

文章编号:1004-4213(2010)01-0084-5

# 采用 OFDM 信号作为标记的光分组交换方案\*

张超俐, 陈林, 邵宇丰, 曹子峥, 李登科, 余建军

(湖南大学 a. 计算机与通信学院; b. 微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 长沙 410082)

**摘 要:**以光正交频分复用信号作为光标记, 利用两个不同波长的光载波分别经过强度调制, 产生了 10 Gb/sOOK 光载荷和 2.5 Gb/sOFDM 光标记. 测得了光分组信号经光纤传输前后接收载荷的眼图和标记的星座图以及误码率曲线, 结果表明: 经过 40 km 光纤传输后, 载荷与标记的功率代价分别为 1 dB 和 0.5 dB.

**关键词:**光纤通信; 光标记交换; 强度调制; 正交频分复用

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0084

## 0 引言

光分组交换能有效克服未来光网络中“电子瓶颈”效应, 能够实现网络交换容量与波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 技术带来的大传输容量相匹配. 光标记交换作为实现光分组交换最有效的方式之一, 是一种极具应用前景的技术<sup>[1]</sup>. 标记交换网的节点只对少量的分组头即标记信息在电域进行处理, 数据载荷直接在光域内进行传输, 大大提高了交换速度.

光标记的产生和提取是光标记交换网中的关键技术. 在目前提出的光标记交换技术中, 光时分复用标记的产生、提取和识别较容易, 但对网络的同步要求很高, 网络节点结构复杂<sup>[2]</sup>. 光副载波复用标记技术中, 网络节点设计不需考虑精确定时, 简化了节点结构, 但调制在副载波上的标记信息与基带数据载荷混合后调制光调制器, 会产生交互调制<sup>[3-4]</sup>. 正交标记技术具有高的频谱效率, 但标记与载荷的消光比不高, 小的消光比不利于网络节点对信号的检测, 且限制了信号的传输距离<sup>[5-6]</sup>. 此外, 目前大多采用传统的二进制、单载波调制格式的信号作为标记信号, 在光纤传输过程中色散较严重, 不利于信号的长距离传输.

本文提出并实验研究了一种用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 信号作为标记的新方法. OFDM 标记和 OOK 载荷分别通过强度调制器调制在不同波长的光载波上, 再产生光分组. 该方案产生的标记与载荷

之间没有串扰, 不受消光比限制, 容易实现合并、分离及检测. 而 OFDM 调制技术相比传统的二进制、单载波调制, 采用多进制、多载频、并行传输, 具有抗多径衰落和窄带干扰能力强、频谱效率高、传输容量大等特点. 近期研究表明, OFDM 运用到光纤通信中实现光正交频分复用 (Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OOFDM), 可以帮助抑制色散和偏振模色散, 从而成为国际上研究的热点<sup>[7-8]</sup>. 因此, 将 OOFDM 信号作为光标记应用到光标记交换系统中, 将会有效地抵抗色散效应以及标记和载荷之间交互干扰的影响, 实现信号的长距离传输, 这是光通信网络的一个发展方向<sup>[9-16]</sup>.

## 1 光分组产生方案原理

在光网络的入口边缘节点, 数据载荷被绑定一个标记信息来映射 IP 地址, 从而确定一条传输路径. 数据载荷部分由若干高速业务数据信息汇聚而成; 标记部分则包括了交换过程所需的路由控制信息. 载荷与标记在入口边缘节点分别经电光调制后封装成光分组, 进入光标记交换 (OLS) 网. 在 OLS 网的每个核心节点将光标记转换为电信号加以处理, 产生相应的控制信息驱动光交换网络, 实现对业务数据的标记交换.

