

文章编号: 0253-2239(2008)02-0249-06

基于半导体光放大器和整形滤波器的 40 Gb/s 的 归零正码波长变换研究

张爱旭^{1,2} 于晋龙² 王耀天² 崔跃² 胡浩² 杨恩泽²

¹ 天津大学计算机学院, 天津 300072

² 天津大学电子信息学院光纤通信实验室, 天津 300072

摘要 理论上分析了通过整形滤波器方法实现正码波长变换的原理,并讨论了滤波器带宽及偏移方向对正码脉冲效果的影响,解释了目前实验报道中多采用蓝移滤波方案的技术根由。在实验上利用半导体光放大器(SOA)和通带滤波器完成了 40 Gb/s 的归零正码波长变换实验,验证了理论分析的结构,证明了整形滤波器加半导体光放大器的方案可以实现正码的波长变换。这对于简化网络的设计,提高信号传输质量都有重要的意义。

关键词 光纤通信; 正码波长变换; 带通滤波器; 半导体光放大器

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

Noninverted Wavelength Conversion for 40 Gb/s Return-to-Zero Signal Based on Semiconductor Optical Amplifier and Optical Bandpass Filter

Zhang Aixu^{1,2} Yu Jinlong¹ Wang Yaotian¹ Chui Yue¹ Hu Hao¹ Yang Enze¹

¹ School of computer science and technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Lab of Optical Fiber Communication, School of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Noninverted wavelength conversion based on semiconductor optical amplifier and optical bandpass filter is theoretically analyzed, and the effect of bandwidth and deviation direction of optical bandpass filter on noninverted wavelength conversion is discussed, which well explain the widely reported experimental results on blue-shifted wavelength conversion. The experiment of the 40Gb/s RZ signal wavelength conversion has been completed by the assistance of the SOA and bandpass filter, which demonstrates the result of theoretical analysis, and the feasibility of the noninverted wavelength conversion based on SOA and optical bandpass filter. The method of noninverted wavelength conversion is significant to simplify the network design and to improve the quality of the signal transmission.

Key words optical fiber communication; noninverted wavelength conversion; optical bandpass filter; semiconductor optical amplifier (SOA)

1 引 言

波长变换(OWC)是波分复用(WDM)光网络中提供波长路由和波长再利用的关键技术^[1]。其中采用半导体光放大器(SOA)实现的全光波长变换(AOWC)技术具有体积小、易于集成、器件较为成熟、

可靠性好等优点而成为目前全光波长变换的主流技术之一^[2]。另一方面,波长变换相当于一个光控光开关器件,这也是全光逻辑中的一个基本器件^[3]。

利用交叉增益调制(XGM)效应的波长变换方案存在两个主要问题:一是码型问题。交叉增益调

收稿日期: 2007-04-18; 收到修改稿日期: 2007-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(60572013)和天津市自然科学基金(06YFJMJC01400)资助课题。

作者简介: 张爱旭(1969—),女,山西长治人,博士研究生,主要从事高速光纤通信方面的研究。

E-mail: eieky@tju.edu.cn

导师简介: 于晋龙(1969—),男,山西长治人,教授,博士生导师,主要从事高速光纤通信系统和全光信息处理等方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

制效应的特点决定了变换后的信号必然是反码信号,消光比差,变换后的信号光常有较大的啁啾^[4]。另一个是速率问题:基于交叉增益调制效应的波长变换要受到半导体光放大器中载流子恢复时间的限制,一般的半导体光放大器的载流子恢复时间从几十皮秒到上百皮秒,很难将其用于 10 Gb/s 以上的波长变换。

对于应用来讲:反极性信号使用时要劣于相同幅度的正极性信号的使用^[5],例如由反极性信号提取的时钟信号质量要劣于由相同幅度的正极性信号提取的时钟信号质量;而在脉冲形状为高斯形的高速率归零(RZ)码中,反码的平均功率要高于正码且信号波形不理想,严重影响反极性信号在常规单模光纤中的传输质量。所以,如何突破半导体光放大器载流子恢复时间的限制,提高补偿变换的速率;如何实现正码的波长变换就成为目前利用半导体光放大器进行波长变换实验研究的重点。

