

文章编号:1004-4213(2010)08-1455-6

# 基于光电反馈环单元时钟提取与解复用的 160 Gb/s OTDM 信号 100 km 传输<sup>\*</sup>

卢丹, 陈明, 龚桃荣, 吕博, 李唐军, 简水生

(1 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

(2 北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:**提出了一种能够同时对高速光时分复用技术信号解复用与时钟提取的光电反馈环单元. 在接收端, 采用光电反馈环单元, 信号单次通过即可同时完成 160 Gb/s 到 10 Gb/s 的解复用与时钟提取; 两级电吸收调制器级联工作方式缩减了采样窗口宽度, 满足了解复用小于 6.25 ps 超窄采样窗口的要求; 而闭环路的锁相同步工作方式, 使所提取的时钟信号抖动(Jitter RMS)由 2.4 ps 降至 450 fs. 基于该结构, 实验上成功实现了无误码的 100 km 160 Gb/s 光时分复用技术传输及传输后无误码地解复用与时钟提取, 功率代价小于 3 dB.

**关键词:**光时分复用; 电吸收调制器; 解复用; 时钟提取

**中图分类号:** TN913.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103908.1455

## 0 引言

由于电时分复用(Electrical Time-Division-Multiplexed, ETDM)的电子瓶颈限制, 在光域上直接利用光时分复用技术(Optical Time-Division-Multiplexed, OTDM)提高传输容量, 避免了电子器件的速率限制, 近几年来倍受研究者的关注<sup>[1-3]</sup>. 在同一波长上, N 路低速率的信号经过复用组成 N 倍的高速率信号, 可以极大提高单波长信道的速率, 甚至达到 Tbit/s<sup>[4]</sup>. OTDM 信号经过光纤传输后, 在接收端, 不仅需要将高速率信号解复用还原为各支路信号, 而且为了能够正确解复用出各支路信号, 还必须对解复用器进行精确的时钟同步, 因此在接收端进行时钟提取也是至关重要的. 目前多数 OTDM 系统是将信号通过分光器分为两路, 一路利用锁模激光器<sup>[5-6]</sup>、窄带滤波器<sup>[8]</sup>或光电振荡器<sup>[3]</sup>等方法实现时钟提取, 另一路则在所提取的时钟驱动下, 采用非线性效应<sup>[7-10]</sup>(如四波混频, 交叉增益调制等)或电吸收调制器<sup>[11]</sup>完成解复用. 相比之下, 如果能够只经过一个单元, 同时实现解复用与时钟提取, 则不需要对信号进行多次处理且结构紧凑, 有利于实现单元的集成化. 因此, 基于这种思想, 本文提出了一种性能稳定的光电反馈环单元, 利用两级电吸收调

制器(Electro-Absorption Modulators, EAM)形成级联采样窗口, 通过反馈锁相工作方式提取时钟. 在该结构中, 信号单次通过即可同时实现时钟提取与解复用. 采用所提出的光电反馈环单元, 成功实现了从 160 Gb/s 到 10 Gb/s 的解复用与时钟提取, 进行了 160 Gb/s 时分复用系统的实验研究, 实现了无误码的普通单模光纤中的 100 km 传输.

## 1 光电反馈环单元工作原理

图 1 为本文所提出的光电反馈环单元结构图. 高速率 OTDM 信号进入电吸收调制器后, 在反向直流电压偏置下, EAM 的吸收率与射频信号幅度之间呈反比关系<sup>[11]</sup>, 因而 10 GHz 射频信号驱动产生了周期 100 ps 的采样窗口, 此时 EAM<sub>1</sub> 上的偏置电压为 -2.1 V, 射频信号峰值为 150 mV, 对应窗口宽度为 25 ps, 如图 2(b). 而 EAM<sub>2</sub> 在 40 GHz 的射频信号驱动下, 产生的采样周期为 25 ps, 为了得到更窄的窗口宽度, 其直流偏置电压为 -1.4 V, 窗口宽度为 5 ps, 如图 2(d).

