1  $\mu$ s),从传输效率上讲,光分组的时长大约 50  $\mu$ s 是合适的,位于微秒量级,一个光分组的载荷由成百上千个 IP 包汇聚组装而成<sup>[4,5]</sup>。为了实现基本的交换路由功能,一般采用低速的光标记(OL)来传输诸如地址、标记号、分组长度等信息,并且,光标记要先于光分组净荷一定的时间传输,称为保护间隔。典型的具有基本路由功能的光分组与光标记的时间结构图如图 1(b)所示。从中可以看出与 IP 分组结构的差异,尤其是光分组和光标记都是突发接收的,需要有一定的保护字节和同步字节,主要用于比特和字节的同步、时钟恢复、动态判决门限等。

光突发是一个更宽泛的关于信息流的描述[对应于光突发交换(OBS)]。光分组与光突发的时长均位于微秒量级是一个合理的假设,两者的区别更多在于是否有光缓存<sup>[4,6]</sup>。也有论文报道毫秒量级的光突发,这是因为其采用了微电子机械系统(MEMS)光开关,开关时

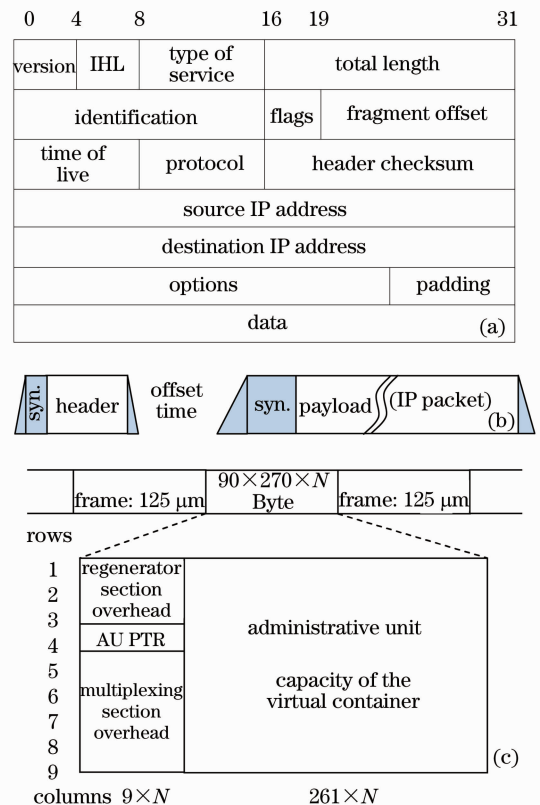


图 1 (a) IP 分组、(b)光分组和(c) SDH 帧的时间结构

Fig. 1 Time structures of (a) IP packet, (b) optical packet and (c) SDH frame

间本身就达到了毫秒量级,不可能实现微秒量级的光突发<sup>[7]</sup>。而 MEMS 在光电路交换(OCS)中更为常见,在 OBS 中反而极为罕见,详见第 3 节。

光电路交换早期都是静态的电路或光路,属于固定的连接,不妨假设其信息流的时长为无穷大。为了更好地向用户提供可动态配置的带宽,引入了分布式的控制平面,并在自动交换光网络(ASON)中定义了下面三种连接方式<sup>[8]</sup>。

1) 永久连接:属于指配型连接,指配过程由网管系统或人工完成,永久连接的保持时间会很长,不妨假设为年或月(兆秒量级)是合理的。

2) 交换连接:属于信令型连接,是由控制平面以信令消息形式建立的动态连接,为实时传送交换连接过程。为了适用于网络上所表现出的带宽变化特征<sup>[9]</sup>,比较合理的连接时长是天或小时(千秒量级),更短的连接时长(如 10 s)在 2.3 节详细讨论。

3) 软永久连接:属于混合型连接,介于交换连接和永久连接之间,由管理平面和控制平面共同完成。连接时长也介于上述两者之间,更接近于永久连接。例如为一些重要客户或重要活动提供临时性的宽带连接。

迄今为止并没有关于连接时长的标准定义,以上只是根据交换设备所具备的技术能力和应用场景的可能情况来分析相对合理的连接时长<sup>[8,9]</sup>。三种类型的连接时长也没有严格的区分界限,主要是因为其连接过程和操作流程的差异,必然导致连接时长上的差异。