在两个波长的光同时进入半导体光放大器时,除了交叉增益调制效应之外,半导体光放大器中还存在着交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)等非线性效应。适当利用这些效应,就有可能大大改善半导体光放大器变换的效果^[6~8]。在正码波长变换方面,同样利用交叉相位调制效应,通过严格设计的整形滤波器得到了非常好的正码变换脉冲^[9~11]。尽管从机理上已同交叉增益调制方案有很大不同,但仍然保留了交叉增益调制方案的简洁和稳定性高的优点。

国内已有多家单位开展了相关的研究工作^[12~16],即使是普通的高斯型带通滤波器,当通带频率偏移连续光的中心波长时也会产生高质量的正码波长变换。本文报道了 40 Gb/s 的归零码的正码波长变换的实验结果,并对其产生机理和滤波器参量对变换结果的影响进行了讨论。

2 数值分析

多束光同时入射半导体光放大器时会引起有源区内载流子的密度变化,交叉增益调制效应。而折射率的变化会引起交叉相位调制。半导体光放大器的这种特性可由速率方程来描述:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{I(t)}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_c} - \frac{g(z,t)}{\omega d} \sum_{i=1,2} \frac{P_i(z,t)}{h\nu_i}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial g(z,t)}{\partial t} = \frac{g_0 - g(z,t)}{\tau_c} - \frac{g(z,t)}{E_{\text{sat}}} \sum_{i=1,2} P_i(z,t), \quad (2)$$

其中 $i = 1, 2$ 分别对应探测光和控制光。 N 为载流子

浓度, I 为注入电流, q 为电子电荷, τ_c 为载流子自发寿命, $N(t)/\tau_c = R_A N(t) + R_B N^2(t) + R_C N^3(t)$, R_A, R_B, R_C 是复合因子, $h\nu$ 为光子能量, V 为有源区的体积, $g(z,t)$ 为增益系数, 描述光波沿半导体光放大器纵向 z 轴上某一点的增益情况, $g(z,t) = \Gamma A_g (N - N_{\text{th}}) - \alpha_{\text{int}} \circ \alpha_{\text{int}}$ 为损耗系数, (Γ 为模式限制因子, A_g 为微分增益系数, N_{th} 为透明载流子密度。经过半导体光放大器的各路光脉冲的功率和相位变化的表达式为

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) \exp[h(t)], \quad (3)$$

$$\varphi_{\text{out}}(t) = \varphi_{\text{in}}(t) - \frac{1}{2} \delta h(t), \quad (4)$$

$h(t)$ 为放大函数, 也称作积分增益, 表示光脉冲功率包络上每一点在整个半导体光放大器上的积分增益

$$h(t) = \int_0^L g(z,t) dz, \delta \text{ 为线宽增强因子。}$$

计算中, 具体的半导体光放大器参量为: $I = 350 \text{ mA}$, 有源区长度 $L = 500 \mu\text{m}$, 宽度 $w = 3 \mu\text{m}$, 厚度 $d = 80 \text{ nm}$, $\Gamma = 0.15$, $\alpha_{\text{int}} = 4000 / \text{m}$, $A_g = 2.78 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, $N_{\text{th}} = 1.4 \times 10^{24} / \text{m}^3$, 初始载流子密度 $N_0 = 3 \times 10^{24} / \text{m}^3$, $\delta = 6$, $R_A = 1.0 \times 10^8 / \text{s}$, $R_B = 2.5 \times 10^{-17} \text{ m}^3 / \text{s}$, $R_C = 9.5 \times 10^{-21} \text{ m}^6 / \text{s}$ 。控制脉冲波长为 1553 nm, 脉冲宽度为 5 ps, 峰值功率为 7 dBm。连续光波长为 1549 nm, 平均功率为 3 dBm。

图 1 是一个控制光脉冲注入半导体光放大器后的连续光输出的波形和啁啾曲线。从图中可以看出输出的光波形是一个典型的反码波形, 消光比较差。从啁啾曲线可以看出, 由于相位调制的作用, 在输出脉冲的快速下降沿, 光瞬态频率降低(红移啁啾); 而在光波长的缓慢上升沿, 则向瞬态频率升高(蓝移啁啾)。此时, 输出的连续光频率随时间呈现与控制光

