

文章编号: 0253-2239(2006)05-0801-6

40 Gb/s 信号全光 3R 再生实验

于晋龙 王耀天 张爱旭 张艳冬 朱利凯 李亚男 胡 浩 王文睿
王卓然 吕 捷 王新兵 张立台 杨恩泽

(天津大学电信学院光纤通信实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 提出一种新型 40 Gb/s 全光 3R 再生器方案。采用高精度度法布里-珀罗滤波器进行时钟提取。时钟提取前, 通过高稳定光源对输入信号光波长变换实现信号光波长和法布里-珀罗滤波器梳状窗口对准; 时钟提取后, 接半导体光放大器(SOA)进一步消除时钟信号噪声。全光判决中, 采用双半导体光放大器串联增大非线性性能, 提高了判决门的响应速度。判决输出接窄带滤波器去除脉冲啁啾拖尾, 减小码型效应。实验中, 恶化 40 Gb/s 光脉冲信号通过全光 3R 再生器可以得到再生脉冲。输入恶化信号时间抖动大于 5 ps, 脉冲宽度大于 16 ps, 再生得到的信号时间抖动小于 1.5 ps。再生信号相对于输入信噪比改善 14 dB。连续稳定工作记录大于 15 h。通过实验验证, 这种全光 3R 再生器方案成功地实现了 40 Gb/s 信号的再生。

关键词: 光纤通信; 全光 3R 再生器; 40 GHz 时钟提取; 法布里-珀罗滤波器; 半导体光放大器; 码型效应
中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

Experimental Study on 40 Gb/s All Optical 3R Regeneration

Yu Jinlong Wang Yaotian Zhang Aixu Zhang Yandong Zhu Likai Li Ya'nan Hu Hao
Wang Wenrui Wang Zhuoran Lü Jie Wang Xinbing Zhang Litai Yang Enze

(School of Electronic Information, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information
and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072)

Abstract: A novel 40 Gb/s all optical 3R regenerator was proposed. High finesse Fabry-Pérot (F-P) filter was used in clock recovery. Before clock recovery, a stable laser was used in wavelength conversion to aim the wavelength of input signal at the window of F-P filter. After clock recovery, the low frequency noise in the recovery clock was suppressed using semiconductor optical amplifier (SOA). In the all optical decision gate, dual SOAs in series were used to lengthen active region of SOA and to rise the optical switching speed. The pattern effect of the output of decision gate was eliminated by using narrow band filter. In experimental study, new 40Gb/s optical signal was regenerated from degraded optical signal using this 3R regenerator. The timing jitter and pulse width of the degraded signal were larger than 5 ps and 16 ps. Compared with these, the timing jitter of the regenerated pulse was 1.5 ps. The signal noise ratio improved 14 dB. This regenerator was recorded to work continually more than 15 h. This experiment testified that the new scheme of regenerator can work successfully in 40 Gb/s all optical 3R pulse regeneration.

Key words: optical fiber communication; all optical 3R regenerator; 40 GHz clock recovery; Fabry-Pérot filter; semiconductor optical amplifier; pattern effect

1 引 言

超高速光通信网中, 光信号在传输过程中会受很多因素影响。这些因素包括光纤及器件的群速度色散、偏振模色散、各种非线性效应, 放大器噪声积

累, 以及信道内或信道间相互干扰等等。其恶化结果是光信号脉冲强度噪声、定时抖动增加以及脉冲展宽、消光比下降或包络畸变, 最终导致光信号误码率上升, 限制了传输距离。为克服诸多因素影响提

作者简介: 于晋龙(1969—), 男, 教授, 主要从事高速光通信系统方面的研究。E-mail: yujinlong@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-07-07; 收到修改稿日期: 2006-08-21

高光网络的传输距离和传输质量,需要在传输过程中采用 3R 再生(再放大 Re-amplifying、再整形 Re-shaping、再定时 Re-timing)。全光 3R 再生系统是在光层面上的 3R 再生方式,克服了电 3R 再生的不足。它以透明性、通用性、灵活性、可扩展性和不需要对信号恶化进行预测补偿等优点,成为全光网络中保证传输质量的一种非常有效的方法^[1]。

全光 3R 再生主要包括光时钟恢复单元和光判决单元。目前全光时钟提取方案主要有注入锁定^[2]、自脉动激光器^[3]、平行放大器结构的萨尼亚克干涉仪^[4]、法布里-珀罗滤波器提取方式^[5]等等。全光判决方案主要有利用超长半导体光放大器^[6]、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构^[7]、电吸收调制器

