

文章编号: 0258-7025(2009)04-0867-06

# 基于多重光正交码光标签的光分组交换系统实验研究

周 恒 邱 昆 凌 云 许 渤 张 崇 富 王 亚 伟

(电子科技大学通信学院宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 采用多个光正交码串行排列组成的多重光正交码(MOOC)标签格式,提高了可用标签的数目;构建了基于 MOOC 标签的光分组交换系统(OPS),对该系统中的各项关键技术,包括光分组信号产生单元、光标签处理单元、交换控制单元、光交换矩阵等进行了分析和研究;完成了光分组交换系统演示实验,并对实验结果进行了讨论。

**关键词** 光通信;光分组交换系统;多重光正交码光标签;半导体光放大器

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0867

## Design and Demonstration of Optical Packet Switching System Adopting Multiple Optical Orthogonal Codes Label

Zhou Heng Qiu Kun Ling Yun Xu Bo Zhang Chongfu Wang Yawei

(*Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks,*  
*Ministry of Education University of Electronic Science and Technology of China,*  
*Chengdu, Sichuan 610054, China*)

**Abstract** Multiple Optical Label that generated by combining multiple optical orthogonal codes (MOOC) in serial can increase the quantity of available labels. An optical packet switching (OPS) system adopting MOOC label is demonstrated, and the corresponding techniques including packets generator, label processing, switching control mechanism and switching matrix are discussed. The experiment results of this system realize the packet switching function under the condition of three edge nodes and one core node, and verify the feasibility of the proposed MOOC label scheme.

**Key words** optical communications; optical packet switching system; multiple optical orthogonal codes label; semiconductor optical amplifier

### 1 引 言

随着 Internet 的迅猛发展,IP 业务呈现爆炸式增长。为了充分利用光传送网的巨大带宽资源,人们纷纷寻求在光层传输 IP 业务的方法<sup>[1~3]</sup>。光分组交换技术以光分组为基本交换单元,不但具有高速率、大容量、对数据速率和格式透明的优点,同时又具有分组交换技术细粒度、资源统计复用率高等特点,同 IP 业务的突发属性相适应,因此被普遍认为是未来网络中最具潜力的技术之一<sup>[3~8]</sup>。光分组交换网络包含边缘节点(Edge Node)和核心节点

(Core Node)。边缘节点的发送端接收本地子网内各用户的 IP 包转换为光净荷(Optical Payload),然后,根据标签转发表,为光净荷加上包含其路由信息的光标签,封装成为光分组发送到光分组交换网络内。边缘节点的接收端完成与发送端相反的操作,接收到达的光分组并将其还原为 IP 分组输入到本地子网内的各用户。在未来的全光网络中,对标签的处理应该完全在光域完成。然而由于全光信号处理技术尚不成熟,目前的光分组交换系统(OPS)一般采用光电混合的方式处理光标签,即将光标签转换为

收稿日期: 2008-10-18; 收到修改稿日期: 2009-01-09

基金项目: 国家 863 计划(2006AA01Z241)和国家自然科学基金(60807028)资助课题。

作者简介: 周 恒(1983-),男,硕士研究生,主要从事光纤通信系统、光交换技术的研究。

E-mail: zhouheng830813@yahoo.com.cn

导师简介: 邱 昆(1964-),男,教授,博士生导师。主要从事光纤通信理论与技术的研究。E-mail: Kunqiu@uestc.edu.cn

电信号来处理。在核心节点,光分组首先完成净荷与标签的分离,携带路由信息的光标签进行光电转换后,输入标签处理单元进行处理,提取出光分组的路由信息输入交换控制单元控制交换过程;净荷保持为光信号,通过光纤延时线(FDL)延时一段时间,待交换控制单元配置好光路后进入交换矩阵进行交换。可见,在核心节点,光标签被转换为电信号处理,利用了电子技术成熟、高效的信号处理能力;而光净荷没有经历光电转换,一直保持为光信号,这样就克服“电子瓶颈”,提高了分组数据转发速率和节点的吞吐量。本文介绍一种采用多重光正交码(MOOC)标签的光分组交换系统,对该系统中的各项关键技术的实现进行了分析,并对实验结果进行了讨论。

