

基于时频共传的光纤链路时延测量方法

郭俊成, 卢麟*, 吴传信, 张宝富, 魏恒, 赵晓宇

陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 针对光纤链路大量程、高精度时延的测量要求,提出了秒脉冲信号与频率信号同波长共传方案。该方案将秒脉冲计数法粗测与频率信号比相法细测的结果拼接组合,以实现光纤链路真时延的高精度测量。搭建了实验测量系统,验证了粗、细测量结果的一致性,测量了剧烈温变条件下 25 km 光纤链路的绝对时延及其时延变化。实验结果表明,该方法能够将脉冲计数法的大量程优势和相位测量法高分辨率优势有效融合。

关键词 光纤光学; 时延测量; 大量程; 分辨率

中图分类号 TN913.1+2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0906003

Time Delay Measurement of Optical Fiber Link Using Time-Frequency Joint Transfer

Guo Juncheng, Lu Lin*, Wu Chuanxin, Zhang Baofu, Wei Heng, Zhao Xiaoyu

Institute of Communication Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract A joint transfer scheme of frequency and one pulse-per-second time signals based on the same wavelength is proposed to meet the time delay measurement requirements of large-range and high-precision fiber-optic links. The scheme combines the coarse results of the one pulse-per-second time counting method and fine results of frequency signal phase-comparison method to achieve high-precision and large dynamic measurement of the true delay of the fiber link. We construct an experimental system to verify the consistency of the coarse and fine measurements and measure the absolute delay of the signal over 25 km of optic fibers under severe temperature change conditions. The experimental results demonstrate that the proposed method can effectively combine the large-range advantage of the one pulse-per-second counting method with the high-resolution advantage of the phase measurement method.

Key words optical fiber; delay measurement; large-range; resolution

OCIS codes 060.2310; 060.2300; 060.2360

1 引 言

光纤链路时延的高精度、大量程测量在时频传递、光载无线通信和分布式多基站^[1-2]等系统中有重要应用。目前,基于光纤链路的时延测量方法主要分为两种:一种是基于高速计数、游标法和延迟线内插法^[3-6]的脉冲飞行时间测量法,该方法的测量量程可达秒级,但测量分辨率不高,成熟的测量仪表或芯片的分辨率一般在几十皮秒,某些新近报道的时延测量工具^[7-9]可达皮秒量级,可认为是时延“粗”测量法;另一种是相干测量法,通常采用光载射频和光梳等方式^[10-13]比对往返信号相位,时延测量的分辨率甚至可达飞秒量级,可认为是时延“细”测量法,但通

常由于相位模糊等问题,量程通常限制在数十千米内,无法实现大动态范围的长距离测量。文献[14-16]中将粗测量和细测量结合,提出了零相位固定和调制相移等方法,虽可同时实现大量程和高精度测量,但存在分辨率不高、时延不确定性大、测量方案复杂和测量数据不稳定等问题。

本文基于秒脉冲信号与频率信号同载波传输,提出粗、细测量结合的光纤时延测量方法,搭建了实验平台,验证了该方案粗、细测量结果的一致性。在测量系统初始校准实验的基础上,完成了 25 km 光纤链路的时延测量,该方法能够将脉冲飞行时间测量法的大量程优势和相干测量法的高分辨率优势有效融合。

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-04-04; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61673393,61371121)

* E-mail: Nj_lulin@163.com

2 时频共传时延测量方法

2.1 时频共传测量原理

时频共传的核心是由发射模块将时间秒脉冲(1PPS)信号与频率信号调制到同一光载波上,两种信号在光纤中同时往返传输,保证时延完全相同,并测量链路中不同的时延部分,其测量时序如图1所示。首先,由时钟产生一个同源同相的秒脉冲信号和频率信号,两种信号以复用方式在同一根光纤中往返传输。若原子钟输出频率信号的周期为 T ,则频率信号相邻的两个上升沿或下降沿之间的时间间隔将严格等于 T 。理论上,任何链路时间间隔都可被划分为 T 的整数倍部分和不足 T 的部分。假设单向时延为 τ ,设不足 T 的部分为 $\Delta\tau$,则总的链路时延 2τ 为