图 1 为光分组产生方案原理. 一个中心波长为  $\lambda_1$  的连续光源接入到一个马赫-曾德尔单臂强度调

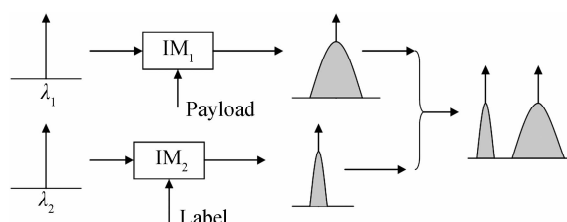


图 1 光分组产生方案原理

Fig. 1 Principle of generating optical packets

\* 国家高科技研究发展计划 (“863”计划) 基金(2007AA01Z263)、湖南省自然科学基金(06JJ50108)和教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助

Tel: 0731-8714920

Email: chaochao1029@163.com

收稿日期: 2009-02-24

修回日期: 2009-05-05

制器(IM<sub>1</sub>),产生 OOK 调制格式的光载荷信号. 设输入 IM<sub>1</sub> 前未经调制的光载波信号为

$$E_{in_1}(t) = E_1 \exp(j\omega_1 t) \quad (1)$$

式中  $E_1$  为光载波 1 的幅度,  $\omega_1$  为光载波 1 的角频率. 那么, 经过 IM<sub>1</sub> 输出的光载荷信号的表达式为

$$E_{out_1} = E_{in_1}(t) \sqrt{\text{Mod}_1(t)} = E_1 \sqrt{\text{Mod}_1(t)} \cdot \exp(j\omega_1 t) \quad (2)$$

$$\text{Mod}_1(t) = (1 - \alpha) + \alpha \cdot \text{modulation}_1(t) \quad (3)$$

$\alpha$  为 IM<sub>1</sub> 的调制系数,  $\text{modulation}_1(t)$  为调制信号, 即数据载荷信号.

OFDM 标记信息经过马赫-曾德尔单臂强度调制器(IM<sub>2</sub>), 调制在中心波长为  $\lambda_2$  的连续光波上, 产生强度调制的 OOFDM 标记信号. 同理, 经过 IM<sub>2</sub> 输出的光标记信号的表达式为

$$E_{out_2} = E_2 \sqrt{\text{Mod}_2(t)} \exp(j\omega_2 t) \quad (4)$$

$$\text{Mod}_2(t) = (1 - \beta) + \beta \cdot \text{modulation}_2(t) \quad (5)$$

式中  $E_2$  为光载波 2 的幅度,  $\omega_2$  为光载波 2 的角频率,  $\beta$  为 IM<sub>2</sub> 的调制系数,  $\text{modulation}_2(t)$  为调制信号即标记信号, 也就是 OFDM 信号. OFDM 信号由二进制信号在电域进行 OFDM 调制得到, 表达式为

$$\text{modulation}_2(t) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \exp(j2\pi f_k t) \quad (6)$$

式中  $f_k = (k-1)/t_s$ ,  $f_k$  是第  $k$  个子载波的频率,  $N$  为 OFDM 子载波数,  $t_s$  是 OFDM 符号周期,  $C_k$  是第  $k$  个子载波上的复数码元信息, 由二进制信息比特经相应的调制映射得到.

载荷和标记分别调制到不同的光波长上后, 通过光耦合器耦合, 产生光分组数据信号, 进行传输. 这种方案的优点有: 1) 用 OFDM 光信号作光标记, 能有效地抵抗色散效应以及标记和载荷之间相互干扰的影响, 适于长距离传输. 2) 标记与载荷是分开调制的, 相互间几乎没有串扰, 且容易结合. 3) 在各个节点载荷和标记易于分离, 采用一个光滤波器即可实现. 4) 载荷和标记不会受到消光比的限制, 克服了正交调制的不利条件. 5) 光标记的速率可以比数据载荷的速率低很多, 便于标记处理, 且适用于高速的数据交换.

## 2 实验装置与结果

光分组的产生、发送和接收的实验装置如图 2. 两个分布反馈式激光器(DFB-LD<sub>1</sub>, DFB-LD<sub>2</sub>) 分别产生两路连续光波, 输出功率均为 10 dBm. 其中一路波长为 1 544.2 nm, 对此路光载波用载荷信号进行光强度调制, 产生速率为 10 Gb/s 的 OOK 光载荷. 实验中使用的载荷信号为字长  $2^{31}-1$  的 10Gb/s 伪随机二进制序列, 由码型发生器产生.

