

基于单向传输的光纤时延波动测量

魏 恒^{1,2}, 卢 麟¹, 蒲 涛¹, 郑吉林¹, 赵继勇¹, 张宝富¹, 吴传信¹

(1. 陆军工程大学通信工程学院, 江苏南京 210007;
2. 中国人民解放军 31103 部队, 江苏南京 210016)

摘要: 为了与现有光纤通信网络兼容, 研究了一种基于单纤单向传输的光纤时延波动测量方法。基于色散温变效应和 Sellmeier 等式, 建立了利用温度的准确测量和双波长光信号传输时延差波动反推单向时延波动的比例模型。令模型中的比例系数是单波长时延波动和双波长时延差波动的比, 仿真研究了温度和波长差对比例系数的影响。搭建了 75 km 光纤单向时延波动测量实验平台, 实验结果表明: 实测比例系数-258.4 接近于理论比例系数-277.3, 对应单向传输时延波动误差为 660 ps, 实验结果验证了模型的正确性和基于单向传输的光纤时延波动测量的可能性。

关键词: 单纤单向; 时延波动测量; 色散温变效应; Sellmeier 等式

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200018

Fiber time delay fluctuations measurement based on one-way transfer

Wei Heng^{1,2}, Lu Lin¹, Pu Tao¹, Zheng Jilin¹, Zhao Jiyong¹, Zhang Baofu¹, Wu Chuanxin¹

(1. College of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;
2. Unit 31103 of PLA, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to be compatible with the existing optical communication network, a time delay fluctuations measurement based on "single-fiber one-way" transfer scheme was proposed. Based on the temperature-induced variation of group velocity dispersion effect and Sellmeier equation, a proportionality model for calculating the one-way delay fluctuations was established with detecting the delay difference fluctuations between two propagating optical signals at given different wavelengths and accurate temperature measurement. Assuming proportionality coefficient in the model was the ratio between one-way delay fluctuations and one-way dual wavelength delay difference fluctuations. By simulation, the impact of fiber link parameters, such as temperature and wavelength difference, on proportionality coefficient was discussed. The experimental platform for one-way time transfer over 75 km fiber was conducted and the experimental results show that the measured proportional coefficient is -258.4, close to the theoretical proportional coefficient -277.3, and the corresponding one-way delay variation error is 660 ps. The measured results validate the correctness of the proposed model as well as the possibility of fiber time delay fluctuations measurement based on one-way transfer.

Key words: single-fiber one-way; delay fluctuations measurement; temperature-induced variation of group velocity dispersion; Sellmeier equation

收稿日期:2020-05-01; 修订日期:2020-06-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61373393; 61371121)

作者简介:魏恒(1989-),男,博士生,主要从事光纤时频传递等方面的研究工作。Email: weiheng63@163.com

导师简介:蒲涛(1974-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光通信等方面的研究工作。Email: nj_putao@163.com

0 引言

现有高精度光纤时延波动测量方案基本都是通过测量一根光纤内往返光信号的时延差来获得单向时延波动,即属于“单纤双向”传输方式^[1-3]。而现有光纤通信网络均采用“单纤单向”传输方式,并且广泛使用的光放大器如 EDFA^[4] 等设备均为单向工作。因此,已有的时延波动测量方案难以与现有光网络业务共用同一光纤链路,必须采用专用光纤,而铺设或租用数千里专用光纤链路的高昂成本严重阻碍了相关方案的实际应用^[5]。若对现有光纤链路进行双向改造,成本会非常高昂,不仅在于重新铺设的费用高,而且改造意味着要中断现有网络通信,对网络带来的未知影响也是很难承受的。此外,海底光缆网中根本无法通过链路改造解决该问题。因此需要研究基于单向传输的光纤时延波动测量方案,使其具备兼容性和高精度特点。已有研究给出的单向时延波动补偿方案都是通过稳定单向双波长时延差波动达到链路单向时延波动的稳定控制^[6-9],并没有实时延迟的测量结果。