图 2 给出了 80 Gb/s 速率下解复用原理图, 由于受限于示波器(安捷伦 86100A) 53 GHz 的带宽, 没有采用 160 Gb/s 的 OTDM 信号波形, 但工作原理相同. 以 100 ps 为一个时间单元来说明整个流程: 160 Gb/s 或 80 Gb/s 的 OTDM 信号在 100 ps 时间单元中分别含有 16 路和 8 路支路信号, 当它们通过第一级 EAM, EAM<sub>1</sub> 利用一个宽度为 25 ps 的采样窗口(如原理图 2 中的虚线)对这 100 ps

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(2007AA01Z258、2008AA01Z15、60877042、60837002)资助

Tel: 010-51684015

Email: 05111030@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2009-12-24

修回日期: 2010-02-04

OTDM 信号进行解复用,对 160 Gb/s 速率,解复用出四路光信号,而在 80 Gb/s 速率下,解复用得到两路光信号,而采样窗口外的 75 ps,输出为零,如图 2 (c).之后信号继续接入到下一级 EAM<sub>2</sub>,在 100 ps 时间单元内,EAM<sub>2</sub> 利用四个周期 25 ps,宽度 5 ps 的采样窗口再次对这 100 ps 的 OTDM 信号进行解复用,由于窗口宽度 5 ps 小于单支路间隔,第一个周期的采样窗口得到了一路信号,而在随后的三个采样窗口由于第一级 EAM 输出已为零,则其输出也为零,即在 100 ps 时间单元内,只有一路信号被提取出来.因此,通过两个 EAM 的配合工作,在 EAM<sub>2</sub> 的输出端就解复用得到了 10 Gb/s 的单路信号,如图 2(e),实现了 160 Gb/s(或 80 Gb/s)到 10 Gb/s 的解复用.

由本文分析可知,如果单独使用任何一级

EAM,如采用 EAM<sub>1</sub> 的 100 ps 周期,25 ps 宽度的采样窗口,窗口宽度太宽无法直接得到单路信号,而若使用 EAM<sub>2</sub> 的 25 ps 周期,5 ps 宽度的采样窗口,尽管窗口宽度小于单路时隙,但却只能得到 40 Gb/s 速率而非 10 Gb/s 的支路信号,而通过两个 EAM 级联结构,大大降低了对器件性能的要求,获得了从高速 160 Gb/s 到 10 Gb/s 所需的周期 100 ps,宽度 5 ps 的极窄解复用窗口.

如图 1 中,解复用后的光信号之后进入 10 Gb/s 时钟数据提取模块,在电域上进行低速率的时钟提取,同时得到 10 GHz 时钟信号.为了降低时钟抖动并使解复用与时钟提取同步,将此电时钟“反馈”驱动 EAM<sub>1</sub>,并倍频到 40 GHz 驱动 EAM<sub>2</sub>,这样通过调节线路上的相移器,实现反馈锁相工作状态,从而保证解复用与时钟提取的同步.