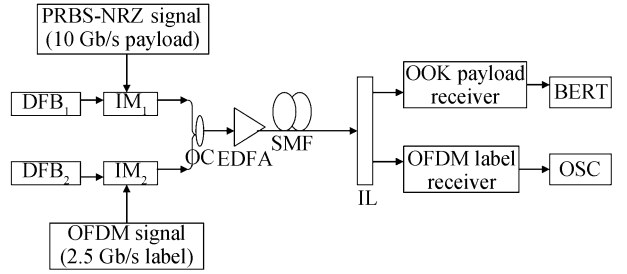


图 2 实验装置

Fig. 2 Diagram of experiment setup

另一路连续光波长为 1 545.2 nm, 将此路光载波接到一个 3 dB 带宽大于 8 GHz, 半波电压为 7.8 V, 消光比大于 25 dB 的马赫-曾德尔单臂强度调制器, 用来加载标记信号即 OFDM 电信号, 产生 OFDM 光标记信号, 该强度调制器的偏置电压设为 8.0 V. OFDM 电信号速率为 2.5 Gb/s, 子载波采用 QPSK 调制, 由任意波形发生器(AWG)产生, 其过程分为三步, 第一步: 产生数据信号的 OFDM 信号. 首先根据系统特性, 将需要传输的伪随机码数据进行多进制符号映射如采取 QPSK 映射(Mapper). 将数据帧映射为符号帧后, 在各个符号中加入导频(Pilot), 并将高频部分插零作为保护间隔(GI), 然后进行 IFFT 形成子载波. 此多正交子载波波形就是基本 OFDM 波形, 为克服信号时延, 需要将这一波形的一部分复制到波形的头部作为循环前缀(CP). 至此, 数据信号的 OFDM 信号产生. 第二步: 产生训练序列的 OFDM 信号, 即一个用于同步和信道估计的功能型 OFDM 信号. 首先, 根据需要形成一个训练序列, 将这个序列直接通过 IFFT 形成子载波. 将形成的多子载波波形的一部分复制到波形的头部作为克服信号时延的循环前缀(CP). 至此, 训练序列 OFDM 信号形成. 第三步: 在完成以上两个步骤后, 将训练序列 OFDM 信号复制到数据 OFDM 信号前形成一个完整 OFDM 信号. 经 AWG 生成完整的 OFDM 信号. OFDM 信号的电谱图如图 3.

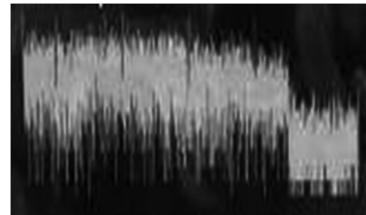


图 3 OFDM 信号电谱图

Fig. 3 Electrical spectra of OFDM signal

光标记和光载荷两路信号经过一个 3-dB 光耦合器(OC), 耦合封装后产生光分组信号. 光分组信号经掺铒光纤放大器(EDFA)光功率放大后, 经过 40 km 标准单模光纤(SMF-28)传输至接收节点. 为了避免非线性效应的影响, 耦合入光纤的总输入功

率低于 3 dBm. 在接收节点, 采用带宽和频率间隔为 50/100 GHz 的双端口光交错复用器(IL)分离标记信号和载荷信号. 从光交错复用器的一端分离出来的光载荷信号经光放大后由 PIN 光电二极管检测接收, 再接入到误码仪(BERT)测量误码率. 由光交错复用器另一端分离出来的 OFDM 光标记信号则进入 10 Gb/s 光接收机, 经光接收机解调的 OFDM 信号由实时示波器(OSC)进行数据采集接收, 以便后续计算误码及星座图.

图 4 为实验装置中的不同位置测得的光谱图.