## 2 边缘节点关键技术

### 2.1 光标签格式及产生方法

在光标签的设计过程中,除了要求易于识别外,还需要考虑标签与净荷的高效快速分离<sup>[5~7]</sup>。现在光标签格式主要有比特序列标签(Bit-Serial Label)、副载波标签(Subcarrier Label)、正交调制标签(Orthogonal Modulation Label)和光码标签(Optical-Code Label)等。其中,光码标签利用光学编码器/解码器完成标签的产生和识别,非常接近全光标签处理,是一种很好的标签格式。日本 NICT 实验室 Wada N. 博士带领的研究小组已经实现了 16 位码片长度,200 Gchip/s 码片速率的光码标签,

160 Gbit/s 净荷速率的光分组交换的现场实验。但光标签的数目由光码的数目决定,使得可用光标签的数目受限于光码的数目。采用一个光码为基本标签格式,在时域和码字域二维空间中对光码进行复用来构造光标签,可以大大增加标签的数目。研究表明,对于  $N_t$  个时隙,每个时隙可用码字数目为  $N_c$  的情况,可以构造的光码标签总数达到<sup>[9]</sup>

$$N = \sum_{i=1}^{N_c N_t} \binom{N_c N_t}{i} = 2^{N_c N_t} - 1. \quad (1)$$

实验系统选取一维光码 OOC,且在每个时隙只采用一个 OOC,构成了 MOOC 标签。MOOC 标签的产生采用了宽谱光源, LiNbO<sub>3</sub> 调制器, FBG 编/解码器,光交换矩阵,光纤延时线(FDL)等设备,原理如图 1 所示。边缘节点中由现场可编程门阵列(FPGA)芯片实现的控制单元发出宽度等于码片宽度  $T_{\text{chip}}$  的脉冲,本系统中  $T_{\text{chip}} = 2 \text{ ns}$ ,通过 LiNbO<sub>3</sub> 调制器将宽谱光源发出的连续波调制成宽度为  $T_{\text{chip}}$  光脉冲,光脉冲被分路器分成三路,输入到  $3 \times 3$  光开关。控制单元控制光交换矩阵将三个光脉冲输出到长度不同 FDL,可实现对各光路时延的调整,之后进入三个码长  $L = 19$ ,码重  $W = 3$  的 FBG 结构 OOC 编码器,其码字分别为:  $C_1 [5, 11, 13]$ ,  $C_2 [7, 10, 17]$ ,  $C_3 [3, 4, 18]$ 。各段 FDL 的长度差值为一个标签持续时间内光在光纤中传播的距离,即 7.6 m。编码器产生三个 OOC 通过耦合器耦合在一起构成串联的 MOOC 光码标签。