$$2\tau = N \times T + \Delta\tau. \quad (1)$$

总时延 2τ 可分解为如图1所示的 $N \times T$ 和 $\Delta\tau$ 两个部分,其中 N 为计数器示值,即发送秒脉冲信号开始触发时计数,返回秒脉冲信号返回本地端时停止计数。第一部分是整数周期内的时延。第二部分是小于一个周期的 $\Delta\tau$ 时延,该部分时延由具有相位测量功能的比相器比较本地频率(input frequency)信号与返回频率(return frequency)信号之间的相位差所得。以100 MHz频率信号为例,由于其周期为10 ns,粗测结果可以取10 ns量级,10 ns以内的细测结果由往返的100 MHz信号比相测得,对粗、细测量结果进行拼接,即为所测链路的

真时延。由于时钟计数器的粗测范围广、量程大,比相法中频率信号的细测结果的分辨率较好,故这种粗、细测量结合的方法能够同时满足大量程、高分辨率的测量要求。

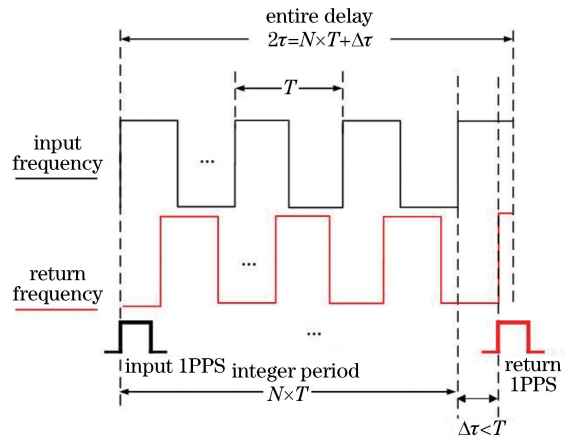


图1 时延测量原理图

Fig. 1 Principle of time-delay measurement

2.2 时频共传测量方案

时频共传测量方案如图2所示,该系统包含3个部分:时频发射模块、测量链路和接收模块。本地端由铷原子钟(CLK)产生100 MHz频率信号,其中,一路分频经过秒脉冲生成模块(PPS)产生秒脉冲信号,作为本地时延粗测单元的start信号,连接到时间间隔测量仪SR620的第1通道(CH1);一路100 MHz信号作为本地端细测单元的本地频率比信号,连接到具有相对相位延迟测量功能的比相器的第1通道(CH1)。

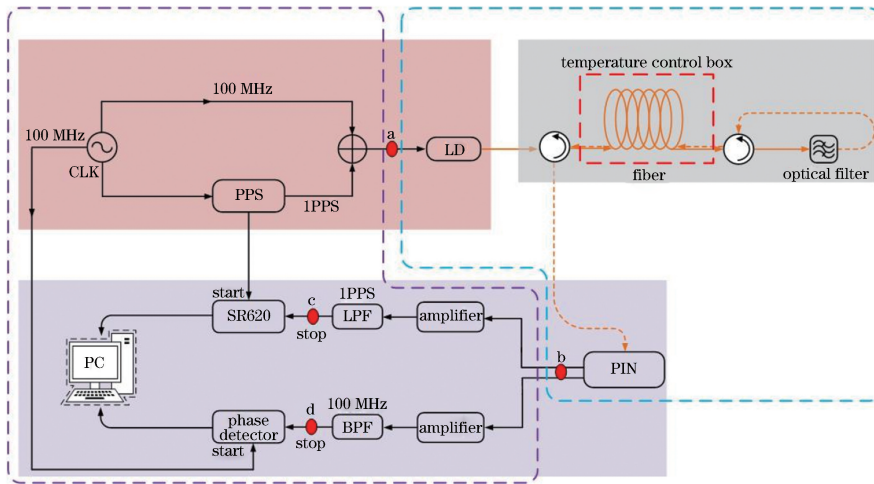


图2 时延测量方案

Fig. 2 Scheme of time-delay measurement

剩余的一路秒脉冲信号与100 MHz信号合路, Tektronix MDO3102示波器所测量a点合路信号

如图3(a)所示,其中,秒脉冲信号按照级数展开形式与100 MHz信号的合路表达式为

$$V_{E0}(t) = A \sum_{n=1}^{+\infty} S_a \left(\frac{2\pi f_{1PPS} n \tau_{1PPS}}{2} \right) \cos(2\pi f_{1PPS} n t) + B \cos(2\pi f_{100M} t), \quad (2)$$

