

文章编号: 0258-7025(2007)08-1101-05

# 恶化非归零码信号的全光时钟恢复

张峰<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 秦曦<sup>1,2</sup>, 吕博<sup>1,2</sup>, 卢丹<sup>1,2</sup>, 陈勇<sup>1,2</sup>, 曹继红<sup>1,2</sup>, 简水生<sup>1,2</sup>

(北京交通大学<sup>1</sup> 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, <sup>2</sup> 光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 全光时钟提取结构应对输入信号的恶化程度有一定的容忍度。在一种半导体光放大器(SOA)+啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)+受激布里渊散射(SBS)的方式实现非归零(NRZ)码信号的全光时钟提取结构中, 半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅共同作用实现了非归零码信号的时钟分量增强, 基于受激布里渊散射的全光时钟提取结构提取出非归零码的光时钟信号。实验通过对不同恶化程度的非归零码信号的时钟提取比较发现, 恶化信号的信噪比是影响光时钟提取的关键。输入非归零码信号的信噪比越差, 光时钟信号光谱的噪声水平越高, 提取出的光时钟信号的幅度越低。当时钟增强非归零码信号的时钟数据抑制比低于-10 dB时, 无法实现非归零码信号的时钟提取。

**关键词** 光纤通信; 全光时钟提取; 非归零码; 半导体光放大器; 受激布里渊散射

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## All Optical Clock Recovery from Degraded Non-Return-to-Zero Data Stream

ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, QIN Xi<sup>1,2</sup>, LÜ Bo<sup>1,2</sup>,

LU Dan<sup>1,2</sup>, CHEN Yong<sup>1,2</sup>, CAO Ji-hong<sup>1,2</sup>, JIAN Shui-sheng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, )  
(<sup>2</sup>Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** The all optical clock recovery scheme has certain tolerance for degraded input signal. A novel scheme including semiconductor optical amplifier (SOA), chirped fiber Bragg grating (CFBG), and stimulated Brillouin scattering (SBS) is proposed and demonstrated to recover the clock from the input degraded non-return-to-zero (NRZ) data stream. SOA and CFBG enhance the clock component, and the clock information is extracted from the clock component enhanced signal based on SBS. For different degraded signals, the signal-to-noise ratio (SNR) of the input stream is the key factor to the clock recovery. When the input SNR is worse, the noise of recovered clock spectrum is higher, and the amplitude of extracted optical clock is lower. The clock of NRZ signal could not be recovered as the clock-to-data ratio of the enhanced signal is less than -10 dB.

**Key words** optical fiber communication; all optical clock recovery; non-return-to-zero code; semiconductor optical amplifier; stimulated Brillouin scattering

## 1 引言

在长距离大容量的光传输系统中, 群速度色散(GVD)、光放大器的级联而累积的放大自发辐射(ASE)噪声、偏振模色散(PMD)及非线性效应等影响了信号的形状和信噪比。当单信道数据速率达到

40 Gbit/s以上时, 对如此高速的信号在电域内处理, 其实现难度和代价都极高, 甚至因为超过了电处理的极限而无法实现。因此对信号的全光 3R 再生就变得极其重要<sup>[1,2]</sup>。全光时钟恢复是 3R 的重要内容, 是进行再放大和再整形的基础。

**收稿日期:** 2007-01-15; **收到修改稿日期:** 2007-04-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(60437010)资助项目。

**作者简介:** 张峰(1981—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事全光通信网及高速光传输技术方面的研究。

E-mail: mitor@163.com

**导师简介:** 简水生(1929—), 男, 江西人, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感、光纤有源器件、光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

在现在光纤传输系统中,由于非归零(NRZ)码数据格式实现简单而被广泛采用。但由于非归零码的调制光谱中没有明显的时钟信息,直接从非归零码数据提取时钟信息是非常困难的。目前商用的非归零码信号的时钟提取都是在电域内实现的。当数据速率进一步提高时,全光非归零码信号时钟提取的优势就体现出来了。全光非归零码信号的时钟提取包括非归零码时钟分量增强和全光时钟提取两个功能模块。非归零码信号的预处理可以采用半导体光放大器(SOA)和带通滤波器的方法,即半导体光放大器+光纤布拉格光栅(FBG)<sup>[3]</sup>,半导体光放大器+阵列波导光栅(AWG)<sup>[4]</sup>等实现非归零码时钟增强,时钟分量增强后的信号通过法布里-珀罗(F-P)滤波器<sup>[5]</sup>、自脉冲激光器<sup>[6]</sup>、注入锁模激光器<sup>[7]</sup>、双折射谐振腔<sup>[8]</sup>、受激布里渊散射(SBS)效应<sup>[9,10]</sup>等结构将其时钟分量提取出来。

