

# 光时分复用系统中单路时钟的提取\*

马晓红 于晋龙 王 林 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院, 教育部光电信息技术科学开放实验室, 天津 300072)

**摘 要** 提出利用复用信号的时间不均匀性, 采用主动光纤锁模激光器, 直接从复用后的信号中提取出复用前的时钟光脉冲。考虑到电的时分复用与光的时分复用在机理上的一致性, 故初步用电时分复用信号进行实验, 成功地从时分复用信号中得到了复用前的时钟光脉冲<sup>[1]</sup>。此处电的时分复用所得的结论适用于光的时分复用。

**关键词** 光时分复用, 时钟提取, 光纤主动锁模激光器。

## 1 引 言

目前, 超高速光纤通信技术发展日渐深入, 高速光时分复用(OTDM)作为高速光通信的可选方式之一, 其研究日益受到重视。采用光时分复用技术, 可大大提高单光路的通信容量, 并且对掺铒光纤放大器增益平坦性没有要求。未来的高速光纤通信系统, 极有可能是光时分复用/波分复用(OTDM/WDM)系统<sup>[2-5]</sup>。在光时分复用系统中, 复用技术已达到 400 Gb/s 脉冲信号<sup>[6]</sup>, 解复用技术利用光的四波混频技术也达到了 500 Gb/s 的水平<sup>[7]</sup>。相对而言, 研究一种简单可靠、经济的全光时钟提取技术成为光时分复用技术中一个亟待解决的问题。

全光时钟提取是指采用光学的办法从光脉冲信号中提取出低抖动的同步时钟脉冲, 供光时分复用系统中解复用及信道选择等用。实现全光时钟提取的优点在于突破电子瓶颈的限制, 大大提高通信速率。现已报导的光时钟提取方案有: 光电锁相环(PLL)时钟提取, 锁模激光器时钟提取, 非线性环型镜腔时钟提取等。每种方案都有其优点和不足, 需要进一步探索。

本文提出一个新的全光时钟提取方案; 用复用信号去驱动主动锁模光纤环形激光器中的调制器件, 得到复用前的单路时钟光脉冲。

## 2 设想及分析

由光时分复用的复用方式, 决定了复用光脉冲非严格等间隔和非等幅度。采用这样的光脉冲信号作为调制信号注入到主动光纤锁模激光器后, 就有可能提取到复用前的光时钟脉冲。

设想的实验装置如图 1 所示: SOA 是半导体行波放大器, OBF 是光带通滤波器, PC 是偏振控制器。复用后的光信号注入到半导体行波放大器作为调制光信号。可变光延时器用于

\* 国家自然科学基金(69807002)资助项目。

收稿日期: 1998-11-17; 收到修改稿日期: 1999-02-08

调节环形腔长度，以保证环腔谐振频率与入射光脉冲的重复频率相匹配。不失一般性，考虑一个两路复用的光时分复用系统。设复用前的码元周期为  $T_0$ ，由于复用器延时不可能严格为  $T_0/2$ ，复用后的信号脉冲间隔不等，其中一路码元与理想时间有一误差  $\Delta t$ 。

从频域角度理解，这样的信号包含了较强的分路时钟的频率分量。在条件适合的情况下，通过光纤环锁模激光器就可以得到分路时钟频率的光时钟脉冲。

从时域角度看可以更好地理解。复用后的信号注入半导体行波放大器，通过半导体行波放大器的非线性作用，对腔内增益起调制作用，腔内增益的变化如图 2(a) 所示；当由环形腔长度所决定的光脉冲环行一周的时延为  $T' = (n + 1/2)T_0 + \Delta t$  时，环行一周后到达半导体行波放大器的时序如图 2(b) 所示。当信号脉冲与调制脉冲“开”相重叠时，信号脉冲得到增益，形成锁模输出。而与调制脉冲的“关”相重叠时，信号脉冲受到较大损耗，无法形成锁模输出。比较调制脉冲和到达信号的时序，最终得到的是复用前的时钟光脉冲，正如图 2(c) 所示。