(EAM)^[8]等等。所有这些方案都处在研究探索阶段,各有各的优点和缺陷,没有公认的最佳方案。而且由于多数方法所用的器件特殊,难于量产,全光 3R 实用商品化无法实现。本文采用高精度法布里-珀罗滤波器直接进行时钟提取,此方案结构简单,可以得到较高质量的时钟;采用半导体光放大器的交叉增益效应(XGM)进行判决整形,后接窄带滤波器滤除原注入光,改善码型。最后实现了对恶化信号的全光 3R 再生。

2 全光 3R 再生器方案

全光 3R 再生器系统由光源,时钟提取及光判决三部分组成,如图 1 所示。

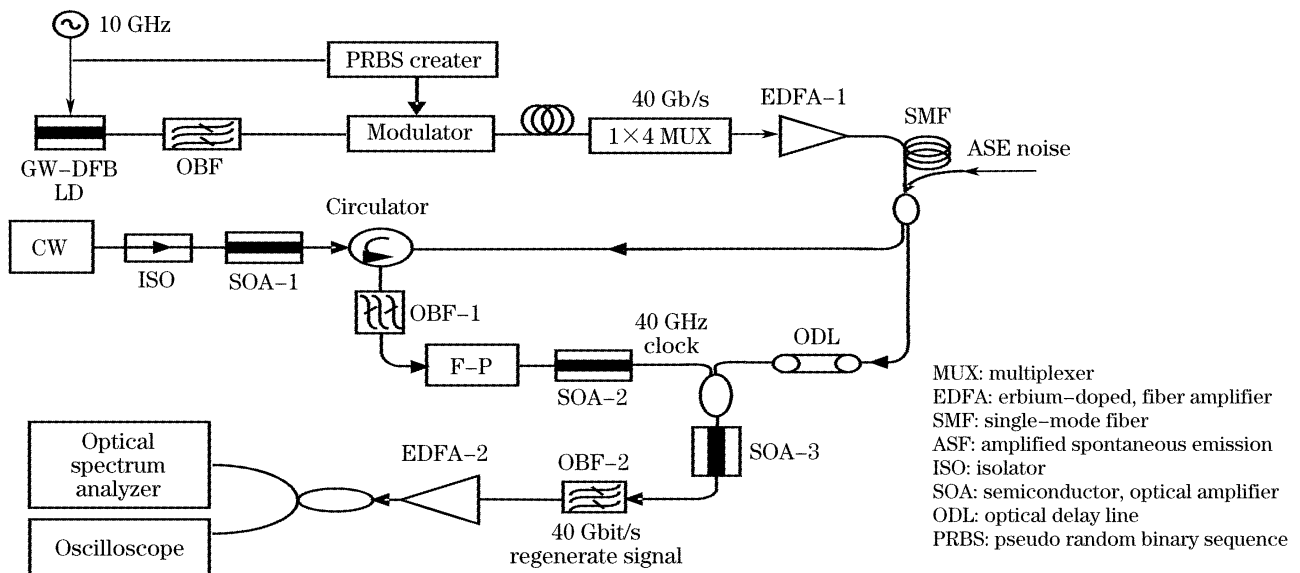


图 1 全光 3R 再生方案

Fig. 1 All optical 3R regeneration scheme

2.1 40 Gb/s 光源

40 Gb/s 伪随机码光源通过对脉冲压窄和复用得到。微波源产生的 10 GHz 正弦波信号被分成两路,其中一路对工作在增益开关状态的分布反馈激光器进行直接调制(DFB),产生出啁啾量很大的 10 GHz 光脉冲;另一路作为同步信号注入到伪随机码发生器,输出 10 Gb/s 非归零(NRZ)伪随机码序列(PRBS)。此序列码通过马赫-曾德尔结构 LiNbO₃ 调制器对 10 GHz 光脉冲进行调制,其输出为 10 Gb/s 归零(RZ)伪随机码序列光信号。10 Gb/s 伪随机码光信号带有很大的啁啾量,经过色散补偿光纤压窄后变为脉宽小于 13 ps 的窄脉冲,再经过四路复用器时分复用后就得到 40 Gb/s 归零伪随机码光源[图 2(a)]。由于复用器四路延时不精确衰减不均匀,图中脉冲峰值和码间周期都不理想。图 2(c)是信号的光谱,其中各纵模间隔对应 40 GHz

