

文章编号: 0258-7025(2001)01-0067-04

从非均匀分布的信号脉冲中提取 基频时钟脉冲*

戴居丰 于晋龙 马晓红 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 提出从接收到的光信号脉冲串中提取光基频时钟的方案。此方案的要点是:首先在光脉冲的复用过程中人为地使复用后相邻码的时间间隔不相等,即复用为非均匀码。其次,在接收端利用光纤环形锁模激光器提取与复用前原信号同频率的时钟脉冲。实验的初步结果及理论分析表明所提出的时钟提取方案是可行的。

关键词 光通信, 光时分复用, 时钟提取, 光纤环形锁模激光器

中图分类号: TN 929.11 文献标识码: A

Base-frequency Clock Recovery from Non-uniform Optical Signal Pulses

DAI Ju-feng YU Jin-long MA Xiao-hong YANG En-ze

(The College of Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072)

Abstract A novel all-optical scheme for extracting clock pulses with basic frequency from the receiving non-uniform OTDM optical signal is proposed. The key point is: in the OTDM signal, the space between two pulses is made unequally by artificial means. At the receiver side the base-frequency pulses can be obtained when such signal injects into a mode-locked fiber laser. The feasibility of this scheme is proved by experiment.

Key words optical fiber communication (OTDM), optical time division multiplexing, clock extraction, optical fiber ring type mode-locked laser

1 引言

在信息大爆炸的今天,人们对高速通信系统的需求日益迫切。光时分复用(OTDM)作为高速通信的可选方式之一,其研究日益受到重视。采用OTDM技术,可大大提高单路通信速率。同波分复用(WDM)系统相比,OTDM对光信号源的波长精确度及稳定性无苛刻要求。在一些对信息时延差别有要求的应用场合,如计算机局域网,OTDM有WDM不可取代的作用。未来的高速光纤通信系统,极有可能是OTDM+WDM的通信方式。近两年有代表性的实验报道有1.4 Tbit/s(200 Gbit/s OTDM 7 channel WDM)传输 $50 \text{ km}^{[1]}$, 1.0 Tbit/s(100 Gbit/s OTDM 10 channel WDM)传输 $40 \text{ km}^{[2]}$, 100

Gbit/s 4 ch 100 km 无中继^[3], 80 Gbit/s(402 ch)传输 $1200 \text{ km}^{[4]}$ 等。但OTDM的商用化还有一些问题有待解决。

在OTDM系统中,复用光源已可得到单路400的脉冲信号^[5],解复用技术利用光纤的四波混频(FWM)也达到了500 Gbit/s的水平^[6]。相对而言,现有的时钟提取采用的光电锁相环技术(PLL)复杂、成本高,极大地抵消了OTDM的优势。发展一种简捷、可靠、经济的全光时钟提取技术变成了OTDM技术的一个急待解决的关键问题。全光时钟恢复是指采用光学办法从归零码光脉冲信号中提取低抖动($< 1 \text{ ps}$)的复用前的分路同步时钟信号,以供OTDM系统中的解复用、路由选择、信道选择等使用。其优点在于可绕过“电子瓶颈”,大大提高通信速率。近年来,陆续有多种全光时钟提取技术的报道,但在可靠性和实用性上还存在一些问题,一时还无法取代光电锁相环(PLL)时钟提取技