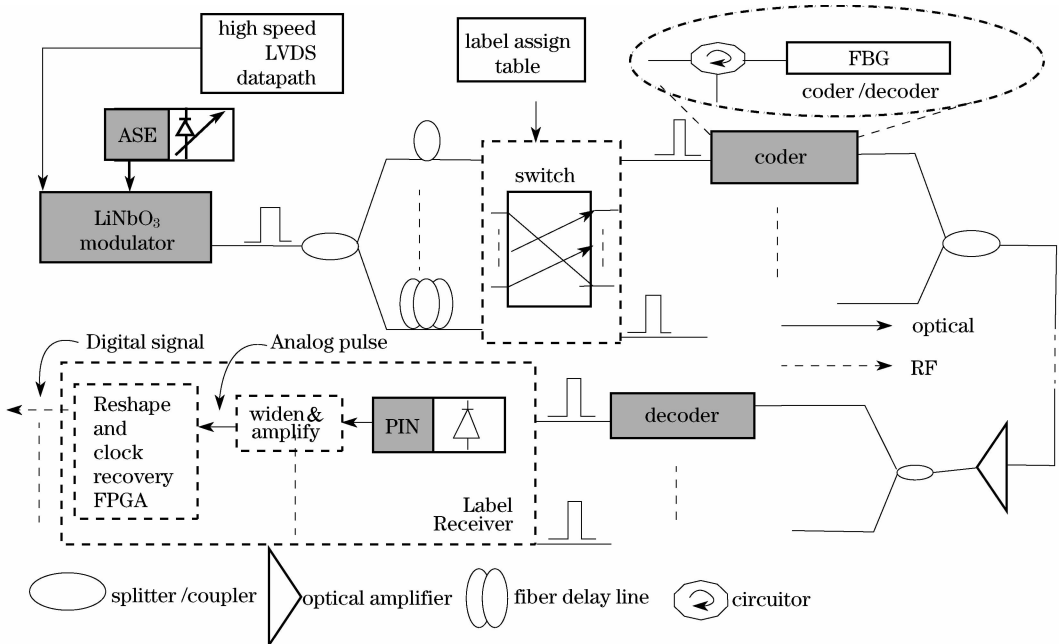


图 1 光标签的产生和识别原理图

Fig. 1 Diagrams of MOOC generator and receiver

## 2.2 光分组产生

边缘节点光分组的产生包括净荷信号的产生和光标签信号的产生。图 2 所示为边缘节点光分组产生单元原理图。当要产生一个光分组时,边缘节点控制单元首先发出一个脉冲到标签产生单元开始生成光标签,经过保护间隔后,边缘节点控制单元触发净荷产生单元,输出净荷信号。在实验中净荷信号由脉冲码型发生器(PPG)产生一定长度的伪随机(PRBS  $2^7-1$ )数字序列代替,经过  $\text{LiNbO}_3$  调制器调制后与标签耦合到一起形成光分组。

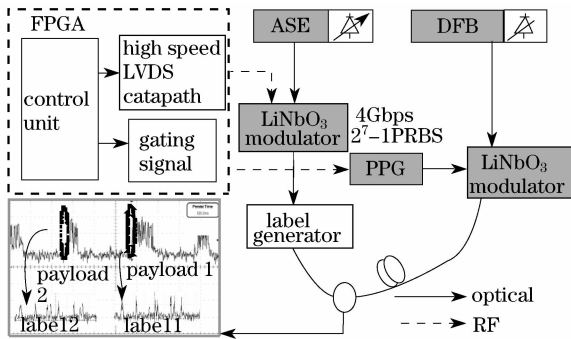


图 2 光分组产生单元结构图

Fig. 2 Diagram of optical packets generator

## 3 核心节点关键技术

### 3.1 光交换矩阵

光交换矩阵的结构可以分为由  $2 \times 2$  小开关构成的多端口交换矩阵,光分支器和光门构成的广播选择交换矩阵和基于可调波长变换器和阵列波导光栅的交换矩阵<sup>[10~12]</sup>。其中由于广播选择交换结构光功率损耗大,可调波长变换器实现复杂,因此在实验中采用了  $2 \times 2$  小开关构成的多端口交换矩阵。

实验中还采用了 LYNX 公司生产的基于  $\text{LiNbO}_3$  光电效应的  $4 \times 4$  光开关,它可以通过 8 位的配置字( $C_7 C_6 C_5 C_4 C_3 C_2 C_1 C_0$ ,其中  $C_7 C_6, C_5 C_4, C_3 C_2, C_1 C_0$  分别表示与输出端口 1,2,3,4 连接的输入端口号)来配置,其端口切换时间为 10 ns,配置频率可达到 4 MHz,各端口严格无阻塞交换。

### 3.2 标签接收与处理

当光分组到达核心节点后,首先由光分支器将分组信号分为两路,一路进行标签提取和识别,另一路经过标签擦除后,将净荷输入光交换矩阵。MOOC 光标签的提取和标签的产生类似,都是利用 FBG 在光域完成的,原理如图 1 所示。光标签经过匹配的光解码器将产生自相关峰;在不匹配的光解码器输出端为互相关噪声;净荷信号与解码器不匹

