

40 Gb/s 至 8 路 5 Gb/s 全光串并转换实验研究

王 菊 于晋龙 罗 俊 王文睿 吴 波 韩丙辰 郭精忠 杨恩泽

(天津大学电信学院光纤通信实验室, 天津 300072)

摘要 提出了一种新型的 40 Gb/s 全光串并转换(AOSPC)的实现方案,该系统主要由波分/时分脉冲光源的产生与顺序多波长变换两个部分构成。实现了信道波长数目和重复频率可调的波时分脉冲光源;分析了基于单个半导体光放大器(SOA)中的交叉相位调制效应(XPM)实现顺序多波长变换的原理,并在此基础上采用顺序多波长变换技术实现了将 40 Gb/s 的串行输入光信号转换为 8 路 5 Gb/s 的并行输出信号。该技术可将高速率的光信号转换为多路低速率信号,进而可以使用现有的电子器件对信号进行处理,为下一步的光分组交换中的报头处理技术和光随机存取存储器(RAM)的研究提供了一种可行的思路。

关键词 光通信;光分组交换;串并转换;波分/时分光脉冲;顺序多波长变换

中图分类号 TN914.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0506001

Investigation of 40 Gb/s All-Optical Serial to Parallel Conversion to 8-Channel 5 Gb/s

Wang Ju Yu Jinlong Luo Jun Wang Wenrui Wu Bo

Han Bingchen Guo Jingzhong Yang Enze

(Laboratory of Optical Fiber Communication, School of Electronic and Information Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A novel all-optical serial to parallel converter is proposed. The scheme mainly consists of time-and-wavelength-interleaved pulse train generation and the sequential multi-wavelength conversion based on the cross-phase modulation (XPM) of a single semiconductor optical amplifier (SOA). Using super-continuous spectrum generation in high nonlinear fiber, a time-and-wavelength-interleaved pulse source is generated with tunability of both channel wavelength and bit rate. And the all-optical serial to parallel conversion has been implemented based on sequential multi-wavelength conversion in SOA. In the experiment, 40 Gb/s serial optical signals are converted into 8-channel 5 Gb/s parallel optical signals. It should be pointed out that, this technique can achieve the all optical serial-to-parallel conversion of more than 100 channels without remarkably increasing the insertion losses, which will be a solid preparation for optical label processing and random access memory (RAM) technique in packet switching networks.

Key words optical communications; optical packet switching; all-optical serial-to-parallel converter (AOSPC); time-and wavelength-interleaved pulse train; sequential multiwavelength conversion (SMWC)

OCIS codes 060.0060; 190.0190; 210.0210

1 引 言

光分组交换具有大容量、路由功能丰富和可配置性等特点,是未来高速光网络中的核心技术。但

就目前的光信号或电信号处理技术而言,还无法直接对高速率的信号进行复杂的计算和缓存,这样就使得光通信的大容量的优势荡然无存。一种折中的

收稿日期: 2010-08-16; **收到修改稿日期**: 2010-11-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60736035)、国家自然科学基金(60977053)、国家 973 计划(2010CB327603)和天津市自然科学基金(06YFJMJ01400)资助课题。

作者简介: 王 菊(1985—),女,博士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: wangjutju@126.com

导师简介: 于晋龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统、光微波和光纤传感等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

方案是采用全光串并转换(AOSPC)技术将高速串行光信号转换为并行的低速信号,再利用目前较为成熟的CMOS工艺电路处理技术对信号进行处理,以实现光分组交换。在此类方案中,核心的非线性器件主要有高非线性光纤(HNLF)和半导体光放大器(SOA),这些器件有良好的非线性,可以实现多波长变换^[1,2]、全光组合逻辑^[3,4]和码型变换^[2,5]等功能。国际上报道的AOSPC的方案主要包括利用时间到波长的映射技术^[6~8]以及利用时间到空间的映射技术^[9,10]来实现串并转换。然而,目前的报道的方案还存在一些固有的缺陷,比如对信号偏振态敏感性,系统结构复杂且需要较多的光源,系统扩展能力差等,这都限制了AOSPC技术的进一步应用。

