

非等幅 OTDM 信号的全光时钟提取*

尹丽娜 曹灼 刘国明 伍剑 林金桐

(北京邮电大学 55 信箱,北京 100876)

摘要 理论上推导了非等幅均匀复用的 OTDM 信号中时钟分量与各路脉冲幅度的关系式,并分别从频域和时域的角度给出了利用以半导体光放大器(SOA)作为调制器的锁模光纤激光器进行时钟提取的物理机制,对时钟提取的物理过程给出了形象解释. 实验上通过利用锁模光纤激光器成功地从非等幅均匀复用的 8×2.5 GHz OTDM 信号中提取了 2.5 GHz 单路时钟和 20 GHz 群路时钟光脉冲. 利用该方案提取的时钟脉冲稳定性好,对偏振态不敏感,是较理想的时钟源. 此技术可用于高速 OTDM 信号的时钟提取.

关键词 全光时钟提取;非等幅复用;注入锁模光纤激光器;半导体光放大器(SOA)

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

0 引言

光时分复用(Optical Time Division Multiplexing, OTDM)技术作为实现高速通信的可选方式之一越来越受到人们的重视. 时钟提取是 OTDM 系统的关键技术,它广泛地应用于解复用、地址识别、3R (retiming, reshaping, reamplification)再生等技术中. 在解复用和地址识别时,需要提取复用前的单路时钟或帧时钟;在 3R 再生中,则要用到群路时钟. 目前时钟提取方案主要有光电锁相环^[1]和全光时钟提取^[2,3]. 其中光电锁相环方案是较为成熟的一种方案,但系统复杂昂贵,且受“电子瓶颈”的制约. 而全光时钟提取方案以其高速的性能日益受到青睐. 基于注入锁模光纤激光器的全光时钟提取技术应运而生,它具有许多优点,如可靠性高、结构简单、并且在不同状态下可输出不同频率的时钟从而满足不同场合的应用需求.

国外一些研究小组利用锁模激光器实现了伪随机序列的群路时钟提取^[4,5]. 国内文献报导了将非均匀或非等幅复用的信号光注入锁模激光器实现了单路及群路时钟的提取^[6,7]. 文献[6]针对非均匀复用的 OTDM 信号进行了分析,给出了时钟分量与脉冲时偏的关系. 但关于非等幅复用的 OTDM 信号中时钟分量与各单路脉冲幅度的关系的理论分析尚未见诸报导.

本文分别从频域和时域的角度给出了利用以半导体光放大器(semiconductor optical amplifier-SOA)作为调制器的锁模激光器进行时钟提取的物理机制,从理论上推导了非等幅均匀复用的 OTDM 信号中时钟分量与各单路脉冲幅度的关系式. 实验上成功地从非等幅均匀复用的 8×2.5 GHz OTDM 信号

中提取出了 2.5 GHz 单路时钟和 20 GHz 群路时钟光脉冲.

1 理论分析

图 1(a)给出了利用 SOA 锁模光纤激光器进行时钟提取的示意图,主要器件包括:非线性调制器 SOA、延时线、滤波器、放大器、耦合器. 本文从频域和时域的角度分析了基于 SOA 锁模激光器进行时钟提取的物理机制,注入的信号光为非等幅均匀复用的 OTDM 信号,周期为 T_0 ,见图 1(b).

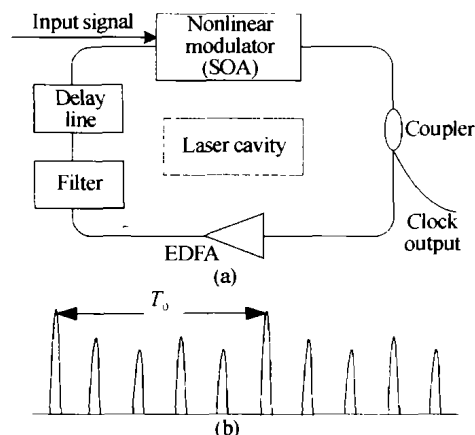


图 1 (a)利用 SOA 锁模光纤激光器进行时钟提取的示意图;(b)非等幅均匀复用的 OTDM 信号

Fig. 1 (a) Scheme of clock recovery based on SOA mode-locked fiber laser;(b) Unequal-amplitude even-multiplexed OTDM signals with period of T_0

1.1 频域

从频域角度来看,由于非等幅复用的光脉冲中包含了单路时钟和群路时钟的频率分量,在满足一定条件时就可以通过注入锁模光纤激光器提取出相应的单路或群路时钟脉冲.