全光时钟提取结构应该对输入信号的恶化程度有一定的容忍度,即能从受群速度色散、放大自发辐射、非线性等因素影响而恶化的信号中提取出高消光比、低时钟抖动的时钟信号。容忍度越大,该时钟提取结构的性能越优。本文采用半导体光放大器+啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)的方式,充分利用半导体光放大器的增益饱和特性,半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅的频率啁啾特性,啁啾光纤布拉格光栅的带通滤波作用实现了对非归零码信号的时钟分量增强;利用基于受激布里渊散射的结构实现恶化非归零码信号的全光时钟提取。

## 2 恶化信号的时钟恢复原理

当光脉冲沿半导体光放大器传播时,脉冲上升沿的到达使受激辐射引起载流子消耗,载流子浓度的下降使脉冲的不同部分获得不同的增益,由此导致了输入光脉冲的畸变,在脉冲的上升沿产生了一个“过冲”。这也是半导体光放大器载流子浓度的动态饱和特性。光脉冲在半导体光放大器中传播时,几乎在整个脉冲上产生了不同程度的负啁啾,仅在脉冲的后沿,由于载流子的恢复使得啁啾为正。啁啾光纤布拉格光栅在光脉冲传输过程中使得脉冲在正色散区域传输即在反常色散区( $\beta_2 < 0$ ),在脉冲前沿( $T < 0$ )的 $\delta\omega$ 为负,向后沿线性增大。因此光脉冲经过半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅后,半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅所致频率啁啾在脉冲前后沿符号相同:前沿为负啁啾即红

移;后沿为正啁啾即蓝移。啁啾光纤布拉格光栅对自相位调制(SPM)致啁啾起到了加强的作用。啁啾光纤布拉格光栅同时也作为一个带通滤波器,将频率的啁啾转化为幅度的变化。经过半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅共同作用频率啁啾加强的脉冲,前后沿就会产生尖峰,加上由半导体光放大器增益饱和引起的过冲,每个脉冲前沿的尖峰大于后沿,前后沿尖峰的出现使原本时钟信息较弱的非归零码调制光谱产生了较强的时钟分量。调整非归零码光谱的中心波长至啁啾光纤布拉格光栅反射谱的长波长边缘,使中心频率和红移分量得到抑制,蓝移分量几乎全部被反射,时钟分量就被有效地加强,时钟数据抑制比也因此得到提高<sup>[10]</sup>。

受激布里渊散射描述的是光子和晶体振动态(介质中的声波,通常称为声学声子)之间的相互作用。当入射的抽运光功率超过布里渊散射阈值时,受激布里渊散射将大部分的抽运光能量转换为反向的斯托克斯波。受激布里渊散射过程可以描述成为抽运波,斯托克斯波通过声波进行非线性相互作用。抽运引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射抽运光,由于多普勒位移与声速 $v_A$ 移动的光栅有关,散射光产生了频率下移。后向的布里渊频移为: $f_B = 2nv_A/\lambda_p$ 。其中 $n$ 为在抽运波长 $\lambda_p$ 处的折射率。在基于受激布里渊散射的光时钟恢复方案中<sup>[9]</sup>,数据流被分成两路相反方向传输的信号,一路信号用 $f_B$ 的频率调制产生频率偏移,称之为种子光。另一路为抽运光,携带大部分能量,其频率不变。当频率下移的种子光和反向传输的抽运光相遇时,发生强烈的受激布里渊散射过程,同时由于布里渊增益带宽很窄,为10~100 MHz(与光纤的类型和抽运特性有关),受激布里渊散射效应形成的梳状窄带滤波器只将种子光频谱中相应的频率分量放大,这样时钟信号被提取出来。这种时钟提取结构对频谱中含有时钟分量的数据格式也可以进行时钟提取,且对数据速率透明。