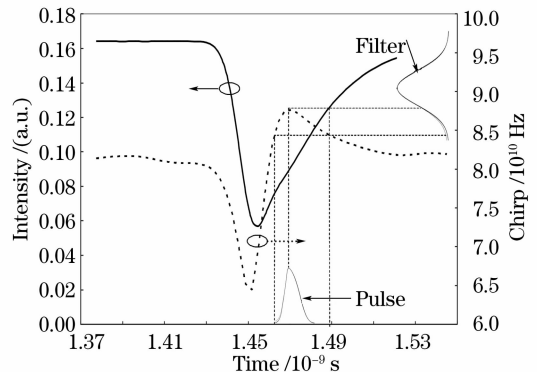


图 1 正码波长变换原理图

Fig. 1 Operation principle of noninverted wavelength conversion

码相对应的变化。由于滤波器对不同频率的光信号呈现出不同的衰减特性,通过滤波器后频率在时间上的分布就转换成光强的变化。这样就可以得到正码的输出。滤波后的波形与滤波前的波形比较,除了正码输出外,消光比会大大改善,脉冲宽度也会降低,从而提高了半导体光放大器的变换速度。而输出的波形则取决于半导体光放大器自身的特性,控制光的特性以及滤波器的参量。

按照以上原理,可以看出,当带通滤波器向长波长偏移时,滤出的脉冲是由红移啁啾构成的快速下降沿部分构成。而当滤波器向短波长偏移时,滤出的脉冲是由蓝移啁啾构成的慢速上升沿部分构成。所以得到的脉冲宽度要大于滤波器向长波长偏移时得到的脉冲。但此结论是在分析单个控制光脉冲的情况下得到的,而在实验报道中,却大多报道的是采用蓝移滤波的方法来实现的正码变换^[6~9]。实验中也发现蓝移滤波的脉冲质量要好于红移滤波。所以

在随机编码的条件下对滤波器的偏移和带宽对输出脉冲质量的影响进行了分析。

分析采用了不同带宽的 ($bw = 0.32 \text{ nm}, 0.40 \text{ nm}, 0.48 \text{ nm}, 5.6 \text{ nm}$) 的一阶高斯滤波器,控制信号采用了 40 Gb/s 的 $2^{12} - 1$ 阶 M 伪随机码序列。研究了不同频率偏移条件下的输出信号质量。

图 2 表示了正码条件下,不同的带宽时输出的信号 Q 值、消光比随滤波器偏移量变化的情况。从中可以看出:1)在分析的几种滤波器带宽条件下,滤波器带宽越窄,信号的能够达到的最大 Q 值和消光比也越大。同时,最佳的滤波器中心波长也越接近连续光波长,显而易见,这有利于减小由滤波器偏移而引入的损耗。2)系统窄滤波器向短波长偏移得到的正码的 Q 值要远高于滤波器向长波长偏移得到的 Q 值。消光比则相差不大,当滤波器的带宽增加时,向长波长偏移得到的消光比要略高于向短波长偏移的情况。

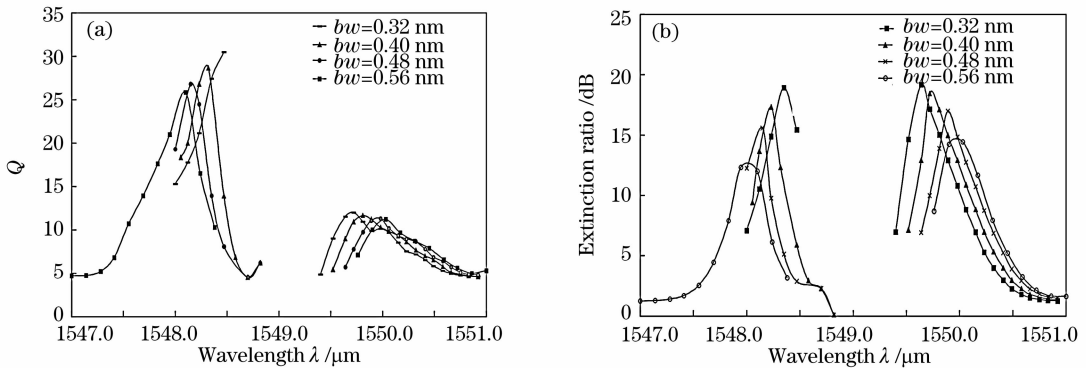


图 2 不同带通滤波器带宽条件下的(a)正码信号 Q 值,(b)正码消光比与滤波器中心波长的关系

Fig. 2 The character of noninverted wavelength conversion with different bandwidth of optical passband filter. (a) The Q value versus the central wavelength of optical passband filter, (b) extinction ratio versus the central wavelength of optical passband filter

