

# 高精度光链路授时时延估算

赖先主 张宝富 卢 麟 谢 畅

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 授时系统中信号单程传输时延的估算直接影响到授时的精度, 环路时延测试是估算单程传输时延的方法之一。在光缆授时系统中光纤的色散特性将导致不同波长光信号在同一光链路中的传输时延存在差异, 基于 G. 652 光纤的色散特性, 提出的时延差精确估算方法, 能够得到这种传输时延的差异。仿真显示来回链路工作波长在 1.55  $\mu\text{m}$  附近时, 此方法能够很好地补偿时延差, 从而精确估算信号传输时延。

**关键词** 光纤光学; 光链路; 高精度授时; 时延估算

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0170

## Estimation of Transmission Delay in the Accurate Time Transfer System Based on Optical Link

Lai Xianzhu Zhang Baofu Lu Lin Xie Chang

(Institute of Communications Engineering,

PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** The time synchronization accuracy depends on the accuracy of the transmission delay measurement of the time signal in the time transfer system. The transmission delay is always achieved by measuring the round-trip path delay using the outgoing and incoming path. But it incurs error due to the chromatic dispersion of the fiber in the time transfer system based on optical cable. A method to count the difference in transmission delay between the outgoing and incoming path is proposed based on the dispersion of the G. 652 fiber. The error caused by fiber dispersion can be eliminated when the wavelength of optical signal in the round-trip is around 1.55- $\mu\text{m}$  by using this method, which can achieve the accurate transmission delay of the signal.

**Key words** fiber optics; optical link; accurate time transfer; estimation of transmission delay

### 1 引 言

基于光网络的授时体系作为一种地面时间频率网络因其基于现有的光缆通信网络、成本低、实现容易、抗干扰能力强和授时精度高等优点成为卫星导航授时网络另一选择。光网络授时系统的精度主要取决于光信号传输时延的估算精度。光信号的传输时延一般是在测得环路(round-trip)时延的基础上取环路时延一半的方法进行估算。在基于 SDH 体系的授时系统<sup>[1~6]</sup>中, 由于测试环路时延信号来回传输所用光链路在物理上不一致, 导致光信号单程传输时延的测试存在较大误差; 在基于波分复用(WDM)技术的授时系统<sup>[7,8]</sup>中, 来回光链路采用同

样的光纤, 克服了物理上来回光链路不一致导致的测试误差, 但是不同波长的光信号在同一根光纤中传输时, 色散将使不同波长光信号的群时延不一致, 从而产生测试误差, 例如在色散位移光纤(DSF)上来回链路分别使用 1315 nm 和 1548 nm 的光信号, 传输距离 50 km 时, 来回链路的传输时延差将会达到 113.6 ns<sup>[8]</sup>。上述两种系统中如果简单地将环路时延的一半当作单程传输时延, 难以满足高精度(纳秒量级)、长距离的授时要求。因此, 在高精度的授时系统中, 除采用单纤 WDM 技术克服双向授时信道物理长度不一致的问题之外, 还要克服不同波长光信号在同一光纤链路中传输时群时延不一致带来的

**作者简介:** 赖先主(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事基于光网络的高精度授时系统研究。

E-mail: laixianzhu@yahoo.com.cn

**导师简介:** 张宝富(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光通信系统与技术、光信息处理技术方面的研究。

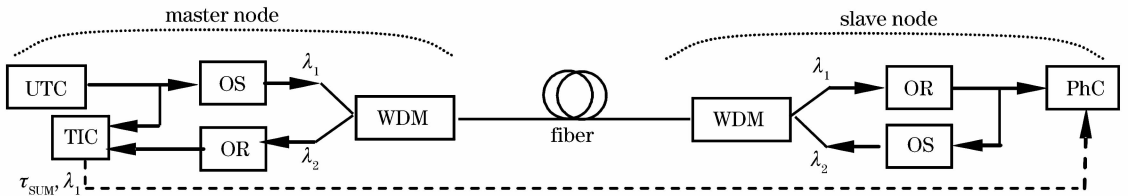
E-mail: zhangbaofu@163.com

授时误差。

本文提出了一种利用来回链路光信号总的传输时延估算来回链路传输群时延差和信号单程传输时延的方法,结合数值计算方法可以有效估算出光缆高精度授时系统中的信号传输时延,抑制色散对授时精度的影响,仿真结果表明了这种方法可以有效提高系统授时精度。