论文提出了一种与现有“单纤单向”光通信传输体制兼容的光纤传输时延波动测量方法,基于光纤色散温变效应^[10-11]的基本原理和 Sellmeier 等式,建立了以双波长光信号传输时延差波动反推单向时延波动的数学模型。在给定起始温度、温变范围和波长的条件下计算理论单波长时延波动和双波长时延差波动的比例系数,通过测量双波长时延差波动高精度计算单向时延波动。对该模型进行了实验研究,实验结果验证了该模型的正确性和所提方法的可行性。

1 光纤单向传输时延波动测量原理

由于在 1 550 nm 窗口,单模光纤中材料色散占主导,可以假设光纤链路传输时延波动完全受材料色散的影响。对于波长为 λ 的光信号来说,其在单模光纤中传播一段距离 L ,材料色散引起的群时延 τ 为:

$$\tau = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (1)$$

式中: n 是光纤的折射率; c 是真空中光速。

根据公式 (1),长度一定的光纤中的传输时延主要受折射率 n 和波长 λ 的影响。这意味着两个波长不

同的光信号,在相同的光纤中传播速度不同。由材料色散的定义,可以得出单向传输时延关于温度的导数,即单波长单向传输时延波动为:

$$\left. \frac{d\tau}{dT} \right|_{\lambda_N} = \frac{1}{c} \left[\frac{dL}{dT} \left(n_{\lambda_N} - \lambda_N \frac{dn_{\lambda_N}}{d\lambda_N} \right) + L \left(\frac{dn_{\lambda_N}}{dT} - \lambda_N \frac{d^2 n_{\lambda_N}}{d\lambda_N dT} \right) \right], \quad N = 1, 2 \quad (2)$$

其中 $N = 1, 2$ 代表该表达式代入两个不同波长对应的两个函数。可以发现,不同波长对应的单向时延波动不相同。如果公式 (2) 中两个函数相减结果不等于零,则可以计算光纤路径中双波长传输延迟差的波动,表达式如下所示:

$$\left. \frac{d\tau}{dT} \right|_{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{1}{c} \left[\frac{dL}{dT} \left((n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}) + \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right) + L \left(\frac{d}{dT} \left((n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}) + \lambda_2 \frac{dn_{\lambda_2}}{d\lambda_2} - \lambda_1 \frac{dn_{\lambda_1}}{d\lambda_1} \right) \right) \right] \quad (3)$$

根据公式 (3) 提出了光纤单向时延波动测量方法,原理图如图 1 所示。本地站时钟 A 发送时间信号给两个激光器,分别以 λ_1 和 λ_2 两个不同波长的光信号经过长距离光纤传输至终端站,经过光电探测器转换后由时间间隔测量设备测量出两个信号的到达时间差。则公式 (3) 中两个波长光信号之间的时延差波动可以在终端站测量得到。如果能够找到双波长时延差波动与单向传播时延波动之间的理论量化对应关系,则可以由实测的双波长传递时延差波动反推出单向时延波动。

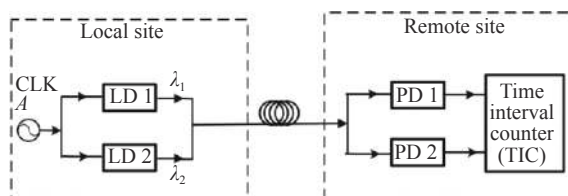


图 1 光纤单向时延波动测量原理图

Fig.1 Schematic of fiber one-way time delay fluctuations measurement

由公式 (3) 可知,两种波长的折射率和光纤长度都独立地受温度的影响,在此基础上可以计算和测量传输时延差的变化。由于光纤的热胀冷缩系数约为 7 ppm/°C,光纤长度随温度变化而导致的传输时延远小于材料色散,为方便计算,文中忽略光纤热胀冷缩对单向时延波动的影响。