本文报道了一种基于顺序多波长变换的AOSPC方案。对于串行的输入信号以 N 个比特为一个周期内,将每一个比特顺序变换到不同的波长上,再经过一个 $1 \times N$ 的波分解复用器就可以得到 N 路并行的低速信号输出,从而实现了 $1:N$ 的AOSPC。

文献[11]完成了将40 Gb/s的串行输入信号转换为4路10 Gb/s的并行输出信号,但10 Gb/s的

信号速率对后续信号处理电路的要求仍然太高。为了降低信号处理电路的实现难度,在文献[11]的基础上,进一步将40 Gb/s的串行输入光信号转换为8路5 Gb/s的并行输出光信号。高速率AOSPC技术可将高速率的信号变成低速率的信号以便于后续报头处理、随机存取等电信号处理,有效的解决了光分组交换中的存储与协议处理问题,并在其它的高速率光信号处理技术方面具有良好的应用前景。该AOSPC系统结构简单,可轻易进行扩展以实现更高串行输入速率及更多路数的串并转换。

2 系统原理

整个AOSPC的系统方案图如图1所示,40 Gb/s的全光归零码(RZ)信号的产生是利用5 GHz微波信号直接调制分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)得到的窄脉冲经过色散补偿光纤(DCF)的补偿后压窄,再经过伪随机序列(PRBS)发生器驱动的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构的外调制器调制,最后经过 1×8 的复用器(MUX)得到40 Gb/s的全光RZ信号。

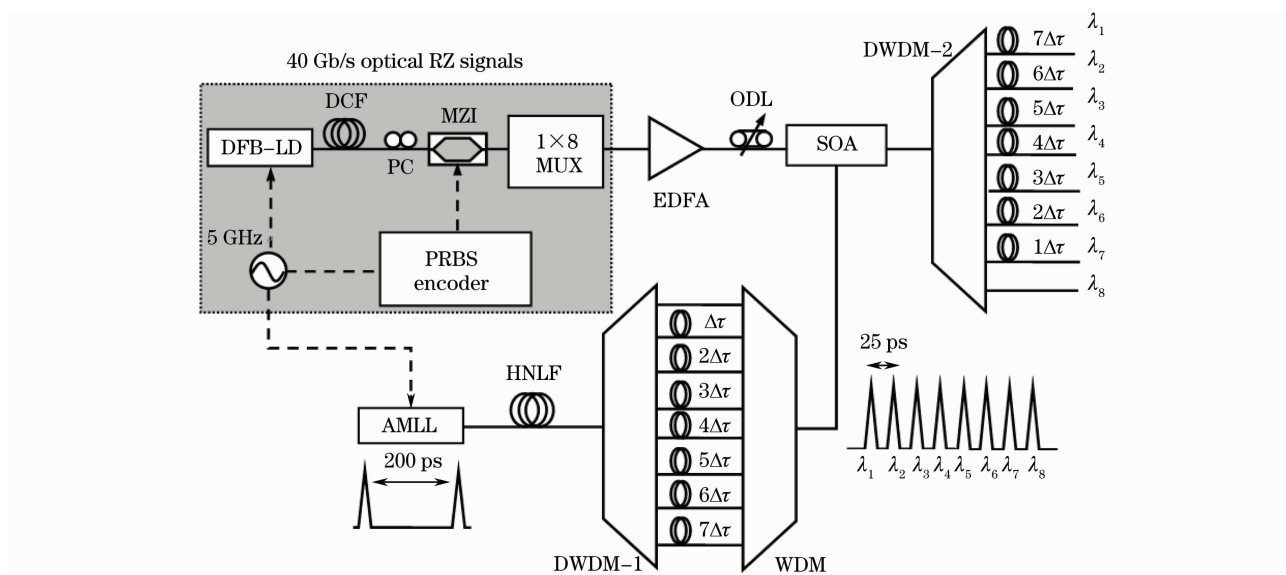


图1 AOSPC系统装置图

Fig. 1 Scheme of the 40 Gb/s AOSPC based on a single SOA

该系统的核心部分包括了波分/时分脉冲光源的产生与顺序多波长变换两个部分。

波分/时分脉冲光源的产生可以采用超连续谱的产生+谱切片+光程走离的方案^[12]。具体的,在这个AOSPC系统中利用主动锁模光纤激光器(AMLL)产生的无啁啾皮秒脉冲作为抽运脉冲,用一段500 m的非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 的