带宽间隔,中心波长 1553 nm。

需要对 40 Gb/s 伪随机码光源进行恶化处理,以模拟实际通信线路中需要再生的光信号。首先,40 Gb/s 光信号经过一段 2 km 单模光纤(SMF),脉冲因色散而展宽;然后,一个无输入的掺铒光纤放大器(EDFA)通过耦合器向光信号中加入自发辐射噪声(ASE)。通过这样的恶化处理^[9]造成信号脉冲展宽,幅度噪声和时间抖动增大,信噪比下降[图 2(b)]。测得恶化信号波形脉宽大于 16 ps,脉冲时间抖动大于 5 ps。

恶化处理后的 40 Gb/s 信号分成两路,分别输入到时钟提取单元和光判决单元。在时钟提取单元得到波长稳定、抖动小、噪声低、波形规则的时钟光脉冲。时钟光脉冲在光判决单元由原信号进行调制,最终得到比输入脉冲波形更好的再生光数据信号。

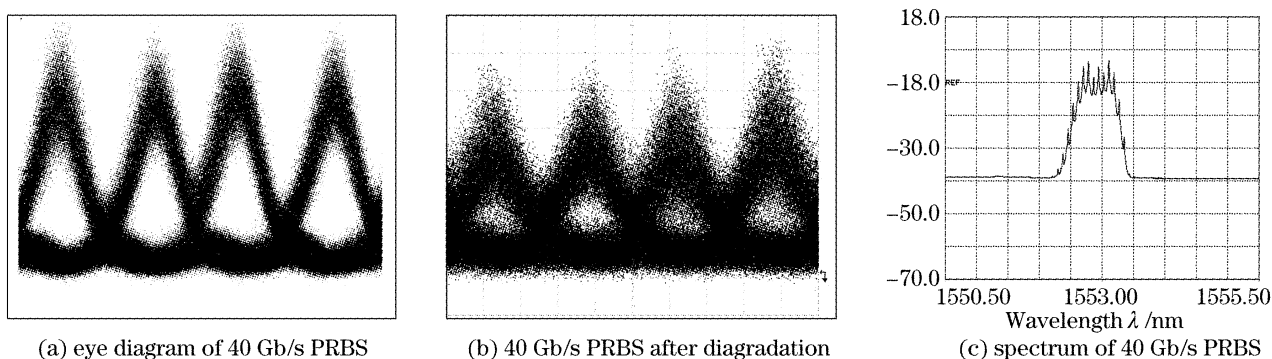


图 2 40 Gb/s 伪随机码序列光源。(a) 40 Gb/s 伪随机码波形眼图, (b) 恶化后 40 Gb/s 伪随机码波形眼图, (c) 40 Gb/s 伪随机码光谱

Fig. 2 40 Gb/s PRBS optical signal resource. (a) Eye diagram of 40 Gb/s PRBS, (b) 40 Gb/s PRBS after degradation, (c) spectrum of 40 Gb/s PRBS

2.2 全光时钟提取单元

从随机数字信号中提取时钟的前提是信号中必须含有丰富的定时信息。40 Gb/s 归零码数据脉冲的频谱分量中含有两部分: 对应脉冲形状连续谱成分; 对应脉冲速率的 40 GHz 离散谱成分, 即频谱中的时钟分量。时钟提取过程即是一个滤除连续谱, 提取离散谱的过程。采用高精度法布里-珀罗梳状滤波器对数据脉冲进行时钟提取。40 Gb/s 光数据脉冲通过自由谱区为 40 GHz 的法布里-珀罗滤波器, 透过峰与数据信号中心波长对准, 频率间隔为 40 GHz 的时钟分量将通过滤波器, 而其余连续谱分量会被滤除。

法布里-珀罗滤波器是一个光波谐振腔, 滤波器精细度 Q 值对于提取时钟的质量有着最直接的关系。其相对传输函数为

$$Y(\lambda) = \frac{1}{1 + jQ(\lambda_0/\lambda - \lambda/\lambda_0)}, \quad (1)$$

其中 λ 为实际输入波长; λ_0 为法布里-珀罗窗口的中心波长; Q 为法布里-珀罗的精细度。当 $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ 很小时, 传输函数为

$$Y(\lambda) = \frac{1}{1 + jQ\Delta\lambda/\lambda_0}, \quad (2)$$

光信号通过法布里-珀罗滤波器产生的定时抖动幅度为

$$A = |Y(\lambda)| \frac{1}{\sqrt{1 + (2Q\Delta\lambda/\lambda_0)^2}}. \quad (3)$$