为了更好地说明问题,给出当滤波器带宽为 0.32 nm 时,滤波器中心波长不同时眼图。从图 3(a) 可以看出,当滤波器向长波长偏移时,输出的脉冲形

状要好于向短波长偏移的情况,而且脉冲宽度也要小(从眼图的交叉点可以看出)。但“1”码的起伏明显偏大,造成信号 Q 值下降。从图 1 看出,红移分

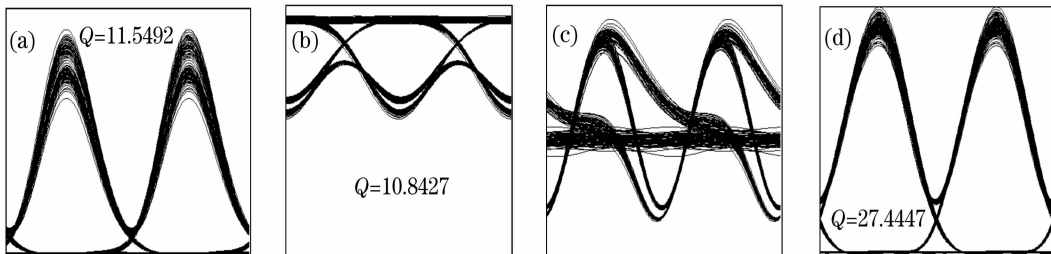


图 3 滤波器中心波长 λ_0 不同时输出的光信号眼图. (a) $\lambda_0 = 1549.64 \text{ nm}$, (b) $\lambda_0 = 1548.93 \text{ nm}$, (c) $\lambda_0 = 1548.70 \text{ nm}$, (d) $\lambda_0 = 1548.35 \text{ nm}$

Fig. 3 Eye diagram of output optical signal with to different central wavelength of optical passband filter of the converted signal. (a) $\lambda_0 = 1549.64 \text{ nm}$, (b) $\lambda_0 = 1548.93 \text{ nm}$, (c) $\lambda_0 = 1548.70 \text{ nm}$, (d) $\lambda_0 = 1548.35 \text{ nm}$

量是光信号的快速下降部分,在这部分,光频率的变化斜率很大,此时由码型效应导致的光信号幅度起伏会引起较大的频率起伏。频率的起伏通过滤波后则又变成了幅度的起伏。相对而言,蓝移部分的波长随幅度的变化相对要平缓一些,最终表现为“1”幅度的起伏较小。比较图 3(d)和图 3(a)可以看出,尽管蓝移滤波得到的波形的形状和脉冲宽度均逊于红移滤波的结果,但它的“1”码噪声要小,得到的脉冲 Q 值明显高于红移滤波。这可以在一个方面解释目前的实验报道多以蓝移为主的原因。

综合以上的分析,可以得到以下结论:1)滤波器的带宽应尽量小,小的滤波器带宽一方面可以得到最大的 Q 值和消光比。另一方面,滤波器带宽越窄,达到最好脉冲质量所需要的频率偏移量就越小,而偏移量的减小意味着系统损耗的降低。当然,滤波器带宽的降低也不是无限的,当滤波器的带宽小于信号自身的带宽时,滤波器会对信号本身带来不利影响。故滤波器的带宽应以接近信号的带宽为佳。2)如果要得到较好的正码变换脉冲,采用蓝移滤波应是首选的方案。当然,前提是在半导体光放大器有较大的载流子恢复时间。如果半导体光放大器的载流子恢复时间短或信号的码率较低,可以忽略码型效应带来的影响,则蓝移滤波的方案由于脉冲形状好、宽度窄应该是一个不错的方案。