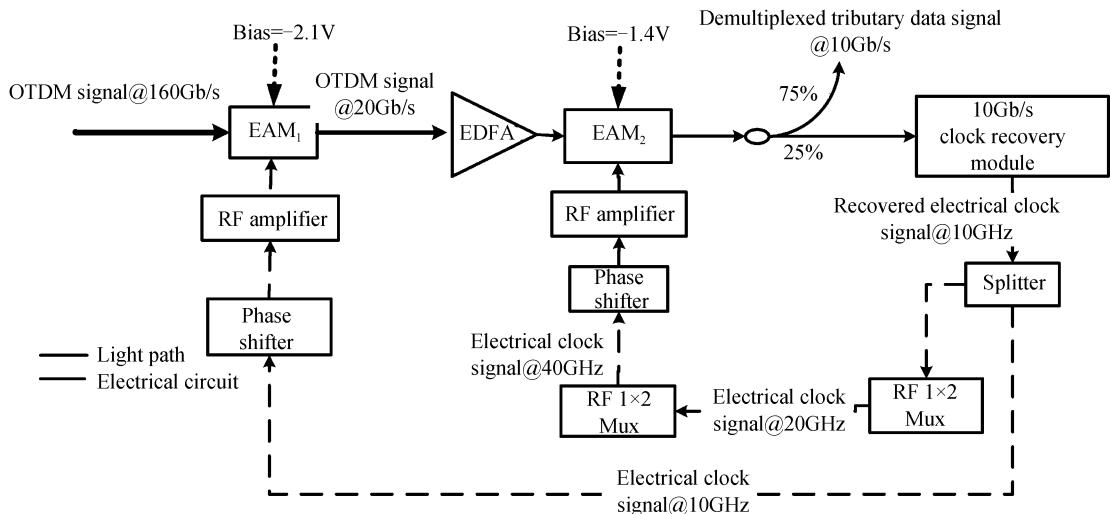


图 1 级联电吸收调制器的解复用与时钟提取光电反馈环单元结构图  
Fig. 1 Opto-electronics feedback loop for simultaneous demultiplexing and clock recovery

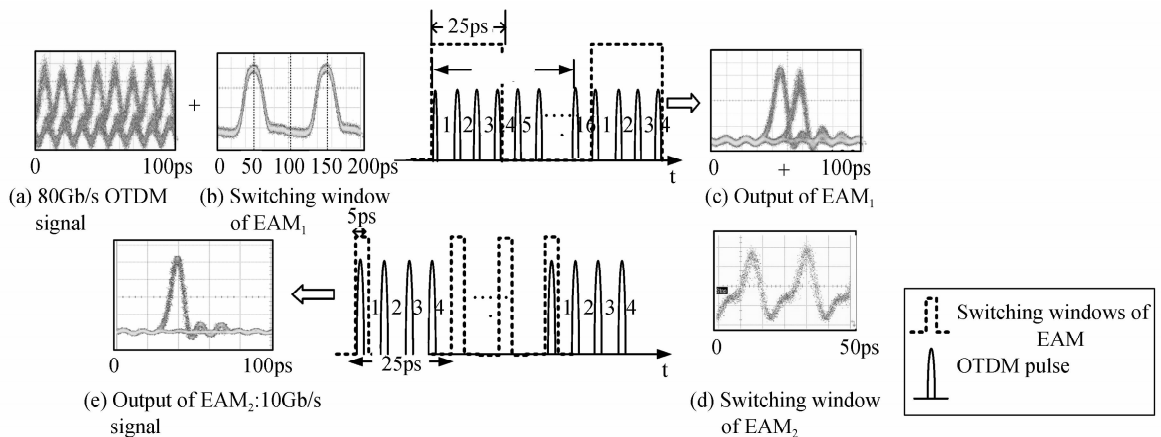


图 2 160(80)Gb/s 到 10Gb/s 的解复用原理图  
Fig. 2 Schematic diagram illustration of 160(80)Gb/s/ to 10 Gb/s demultiplexing

## 2 160 Gb/s OTDM 时钟提取与解复用实验

基于本文提出的时钟提取与解复用单元,搭建

了 160 Gb/s OTDM 传输系统,如图 3. 实验中采用了锁模光纤环激光器(Calmar Optcom's pico-second fiber laser)作为超短脉冲源,图 4 为其输出光谱与时域波形,脉冲中心波长 1 557. 98 nm,脉宽

1.5 ps,边模抑制比(Side-Mode Suppression Ratio, SMSR)20 dB.光脉冲经过 LiNbO<sub>3</sub> 调制器进行 10 Gb/s 的伪随机码数据调制后(码长为 2<sup>7</sup>-1),通过光复用器对各支路信号经过不同量的时延后,再在

空间上利用自聚焦准直透镜进行脉冲间插复用,将 10 Gb/s 复用为 160 Gb/s 信号,这种结构采用体光学的方法,减少了干涉扰动,能够最大程度降低输出信号的峰-峰波动<sup>[12]</sup>.