由(3)式可见, 法布里-珀罗滤波器的精细度高, 输出脉冲抖动幅度下降。直观地看法布里-珀罗的精细度越高, 其透射窗口宽度越窄, 则通过窗口的连续谱成分越少, 所得到的脉冲噪声小、信噪比高。因此时钟提取单元里应该采用高精度法布里-珀罗滤波器。可以通过仿真模拟进一步说明精细度对时

钟提取的影响。设谱宽 50 MHz 的直流激光器被调制成 40 Gb/s 的脉冲序列, 分别经过精细度为 50, 200, 500 和 1000 的法布里-珀罗滤波器后得到的输出结果如图 3 所示。在法布里-珀罗滤波器精细度较低时, 信号眼图随精细度的提高而迅速改善, 时钟中的幅度抖动减小。精细度为 50 时, 幅度起伏很大, 噪声很强; 当精细度为 500 时幅度噪声已较小; 达到 1000 时, 时钟幅度基本一致, 幅度噪声已经非常弱。

实验中采用精细度为 1012 的法布里-珀罗滤波器, 其透射窗口 3 dB 带宽仅 40 MHz。理论上, 如果能保证信号中心波长与滤波器窗口中心对准, 增大法布里-珀罗滤波器精细度可以将抖动减小到任意程度。但如果信号波长和窗口中心偏移, 高精度反而会增大输出脉冲的噪声和抖动, 因此要求滤波器透射窗口和输入脉冲波长高度稳定。实验中, 40 GHz 的法布里-珀罗滤波器通过高精度温控电路来稳定滤波器腔长, 确保了滤波器透射窗口位置的稳定。40 Gb/s 光脉冲信号是由工作在增益开关的分布式反馈激光器产生, 光谱很宽而且波长很不稳定, 不能直接通过窗口宽度仅 40 MHz 的法布里-珀罗滤波器。需要对光数据信号进行波长变换, 使输入信号波长稳定。

用一波长高度稳定并可调谐的激光器 (Agilent81640A) 输出连续光, 其光谱宽度只有 12.5 MHz (10^{-4} nm), 24 h 漂移小于 1 pm。实验中连续光的波长为 1548 nm。连续光与数据光信号相对反向进入半导体光放大器 (SOA-1), 进行波长变换。原数据信号被半导体光放大器后的隔离器 (ISO) 阻挡, 波长变换后的反码数据信号经过环形器 (Circulator) 进入窄带光滤波器 (OBF-1)。因为

SOA-1 载流子恢复时间接近 100 ps, 进行 40 Gb/s 波长变换会产生明显的码型效应, 经过窄带滤波器滤除脉冲拖尾部分的波长抑制码型效应^[10,11]。经过掺铒光纤放大器的放大后, 波长稳定的数据信号进入法布里-珀罗滤波器。调整高稳定激光器的波

长, 使数据信号波长与法布里-珀罗滤波器的透过峰窗口对准。通过调节法布里-珀罗滤波器温控电路, 改变温度, 改变滤波器透射窗口的位置, 与数据信号码率相吻合。法布里-珀罗滤波器输出端得到时钟脉冲[图 4(a)]。

