

文章编号: 0253-2239(2010)06-1576-05

# 利用光参变放大同时实现双波长全光判决的实验研究

韩丙辰<sup>1,2</sup> 于晋龙<sup>1</sup> 罗俊<sup>1</sup> 王文睿<sup>1</sup> 王菊<sup>1</sup> 吴波<sup>1</sup> 郭精忠<sup>1</sup> 杨恩泽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072; <sup>2</sup> 山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

**摘要** 为了能够对多路光信号同时实现整形再生, 提出了一种在高非线性光纤(HNLF)中利用单抽运光参变放大(OPA)同时实现双波长全光判决的实验方案。该方案基于一段 500 m 长的 HNLF, 输入信号为两路不同波长的 10 Gb/s 伪随机归零(RZ)码信号, 抽运光为 10 GHz 的时钟脉冲。信号光与抽运光在 HNLF 中发生参变过程, 通过两个光带通滤波器, 分别滤出两路闲频光波长信号, 可以在同一段 HNLF 中同时实现双波长全光判决。实验中, 对两路 10 Gb/s 伪随机归零码信号进行了恶化, 以仿真长距离传输损耗及失真, 恶化后信号的消光比(ER)分别为 9.17 dB 和 8.27 dB, 判决后的信号 ER 分别提高到 12.8 dB 和 12.66 dB。通过实验论证了一种双波长全光判决的实现方案。

**关键词** 光通信; 全光判决; 高非线性光纤; 光纤光参变放大

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1576

## Experimental Research on Dual Wavelength All-Optical Decision Based on Fiber-Optical Parametric Amplifier

Han Bingchen<sup>1,2</sup> Yu Jinlong<sup>1</sup> Luo Jun<sup>1</sup> Wang Wenrui<sup>1</sup> Wang Ju<sup>1</sup>  
Wu Bo<sup>1</sup> Guo Jingzhong<sup>1</sup> Yang Enze<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China  
<sup>2</sup> School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

**Abstract** A novel experimental scheme is reported about double wavelength decision using optical fiber parametric amplifier in a highly nonlinear fiber (HNLF). So multi-channels signals can be reshaped and regenerated simultaneously. This scheme is based on a coil 500 m HNLF. The input signals are two channels of 10 Gb/s return-to-zero (RZ) pseudorandom bit sequence with different wavelengths, and the pump is clock pulse with 10 GHz frequency. Parameters process of signal and pump occurred at HNLF, two idlers are filtered through two different center wavelength optical band pass filters, then the all-optical decision is realized. In the experiment, two channels of 10 Gb/s RZ are firstly deteriorated for simulating the long-haul transmission loss and distortion. The extinction ratio (ER) of deteriorated signal is respectively 9.17 dB and 8.27 dB, and the ER of decision signal is 12.8 dB and 12.66 dB. A scheme of dual wavelength all optical decision is demonstrated through the experiment.

**Key words** optical communication; all-optical decision; highly nonlinear fiber; optical fiber parametric amplifier

## 1 引 言

在全光网络中, 信号的全光 3R(Reamplification, Reshaping, Retiming)再生是一个亟待解决的关键问

题。由于色散、波分复用(WDM)信道间的干扰、系统的非线性效应、光源和光放大器的自发辐射(ASE)噪声等因素都不可避免地引起网络中信号的恶化, 尤其

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(60736035)、国家 863 计划(2007AA01Z272)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0248)、天津市科技发展事业(05YFGZGX24100)和山西大同大学青年项目(2008Q10)资助课题。

作者简介: 韩丙辰(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事高速光纤通信方面的研究。E-mail: han\_bchen@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

在 40 Gb/s 及以上的超高速光网络中,这种恶化对信号的影响更是不可忽略。全光判决技术则是全光 3R 再生系统中的一个关键技术,直接影响着再生信号的质量<sup>[1~7]</sup>。

