

光学学报

基于光纤频率传递的高精度时间传递方法

陈法喜¹, 李博^{2*}, 郭宝龙¹

¹西安电子科技大学, 陕西 西安 710071;

²中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600

摘要 为了进一步提高时间传递的稳定度,提出了一种基于光纤频率传递的高精度时间传递方法。在保证光纤时间传递不确定度的情况下,结合光纤频率传递的高稳定度特性,所提方法实现了兼具高稳定度和良好不确定度的光纤时间传递。在光纤时间频率传递的基础上,利用光纤频率传递系统输出的频率信号再生出具有高稳定度的 1PPS(one pulse per second)时间信号,并使再生的 1PPS 时间信号跟踪光纤时间传递系统输出的 1PPS 时间信号,进而使再生出的 1PPS 时间信号同时具有较好的稳定度和不确定度。为了验证所提方法的可行性,使用光纤链路测得的时间传递数据进行仿真实验,所提方法使光纤时间传递稳定度提高至 0.5 ps@1 s 和 0.09 ps@10⁴ s。在 500 km 长的实验室光纤链路上,利用光纤时间频率传递实验装置进行了测试,所提方法实现了稳定度为 2.5 ps@1 s 和 0.9 ps@10⁵ s,不确定度为 6.4 ps 的高精度时间传递。

关键词 光纤光学; 频率传递; 时间传递; 时间再生

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1506002

Ultra-High Precision Time Transfer Based on Fiber Frequency Transfer

Chen Faxi¹, Li Bo^{2*}, Guo Baolong¹

¹Xidian University, Xi'an 710071, Shaanxi, China;

²National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, Shaanxi, China

Abstract A high-precision time transfer method based on fiber frequency transfer is proposed to achieve higher stability of time transfer. On the premise of ensuring the uncertainty of time transfer, the proposed method can achieve the fiber time transfer with high stability and good uncertainty considering the high stability of fiber frequency transfer. On the basis of the fiber time and frequency transfer, the highly stable 1PPS (one pulse per second) time signal is regenerated using the frequency signal transmitted from the fiber frequency transfer system. Then, the regenerated 1PPS time signal tracks the 1PPS time signal transmitted by the fiber time transfer system, which renders the regenerated 1PPS time signal good stability and uncertainty simultaneously. The time transfer data measured by fiber links are used to conduct simulation experiments to verify the feasibility of the proposed method. The results indicate that under the proposed method, the fiber time transfer stability reaches 0.5 ps@1 s and 0.09 ps@10⁴ s. The experiment device for the fiber time and frequency transfer is employed to perform a test on a fiber link of 500 km, and the result demonstrates that the high-precision time transfer can be achieved by the proposed method, with the stability of 2.5 ps@1 s and 0.9 ps@10⁵ s, and the uncertainty of 6.4 ps.

Key words fiber optics; frequency transfer; time transfer; time regeneration

1 引言

高精度时间频率传递技术在频率标准比对^[1]、雷达探测^[2-3]、基础物理^[4-6]、射电天文^[7]和地球科学^[8]等前沿科学研究和重大基础设施中都发挥着举足轻重的作

用。由于光纤具有高带宽、抗干扰和低损耗等优点,故基于光纤的时间频率传递已成为超高精度时间频率信号传递的主要手段^[9-12]。目前,国内外已有多家单位开展了光纤时间频率信号传递方面的研究,并取得了突破性的进展^[13-16]。目前基于光纤微波频率传递的应用

收稿日期: 2021-12-24; 修回日期: 2022-01-17; 录用日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(12003042, 12103059)