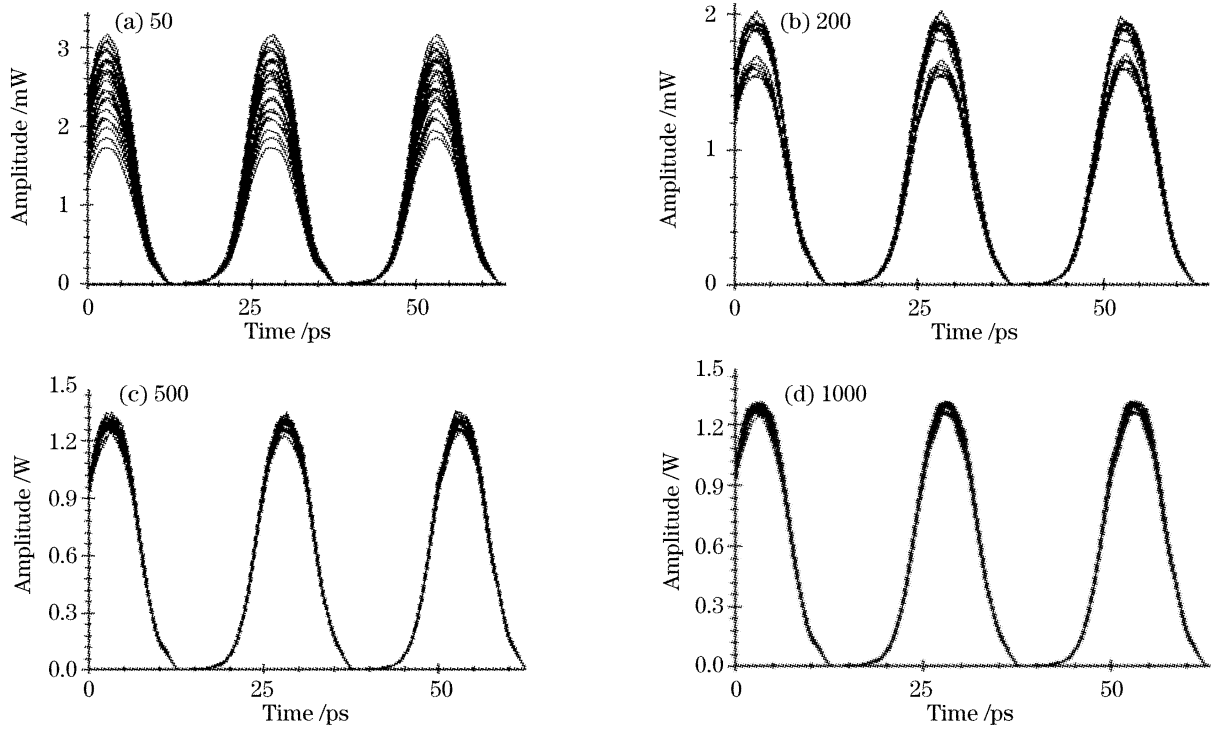


图 3 法布里-珀罗滤波器不同精细度时提取得到的时钟的眼图

Fig. 3 Eye diagram of recovery clock through Fabry-Pérot filter with different finesse

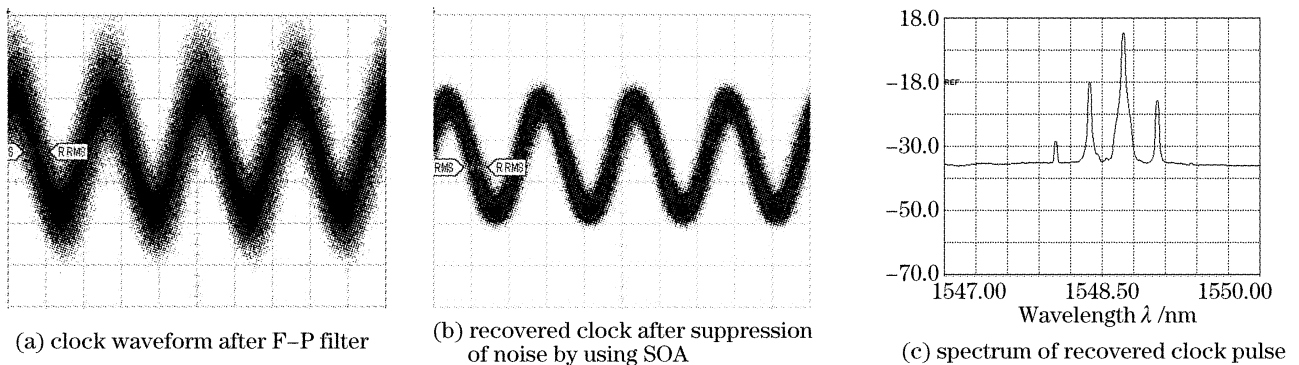


图 4 40 GHz 时钟提取结果。(a) 经法布里-珀罗滤波器提取的时钟波形, (b) 经过半导体光放大器去噪声的时钟波形, (c) 提取时钟信号的光谱图

Fig. 4 Result of 40 GHz clock recovery (a) clock waveform after Fabry-Pérot filter (b) recovered clock after suppression of noise by using SOA (c) spectrum of recovered clock pulse

