

# 4 × 10Gbit/s OTDM 系统中 10GHz 帧时钟提取技术

左 鹏, 伍 剑, 张 帆, 林金桐

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘 要: 本文介绍了利用非等幅原理进行帧时钟分量提取的原理; 阐述了 40Gbit/s 光时分复用 (OTDM) 系统中利用电时钟提取技术实现 10GHz 帧时钟的理论模型和实验框图; 分析了 OTDM 光信号参数和时钟提取单元参数对系统的影响, 并给出了理论分析结果; 分析了应用于实际中的时钟提取单元的实现过程和实验结果; 并对理论结果和实验结果进行了分析和比较。

关键词: 光时分复用系统; 时钟提取技术; 非等幅编码

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 07-1006-03

## 10GHz Frame Clock Extraction Technology for 4 × 10Gbit/s OTDM System

ZUO Peng, WU Jian, ZHANG Fan, LIN Jintong

(Optical Center, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In this article, a practical 10GHz frame clock extraction technology based on unequal coding scheme and high Q value filter is introduced and analyzed. We illustrate its basic principle and propose the theoretical models to simulate the effects of parameters of OTDM (Optical Time Division Multiplexing) signals and high Q value filter. Also, we employ this technology in our practical 40Gbit/s OTDM system, and acquire a series of curves and results related to this unit. Finally, the theoretical and experimental results are compared and discussed.

Key words: optical time division multiplexing; clock extraction technology; unequal coding scheme

### 1 引言

无论对于未来的 OTDM 系统还是网络, 都需要在接收端对高速光信号进行定位和同步, 即解复用器、再生器、上下话路及路由选择都必须由时钟信号控制, 因而帧时钟提取技术是实现 OTDM 系统的关键技术. OTDM 时钟提取的方案包括基于光电锁相环的帧时钟提取方案<sup>[1]</sup>; 基于 EAM 的高 Q 值、高增益环路帧时钟提取方案<sup>[2]</sup>; 以及基于非等幅编码的帧时钟提取方案<sup>[3]</sup>.

在本文中, 我们对基于非等幅编码的 10GHz 电时钟提取方案进行了理论分析和实验研究. 在理论分析模型中, 在考虑随机码元噪声的条件下, 分析了 OTDM 光信号参数和时钟提取单元参数对恢复的帧时钟信号的影响. 利用该时钟提取方案实现了经过 122km SMF 传输后误码率 < 10<sup>-9</sup>. 该方案的优点是时间抖动小、简单实用、稳定性好、成本低等.

### 2 帧时钟提取的原理和理论分析模型

#### 2.1 基本原理

在 40Gbit/s OTDM 系统中, 采用基于非等幅编码的高 Q 值电滤波器时钟提取方案. 时钟提取单元的具体结构如图 1.

基本原理描述如下, 在 4 × 10Gbit/s OTDM 数据流复用过程中, 使其中一路光信号的幅度与其它三路光信号的幅度有差别, 即其中一路信号强于其它三路信号或弱于其它三路信号. 理论分析表明, 以上两种情况均会加强 4 × 10Gbit/s OTDM 数据流中的帧频时钟分量 (10GHz). 当基于非等幅编码的 4 × 10Gbit/s 光比特流通过宽带 (> 10GHz) 光电探测器 (PIN) 转换

之后, 输出的电信号将包含丰富的 10GHz 的电时钟分量 (如图 3 所示); 采用高 Q 值滤波器可以对 10GHz 的频谱分量直接进行提取, 从而获得 10GHz 的帧时钟信号.

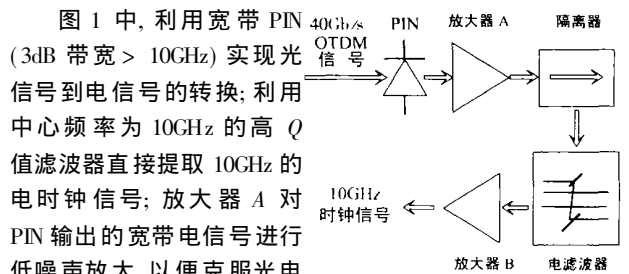


图 1 非等幅编码的高 Q 值电滤波器时钟提取单元原理图

放大器 A 对 PIN 输出的宽带电信号进行低噪声放大, 以便克服光电转换效率的限制; 使用隔离器是为了减小反射信号对前端的影响; 放大器 B 进一步将 10GHz 的时钟信号放大, 提供给后续设备使用.