通信作者: *libo@ntsc.ac.cn

较为广泛。2019 年,波兰克拉科夫理工大学在 1500 km 长的光纤环网内实现了稳定度为 1×10^{-16} @ 10^4 s 的 10 MHz 频率传递^[17]。2012 年,清华大学在 80 km 长的实地光纤链路上实现了稳定度为 5×10^{-19} @1 d 的 9.1 GHz 频率传递^[10]。2021 年,中国科学院国家授时中心在 300 km 的光纤环路链路上实现了稳定度为 1.1×10^{-14} @1 s 和 6.8×10^{-18} @ 10^5 s 的 9 GHz 频率传递^[18]。光纤频率传递通过抑制光纤链路噪声和光纤链路时延漂移,实现远程端输出的频率信号与本地端参考频率信号相位相对稳定,保证了传递前后频率信号的稳定度,但频率信号存在整周期模糊等问题,难以实现频率信号的相位同步对齐,进而无法保证频率信号的准确度。光纤频率传递常被用于只对频率信号相位稳定有较高要求的场合中,如原子钟频率信号传递^[1, 4-6]等。在一些对准确度有着严格要求的应用领域中,如雷达探测^[2-3]和射电天文^[7]等,常利用光纤时间传递技术来实现信号的同步。光纤时间传递是将 1PPS(one pulse per second)时间信号从本地端准确地传递到远程端,并通过补偿光纤链路的传输时延和传输时延的漂移将远程端 1PPS 信号与本地端 1PPS 信号的上升沿准确对齐,从而实现时间信号的准确同步。目前在光纤时间传递研究方面,研究人员也进行了诸多工作。2019 年,波兰克拉科夫 AGH 科技大学利用色散补偿相位延迟的方法,在 1550 km 长的实地光纤链路上将时间传递的稳定度提高到了 20 ps 内^[19]。2017 年,清华大学在 25 km 长的光纤链路上实现了稳定度优于 3 ps@1 s 和 10 ps@ 10^4 s,不确定度为 100 ps 的时间传递^[20]。2019 年,上海交通大学在 2100 km 长的实验室光纤链路上获得了优于 130 ps@1 s 和 12 ps@ 10^4 s 的时间传递稳定度^[21]。2020 年,中国科学院上海光学精密机械研究所在 110 km 长的实验室光纤链路上实现了稳定度为 16 ps@1 s 和 0.91 ps@ 10^4 s 的时间传递^[13]。2021 年,中国科学院国家授时中心在 1085 km 长的实地光纤链路上,利用色散误差修正的方法将 10^6 m 量级距离的时间传递不确定度改善至 63.5 ps,稳定度提高至 9.2 ps@1 s 和 5.4 ps@ 4×10^4 s^[22]。

光纤时间传递过程中系统时延随环境温度的变化而产生的波动将会导致时间传递的长期稳定度(万秒)下降。受时间传递系统中时差测量模块测量分辨率的影响,时间传递的中期稳定度(千秒)将会恶化。另外,光纤时间传递系统的闭环带宽较窄^[10, 23],难以对链路的噪声进行有效抑制,这会影响到时间传递的短期稳定度。如果时间信号的稳定度难以保证,即便时间信号具有很高的准确度,也会使其应用受到很大的限制,特别是在一些对实时准确度要求高的应用领域中。因此,在未来的光纤时间传递研究方面,亟需能够在光纤链路上实现更高稳定度、更高准确度的时间传递方法,为光纤时间传递的广泛应用奠定基础。在光纤时间传递中采用伺服本地振荡器的方法,虽然可以提高时间信号的短期稳定度^[24-25],但是被伺服的振荡器往往中

长期稳定度得不到保障,难以抑制时间传递过程中昼夜温差等因素引起的中长期稳定度的恶化。利用光纤频率传递系统相位补偿过程中的相位测量或控制的高分辨率,可以有效提高光纤链路时延变化量的测量分辨率,并实现高稳定度的时间传输^[26-27]。然而,由于未对链路的总时延进行实时测量和大范围补偿,故难以保证 1PPS 信号传递的准确度。为了规范描述光纤时间传递的准确度,下文用时间传递不确定度来表述。

本文提出了一种基于光纤频率传递的光纤时间传递方法,在保证光纤时间传递不确定度的同时,结合光纤频率传递的高稳定度,实现兼具高稳定度和良好不确定度的光纤时间传递,从而使得光纤时间传递的应用范围得以扩大。利用光纤频率传递系统输出的频率信号再生出具有高稳定度的 1PPS 信号,并使再生的 1PPS 信号相位跟踪光纤时间传递系统输出的具有良好不确定度的 1PPS 信号,使再生出的 1PPS 信号同时兼具较高的稳定度和良好的不确定度。本文利用光纤链路测得的时间传递数据进行了时间信号再生仿真,再生 1PPS 信号的稳定度可以达到 0.5 ps@1 s 和 0.09 ps@ 10^4 s,验证了基于光纤频率传递的时间传递方法大幅提高时间传递稳定度的可行性。同时,在 500 km 长的实验室光纤链路上进行了测试,实验表明,时间信号抖动的峰峰值由 193 ps 下降至 42 ps,稳定度由 9.05 ps@1 s 和 2.20 ps@ 10^5 s 提升到 2.52 ps@1 s 和 0.92 ps@ 10^5 s。最后,对基于光纤频率传递的光纤时间传递方法中影响不确定度的相关因素进行了分析讨论,评估出所提方法的时间传递不确定度为 6.4 ps。

