

文章编号: 0253-2239(2005)11-1467-5

40 Gb/s 信号的全光 3R 再生*

娄采云** 杨彦甫 霍力 潘时龙 高以智

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 研制出以注入锁模光纤激光器进行时钟恢复、电吸收调制器(EAM)作光判决门进行信号再整形的新型全光 3R 再生器,成功地运行于 40 Gb/s。理论和实验证明锁模环形激光器腔内放置的可调谐光滤波器的透射谱形状对时钟的脉宽有显著影响,超高斯透射谱的光滤波器利于获得窄时钟光脉冲,腔内放置这样的滤波器使恢复的时钟光脉冲谱宽达 0.44 nm、脉宽 6 ps、时间抖动小于 1 ps。最佳选择用作光判决的开关门的参量,改善了开关门的传输函数,使其接近阶跃函数,并使得开关窗宽度达到最佳。对于被剩余色散恶化的 40 Gb/s 归零码信号进行了 3R 再生,再生后达到了无误码。

关键词: 光纤通信; 全光 3R 再生; 双环注入锁模激光器时钟恢复; 光判决门; 电吸收调制器

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

40 Gb/s All-Optical 3R Regeneration

Lou Caiyun Yang Yanfu Huo Li Pan Shilong Gao Yizhi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A novel 40 Gb/s 3R regenerator was proposed and demonstrated based on two-ring injection mode-locked fiber laser as the clock recovery and electroabsorption modulator as the reshaping optical gate. The effect of the shape of the transmission spectrum of the optical filter on the output pulses of actively mode locked fiber ring laser has been studied experimentally and numerically. It was found that, with the same 3 dB bandwidth, the filter which had a super-Gaussian profile tended to generate narrow pulses. With this scheme, an optical clock pulse train with a spectrum bandwidth of 0.44 nm, a pulse-width of about 6 ps and a timing jitter of <1 ps was recovered. The transmission function of optical gate was improved by optimizing the design of parameters to approach the step function. The width of the switching window was also optimized. With this regenerator, error-free 3R regeneration was performed from 40 Gb/s RZ signal that was degraded by residual dispersion.

Key words: optical fiber communication; all-optical 3R regeneration; clock recovery with two-ring injection mode-locked fiber laser; optical gate; electroabsorption modulator

1 引 言

在高速大容量的光网络中,光纤的非线性效应(自相位调制、交叉相位调制、四波混频)与群速度色散的联合作用,以及光纤放大器的自发辐射噪声,节点上下路等器件的不完善,造成信号严重的累积性损伤(衰减、变形和抖动),最终限制了系统和网络的传输速率和距离。全光 2R 再生(Re-amplification、Re-shaping)可以抑制信号的幅度噪声、提高信号的消光比,但由于没有再定时功能,2R 再生不能提高

光通信系统的级联能力^[1]。全光 3R (Re-amplification、Re-shaping, Re-timing)再生是解决上述问题的最有效方法^[2~4]并成为光通信的一个研究热点。人们希望用于光通信的光再生器满足以下要求:1)低功率消耗;2)对输入信号抖动和功率波动不敏感及大的输入功率动态范围;3)高消光比和低啁啾;4)偏振不敏感;5)对数据码型和速率透明;6)简单有效,成本低。国际上一些大的公司和研究机构自制特殊的器件实现了全光 3R 再生,但这些器

