

doi: 10.3788/lop47.040603

# 光纤 Round-Trip 法授时的误差分析

丁小玉<sup>1,2</sup> 卢麟<sup>2</sup> 张宝富<sup>2</sup> 代玉锋<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>解放军理工大学通信工程学院研究生3队, 江苏 南京 210007)  
(<sup>2</sup>解放军理工大学通信工程学院电信工程系, 江苏 南京 210007)

**摘要** 现有天基时间同步网络的精度限制和光钟的出现, 使得光纤授时成为高精度时间同步的主要方案之一。介绍了利用密集波分复用(DWDM)技术实现单纤双向传输的 Round-Trip 法授时方案, 该方案抑制了利用光纤业务授时而导致的双向信道延时不对称问题。利用光纤授时系统中各模块的典型参数和信道特征分析了授时偏差和随机误差, 提出了相应的补偿偏差和抑制误差的方法。理论分析表明, 该方案在现有光纤中继距离上的授时精度可以达到亚纳秒量级。利用时间间隔计数器测量了 50 km 光纤授时系统中主要模块的时延及其时延波动范围, 实验验证了理论分析的结果。

**关键词** 高精度授时; 同步精度; 误差分析; 环路测量

中图分类号 TB939 OCIS 060.2330 060.4256 文献标识码 A

## Error Analysis of Fiber Time Service Using Round-Trip Method

Ding Xiaoyu<sup>1,2</sup> Lu Lin<sup>2</sup> Zhang Baofu<sup>2</sup> Dai Yufeng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>Postgraduate Team 3, Institute of Communication and Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)  
(<sup>2</sup>Department of Telecommunications Engineering, Institute of Communication and Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** The emergence of optical clock and the precision limits of the existing time synchronization space-based make fiber one of the major high-precision time service systems. A Round-Trip method that uses dense wavelength division multiplexing (DWDM) technology in a single fiber and achieves bidirectional time information transfer is introduced. This method restrains the delay time asymmetry of the optical time service using fiber business channel. The time deviation and random error are analysed by using typical parameters of various modules and the character of the fiber channel in the system, and the corresponding suppression of deviation and compensation of random error methods are brought forward. Theoretical analysis shows that the method can satisfy time-precision of nanosecond order of magnitude in the existing fiber distance relay. Taking advantage of the time interval, the delay time and the time stability of the major modules in the 50 km fiber time service system are measured, verifying the theoretical analysis.

**Key words** accurate time service; synchronization-precision; error analysis; Round-Trip

### 1 引言

时间作为一个最基本的物理量, 在国民经济、国防建设和基础学科研究中起着重要的作用, 高精度的时间频率体系已经成为各国都竞相发展的战略资源之一。卫星授时系统虽然技术上已经相当成熟, 但它自身存在着体系复杂、成本昂贵、实现周期长、安全隐患多等缺陷, 而研究技术实现性强、具备一定抗干扰

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-10

作者简介: 丁小玉(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤授时方面的研究。E-mail: dingxy1983@qq.com

导师简介: 张宝富(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事复杂电磁环境下 ROF 技术和无线光通信等方面的研究。E-mail: zhangbaofu@163.com

能力的高精度地面时间频率网络十分必要。近年来, 光纤信道的优良特性和光网络的普及使得光纤授时受到越来越多的关注, 成为新一代授时系统的主要方案之一。

光纤授时的主要方法有两类: 一是利用现有的光纤数字同步(SDH)网, 二是利用密集波分复用(DWDM)技术。利用 SDH 网授时存在着物理链路不对称性和指针调整等因素, 使得授时无法跨越复用段或者跨越复用段时授时精度不高<sup>[1-4]</sup>, 所以长距离的纳秒级的高精度光纤授时倾向于采用 DWDM 技术。DWDM 授时又分为 Round-Trip 法和双向对比法, 本文在阐述 Round-Trip 法授时原理的基础上, 利用光纤信道的特点和光源的典型参数对授时固定偏差和随机误差进行了分析, 并提出了相应的补偿措施。