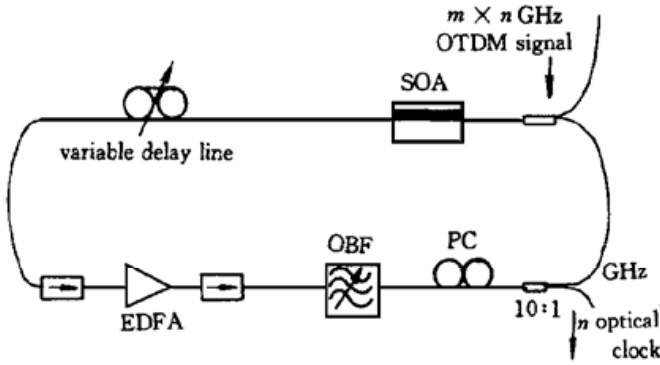


Fig. 1 Experiment set-up of all-optical clock recovery

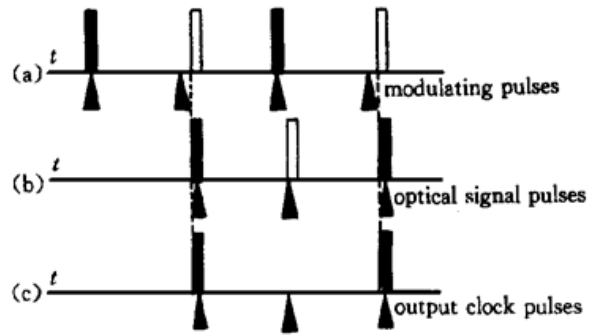


Fig. 2 The scheme of the principle of clock recovery

以上只是定性的说明，实际系统中还要考虑到其他的因素，如：插入偏差  $\Delta t$  的大小对时钟提取的影响等。假设注入锁模激光器腔中光脉冲波形为高斯型曲线，由于此光脉冲作用于半导体行波放大器中起调制作用，所以腔内增益  $G$  也为高斯函数，在一个码元周期内随时间变化的表达式可写作

$$G(t) = G_0 \exp [ - (t/\tau)^2 ], \quad ( - T_0/2 < t < T_0/2 ) \tag{1}$$

式中， $G_0$  为调制器处于最大‘开启’状态时腔内的增益， $\tau$  为调制脉冲降至峰值功率的  $1/e$  时的脉冲半宽， $T_0$  是一个码元周期。从锁模的机理可以知道：只有当  $G > 1$  时，锁模才可能实现。两路速率为  $f_0$  的信号，采用不等间隔插入办法合成速率近似为  $2f_0$  的高速信号。用此信号注入锁模激光器，正如在前面提到的，由于调制脉冲的非等间隔，当一路光信号脉冲与调制脉冲中心对准时，另外一路光信号脉冲就会与调制脉冲中心偏离。当这个偏差使这路脉冲的腔内增益都小于 1 时，光脉冲逐步消失此时锁模激光器的输出就是频率为  $f_0$  的时钟脉冲。

因此，分路时钟提取要求光脉冲信号插入的偏差  $\Delta t$  必须满足  $G(t + \Delta t) < 1$  的条件，才能保证从复用后的信号中提取出原时钟信号，如图 3 所示。设  $t = 0$ ，从(1)式可得

$$G(\Delta t) = G_0 \exp [ - (2\Delta t/\tau)^2 ] < 1 \tag{2}$$

由此得到

$$| \Delta t | / \tau > \sqrt{ \ln G_0 / 2 } \tag{3}$$

设  $R$  为信号的占空比，周期为  $T_0$  的高斯脉冲序列有  $\tau = T_{FWHM} / 3.33 = T_0 R / 3.33$ 。则上式可改写成

$$|\Delta t|/T_0 > R \sqrt{\ln G_0}/3.33 \quad (4)$$

从(4)式可以看出, 时间偏差与复用前信号周期的比值与环行腔的最大增益和光脉冲信号占空比有关, 而与信号速率无关。一般来讲, 为了得到较窄的光脉冲输出, 增益不能取得太大; 但过小的增益会导致激光器工作状态对外部条件极为敏感, 不利于激光器的稳定。本工作取  $G_0 < 2$ 。对于高速光时分复用系统, 由于多采用孤子传输的方式, 其占空比应小于 1/5。当腔内最大增益和信号占空比确定后, 插入时间的偏差和复用前光信号周期的比值的下限也确定了。此时速率越高, 周期  $T_0$  越小, 要求的偏差  $\Delta t$  也越小, 而其比值保持不变。时间偏差在不同的腔内增益和占空比的条件下随速率变化的曲线如图 4 和图 5 所示。图 6 和图 7 表示的是在不同的占空比和增益条件下, 时间偏差和重复周期比值的变化曲线。所以, 通过改变腔内增益来配合不同的时间偏差。