2 实验原理及装置

基于光纤频率传递的高精度时间传递的原理装置框图如图 1 所示。原子钟输出的 10 MHz 频率信号和 1PPS 时间信号一起输入到本地端设备中,分别作为系统的频率参考和时间参考。本地端设备主要包含时间传递本地端部分和频率传递本地端部分。远程端设备与本地端设备通过标准单模光纤(SSMF)相连,当光纤链路较长或者损耗较大时,需要加入一个或多个中继设备。远程端设备主要包含时间传递远程端部分、频率传递远程端部分和时间再生控制部分。时间传递本地端部分与时间传递远程端部分采用双向时间比对的方式以实现时间信号的传递。实时测量光纤链路的总时延及其变化,并采用时间传递远程端部分的时延相位控制器补偿光纤链路时延,使时间传递输出的 1PPS 信号与本地端参考 1PPS 信号准确同步。频率传递本地端部分与频率传递远程端部分构成频率传递系统,采用在本地端进行相位检测和补偿的方式,在远程端输出与频率为 10 MHz 的参考信号相位稳定的 10 MHz 信号。远程端设备内的时间再生控制部分利用频率传递输出的 10 MHz 信号再生出具有高稳定度的 1PPS 信号。同时,使再生 1PPS 信号的脉冲沿跟踪光纤时间传递系统输出的 1PPS 信号的脉冲沿,以保

证再生出的 1PPS 信号同时兼具良好的稳定性和不确定度。为了防止时间传递和频率传递两个环路之间的干扰,以及环路内的双向光路的干扰,系统中采用了 4

个不同波长的激光进行传递,并用密集波分复用器 (DWDM) 对信号进行分束和合束。

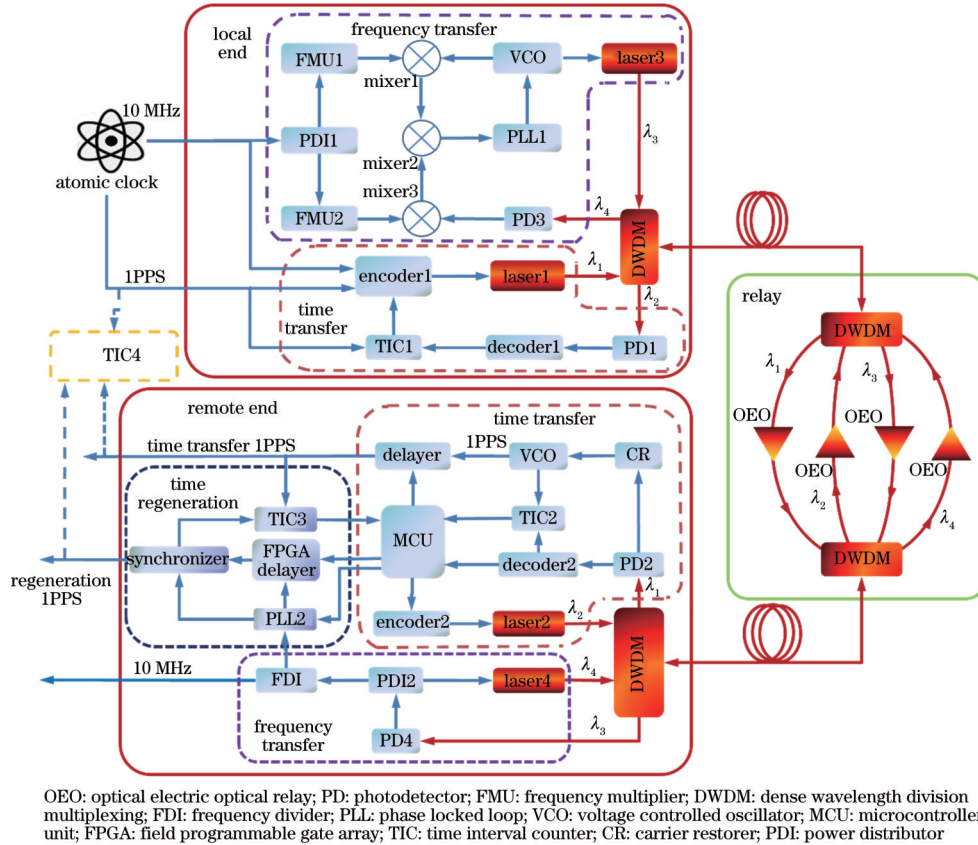


图 1 基于光纤频率传递的高精度时间传递原理框图

Fig. 1 Block diagram of high-precision time transfer based on fiber frequency transfer