周期为 T_0 的信号 $m(t)$ 可以表示为^[6]

$$m(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} m_k \exp(jk\omega_0 t) \quad (1)$$

式中

*国家自然科学基金资助项目

Tel:010-62282324-87 Email:yinlina_bupt@163.com

收稿日期:2004-03-09

$$m_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} m(t) \exp(-jk\omega_0 t) dt \quad (2)$$

$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T_0$ 为基频信号的频率.

间隔均匀非等幅复用的 OTDM 信号 $m(t)$ 可看作在周期 T_0 内有 p 个非等幅均匀分布的脉冲, 设 $f(t)$ 为单个脉冲的表达式, 则 $m(t)$ 为

$$m(t) = \sum_{n=0}^{p-1} f(t - nT_0/p) \quad (3)$$

式(2)的积分范围为一周期, 由于脉冲很窄, 故在积分范围内只需考虑 $0, 1, \dots, p-1$ 共 p 个脉冲, 式(3)可改写为

$$m(t) = \sum_{n=0}^{p-1} f(t - nT_0/p) \quad (4)$$

在只有 p 个脉冲即满足式(4)的情况下, 对式(2)积分范围 $[0, T_0]$ 以外进行积分, 其值接近于 0, 在此情况下可将式(2)的积分范围扩展到无穷大, 即

$$m_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} m(t) \exp(-jk\omega_0 t) dt = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{p-1} f(t - nT_0/p) \exp(-jk\omega_0 t) dt \quad (5)$$

设单个脉冲信号为高斯型, 它满足

$$f(t) = A \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \quad (6)$$

式中 A 为脉冲幅度参量, τ 为脉宽参量.

将式(6)代入式(5)得

$$m_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp\left[-\frac{(t - nT_0/p)^2}{\tau^2} - jk\omega_0 t\right] dt \quad (7)$$

令 $x = t - nT_0/p$, 则 $t = x + nT_0/p$, $dt = dx$, 代入式(7)得

$$m_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp\left[-\frac{x^2}{\tau^2} - jk\omega_0(x + nT_0/p)\right] dx =$$

$$\frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp\left[-\frac{x^2}{\tau^2} - j2\pi kx/T_0 - jk2\pi n/p\right] dx =$$

$$\frac{1}{T_0} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{x}{\tau} + j\pi k\tau/T_0\right)^2\right] dx \right] \exp\left[-(k\pi\tau/T_0)^2\right] \sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp(-jk2\pi n/p) = \frac{\sqrt{\pi}}{T_0} \exp\left[-(k\pi\tau/T_0)^2\right] \sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp(-jk2\pi n/p) \quad (8)$$

$$\sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp(-jk2\pi n/p) = \frac{\sqrt{\pi}}{T_0} \exp\left[-(k\pi\tau/T_0)^2\right] \sum_{n=0}^{p-1} A_n \exp(-jk2\pi n/p) \quad (8)$$

式(8)即为非等幅均匀复用的周期信号包含的时钟分量大小的表达式.

为清晰起见, 在式(8)中以 $p=8$ (信号光由 8 路脉冲非等幅复用而成) 为例, 研究信号光中包含的帧时钟和比特时钟分量的大小.

帧时钟即基频 ($k=1$) 时钟分量的幅度为

$$|m_1| = \frac{\sqrt{\pi}}{T_0} \exp\left[-(\pi\tau/T_0)^2\right] \left\{ [(A_0 - A_4) + \frac{\sqrt{2}}{2}(A_1 - A_3 - A_5 + A_7)]^2 + \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}(A_1 + A_3 - A_5 - A_7) - (A_2 - A_6)\right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (9)$$

比特时钟即 8 次谐波 ($k=8$) 时钟分量的幅度为

$$|m_8| = \frac{\sqrt{\pi}}{T_0} \exp\left[-(8\pi\tau/T_0)^2\right] (A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7) \quad (10)$$

由式(8)~(10)可以得出如下结论: ①非等幅均匀复用的信号中包含的时钟分量大小与信号周期 T_0 和脉冲宽度 τ 有关. 在 T_0 一定时, 脉宽越宽, 各谐波分量越小; ②非等幅均匀复用的信号中包含的时钟分量大小与各路脉冲的相对幅度有关, 为了获得较强的基频时钟分量, 应该根据式(9) (对于 $p=8$ 的情况) 适当增加各路脉冲的幅度差; 基频分量容易受到其它谐波时钟分量的影响, 因此提取单路时钟时, 腔内功率不宜过大; ③当 8 路脉冲完全等幅均匀复用即 $A_n = A$ ($n=0, 1, \dots, 7$) 时, 8 次谐波分量达到最大, 而其它低次谐波时钟分量包括基频时钟分量均为 0, 说明在此情况下只能提取群路时钟; ④考虑极限情况. 当复用信号中仅包含一路脉冲, 即 $A_0 = A, A_n = 0$ ($n=1, 2, \dots, 7$) 时, 基频时钟分量远大于其它谐波分量, 因此很容易实现基频时钟的提取.