法布里-珀罗滤波器窗口带宽为 40 MHz, 光数据脉冲通过后在离散谱线两侧 40 MHz 范围内仍会带有一定的连续谱成分透过, 时域上反映为输出时钟脉冲含有低频分量。这些低频分量使时钟信号含有很弱的低频包络起伏, 在示波器上显示为幅度抖动。法布里-珀罗输出的时钟脉冲通过一个 SOA-2。半导体光放大器的自增益调制效应(SGM)对通过信号百兆量级以下的低频噪声有较好的抑制效

果^[12]。通过半导体光放大器时钟脉冲低频抖动被抑制^[13], 脉冲幅度一致, 得到质量更好的时钟脉冲[图 4(b)]。

2.3 全光判决单元

在光判决单元, 数据脉冲和提取出的时钟脉冲同向入射到 SOA-3, 利用半导体光放大器的交叉增益调制效应(XGM)直接完成脉冲判决再生。SOA-3 由两个半导体光放大器级联组成, 增长有源区长度,

加强了半导体光放大器的非线性效应。通过改变光可变延时线(ODL)调节数据脉冲和时钟脉冲的相对时延量,使两路脉冲对准。数据脉冲控制半导体光放大器判决门的开启关闭,时钟脉冲被数据脉冲调制,成为再生脉冲。

经过半导体光放大器得到的 40 Gb/s 再生脉冲带有明显的脉冲拖尾。随注入光脉冲通过,半导体光放大器有源区内载流子浓度快速消耗缓慢恢复。有源区折射率随载流子浓度产生变化,引起输出信号光中心波长漂移^[14]。输出脉冲的前沿短波长成分较多,陡峭上升;后沿长波长成分较多,缓慢下降形成拖尾。当注入脉冲出现长连“1”脉冲时,脉冲后

沿长波长拖尾严重,会造成脉冲展宽和码间混叠,即出现码型效应[图 5(a)]。

半导体光放大器输出端接一窄带滤波器(OBF-2),用来滤除输入的数据脉冲光,同时消除再生信号的码型效应。此滤波器 3 dB 带宽为 0.2 nm,具有陡峭的上升沿和下降沿,输出光脉冲通过时,可以保留输出脉冲的短波长部分,截去长波长部分,从而抑制长波长拖尾减小码型效应^[9],得到波形清晰的再生脉冲信号。再生脉冲光谱[图 5(c)]不对称,是因为窄带滤波器对长波长抑制,取半导体光放大器输出的短波长的结果。

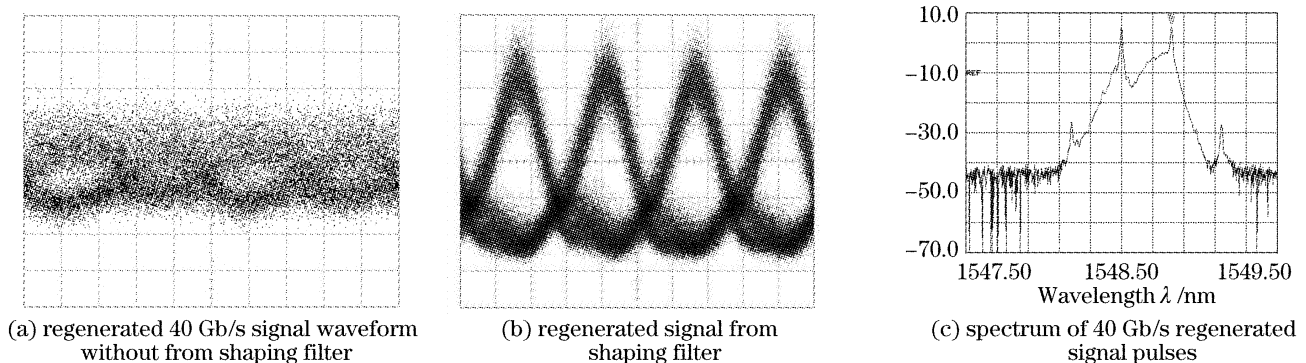


图 5 40 Gb/s 全光 3R 再生结果。(a) 未经滤波整形的判决输出的 40 Gb/s 信号波形, (b) 经滤波整形的 40 Gb/s 再生波形, (c) 40 Gb/s 再生信号光谱

Fig. 5 Result of 40 Gb/s all optical 3R regeneration. (a) Regenerated 40 Gb/s signal waveform without from shaping filter, (b) regenerated signal from shaping filter, (c) spectrum of 40 Gb/s regenerated signal pulses