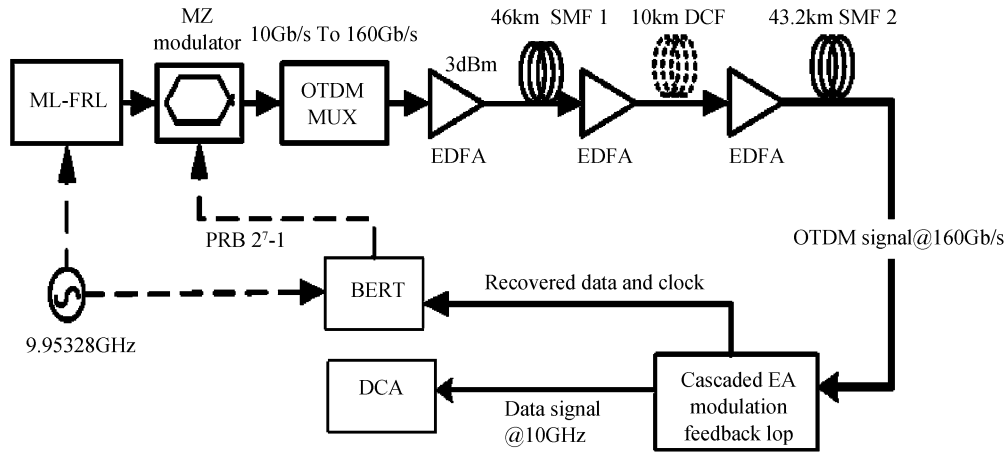


图 3 160Gb/s 光时分复用传输系统  
Fig. 3 Experiment setup of 160 Gb/s OTDM transmission system

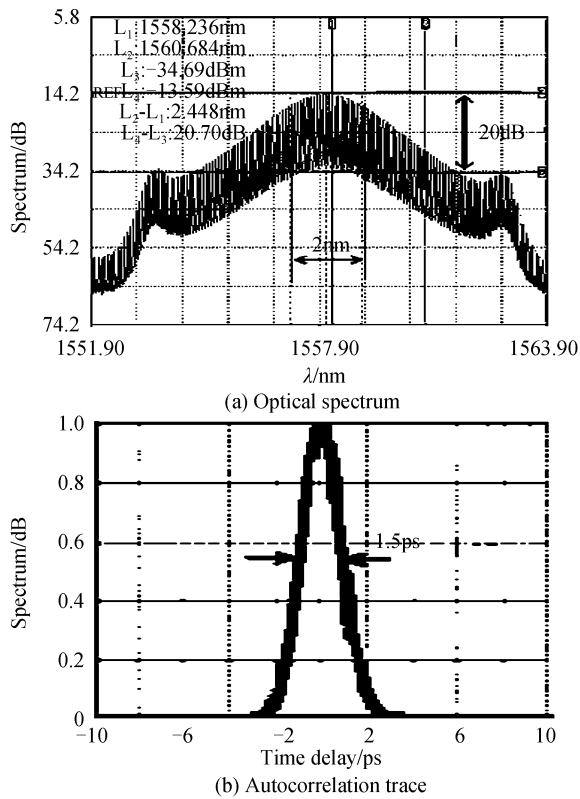


图 4 脉冲源输出光谱和自相关仪测得的时域波形  
Fig. 4 Optical spectrum and autocorrelation trace of the ultra-short pulse source

复用后的信号经过两段普通单模光纤(SMF<sub>1</sub>, SMF<sub>2</sub>)后,通过色散补偿光纤(Dispersion Compensating Fiber, DCF)对链路中的色散与色散斜率同时进行补偿.由于超窄光源对应谱宽较宽,因而我们需要色散斜率补偿进一步抑制频谱展宽,另外,由于 160 Gb/s 高速光信号的色散容限只有 40 Gb/s 系统的 1/16,即线路中若存在 1~2 ps 的色