* 国家自然科学基金(60444008)资助课题。

作者简介: 娄采云(1946~),女,天津人,清华大学电子工程系教授,主要从事高速光通信方面的研究工作。

E-mail: loucy@ee.tsinghua.edu.cn

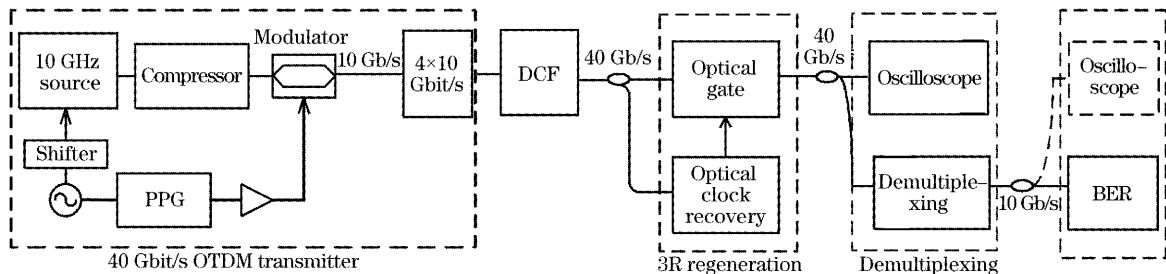
收稿日期: 2004-11-13; 收到修改稿日期: 2005-03-24

件至今未达到实用化。用于全光 3R 的器件中仅电吸收调制器(EAM)达到了商品化。而全部采用电吸收调制器的全光 3R 再生器^[5],虽然结构简单,但是由于电吸收调制器的损耗太大,需要的掺铒光纤放大器多,加大了系统的噪声。本文提出了采用注入锁模光纤激光器进行时钟恢复、电吸收调制器作光判决门进行信号再整形的新型全光 3R 再生器。

2 全光 3R 再生装置

图 1 左边虚线框内为 40 Gb/s 时分复用光发射源。其中分布反馈(DFB)激光器发出的波长为 λ_s 的连续光经电吸收调制器调制后转化为 10 GHz 的光脉冲,经压缩器压缩后脉宽约为 2 ps。光脉冲经铌酸锂调制器调制并经时分复用器复用后生成 40 Gb/s 归零(RZ)码信号。图 1 中左数第二个虚线框内给出了全光 3R 再生器装置图。它由光时钟恢复和光判决门

两部分组成。在发射源和再生器之间插入一段具有高色散参量的色散补偿光纤(DCF)以形成被剩余色散恶化的数据信号。恶化的数据信号经耦合器后分成两部分,分别输入到时钟恢复单元(注入锁模光纤激光器)和光判决门(EAM)。时钟恢复单元从波长为 λ_s 的数据信号中恢复出波长为 λ_c 、抖动很小、信噪比很高并具有理想波形的位时钟光脉冲。在光判决门中,光数据信号控制光判决门的开与关,使通过它的时钟光脉冲受到数据信号的调制,从而输出再整形(Re-shaping)和再定时(Re-timing)了的再生光数据信号^[2,6]。显然,时钟提取和光判决是光 3R 再生的关键技术。本文提出的 3R 再生器的时钟恢复单元是一个注入锁模光纤激光器,光判决门为一个电吸收调制器。实验中采用 Agilent 86100A 测量信号的眼图和时钟波形,Anritsu MP1762A/1761B 误码测试仪进行信号的误码测试。



PPG:pseudorandom pattern generator; OTDM:optical time division multiplexed; DCF: dispersion compensating fiber; BER: bit error rate

图 1 40 Gb/s 3R 全光再生实验结构框图

Fig. 1 Experimental block diagram for 40 Gb/s all-optical 3R regeneration.

2.1 全光时钟恢复

3R 再生的一个关键是从恶化的数据信号中恢复出抖动小、消光比高并且波形良好的时钟光脉冲。本文提出了一种全部由 10 GHz 带宽的元件构成的双环注入锁模光纤激光器,并与频率倍乘技术^[7]相结合,实现 40 Gb/s 恶化信号的光时钟恢复。图 2 为双环注入锁模光纤激光器装置图,该装置实质上是主动锁模光纤激光器和光电振荡环的结合。当外界光信号注入主动锁模激光器后,通过调制器进入 10 GHz 光电振荡环,光电振荡环的振荡频率可以被这个外界信号注入锁定,产生高质量的 10 GHz 电时钟。电时钟又驱动与主动锁模激光器共用的 E/O 调制器,将主动锁模激光器的频率锁定到外界的注入信号的频率上,从而产生 10 GHz 光时钟脉冲。耦合器 3 的输出经过一个间隔为 40 GHz 的法布里-珀罗(F-P)滤波器,频率倍乘器生成 40 GHz 光时钟脉冲。双环注入锁模光纤激光器时钟恢复的最大优点是无码型效应,抵御信号抖动的能力强。