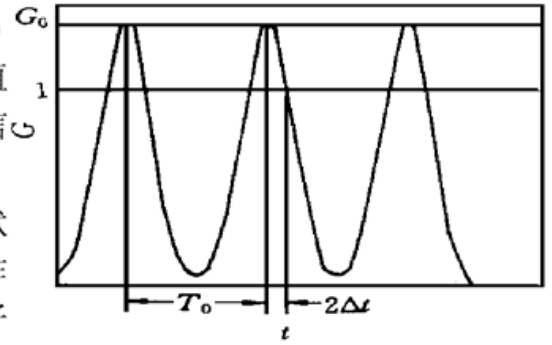


Fig. 3 Gain in the cavity versus time

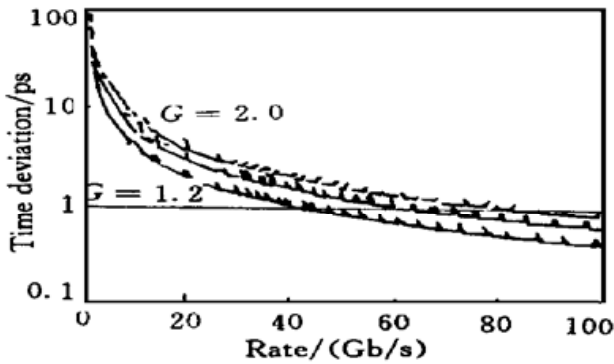


Fig. 4 Time deviation versus the rate for different gain values

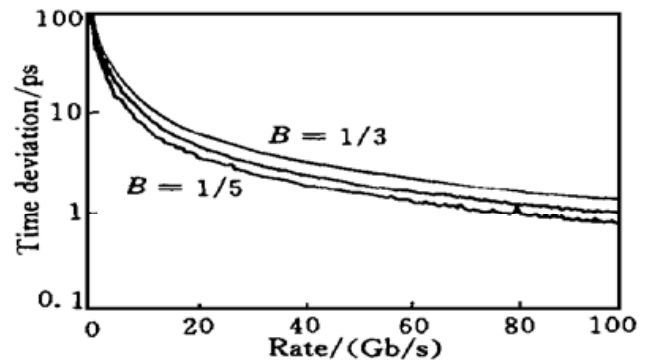


Fig. 5 Time deviation versus the rate for different duty cycles

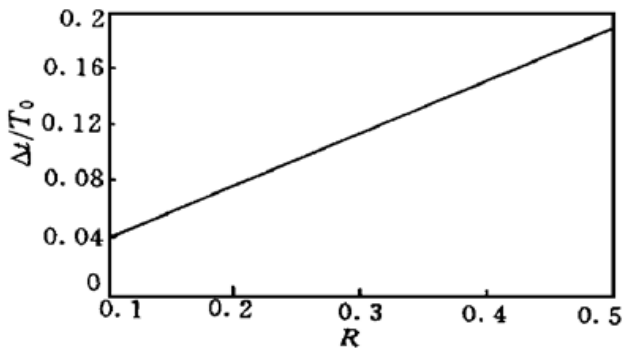


Fig. 6 Ratio of time deviation  $\Delta t$  and period  $T_0$  versus duty cycle  $R$

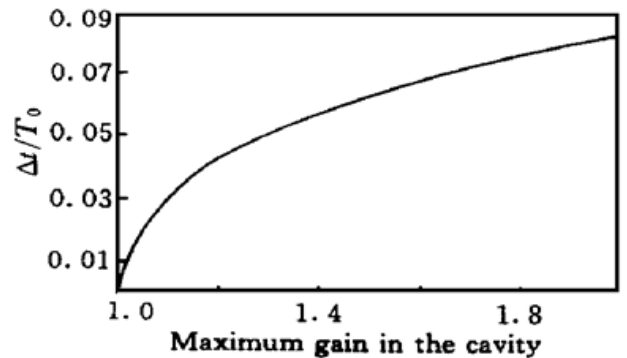


Fig. 7 Ratio of time deviation  $\Delta t$  and period  $T_0$  versus the maximum gain in the cavity

以一个 40 Gb/s 的系统为例: 假使其占空比为 1/3, 腔内最大增益为 1.5。从(4)式可计算得到

$$|\Delta t|/T_0 > 0.063 \quad (5)$$

此时间偏差相当于信号重复周期的 6.3%, 对应的时间差  $\Delta t > 1.53$  ps。同样, 对于一个更高速率的通信系统, 如 100 Gb/s, 经过同样计算可知对应的时间差  $\Delta t > 0.63$  ps。其与信号重复速率的比仍为 6.3%。