式中: A 、 B 分别为秒脉冲信号和 100 MHz 频率信号的幅度系数; S_a 、 f_{1PPS} 、 f_{100M} 、 n 、 τ_{1PPS} 和 t 分别为抽样函数、1 Hz、100 MHz、调制阶数、脉冲宽度和时间参数。(2)式等号右边第一项为秒脉冲信号按照级数形式展开的表达式;第二项为 100 MHz 频率信号的表达式。合路信号经过激光器调制到光载波上,载波波长为 1545.3 nm。已调合路信号可表示为

$$V_{C0}(t) = \cos(\omega_c t) + \sum_{n=1}^{+\infty} A_n S_a \left(\frac{2\pi f_{1PPS} n \tau_{1PPS}}{2} \right) \cdot \cos(2\pi f_{1PPS} n t) \cos(\omega_c t) + \sum_{n=1}^{+\infty} B_n \cos(\omega_c t \pm 2\pi n f_{100M} t), \quad (3)$$

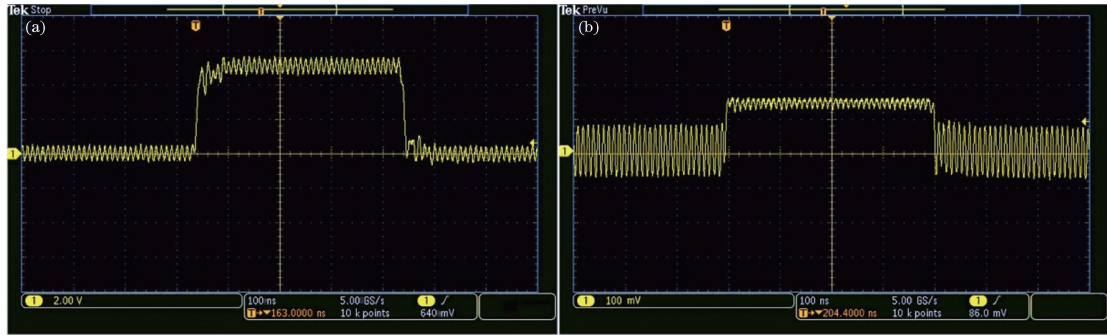


图 3 合路信号波形图。(a)秒脉冲信号和 100 MHz 初始合路信号;(b) PIN 检测的合路信号

Fig. 3 Waveforms of combined signal. (a) Original combined signal of 1PPS and 100 MHz;
(b) combined signal in PIN detection

达式为

$$V_{ET}(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} A'_n \cos[2\pi n f_{1PPS} (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} B'_n \cos[2\pi n f_{100M} (t + \tau)] + \sum_{n=1}^{+\infty} C'_n \cos[2\pi n (f_{1PPS} \pm f_{100M}) (t + \tau)], \quad (4)$$

式中: A'_n 、 B'_n 和 C'_n 分别为检测到的秒脉冲信号、100 MHz 频率信号和两信号拍频的各谐波幅度系数。从(4)式可以看出,时间信号与频率信号在传输的过程中存在相互串扰和高次谐波干扰,故需要对两路混合信号进行滤波处理。由于秒脉冲信号频率为 1 Hz,混合信号通过 87 MHz 的低通滤波器(LPF)后可滤除 100 MHz 频率信号及其高次谐波,恢复出秒脉冲源信号,但因为存在能量损失,需接入饱和放大器来提高秒脉冲信号峰值电压。由于粗测量只取 10 ns 整数台阶的测量结果,放大失真带来的额外抖动在百皮秒量级。因此,