#### 2.2 理论模型的建立

理论分析过程中, 需要分析 40Gbit/s 的 OTDM 光信号非等幅程度 (即幅度差别)、高 Q 值滤波器带宽对输出时钟信号的幅度和抖动的影响.

由于随机码元噪声是造成时钟输出抖动的主要原因, 因而理论模型中必须引入随机码元噪声.

定义 OTDM 信号包络为

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [ma_n \text{sgn}(t - nT_f) + \sum_{k=1}^{N-1} a_{nk} \text{sgn}(t - kT_s - nT_f)]$$

其中:  $a_{ij}$  为随  $i, j$  变化的随机变量 ( $i, j$  为整数), 取值为“0”和“1”的概率均为 0.5;  $m$  表示幅度差别,  $m = 1$  时上式即为等幅信号;  $g(t)$  表示脉冲形状, 一般取高斯形脉冲;  $T_f$  和  $T_s$  分别表示 OTDM 信号的帧重复周期和比特重复周期;  $N$  表示复用的路数。

滤波器采用高斯形带通滤波器:

$$f_B(\omega) = \exp(-(\omega - \omega_0)^2 / 2\omega_B^2)$$

其中, 中心频率  $\omega_0$  取 10GHz;  $\omega_B$  为滤波器带宽。进而时钟信号输出可以表示为:

$$C_{out}(t) = F^{-1}\{F[S(t)] \times f_B(\omega)\}$$

其中  $F$  和  $F^{-1}$  分别为傅立叶正变换和傅立叶反变换。

### 2.3 分析 $m$ 、 $\omega_B$ 与时钟输出幅度的关系

根据  $C_{out}$  计算在不同  $m$  和  $\omega_B$  取值条件下, 时钟输出幅度的变化。

### 2.4 分析 $m$ 、 $\omega_B$ 与信号抖动的关系

在忽略 OTDM 信号源的抖动的情况下, 随机码型噪声将是造成信号抖动的主要原因。因而  $m$ 、 $\omega_B$  与随机码型噪声率的关系将反映前者对信号抖动的影响。采用类似信号解调的原理对随机噪声进行分析和处理。

在归一化输出时钟信号幅度的条件下, 计算不同  $m$ 、 $\omega_B$  值的条件下随机码型噪声的功率。

- ⊗ 首先将输出的时钟信号  $C_{out}$  幅度进行归一化处理;
- ⊗ 将  $C_{out}$  与 10GHz 的正弦波相乘;
- ⊗ 通过低通滤波器可以得到随机码型噪声信号。

用公式表示上述过程, 即

$$N(t) = F^{-1}\{F[C_{out} \times \sin(\omega_0 t)] \times f_L(\omega)\}$$

$$f_L(\omega) = \exp\left[-\frac{\omega^2}{2\omega_L^2}\right]$$

其中,  $\omega_0$  为中心频率, 取 10GHz;  $\omega_L$  为低通滤波器带宽。  $N(t)$  为计算得到的码型随机噪声参量, 表征码型噪声的大小。

## 3 理论分析结果

这里采用数值计算方法对以上公式进行数值计算。以下是数值计算结果。

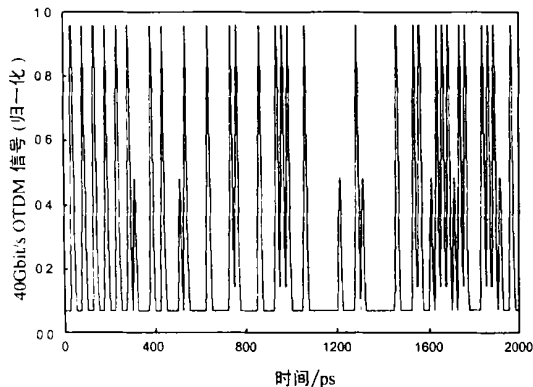


图 2 40Gbit/s OTDM 信号

图 2 和图 3 分别对应入射 40Gbit/s 信号的波形图 (这里仅给出了 OTDM 信号 0-2000ps 之间的部分波形) 和频谱图。计算条件如下:

- ⊗ 脉冲重复速率为 40Gbit/s, 帧重复频率为 10GHz;
- ⊗ OTDM 信号的脉冲宽度为 15ps, 为高斯形脉冲;
- ⊗ 非等幅编码的信号幅度差别为 3dB;
- ⊗  $a_{ij}$  为  $2^{53}-1$  的伪随机码序列。