散也会产生较大的误码,为了保证残余色散足够小,在 DCF 长度一定时,本文采用了改变链路中普通单模光纤的长度来确保得到最优化的色散补偿.利用若干长度不同的 SMF(包括 5 km、1 km、500 m、200 m、100 m、50 m)组合匹配,测量不同长度普通单模光纤下,传输后脉冲宽度的曲线,如图 5,能够有效地将色散补偿准确度控制在 m 量级,残余色散小于 0.01 ps.从图 5 中可以看出,当 L=89.25 km,传输后色散引起的脉冲展宽最小,脉宽约为 2.25 ps,与源脉宽近似,因而采用了 46+43.25 km 的两段普通单模光纤的组合.链路上采用 EDFA 作为在线放大器,其噪音指数约为 2 dB.为了减小非线性的影响,入纤光功率控制在小于 3 dBm.

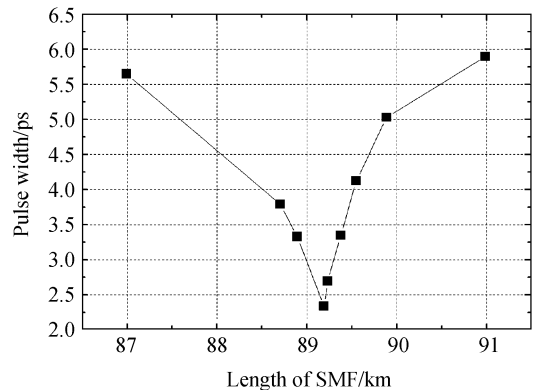


图 5 在单模光纤不同长度下脉冲宽度的变化  
Fig. 5 Variation of pulse width versus length of SMF

传输后的 OTDM 信号在接收端进入所提出的光电反馈单元进行解复用与时钟提取,通过两级电吸收调制器的采样窗口,再经过 10 Gb/s 时钟数据的模块进行电时钟提取,通过调节相移器改变电

时钟的相位,观察示波器上解复用后的光时域波形,同时利用误码仪测量此时的误码率。

### 3 实验结果与讨论

如图 6,首先本文测量了未经传输时,OTDM 信号经过光电反馈环单元后,在输出端所得到的解复用与时钟提取信号。实验结果表明,在输出端,在光电反馈环单元反馈锁定状态下,输出端得到了清晰、稳定的支路 10 Gbit/s 信号并同时获得了提取

后的 10 GHz 时钟信号,如图 6(d),证明了光电反馈环单元的可行性。图 6 还同时比较了锁定与非锁定工作状态下,光电反馈环单元环输出端得到的解复用 10 Gb/s 支路信号与提取的时钟信号性能:在锁定工作下,解复用支路信号眼开度更大,噪音更小,信号 OSNR 由未锁定下的 7.2 dB 增加为 15.5 dB,而提取出的时钟抖动 RMS 由 2.4 ps 减小为 420 fs,误码率迅速降为 0,由此看出,反馈锁定工作方式能够大大减小时钟抖动,并改善解复用信号的性能。