式中: ω_c 为光载波的角速度; A_n 和 B_n 分别为秒脉冲信号与 100 MHz 频率信号的各谐波的幅度系数。从(3)式可看出,由于调制过程中非线性效应的影响,已调光信号理论上存在不同幅值的高次谐波。结合表达式及合路信号的波形图可知,该信号包含了秒脉冲信号中具有指示作用的上升沿和 100 MHz 的频率成分。

光发送信号(图 2 中为黄色实线)通过环形器后输入至 G.652 单模光纤。光纤末端连接另一环形器,经滤波后的返回光信号(图 2 中为黄色虚线)输入至该环形器第二输入口,经由原光纤返回。返回光信号由光电检测器(PIN)检测,在图 2 中 b 点检测到的光电转换信号如图 3(b)所示。可以看到,合路信号相对幅度降低,能量损失严重,返回信号的表

饱和放大不会对测量结果带来劣化影响。经过低通滤波、放大后在图 2 中 c 点测得秒脉冲信号如图 4(a)上半部分所示,下半部分脉冲波形为秒脉冲源信号,两信号峰值电压分别为 2.5 V 和 2.1 V,其上升沿满足时间间隔测量仪 SR620 的判决条件。将恢复的秒脉冲信号作为 stop 连接到 SR620 的第 2 通道(CH2),从而测得链路时延的整数周期部分。

返回的 100 MHz 信号中由于存在很多高次谐波信号,同样需要对信号进行带通滤波器(BPF)处理和放大处理。在图 2 中 d 点测得的恢复 100 MHz 信号如图 4(b)上半部分波形所示,图 4(b)下半部分的波形为 100 MHz 源信号。可以看出,两频率信号由于链路延迟存在明显的相位差,理论上 100 MHz 和秒脉冲信号的拍频未对频率信号产生可观测的影响,满足比相器的测量要求,可将处理后的 100 MHz 频率信号连接到比相器的第 2 通道(CH2)进行细测。

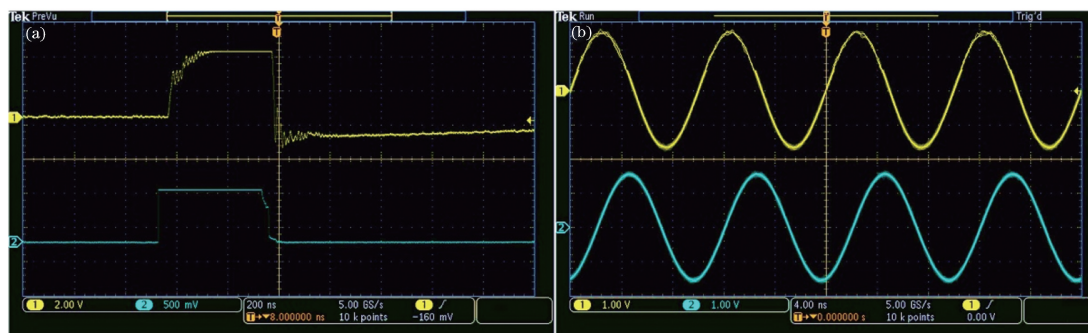


图4 时频信号波形图。(a)秒脉冲信号波形图对比;(b)100 MHz源信号波形图对比
Fig. 4 Waveforms of time-frequency signal. (a) Waveform comparison of 1PPS signal;
(b) waveform comparison of 100 MHz source signal

由上述传输过程看,秒脉冲信号与100 MHz合路信号经光纤往返传输回本地端后,信号经过分路、滤波和放大,可以恢复出满足测量要求的信号。同时,为保证两测量结果同步一致,SR620与比相器的参考信号需为同源同相的高精度时钟源信号,复杂度比单独计数或单独比相的系统高。后续可采用集成化的设计来降低系统复杂度,如采用商用时间间隔测量芯片同时进行粗测量和基于过零检测法的高精度比相测量,可在降低系统复杂度的同时实现集成化。