如图 3 所示的频谱图是对图 2 进行 FFT 变换的结果, 纵坐标为对数坐标。

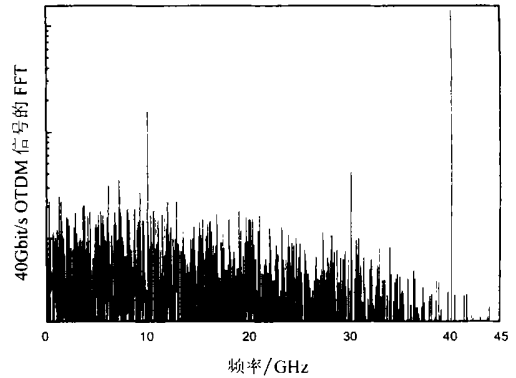


图 3 40Gbit/s OTDM 信号 FFT 变换结果

图 4 为  $m$ 、 $\omega_B$  与时钟输出幅度的关系曲线,  $m$  采用 dB 值表示。图 5 为  $m$ 、 $\omega_B$  与  $N(t)$  的关系曲线。在图 5 中, 在选择不同的电滤波器带宽 (10MHz、20MHz、50MHz) 的条件下, 计算了定义的噪声参量与  $m$  之间的关系。当  $m$  接近 0dB 时, 即 OTDM 信道间的幅度差别很小的条件下, 噪声参量将变得很大, 这是由于此时的帧时钟分量非常小而造成的。

## 4 实验的建立和结果

### 4.1 实验系统简介

图 6 为研究时钟提取单元特性的实验系统图。其中 OA 为光衰减器, EDFA 为掺铒光纤放大器, DFB 为光脉冲源输出的脉冲, 经过一段色散补偿光纤 (DCF) 进行线性压缩至 13ps, 再经色散位移光纤 (DSF) 非线性压缩至 5ps。压缩后光脉冲通过光时间延迟线复用至 40Gbit/s, 在复用后的四路信号中, 第一路信号的功率可以通过可变光衰减器调节, 使其低于其它三路信号。然后, 此 40Gbit/s 的 OTDM 信号进入时钟提取单元进行 10GHz 帧时钟的提取; 并利用示波器 (型号 TEC11801C) 对时钟信号幅度和抖动特性进行了测试。

### 4.2 实验结果

图 7 和图 8 是用 50G 高速探测器和示波器观察到的 OTDM 信号波形和时钟输出波形, 很明显一路脉冲的幅度低于其它几路。图 7 中, 时间坐标每格 25ps; 图 8 中, 时间坐标每格 50ps; 纵坐标均为线性坐标。

通过图 6 的实验系统, 我们还得到提取输出的时钟信号的相关特性 (抖动及幅度) 与注入信号的幅度差别的关系曲线 (如图 9 所示), 该曲线是对实验测试点拟合的结果。测试点对应的抖动与幅度数值均从示波器上直接读取。