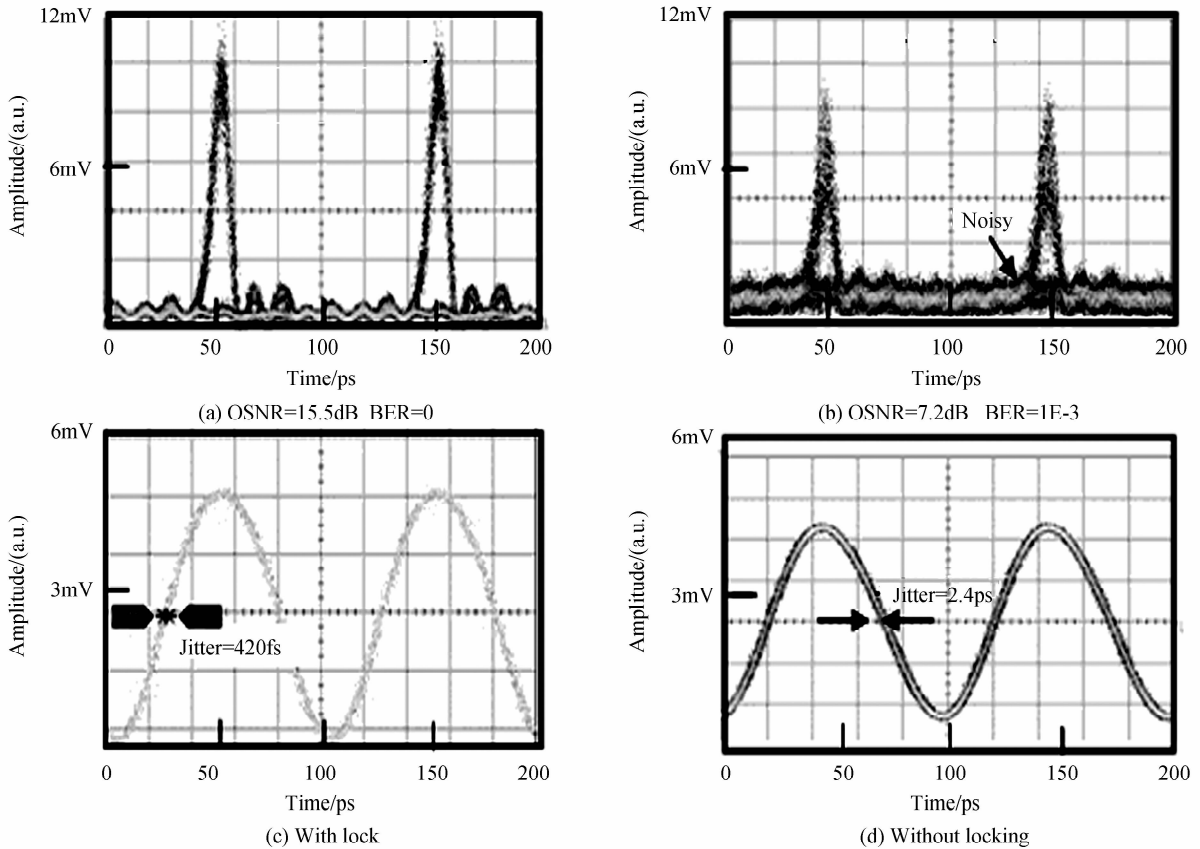


图 6 解复用出的 10 Gb/s 支路信号与提取的时钟信号锁定和非锁定工作状态

Fig. 6 10 Gb/s demultiplexed optical signal and 10 GHz recovered clock With and Without locking operation

为了能够得到系统的传输性能,本文分别测量了在 80 Gb/s 和 160 Gb/s 速率下经过 100 km 传输后的误码率曲线,如图 7。尽管在传输系统中并没有

消除偏振模色散和滤除 EDFA 所产生的自发辐射噪音影响,传输后在两个速率下均能达到零误码,稳定性较好,功率代价小,传输后的 80 Gb/s 的信号,功率代价小于 1.5 dB,而传输后的 160 Gb/s 信号,功率代价仅为 3 dB。

本文进一步比较了没有传输与经过 100 km 传输后光电反馈环单元锁解复用信号的性能,如图 8。实验结果表明,经过 100 km 传输后,链路中的 EDFA 的自发辐射噪音使解复用后的信号比未传输信号 OSNR 降低,而 PMD 会使分插复用的脉冲序列产生交叠,带来系统不稳定<sup>[13]</sup>,但经过光电反馈单元接收后,解复用信号的眼开度仍较好,误码率仍能达到为零,说明了光电反馈环单元对传输后所带来的噪音和 PMD 影响有较好的容忍度。