配,经过解码器后也变成噪声信号,因此在标签提取时,只有光功率相对较强的自相关脉冲被提取出来。本系统采用的 MOOC 为三个 OOC 光码标签串行排列,因此将一个标签信号分路后输入三个与编码器对应的 FBG 解码器,各自提取出相应的自相关短脉冲,经过处理电路进行展宽和放大处理后,输入标签整形单元进行标签的整形和时钟恢复,最后转换为 3 路 TTL 电平,宽度为单个 OOC 长度的标签脉冲及其随路时钟,输入到核心节点控制单元。

### 3.3 标签擦除

采用半导体光放大器(SOA)构成光门来实现标签擦除。当无注入电流时,SOA 的损耗大,光门处于关闭状态;当注入电流增大时,SOA 提供高增益,相光门处于打开状态<sup>[13~15]</sup>。实验系统选用了 CIP 公司的开关型 SOA(型号:CIP-SOA-S-OEC),其开关速率可以达到 1 ns。SOA 光门结构如图 3 所示,主要包括电流驱动模块、自动温度控制模块(ATC)、光隔离器、光滤波器等。由于所选用的 SOA 需要的注入电流较大,因此电流驱动采用 Maxim 公司的 LED 驱动芯片 max3966,标签擦除信号以 PECL 电平接入 max3966,可在 615 ps 内产生最大为 200 mA 的驱动电流,通过调节注入电流可以控制 SOA 的增益,调节光门的消光比。通过实验得到,当无电流注入时,SOA 的损耗达到 -30 dB,即没有光输出,光门关闭;当注入 100 mA 的电流时,增益达到 15 dB,即光门打开。实测的光门上升/下降时间为 20 ns,主要原因是电流驱动芯片引脚及周围布线存在电感,影响了驱动电流的建立时间,从而影响了光门的切换速度。光门打开的情况下,信号可以零误差地通过 SOA。用 SOA 光门实现标签擦除的优点即高效地对标签进行擦除的同时可以很好地补偿净荷信号的损耗,缺点是在净荷信号中引入了额外的噪声,主要是 SOA 的自发辐射噪声。为了抑制噪声,在 SOA 的输入、输出端接入光隔离器减小光纤连接器带来的端面反射,在输出端接了光滤波器滤除噪声,保留净荷信号,提高信噪比。为了防止 SOA 由于内部温度升高被烧毁和消除温度变化对性能的影响,需要采用 ATC 模块。ATC 模块利用 SOA 内置的热敏电阻  $R_t$ (温度系数为  $-4.4\%/^{\circ}\text{C}$ )将 SOA 内部温度的变换转换为电压信号  $V_{\text{temp}}$ ,通过负反馈网络将该电压信号转换为与参考电压的差值  $V_{\text{dif}} = V_{\text{ref}} - V_{\text{temp}}$ , $V_{\text{dif}}$  输入 TEC 电流驱动芯片 max1968,max1968 根据  $V_{\text{dif}}$  产生制冷/加热电流注入到 SOA 内置的制冷器,实现对

SOA 温度的控制。制冷/加热电流  $I_{\text{tec}}$  与  $V_{\text{dif}}$  的关系为  $I_{\text{tec}} = (V_{\text{dif}} - 1.5) / (10 \times R_{\text{sense}})$ , 其中  $R_{\text{sense}}$  为感应电阻, 大小为 50 mΩ。所选用的 CIP-SOA-S-OEC 允许的工作温度范围是 15~40 °C, 实验表明, 温度控制模块可以将 SOA 的温度控制在  $(25 \pm 2)$  °C 的范围, 完全满足器件的要求。