需要说明的是,电路交换的 SDH 具有独特的帧结构,如图 1(c)所示,STM-N 帧有 9 行,每行由  $270 \times N$  个字节组成。每一帧是连续的(非突发),帧周期一律固定为  $125 \mu\text{s}$ ,即每秒传输 8000 frame。标准的 SDH 帧结构分为三个部分:1)净负荷,包含少量低阶通道开销字节;2)段开销,分为再生段开销(RSOH)和复用段开销(MSOH);3)管理单元指针(AU-PTR),用来指示净负荷的第一个字节在 STM-N 帧内的准确位置。各种信号装入 SDH 帧结构的净负荷区需经过三个步骤,即映射、定位、复用,低阶的 SDH 信号复用成高阶 SDH 信号由字节间插复用完成。

表 1 以 40 Gb/s 速率为例,各种交换的时长数据

Table 1 Lengths of various switch flew at 40 Gb/s bit rate

Classification	Length	Description
Unit bit	25 ps	Minimum
Unit Byte	200 ps	Minimum Byte
ATM cell	11 ns	53 Byte
Ethernet frame (minimum)	13 ns	64 Byte
Ethernet frame (maximum)	300 ns	1500 Byte
Optical packet	About 50 $\mu\text{s}$	Typical value
Optical burst	About 50 $\mu\text{s}$	Typical value, milliseconds sometimes
SDH frame	125 $\mu\text{s}$	Standard frame period
To be determined	Milliseconds	Maximum burst or minimum connection?
Switched connection	Minutes	Typically seconds to days
Soft permanent connection	Months	Typically weeks to months
Permanent connection	Years	Fixed connections

综上所述,表 1 总结了各种交换的时长数据及主要特征描述,结合图 1 所示的帧结构,可以看出电分组、光分组(含光突发)、光电路交换在时间结构上的差异,其本质上的差异大于其名称上的差异。

### 2.3 动态光交换连接的最短时长

作为一种动态的实时连接,交换连接可以提供快速的短时长、高效率的服务,但能达到的最小连接时长与控制平面和传送平面的性能有关。在此方面,我们进行了深入的实验研究,研究了各种时间参数之间的关系<sup>[10~13]</sup>,如图 2 所示。

实验测量基于 ASON 网络平台。图 2(a)是建路时长的统计结果,表现出明显的统计分布特征,具有平均值和方差等统计参数,两跳的平均建路时长稍大于 300 ms。从传输效率考虑,有效的连接保持时长至少是建路时长的数十倍,假定 10 s 量级是合理的,国家 863 计划高性能宽带信息网示范工程就采用了此参数

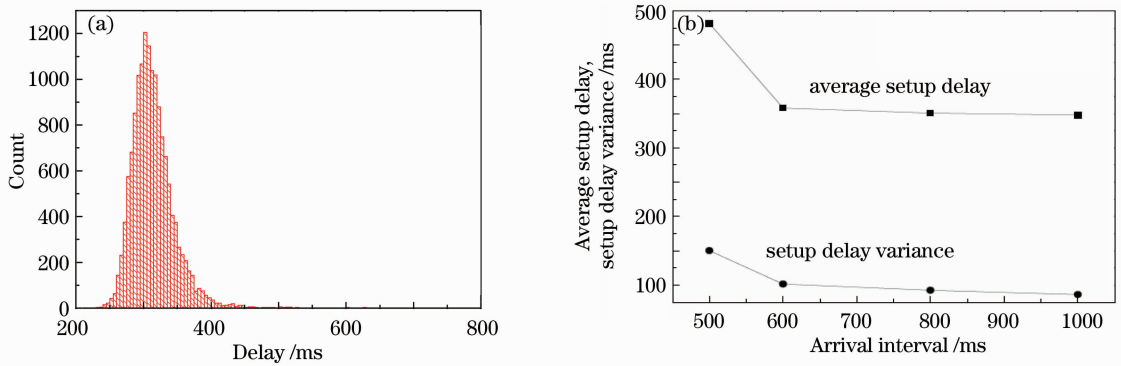


图 2 (a)延路时长分布;(b)平均建路时长和方差与到达时间间隔的关系

Fig. 2 (a) Distribution of setup delay; (b) average setup delay and setup delay variance versus arrival interval