* 国家自然科学基金(69807002)资助项目。

收稿日期: 2000-04-21; 收到修改稿日期: 2000-08-03

术。近年一些关于高速 OTDM 系统的时钟提取技术的报道主要有以下几种 (1) PLL 时钟提取,该方案是目前大多数高速 OTDM 系统所采用的时钟提取方案^[7],该方案比较成熟,可直接得到复用前的基频时钟信号。但缺点是系统过于复杂、昂贵。高频器件的存在一定程度上限制了系统性能的提高。(2) 锁模激光器时钟提取方案,它可以算得上真正的全光时钟提取方案,克服了电子瓶颈,是非常有前途的一种时钟提取技术^[8,9]。该方案的优点是简单、经济,但其稳定性需要进一步改善。另一个较为严重的问题是提取的时钟都是复用后的时钟频率。要想得到复用前的原始时钟,还必须采用电处理。这样,全光处理的优势便丧失殆尽。所以,必须发展一种能直接从干线信号中提取原始时钟的全光时钟提取技术。(3) 利用注入锁模半导体激光器(JMLLD)的全光时钟提取和解复用方案^[10]这个方案可能是所有时钟提取方案中使用器件最少的一种:信号直接注入锁模半导体激光器,其输出脉冲复用前的原始时钟信号。其工作原理还有待于进一步讨论,但由于 JMLLD 的腔长只能在制作中控制,加之腔长短,折射率高。在生产使用中,其腔长的稳定性是一个棘手的问题。

另外还有采用 NOLM 对时钟信号进行二分频的报道^[11],该技术也有可能用于提取分路时钟。

1997 年底,我们利用复用后的电脉冲进行了光纤环形锁模激光器的实验^[12,13],发现从非均匀的复用脉冲中可以提取复用前的基频信号脉冲,遂意识到对于光脉冲也能得到同样的结果而提出图 1 所示的方案。此方案的特点是结构简单,易于实现。实验的初步结果说明我们的方案是可行的,在非均匀的复用光脉冲中可以提取基频光脉冲,而且

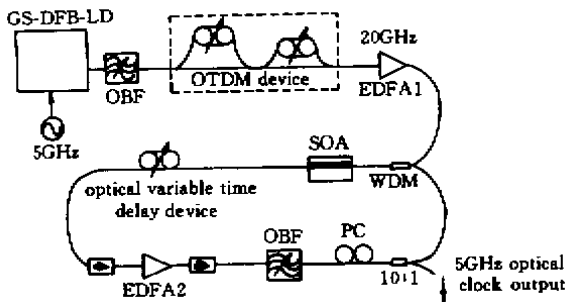


图 1 基频时钟提取系统方框图

OBF:光带通滤波器;SOA:半导体激光放大器;PC:偏振控制器;
ISO:光隔离器;ODL:光延时器;MUX:光复用器;GS-DFB LD:增益开关半导体激光器;WDM:波分复用耦合器

Fig.1 Sketch diagram of the clock extraction system

对非均匀性的要求很低,脉冲间隔的偏差约为 10% 已能很好地提取基频脉冲。

2 理论分析

理论分析说明在复用后的非均匀脉冲中存在着基频分量,即复用前的信号脉冲。

一周期为 T_0 的周期信号 $m(t)$ 可以用下列集合式来表示

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

其中

$$m_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} m(t) \exp(-jk\omega_0 t) dt, \quad k = 0 \quad (2)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi/T_0$$

f_0 为基频信号的频率。

我们所要讨论的周期信号 $m(t)$ 是在周期 T_0 内有 p 个非均匀分布的脉冲。令 $f(t)$ 表征单个脉冲的函数,则信号 $m(t)$ 应为

$$m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[t + (n + \Delta_n)T_0/p] \quad (3)$$

式中 $\Delta_n T_0/p$ 为第 n 个脉冲的时间偏移, $\Delta_n \ll 1$, 见图 2。

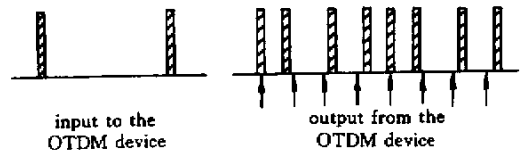


图 2 非均匀分布脉冲

Fig.2 Uneven allocation pulses

在式(2)中的积分范围为一周期,为处理方便,将积分周期改为 $-T_0/8$ 到 $T_0/8$ 。假定 $p = 4$,在此积分范围内,由于脉冲很窄,故仅须考虑第 0, 1, 2, 3 共 4 个脉冲。因此式(3)可改写成

$$m(t) = \sum_{n=0}^3 f[t + (n + \Delta_n)T_0/4] \quad (4)$$

此外在只有 4 个脉冲的情况下,如对上述的积分范围 $-T_0/8$ 到 $T_0/8$ 以外进行积分,则其值接近于零。故可将式(2)的积分范围延伸到无穷大,即

$$m_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} m(t) \exp(-jk\omega_0 t) dt \quad (5)$$