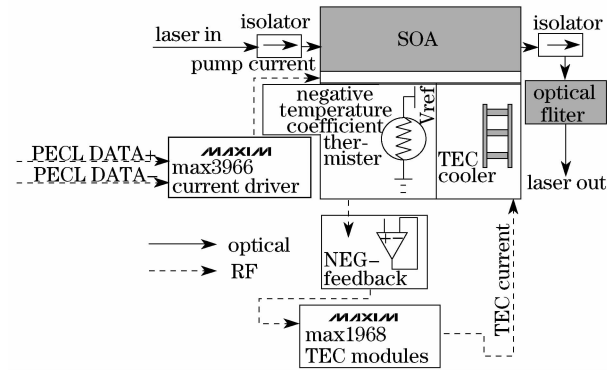


图 3 SOA 标签擦除模块结构图

Fig. 3 Diagram of label-erasing unit

### 3.4 核心节点控制单元

由于全光信号处理还很不成熟, 目前的光分组交换系统中, 核心节点的控制单元一般是在电域完成的, 其中 FPGA 运用得最为广泛。随着工艺水平的不断提高, 目前的 FPGA 芯片中不仅集成了大量的逻辑资源及存储器块, 而且还嵌入了 DSP 块、硬件乘法器、高速输入/输出通道等高级功能模块, 不仅可以实现在线控制, 还能高速地实现各种复杂的调度算法<sup>[16]</sup>。实验系统的核心节点控制单元围绕一块 FPGA 芯片构建, 其结构如图 4 所示, 主要包括标签缓存模块、标签解释模块、路由查找表、调度模块、光交换矩阵配置模块等。控制单元接收到标签信号后进行标签缓存, 用随路时钟将 3 路 3 bits 的标签脉冲写入先入先出存储器 (FIFO) 中, 并将其转换为 1 路 9 bits 的标签序列。其中 FIFO 模块用来解决输入随路时钟和系统时钟不统一的问题, 实现两个不同时钟域的互连。标签缓存模块判断接收到的标签是否合法, 如果合法, 输出标签擦除信号, 其长度为标签的长度加上保护时间, 保护时间主要取决于标签擦除单元的光门的上升/下降时间和用于缓存光分组的 FDL 的长度误差, 本系统中, 保护时间取为 40 ns, 标签擦除信号的总长度为 170 ns。由于实验系统采用的标签总数为 6 个, 为了方便路由表的查找, 在控制单元中加入了标签解释模块, 将标签序列解释为 3 bits 的二进制代码, 输入到标签转发查表单元。标签转发表由 FPGA 中的 RAM 块实现,

RAM 块中标签转发表一个表项的存储单元长度为 8 bits, 其结构为  $b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0$ , 其中  $b_5 b_6 b_7$  表示输入标签值,  $b_3 b_4$  表示输出端口值,  $b_0 b_1 b_2$  表示输出标签值。例如 (00101011): 表示该端口输入标签为 001 ( $L_1$ ) 时, 输出端口为 01 (2 端口), 输出标签为 011 ( $L_3$ )。查表过程就是将 RAM 块的各个存储单元的  $b_7 b_6 b_5$  依次与输入标签的标签代码进行比较, 当找到相同表项后, 立即在此表项置一标志位, 直到所有表项遍历完后, 将标志位处的结果 (输出端口  $b_4 b_3$ , 输出标签  $b_2 b_1 b_0$ ) 输出到调度模块。为了保证各输出端口的公平性, 调度采用各输入端口轮循 (Round Robin, RR) 享有最高优先级的机制, 例如  $T$  时隙采用先调度输入端口 1, 再输入端口 2, 最后输入端口 3;  $T+1$  时隙采用先调度输入端口 2, 再输入端口 3, 最后输入端口 1;  $T+2$  时隙采用先调度输入端口 3, 再输入端口 1, 最后输入端口 2, 依次交替。调度完成后, 交换矩阵配置模块根据调度结果生成相应的光交换矩阵配置字  $S_{\text{sw}}$  和新标签信号  $S_{\text{New-Label}}$ ,  $S_{\text{sw}}$  输入光交换模块进行光路配置,  $S_{\text{New-Label}}$  输入核心节点的新标签产生单元产生新标签。其标签产生原理与边缘节点的标签产生相同。新标签耦合到净荷保护间隔前形成新的光分组输出。