高动态地开展视频点播业务<sup>[12,13]</sup>。

进一步测量了建路时长与到达间隔(包括建路时长、保持时长和拆路时长)的关系,结果如图 2(b)所示。实验发现当到达间隔从 1000 ms 缩小至 600 ms 时,建路时长几乎不受影响,但是,当缩小到 500 ms 时,建路时长陡然增加到 480 ms<sup>[10,11]</sup>。这表明,最小到达间隔宜设定为建路时长的 2 倍左右(实验中是 1.7 倍),这是最高动态的极限。但是,这时的传输效率很低,不足 50%,因此,交换连接时长最小值位于秒量级是合适的,ASON 不适合于毫秒量级的连接时长。

为了更科学地度量交换连接的性能,分析其量化参数,互联网工程任务组(IETF)发布了“GMPLS 网络中的标记交换路径动态提供性能度量”国际标准(RFC5814),较系统地规范了 GMPLS 光网络的动态性能与业务提供能力的指标体系(DPPM),包括:单向连接建立时延、双向连接建立时延、连接拆除时延、建立时延方差、百分比、阻塞概率、控制平面和数据平面差异延时等<sup>[14]</sup>。这方面的工作仍在继续,将有力地推动高动态交换式连接的发展,为高动态业务提供更科学的网络连接性能参数<sup>[15]</sup>。

## 2.4 光交换的多粒度结构

对于电分组、光分组、光突发言,传输的信息流是时长与接口速率的乘积,但对于电路光交换就不一定如此了,因为存在一个粒度问题。某一粒度传输的信息流量是时长  $T$  和粒度  $G$ (用其绝对带宽表示)的乘积。

图 1(c)所示的 SDH 帧结构也包括了不同粒度复用问题,包括 STM-0, STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 和 STM-256 等,存在固定的粒度之间复用路线图<sup>[16]</sup>。ASON 从 SDH 发展而来,粒度同 SDH,内部交换基于虚容器<sup>[12,13]</sup>。光传送网(OTN)的粒度包括 ODU0, ODU1, ODU2, ODU2e, ODU3, ODU3e2, ODU4, ODUflex(CBR)和 ODUflex(GFP)等<sup>[17]</sup>。光交叉连接(OXC)是透明的光交换技术(任意速率、任意格式),最小粒度是波长,并支持多个波长的组合,如波带,甚至光纤。讲到这里,有必要呼应文章开头的“百万英镑”了:“光纤”就有点“百万英镑”的意味。

## 3 光交换的空间结构

大卫·科波菲尔被誉为我们这个时代最了不起的魔术师,他曾经创造了无数令人惊叹的魔术,可以让美国自由女神像不翼而飞,从中国长城“穿”墙而过,“飘浮”在科罗拉多大峡谷上空,从百慕大三角海域“捞”上来一艘沉船<sup>[18]</sup>。如果我们惊叹于超越我们想象力的空间魔术大挪移的话,那么,我们也会惊叹于光交换的空间结构,它充满了丰富的几何设计和科技想象力。可以说,连接世界四通八达的信息网络就是通过节点交换和路由实现信息的空间“穿越”的。

关于光交换空间结构的文章非常多,它是光交换的具体表现形式。交换方式和交换结构千变万化,都离不开一个通用结构,如图 3 所示。它将任意交换结构都抽象为线卡和交换背板两个组成部分,线卡负责处理输入与输出的物理信号和控制信号,交换背板处理任意线卡之间的信息交互与调度<sup>[19]</sup>。需要注意的是,线卡是双向的,输入、输出信号与线卡-背板之间的信号相匹配但不一定完全一样,存在汇聚组装、交换信元切

割、串并转换、开销剥离和插入等过程,这些功能取决于所采取的交换方式和所要达到的交换性能。

交换结构的设计以光器件的功能与性能为基础,可采用的光器件种类繁多,诸如机械光开关、各种物理效应(热光、电光、声光、磁光)波导光开关、液晶光开关、晶体光开关等<sup>[20]</sup>。本文拟从系统设备的角度来探讨光交换的空间结构,它是一个多端口大容量的系统,但是,很多光器件并不一定(或者暂时)满足多端口大容量的要求。目前能够满足这一要求的光交换器件主要有以下三类。