## 2 DWDM Round-Trip 法授时的原理

Round-Trip 法授时的基本原理, 如图 1 所示。时频中心发出的 1PPS(1 pulse per second)在中心站处理后由光发送模块以  $\lambda_1$  波长发送出去, 经 DWDM 设备上光纤线路, 在终端站携带 1PPS 的光信号经 DWDM 设备被分离出来, 经光接收模块转换成电信号, 在终端站恢复 1PPS。然后终端站再将该恢复的 1PPS 经光发送模块调制在波长为  $\lambda_2$  的光波上发送出去, 经 DWDM 合波上光纤线路, 中心站同样经 DWDM 设备和光接收设备恢复终端站回送过来的 1PPS。时间间隔计数器通过测量从时频中心发出 1PPS 到接收到终端站回送过来的 1PPS 的时间得到环路总时延。由于线路中使用同一根光纤进行传输, 所以单向传输时延即可认为是环路总时延的一半, 利用该值进行时延补偿, 即可在终端站恢复秒脉冲。

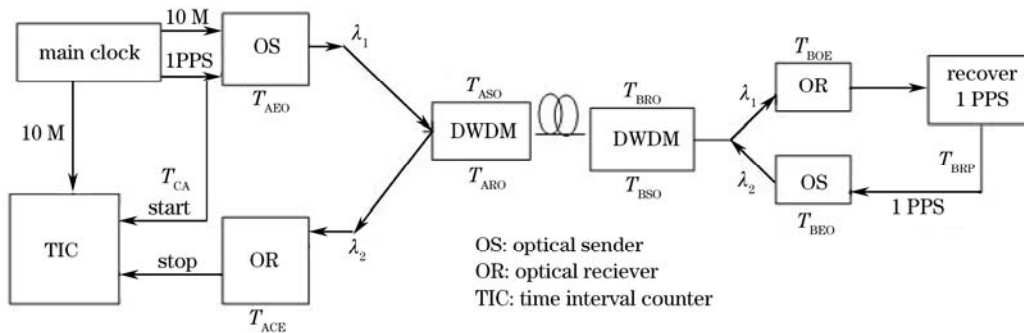


图1 光纤 Round-Trip 法授时的基本原理

Fig.1 Basic principle of fiber time service using Rond-Trip method

时间间隔计数器所测得的时间

$$T = T_{AEO} + T_{ASO} + T_{ARO} + T_{AOE} + T_{AB} + T_{BA} + T_{BSO} + T_{BEO} + T_{BRP} + T_{BOE} + T_{BRO}, \quad (1)$$

需要补偿的时延量为从时频中心经授时中心站和光纤线路到授时终端站恢复 1PPS 的单程时延,

$$\tau = T_{CA} + T_{AEO} + T_{ASO} + T_{AB} + T_{BRO} + T_{BOE} + T_{BRP}, \quad (2)$$

式中  $T_{CA}$  为基准源经中心站到 TIC 的时延,  $T_{AEO}$  为中心站电光时延,  $T_{ASO}$  为中心站发送光处理时延,  $T_{AB}$  为中心站到授时站光纤传输时延,  $T_{ARO}$  为中心站接收光路时延,  $T_{AOE}$  为中心站光电转换时延,  $T_{BA}$  为终端站到中心站光纤传输时延,  $T_{BSO}$  为终端站发送光处理时延,  $T_{BEO}$  为终端站电光时延,  $T_{BRP}$  为终端站 1PPS 恢复处理时延,  $T_{BOE}$  为终端站光电时延,  $T_{BRO}$  为终端站光路接收时延。

硬件电路处理的时延  $T_{BRP}$ ,  $T_{CA}$  和光器件的处理时延均可以准确测得, 故可设

$$T_{AEO} + T_{ASO} + T_{AOE} + T_{BSO} + T_{BEO} + T_{BRP} + T_{BOE} + T_{BRO} = \Delta T_1, \quad (3)$$

$$T_{CA} + T_{AEO} + T_{ASO} + T_{BRO} + T_{BOE} + T_{BRP} = \Delta T_2. \quad (4)$$

于是可得

$$\tau = \frac{T}{2} - \frac{\Delta T_1}{2} + \Delta T_2. \quad (5)$$

由测得的环路时延得到单向时延, 利用该单向时延对终端站接收到的 1PPS 进行补偿, 即得到准确的时间。

### 3 时间同步精度分析与解决方案

(5)式做了一个重要的假设, 即认为单纤双向传输的来回链路传输时延相等。但实际上由于来回链路上选用的波长不等, 光纤对不同波长的折射率并不相同, 所以来回链路的传输时延并不完全相等。于是考虑该不对称性, 由(5)式可以看出影响授时同步精度的主要因素有: 来回链路不对称性、光器件处理时延的不稳定性、测量手段的不准确性、延时控制不够精密以及硬件延时的不稳定性等。这些影响因素中只有前两项是光纤授时所特有的, 因此主要从这两个光纤授时系统中所特有的影响因素分别从误差和偏差的角度分析它们给授时系统带来的影响, 并提出消除固定偏差和减小随机误差的方法。