3 实验与分析

首先对时频共传条件下粗、细测量结果的一致性进行验证,对测量系统本底时延进行初始校准测量,最后对25 km光纤往返链路稳定条件下以及温

度剧烈变化后的链路时延进行测量。

3.1 粗、细测量结果一致性验证

为验证秒脉冲时间信号的粗测结果与100 MHz频率信号的细测结果在链路长度发生变化后,两测量结果的一致性,采用5.0,9.5,14.0,52.0,103.0,279.0 cm的光纤跳线进行系统时延变化比对实验,测量结果如表1所示。依据本方案的粗、细测量原理,由于频率信号为100 MHz,秒脉冲时间信号的粗测结果取到10 ns量级,10 ns以内时延测量部分由细测单元完成。以5.0 cm变化至9.5 cm为例,秒脉冲时间信号的粗测结果与100 MHz频率信号的细测结果变化值分别为0.224 ns和0.22046 ns,两结果受环境温度影响的误差在4 ps以内。粗、细测量结果的均方差分别为63.092 ps和0.0342 ps。由此可知,两种测量方式满足粗细结合的测量条件。

表1 不同长度短光纤时延测量结果

Table 1 Time delay measurement results of short optical fibers with different lengths

Length /cm	5.0	9.5	14.0	52.0	103.0	279.0
Coarse results /ns	1481.520	1481.744	1481.963	1483.868	1486.398	1495.238
Fine results /ns	0.96239	1.18285	1.39971	3.30409	5.83493	4.63068
FTD /ns	1480.96239	1481.18285	1481.39971	1483.30409	1485.83493	1494.63068

表1中以第一组5.0 cm测量结果为例,秒脉冲时间信号时延测量结果为1481.520 ns,100 MHz频率信号的测量结果为0.96239 ns,依据测量原理链路测量时延(FTD)为1480.96239 ns。当所测链路长度由5.0 cm增加至279.0 cm时,其长度变化导致100 MHz频域信号的时延变化率超过一个周期,链路时延粗测变化值为13.718 ns;细测时延变化量也超过一个周期,变化量为13.66829 ns,约等于增加的279.0 cm光纤时延。两测量结果误差在1 ns以内,满足粗、细测量一致性的测量条件。表1中其

余粗、细测量结果随长度变化时依旧满足一致性测量条件,由此证明,随链路长度的增加,秒脉冲时间信号与100 MHz频率信号测量结果在实际测量过程中具有变化一致性。

3.2 25 km 光纤链路测量实验

为研究该方法在光纤链路延迟大范围波动条件下的有效性,将25 km光纤置于温控箱中。对系统底噪时延进行初始校准测量,然后测量温度变化下25 km光纤链路的时延。

1) 初始校准实验在室内稳定环境(16~17 °C)

中进行,系统本底时延的粗、细测量结果如图 5(a)所示,虚线为经过卡尔曼滤波后的结果。其中,系统粗测结果在 88.6~88.7 ns 范围内波动,按照测量原理粗测结果为 80 ns。细测结果如图 5(b)所示,细测本底时延波动范围为 244.10~254.10 ps,细测时延均值为 247.35 ps,故粗、细测量下 FTD 值为 80.24735 ns。