根据式(8)~(10)知, 通过设计各支路信号以不同幅度复用, 可以得到较强的各次谐波时钟分量. 当用此信号光调制 SOA 光纤锁模激光器并满足锁模条件时, 便可以提取出相应频率的时钟脉冲.

1.2 时域

从时域角度来看, 非等幅复用的光信号注入 SOA 后, 通过 SOA 的非线性作用对腔内增益进行调制, SOA 的增益系数具有快速饱和、缓慢恢复的特性^[8,9], 它与 LiNbO₃ 的振幅调制不同.

非等幅均匀复用的 OTDM 信号 (图 2(a)) 注入 SOA 时, 腔内的增益变化如图 2(b) 所示. 幅度高的脉冲 (如脉冲 1) 注入 SOA 时, 腔内增益下降幅度较大, 经过恢复时间 T_0/q (q 为周期 T_0 内的脉冲数) 后的增益设为 G_1 , 而幅度低的脉冲 (如脉冲 4) 注入时, 腔内增益下降较小, 经过相同的恢复时间 T_0/q 后的增益设为 G_2 , G_2 必然高于 G_1 , 即对应较高的腔内增益. 由锁模机理知道, 只有当腔内增益 G 大于损耗时锁模激光器才能形成振荡. 为了提取单路时钟, 在腔长满足谐振条件的情况下, 需要控制腔内增益不宜过大 (见图 2(b) 中增益曲线 II), 仅使与较高增益峰值对应的一路脉冲能够抵消掉腔内损耗而形成振荡, 而其它路脉冲由于损耗较大而逐渐消失, 从而提取出单路时钟 (图 2(c)). 实验也证明了腔内增益过大会引起其它谐波干扰. 当提取群路时钟时, 在腔长与调制频率匹配的情况下 (不考虑有理谐波锁模), 只需各增益峰值均高于腔损耗 (见图 2(b) 中增益曲线 I), 即可提取出群路时钟脉冲 (图 2(d)). 如果将完全等幅复用的 OTDM 信号注入

SOA, 由于各路脉冲对增益峰值影响相同, 提取的群路时钟必然为等幅脉冲; 当伪随机序列信号 (尤其是长连“0”信号) 注入时, 则由于 SOA 的增益特性将会出现码型效应^[4,5].

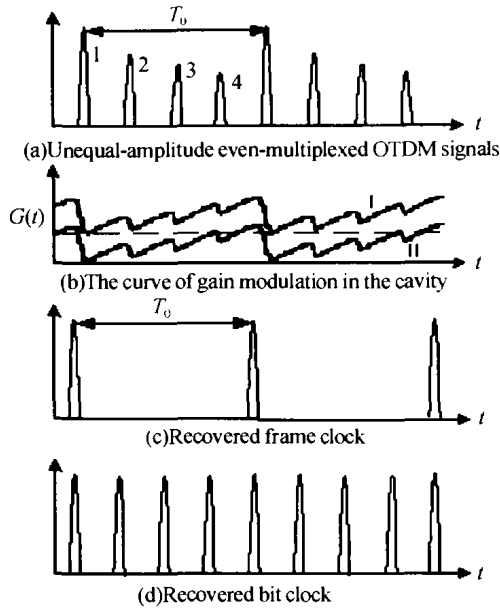


图 2 非等幅均匀复用 OTDM 信号的时钟提取机理
Fig. 2 Mechanism of clock recovery from unequal-amplitude even-multiplexed OTDM signals

2 实验方案及结果

实验装置如图 3. 信号光通过如下方式产生: 从 2.5 GHz 增益开关 DFB 激光器输出的脉冲经过色散补偿光纤 (dispersion compensation fiber-DCF) 和梳状色散光纤 (comb-like dispersion profiled fiber-CDPF) 进行线性和非线性压缩, 压窄后的脉冲进入时分复用器, 通过调节各路脉冲的损耗和相对位置可以获得非等幅均匀复用的 8×2.5 GHz 信号光. 复用后的信号经掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier-EDFA) 放大从而达到足够的功率来调