2.1 光纤时间传递

光纤时间传递系统将本地端的 1PPS 信号和比对数据等信息通过编码器 1 加载到波长为 λ_1 的激光器 1 上,经过波分复用器、中继设备和光纤链路后传递到远程端。远程端的光电探测器 2 探测到的信号经过解码器 2 进行解码,并将解码得到的 1PPS 信号与守时模块输出的 1PPS 信号通过时差测量模块 2 进行比对,比对后的数据输入到运算控制器 2 上。运算控制器将比对的时差数据与来自本地端的比对数据处理后,利用延迟控制器调节守时模块输出的 1PPS 信号的时延。同时,远程端输出的 1PPS 信号通过编码器 2 加载到波长为 λ_2 的激光器 2 上并返回到本地端,本地端光电探测器 1 探测到的 1PPS 信号通过解码器 1 进行解码,并将解码得到的 1PPS 信号输送给时差测量模块 1 与本地端的 1PPS 信号进行比对,将比对后的数据经过编码器 1 加载到激光器 1 上并传输给远程端,从而实现时间信号的高精度传递。

在光纤时间传递系统中,时间传递过程中的时延补偿控制量 T_{DA} 可以表示为

$$T_{DA} = \frac{1}{2}(T_{LR} - T_{RL} + T_{DL} - T_{DR}) + T_{SE}, \quad (1)$$

式中: T_{LR} 和 T_{RL} 分别是通过时差测量模块得到的本地

端和远程端的时间比对结果; T_{DL} 和 T_{DR} 分别是本地端到远程端往返的光纤链路时延; T_{SE} 是本地端和远程端设备内引入的系统时误差,其对应的修正值为

$$T_{SE} = T_{DDL_S} - T_{DDR_R} + T_{DDL_R} - T_{DDR_S}, \quad (2)$$

式中: T_{DDL_S} 和 T_{DDR_S} 分别为本地端和远程端设备发送部分的时延; T_{DDL_R} 和 T_{DDR_R} 分别为本地端和远程端设备内接收部分的时延。综上所述,本文中的时间传递对光纤链路的总时延进行实时精确测量和补偿,并对系统时误差进行了修正,保证了时间传递的不确定度。另外,针对双向波长不一致引入的不对称性问题对时间传递不确定度的影响,在对链路色散参数精确测量的基础上,根据测得的链路时延换算得到的链路长度,采用色散偏差自动补偿的方式进行了抑制^[22]。

2.2 光纤频率传递

光纤频率传递系统将频率信号通过光纤链路进行往返传输,并获取光纤链路因为时延漂移和振动等因素产生的相位漂移和噪声,通过本地端锁相环路进行补偿和抑制,进而实现频率信号的高稳定性传递。本地端的 10 MHz 信号经过功率分配器 2 后被分成两路分别进行倍频,倍频后的两路信号用于解调出链路误差信号。将压控振荡器输出的频率信号加载到激光器 3 上,其输出波长为 λ_3 。激光器 3 的输出光作为下行光

信号,经过波分复用器、光纤链路和中继设备后到达远程端设备。远程端设备将来自本地端的下行光信号通过光电探测器 4 探测出来,探测到的频率信号经过功率分配器 2 后被分为两路,一路频率信号经过分频器后被直接输出,另一路频率信号被调制到波长为 λ_i 的激光器 4 上并发送至本地端。本地端将光电探测器 3 接收到的频率信号与本地端的倍频器 2 输出的频率信号进行混频,解调出带有链路误差的频率信号,再次将该信号通过混频器 2 进行混频,提取出链路的误差信号,并通过锁相环控制压控振荡器的输出频率和相位,实现对光纤链路引入的时延漂移的补偿和相位噪声的抑制,从而实现 10 MHz 信号的高精度传递。