现设单个脉冲信号为高斯形,即

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

其中 A 为脉冲幅度参数, σ 为脉宽参数, 其与脉冲半高全宽 Δt 的关系为

$$\Delta t = 2\sqrt{\sigma} \sqrt{2\ln 2} \quad (7)$$

如果取 $\sigma = \frac{4}{100} T_0$

则 $\Delta t = 0.09419 T_0$

即脉宽约为基频信号码元时间的 $1/100$ 。正如上面所假设的, 这样窄的脉冲使在积分范围 $-T_0/8 \sim T_0/8$ 以外的积分值接近于零。计算机的数值计算证明此结论的正确性。将式 (6) 代入式 (5) 得

$$m_k = \frac{A}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^3 \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[t - (n + \Delta_n)T_0/4]^2}{2\sigma^2} - jk\omega_0 t\right\} dt \quad (8)$$

令 $x = \frac{t - (n + \Delta_n)T_0/4}{\sigma\sqrt{2}}$

及 $\sigma = aT_0$

则式 (8) 变成

$$m_k = \frac{A}{T_0 \sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-(x^2 + jk2\sqrt{2}\pi ax)] \cdot \sum_{n=0}^3 \exp[-jk2\pi(n + \Delta_n)/4] dx = \frac{A}{T_0} \sum_{n=0}^3 \exp[-\chi k a \pi \chi] \cdot \exp[-jk(n + \Delta_n)\pi/2] \quad (9)$$

我们所关心的是基频脉冲的幅度, 即 $k = 1$ 时的 m_k , 在上面所述 $a = 0.04$ 的情况下,

$$\begin{aligned} \exp[-\chi a \pi \chi] &= 0.9689 \\ \sum_{n=0}^3 \exp\left[-j(n + \Delta_n)\frac{\pi}{2}\right] &= \\ \sum_{n=0}^3 \exp\left(-jn\frac{\pi}{2}\right) \exp\left(-j\Delta_n\frac{\pi}{2}\right) &= \\ \sum_{n=0}^3 (-j)^n \left[1 - j\Delta_n\frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\left(\Delta_n\frac{\pi}{2}\right)^2 + \dots\right] &= \\ \frac{\pi}{2} \left(-\Delta_1 + j\frac{\pi}{4}\Delta_1^2 + j\Delta_2 + \frac{\pi}{4}\Delta_2^2 + \dots\right) &= \\ \Delta_3 - j\frac{\pi}{4}\Delta_3^2 + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

将以上数值及关系式代入式 (9), 并指定第 0 脉冲为参考脉冲, 令其时间偏移为零, 即令 $\Delta_0 = 0$, 故得

$$|m_1| = \frac{1.52A}{T_0} \sqrt{\left(-\Delta_1 + \Delta_3 + \frac{\pi}{4}\Delta_2^2\right)^2 + \Delta_2^2} \quad (11)$$

如 $-\Delta_1 = \Delta_3 = \Delta_2$ 则 $|m_1| = 3.4A\Delta_3/T_0$ 。表明基

波时钟分量正比于脉冲时偏(第 0 个脉冲除外)

选取 $\Delta_1 = -0.3, \Delta_2 = 0.3, a = 0.04$ 则可得如下 $|m_1| T_0/A \sim \Delta_3$ 曲线(见图 3)。

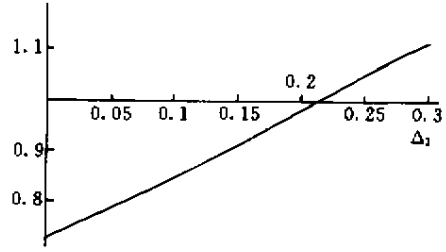


图 3 选取 $a = 0.04, \Delta_1 = -0.3, \Delta_2 = 0.3$ 时, $|m_1| T_0/A \sim \Delta_3$ 的关系曲线