目前主要的全光判决技术方案有如下几种:基于半导体光放大器(SOA)交叉相位调制效应(XPM)的全光判决方案<sup>[1]</sup>,在此基础上,国际上很多方案基于 SOA-MZI 干涉仪结构<sup>[2]</sup>,利用电吸收调制器(EAM)实现的全光判决<sup>[3]</sup>,这些都已经是比较成熟的方案。近期,利用高非线性光纤(HNLF)中的四波混频(FWM)或参变放大效应进行的全光判决方案引起了研究人员的兴趣。相比前者,由于其能够保持调制格式的相位信息,可用于各种相位调制信号的判决<sup>[4~7]</sup>。日本的 M. Matsumoto 利用 FWM 效应实现了对差分相移键控(DPSK)信号的再生实验<sup>[5]</sup>。南加州大学的 A. E. Willner 研究小组利用高非线性光纤的参变放大效应实现了 40 Gb/s 的全光 3R 再生实验<sup>[6]</sup>。北京邮电大学也利用高非线性微结构光纤实现了全光再生的研究<sup>[8]</sup>。然而,这些全光判决技术均是基于单波长的实现方案。对于目前光传输系统中广泛采用的 WDM 系统,其成本、可靠性的优势随波长数的增加而被大大抵消。然而从光的本质讲,理论上可以在同一系统中对多个波长同时进行 3R 再生。因此多波长的全光判决技术的研究势必成为当今研究的技术热点<sup>[9]</sup>。

提出了一种在 HNLF 中利用光参变放大(OPA)同时实现双波长全光判决的实验方案。该方案基于一段 500 m 长的 HNLF,输入信号为两路不同波长的 10 Gb/s 伪随机归零码信号,抽运光为 10 GHz 的时钟脉冲,利用 HNLF 中的参变放大过程,通过两个不同中心波长的光带通滤波器,同时滤出两路闲频光波长信号,实现双波长全光判决。实验中,对两路 10 Gb/s 伪随机归零(RZ)码信号进行恶化,以仿真长距离传输损耗,恶化后信号的信光比(ER)分别为 9.17 dB 和 8.27 dB,判决后的信号 ER 分别提高到 12.8 dB 和 12.66 dB。

## 2 工作原理

参变放大是光纤中一种非常重要的非线性现象,可以简单理解为光纤中的 FWM 效应的简并状态<sup>[10]</sup>。四波混频通常涉及四个光波之间的相互作用,而参变放大可认为两个光波完全相同并作为高功率的抽运光,设它的频率为  $\omega_p$ ,如图 1 所示,当信号光(频率为  $\omega_s$ )与这个抽运光一起在光纤中同向

传输时,两个光场会由于差拍的作用产生一个频率为  $\omega_p - \omega_s$  的强度变化包络。这种强度变化会激发光纤中的克尔效应,使光纤中的折射率出现周期性的变化,而折射率的变化会造成相位调制的效果产生一对调制边带,其频率为

$$\begin{cases} \omega_{i1} = \omega_p - (\omega_p - \omega_s) \\ \omega_{i2} = \omega_p + (\omega_p - \omega_s) \end{cases} \quad (1)$$

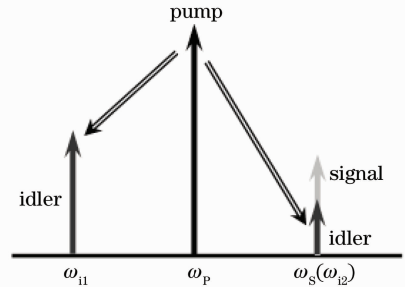


图 1 光纤光参变放大原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the fiber optical parametric amplifier

由此,光能量就从抽运光场转移到了信号光场,使信号得到放大。同时在抽运光的短波长处产生与信号光相位完全相同的闲频光<sup>[11]</sup>。在参变放大过程中,抽运光强度被一频率为  $f$  的正弦时钟调制,抽运光功率为

$$P_p = P_p(t) = P_0(1 + \sin 2\pi ft), \quad (2)$$

从而得到参变放大后信号增益<sup>[12]</sup>

$$G_s = 1 + \left[ \frac{\gamma P_p \sinh(gL)}{g} \right]^2, \quad (3)$$

式中  $P_0$  为抽运光的平均功率,  $f$  为抽运光的正弦时钟调制频率,  $\gamma$  和  $L$  分别为高非线性光纤的非线性系数和长度,  $g$  为参变增益

$$g = \sqrt{(\gamma P_0 r)^2 - (\kappa/2)^2}. \quad (4)$$

当相位严格匹配( $\kappa=0$ ),且有  $gL \gg 1$  时,信号光增益可以简化为

$$G_s \simeq \sinh^2(\gamma P_p L) = \frac{[\exp(\gamma P_p L) - \exp(-\gamma P_p L)]^2}{4} \simeq \frac{1}{4} \exp(2\gamma P_p L). \quad (5)$$