制 SOA. 时钟提取光路见图 3 中环路部分. 信号光通过环形器逆时针注入 SOA 中, 使其产生交叉增益调制 (cross gain modulation-XGM) 效应, 对环形腔的增益进行调制. 由于 SOA 与偏振态有关 (1 dB), 加入两个偏振控制器 (polarization controller-PC) 用于调节信号光脉冲和时钟脉冲均与 SOA 的偏振态达到最佳匹配. 激光器中的 EDFA 用于补偿腔内损耗, 可调谐滤波器用于选择输出时钟脉冲的波长, 光延时线用于调节腔长从而实现时钟脉冲的提取, 90:10 耦合器用于输出时钟脉冲.

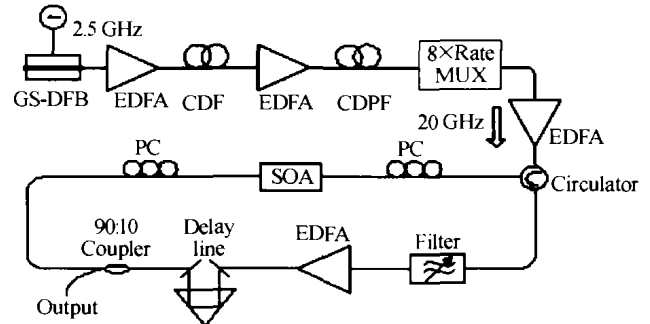


图 3 全光时钟提取的实验装置图
Fig. 3 Experimental setup for all-optical clock recovery

调节延时线使激光器的腔长与调制频率相匹配, 从而满足锁模条件提取出相应频率的时钟脉冲. 通过调节 PC 和腔增益 (改变 EDFA 的泵浦功率和 SOA 的偏置电流) 来得到理想的时钟脉冲. 实验发现调节 PC 对输出脉冲基本无影响, 说明 SOA 的增益对偏振的敏感性很低, 因而周围环境引起的光偏振扰动对提取的时钟脉冲质量影响很小, 这为方案的实用化奠定了基础. 另外需要指出的是, 当提取单路时钟时, 腔内增益不宜过大, 以避免高次谐波分量的干扰, 使时钟脉冲质量恶化, 这与理论分析是一致的. 该现象与文献 [7] 中提到的由于 2.5 GHz 调制分量不足而出现噪声信号干扰的现象类似.

实验结果如图 4. 图 4(a) 为非等幅均匀复用的

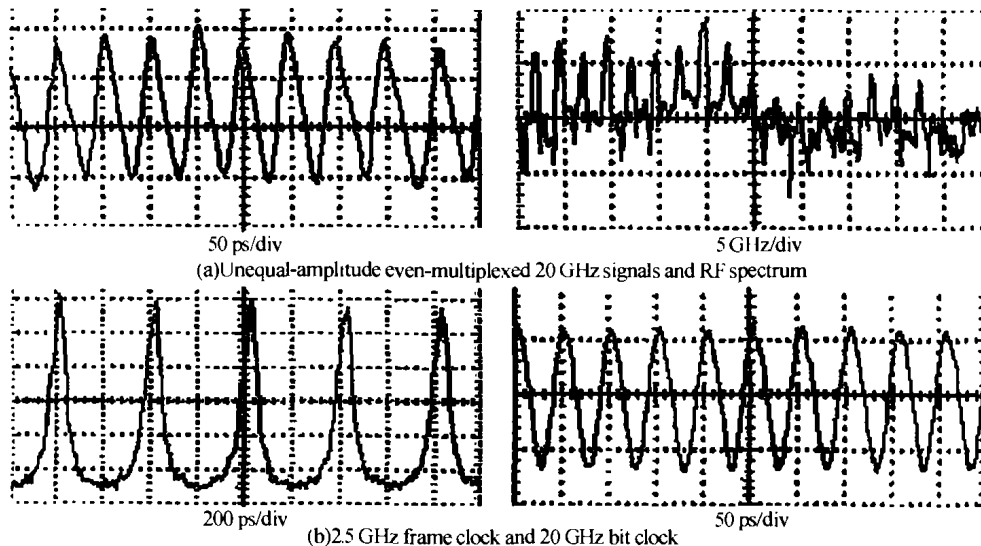


图 4 实验结果
Fig. 4 Experimental results

20 GHz 信号光和相应的时钟频谱分量,可以看出 2.5 GHz 和 20 GHz 的时钟分量都很强,从而为单路时钟和群路时钟的提取提供了条件;图 4(b)为提取的 2.5 GHz 单路时钟和 20 GHz 群路时钟. 利用 SOA 注入锁模激光器提取的时钟脉冲抖动小,基本无超模噪声(脉冲顶部清晰),可持续稳定工作时间超过 2 hour 小时以上(受实验时间限制),是较理想的时钟源.