由于 PIN、电滤波器和调制器组成一个具有很高 Q 值的滤波器,相当于一个充满能量的水库,即使输入信号中出现了长“0”序列,该水库中储存的能量仍然能够保持稳定振荡。因此该结构在时钟恢复时不存在码型效应造成的幅度和时间抖动。

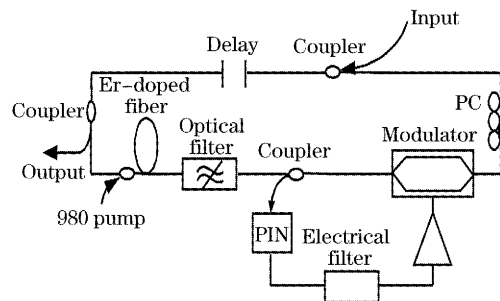


图 2 双环注入锁模光纤激光器结构示意图

Fig. 2 Scheme of two-ring injection mode-locked fiber ring laser

恢复的时钟信号脉宽是一个重要的指标。Kuizenga 和 Siegman^[8]给出了锁模激光器产生的光脉

冲脉宽与腔内元件 3 dB 带宽的平方根成反比的关系。在双环注入锁模光纤激光器的腔内,光域内带宽最小的器件是光滤波器,但透过谱带宽太宽的光滤波器会使激光器不能稳定运转。为了更深入地探讨滤波器透过谱形状对脉冲特性产生的影响,进行了理论计算和实验研究。用 $H(f) = \alpha \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{f}{B_0}\right)^{2m}\right]$ 来描述滤波器透过谱的形状,其中 $m=1$ 表示透过谱为高斯形, m 大于 1 为超高斯形, m 越大,透过谱顶部越平。在腔内色散相同情况下,对滤波器的 $m=1.35$ 和 $m=3.25$ 这两种情况下生成的脉冲光谱进行了数值模拟。图 3 显示了模拟结果,其中虚线为

滤波器的透射曲线,其顶部越平对应的 m 值就越大,实线为锁模激光器输出光脉冲的光谱。该图表明,滤波器的形状系数 m 取 3.25 时得到的光脉冲光谱要比 $m=1.35$ 时的要宽^[9],由变换极限脉冲的时间带宽乘积关系得出相应的脉宽要窄。实验上用 1.5 nm 带宽、高斯透过谱滤波器,时钟光谱小于 0.3 nm,而超高斯形的,得到 0.40~0.44nm 的光谱。因此,无需增大滤波器的 3 dB 带宽或腔长,只须使用滤波谱较平的滤波器,即可得到窄的脉冲。本文选用的是 3 dB 带宽约为 1.5 nm、但透射谱为超高斯形(顶部平坦)的滤波器。

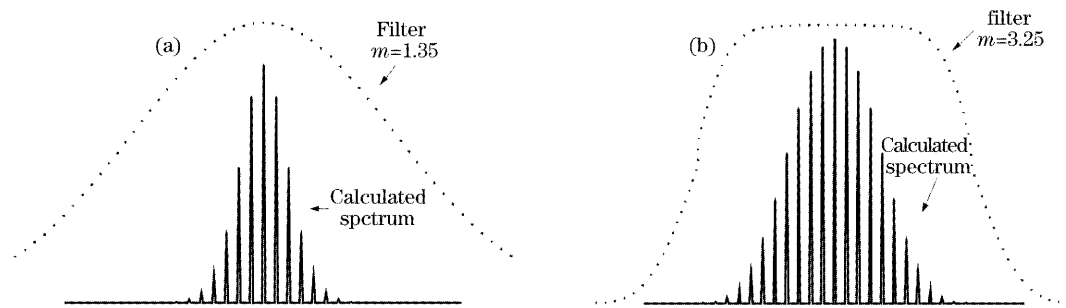


图 3 计算得到的不同光滤波器形状对光谱的影响。(a)高斯型,(b)超高斯型

Fig. 3 Calculated spectrum of the pulse with different filter shape. (a) Gaussian profile, (b) super-Gaussian profile