3 实验结果

40 Gb/s 的波长变换实验的,具体装置如图 4 所示。

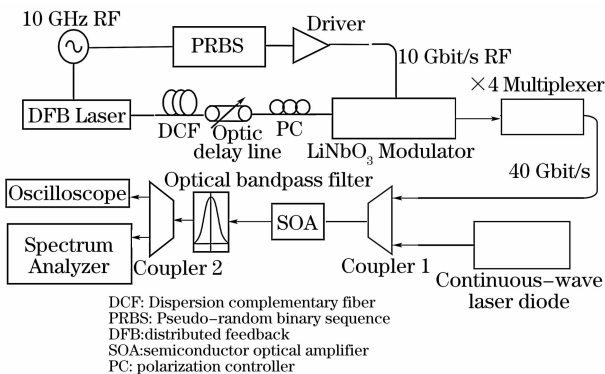


图 4 40 Gb/s 正码波长变换实验图

Fig. 4 The setup of the noninverted wavelength conversion experiment

10 GHz 的正弦微波信号直接对激光器调制,激光器输出具有负啁啾的宽谱光脉冲。光脉冲经过恰当长度的色散补偿光纤(DCF)压窄,最终得到脉

冲宽度为 5.3 ps,中心波长为 1553 nm 的 10 GHz 光脉冲序列。伪随机码发生器(PRBS)产生 10 Gb/s 的非归零伪随机序列电信号,然后驱动 LiNbO₃ 电光调制器将 10 GHz 光脉冲调制成 10 Gb/s 归零伪随机序列,再经过光时分复用器将信号复用后得到 40 Gb/s 的控制光信号。眼图如图 5 所示。

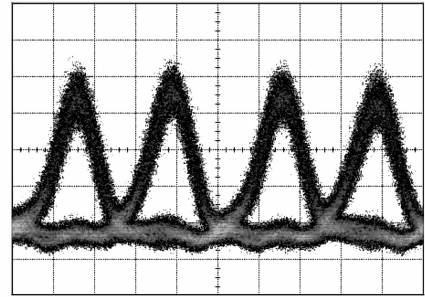


图 5 40 Gb/s 信号波形眼图

Fig. 5 Eye diagram of 40 Gb/s optical signal

连续光信号由一波长 1549 nm 的半导体激光器提供,与控制光一起注入一个半导体光放大器进行波长变换,注入半导体光放大器的控制光功率为 1.2 dBm,连续光功率为 2 dBm。半导体光放大器的注入电流为 350 mA。输出的光经过一个带通光滤波器,用于滤除控制光和进行脉冲整形的功能。

首先采用宽带滤波器对 40 Gb/s 波长变换进行实验。采用可调谐的带宽为 3 nm 的宽带滤波器。波长变换后输出的眼图如图 6,可见波形混叠严重,几乎无法辨认。这个结果表明在没有采用整形滤波器的情况下,由于半导体光放大器上升沿的速度较慢,导致了严重的码型效应,此时的波长变换是不可用的。

将光滤波器换成带宽为 0.3 nm 的可调谐滤波器,并调节滤波器的中心波长,则得到图 7 的结果。从图中可以看出,当滤波器中心波长向短波长偏移 0.1 nm 时,波长变换的波形成为一个较为理想的反码信号,与宽带滤波的结果相比较,可以看出滤波器向短波长小的偏移有利于消除变换信号的码型效应,此时滤波器不是单纯滤除控制光,而且起到了整形滤波的作用。调节滤波器的中心波长进一步向短波长偏移,变换信号逐步出现了正向信号,当偏移到一定程度后,变换的信号完全变成了正码。与图 3 中的(b)(c)(d)计算得到的眼图比较,发现二者基本吻合。

从理论上讲,当滤波器向长波长偏移时同样也可以出现正码。但实验发现,当滤波器向长波长偏移时,变换后的信号码型效应十分严重,并且正码的

功率也很弱。从前面的分析可以判断,这是由于半导体光放大器的载流子恢复时间过长,在下一个码到达之前载流子还未充分恢复,导致红移能量过低。为了验证这个推断,减低控制光的码率到10 Gb/s,以保证载流子能够充分恢复。在此条件下进行了波