1) MEMS 光开关矩阵:通过静电或其他控制力使活动的微镜发生机械转动,从而改变输入光的传播方向,实现开关功能。二维光开关阵列插入损耗较小,开关时间小于 10 ms。更先进的三维方案在  $N$  个输入光纤和  $N$  个输出光纤之间仅使用  $2N$  个微镜,由于每个微镜都有  $N$  个可能的位置,从而实现了  $N \times N$  开关阵列,突破了二维方案的端口限制,有报道的端口数量已达到  $1024 \times 1024$ <sup>[21]</sup>。

2) 波长选择开关(WSS):主要基于 MEMS 或硅基液晶光学平台,具有频带宽、色散低,并且同时支持透明光信号的特点和内在的基于端口的任意波长定义(Colorless)特性,具有更强的动态配置能力和升级扩展能力,为组网带来更大的灵活性。WSS 有多种型号,具有 50 GHz 等固定通道间隔或可变通道间隔,支持大约 96 个波长等<sup>[21]</sup>。

3) 循环阵列波导光栅(CAWG):阵列波导光栅(AWG)是实现多通道密集波分复用的主流器件之一,它采用平面光路技术,可实现的功能远远不止复用和解复用,它还可以实现功率分配、交换、监测和光强可变衰减等功能。对称 CAWG 具有波长路由功能,可以作为频域光交换背板的候选技术之一,有公司能提供  $32 \times 32$  CAWG,每端口可以支持 32 个波长(或 32 的倍数),端口数量可以进一步增加<sup>[22]</sup>。

交换结构的设计必然有很多约束条件,其中最为核心的是无阻塞性,因为一个有阻塞的交换结构是很难应用于实际网络的。采用多端口的光交换器件具有天然的无阻塞性,为交换结构的设计带来了便捷的途径。第二个约束条件是开关时间。根据上一节关于光交换时间结构的分析,光分组或光突发交换的时长在微秒量级,要求开关时间在亚微秒是合理的。光电路交换的时长在秒量级甚至更长,开关时间在毫秒量级都是可以适用的。因此,MEMS 光开关矩阵和 WSS 都只能适用于光电路交换,适合于构建大容量的 OXC 和多方向的可重构光分插复用器(ROADM),典型的交换结构如图 4(a)和(b)所示。CAWG 本身只提供固定的频域波长路由功能,交换必须结合可调谐波长变换器(TWC),通过波长的改变来实现端口间的交换功能,如图 4(c)所示。其“开关”时间取决于波长变换的时间,基于半导体光放大器(SOA)实现的 TWC 一般都能达到纳秒量级的波长变换时间,适用于光分组和光突发交换<sup>[23]</sup>。光交换结构设计的其他约束条件,诸如插入损耗及其均匀性,功率控制与均衡,甚至于一些高级的要求如色散管理等,本质上与传输相关,可以直接采用传输上的设计条件,不再赘述。

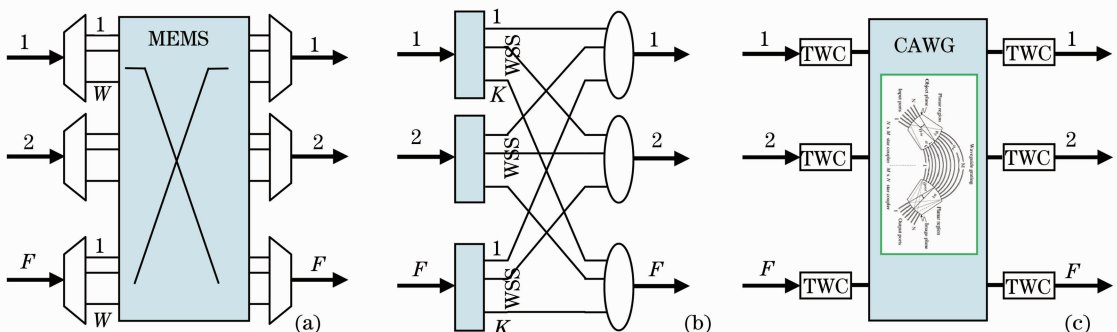


图 4 三种多端口大容量光交换结构。(a) MEMS; (b) WSS; (c) CAWG

Fig. 4 Three switching architectures with large port number and capacity based on (a) MEMS, (b) WSS and (c) CAWG