2.2 基于电吸收调制器光信号的判决门

利用电吸收调制器中的交叉饱和吸收效应(XAM)作光判决门,选用对偏振不敏感的体材料电吸收调制器,其工作原理如图 4(a)所示。恢复的低抖动的时钟光脉冲和数据信号同时注入电吸收调制器,数据信号光功率较强,可以使电吸收调制器产生饱和吸收效应,而时钟信号功率较弱,其功率不足以影响电吸收调制器的吸收率。因此电吸收调制器对时钟脉冲的吸收随输入信号的强弱而变化,当输入信号为逻辑“1”时,电吸收调制器因交叉吸收饱和而对时钟光脉冲没有吸收,此时时钟光脉冲可透过电吸收调制器;当信号为“0”时,电吸收调制器对时

钟光脉冲强烈吸收,电吸收调制器的输出为“0”,从而再现了输入信号的信息,并实现再整形和消抖动。为了达到好的再生效果,判决门的开关窗宽度应大于时钟宽度和时钟抖动的和。双环注入锁模光纤激光器可以得到低抖动和波形理想的光时钟脉冲,因此这里影响光判决门对信号整形和消抖动效果的影响因素是开关窗和时钟之间的相对宽度,相位和各自的形状。通过理论计算,选择最佳的开关门参量(偏置电压、时钟及数据信号的功率),使开关门的传输函数尽量接近阶跃函数,并使得开关窗宽度达到最佳。入射到电吸收调制器的光功率将显著影响判决门的特性,图 4(a)所示的单侧注入光强度受镀膜

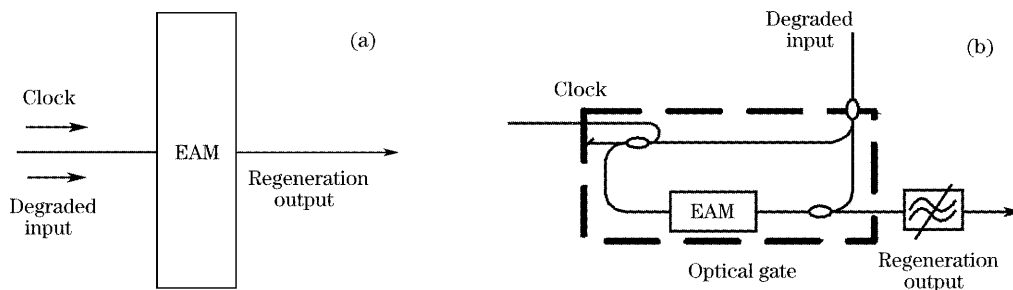


图 4 电吸收调制器光开关结构。(a)基本结构,(b)双侧注入的电吸收调制器光开关

Fig. 4 Configuration of the electroabsorption modulator (EAM) optical gate. (a) Basic principle of electroabsorption modulator gate, (b) electroabsorption modulator gate with two data streams

承受能力限制,为了避免电吸收调制器增透模的损伤,实验中采用图 4(b)所示的数据信号双侧注入方式。

3 实验结果与讨论

输入的 40 Gb/s 的数据信号是由 10 Gb/s 的归零码经过 4×10 Gb/s 复用器获得的,对应的眼图如图 5(a)所示,该信号经过一段色散量为 10 ps/nm 的色散补偿光纤以后,信号被展宽,恶化的眼图如图 5(b)。恶化的信号分成两部分,分别输入到时钟