为了得到双波长时延差波动与单向传播时延波

动之间的理论量化对应关系,定义比例系数 M 是同一单模光纤内单波长光信号时延波动与双波长光信号时延差波动的比,忽略光纤的热胀冷缩效应,根据公式 (2) 和公式 (3) 可得比例系数 M 为:

$$M = \frac{\left. \frac{d\tau}{dT} \right|_{\lambda_1}}{\left. \frac{d\tau}{dT} \right|_{\lambda_1-\lambda_2}} = \frac{\frac{L}{c} \left(\frac{dn_{\lambda_1}}{dT} - \lambda_1 \frac{d^2 n_{\lambda_1}}{d\lambda_1 dT} \right)}{\frac{L}{c} \left(\frac{dn_{\lambda_1}}{dT} - \frac{dn_{\lambda_2}}{dT} + \lambda_2 \frac{d^2 n_{\lambda_2}}{d\lambda_2 dT} - \lambda_1 \frac{d^2 n_{\lambda_1}}{d\lambda_1 dT} \right)}$$

$$= \frac{\frac{dn_{\lambda_1}}{dT} - \lambda_1 \frac{d^2 n_{\lambda_1}}{d\lambda_1 dT}}{\frac{dn_{\lambda_1}}{dT} - \frac{dn_{\lambda_2}}{dT} + \lambda_2 \frac{d^2 n_{\lambda_2}}{d\lambda_2 dT} - \lambda_1 \frac{d^2 n_{\lambda_1}}{d\lambda_1 dT}} \quad (4)$$

由上式可知,比例系数与温变范围、光波长、光纤折射率等条件有关。Sellmeier 等式是描述特定光学介质材料的折射率随温度变化和波长的经验关系式。可以通过温度及波长的相关参数来精确预测光在特定介质中的色散关系,受温度和波长影响的折射率具有以下形式^[12]:

$$n^2(\lambda, T) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i(T) \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)} \quad (5)$$

式中: $S_i(T)$ 是在特定温度下材料的共振强度参数, T 是温度; λ 是传播的光信号波长。在 Sellmeier 等式这种近似经验关系式下,共振强度参数 $S_i(T)$ 和波长参数不再具有直接的物理意义,而是用于生成与经验数据足够匹配的拟合参数。

综上,光纤单向传输时延波动测量的基本原理是:通过精确测量温度和利用 Sellmeier 等式实时计算出给定光波长的光纤的折射率,进而计算出实际使用的双波长光信号对应的比例系数 M ,从而可以将测得的双波长时延差波动乘以该比例系数 M ,最后反推出单向时延波动,如公式 (6) 所示:

$$\text{单波长时延波动} = \text{测得双波长时延差波动} * M \quad (6)$$

2 光纤链路参数对比例系数的影响

当光纤传输距离较大时,由于大量的传输介质在室外,光纤的传播特性会随环境温度的变化的而随之变化。由于光纤中光信号的色散是光纤折射率的函数,而折射率 $n(\lambda, T)$ 是光信号波长和温度的函数,因而比例系数与三个参量有关,分别是起始温度,温变范围以及选用的光信号波长。

图 2 是 150 km 光纤链路在不同温度区间内,波长为 1 530 nm 和 1 560 nm 光信号传输时延随光纤温度变化对应的比例系数。其中比例系数为负数代表的是单向时延波动与双波长时延差波动的趋势相反。圆标曲线代表的温度区间为 0 ~ 30 °C,三角标曲线代表的温度区间为 10 ~ 40 °C。由图中可以看出虽然两者温度变化都是 30 °C,但由于起始温度不一样,两条曲线并不相等。并且起始温度越高,温度变化相同时,比例系数的绝对值越小,则在同样的双波长时延差波动的情况下,对应计算出的单向时延波动越小。并且起始温度固定时,温变越大,比例系数的绝对值越小。由于不同温度区间内,相同波长传输下对应的比例系数不同,所以需要准确测量出温度的变化,计算相应的比例系数,从而反推单波长单向传输时延波动。