Fig.3 $a = 0.04, \Delta_1 = -0.3, \Delta_2 = 0.3$, $|m_1| T_0/A \sim \Delta_3$ curve

3 讨论

1. 为提高所提取的基频时钟脉冲幅度, 应:

- 1) 取 $\Delta_1 = -, \Delta_3 = +, \Delta_2 = +$ 或 $-$ 。
- 2) $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 的数值越大越好, 但太大容易产生码间干扰, 一般可取在 0.3 以内。在图 3 情况下, 当 Δ_3 从 0 增至 0.3 时, m_1 增长 54%。
- 3) Δ_2 的影响较小, 但因第一个脉冲提前而第三个延后, 故 $|\Delta_2|$ 可取较大数值, 例如 0.6, 以提高基波分量的幅度。 $|m_1| T_0/A \sim \Delta_2$ 的曲线如图 4。

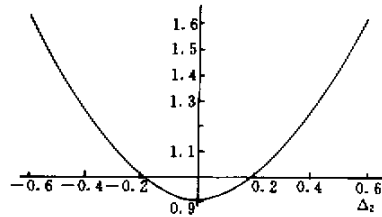


图 4 选取 $a = 0.04, \Delta_1 = -0.3, \Delta_3 = 0.3$ 时, $|m_1| T_0/A \sim \Delta_2$ 的关系曲线

Fig.4 $a = 0.04, \Delta_1 = -0.3, \Delta_3 = 0.3$, $|m_1| T_0/A \sim \Delta_2$ curve

在此种情况下, 当 Δ_2 从 0 增长到 0.3 时, m_1 才增长 22%, 但如 Δ_2 从 0 增长到 0.6 时, 则 m_1 可增长 78%, 故取较大的 Δ_2 对提高基频分量是有利的。

2. 各次谐波的相对幅度: 为了解基波分量的可提取性, 现比较各次谐波的相对幅度。

用式 (4) ~ (6) 进行计算。设 $a = 0.04, \Delta_0 = 0, \Delta_1 = 0.3, \Delta_3 = 0.3$ 则 1 2 3 4 各次谐波分量的相对幅度依次为:

1. 07908 0.800225 , 1.13051 0.575468 , 当 $\Delta_2 = 0.3$

1.50022 0.940721 0.23328 0.438331 , 当 $\Delta_2 = 0.6$

由此可见基频分量的幅度是比较大的, 尤其是在 $\Delta_2 = 0.6$ 的情况下更为突出, 这说明基波分量是易于提取的。

3. 为了验证所推导公式的正确性, 对式(1)及(2)(4)及(5)(11)3种不同形式的公式进行数值计算, 计算的结果是一致的, 这说明以上所用的近似公式是正确的。

4. 8倍复用倍频的情况: 在8倍频的情况下, 式(10)应换成

$$\sum_{n=0}^7 \exp\left[-\chi(n + \Delta_n) \frac{\pi}{4}\right] \quad (12)$$

设 $|\Delta_n|$ 极限值为 c $0 \leq c \leq 0.3$ 经优化计算知: 当 $\Delta_0 = 0$ $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = -c$ $\Delta_4 = \Delta_5 = \Delta_6(A/T_0) = c$ $\Delta_7 = \pm c$ 时, 上式为最大, 即 $|m_1|$ 为最大。取 $a = 0.04$ 则基波分量为 $[m_1] = 3.77c(A/T_0)$, 这表明基波时钟分量正比于脉冲时偏(第0个脉冲除外)。如果脉冲时偏的绝对值不相等, 但 $\Delta_7 = -\Delta_1$ $\Delta_6 = -\Delta_2$ $\Delta_5 = -\Delta_3$, 且 $\Delta_0 = 0$ 则 $|m_1| = 1.08A/T_0 \sqrt{[(\Delta_1 + \Delta_2\sqrt{2} + \Delta_3)2 + (\Delta_4)2/2]}$