2) 25 km 链路时延及其波动测量 25 km 链路

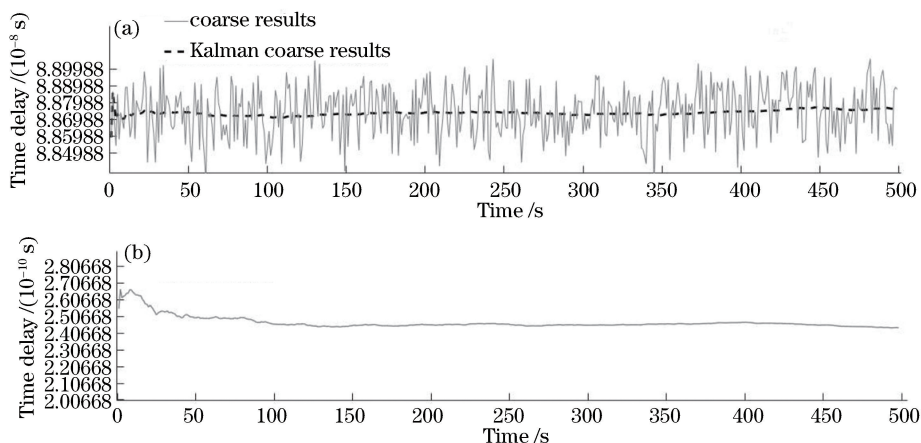


图 5 系统本底时延。(a)粗测结果;(b)细测结果

Fig. 5 Time delay of system background. (a) Coarse results; (b) fine results

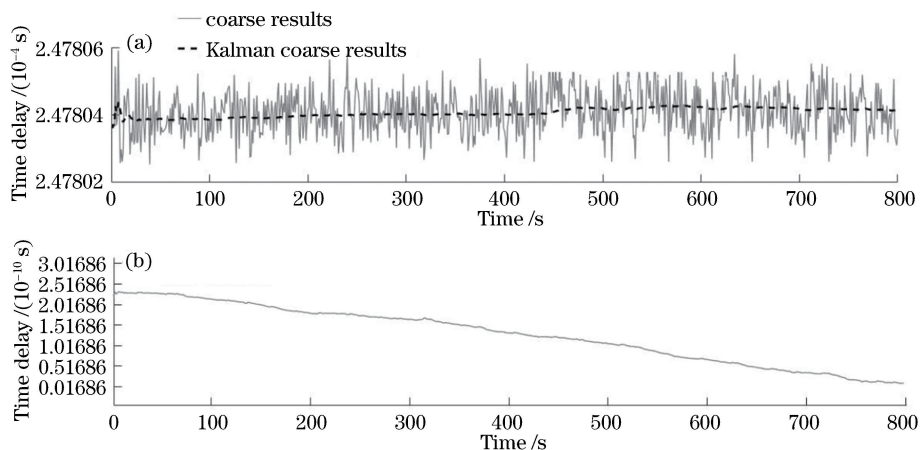


图 6 25 km 系统本底时延。(a)粗测结果;(b)细测结果

Fig. 6 Time delay of system background of 25 km fiber link. (a) Coarse results; (b) fine results

将 25 km 光纤放进恒温箱,以恒温箱内的温度变化模拟实际环境中的温度变化。为直观体现链路温度变化给延迟波动带来的影响,设恒温箱的温度由 15 °C 上升到 30 °C,并持续运行 3000 s,由于实验中 25 km 光纤为整盘光纤,3000 s 的恒定运行能够保证光纤温度持续上升。外界环境温度变化为 15 °C,光纤时延变化系数为 $30 \text{ ps} \cdot (\text{km} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,理论上时延变化为 22 ns,实验测得的单向传播延迟变化约为 20 ns,其误差是因为盘纤延迟存在滞后效应,该结果与文献[8,11]中的报道相符。

图 7 为恒温箱温度上升 3000 s 的粗、细测量结

在稳定环境条件下,系统本底时延的粗、细测量结果如图 6 所示。25 km 光纤链路的系统粗测结果如图 6(a)所示,均值为 247804.1~247804.3 ns,去除 80 ns 的系统本底时延,25 km 粗测结果为 247720 ns。细测结果中,由于光纤延迟存在缓慢波动,温控开始前 25 km 链路细测时延如图 6(b)所示,其波动范围在 200 ps 以内。

果,图 7(a)表示系统粗测时延由原 25 km 本底时延 247800 ns 变化至 247825 ns,链路细测时延变化值超过两个周期;图 7(b)中的细测时延在 3000 s 的升温过程中由 4.07226 ns 变为 1.77636 ns,较粗测值有明显提升。

两结果拼接值如图 8 所示,其中点虚线表示的 FTD 值与实线表示的粗测结果拟合良好,与粗测结果相比,FTD 值的波动明显变小。减去系统初始校准时延 80.24735 ns 后,FTD 值为 247723.82491~247745.52901 ns。系统秒稳如图 9 所示,由 1.13×10^{-10} 优化至 4.62×10^{-14} ,按照秒稳定度与测量精度