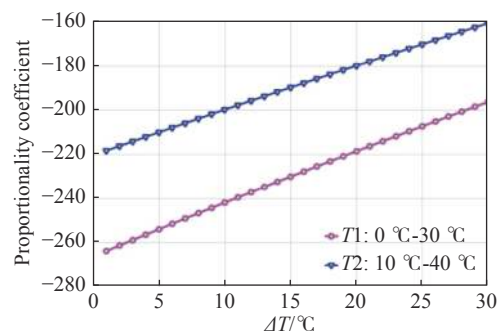


图 2 150 km 光纤不同温度区间变化时对应的比例系数仿真

Fig.2 Simulated proportionality coefficient with different temperature ranges via 150 km fiber

图 3 为起始温度为 0 °C,温度变化区间为 0 ~ 40 °C 时,150 km 长的单模光纤链路中不同波长差随光纤温度变化对应的比例系数。图中各曲线由上至下对应的波长间隔依次为 17 nm、22 nm 和 30 nm,依次分别对应于 1 530 nm 和 1 547 nm,1 530 nm 和 1 552 nm,1 530 nm 和 1 560 nm 三组不同波长差光信号随光纤温度变化对应的比例系数仿真结果。

从图中可以看出,不同波长差对应的三条曲线随着温变的增加都是呈单调上升趋势,说明随着温变的增加,单波长时延波动与双波长时延差波动的比例系数的绝对值都是呈下降趋势。并且,在相同温度变化的条件下,随着波长差的增大,比例系数的绝对值相应减小。则较大波长差的测量误差对单波长时延差

的估计精度的误差影响较小,所以在实际应用中,最好选择较大的波长差作为双波长检测信号。

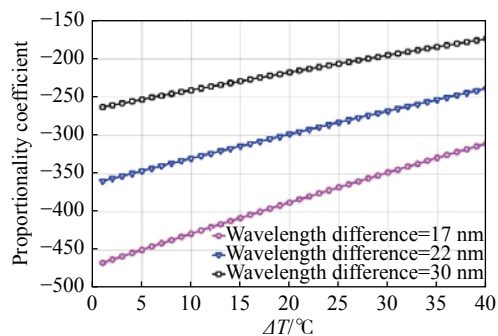


图 3 150 km 光纤不同波长差对应的比例系数仿真

Fig.3 Simulated proportionality coefficient with different wavelengths difference via 150 km fiber

3 验证实验

光纤单向传输时延波动测量实验框图如图 4 所示。其中, LD 是激光器; OC 是光耦合器; TC 是温控箱; OF 是光带通滤波器; PD 是光检测器; AMP 是射频功率放大器; TIC 是时间间隔计数器。

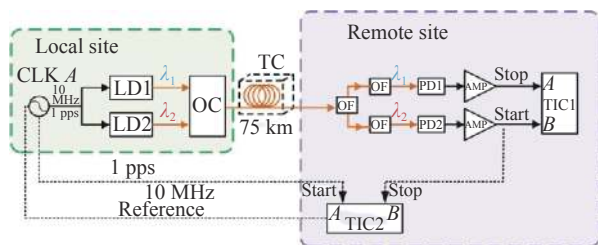


图 4 光纤单向传输时延波动测量实验

Fig.4 Experiment on one-way fiber delay fluctuations measurement

为便于性能评估,本地站与终端站及光纤设备都放置在同一实验室内。本地站与终端站通过 75 km 的 G.652 单模光纤连接,光纤链路由光纤盘模拟替代。光纤盘放置在可编程恒温实验箱内精确控制温度,温控精度可以达到 0.1°C。由于该实验需要严格控制光纤的温度变化,并且要尽可能保证光纤盘内光纤温度的一致性,将温控箱设定为由 10°C 线性升高至 17°C,时间间隔为 30 min 升高 1°C,以保证光纤盘整体的温度变化。将温控箱内初始温度恒定在 10°C 2 h,以模拟光纤埋在地底或海底温度状态。

在本地站,时钟 A(FS725 铷原子钟)提供 1PPS 秒脉冲时间信号和 10 MHz 频率标准信号。秒脉冲时间信号经过功分器分成两路,一路作为型号为 KEYSIGHT