从上面的计算可以看出, 由于要求的插入时间偏差与重复周期成一比例关系, 所以不等间距插入引入的时间偏差不会限制光时分复用系统的通信速率。

### 3 原理实验

由于实验条件的限制(没有半导体行波放大器), 我们利用现有条件对上述设想进行了实验验证。实验装置如图 8 所示。

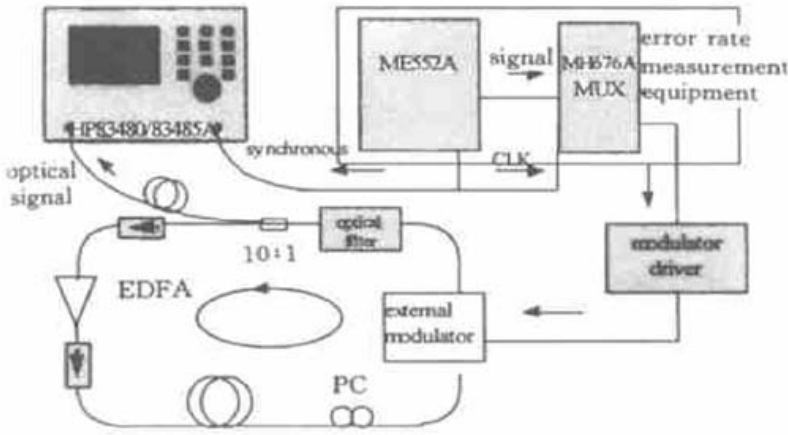


Fig. 8 The schematic of clock recovery experiment

实验中, 由掺铒光纤放大器、电光调制器、偏振控制器、传输光纤、光滤波器及隔离器等元件组成一个典型的锁模光纤环形激光器。其基频为 7.97 MHz。实验中电光调制器的驱动脉冲来自误码仪 ME522A 输出的电时钟脉冲, 在 10 MHz~ 1.4 GHz 范围内可调, 700 MHz 以上信号是采用时延法由两路信号合成得到的。最小改变步长为 1 kHz (当  $f < 700$  MHz 时) 或 2 kHz (当  $f > 700$  MHz 时)。光纤环形腔内光脉冲产生起源于光放大器噪声, 经掺铒光纤放大器的放大即调制器的开关作用而形成光脉冲。因环形腔的腔长是固定的, 故通过改变驱动信号频率与腔长匹配, 达到锁模的目的。得到的光脉冲经耦合器输出到示波器和光谱仪, 进行测量。图中, 时分复用信号采用的是电时分复用, 这部分功能由误码仪中的复用器本身来实现。由于时分复用这种形式本身就不可能保证插入的码元在理想位置上, 即脉冲是非等间隔的。电时分复用信号作用于电光调制器相当于原设想的光时分复用光脉冲作用于半导体行波放大器起调制作用。

通过实验, 得到了重复频率为复用前信号频率的锁模光脉冲。图 9 是实验结果, 上面的脉冲序列是锁模后得到的光脉冲信号, 下面是电光调制器驱动器输出的电信号, 该电信号是由两路信号时分复用而成的。当光纤环形锁模激光器的腔长相当于基频的奇数倍时[如图 9(a) 中, 调制频率为 1.37868 GHz, 是基频的 173 倍], 可以直接得到复用前频率的时钟光脉冲(本实验中得到了 689.340 MHz 的时钟光脉冲)。为了比较, 在图 9(b) 中也给出了相邻纵模的锁模结果, 即当调制频率变为 1.37071 GHz 时, 锁模激光器输出与电驱动脉冲频率相同。此时的调制频率约为环形腔基频的 172 倍。图 10 是分频输出时的光谱结构。在 700 MHz ~ 1.4 GHz 的范围内改变调制频率, 观察到图 10 所示的两种情况稳定地交替出现, 说明锁模分频现象不是偶然的。在整个实验中, 光调制器的直流偏置和调制脉冲强度始终保证了其工