#### 3.1 来回光纤链路不对称性引入的误差

采用 DWDM 单纤双向传输的主要优势在于信号在同一根光纤中传输, 物理上克服了来回链路的不对称性, 但光纤的色散特性导致了光纤对不同波长的光信号会有不同的群速度或群时延, 带来了传输来回链路的不对称性, 且该不对称性与距离成正比。设往返链路上的两个光信号工作波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 则这两个光信号在同一根光纤上传输的群速度不同, 分别记为  $v_{g1}$  和  $v_{g2}$ 。若已知  $v_{g1}$  和  $v_{g2}$ , 则往返链路传输总时延  $\tau_{\text{sum}}$  和链路长度  $L$  关系为  $L/v_{g1} + L/v_{g2} = \tau_{\text{sum}}$ 。用该式便可以在测得  $\tau_{\text{sum}}$  的前提下计算出光链路的总长度  $L$ , 进而可以计算出  $\tau_1 = L/v_{g1}$ 。故而估算单程传输时延首先是计算不同波长的光信号在 G.652 光纤中的群速度  $v_g$  或者群时延  $1/v_g$ 。G.652 光纤中的群时延  $1/v_g$  与波长的关系如图 2 所示<sup>[6]</sup>。

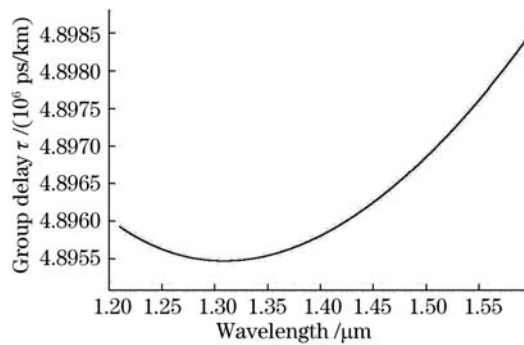


图 2 G.652 光纤中的群时延与波长的关系

Fig.2 Relation of group delay and wavelength in fiber G.652

由图 2 可以得到 1550 nm 窗口任意工作波长的群时延。表 1 为结合群时延特性曲线计算出的不同工作波长在传输 1000 km 的往返链路时延差  $\tau_{\text{diff}}$  和信号单程传输时延  $\tau_1$ <sup>[6]</sup>。

表 1 不同的工作波长传输 1000 km 后的群时延差和单程传输时延

Table 1 Group delay and one-way transmission time delay after 100 km transfer for different wavelengths

$\lambda_1$ /nm	$\lambda_2$ /nm	$\tau_{\text{sum}}$ /ns	$\tau_{\text{diff}}$ /ns	$\tau_1$ /ns
1550.12	1550.52	9795232.4	6.6	4897612.9
1527.22	1598.04	9795722.5	1228.9	4897246.8
1310.00	1550.00	9793080.4	2141.4	4895469.5

由表 1 可知: 在 1550 nm 波长附近, 间隔 0.4 nm 的两个波长传输 1000 km 后群时延差可达 6.6 ns, 即传输链路不对称性可达 6.6 ns, 这种不对称性会对系统的同步精度带来严重影响。但该不对称性与光纤的传输特性有关, 对系统的影响属于偏差, 可以用光纤的典型参数进行估算和补偿。如表 1 中所列第一组数据, 由群时延特性曲线可得光纤在 1550.12 nm 处的色散斜率为 16.6 ps/(km·nm), 利用此色散斜率对不对称性进行估算为  $16.6 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}) \times 0.4 \text{ nm} \times 1000 \text{ km} = 6.64 \text{ ns}$ , 该估算值与仿真结果基本吻合。利用该估算