当非归零码信号在光纤中传输时,随着传输距离的增加,色散使光脉冲逐渐展宽,光纤损耗使光脉冲功率下降,信号信噪比下降。当链路中使用掺铒光纤放大器(EDFA)后,特别是长链路中掺铒光纤放大器的级联,掺铒光纤放大器的放大自发辐射不断积累放大,进一步恶化了信号的信噪比,系统出现明显的功率代价。本时钟提取结构,是利用受激布里渊散射形成梳状窄带滤波器从频域上将时钟分量增强后的非归零码信号中的时钟分量提取出来,因

此恶化信号经时钟分量增强结构后的频谱决定了所提取出时钟信号的质量。色散的作用,是脉冲的不同频率的分量有不同的群速度,造成时域波形的展宽,色散引起的频率啁啾不产生新的频率分量,不影响信号的频谱。在频域上,时钟分量与数据分量的功率差为时钟数据抑制比。噪声的积累和信号的衰减使光信噪比下降,信噪比下降后的信号经时钟分量增强后,时钟数据抑制比下降。当时钟分量低于受激布里渊散射的阈值时,不再发生时钟分量的受激布里渊散射效应,时钟信号无法提取出来。

### 3 实验及结果分析

图 1 为实验实现框图。非归零码信号由 Agilent N4901B 误码仪产生的  $2^{23}-1$  字长的伪随机码 (PRBS) 以 9.953 Gbit/s 的速率驱动无啁啾 LiNbO<sub>3</sub> 马赫-曾德尔调制器 (MZM)。啁啾光纤布拉格光栅为用于长距离传输色散补偿的啁啾光栅,中心波长为 1554.94 nm,其反射谱和时延曲线如图 2 所示。半导体光放大器为 COVEGA SOA1117,其 Steinhart 常数为:  $a = 1.129241 \times 10^{-3}$ ;  $b = 2.341077 \times 10^{-4}$ ;  $c = 8.775468 \times 10^{-8}$ 。采样示波器

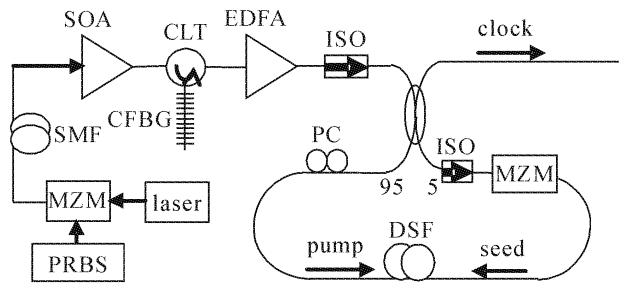


图 1 非归零码全光时钟恢复原理框图

CLT: 环形器; PC: 偏振控制器; ISO: 光隔离器

Fig. 1 Experimental setup of all optical clock recovery of NRZ

CLT: circulator; PC: polarization controller; ISO: isolator

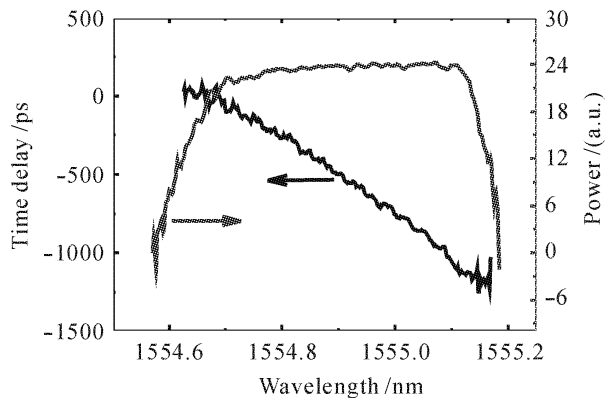


图 2 啁啾光纤布拉格光栅的反射谱和时延曲线

Fig. 2 Reflectivity and time delay of CFBG

为 Agilent 86100B 宽带示波器,光谱仪为 ANDO AQ6317C。非归零码信号经光纤传输后,采用放大器补偿其功率损耗,输入光纤的非归零码信号平均功率为 0,对不同的光纤长度,保持输入半导体光放大器的信号平均功率为  $-4$  dBm,半导体光放大器的输入电流为 238 mA。色散位移光纤 (DSF) 长 7.6 km。