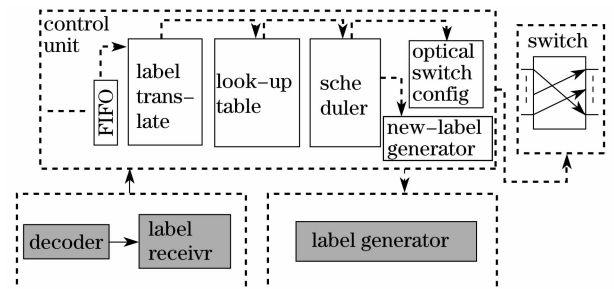


图 4 核心节点控制单元结构图

Fig. 4 Diagram of the control unit in core node

## 4 系统实验

### 4.1 实验内容

实验系统的结构为三个边缘节点 (Edge node I, Edge node II, Edge node III) 和一个核心节点 (Core node I) 组成的星形网络, 实验现场如图 5 所示。Edge node I 交替产生两个不同长度, 光标签分别为  $L_1 (C_1, C_2, C_3)$  和  $L_2 (C_1, C_3, C_2)$  的光分组  $OP_1$  和  $OP_2$ 。根据预设的标签转发表,  $L_1$  和  $L_2$  的光分组将经过核心交换节点分别被交换到 Edge node II 和 Edge node III, 实验原理如图 6(a) 所示。

分组的净荷的数据速率为 4 Gbit/s,  $OP_1$  净荷长度  $L_{payload1} = 4000$  bits,  $OP_2$  净荷长度  $L_{payload2} = 2000$  bits,  $OP_1$  与  $OP_2$  的间隔时间为  $2.5 \mu s$ 。实验研究表明,由于标签处理的延时要求光分组在输入标签擦除单元之间需要被缓存 210 ns,采用长度为 42 m 的 FDL 实现;标签擦除后进入光交换矩阵之前需要被缓存 95 ns,采用长度为 19 m 的 FDL 实现。

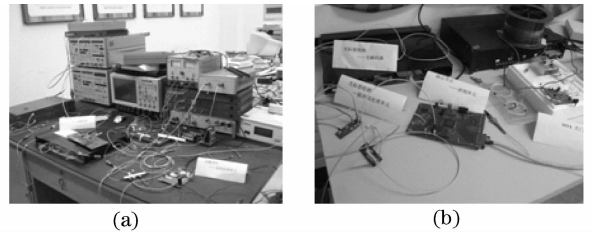


图 5 实验演示场景。(a)边缘节点;(b)核心节点  
Fig. 5 Experimental scene. (a) edge node; (b) core node