HNLF进行光谱展宽,另外调节抽运脉冲的中心波长至HNLF零色散点波长侧,在四波混频(FWM)、光纤光参量放大(FOPA)等非线性效应的作用下可以获得几十纳米的超连续光谱,采用超连续切片技术有利于增加信道波长的数目进而使串并转换输出的并行信号速率进一步降低。输出的展宽光谱经过一个波分解复用器(DWDM)进行光谱切片得到的

多波长窄脉冲经过不同光纤延时后,再用一个波分复用器(WDM)合至一路;调整各路相对延时量分别为 $0, \Delta\tau, 2\Delta\tau, \dots, (N-1)\Delta\tau$, 其中 $\Delta\tau$ 为串行输入信号的码元周期, N 为并行输出的路数, 如此就从 WDM 的输出得到波分/时分光脉冲序列。

顺序多波长变换则是通过单个 SOA 中的交叉相位调制(XPM)作用实现。具体是将波分/时分光脉冲序列与 40 Gb/s 串行输入光信号同时注入高非线性 SOA 中, 其中功率较大的串行输入信号光为控制光, 光功率较小的波分/时分脉冲序列为探测光; 串行输入信号的光强变化在引起 SOA 增益变化的同时, 还使得 SOA 中折射率的相应变化, 并由此导致探测光产生红移与蓝移啁啾, 此即 XPM 效应; 在 SOA 输出端用一个带宽合适的中心波长偏移的滤波器滤出探测光的蓝移啁啾部分就实现了顺序多波长的正码波长变换, 如图 2 所示。通过高速的正码波长变换, 实现了将高速串行光信号信息复制到波分/时分光脉冲序列上, 波分/时分光脉冲序列经波分解复用后就得到了多路并行的低速输出光信号, 由此实现了高速 AOSPC。基于 SOA 中 XPM

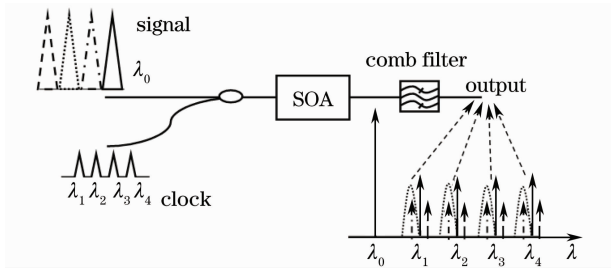


图 2 SOA 中全光波长变换示意图

Fig. 2 All optical multiwavelength conversion based on SOA

效应实现多波长的正码变换, 具有对输入信号的偏振态不敏感、作用波长范围宽的优点, 另外配合整形滤波器的使用可以工作在 160 Gb/s 乃至更高的速率^[13]。

3 实验结果与分析

图 3(a)显示了 40 Gb/s 的串行光输入信号眼图。另外, 由主动锁模光纤激光器产生 5 GHz 无啁啾低抖动光窄脉冲序列, 其脉宽为 1.2 ps, 输出波长为 1553.8 nm, 输出的平均光功率为 9 dBm。以其作为抽运光脉冲直接注入到 500 m 的 HNLF 中(零色散点波长为 1545 nm, 非线性系数为 $11 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 色散斜率为 $0.03 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$)进行光谱展宽得到半峰全宽为 20 nm 的超连续谱, 展宽的光谱经过一对通道间隔为 100 GHz 的 8 路 DWDM(DWDM-1 和 WDM)及之间延时量分别为 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150 和 175 ps 的多路光纤延时, 得到 40 GHz 的波分/时分脉冲光源, 其波形图及对应的光谱如图 3(b), (c)所示(光谱分析仪的分辨率为 0.06 nm)。将 40 Gb/s 串行信号经放大后与 40 GHz 的波分/时分光脉冲一起注入到一个高非线性的 SOA 中进行顺序多波长变换。串行信号与波分/时分光脉冲输入平均功率分别为 9 dBm 与 1.2 dBm, 其中串行信号的中心波长为 1548.5 nm, 而波分/时分脉冲序列的波长则分别为 1550.9, 1551.7, 1552.5, 1553.3, 1554.1, 1554.9, 1555.7 和 1556.5 nm。在 SOA 中, 串行信号的功率较大为控制光, 其光强的变化通过 SOA 中的 XPM 效应, 引起对波分/时分光脉冲的红移啁啾与蓝移啁啾的产生。在 SOA 的输出端利用一个通道中心波长相对波分/时分脉冲的波长略微蓝移的滤波器分别滤出波分/时分脉冲光蓝移啁啾, 就实现了基于 SOA 中