恢复单元和光判决门(如图 1 所示)进行信号的再定时和再整形。在时钟恢复单元的双环注入锁模光纤激光器中,调节环中的光延迟线,从双环注入锁模光纤激光器的输出端得到 10 GHz 的光时钟脉冲。图 6(a)、图 6(b)分别为腔内滤波器的透过谱和注入锁模恢复的时钟光谱,时钟谱宽为 0.44 nm。采用光学倍乘技术得到 40 GHz 的时钟光脉冲示波器波形如图 6(c)所示,示波器波形表明时钟脉冲的重复率为 40 GHz,时间抖动小于 1 ps,利用自相关仪测量时钟的脉宽为 5.8 ps[图 6(d)]。

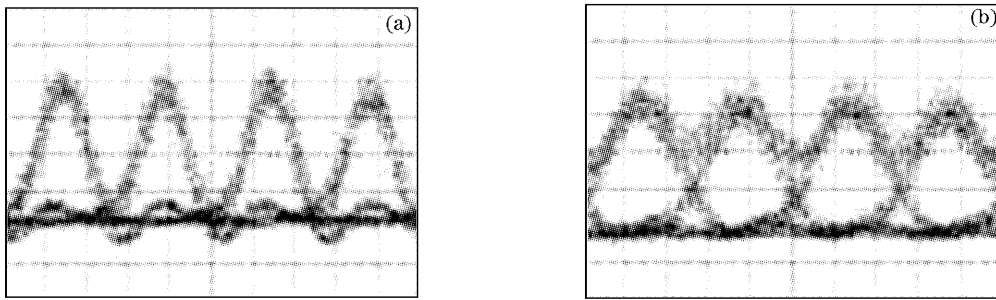


图 5 原始 40 Gb/s 和恶化后 40 Gb/s 信号眼图

Fig. 5 Eye diagrams of the original 40 Gb/s signal and the degraded 40 Gb/s signal

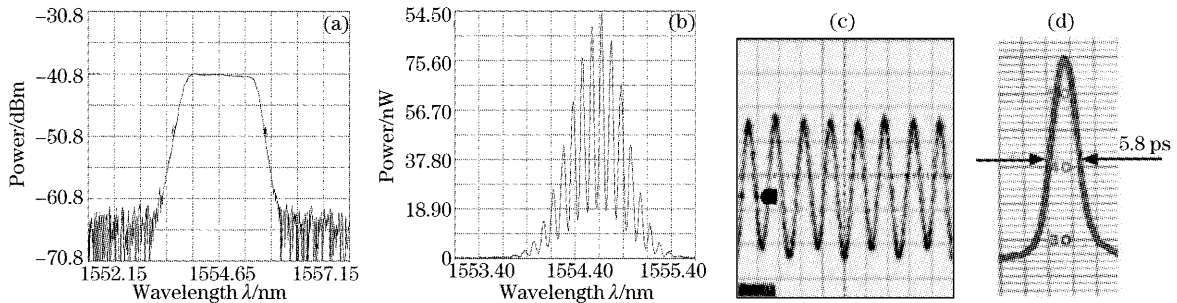


图 6 恢复出的 40 GHz 光时钟脉冲

Fig. 6 The characteristics of recovered 40 GHz clock pulse

将恢复的光时钟光脉冲与恶化的 40 Gb/s 数据信号同时注入到作为判决门的电吸收调制器中,利用电吸收调制器的交叉吸收效应(XAM)获得 40 Gb/s 再生信号。再生的 40 Gb/s 信号经解时分

复用后测量误码。为了对比,对恶化信号也进行了解复用和误码测试。图 7(a)~图 7(c)分别为恶化信号解复用得到的 10 Gb/s 信号、再生的 40 Gb/s 信号及再生解复用后的 10 Gb/s 信号的眼图。由于数