3 结论

本文从理论上推导了非等幅均匀复用的 OTDM 信号中时钟分量与各路脉冲幅度的关系式,给出了利用 SOA 锁模激光器对非等幅复用的 OTDM 信号进行时钟提取的物理机制. 实验上实现了非等幅均匀复用信号的单路时钟和群路时钟的提取. 利用该方案提取的时钟脉冲质量高、稳定性好、波长可调谐;该方案完全由商用器件构成,容易实现,并且适用于高速 OTDM 信号的时钟提取;SOA 注入锁模激光器对偏振态不敏感的特性为该方案的进一步实用化创造了条件.

参考文献

- 1 高以智, 娄采云, 姚敏玉, 等. 用光电振荡器提取帧时钟实现 4×10 Gb/s OTDM 信号 165 km 传输. 光子学报, 2002, **31**(1): 30 ~ 32
Gao Y Z, Lou C Y, Yao M Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 30 ~ 32
- 2 王桐, 李智红, 娄采云, 等. 一种减少基于 SOA 的全光时钟提取码型效应的新方法. 光子学报, 2002, **31**(2): 173

~ 177

- Wang T, Li Z H, Lou C Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 173 ~ 177
- 3 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. 光子学报, 2003, **32**(9): 1090 ~ 1093
Wang Z X, Wang T, Huo L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1090 ~ 1093
 - 4 Patrick D M, Manning R J. 20 Gbit/s all-optical clock recovery using semiconductor nonlinearity. *Electron Lett*, 1994, **30**(2): 151 ~ 152
 - 5 Vlachos K, Theophilopoulos G, Hatziefremidis A, et al. 30Gb/s all-optical clock recovery circuit. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, **12**(6): 705 ~ 707
 - 6 戴居丰, 于晋龙, 马晓红, 等. 从非均匀分布的信号脉冲中提取基频时钟脉冲. 中国激光, 2001, **A28**(1): 67 ~ 70
Dai J F, Yu J L, Ma X H, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(1): 67 ~ 70
 - 7 宋立军, 李世忱, 葛春风, 等. 脉幅有序变化 OTDM 信号的支路及群路全光时钟提取. 中国激光, 2001, **A28**(11): 1010 ~ 1012
Song L J, Li S C, Ge C F, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(11): 1010 ~ 1012
 - 8 Zoiros K, Stathopoulos T, Vlachos K, et al. Experimental and theoretical studies of high repetition rate fiber laser, mode-locked by external optical modulation. *Opt Commu*, 2000, **180**: 301 ~ 315
 - 9 Eiselt M, Pieper W, Weber H G. SLALOM: semiconductor laser amplifier in a loop mirror. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(10): 2099 ~ 2111

All-optical Clock Recovery From Unequal-amplitude Multiplexed OTDM Signals

Yin Lina, Cao Zhuo, Liu Guoming, Wu Jian, Lin Jintong

P. O. Box 66, Optical Communication Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Received date: 2004-03-09

Abstract A theoretical analysis is given about the relationship between clock frequency components and pulse amplitude for unequal-amplitude even-multiplexed OTDM (Optical Time Division Multiplexing) signals, and physical mechanism of clock recovery based on SOA (Semiconductor Optical Amplifier) mode-locked fiber laser is demonstrated from the point of time domain and frequency domain respectively. In experiment, 2.5 GHz frame clock and 20 GHz bit clock are extracted from unequal-amplitude even-multiplexed 8×2.5 GHz signals by using SOA mode-locked fiber laser. The extracted clock pulses have several desirable features such as low timing jitter, broad wavelength tuning range and polarization independence. This technique can be applied to clock recovery in high-speed OTDM network.

Keywords All-optical clock recovery; Unequal-amplitude multiplexing; Injection mode-locked fiber laser; Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

Yin Lina was born in 1976 in Hebei. She received her M. S. degree in the Institute of Laser Engineering in Beijing University of Technology, Beijing, China, in 2002. Currently she is a Ph. D. candidate of Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT), and mainly working on all-optical clock recovery and other optical signal processing technologies in optical time division multiplexing (OTDM) network.