## 2 高精度授时系统中的时延估算方法

### 群时延差估算方法用于如图 1 所示的光缆授时



UTC: universal time coordinated; PhC: phase compensator; OS: optical sender; OR: optical receiver; TIC: time interval counter

图 1 基于 WDM 技术的授时系统

Fig. 1 Time transfer system based on WDM transmission

$$\frac{L}{v_{g1}} + \frac{L}{v_{g2}} = \tau_{sum}, \quad (1)$$

用(1)式便可以在测得  $\tau_{sum}$  的前提下计算出光链路的总长度  $L$ ,进而可以计算出来回链路时延差  $\tau_{diff} = L/v_{g1} - L/v_{g2}$  和光信号单程传输时延  $\tau_1 = L/v_{g1}$ 。故而估算单程传输时延首先需要估算出光路总长度  $L$ ,而在已知传输总时延  $\tau_{sum}$  的基础上,精确估算  $L$  的关键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 光纤中群速度  $v_g$  和群时延  $1/v_g$  的计算方法为<sup>[9]</sup>

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta}, \quad \tau = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega}, \quad (2)$$

式中  $\beta$  为单模光纤中相位常数,其表达式为

$$\begin{aligned} \beta &= k_0 [n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2)b]^{1/2} = \\ k_0 n_1 \left[ \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 + \frac{2(n_1^2 - n_2^2)b}{2n_1^2} \right]^{1/2} &\approx \\ k_0 n_1 (1 + 2\Delta b)^{1/2} &\approx k_0 n_1 (1 + \Delta b), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \omega/c$  为自由空间中相位常数,  $n_1, n_2$  分别为纤芯和包层中的折射率,  $b = \frac{W^2}{V^2} = 1 -$

$\frac{U^2}{V^2}$  是为计算方便引进的归一化工作参数,其中  $U,$

$W$  分别为光纤中电磁场方程的特征常量,  $V^2 = U^2 + W^2$  称为光纤的归一化频率,它与工作频率成正比,

是一个无量纲的参数。式中  $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

系统<sup>[8]</sup>。系统采用基于 WDM 技术的单纤双向双波长传输克服授时信道来回链路长度不对称问题。

授时系统中来回链路上的两个光信号工作波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,授时中心的时间间隔计数器可以测得光信号在来回链路上的传输总时延  $\tau_{sum}$ ,传输时延信息使用  $\lambda_1$  光信号传给授时站。

光纤对不同波长的光信号会有不同的群速度或群时延,上述  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  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  $v_{g2}$ ,则来回链路传输总时延  $\tau_{sum}$  和来回链路总长度存在关系

为纤芯和包层的相对折射率差,式中近似用到了弱导条件  $n_2/n_1 \approx 1$ 。将(3)式对  $k_0$  求导,得

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dk_0} &= \frac{d}{dk_0} [k_0 n_1 (1 + \Delta b)] \approx \\ N_1 + (N_1 - N_2)b + (n_1 - n_2)k_0 \frac{db}{dk_0}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $N_1 = \frac{d}{dk_0} (k_0 n_1)$  和  $N_2 = \frac{d}{dk_0} (k_0 n_2)$  分别为纤芯和包层的群折射率。将  $b$  对  $k_0$  求导并代入(4)式,可以得到

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dk_0} &= N_1 + (N_1 - N_2)b + (n_1 - n_2)V \frac{db}{dV} \approx \\ N_1 + (N_1 - N_2) \frac{d(bV)}{dV}, \end{aligned} \quad (5)$$

而群时延  $\tau = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{d\beta}{dk_0} \frac{dk_0}{d\omega} = \frac{d\beta}{dk_0} / c$ ,故而可以通过求解(5)式中的群折射率  $N_1, N_2$  和  $\frac{d(bV)}{dV}$  来

求解群时延。可以通过数值计算的方法得到  $\frac{d(bV)}{dV}$  随  $V$  变化的曲线,进而得到群时延随波长  $\lambda$  的变化曲线,完成对  $\tau_1$  的求解。

采用数值计算方法,得到 G. 652 光纤中群时延随波长  $\lambda$  的变化曲线如图 2 所示。

通过曲线可以得出不同工作波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  光信号的群时延,在测得来回链路传输总时延  $\tau_{sum}$  的基