基于光纤光参变放大器的全光判决工作原理如图 2 所示,时钟抽运光波长为  $\lambda_p$ ,信号光波长为  $\lambda_s$ ,时钟抽运光与信号光共同注入到 HNLF 中,由于时钟抽运光具有较强的光功率,将与信号光在 HNLF 中相互作用出现参变过程,因此在与时钟抽运光相位匹配处产生参变放大现象。信号光将与时钟抽运光相互产生调制作用,同时在时钟抽运光的另外一侧产生与信号光相位完全一致的闲频光,在 HNLF

后面接光带通滤波器(OBPF),并将其中心波长调至闲频光波长,即可得到与输入信号光携带信息相同的输出信号。基于以上的工作原理,可将光纤光参变放大器视为光控光开关<sup>[13]</sup>。

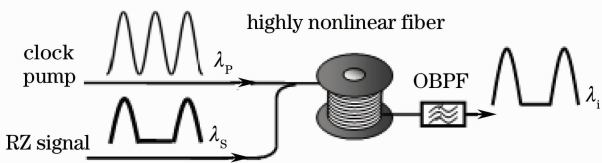


图 2 基于光纤光参变放大器的全光判决原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of the all-optical decision based on fiber optical parametric amplifier

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 实验系统及条件

基于光纤光参变放大器的双波长判决实验方案

如图 3 所示,其中 PC 为偏振控制器,IM 为电光强度调制器,PM 为相位调制器,CLK 为电时钟,ODL 为光可调延时线,OBPF 为光带通滤波器,WDM 为波分复用器。

信号数据的产生: 两路波长分别为 1551.7 nm 和 1553.3 nm 的分布式反馈半导体激光器(DFB-LD)产生的连续光(CW)经过偏振控制器 PC1 和 PC2 后,通过一个 50:50 的光耦合器(OC)合为一路上输入到 LiNbO<sub>3</sub> 电光强度调制器 IM1,在 IM1 中将不同波长的 CW 经 10 GHz 时钟射频信号调制,连续光变成 10 GHz 的脉冲光,接着经可调光延时线(ODL1)和 PC3 后进入到 IM2 中。在 IM2 中非归零(NRZ)编码电信号(data)将 10 GHz 光脉冲变成 10 Gb/s 归零(RZ)伪随机码序列(PRBS)。得到两路不同波长的光信号眼图如图 4(a)和图 4(b)所示。

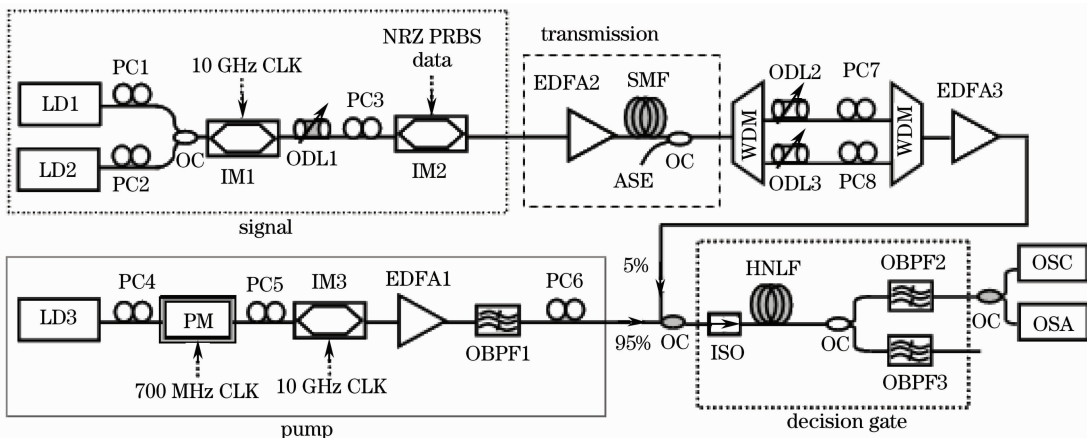


图 3 基于光纤光参变放大的双波长判决系统实验图

Fig. 3 Experimental setup of the dual wavelength decision based on fiber-optical parametric amplifier