## 5 结论与分析

理论和实验的结果都表明, 利用非等幅原理进行帧时钟分量提取可以获得满足系统要求的时钟信号, 该技术已经用在实际的 40Gbit/s OTDM 系统之中。

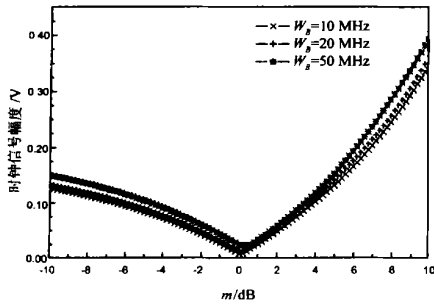


图 4  $m$ 、 $\omega_b$  与时钟输出幅度的关系

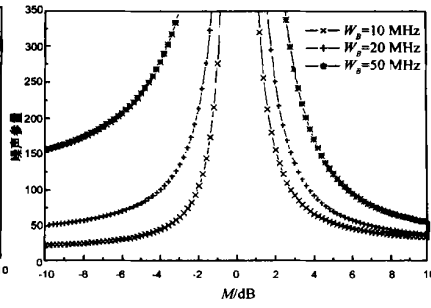


图 5  $m$ 、 $\omega_b$  与随机噪声  $N(t)$  的关系

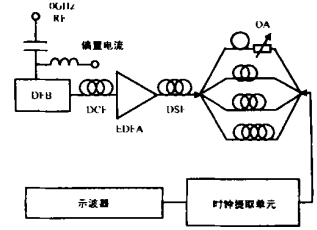


图 6 实验系统框图

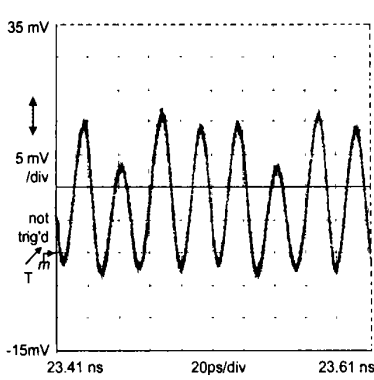


图 7 非等幅 40Gbit/s 的 OTDM 信号

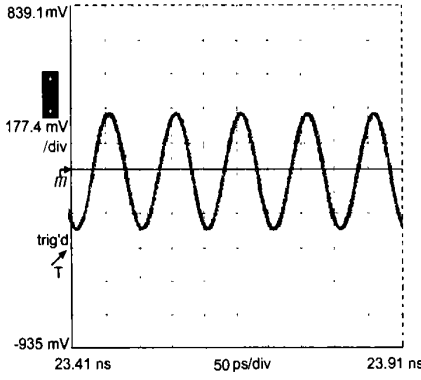


图 8 时钟提取单元输出波形

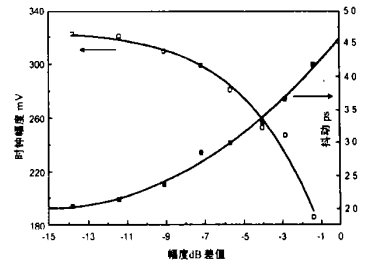


图 9 幅度差别与时钟输出幅度以及抖动的关系曲线

显然,当  $m < 1$  (即 dB 值小于 0) 的情况下,  $m$  越小,幅度差别越大;当  $m > 1$  (即 dB 值大于 0) 的情况下,  $m$  越大,幅度差别越大。

通过理论分析和实验验证得到以下结论:

(1) 幅度差别对时钟提取单元的影响表现为:时钟信号的幅度随信号幅度差别的增大而增大,这是因为信号幅度差别愈大,频谱中 10GHz 时钟分量愈强所致;对于一定的时钟信号功率,时钟信号的抖动随信号幅度差别的增大而减小。 $m$  (dB)  $< 0$  的情况在实验系统中,此结论得到验证。

(2) 滤波器的带宽  $\omega_b$  对时钟提取单元的影响表现为:滤波器的带宽越宽,时钟信号的抖动越大,这是由于引入的带内码型随机噪声越强的缘故。

(3) 对于  $\omega_b = 10\text{MHz}$  的条件下,  $m$  (dB) =  $\pm 3\text{dB}$  时,理论计算的噪声参量曲线出现拐点。

基于以上的分析,对于实际系统设计,应在系统传输条件容许的条件下,尽量提高信号的幅度差别,提高幅度差别可以改善输出的帧时钟信号的幅度,减小时钟的抖动。建议选取滤波器的  $Q$  值大于 1000,  $|m_{\text{dB}}| > 3\text{dB}$ 。

致谢 本课题研究由 863-317-02-03-99 计划支持。同时感谢参与整个实验系统建立的清华大学、北方交通大学的各位老师和同学。

参考文献:

- [ 1 ] I D Phillips, et al., Drop and insert multiplexing with simultaneous clock recovery using an electroabsorption modulator [ J ]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10( 2 ): 291- 293.
- [ 2 ] G Raybon, B Mikkelsen, R J Essiambre, A J Stentz. 320Gbit/s single channel pseudo-linear transmission over 200km of nonzero dispersion fiber [ A ]. Proc. of OFC2000 [ C ]. USA: OFC, 2000.
- [ 3 ] Yu Jianjun, et al. 2. 5GHz clock extraction from  $8 \times 2.5\text{Gbit/s}$  OTDM system employing electrical filter with high Q value [ A ]. Proc. of ICT' 98 [ C ]. Beijing: ICCT, 1998.

作者简介:



edu. cn

左 鹏 男, 1978 年 7 月生于辽宁省沈阳市, 1998 年毕业于北京邮电大学无线系无线通信工程专业, 获学士学位; 1998 年开始在北京邮电大学电信工程学院光纤通信专业攻读硕士学位; 2000 年于北京邮电大学电信工程学院开始攻读光纤通信专业博士学位, 现主研方向为光时分复用系统和光通信网络。电子信箱 zuopeng@ bupt.