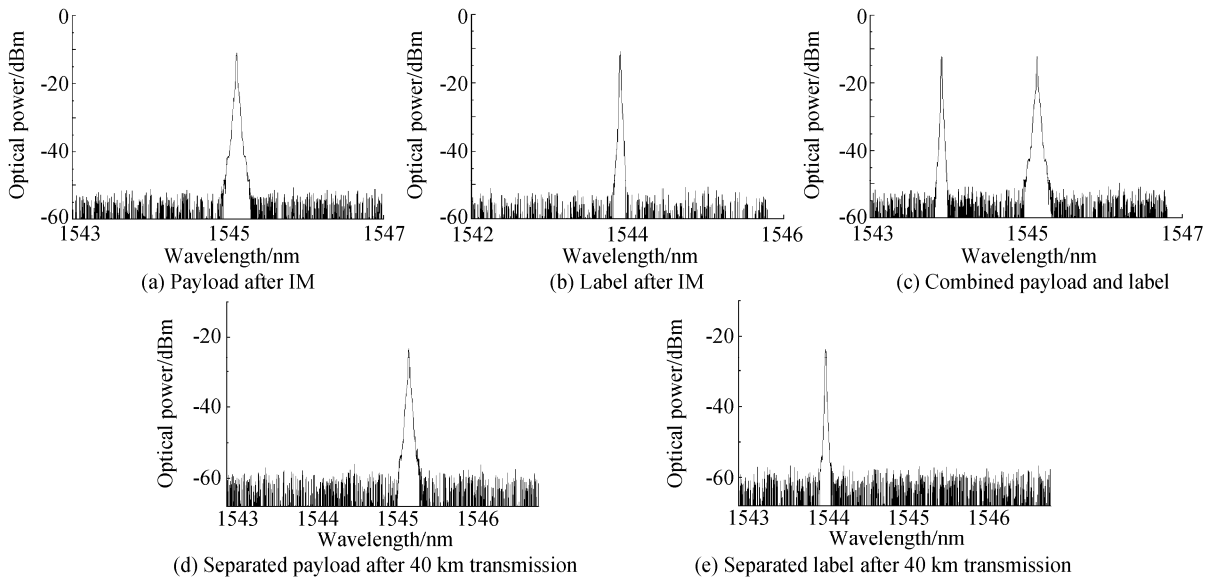


图 4 不同测试点的实验光谱

Fig. 4 Optical spectra at different locations within the experimental setup

图 5 为利用示波器测得的载荷的眼图. 图 5(a)是在背靠背即光纤传输距离为 0 km 的情况下, 接

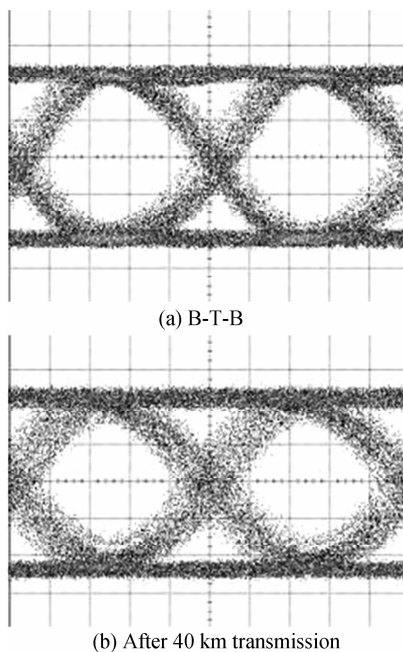


图 5 载荷的接收眼图(20 ps/div)

Fig. 5 Eye diagrams (20 ps/div) of the demodulation of payload

采用 Ando 公司 6317 的光谱分析仪测得, 其波长范围为 600~1 700 nm, 最小分辨率为 0.01 nm. 图 4(a)和(b)分别为在发送节点经强度调制后的 OOK 光载荷和 OFDM 光标记的光谱图. 图 4(c)为在发送节点经光耦合器耦合的载荷和标记的光谱图. 从图上可以看到, 标记与载荷的峰值功率几乎相等, 以确保标记与载荷的接收质量. 图 4(d)和(e)分别为经 40 km 单模光纤传输后并在接收节点经光交错复用器分离的载荷和标记的光谱图. 可以看出两者之间几乎没有串扰.