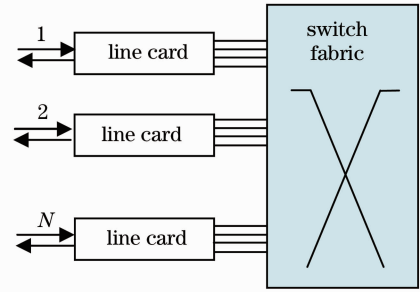


图 3 通用交换结构

Fig. 3 Generic switch architecture



## 4 光交换结构的扩展、缓存和能耗问题

光交换一直被寄予一个“使命”——突破电子瓶颈,亦即光交换的端口数量和交换容量比相应的电交换要多和大。这一“使命”一直在推动着光交换技术的发展。但是,因为电交换的端口数量和容量也一直在快速增长,大大推迟了“电子瓶颈”的出现,也大大推迟了光交换技术的应用进程。当然,光交换技术本身也面临一些挑战,亟需相关支撑技术和系统技术的突破。

光交换器件的端口数量总是有限的,自然要研究多个光交换器件的扩展方法,所用到的扩展方法基本上都能在电交换领域找到理论支撑<sup>[3,4,19,20]</sup>,比如直接延用三级 CLOS 网络理论扩展 MEMS 光开关矩阵,因为在逻辑上 MEMS 与电交叉芯片是等效的。但是,光器件也有区别于电器件之处,仅以图 4(b)和(c)为例,WSS 器件就找不到逻辑上对等的电器件,其扩展方法就不能直接延用电交换理论,一个简单的扩展方法是借鉴光耦合器的扩展方法,将多个 WSS 按两级树型方式连接起来,从而扩展 WSS 的端口数量。另外,关于 CAWG 的扩展,它是频域的波长路由器件,但是,与 TWC 结合之后就等效于空间交换器件了,其扩展方法也可以参照三级(或多级)CLOS 网络理论,同时,考虑到 CAWG 本身的基于自由谱范围的循环特性,其多级网络的连接性会有所变化。在此不再展开讨论<sup>[24,25]</sup>。

光交换绕不开的一个问题是光缓存,尤其对于光分组交换,光缓存是解决流量管理、减少丢包、提高吞吐量的必备条件。从设备系统的角度讲,目前仍然缺乏有效的光缓存器件,只能采用光纤延迟线及其组合来实现不同时长的延迟,其时长的选择是通过光开关实现的。近年来研究的诸如光纤慢光延迟等方法,一般都只能延迟几个比特<sup>[26]</sup>,不能够实现完整光分组的缓存,即使采用级联或微环的方式,延迟量还是有限的,况且还恶化了物理性能。目前仍然看不到可以与电缓存相当的光缓存技术,直接采用电缓存不失为一种可选办法<sup>[27]</sup>。

最近,人们开始关注光交换能耗问题。从直觉出发,人们总是认为并且相信光交换的能耗比电交换要低很多,甚至于低 2~3 个数量级。然而,也有人持相反观点<sup>[4]</sup>。虽然光传输的损耗很低,所消耗的能量也很低,但是对于光交换系统,以图 4(c)为例,CAWG 是一个无源器件,无需消耗任务能量,但 TWC 需要能量,TWC 中的 SOA 是比较耗能的,因此,全光交换的能耗并不总是最低的<sup>[4]</sup>。

## 5 结束语

古有阴阳太极,我们联想到,电子和光子分别属于费米子和玻色子,也许有必要由光子和电子共同来完成交换功能,实现多端口、大容量交换的使命,尤其是在全球面临带宽需求增长和能源危机的当下,这也符合朴素的唯物辩证思想。最后要特别说明的是,囿于作者学识,一家之言,欢迎读者指正。