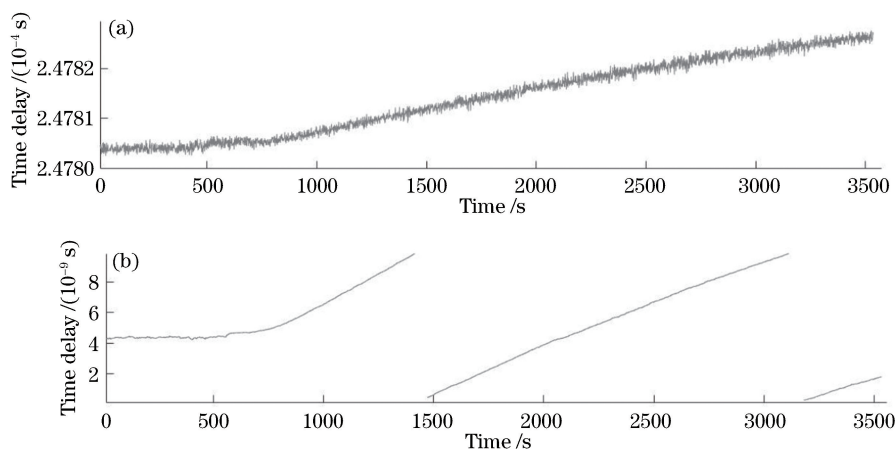


图 7 25 km 链路温度升高时的粗、细结果。(a)粗测结果;(b)细测结果

Fig. 7 Coarse and fine results of 25 km fiber link when temperature rises. (a) Coarse results; (b) fine results