非归零码信号经不同长度的单模光纤 (SMF) 传输后,在保持输入半导体光放大器的平均功率不变的情况下,信号经过半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅后的时钟分量增强的结果如图 3 所示。在传输光纤长度为 0 时,经半导体光放大器后,时钟数据抑制比为  $-25.3$  dB。调整非归零码光谱的中心波长至啁啾光纤布拉格光栅反射谱的长波长边缘,经过啁啾光纤布拉格光栅后,半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅共同作用使增强的频率啁啾转化成幅度的变化,因此在每个脉冲的前后沿都产生了尖峰,尖峰的产生,使非归零码频谱中的时钟分量增强,时钟数据抑制比增大。经啁啾光纤布拉格光栅后,时钟数据抑制比为  $-2$  dB。时钟数据抑制比提高后的信号通过大功率掺铒光纤放大器放大,经 95:5 的耦合器分成两路。95% 的信号作为抽运光,另 5% 的光信号经 10.484 GHz (对应于输入中心波长下色散位移光纤的斯托克斯频移) 的时钟调制后作为种子信号 (相对调制前产生了频移),抽运光激发频率下移的频率分量,形成的梳状窄带受激布里渊散射滤波器将种子光中对应频率的信号提取出来。经过半导体光放大器后,时钟数据抑制比随距离的增加而逐渐下降,经过啁啾光纤布拉格光栅后,时钟数据抑制比经历同样的变化趋势。啁啾光纤布拉格光栅对时钟数据抑制比的贡献在 22 dB 左右,并随光

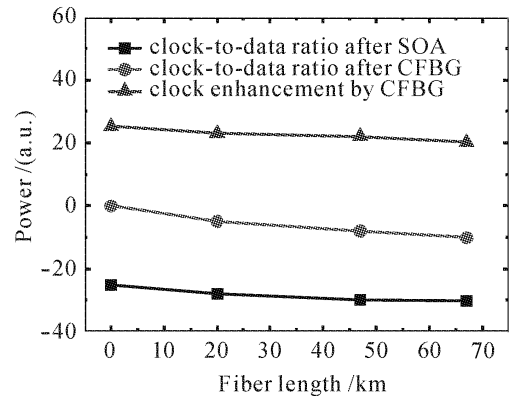


图 3 经半导体光放大器和啁啾光纤布拉格光栅后的时钟分量增强

Fig. 3 Clock component enhancement after SOA and CFBG

纤距离的变化不大,如图 3 所示。

单纯的色散作用,不影响信号的光谱。对于普通单模光纤,信号波长1550 nm,  $D = 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 10 Gbit/s系统在出现明显的功率代价前,最大的传输距离为52 km,当光纤长度为60 km时,色散导致的功率代价为1 dB左右。未补偿的色散导致的功率代价随距离按指数增长。色散、非线性、光纤损耗、放大器噪声共同作用,造成了非归零码信号的信噪比明显下降,光谱中的时钟分量功率相对数据分量越低,提取的光时钟质量越差。当光纤长度逐渐增加,经过半导体光放大器后的时钟数据抑制比逐渐减小,时钟分量功率相对数据分量功率越低。由于抽运光和种子光来自同一个输入,在光谱上,抽运光 and 种子光的数据、时钟分量的相对功率变化相同。时钟数据抑制比越低,时钟分量功率相对数据分量相差越大,造成时钟分量和数据分量的受激布里渊放大增益不再同时达到饱和,即种子光谱中的数据分量和时钟分量获得不同的增益。数据分量获得较大的增益,由傅里叶变换的性质可以知道,数据分量和时钟分量不同的增益导致了在时域内恢复出的时钟信号具有较大的直流分量,时钟信号的消光比降低。当抽运光中时钟分量的功率低于受激布里渊散射的阈值时,抽运光谱中只有数据分量的功率能产生受激布里渊散射效应,此时无法形成梳状受激布里渊散射滤波器,无法实现时钟提取。当光纤长度

达到67 km时,在经过啁啾光纤布拉格光栅后的时钟数据抑制比达到 $-10.5 \text{ dB}$ ,此时大功率掺铒光纤放大器已经不能满足时钟分量数据分量功率同时超过受激布里渊散射阈值的要求,时钟信号无法提取出来。