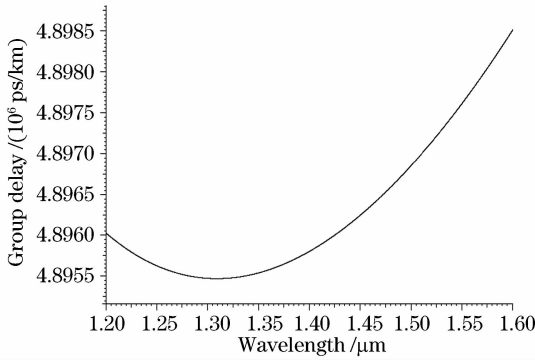


图 2 G. 652 光纤的群时延特性

Fig. 2 Group delay of G. 652 optical fiber

基础上,根据  $\tau_{diff} = L/v_{g1} - L/v_{g2}$  便可以估算出来回链路传输群时延差  $\tau_{diff}$ ,同时也可以估算信号单程传输时延  $\tau_1$ ,为光缆授时系统提供精度保证。

表 1 所示为结合群时延特性曲线使用时延估算方法,计算出的不同工作波长在传输 1000 km 后的来回链路时延差  $\tau_{diff}$  和信号单程传输时延  $\tau_1$ 。表中

表 1 不同的工作波长传输 1000 km 后的群时延差值和单程传输时延

Table 1 Differential group delay and the outgoing path transfer delay with different wavelengths

$\lambda_1$ /nm	$\lambda_2$ /nm	$\tau_{sum}$ /ns	$\tau_{diff}$ /ns	$(\tau_{sum}/2)$ /ns	$\tau_1$ /ns	$\Delta = (\tau_{sum}/2 - \tau_1)$ /ns
1550.12	1550.52	9795232.4	6.6	4897616.20	4897612.9	3.3
1527.22	1598.04	9795722.5	1228.9	4897861.25	4897246.8	614.45
1310.00	1550.00	9793080.4	2141.4	4896540.20	4895469.5	1070.7

### 3 高精度授时系统中的时延估算仿真

图 3 为使用光纤通信系统仿真软件仿真的不同波长光信号在同一根 G. 652 光纤上传输时由色散引起的传输群时延差。图 3(a) 所模拟系统中两个激光器中心频率分别为 193.40 THz (1550.12 nm) 和 193.35 THz (即间隔 0.4 nm, 波长为

$\Delta = \tau_{sum}/2 - \tau_1$  显示取环路时延一半作为单程传输时延与由时延估算法得到的单程环路时延之间的差值。表中传输总时延的取值是在确定链路长度 (1000 km) 之后利用 (1) 式反推出来的,确定链路总长度的目的是为了便于仿真。

由表 1 可以看出在光缆高精度授时系统中取环路时延的一半作为信号传输时延会对系统授时精度带来的误差,此误差的大小正好为来回链路传输群时延差的一半。工作波长间隔小、传输距离小时,此误差不是太明显,但工作波长间隔变大、传输距离变大时,此误差将变得不可忽略。如在 G. 652 光纤中,工作波长取 1550.12 nm 和 1550.52 nm,传输 1000 km,由来回链路传输群时延差带来的授时误差约为 3.3 ns;但当工作波长取 1310 nm 和 1550 nm,传输 1000 km 时,此误差为 1070.7 ns。因此群时延差必须进行补偿才能保证长距离授时的精度要求。

1550.52 nm), 光纤在 1550.12 nm 附近色散系数设置为 16.6 ps/(nm·km), 色散斜率设置为 0.057 ps/(nm<sup>2</sup>·km), 光纤长度为 1000 km, 仿真结果显示两个光信号先后到达接收端,其群时延差约为 6.67 ns,与理论计算结果吻合得较好。