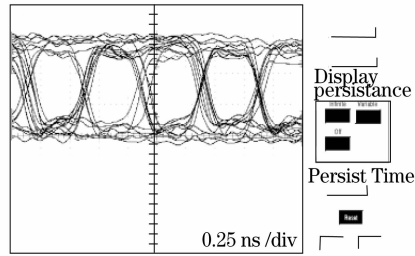
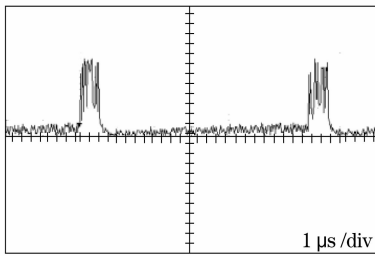
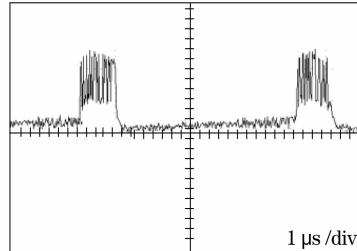
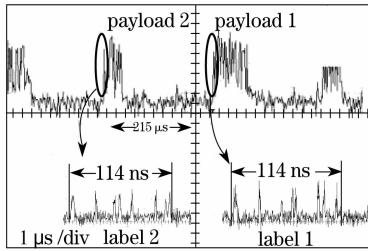
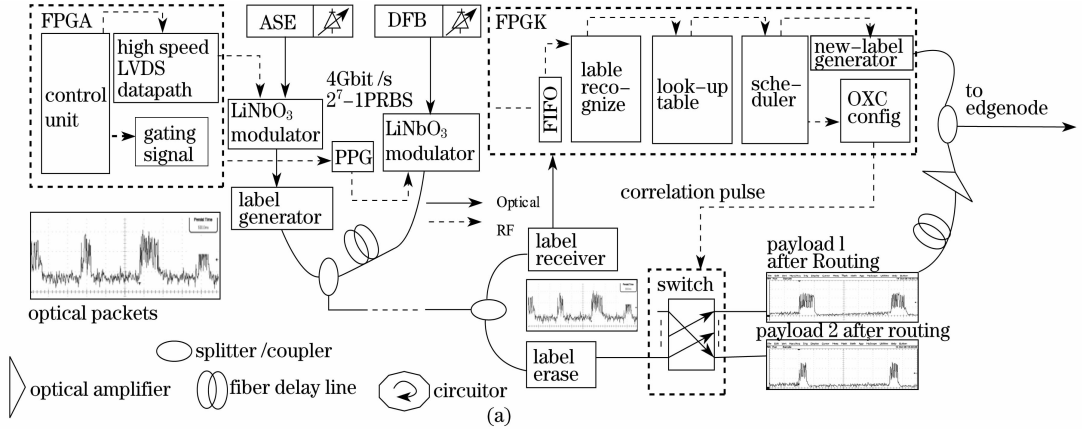


图 6 (a) MOOC-OPS 实验建立示意图; (b) 光分组  $OP_1$  及  $OP_2$  波形; (c)  $OP_1$  的净荷经过交换后波形;  
(d)  $OP_2$  的净荷经过交换后波形; (e)  $OP_1$  的净荷经过交换后眼图

Fig. 6 (a) MOOC-OPS experimental setup; (b) Waveform of  $OP_1$  and  $OP_2$ ; (c) Payload of  $OP_1$  after switching; (d) Payload of  $OP_2$  after switching; (e) EYE diagram of  $OP_1$  after switching

### 4.2 实验结果与讨论

图 6(b)示出了由 Edge node I 的分组产生模块产生的分组  $OP_1, OP_2$  的净荷以及标签波形及经过核心节点;图 6(c), (d), (e)示出了  $OP_1$  和  $OP_2$  的净荷分别从交换矩阵的不同端口输出的波形及眼图。从以上波形可以看出,核心节点准确地识别了各分组的标签,并根据标签携带的路由信息对 4 Gbit/s

的净荷进行了交换,整个交换过程在 320 ns 内完成。从图 6(c), (d), (e)可以看出,在经过了交换节点的交换过程后,净荷信号信噪比仍然保持在 15 dB 左右,说明在整个交换节点中进入净荷的噪声非常有限。在调制净荷使用的光源功率为  $-19$  dBm 的情况下,净荷经过交换后误码率  $BER = 0$ 。该实验演示系统经过扩展可以支持 40 Gbit/s 以上速率的净

荷交换,但是扩展后,系统对 SOA 光门的开关速率,以及光交换矩阵的端口切换时间等都有更加严格的要求。

一些有效的措施可以大大提高交换速度:1) 由于码片速率较慢,标签的长度达到了 114 ns,控制单元的所有模块都要在接收完标签后,即 114 ns 后才能开始工作,如果增加码片速率,缩短标签长度,就可以缩短一次交换所需的时间。2) 在本系统中,核心节点的控制单元是工作在 100 MHz 的系统时钟下的,如果控制单元采用更高端的 FPGA 芯片实现,可以工作在更高的系统时钟下,这样可以成倍地提高整个交换过程的速率。3) 核心节点控制单元各模块可以采用流水线的运行机制,比如当标签缓存单元将前一标签缓存完送入后面模块后,缓存单元就可以缓存下一组标签,这样也可有效地缩短一次交换过程所需要的时间。