值进行修正, 不对称性将降低到 40 ps, 由(5)式得不对称性引入的授时误差将降至 20 ps。

### 3.2 光器件引入的误差

由(2)式可得光器件的处理时延也是影响系统同步精度的一个重要因素。其中无源光器件的处理时延可以认为是一定值, 它们几乎不带来额外的时延抖动, 增加抖动的光器件主要是有源光器件, 即光源。光源引入的误差根据产生的机理, 主要分为两个方面, 一是波长不稳定性引入的误差, 二是电光转换的时延抖动引入的误差。

目前商用 320 Gb/s DWDM 系统规定了光源的最大中心偏移为 $\pm 0.1 \text{ nm}$ <sup>[7]</sup>, 则最坏情况下来回两个波长的间隔将增加 0.2 nm, 根据往返链路不对称性的阐述, 传输 1000 km 色散导致的传输链路不对称性将达  $16.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \times 0.2 \text{ nm} \times 1000 \text{ km} = 3.32 \text{ ns}$  (仍以表 1 中第一组数据为例), 将对长距离的光纤授时系统同步精度带来严重影响。该误差是随机的, 无法预知与补偿。要想提高长距离光纤授时系统的同步精度则必须对该误差项进行抑制。可采取的抑制措施主要有: 一是控制光源的中心波长, 让它尽可能的稳定, 该方法受光源的制造工艺等的限制, 可能无法满足要求; 二是在线路中加光谱仪对波长进行监测, 现在商用光谱仪的测量精度可以达到 2 pm, 利用这种光谱仪对波长进行监测, 再利用监测的结果对时延量进行实时的补偿和控制, 则传输 1000 km 的可能误差为  $16.6 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm}) \times 1000 \text{ km} \times 2 \text{ pm} = 33.2 \text{ ps}$ , 即利用光谱仪监测的方法可以将光源不稳定性误差缩小到 1%。

时间信号由电信号经激光器转换成光信号需要一定的时间, 这个时间称为电光转换时延, 该时延有一定的抖动范围, 以英国 BOOKHAM 公司的 SFP 激光器为例, 其电/光和光/电转换时延抖动均值为 10 mUI, 峰-峰值为 70 mUI, 其中 mUI 为线路中码元宽度的千分之一。如果信道中只传送时频中心发过来的 10 MHz 标称频率和秒脉冲, 则线路中的码元速率为 20 Mb/s, 周期为 50 ns, 一个 mUI 就是 50 ps, 电光转换和光电转换的延时抖动均将达到 3.5 ns。该抖动成为严重影响系统的授时同步精度的因素之一。为减小该误差抖动, 可以采取的办法一是提高电光转换延时的稳定性, 二是提高线路码元速率, 将码元速率每提高 1 倍该抖动将降低 50%, 例如将线路速率提高到 2.5 Gb/s, 一个 mUI 则降至 0.4 ps, 电光转换的时延抖动均值将降低到皮秒量级。

影响光纤授时同步精度的因素除了光路外, 还包括硬件延时不稳定、测量手段不准确带来的误差和延时控制带来的误差等任何授时系统都不可避免的误差, 这些误差来源在卫星授时系统也同样存在。

## 4 实验结果

实验中时间间隔计数器采用 Agilent 公司的 53132A(配备高稳定钟源), BOOKHAM 公司的 SFP 光收发器和 altera 公司 cyclone 系列的一款通用现场可编程门阵列(FPGA)做电域处理。实验中测试了温度对 FPGA 的处理时延、FPGA+光模块的时延和 FPGA+光模块+50 km 光纤的时延的影响, 并通过在不同温度下测试结果的对比如得出对授时同步精度影响较大的因素。最后测试了不同距离下授时的同步精度。测试全部不考虑测量误差。

通过对不同温度下各模块延时量的测量比较得出各模块所增加的时延以及带来的额外时延抖动, 如图 3 所示。由于依次加入各模块后总时延量不断增加, 为了使它们在同一张图中显示, 方便比较, 把加了光模块和加了 50 km 光纤后的总时延量分别减去 35 ns 和 239510 ns。由图 3 可以看出, 光纤对温度敏感, 温度上升时 50 km 光纤的时延量迅速增大。温度对授时系统精度的影响主要表现为对光纤群时延的影响, 但温度是一个缓变量, 可以对其进行实时监控和补偿。实验测得只通过 FPGA 的时延均方差为 140 ps, 通过 FPGA+光模块的时延均方差为 197 ps, 再加 50 km 光纤的时延均方差增大到 1594 ps。加光纤后抖动量增大的主要原因是温度变化引起光纤的群时延变化。可见未经补偿的情况下影响系统抖动的主要因素仍是光纤信道。实际线路中可以通过深埋光纤等方法进行补偿改善。