图 4 为在非归零码信号传输不同光纤长度的情况下所恢复出时钟的光谱和波形。对比图 4(a), (b), (c)可以发现在光纤长度增加时,光时钟频谱中对应频率分量的峰值逐渐降低,噪声水平提高。这说明了光纤长度增加时,传输信号不断恶化,噪声水平增加,信噪比降低,影响了大功率掺铒光纤放大器的放大效率,最后积累的噪声水平提高,时钟分量功率下降,时钟分量的功率下降到一定程度时,抽运光中的数据、时钟分量不能同时达到受激布里渊散射的阈值,因此,无法提取光时钟,如图 4(c), (f)所示。图 4(d), (e), (f)的横轴刻度单位同为 $100 \text{ ps}/\text{div}$ ,纵轴同为 $319 \text{ mW}/\text{div}$ ,时钟波形图左上部分为经 0, 47 km, 67 km传输后非归零码的眼图,显然,随着距离的增长,非归零码信号的恶化程度加重。实验过程中保持输入半导体光放大器的功率不变,受激布里渊散射时钟提取过程各输入功率不变,可以发现提取出的时钟波形的幅度依次下降。这说明信噪比的恶化,使大功率的掺铒光纤放大器的放大效率下降,使提取出的时钟分量的功率下降,反应在时域内时钟信号的幅度下降。

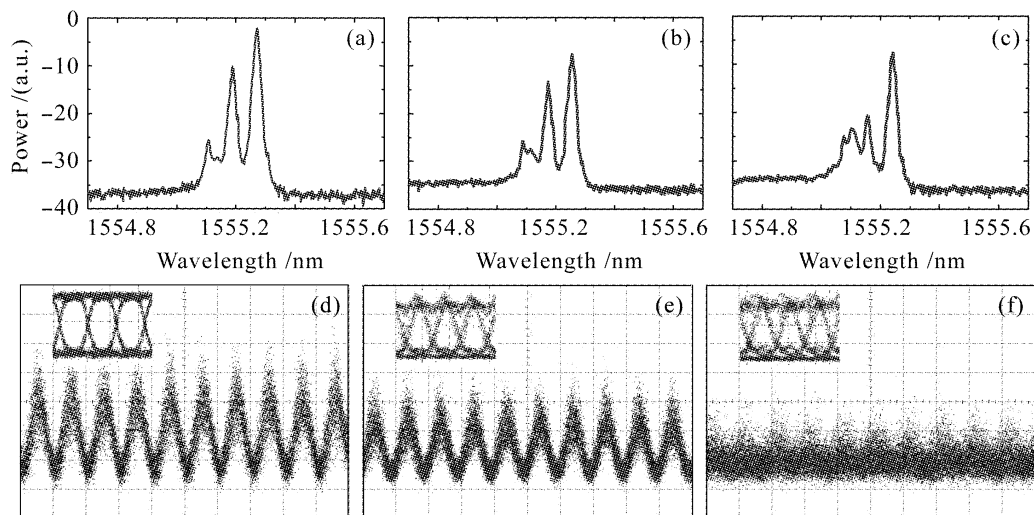


图 4 提取出的时钟的光谱和波形

光纤长度:(a), (d) 0, (b), (e) 47 km, (c), (f) 67 km

Fig. 4 Spectrum and waveform of recovered clock

fiber length: (a), (d) 0; (b), (e) 47 km; (c), (f) 67 km

除单模光纤的色散外,还有啁啾光纤布拉格光栅和色散位移光纤引入系统的色散。脉冲经过半导

体光放大器产生的前沿过冲,从光谱上来说,反映为对应时钟分量的增强;啁啾光纤布拉格光栅的位置

在半导体光放大器之后,其色散作用只影响时域波形,不会有新的频率分量产生,在啁啾光纤布拉格光栅的带宽较宽(一般为信号带宽的 2~4 倍)的情况下,啁啾光纤布拉格光栅对光谱的影响可以忽略。啁啾光纤布拉格光栅致频率啁啾和自相位调制致频率啁啾共同作用加强了时钟数据抑制比;产生受激布里渊散射的过程使用了 7.6 km 的色散位移光纤,其主要作用是作为高非线性介质,使发生受激布里渊散射的阈值较低;色散位移光纤在 1550 nm 处的光纤色散值很小,光脉冲在色散位移光纤中传输时几乎不发生波形畸变,受激布里渊散射过程产生的窄带滤波效应仅仅是滤出了频谱中对应的频率分量。因此在整个实验中,啁啾光纤布拉格光栅和色散位移光纤引入的色散对实验结果的影响很小。