收载荷的眼图. 图 5(b)是经过 40 km 光纤传输后的载荷解调的眼图. 通过比较可以看出, 经过光纤传输后, 载荷眼图依然清晰张开, 说明虽然经过 40 km 的光纤传输, 仍然能够很好的恢复出数据载荷信号, OFDM 标记对载荷的传输几乎没有影响. 但眼开度稍微减小, 这是由于信号在光纤传输中受噪音、衰减、色散以及非线性效应影响造成的.

图 6 是 OFDM 光标记信号解调得到的星座图. 图 6(a)和(c)是背靠背情况下, 接收功率分别为 -17 dBm 和 -19 dBm 时, OFDM 标记解调的星座图. 图 6(b)和(d)是经过 40 km 光纤传输后, 接收功率分别为 -17 dBm 和 -19 dBm 时, OFDM 标记解调的星座图. 将这四幅星座图比较可以看出, 随接收功率减小, 星座图越发散. 当接收功率确定时, 经光纤传输后的星座图比背靠背测得的星座图发散, 这是由于信噪比的下降和色散的影响造成的, 但是基于 QPSK 调制的 OFDM 信号在 40 km 光纤传输后仍然处于标准的四个区域, 能很好地恢复标记信号.

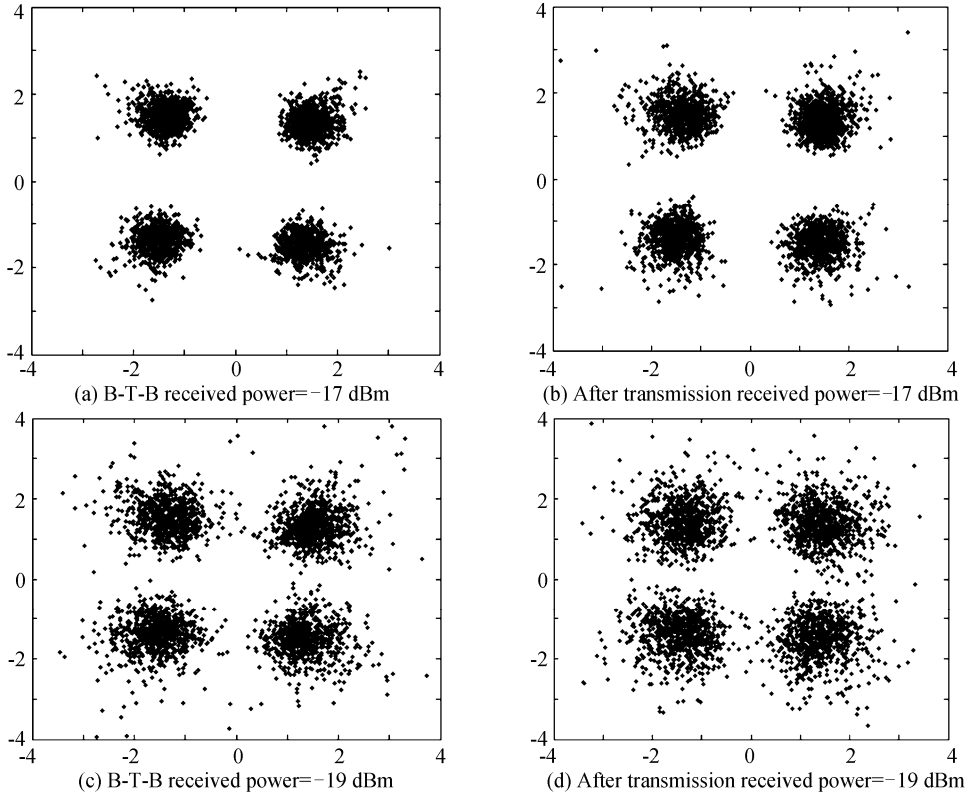


图 6 OFDM 光标记的接收星座  
Fig. 6 Received constellations of the OFDM label

图 7(a)和(b)为背靠背接收以及传输 40 km 后接收两种情况下,分别对载荷和标记解调后的误码率曲线图. 由图看出接收功率越小,误码率越大. 10 Gb/sOOK 载荷在传输 40 km 后,误码率达  $10^{-9}$  时,功率代价约为 1 dB. 2.5 Gb/sOFDM 标记在传

输 40 km 后,误码率达  $10^{-4}$  时,功率代价约为 0.5 dB. 功率代价主要由光信噪比的降低引起. 实验结果表明这种方案具有很好的性能,使标记信号和载荷信号不容易被破坏,功率损耗小,能进行长远距离传输而不需要色散补偿.