4 初步实验

根据图1的实验方案, 我们作了初步实验, 成功地从 $4 \times 2.5\text{GHz}$ OTDM 光信号中提取出 2.5GHz

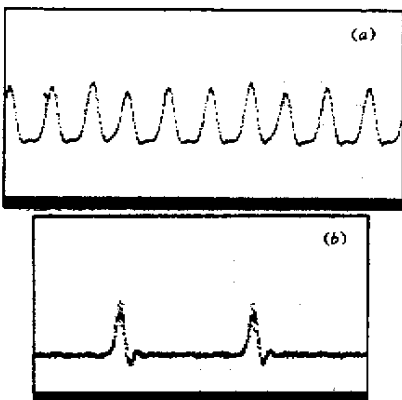


图5 时钟提取实验

(a) 注入的 $4 \times 2.5\text{GHz}$ OTDM 光信号;

(b) 提取出的 2.5GHz 时钟脉冲

Fig.5 Clock-recovery experiment

(a) $4 \times 2.5\text{GHz}$ OTDM signal;

(b) Recovered clock signal of 2.5GHz

的时钟信号。实验结果如图5所示。图5(a)为复用后的 10GHz 光脉冲信号, 图5(b)为提取出的 2.5GHz 的时钟信号。从图5(a)中可以看到, 复用后的信号的幅度及脉冲间隔都不尽相同, 这样的信号包含了较多的 2.5GHz 频率分量, 通过注入锁模激光器就可提取出 2.5GHz 的时钟信号。初步验证了我们的设想。

参 考 文 献

- 1 S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama *et al.*. 1.4 Tbit/s ($200\text{Gbit/s} \times 7\text{ch}$) 50km optical transmission experiment. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(20):1716~1717
- 2 T. Morioka, T. H. Takara, S. Kawanishi *et al.*. 1-Tbit/s ($100\text{Gbit/s} \times 10\text{channel}$) OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(10):906907
- 3 T. Morioka, S. Kawanishi, H. Takara *et al.*. 100 Gbit/s \times 4ch, 100km repeaterless TDM-WDM transmission using a single supercontinuum source. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5):468470
- 4 M. Mirakami, K.-I. Suzuki, S. Kawai *et al.*. 80 Gbit/s- 1200km , 40 Gbit/s-base WDM transmission experiment using RZ pulse format. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9):789791
- 5 T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi *et al.*. Error-free 500 Gbit/s all-optical demultiplexing using low-noise, low-jitter supercontinuum short pulses. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(9):833834
- 6 O. Kamatani, S. Kawanishi. Ultrahigh-speed clock recovery with phase lock loop based on four-wave mixing in a traveling-wave laser diode amplifier. *J. Lightwave Tech.*, 1996, **14**(8):17571767
- 7 D. M. Patrick, R. J. Manning. 20 Gbit/s all-optical clock recovery using semiconductor nonlinearity. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(2):151152
- 8 L. E. Adams, E. S. Kintzer, J. G. Fujimoto. All-optical timing extraction at 40GHz using a mode-locked figure-eight laser with an SLA. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(20):17591761
- 9 R. Ludwig, A. Ehrhardt, W. Pieper *et al.*. 40 Gbit/s demultiplexing experiment with 10GHz all-optical clock recovery using a modelocked semiconductor laser. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4):327329
- 10 J. Manning, A. J. Poustie, K. J. Blow *et al.*. All-optical clock division using a semiconductor optical amplifier loop mirror with feedback. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(16):916, 15041506
- 11 Yu Jinlong, Ma Xiaohong, Wang Lin *et al.*. Dimidiate frequency phenomenon and rational harmonic mode-locked in an active mode-locked fiber laser. *Journal of Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 1999, **10**(1):14 (in Chinese)
- 12 Ma Xiaohong, Yu Jinlong, Wang Lin *et al.*. Clock recovery of single channel in OTDM system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(11):1541~1545 (in Chinese)