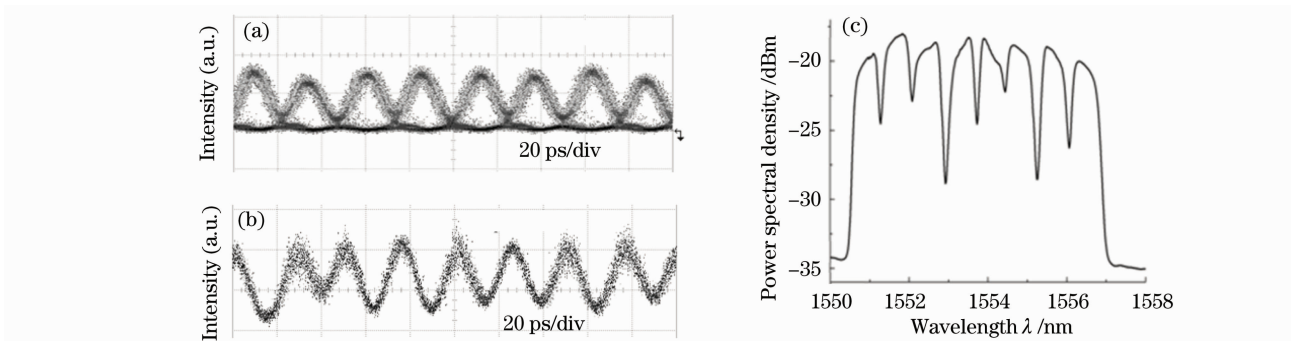


图 3 (a) 40 Gb/s 串行信号眼图, (b) 40 GHz 波分/时分光脉冲波形图及 (c) 其光谱图

Fig. 3 (a) Eyediagram of 40 Gb/s serial optical signals, (b) waveform of the 40 GHz time-and wavelength-interleaved pulses, (c) optical spectrum of the 40 GHz time-and wavelength-interleaved pulses

XPM效应的正码多波长变换,并由此实现了将40 Gb/s的串行信号变换为8路并行的5 Gb/s信号。其中,级联于SOA后的滤波器的通道中心波长分别为1550.7,1551.5,1552.3,1553.1,1553.9,1554.7,1555.5和1556.3 nm(通道带宽为0.26 nm),输出端

得到的8路并行5 Gb/s信号眼图如图4所示。由图4可知,经过AOSPC后的8路并行信号仍然具有清晰的眼图轮廓。需要指出的是,该AOSPC系统由于仅采用了单个SOA与后续滤波器就完成了多波长变换,整个系统结构十分紧凑。

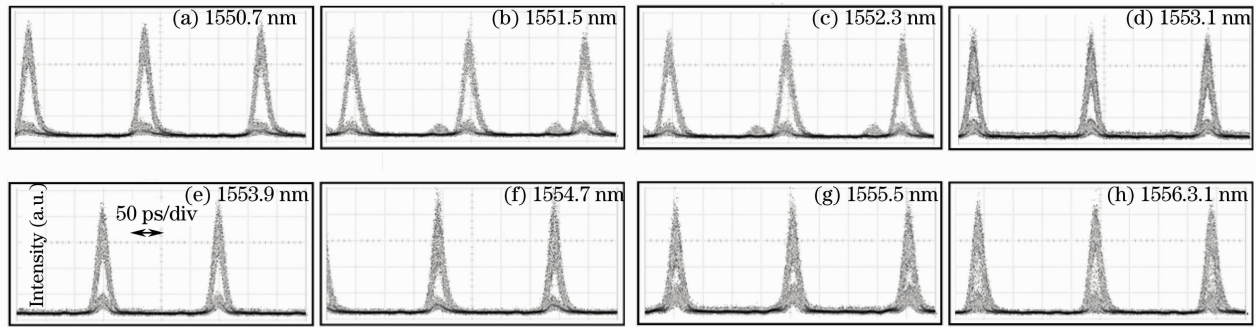


图4 8路并行5Gb/s信号眼图

Fig. 4 Eye diagram of 8-channel 5 Gb/s parallel optical signals with different wavelengths