### 参 考 文 献

- 1 Mark Twain. The Million Pound Banknote [M]. Prague: Fragment, 1997
- 2 中国音响网. 新型广电网络业务发展过程及业务分类 [OL]. <http://www.chinaaudio.net/news/389-292/292566.html>, 2010
- 3 Mi Zhengkun, Yang Guomin. Switching Technique [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2006  
糜正琨, 杨国民. 交换技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 2006
- 4 Rodney S. Tucker. Optical and Electronic Technologies for Packet Switching, Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks [M]. New York: Academic Press, 2008
- 5 Zhe Wang, Weisheng Hu, Weiqiang Sun *et al.*. An efficient aggregation scheduling algorithm for unbalanced traffic distribution in optical packet switch network [C]. Asia Communications and Photonics Conference, 2010, SuC6
- 6 Wu Jian, Zhang Wei, Wang Minxue. Optical burst switching network testbed [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 247~251  
伍 剑, 张 伟, 王敏学. 光突发交换网络试验平台 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 247~251
- 7 K. Kitayama, M. Koga, H. Morikawa *et al.*. Optical burst switching network testbed in Japan [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005, OFA6
- 8 Wei Leping. Intelligent optical network: concept, architecture and evolution [J]. *Telecommunications Network Technology*, 2003, (1): 1~5

- 韦乐平. 智能光网络概念及体系架构与演进[J]. 电信网技术, 2003, (1): 1~5
- 9 J. Gao, D. Li. BoD service with VCAT/LCAS and GMPLS signaling [C]. IEEE NOMS Workshops, 2008, 207
- 10 Weiqiang Sun, Zijie Xing, Kai Kang *et al.*. Performances of label switched path dynamic provisioning in GMPLS networks [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2011(in Press)
- 11 Zijie Xing, Weiqiang Sun, Yaohui Jin *et al.*. Dynamic label switched path provisioning performance in GMPLS networks [C]. OECC, 2009, ThN4
- 12 Weisheng Hu, Weiqiang Sun, Wei Guo *et al.*. Performance of label-switched intelligent optical networks [C]. The 7th International ICST Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2011
- 13 Weisheng Hu, Yaohui Jin, Weiqiang Sun *et al.*. Enhanced connectivity in ASON/GMPLS network with demonstrations [C]. International Conference on Optical Internet, 2008
- 14 Weiqiang Sun, Guoying Zhang. Label Switched Path (LSP) Dynamic Provisioning Performance Metrics in Generalized MPLS Networks [S]. The Internet Engineering Task Force-IETF, 2010, RFC 5814
- 15 Working Group Documents. Common Control and Measurement Plane, Ccamp Status Pages [OL]. <http://tools.ietf.org/wg/ccamp/>, updated, 2011
- 16 Cisco. Synchronous Digital Hierarchy (SDH) Graphical Overview [R]. Updated; Oct 01, 2006 Document ID: 28327
- 17 Zhang Haiyi. OTN standard progress [J]. *Telecommunications Technology*, 2009, (5): 45~49
- 张海懿. OTN 技术标准进展 [J]. 电信技术, 2009, (5): 45~49
- 18 中央电视台文娱频道. 魔术巨人: 大卫·科波菲尔 [OL]. <http://www.cctv.com/entertainment/>
- 19 Zhu Peidong. High Performance Router [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2005
- 朱培栋. 高性能路由器 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005
- 20 Zhang Yimo. Optics Inter-Connected Networks Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006
- 张以谟. 光互连网络技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006
- 21 Ming C. Wu, Olav Solgaard, Joseph E. Ford. Microelectromechanical Systems for Lightwave Communication, Optical Fiber Telecommunications V A: Components and Subsystems [M]. New York: Elsevier, 2008
- 22 Enablance.  $N \times N$  AWG Multiplexers and Demultiplexers Module [OL]. <http://www.enablance.com/>
- 23 S. J. B. Yoo. Optical Burst and Packet Switching, Optical Fiber Telecommunications V B: Systems and Networks [M]. New York: Academic Press, 2008
- 24 Yong-Kee Yeo, Zhaowen Xu, Chin-Yi Liaw *et al.*. A  $448 \times 448$  optical cross-connect for high-performance computers and multi-terabit/s routers [C]. OFC/NFOEC, 2010, OMP6
- 25 Domenico Siracusa, Guido Maier, Vittorio Linzalata *et al.*. Scalability of optical interconnections based on the arrayed waveguide grating in high capacity routers [C]. 15th Conference on Optical Network Design and Modeling, 2011. 1~6
- 26 Lilin Yi, Yves Jaouen, Weisheng Hu *et al.*. Improved slow-light performance of 10 Gb/s NRZ, PSBT and DPSK signals in fiber broadband SBS [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 16972~16979
- 27 K. Takahata, R. Takahashi, T. Nakahara *et al.*. Opto-electronic packet switches for 40-Gb/s, 16-bit asynchronous burst optical packets [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 684~686