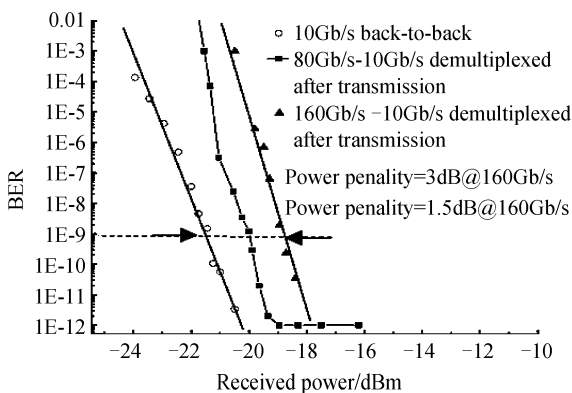


图 7 系统误码率

Fig. 7 BER performance

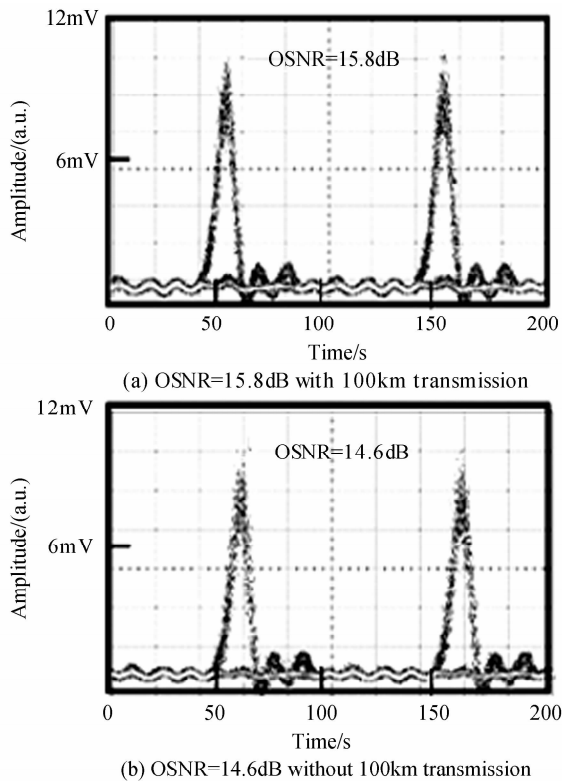


图 8 信号没有经过与经过 100 km 传输后经过光电反馈环单元解复用后的支路信号

Fig. 8 Demultiplexed signal without and with 100 km transmission

## 4 结论

本文提出了一种能够同时实现解复用与时钟提取的光电反馈环单元,该结构具有稳定性好,结构紧凑,时钟抖动小,并对传输带来的系统损伤有较好容忍度,能广泛应用于高速率光时分复用系统的解复用与时钟提取.基于此结构,实验上成功实现了 100 km 的 80 Gb/s 与 160 Gb/s 无误码传输及传输后的解复用与时钟提取.