53230A 时间间隔计数器 (TIC2) 的起始时间 (start),一路通过调制激光器 (LD2) 将秒脉冲信号发送到终端站。激光器 LD2 产生的光信号波长为 $\lambda_2 = 1530.3$ nm,对应于 DWDM—C 波段的 C59 波段。10 MHz 频率标准信号除了作为时间间隔计数器的频标参考信号,还作为时间信号经过调制激光器 LD1 后与 LD2 发出的光信号通过 2×1 光耦合器 (OC) 共同进入光纤链路。激光器 LD1 产生的光信号波长为 $\lambda_1 = 1552.5$ nm,对应于 C31 波段,与 λ_2 相差 22.2 nm。为了避免光功率过高导致光纤链路产生布里渊散射等非线性效应,将两个激光器的输出光功率都限定在 0 dBm 左右。

在终端站,光信号经过 1×2 光耦合器 (50:50) 被均分成两路,两路信号分别经过相应的光带通滤波器 (OF),再经光检测器 (PD2) 光电转换恢复为原信号并经功率放大器放大电功率。将 λ_2 对应的恢复信号作为时间间隔计数器 (TIC1) 的起始时间 (start),将 λ_1 对应的恢复信号作为停止时间 (stop),可以测得双波长光信号的时延差波动。

另外,在终端站, λ_2 对应的恢复信号经功分器又分出一路信号作为时间间隔计数器 (TIC2) 的停止时间 (stop),以测试单波长 λ_2 的单向延迟波动。TIC2 使用的也是 KEYSIGHT 53230A 时间间隔测量仪,其测量分辨率为 20 ps。

实验的目的是验证双波长时延差波动与单波长时延波动之间的量化关系,从而验证基于单纤单向的光纤传输时延波动测量方法的可行性。实验通过 TIC1 来得到双波长光信号传输时延差,图 5 是时间间隔测量仪 TIC1 的实测数据,即 75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差的实测数据图。

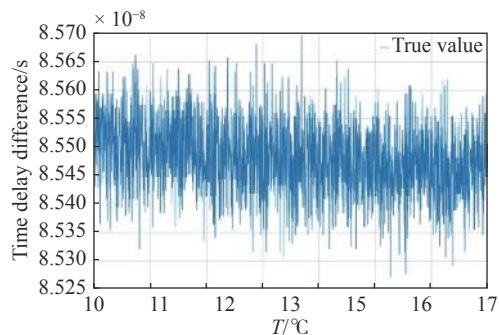


图 5 75 km 光纤双波长传输时间延迟差的实测数据图

Fig.5 Measured data of transfer time delay difference with dual-wavelength via 75 km fiber

由上图可看出在 75 km 单模光纤链路中,随着温度的升高,给定双波长光信号单向传播到达的时间延迟差相应减小。由于该组实验观测到的数据中包括系统中的噪声和其他干扰,无法直接计算出双波长时延差,需要通过卡尔曼滤波利用目标的动态信息进行最优估计,减少噪声的影响,也可看作是滤波过程。

图 6 是 75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差的卡尔曼滤波数据图。选取图中较为平坦的一段数据(温度为 11~17 °C)进行计算验证。由取得的数据可知,在实验温度为 11 °C 时,75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差为 8.55073×10^{-8} s。在温度上升 6~17 °C 后,传输时延差降低至 8.54722×10^{-8} s。则可知在温变为 6 °C 时,75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差的波动为 -3.51×10^{-11} s。

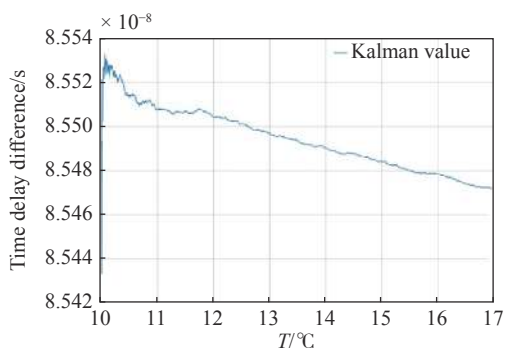


图 6 75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差的卡尔曼滤波数据图
Fig.6 Kalman data of transfer time delay difference with dual-wavelength via 75 km fiber