长变换的实验,当滤波器向长波长偏移时也得到了正码,眼图如图 8,这就证明了半导体光放大器的码型效应对红移滤波有更大的影响,只有采用快恢复的半导体光放大器或降低信号码率才可能获得较好的正码波长变换。

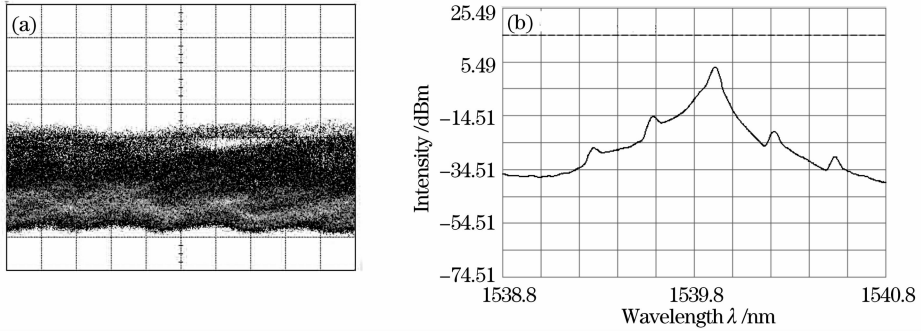


图 6 使用宽带滤波器的眼图(a)和光谱(b)

Fig. 6 The eye diagram (a) and optical spectrum (b) after 3 nm optical bandpass filter

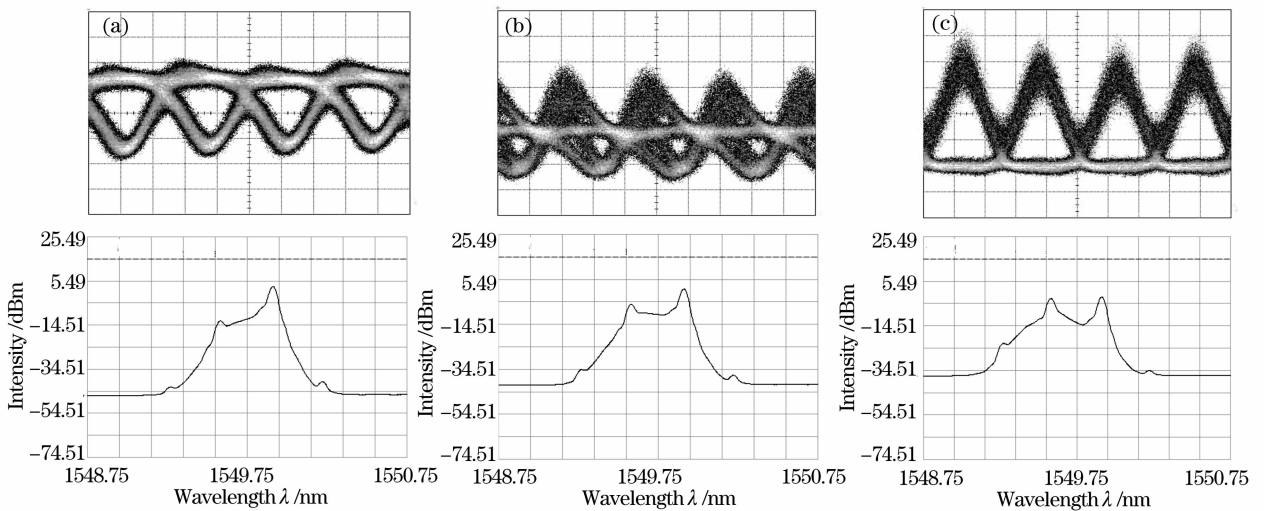


图 7 当带通滤波器中心波长向短波长偏离(a) 0.1 nm, (b) 0.3 nm, (c) 0.5 nm 时,波长变换得到的信号眼图和光谱
Fig. 7 Eye diagram and optical spectrum of wavelength converted signal with blue shift of the central wavelength of optical bandpass filter. (a) 0.1 nm, (b) 0.3 nm, (c) 0.5 nm