抖动或相位噪声是评价时钟信号的一个重要参数。对于一个时钟提取结构来说,该结构引入的抖动性能<sup>[11]</sup>与输入输出信号均有关,而不能单从时钟波形的抖动性能来评价。多次实验测量的抖动均方根在 3~5 ps 之间。对于 10 GHz 信号来说,其周期为 100 ps,时钟抖动一般小于周期的 7% 即 7 ps 时可以接受,这显然是满足的。由于实验采用的光栅是一根各项性能参数都不是最优的啁啾光栅,其非理想的群时延纹波必然引入相位噪声,使该时钟提取结构的抖动性能变差,采用群时延纹波较小的啁啾光栅可以改善该系统的抖动性能。光时钟信号一般应用于 3R 再生或者经光/电转换后变为电触发信号,对光/电时钟信号的进一步滤波处理可以提高时钟信号的质量,优化抖动性能。

## 4 结 论

实际的传输系统中,10 Gbit/s 的非归零码信号经过长距离传输后,由于放大器的级联造成的放大自发辐射噪声的积累,光纤的非线性效应和色散等各种因素的影响造成的光信噪比的劣化是能否进行全光时钟提取的关键。由于非归零码信号的光谱中不存在时钟分量,因此必须通过时钟增强结构对非归零码信号进行非线性处理。实验证明,对于基于

受激布里渊散射的全光时钟提取结构,当时钟增强后的恶化非归零码信号光谱中的时钟数据抑制比低于 -10 dB 时,无法实现该恶化信号的时钟提取,此时需要利用滤波器等方法提高此恶化信号的信噪比,因此这种基于受激布里渊散射的全光时钟提取结构对恶化信号的非归零码信号有较大的容忍度。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Likai, Yu Jinlong, Zhang Aixu *et al.*. Investigation of all-optical clock recovery using a code mixer to reduce the pattern effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1641~1644  
朱利凯,于晋龙,张爱旭等. 采用混码器降低码型效应的全光时钟提取技术的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12):1641~1644
- 2 Tong Wu, Kun Qiu. High speed fiber-based clock enhancement of NRZ data [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4):193~195
- 3 Weiming Mao, Mohammed Al-Mumin, Xinhong Wang *et al.*. All-optical enhancement of clock and clock-to-data suppression ratio of NRZ data [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3):239~241
- 4 Lina Yin, Yumei Yan, Yunfeng Zhou *et al.*. Novel scheme for all-optical clock recovery from NRZ signal [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2006, **48**(3):516~521
- 5 M. Jinno, T. Matsumoto. Optical tank circuits used for all-optical timing recovery [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):895~900
- 6 J. Slovak, C. Bornholdt, J. Kreissl *et al.*. Bit rate and wavelength transparent all-optical clock recovery scheme for NRZ-coded PRBS signals [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7):844~846
- 7 Lü Jie, Yu Jinlong, Li Yanan *et al.*. 40 Gb/s all-optical clock extraction based on the injection mode-locked laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10):1307~1312  
吕捷,于晋龙,李亚男等. 基于注入锁模激光器的 40 Gb/s 全光时钟提取[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10):1307~1312
- 8 Tuomo von Lerber, Jesse Tuominen, Hanne Ludvigsen *et al.*. Multichannel and rate all-optical clock recovery [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(12):1395~1397
- 9 D. L. Butler, J. S. Wey, M. W. Chbat *et al.*. Optical clock recovery from a data stream of an arbitrary bit rate by use of stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6):560~562
- 10 Zhang Feng, Chen Yong, Jian Shuisheng. All optical clock recovery from non-return to zero data stream based on semiconductor optical amplifier and stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):987~992  
张峰,陈勇,简水生. 基于 SOA 和 SBS 的全光 NRZ 时钟提取[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):987~992
- 11 C. Johnson, K. Demarest, C. Allen *et al.*. Multiwavelength all-optical clock recovery [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7):895~897