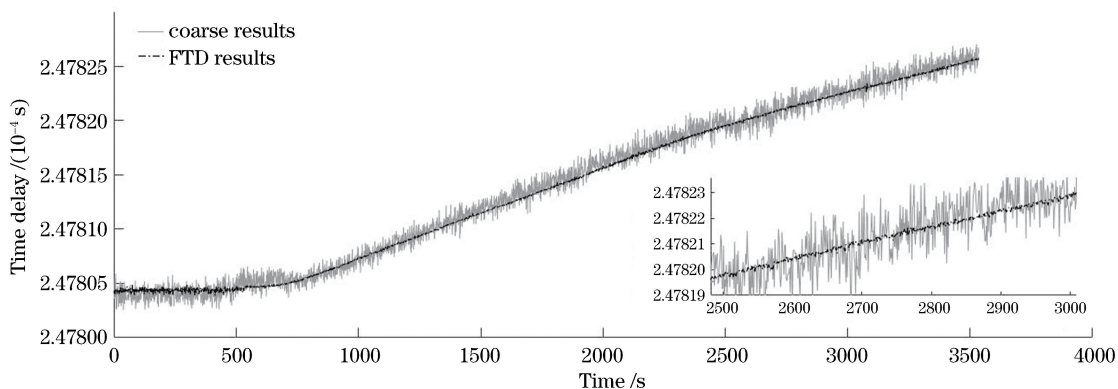


图 8 25 km 链路升温测量结果

Fig. 8 Time delay of 25 km fiber link when temperature rises

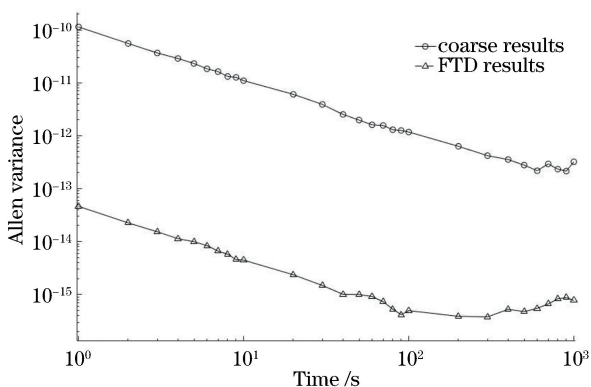


图 9 阿伦方差

Fig. 9 Allen variance

的对应关系^[17],其精度约为 0.03 ps。细测量精度较粗测值高,验证了长距离温度变化下该方案的可行性。

4 结 论

提出了光纤链路时延的时频共传、粗细结合的测量方法,设计了测量方案,搭建了实验平台,通过

改变光纤跳线的长度进行系统时延变化比对实验,证明了粗细结合测量结果的一致性;完成了实验室环境下 25 km 光纤链路的时延测量,在温度剧烈变化导致近 22 ns 的延迟波动条件下,实现了 0.03 ps 分辨率的绝对延迟和延迟波动测量。该方法的量程由时间计数的粗测量决定,分辨率由比相法细测量决定。因此可有效融合两种方法的优势,实现光纤链路延迟的高精度和大量程测量。

参 考 文 献

- [1] Tashiro T, Miyamoto K, Iwakuni T, *et al.* 40 km fiber transmission of time domain multiplexed MIMO RF signals for RoF-DAS over WDM-PON [C]// Optical Fiber Communication Conference, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2012: OTu2H.4.
- [2] Jiang Z Z, Dai Y T, Zhang A X, *et al.* Precise time delay sensing and stable frequency dissemination on arbitrary intermediate point along fiber-optic loop link with RF phase locking assistance[J]. IEEE Photonics

- Journal, 2015, 7(2): 7200809.
- [3] Liu Q, Han S L, Wang J L, *et al.* High precise frequency transfer over a 430 km fiber backbone network using cascaded system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0906001.
刘琴, 韩圣龙, 王家亮, 等. 采用级联方式实现 430 km 高精度频率传递[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0906001.
- [4] Xue M X, Fei S M, Li T, *et al.* Delay-derivative-dependent absolute stability criterion for neutral type Lurie system with interval time-varying delay[C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, July 22-24, 2011, Yantai, China. New York: IEEE, 2011: 1240-1245.
- [5] Sliwczynski L, Krehlik P. 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.
- [6] Priyanka E B, Maheswari C, Meenakshipriya B. Parameter monitoring and control during petrol transportation using PLC based PID controller[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2016, 14(2): 125-131.
- [7] Dong J W, Wang B, Gao C, *et al.* Highly accurate multichannel fiber transfer delay measurement[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: SM3P.5.
- [8] Yu N, Grudinin I, Tinto M. Optical frequency comb application in time-delay interferometer [C]//2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), July 9-17, 2017, Besancon, France. New York: IEEE, 2017: 126-127.
- [9] Jongenelen A P P, Bailey D G, Payne A D, *et al.* Analysis of errors in ToF range imaging with dual-frequency modulation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1861-1868.
- [10] Xin M, Şafak K, Peng M Y, *et al.* One-femtosecond, long-term stable remote laser synchronization over a 3.5-km fiber link[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14904-14912.
- [11] Li X Y, Zhu Y, Lu L, *et al.* Study on high precision disciplined time-frequency transferring experiments through optical fiber link [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506004.
李晓亚, 朱勇, 卢麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506004.
- [12] Zhou W H, Shi J K, Ji R Y, *et al.* High-precision distance measurement using femtosecond laser frequency comb [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1859-1868.
周维虎, 石俊凯, 纪荣祎, 等. 飞秒激光频率梳精密测距技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1859-1868.
- [13] Zhou X, Chen F X, Zhao K, *et al.* Time-delay measurement techniques for time transfer over optical fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081201.
周旭, 陈法喜, 赵侃, 等. 光纤时间传递的时延测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081201.
- [14] Zhu X, Wang B, Gao C, *et al.* Fiber-based multiple-access frequency synchronization via 1f-2f dissemination[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 090601.
- [15] Krehlik P, Sliwczynski L, Buczek L, *et al.* ELSTAB—fiber-optic time and frequency distribution technology: a general characterization and fundamental limits [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(7): 993-1004.
- [16] Yu L Q, Lu L, Wang R, *et al.* Analysis of the Sagnac effect and its influence on the accuracy of time transfer system by the optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306003.
于龙强, 卢麟, 王荣, 等. Sagnac 效应对光纤时间传递精度的影响分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306003.
- [17] Fujieda M, Kumagai M, Gotoh T, *et al.* Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1223-1228.