图 3(b) 所示为增大工作波长间隔后的仿真结

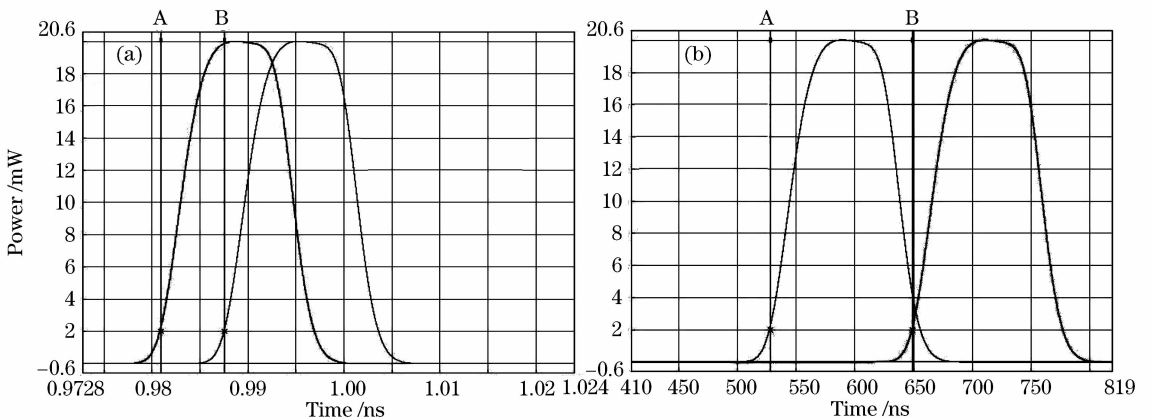


图 3 不同波长的光传输 L 后的时延差

Fig. 3 Differential group delay of two optical signals transmitted L km

(a)  $\Delta\lambda = 0.4$  nm,  $L = 1000$  km; (b)  $\Delta\lambda = 70.82$  nm,  $L = 100$  km

果。仿真所模拟的系统中工作波长均靠近密集波分复用(DWDM)系统建议波长的上下两个极限波长,分别为 196.30 THz (1527.22 nm) 和 186.20 THz (1598.04 nm),光链路在1527.22 nm处色散系数设置为 15.33 ps/(nm·km),色散斜率设置为 0.057 ps/(nm<sup>2</sup>·km),链路长度设置为100 km。仿真结果显示两个光信号的群时延差约为121.18 ns,根据时延差与链路长度的线性关系知链路长度为1000 km时群时延差将会是1211.8 ns,这与理论计算的群时延差同样吻合的较好。

仿真结果表明在标准的 DWDM 系统工作波长范围内,用本文提出的时延估算方法结合数值计算所得到的群时延差都与实际情况相符,可以为基于光网络的高精度授时系统提供精确的信号单程传输时延估算。

## 4 结 论

在采用 WDM 技术的光纤高精度、长距离授时系统中,必须考虑色散导致的来回链路传输时延的不对称问题,时延估算方法可以较好地对时延差进行补偿,提高了授时精度。需要指出的是,由多段光纤链路组合而成的实际长距离授时信道色散系数与估算补偿法所采用的理论值之间仍然存在随机误差,在授时系统设计时必须加以考虑。

## 参 考 文 献

- 1 Atsushi Imaoka, Masami Kihara. Time signal distribution in communication networks based on synchronous digital hierarchy [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, **45**(2):247~253
- 2 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
- 3 Masami Kihara, Atsushi Imaoka. System Configuration for standardizing SDH-based time and frequency transfer [C]. European Frequency Time Forum, 5~7 March 1996 Conference Publication No. 418. 465~470
- 4 S. R. Jefferts, M. A. Weiss, J. Levines *et al.*. Two-way time transfer through SDH and SONET system [C]. European Frequency Time Forum, 5 ~ 7 March 1996 Conference Publication No. 418. 461~464
- 5 M. A. Weiss, S. R. Jefferts, J. Levine *et al.*. Two-way time and frequency transfer in SONET [C]. IEEE International Frequency Control Symposium, 1996. 1163~1168
- 6 Steven R. Jefferts, Marc A. Weiss, J. Levine *et al.*. Two-way time and frequency transfer using optical fiber [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, **46**(2):209~211
- 7 C. Lopes, B. Riondet. Ultra precise time dissemination system [C]. The IEEE International Frequency Control Symposium Joint Meeting of the European Volume 1, Issue, 1999. 296 ~ 299
- 8 Atsushi Imaoka, Masami Kihara. Accurate time/frequency transfer method using bidirectional WDM transmission [J]. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1998, **47**(2):537~542
- 9 Li Yuquan, Cui Min. Theory and Technology of Optical Waveguide [M]. Beijing: Post & Telecommunications Press, 2002. 160  
李玉权,崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2002. 160