光纤频率传递的基本原理与光纤时间传递类似。然而,在光纤频率传递系统中,无法准确评估频率信号相位变化量的绝对值,只能评估出往返信号相位变化的相对值,且认为频率信号往返传输的相位变化量是相同的。在光纤频率传递过程中的频率信号相位补偿量 θ_{DA} 可以表示为

$$\theta_{DA} = \frac{1}{2}(\theta_{DL} + \theta_{DR}), \quad (3)$$

式中: θ_{DL} 和 θ_{DR} 分别是频率信号往返于本地端和远程端的相位变化量,可认为 $\theta_{DL} = \theta_{DR}$ 。因此,在光纤频率传递的锁相伺服控制系统中,相位变化的补偿量为解调相位变化量的一半。

2.3 时间再生控制

时间再生控制部分将光纤频率传递系统输出的高稳定度的 10 MHz 信号送入到锁相环(PLL)中进行移相,再将移相后的频率信号通过 FPGA 计数延迟器进行分频,进而产生 1PPS 信号,并用低温漂的触发器进行重同步以消除 FPGA 产生的时延漂移,最终再生出 1PPS 信号。为了确保再生 1PPS 信号的不确定度,将再生的 1PPS 信号与时间传递系统输出的 1PPS 信号通过时差测量模块 3 进行比对,运算控制器 2 根据比对结果控制再生时间信号的相位以跟踪时间传递系统输出的 1PPS 信号。对于超过 100 ns 的相位调整量,采用 FPGA 内部的计数值进行调整。对于 100 ns 以内的相位调整量,采用锁相环实现输出频率信号的相位微调,进而改变再生时间的相位。最终,使得再生的 1PPS 信号的相位中心值与光纤时间传递系统输出的 1PPS 信号保持一致,从而提高光纤时间传递的稳定度。

实验中的具体实施方法是将再生的 1PPS 信号与时间传递系统输出的 1PPS 信号测量的时间差 T_{err} 分解为 100 ns 整数倍的部分 T_{int} 和小于 100 ns 的部分 T_{dec} ,即

$$T_{err} = T_{int} + T_{dec}, \quad (4)$$

其中,通过 FPGA 计数延迟器进行调整的变化量 Δn 为

$$\Delta n = T_{int}/100, \quad (5)$$

利用锁相环进行调整的移相调整量 Δd 的计算公式为

$$\Delta d = \frac{T_{dec}}{200} \times 65535, \quad (6)$$

在 1PPS 再生装置系统中,移相控制模块的模拟数字

转换电路(DA)的分辨率为 16 bit,时延的控制范围为 $-100 \sim 100$ ns。

由频率传递系统输出的频率信号分频产生的 1PPS 信号的短期和长期稳定度均优于时间传递系统输出的 1PPS 信号,故时间传递系统输出的 1PPS 信号仅用于改善再生 1PPS 信号的不确定度。时间再生控制部分对再生 1PPS 信号时延的控制要根据两个 1PPS 信号的相位偏差来调整数据采集时间和控制周期。两个 1PPS 信号的相位偏差越小,数据采集时间和控制周期越长,越能发挥频率传递系统高稳定度的优势,这样可以抑制时间信号的噪声和昼夜温差等因素引起的起伏,从而提高再生 1PPS 信号的稳定度,并保证其不确定度。

3 测试方法与数据分析

3.1 基于光纤频率传递的时间传递方法仿真实验

为了验证基于光纤频率传递的时间传递方法的可行性,利用实地光纤链路测试得到的时间传递数据和频率传递数据进行了仿真验证。光纤时间传递实地链路实验测试的数据如图 2(a)中带实心原点的实线所示,仿真实验中的再生时间信号如图 2(a)中带空心圆圈的实线所示。可以看出,对再生时间信号相位不断进行调整可使再生时间信号趋于稳定。由于初始阶段数据量较少,光纤时间传递的时间信号和再生时间信号的初始相位偏差较大,因此在采集 1 min 数据后对再生时间信号的相位进行调整,以减小两个信号之间的偏差。随着数据量的增加和两个信号间偏差的减小,逐步增加数据的采集时间,在数据采集阶段不改变再生信号相位。最后,将采集时间增加至 24 h,根据前 24 h 采集的数据,对再生时间信号相位再次进行调整。对实验中采集到的时间信号与频率信号进行数据处理,得到时间传递的时间稳定度(TDEV),如图 2(b)中带实心圆的实线所示,分别为 8.9 ps@1 s 和 4.6 ps@ 10^4 s。频率信号传递的 TDEV 如图 2(b)中带菱形的实线所示,分别为 0.5 ps@1 s 和 0.02 ps@ 10^4 s。仿真再生的 1PPS 的 TDEV 如图 2(b)中带空心圆圈的实线所示,分别为 0.5 ps@1 s 和 0.09 ps@ 10^4 s。可以看出,再生时间信号的短期稳定度由 10 MHz 信号的稳定度决定,且其长期稳定度也得到了大幅度的提升。从仿真实验中可以看出,再生的 1PPS 信号无论是短期稳定度还是长期稳定度都得到了大幅提升。