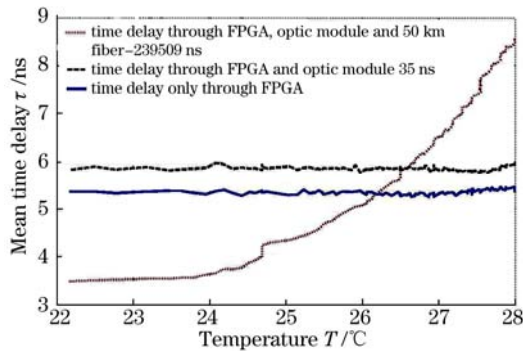
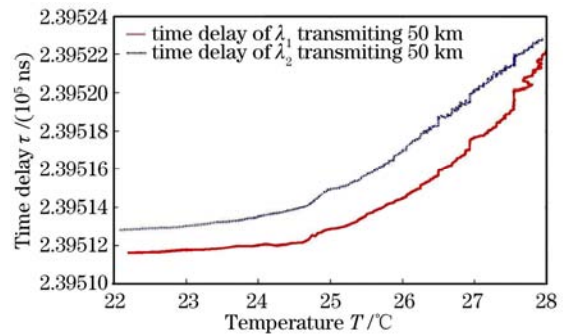


图3 温度对各模块时延量的影响

Fig.3 Effect of temperature on time delay for every module

图4 间隔 0.8 nm 的两个波长传输 50 km 的线路时延  
Fig.4 Time delay of two wavelengths transmitting 50 km with 0.8 nm interval

为了验证来回链路的不对称性,测试了同等条件下分别用间隔 0.8 nm 的两个波长传输 50 km 的线路时延。实验结果如图 4 所示。由图 4 可知,在同一温度条件下两个波长传输同样的距离所用的时间并不相等,即为传输链路的不对称性。在光纤授时系统中需要补偿此不对称性偏差。另外由图 4 也可以看出,在不同温度下往返链路时延差也会有所不同,这也是光纤授时系统中需要考虑的因素。

## 5 结 论

通过分析可知,光纤链路授时的误差主要受光纤色散带来的往返链路不对称性、激光器发光波长不稳定、电/光/电转换时延不稳定等因素的影响,采用补偿措施后,利用 DWDM 技术的 Round-Trip 法光纤授时 1000 km 的理论同步精度可达亚纳秒量级。国外一些研究与实验也确实达到了纳秒级甚至在短距离上达到了亚纳秒级的授时同步精度。

## 参 考 文 献

- Masami Kihara, Atsushi Imaoka. System configuration for standardizing SDH-based time and frequency transfer[C]. European Frequency Time Forum, 1996, **418**: 465~470
- Zhang Dayuan, Xie Yi, Meng Aili *et al.*. Transferring high accuracy standard time signal by SDH 2.048 Mbit/s channel[J]. *Modern Telecommunications Technology*, 2006, (12): 17~25  
张大元,谢毅,孟艾立等.利用光纤数字同步传送网2.048 Mbit/s支路传送高精度标准时间信号[J].现代电信技术,2006, (12): 17~25
- Masaki Amemiya, Michito Imae. Time and frequency transfer and dissemination methods using optical fiber network[J]. *IEEE J Transactions on Fundamentals and Materials*. 2006, **126**(6): 458~463
- Masami Kihara, Atsushi Imaoka. Two-way time transfer through 2.4 Gb/s optical SDH system[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2001, **50**(3): 709~715
- Atsushi Imaoka, Masami Kihara. Accurate time/frequency transfer method using bidirectional WDM transmission[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1998, **47**(2): 537~542
- Lai Xianzhu. The Study of High Precision Time Service Basic of Optic Network[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009. 31~37  
赖先主.基于光网络的高精度授时技术研究[D].南京:解放军理工大学,2009.31~37
- Li Yunbo, Zhang Chengliang. Technical standards for 1.6 Tbit/s and 800 Gbit/s optical WDM systems[J]. *Telecommun Network Technol.*, 2003, (1): 27~30  
李允博,张成良.1.6 Tbit/s与800 Gbit/s光波分复用系统(WDM)技术要求 [J]. 电信网技术, 2003, (1): 27~30