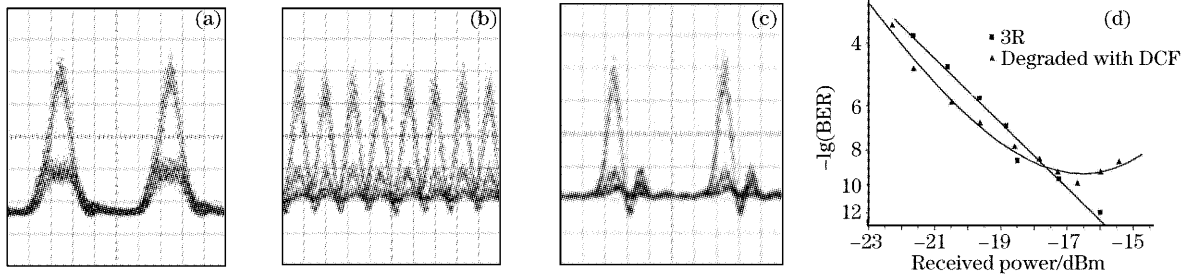


图 7 数据信号眼图(a),(b),(c)和误码特性曲线(d)

Fig. 7 The eye diagram of data signal (a), (b), (c) and BER characteristics (d)

据信号经色散补偿光纤后被剩余色散展宽,在图 5(b)中表现出相邻信号的底部相连,这样的信号解复用以后的眼图如图 7(a)所示,其零码明显上升、眼图睁开度变差,而图 7(c)所示的再生并解复用后的眼图有明显改善。图 7(d)为再生前后信号的误码测试曲线,它表明对于色散补偿光纤所致的剩余色散恶化信号,达不到无误码状态,而 3R 再生后的信号则达到了无误码。

4 结 论

本文提出了采用注入锁模光纤激光器进行时钟恢复、用电吸收调制器进行信号判决的新型全光 3R 再生器。它具有对输入信号抖动和功率波动不敏感及偏振不敏感、对数据信号无码型和速率透明的特点。运用该结构实现了 40 Gb/s 剩余色散恶化信号的全光 3R 再生,再生后的信号可达无误码。

参 考 文 献

- 1 Paul E, Green Jr., Frank J. *et al.*. WDM protocol-transparent distance extension using R2 remodulation[J]. *IEEE J. Areas Commun.*, 1996, **14**(5): 962~967
- 2 J. Nakagawa, M. E. Marhic, L. G. Kazovsky. All-optical 3R regeneration technique using injection-locking in gain-switched DFB-LD[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(4): 231~232
- 3 H. J. Thiele, A. D. Ellis, I. D. Phillips. Recirculating loop demonstration of 40 Gbit/s all-optical 3R data regeneration using a semiconductor nonlinear interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(3): 230~231
- 4 G. Raybon, Y. Su, J. Leuthold *et al.*. 40 Gbit/s Pseudo-linear transmission over one million kilometers [C]. *OFC/IOOC '02. Technical Digest*, 2002, Page(s): FD10/1~FD10/3 Anaheim, California
- 5 Tomohiro Otani, Tetsuya Miyazaki, Shu Yamamoto *et al.*. 40-Gb/s optical 3R regenerator using electroabsorption modulators for optical networks[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 195~200
- 6 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)
姜采云,王桐,霍力等. 10 Gbit/s 全光 3R 再生的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 27~29
- 7 Wang Zhaoxin, Wang Tong, Huo Li *et al.*. Clock recovery from degraded signal at 10, 20, 40 Gb/s data rates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1090~1093 (in Chinese)
王兆欣,王桐,霍力等. 10、20、40 Gb/s 速率下恶化信号的光时钟提取[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1090~1093
- 8 D. J. Kuizenga, A. E. Siegman. FM and AM mode locking of the homogeneous laser-part I: Theory [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1970, **16**(11): 694~708
- 9 Zhihong Li, Caiyun Lou, Yuhua Li *et al.*. Effect of tunable filter characteristics on the pulse performance of actively mode locked fiber lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11): 1462~1464