### 参考文献

- [1] WEBER H G, LUDWIG R, FERBER S, *et al.* Ultrahigh-speed OTDM-transmission technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **12**(24): 4616-4627.
- [2] SCHUH K, SCHMIDT M, LACH E, *et al.*  $4 \times 160$  Gbit/s DWDM/OTDM transmission over  $3 \times 80$  km TeraLight-Reverse TeraLight fibre [C]. Copenhagen; ECOC, 2002; paper 2.1.2.
- [3] GAO Yi-zhi, LOU Cai-yun, YAO Min-yu, *et al.*  $4 \times 10$  Gb/s otdm signal transmission in 165 km smf using the optronic oscillator as the clock extractor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 30-32.  
高以智, 娄采云, 姚敏玉, 等. 用光电振荡器提取帧时钟实现  $4 \times 10$  Gb/s OTDM 信号 165 km 传输 [J]. *光子学报*, 2002, **31**(1): 30-32.
- [4] WEBER H G, FERBER S, KROH M, *et al.* Single channel 1.28 T/s and 2.56 Tb/s DQPSK transmission [J]. *Electron Lett*, 2006, **3**(42): 178 - 179.
- [5] ATTYGALLE M, WEN Y J. Injection-locked Fabry-Perot laser with electronic feedback for clock recovery from high-speed OTDM signals [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2006, **18**(3): 478-480.
- [6] BETTI S, BULLI C. Optical clock recovery from 10 Gb/s NRZ signal [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, **42**(6): 435-437.
- [7] YIN Li-na, CAO Zhuo, LIU Guo-ming, *et al.* All-optical clock recovery from unequal-amplitude multiplexed OTDM signals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 569-572.  
尹丽娜, 曹灼, 刘国明, 等. 非等幅 OTDM 信号的全光时钟提取 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 569-572.
- [8] TONG W, LOU C Y. A simple method for clock recovery [J]. *Opt and Laser Tech*, 2004, **36**(8): 613-616.
- [9] LI J, OLSSON B, KARLSSON M, *et al.* OTDM demultiplexer based on XPM-induced wavelength shifting in highly nonlinear fiber [C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2003; paper TuH6.
- [10] SOKOLOFF J P, PRUCNAL P R, GLESK I, *et al.* A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 1993, **7**(5): 787-790.
- [11] QIU J, ZHOU G, WU J, *et al.*  $8 \times 10$  Gb/s OTDM signal demultiplexing by using self-cascaded electro-absorption modulator(EAM) after transmitting over 300 km [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2006, **23**(18): 2541-2543.
- [12] LI Tang-jun. Studies on key technology in 160 Gb/s OTDM system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.  
李唐军. 160Gb/s 光时分复用通信系统关键技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [13] ZHANG Jian-zhong, ZHANG Xiao-guang, YU Li, *et al.* The experimental research on adaptive PMD compensation up to second-order in 40 Gbit/s OTDM system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 561-565.  
张建忠, 张晓光, 于丽, 等. 40 Gbit/s OTDM 系统中二阶偏振模色散自适应补偿技术研究 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 561-565.

## 160 Gbit/s OTDM Transmission over 100 km Using Opti-electronics Feedback Loop for Simultaneous Clock Recovery and Demultiplexing

LU Dan, CHEN Ming, GONG Tao-Rong, LÜ Bo, LI Tang-Jun, JIAN Shui-Sheng

(1 *Key-Laboratory of All-Optical Networks and Advanced Communication Networks, Ministry of Education, Beijing 100044, China*)

(2 *Institute of Light wave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

**Abstract:** A single channel  $16 \times 10$  Gb/s OTDM transmission over 100 km fiber is experimentally demonstrated. In the receiver, an opto-electric feedback loop is proposed for simultaneous 10 Gb/s clock recovery and 160 Gb/s to 10 Gb/s demultiplexing. The loop consists of a pair of electro-absorption modulators and a 10 Gb/s clock recovery module. By cascading electro-absorption modulators, the switching window is decreased from 25 ps to 5 ps and the synchronous problem in demultiplexing between clock and data is eliminated using the recovered clock as the feedback in the close loop, the jitter of recovered clock is less than 450 fs. Based on the loop, without using optical filters and eliminating PMD in the transmission line, error free  $16 \times 10$  Gb/s OTDM 100 km transmission is successfully realized with power penalty less than 3 dB.

**Key words:** OTDM; Electric-absorption modulator; Demultiplexing; Clock recovery



**LU Dan** was born in 1983. Now, she is a Ph. D. degree candidate, and her research interests focus on high-speed optical transmission and all-optical signal processing.



**SHUI Sheng-jian** was born in 1929. As a member of Chinese Academy of Sciences, his research interest focus on optical fiber communication, optical fiber sensing, optical fiber active device and electro-magnetic field.