## 5 结 论

将 MOOC 标签应用于 OPS 实验系统中,完成了该系统的边缘节点和核心节点的设计和实现,完成了 4 Gbit/s 数据的系统交换功能的演示。实验验证了采用 FGB 编码器/解码器实现 MOOC 标签的可行性;采用 SOA 实现的光门具有开关速度快,消光比高,提供增益,无信号劣化等优点;实验结果表明设计的光标签处理单元成功地实现了 MOOC 标签的处理,基于 FPGA 的控制单元实现了对标签擦除和更新,以及对  $4 \times 4$  光开关高速和精确的控制。光标签的长度导致了交换时延的增大;标签转发表的查找占用了主要的交换处理时间;复杂的调度算法的实现等这些都是为了实现更高速率的交换需要进一步改进的问题。

## 参 考 文 献

- 1 M. J. O'Mahony, D. Simeonidou, D. K. Hunter *et al.*. The application of optical packet switching in future communication networks[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2001, **39**(3):128~135
- 2 D. Klonidis, T. Politi, R. Nejabati *et al.*. OPSnet: Design and demonstration of an asynchronous high speed optical packet switch[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(10):2914~2925
- 3 E. Modiano. WDM-based packet networks[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 1999, **37**(3):130~135
- 4 Georgios I. Papadimitriou, Chrisoula Papazoglou, Andreas S. Pomportsis. Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(2):384~405
- 5 K. G. Vlachos, I. T. Monooy, A. M. J. Koonen *et al.*. STOLAS: Switching technologies for optically labeled signals [J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2003, **41**(11):43~49
- 6 D. K. Hunter, I. Andonovic. Approaches to optical internet packet switching[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2000, **38**(9):116~122
- 7 Shun Yao, Biswanath Mukherjee, S. J. Ben Yoo *et al.*. A unified study of contention resolution schemes in optical packet switched networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(3):672~683
- 8 Zhong Pan, Min Yong Jeon, Yash Bansal *et al.*. Packet-by-packet wavelength, time, space-domain contention resolution in an optical-label switching router with 2R regeneration[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(9):1312~1314
- 9 Kun Qiu, Chongfu Zhang, Yun Ling *et al.*. A novel all-optical label processing for OPS networks based on multiple OOC sequences from multiple-groups OOC[J]. *SPIE*, 2007, **6783**:678336
- 10 Qiu Kun, Wang Sheng, Qiu Qi. Optical Communication System [M]. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology of China, 2005. 125~130
- 11 邱 昆,王 晟,邱 琪. 光纤通信系统[M]. 成都:电子科技大学出版社,2005. 125~130
- 12 Hou Peipei, Song Zhe, Li Xudong *et al.*. Integrated optical  $N \times N$  crossbar network and its control algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):365~389
- 13 侯培培,宋 哲,李旭东等. 单块晶体集成的  $N \times N$  纵横开关网络及其控制算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2):365~389
- 14 Hu Qianyan, Yuan Jing, Li Jing, *et al.*.  $4 \times 4$  crossbar micro-electro-mechanical system optical matrices switches[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2005, **32**(7):938~941
- 15 胡巧燕,袁 菁,李 静等.  $4 \times 4$  纵横交换微机械系统光开关阵列[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):938~941
- 16 Michael J. Connelly. Wideband semiconductor optical amplifier steady-state numerical model[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(3):439~447
- 17 Ding Yuan, Zhang Xinliang, Dong Jianji *et al.*. Improvement for all-optical logical AND gate based on cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(11):1517~1521
- 18 丁 园,张新亮,董建绩等. 基于级联半导体光放大器实现全光逻辑与门的改进方案[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1517~1521
- 19 Wei Zhang, Kun Qiu, Yun Ling *et al.*. A novel scheme of label abstraction and erasure based on Fabry-Perot semiconductor optical amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1):14~17
- 20 L. Wu, H. J. Chao, X. J. Zhao *et al.*. An FPGA controlled WDM buffer memory[C]. *Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2000, San Francisco, CA*, 2000, 340~341