### 3 结论

提出并实验研究了一种以光正交频分复用(OOFDM)信号作为光标记的新方案,将 10 Gb/sOOK 载荷和 2.5 Gb/sOFDM 标记分别通过强度调制器调制在不同波长的光载波上,用光耦合器耦合产生光分组. 经过 40 km 单模光纤传输后,在接收节点用光交错复用器将载荷与标记分离,分别用相应的接收机进行检测. 实验结果表明光分组信号经光纤传输后,仍能很好的恢复载荷信号和标记信号,功率损耗小,能进行长远距离传输. 该方案简单易行,标记与载荷分开调制,不受消光比限制,串扰不明显,容易实现标记和载荷的合并与分离,且将 OFDM 引入光标记交换网,具有抗色散、抗干扰等多方面的优势,给光标记交换技术提供了一个全新的方案.

#### 参考文献

[1] MEAGHER B, CHANG G K, ELLINAS G, et al. Design and implementation of ultra-low latency optical label switching for packet-switched WDM networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(12):1978-1987.  
[2] BLUMENTHAL D J, OLSSON B E.. All-optical label swapping networks and technologies [J]. *Journal of*

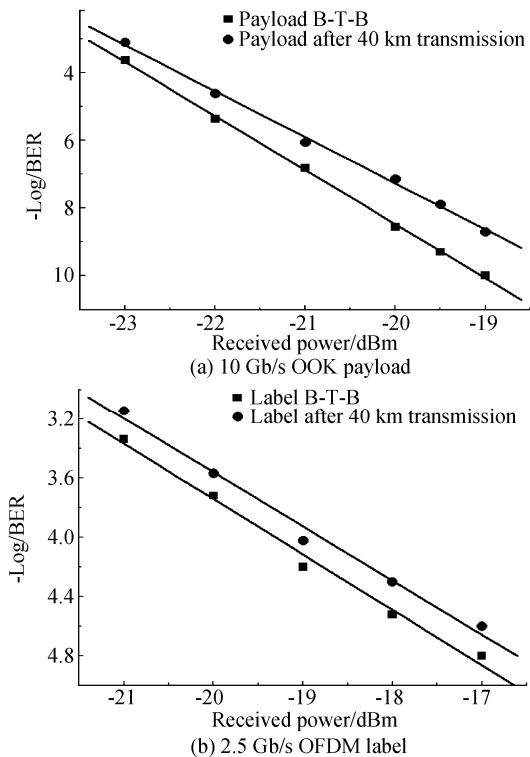


图 7 误码率曲线  
Fig. 7 BER curves

- Lightwave Technology*, 2000, **18**(12): 2058-2075.
- [3] JEON M, PAN Z, CAO J, *et al.* All-optical sub-carrier label-swapping with 2R regeneration[J]. *OFC*, 2003, **1**: 277-279.
- [4] ZHU Zu-qing, ZHONG Pan, YOO S J B. A compact all-optical subcarrier label-swapping system using an integrated EML for 10-Gb/s optical label-switching networks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(2): 426-428.
- [5] ZHANG Jian-feng, NAN Chi, PABLO V Holm-Nielsen, *et al.* An optical FSK transmitter based on an integrated DFB laser-EA modulator and its application in optical labeling[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(7): 984-986.
- [6] LIU X, WEI X, SU Y, *et al.* Transmission of an ASK-labeled RZ-DPSK signal and label erasure using a saturated SOA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(6): 1594-1596.
- [7] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(10): 587-588.
- [8] TANG Yan, SHIEH W, YI Xing-wen, *et al.* Optimum design for RF-to-optical up-converter in coherent optical OFDM systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(7): 483-485.
- [9] TANG Guang-qiang, YU Jin-long, WANG Yao-tian, *et al.* 40 GHz all-optical clock extraction using a Fabry-Perot filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1853-1857.  
汤广强, 于晋龙, 王耀天, 等. 基于法布里-珀罗滤波器的 40GHz 全光时钟提取实验[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1853-1857.
- [10] SHAO Yu-feng, CHEN Lin, WEN Shuang-chun, *et al.* A novel scheme for generation of optical dark return-to-zero label signals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **27**(9): 1580-1584.  
邵宇丰, 陈林, 文双春, 等. 产生暗归零码光标记信号的新方案[J]. *光子学报*, 2007, **27**(9): 1580-1584.
- [11] SHAO Yu-feng, WEN Shuang-chun, CHEN Lin, *et al.* Additional applications of modified duobinary return-to-zero signal in the label switching optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(8): 1201-1207.  
邵宇丰, 文双春, 陈林, 等. 改进型双二进制归零码信号在标记交换系统中的新应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1201-1207.
- [12] YAO Min, ZHUO Hui, WEN Shuang-chun. Investigation of the beam evolution of optical lattice of the amplitude modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 802-807.  