3.2 基于光纤频率传递的时间传递系统 500 km 长实验室光纤链路测试

为了验证所提方法在实际光纤链路中的效果,首先利用自行研制的基于光纤频率传递的时间传递系统在实验室光纤链路上进行了时间传递测试。该实验装置由 1 个本地端设备、10 盘标准的 50 km 长光纤盘、1 个远程端设备和 9 台光电光中继放大器组成,结构示意图如图 3 所示,光纤链路长度共计 500 km。在实验中,光纤时间频率传递本地端设备、远程端设备和时间测量设备都放置于同一位置。使用时间间隔计数器分

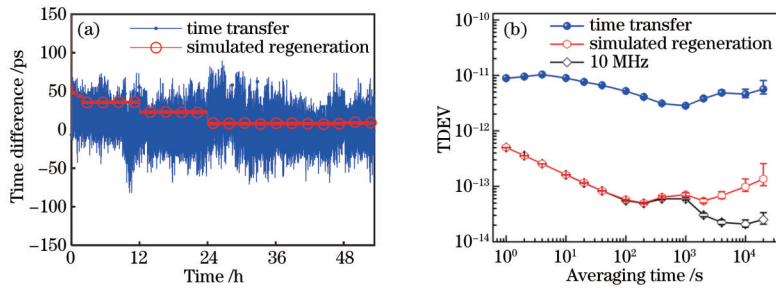


图 2 基于光纤频率传递的时间传递系统仿真结果。(a)时差;(b) TDEV

Fig. 2 Simulation results of time transfer system based on fiber frequency transfer. (a) Time difference; (b) TDEV

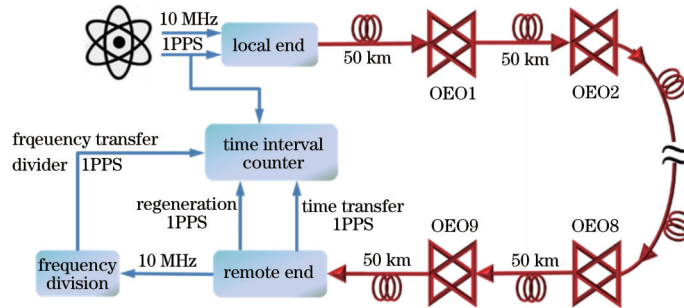


图 3 基于光纤频率传递的时间传递实验装置结构示意图

Fig. 3 Experimental setup of time transfer based on fiber frequency transfer

别测量光纤时间传递系统输出的 1PPS 信号、再生 1PPS 信号和光纤频率传递系统输出的频率信号分频产生的 1PPS 信号与参考 1PPS 信号之间的时间抖动,并用计算机连续采集数据。

基于光纤频率传递的时间传递系统在接近 5 d 的测试实验中,测得光纤时间传递系统输出的 1PPS 信号的比对测量数据如图 4(a)中带实心原点的实线所示,其峰峰值为 193 ps。待系统稳定后产生的再生 1PPS 信号的比对测量结果如图 4(a)中带空心圆圈的实线所示,其峰峰值为 42 ps。数据处理后得到的光纤时间传递设备的 TDEV 如图 4(b)中带实心圆的实线所示,分别为 9.05 ps@1 s、5.59 ps@10⁴ s 和 2.20 ps@10⁵ s。再生后产生的 1PPS 的 TDEV 如图 4(b)中带空

心圆圈的实线所示,分别为 2.52 ps@1 s、0.63 ps@10⁴ s 和 0.92 ps@10⁵ s。光纤频率传递系统输出的 10 MHz 信号分频产生的 1PPS 信号的 TDEV 如图 4(b)中带菱形的实线所示。可以看出,再生时间信号的短期稳定度主要取决于频率传递的稳定度,虽然时间信号的长期稳定度仍然受到光纤时间传递的影响,但是短期和中期稳定度都得到了大幅提升。另外,从图 4(b)中也可以看出,时间信号的长期稳定度仍受到限制,这主要是时间传递过程中温度变化对再生设备系统时延的影响造成的。从图 4(b)的仿真结果可以看出,所提 1PPS 再生系统还具有一定的提升空间。因此,下一步将对再生部分的设备进行高精度的控温,从而提高其稳定性。