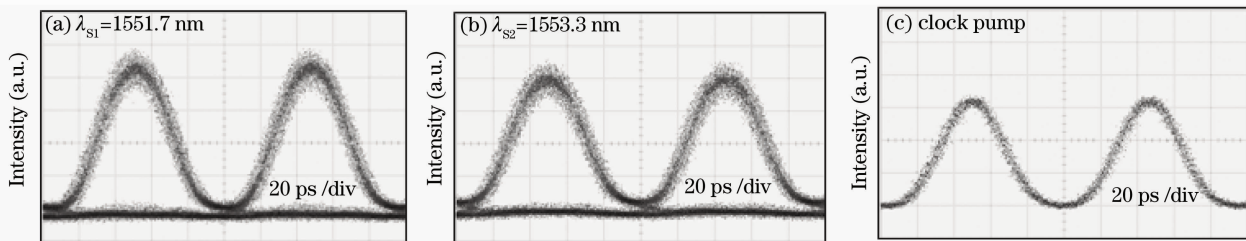


图 4 全光判决前的原始信号和时钟抽运光的眼图

Fig. 4 Eye diagram of original signal and pump before all-optical decision

时钟抽运光的产生: LD3 为中心波长 1550.7 nm 的连续光源,其产生的连续光经 PC4 输入到相位调制器 PM,由 700 MHz 的时钟射频信号对连续光进行相位调制,以抑制抽运光在高非线性光纤中的受激布里渊散射效应(SBS)<sup>[9]</sup>,接着连续光经 PC5 调整偏振态后进入到电光强度调制器 IM3,同样 10 GHz 的时

钟射频信号对输入到 IM3 的连续光进行强度调制,产生 10 GHz 的时钟抽运光,如图 4(c)所示。时钟抽运光经高功率掺铒光纤放大器(EDFA1)放大输出为 27 dBm,后接 1 nm 带宽的光带通滤波器(OBPF1)滤除噪声。为了提高光纤光参变放大的效率,时钟抽运光通过 PC6 调整其偏振态。

伪随机归零码信号光经 EDFA2 放大后进入 10 km 单模光纤(SMF)进行传输,同时加入 ASE 噪声进行恶化,恶化后信号的消光比(ER)分别为 9.17 dB 和 8.27 dB。恶化后的 RZ 码由 WDM 分为两路(恶化信号波形如图 5 所示),每一路光信号分别通过 PC 和 ODL 来调整其偏振态及时序后,再由 WDM 合成一路,并通过 EDFA3 进行放大。恶化后的 RZ 码与高功率时钟抽运光经 5:95 的光耦合器耦合为一路,通过光隔离器(ISO)进入 500 m 长的 HNLF,HNLF

的非线性系数  $\gamma=11$  ( $\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ),零色散波长为 1545 nm,色散斜率为  $0.03$  ( $\text{ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$ ),光纤损耗  $0.5$  dB/km。在 HNLF 中进行参变放大,同时实现双波长的全光判决。判决后的实验结果由 OBPF2 和 OBPF3 选出每一波长的再生信号,可用取样示波器 OSC(Agilent-86100A)观测输出的信号波形,判决后的光信号 ER 分别为 12.8 dB 和 12.66 dB,如图 6 所示。

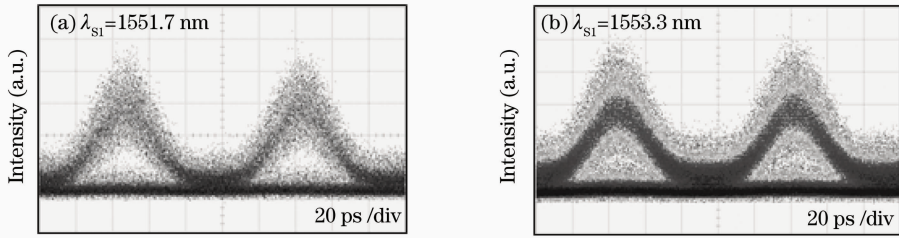


图 5 全光判决前恶化的光信号

Fig. 5 Deteriorated signal eye diagram before all-optical decision

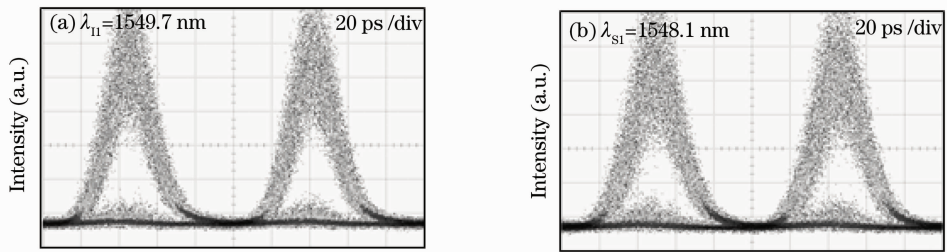


图 6 全光判决后得到的双波长信号

Fig. 6 Double-wavelength signal eye diagram after all-optical decision

### 3.2 实验结果及讨论

通过图 5 和图 6 对比可知,全光判决后的光信号比全光判决前的恶化信号有较大的消光比提高,这意味着本方案能够较好地抑制“0”码噪声,说明该全光判决方案对多波长信号具有一定的再生能力。但同时也看到其对“1”码噪声的改善并不明显,这是由于本实验中,抽运光由高功率掺铒光纤放大器输出最大光功率为 27 dBm,经光带通滤波器、偏振控制器及耦合器后光功率损耗较大,导致入纤光功率只有 18 dBm,因此参变放大的转换效率较低,非线性增益饱和的现象不明显。为了提高光纤光参变放大的转换效率,一方面应增大高功率掺铒光纤放大器的输出光功率,另一方面应减小进入高非线性光纤前的光功率损耗,以提高最终进入高非线性光纤的抽运光功率。