姚敏, 卓辉, 文双春. 具有振幅调制的光学格子中光束的演化研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 802-807.
- [13] SI Li-bin, FU Sheng-gui, JIA Xiu-jie, *et al.* High power switchable multi-wavelength double-clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 209-211.  
司立彬, 付圣贵, 贾秀杰, 等. 大功率多波长可转换双包层光纤激光器[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 209-211.
- [14] CHENG Li-li, SHAO Yu-feng, CHEN Lin, *et al.* A novel scheme for optical label erasure using electro absorption modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1401-1404.  
程黎黎, 邵宇丰, 陈林, 等. 用电吸收调制器实现标记擦除的新方法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1401-1404.
- [15] SHI Sen, YAN Juan-juan, ZHENG Zheng. All-optical regeneration techniques of phase-modulated signals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2310-2313.  
史森, 闫娟娟, 郑铮. 相位调制信号的全光再生技术[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2310-2313.
- [16] HE Jing, CHEN Lin, WEN Shuang-chun. Performance research on 40 Gb/s DPSK format against polarization-mode dispersion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 660-664.  
何晶, 陈林, 文双春. 40Gb/s 差分相移键控格式抗偏振模色散的性能研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 660-664.

## An Optical Packet Switching System with a Novel Scheme for Using Optical OFDM Label Signal

ZHANG Chao-li, CHEN Lin, SHAO Yu-feng, CAO Zi-zheng, LI Deng-ke, YU Jian-jun

(a. School of Computer and Communication; b. Key Laboratory of Micro/Nano

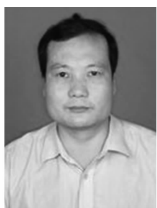
Optoelectronic Devices, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A novel optical packet switching scheme, in which an optical orthogonal frequency division multiplexing (OOFDM) signal is generated as a label, is proposed and experimentally demonstrated. The 10 Gb/s OOK optical payload and the 2.5 Gb/s OFDM optical label are produced by intensity modulation of two continuous waves with different wavelength, respectively. In the experiment, the eye diagrams of the payload, constellation diagrams of the label and the BER curves of the label and payload are obtained, when the optical packets were transmitted on optical fiber or not. It is experimentally demonstrated that the power penalties for the payload and the label after 40 km fiber transmission are 1 dB and 0.5 dB, respectively. The scheme is easy to implement, so it can be used in an optical label switched network.

**Key words:** Optical fiber communication; Optical label switching (OLS); Intensity modulation (IM); Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)



**ZHANG Chao-li** is pursuing her M. S. degree at School of Computer and Communication, Hunan University. Her research interests focus on the technology of all optical network.



**Chen Lin** was born in 1968. He received his Ph. D. degree from Beijing University of Post and Telecommunication in 2004. Now he is a professor of School of Computer and Communication in Hunan University, majored in optical communication and photoelectron device.