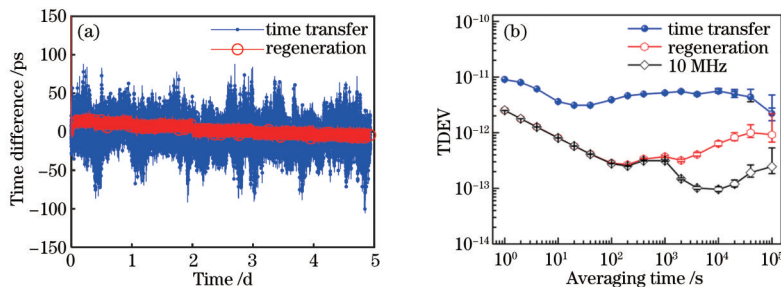


图 4 基于 500 km 长光纤链路的时间频率传递系统测试结果。(a)时差;(b) TDEV

Fig. 4 Measured results of time-frequency transfer system based on 500 km fiber link. (a) Time difference; (b) TDEV

3.3 不确定度误差分析

在基于光纤频率传递的时间传递方法的实验测试中,不确定度主要来源于时间传递中的时差测量误差、时间再生控制中的时差测量误差、设备系统时延误差

和光纤色散误差:1)光纤时间传递中的时差测量误差,光纤链路温度会变化引起时延波动,进而在传递过程中不断需要对时延进行大范围补偿,由于双向时间比对过程中在本地端和远程端都进行了时差测量,每个

时差测量引入的误差为 2 ps, 故此过程引入了约 3 ps 的误差; 2) 时间再生控制中的时差测量误差, 时间再生控制部分中的时差测量模块需要不断测量光纤时间传递的时间信号与再生时间信号之间的相位差, 由时差测量引入的误差约为 2 ps; 3) 设备系统时延误差, 实验室测得光纤时间传递的本地端设备和远程端设备的总漂移约为 2.5 ps/°C, 实验室温度变化峰峰值约为 2 °C, 在测试过程中设备因温度变化引入的往返时延累计误差约为 5.0 ps, 故对时延补偿量的误差为 2.5 ps; 4) 光纤链路色散引起的误差 ($0.5D_{\text{err}}\Delta\lambda L$), 光纤链路色散系数 D_{err} 的测量精度约为 0.03 ps/(km·nm), 上行光和下行光的波长差 $\Delta\lambda$ 约为 0.6 nm, 光纤链路长度 L 为 500 km, 故光纤色散系数测量引起的误差约为 4.5 ps。对于 500 km 长的实地光纤链路, 其色散系数约为 14.0 ps/(km·nm)。本地端、中继和远程端的激光器输出波长随环境温度的变化约为 0.1 pm/°C。实验室昼夜温差的总变化量为 2 °C, 则激光波长的累计变化约为 0.2 pm。经过计算后, 获得因激光器波长变化引起的色散误差约为 1.4 ps。通过上述分析可得到光纤时间频率传递系统中各部分的误差估算结果, 如表 1 所示, 最终获得 500 km 长实地光纤链路的时间传递不确定度约为 6.4 ps。为了进一步提高光纤时间频率传递系统的稳定度, 需尽可能降低温度变化对整个系统的影响, 同时也需尽可能地提高光纤色散系数的测量精度与激光器的控温精度。

表 1 基于光纤频率传递的高精度时间传递不确定性分析
Table 1 Uncertainty analysis of high-precision time transfer based on fiber frequency transfer

Error source	Error / ps
Measurement error of time transfer	3.0
Measurement error of regeneration	2.0
Device system delay error	2.5
Optical fiber dispersion coefficient measurement error	4.5
Laser wavelength error	1.4
Combined standard uncertainty	6.4

4 结 论

为了在保证时间传递不确定度的前提下进一步提高光纤时间传递的稳定度, 提出了一种基于光纤频率传递的光纤时间传递方法, 结合光纤时间传递的高不确定特性与光纤频率传递的高稳定度特性, 实现了兼具高稳定度和良好不确定度的 1PPS 信号的传递。利用光纤频率传递系统输出的频率信号再生出具有高稳定度的 1PPS 信号, 并使再生的 1PPS 信号相位跟踪光纤时间传递设备输出的 1PPS 信号, 从而使具有良好不确定性的 1PPS 信号的稳定度得到大幅度提升。首先, 通过已有的光纤时间传递数据进行时间再生的仿真, 验证了基于光纤频率传递的光纤时间传递方法的可行性。然后, 利用自行研制的基于光纤频率传递的