4 结 论

本文报道了一种新型的AOSPC实现方案,其原理是利用顺序的多波长变换完成将串行的输入信号转换为多路并行信号。串并转换输出的低速并行信号经光电转换后,可以直接送至目前已较为成熟的CMOS工艺的处理电路中,以完成标签交换及随机存储等功能。

虽然实验仅完成了对40 Gb/s信号的串并转换,但由于基于SOA的XPM效应进行波长变换可以工作在很高的速率^[13],该系统理论上可以实现160 Gb/s或更高的速率的信号的AOSPC,该系统具备实现8路甚至更多路数串并转换的扩展潜力。

参 考 文 献

- Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Experimental research of simultaneously wavelength conversion with two independent signals based on a single semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 330~334
韩丙辰, 于晋龙, 张立台等. 利用单个半导体光放大器实现两个独立信号同时波长变换的实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 330~334
- Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on dual-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056
江 阳, 于晋龙, 张爱旭等. 双抽运光纤光参量放大的全光多波长变换与码型转换[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1051~1056
- Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. Reconfigurable all-optical logic gates with not-inverted data technique by using single semiconductor optical amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2367~2370
韩丙辰, 于晋龙, 张立台等. 利用单个半导体光放大器实现非反转归零码的可重构全光逻辑门[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2367~2370
- Han Bingchen, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. The experimental

- research on 10 Gb/s all-optical half-subtractor by using semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2082~2086
- 韩丙辰, 于晋龙, 张立台等. 利用半导体光放大器实现10 Gb/s全光半减器的组合逻辑实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2082~2086
- Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical non-return-to-zero to return-to-zero format converter based on fiber optical parametric amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2962~2965
韩丙辰, 于晋龙, 罗 俊等. 基于光纤光参量放大的多通道全光非归零/归零码转换器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2962~2965
- K. Chan, F. Tong, C. K. Chan *et al.*. An all-optical packet header recognition scheme for self-routing packet networks[C]. Proc. OFC'02, 2002, WO4: 284~285
- N. Calabretta, M. Presi, G. Contestabile *et al.*. All-optical asynchronous serial-to-parallel converter circuit for DPSK optical packets[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(10): 783~785
- Yang Yanfu, Lou Caiyun, Zhao Xiaofan *et al.*. Demultiplexing from 160 Gb/s to 10 Gb/s using nonlinear optical loop mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 611~616
杨彦甫, 娄彩云, 赵小凡等. 利用非线性光纤环镜160 Gb/s到10 Gb/s解时分复用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 611~616
- R. Takahashi, T. Yasui, J. K. Seo *et al.*. Ultrafast all-optical serial-to-parallel converters based on spin-polarized surface-normal optical switches [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2007, **13**(1): 92~103
- R. Takahashi, H. Suzuki. 1-Tb/s 16-b all-optical serial-to-parallel conversion using a surface-reflection optical switch[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 287~289
- Hu Hao, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. 40-Gb/s all-optical serial-to-parallel conversion based on a single SOA [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(13): 1181~1183
- Zhang Aixu, Yu Jinlong, Zhang Litai *et al.*. 4×5 GHz and 5×4 GHz time and wavelength interleaved optical pulse sources[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(10): 1349~1352
张爱旭, 于晋龙, 张立台等. 4波长和5波长的20 GHz波时分光源研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(10): 1349~1352
- Y. Liu, E. Tangdongga, Z. Li *et al.*. Error-free all-optical wavelength conversion at 160 Gb/s using a semiconductor optical amplifier and an optical bandpass filter[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 230~236