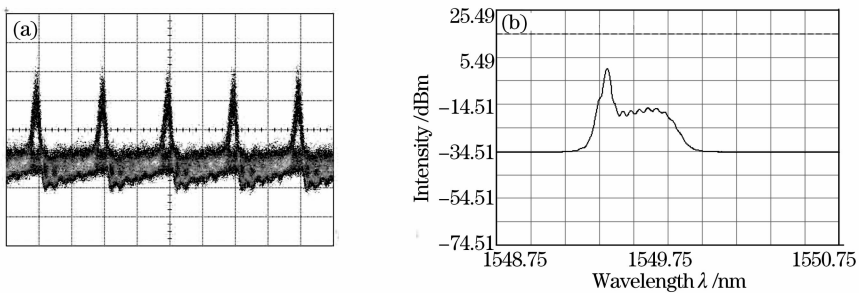


图 8 10 Gb/s 下滤波器向长波长偏移时得到的正码眼图(光谱峰值处为连续光波长)

Fig. 8 Noninverted eye diagram for 10 Gb/s RZ signal with red-shift of the central wavelength of optical bandpass filter

4 结 论

采用尽可能窄的光滤波器有利于提高正码变换的脉冲质量。另外,与仅考虑脉冲注入的情况不同的是,在随机光信号作为控制光的情况下,红移滤波的方案更易于受到半导体光放大器码型效应的影响。在此基础上实验完成了 40 Gb/s 条件下的正码波长变换,实验验证了理论分析的结果。采用滤波器偏移的办法,可以很简单地完成到正码波长变换。这对于全光波长变换技术在网络中的应用有非常重要的现实意义。

参 考 文 献

- S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955~966
- J. M. Yates, J. P. R. Lacey, M. P. Rumsewicz *et al.*. Performance of networks using wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 782~791
- G. Berrettini, A. Simi, A. Malacarne *et al.*. Ultrafast integrable and reconfigurable XNOR, AND, NOR, and NOT photonic logic gate[J]. *IEEE Photon. Technol.*, 2006, **18**(8): 917~919
- T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 942~954
- Tang Guangqiang, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. 40 GHz all-optical clock extraction using a Fabry-Pérot 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 40 GHz 全光时钟提取实验[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1853~1857
- Y. Liu, E. Tangdionga, 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]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 230~236
- Y. Liu, E. Tangdionga, Z. Li *et al.*. Error-free 320-Gb/s all-optical wavelength conversion using a single semiconductor optical amplifier[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 103~108
- 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
- M. L. Nielsen, B. Lavigne, B. Dagens *et al.*. Polarity-preserving SOA-based wavelength conversion at 40 Gbit/s using bandpass filtering[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18): 1334~1335
- Bengt-Erik Olsson, P. Chlen, L. Rau *et al.*. A simple and robust 40-Gb/s wavelength converter using fiber cross-phase modulation and optical filtering[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 846~848
- J. Leuthold, D. M. Marom, S. Cabort *et al.*. All-optical wavelength conversion using a pulse reformatting optical filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 186~192
- Weiwei Shi, Hanyi Zhang, Yili Guo *et al.*. Performance improvement of 10-Gb/s XGM wavelength conversion by using polarization control structure[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(9): 549~551
- Zhou Yunfeng, Zhang Junyi, Wu Jian *et al.*. Simultaneous inverted and non-inverted wavelength conversion based on cross polarization modulation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1035~1037
周云峰,张君毅,伍剑等. 基于半导体光放大器交叉偏振调制效应实现正、反相波长变换[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7): 1035~1037
- Wang Zuoran, Yu Jinlong, Wang Xinbin *et al.*. Experimental analysis of 40 Gb/s all optical switch using ultrafast nonlinear interferometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 987~992
王卓然,于晋龙,王新兵等. 40 Gb/s 超快非线性干涉仪的实验分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 987~992
- Teng Xiang, Zhang Hanyi, Guo Yili *et al.*. Performance optimization of the wavelength converter based on cross-polarization-modulation in SOA [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 810~814
滕翔,张汉一,郭奕理等. 基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的波长转换器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 810~814
- Wang Faqiang, Zhao Yu, Zhu Zhuqing *et al.*. Theoretical study of extinction ration of wavelength-converted optical signals based on SOA-XGM[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1495~1499
王发强,赵宇,朱竹青. 基于半导体光放大器-交叉增益调制波长转换器消光比特特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1495~1499