图 7 是时间间隔测量仪 TIC2 数据图,即 75 km 光纤 $\lambda_2 = 1530.3$ nm 单波长单向传递时延数据图,其中图 7(a) 是实测数据,图 7(b) 是相应卡尔曼滤波值。为了与双波长时延差选取数据段对应,此处也选取温度区间为 11~17 °C 的实验数据。由取得的观测数据可知,在实验温度为 11 °C 时,75 km 光纤单波长传递时间延迟为 3.7174625×10^{-4} s。在温度上升 6~17 °C 后,75 km 光纤单波长传递时间延迟为 3.7175532×10^{-4} s。则由实验数据可知在温变为 6 °C 时,75 km 光纤链路中单波长光信号实际传输时间延迟波动为 9.07×10^{-9} s。而测得 75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差的波动为 -3.51×10^{-11} s,则可计算出单波长时延波动与双波长时延差波动实测比例系数为 -258.4。

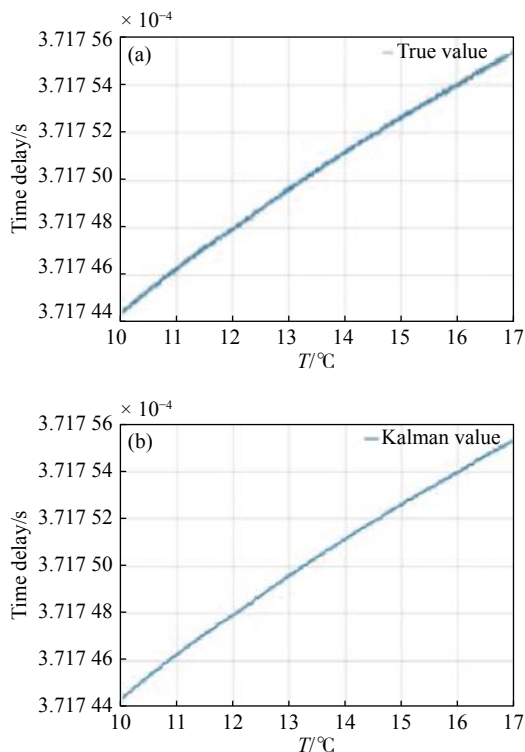


图 7 75 km 光纤单波长单向传递时间延迟数据图。(a) 实测数据, (b) 卡尔曼滤波值
Fig.7 One-way transfer time delay with single-wavelength via 75 km fiber. (a) True value, (b) Kalman value

图 8 是 75 km 光纤波长差为 22.2 nm(1530.3 nm 和 1552.5 nm) 时不同温变对应的比例系数仿真图,温变的起始温度是 11 °C。可以看出温度升高 6 °C 时,仿真比例系数为 -277.3,接近于实测比例系数 -258.4。

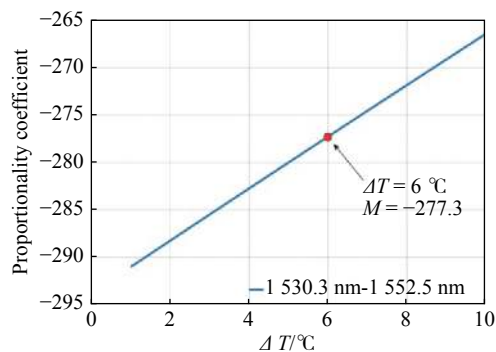


图 8 75 km 光纤波长差为 22.2 nm 时对应的比例系数仿真
Fig.8 Simulated proportionality coefficient with wavelengths difference at 22.2 nm via 75 km fiber

由于 75 km 光纤双波长光信号传输时间延迟差的波动为 -35.1 ps,而比例系数的仿真结果为 -277.3,

若进行时延补偿计算,则对应的需要补偿单向传输时延波动计算值为 9.73 ns,而真实测出的单向传输时延波动为 9.07 ns,误差为 660 ps。验证了文中提出的测量双波长光信号传输时延差波动反推单向时延波动的数学模型的正确性。