3 实验结果

实验过程中的时域波形通过示波器 Agilent86100A 观测记录,光谱由光谱仪 ANDO-AQ6317B 观测记录。

40 Gb/s 伪随机码光脉冲宽度为 13 ps,中心波长 1553 nm。恶化后,光脉冲宽度大于 16 ps,脉冲时间抖动大于 5 ps。时钟提取单元中,可调谐激光器输出的连续光波长 1548 nm。恶化信号经过波长变换得到原波形的反码。经过法布里-珀罗滤波得到时钟脉冲,测其时间抖动为 1.7 ps;再经半导体光放大器去低频噪声处理,时间抖动降到小于 1.4 ps。光判决单元,脉冲信号输入功率为 3.67 dBm,时钟提取信号输入功率为 1.5 dBm。经过串联的双半导体光放大器和窄带光滤波器得到再生数据脉冲,时间抖动 1.5 ps。测得再生信号相对输入的恶化信号的信噪比改善了 14 dB,连续稳定工作记录大于 15 h。

4 结 论

实验证明,从恶化信号中得到了抖动小、噪声低的 40 GHz 时钟。采用双半导体光放大器串联来完成全光判决,后接窄带滤波器起到减小码型效应作用。再生信号与恶化信号相比脉冲质量有较大提高。实验结果显示,利用这种全光 3R 再生系统成功地实现了 40 Gb/s 信号的再生(由于没有 40 Gb/s 误码仪,本再生器没有进行误码率测试)。

参 考 文 献

- 1 I. D. Phillips, A. D. Ellis, H. J. Thiele *et al.*. 40 Gbit/s all-optical data regeneration and demultiplexing with long pattern lengths using a semiconductor nonlinear interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(24): 2340~2342
- 2 Giorgio M. Tosi-Beleffi, Davide M. Forin, Franco Curti *et al.*. 3R all optical regeneration[C]. *ICTON 2004*, 2004. 55~58
- 3 B. Sartorius, C. Bornholdt, O. Brox *et al.*. All-optical clock recovery module based on self-pulsating DFB laser[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(17): 1664~1665

- 4 Y. Shibata, N. Kikuchi, S. Oku *et al.*. Single-stage all-optical 3R at 40 Gb/s retaining input wavelength using Sagnac interferometer integrated with parallel-amplifier structure (SIPAS) [C]. *ECOC 2002*, 2002, (3): 1~2
- 5 M. Jinno, T. Matsumoto, M. Koga. All-optical timing extraction using an optical tank circuit [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(3): 203~204
- 6 C. Bornholdt, J. Slovak, B. Sartorius. Semiconductor-based all-optical 3R regenerator demonstrated at 40 Gbit/s[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(3): 192~194
- 7 Masaki Funabashi, Zuqing Zhu, Zhong Pan *et al.*. All-optical 3R regeneration in monolithic SOA-MZI to achieve 0.4 million km fiber transmission[C]. *LEOS*, 2005. 137~138
- 8 Lou Caiyun, Wang Tong, Huo Li *et al.*. Research on 10 Gb/s all-optical 3R regeneration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 27~29 (in Chinese)
娄采云,王桐,霍力等. 10 Gb/s 全光 3R 再生的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 27~29
- 9 Ehab S. Awad, Pak S. Cho, Christopher Richardson *et al.*. Optical 3R regeneration using a single EAM for all-optical timing extraction with simultaneous reshaping and wavelength conversion[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1378~1380
- 10 J. Leuthold, R. Ryf, Drew N. Maywar *et al.*. Nonblocking all-optical cross connect based on regenerative all-optical wavelength converter in a transparent demonstration over 42 nodes and 16800 km[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(11): 2863~2872
- 11 Ye Yabin, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi *et al.*. Chirp performance of converted signal in wavelength conversion based on cross-gain modulation in SOA[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 436~440 (in Chinese)
叶亚斌,郑小平,张汉一等. 基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的波长转换啁啾特性的分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 436~440
- 12 K. Sato, H. Toba. Reduction of mode partition noise by using semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 2001, **7**(2): 328~333
- 13 Zhang Yandong, Yu Jinlong, Wang Yaotian *et al.*. The suppression of amplitude fluctuating noise of the all-optical clock using the SGM of SOA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 267~269 (in Chinese)
张艳冬,于晋龙,王耀天等. 全光时钟提取中利用 SOA 抑制低频噪声的实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 267~269
- 14 G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 1989, **25**(11): 2297~2306