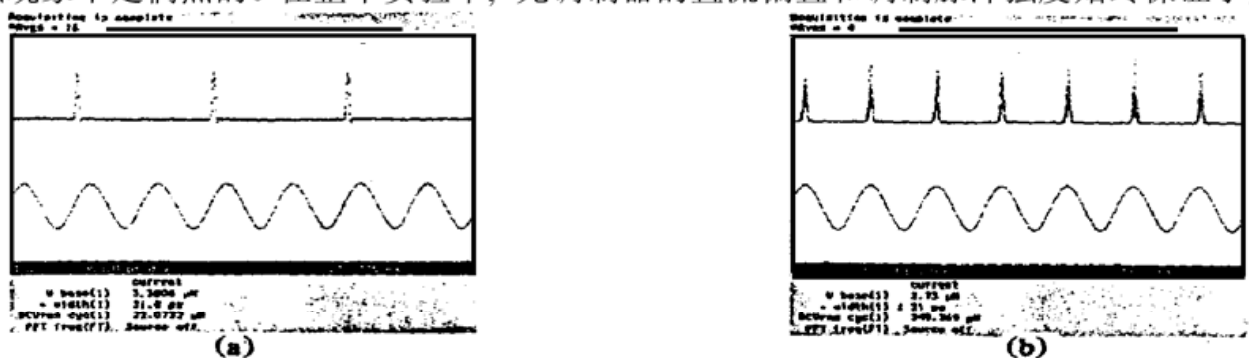


Fig. 9 The output of optical pulses of mode-locked fiber ring laser in different conditions

作在线性范围内。在实验中也发现,除了腔长对系统影响较大外,腔内损耗对能否得到二分频的时钟脉冲也至关重要。这些都验证了本文提出的时钟提取方案的可行性。

**结 论** 提出了一种从光时分复用信号中直接提取复用前时钟脉冲的方案。在此基础上,进行了原理性验证实验,成功地从 2 路时分复用信号中得到复用前信号重复频率的时钟光脉冲。

天津光纤联合公司(总工程师蔺柏平)无偿提供了实验用的掺铒光纤放大器,特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] 于晋龙, 马晓红, 王 林等. 主动锁模光纤激光器有理数谐波锁模与重复频率的分频现象. 光电子·激光, 1999, **10**(1): 1~ 4
- [2] Kawanishi S, Takara H, Uchiyama K *et al.*. 1.4 Tbit/s(200 Gbit/s(7 channel WDM) 50 km optical transmission experiment. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(20): 1716~ 1717
- [3] Morioka T, Takara H, Kawanishi S *et al.*. 1-Tbit/s(100 Gbit/s(10 channel) OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(10): 906~ 907
- [4] Morioka T, Kawanishi S *et al.*. 100 Gbit/s(4 ch, 100 km repeatless TDM-WDM transmission using a single supercontinuum source. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5): 468~ 470
- [5] Mirakami M, Suzuki K I, Kaeai S *et al.*. 80 Gbit/s-1200 km, 40 Gbit/s-base WDM transmission experiment using RZ pulse form. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9): 789~ 791
- [6] Kawanishi S, Takara H, Moriok T *et al.*. Single channel 400 Gb/s time-division-multiplexed transmission of 0.98 ps pulses over 40 km employing dispersion slope compensation. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(10): 916~ 918
- [7] Morioka T, Takara H, Kawanishi S *et al.*. Error-free 500 Gbit/s all-optical demultiplexing using low-noise, low-jitter supercontinuum short pulse. *Electon. Lett.*, 1996, **32**(9): 833~ 834

## Clock Recovery of Single Channel in OTDM System

Ma Xiaohong Yu Jinlong Wang Lin Yang Enze

(The College of Electronics and Information Engineering of Tianjin University,

Optoelectronics Information Science and Technology Laboratory, Ministry of Education, Tianjin 300072)

(Received 17 November 1998; revised 8 February 1998)

**Abstract** A scheme of using a mode-locked fiber ring laser and taking the advantage of the time unevenness of the multiplexed signal to obtain the clock of the single channel from the optical time division multiplexing (OTDM) signal is proposed. In experiment, the electronic time division multiplexing (TDM) signal is used because it is identical with OTDM signal in principle. The optical clock of the single channel is obtained successfully using the electronic multiplexed signal. The result can be applied in all-optical clock recovery of the OTDM system.

**Key words** optical time division multiplexing, clock recovery, active mode-locked fiber ring laser.

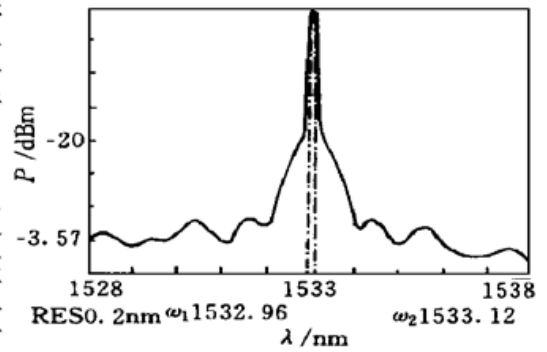


Fig. 10 The spectrum of the clock output of the single channel