需要说明的是,该实验是通过温控箱来缓慢改变光纤环境温度来准确控制光纤温度变化,而在实际应用中,可以采用环境测温系统^[13-15]等方法来得到温度变化的准确值以计算比例系数。

4 结 论

文中研究了一种基于单纤单向的光纤传输时延波动的测量方法。依据色散温变效应可根据光纤温度和双波长光信号计算比例系数,再利用传输时延差波动的测量结果反推单向时延波动。仿真研究了波长差和温度等参数对比例系数的影响,结果表明:温变相同时,起始温度越高,波长差越大时,比例系数的绝对值越小。选择波长差大的双波长测量有助于抑制测量误差,可以更精确地反推出单向时延波动。进行了 75 km 光纤单向传输时延波动测量实验研究,分别测量双波长光信号传输时延差波动与实际单向时延波动,计算出了实际使用的双波长光信号对应的比例系数-258.4,对应的理论比例系数为-277.3。75 km 光纤对应的需要补偿单向传输时延波动计算值为 9.73 ns,测得单向传输时延波动真实值为 9.07 ns,对应单向传输时延波动误差为 660 ps,从而验证了所提方法的可行性。

参考文献:

- [1] Zhao Xiaoyu, Lu Lin, Wu Chuanxin, et al. Ring fiber network based multipoint time-frequency dissemination method with high precision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0606002. (in Chinese)
- [2] Łukasz Sliwczynski, Przemysław Krehlik. Multipoint joint time and frequency dissemination in delay-stabilized fiber optic links [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015, 62(3): 412-420.
- [3] Yu Longqiang, Wang Rong, Lu Lin, et al. Large-dynamic-range time pre-compensation scheme for fiber optic time transfer [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(6): 1757-1762.
- [4] Jiang Haoqi, Zhao Dong, Chen Yongchao, et al. A noise estimation method for characterizing EDFA amplified broadband spectrum light source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0717006. (in Chinese)
- [5] Wu Guiling, Chen Jianping. Ultra-long haul high-precision fiber-optic two way time transfer [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(16): 99-103. (in Chinese)
- [6] Ebenhag S C, Hedekvist P O, Johansson J. Fiber based one-way time transfer with enhanced accuracy[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum. IEEE, 2010: 1-6.
- [7] Ebenhag S C, Hedekvist P O, Jaldehag K. One way time transfer utilizing active detection of propagation delay variations of dual wavelengths in an optical fiber network[C]//Proceedings of the 43rd Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2011: 9-16.
- [8] Hanssen J L, Crane S G, Ekstrom C R. One-way temperature compensated fiber link[C]//2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings. IEEE, 2011: 1-5.
- [9] Hanssen J L, Crane S G, Ekstrom C R. One-way two-color fiber link for frequency transfer[C]//2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. IEEE, 2012: 1-4.
- [10] Wei Heng, Lu Lin, Zhao Xiaoyu, et al. Analysis on one-way dual wavelength time transfer via fiber link based on TIVGVD[C]//14th National Conference on Laser Technology and Optoelectronics (LTO 2019). International Society for Optics and Photonics, 2019, 11170: 111703A.
- [11] Fang Wei, Ma Xiurong, Guo Honglei. Chromatic dispersion measurement of optical fibers[J]. *Optical Communication Technology*, 2006, 30(9): 24-26. (in Chinese)
- [12] Leviton D B, Frey B J. Temperature-dependent absolute refractive index measurements of synthetic fused silica[C]//Optomechanical Technologies for Astronomy. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6273: 62732K.
- [13] Jin Y T, Liu J B, Zhang X T. The high precision sea-water temperature detection system design [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2011, 34(5): 542-545. (in Chinese)
- [14] Huang X W, Zang Y Y, Wang J Y. Study on 500kv submarine cable temperature on-line monitoring of hainan grid interconnection system [J]. *Electric Wire & Cable*, 2014(6): 27-30. (in Chinese)
- [15] Zhang Xueqiang, Sun Bo, Jia Jing. Experimental investigation on temperature sensitivity enhancement of fiber Bragg grating sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1118003. (in Chinese)