通过前面的理论和实验研究可知,理论上光纤光参变放大的增益与抽运光的功率成指数关系,因

此增大抽运光的功率可以增大光纤光参变放大器的增益带宽,从而光纤光参变放大器具有较宽且平坦的增益带宽;而在对基于光纤光参变放大的双波长全光判决实验的研究中发现,由于实验条件的限制导致入纤光功率较小( $P_p=18$  dBm),产生的增益带宽仅为 3 nm。所以,如果提高注入光纤的有效光功率或者将抽运波长进一步靠近 HNLF 的零色散点,能够增大光纤光参变放大的增益带宽,这样理论上可以实现更多波长的全光判决。

## 4 结 论

提出了一种在高非线性光纤中利用光参变放大同时实现双波长全光判决的实验方案。该方案基于一段 500 m 长的高非线性光纤,输入信号为两路不同波长的 10 Gb/s 伪随机归零码信号,抽运光为 10 GHz 的时钟脉冲,利用 HNLF 中的参变放大过程,通过两个窄带光滤波器,滤出两路闲频光波长信

号,实现了双波长的全光判决,得到了两路消光比提高约 3 dB 的再生信号。

### 参 考 文 献

- 1 M. L. Nielsen, B. Lavigne, B. Dagens. Polarity-preserving SOA-based wavelength conversion at 40 Gbit/s using bandpass filtering [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18): 1334~1335
- 2 A. E. Kelly, I. D. Phillips, R. J. Manning *et al.*. 80 Gbit/s all optical regenerative wavelength conversion using semiconductor optical amplifier based interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(17): 1477~1478
- 3 Hwan Seok Chung, Ryo Inohara, Kohsuke Nishimura *et al.*. 40-Gb/s NRZ wavelength conversion with 3R regeneration using an EA modulator and SOA polarization-discriminating delay interferometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 337~339
- 4 Yu Jinlong, Wang Yaotian, Zhang Aixu *et al.*. Experimental study on 40 Gb/s all optical 3R regeneration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 801~806  
于晋龙,王耀天,张爱旭等. 40 Gbit/s 信号全光 3R 再生实验 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 801~806
- 5 M. Matsumoto. A fiber-based all-optical 3R regenerator for DPSK signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(5): 273~275
- 6 C. Yu, T. Luo, B. Zhang *et al.*. Wavelength-shift-free 3R regenerator for 40-Gb/s RZ system by optical parametric amplification in Fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(24): 2569~2571
- 7 Fumio Futami. Highly nonlinear fibers for ultrahigh-speed optical signal processing. in Proc. OFC2008, OMP1, 2008
- 8 Wei Yanfen, Zhang Xia, Xu Yongzhao *et al.*. All-optical regeneration based on highly nonlinear macrostructure fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 414~418  
卫艳芬,张霞,徐永钊等. 基于高非线性微结构光纤的全光再生研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 414~418
- 9 Jiang Yang, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. All optical multi-wavelength conversion and data format conversion based on double-pumped fiber optical parametric amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1051~1056  
江阳,于晋龙,张爱旭等. 双抽运光纤光参变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
- 10 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Application of Nonlinear Optics* [M]. Jia Dongfang *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 247~259  
Govind P. Agrawal. *非线性光纤光学原理及应用* [M]. 贾东方等译. 北京:电子工业出版社,2002. 247~259
- 11 Gui Lin, Zhou Zhibin, Shao Yufeng. All optical AND gate by utilizing fiber optical parametric amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 26~32  
桂林,周志彬,邵宇丰. 利用光纤参变放大器构成全光与门 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 26~32
- 12 Thomas Torounidis, Peter Andrekson. Broadband single-pumped fiber-optic parametric amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(9): 650~652
- 13 Han Bingchen, Yu Jinlong, Luo Jun *et al.*. Multi-channel all-optical Non-return-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. 基于光纤光参变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