时间传递系统, 在 500 km 长的实验室光纤链路上实现了高精度的光纤时间传递, 测得 1PPS 信号的传递稳定度为 2.52 ps@1 s 和 0.92 ps@10⁵ s。最后, 对基于光纤频率传递的高精度时间传递系统的主要误差进行了分析, 经计算获得其不确定度为 6.4 ps。下一步, 将利用环境比较复杂的实地光纤链路对所提方案进行验证, 并通过提高光纤频率传递系统的性能来进一步优化光纤时间传递系统的指标。

参 考 文 献

- [1] Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, et al. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(2): 021101.
- [2] 曾涛, 殷丕磊, 杨小鹏, 等. 分布式全相参雷达系统时间与相位同步方案研究[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 105-110.
Zeng T, Yin P L, Yang X P, et al. Time and phase synchronization for distributed aperture coherent radar[J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 105-110.
- [3] 方立军, 马骏, 柳勇, 等. 一种大型分布式阵列雷达频率与相位同步[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(1): 85-88.
Fang L J, Ma J, Liu Y, et al. Frequency and phase coherence in large distributed digital array radar[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(1): 85-88.
- [4] Wolf P, Bordé C J, Clairon A, et al. Quantum physics exploring gravity in the outer solar system: the SAGAS project[J]. Experimental Astronomy, 2009, 23(2): 651-687.
- [5] Shelkownikov A, Butcher R J, Chardonnet C, et al. Stability of the proton-to-electron mass ratio[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(15): 150801.
- [6] Schiller S, Tino G M, Gill P, et al. Einstein gravity explorer-a medium-class fundamental physics mission[J]. Experimental Astronomy, 2009, 23(2): 573-610.
- [7] Krehlik P, Buczek L, Kołodziej J, et al. Fibre-optic delivery of time and frequency to VLBI station[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 603: A48.
- [8] Bondarescu R, Bondarescu M, Hetényi G, et al. Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping[J]. Geophysical Journal International, 2012, 191(1): 78-82.
- [9] 吴龟灵, 陈建平. 超长距离高精度光纤双向时间传递[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 99-103.
Wu G L, Chen J P. Ultra-long haul high-precision fiber-optic two way time transfer[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(16): 99-103.
- [10] Wang B, Gao C, Chen W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 556.
- [11] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 光纤时频同步技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050004.
Liang Y F, Xu J N, Wu M, et al. Research progress on optical fiber time-frequency synchronization technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050004.

- [12] 陈法喜, 赵侃, 周旭, 等. 长距离多站点高精度光纤时间同步[J]. 物理学报, 2017, 66(20): 200701.
Chen F X, Zhao K, Zhou X, et al. High-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(20): 200701.
- [13] Wang J L, Yue C L, Xi Y L, et al. Fiber-optic joint time and frequency transfer with the same wavelength[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 208-211.
- [14] 刘琴, 陈炜, 徐丹, 等. 采用级联方式在 230 km 光纤链路中同时实现频率传递和时间同步[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305006.
Liu Q, Chen W, Xu D, et al. Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a cascaded fiber link of 230 km[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0305006.
- [15] 陈丁, 许江宁, 李振中, 等. 光纤双向比对时间同步技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130004.
Chen D, Xu J N, Li Z Z, et al. Advancement in time synchronization technology using bi-contrast methods in optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130004.
- [16] Śliwczynski Ł, Krehlik P, Czubla A, et al. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km[J]. Metrologia, 2013, 50(2): 133-145.
- [17] Cárdenas-Olaya A C, Tampellini A, Bertacco E, et al. Digital instrumentation for phase-coherent frequency transfer over 300 km fiber link[C]//Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, April 14-18, 2019, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2019: 19090439.
- [18] Xue W X, Zhao W Y, Quan H L, et al. Cascaded microwave frequency transfer over 300-km fiber link with instability at the 10^{-18} level[J]. Remote Sensing, 2021, 13(11): 2182.
- [19] Turza K, Krehlik P, Śliwczynski Ł. Stability limitations of optical frequency transfer in telecommunication DWDM networks[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 67(5): 1066-1073.
- [20] Yuan Y B, Wang B, Gao C, et al. Fiber-based multiple access timing signal synchronization technique[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(4): 040601.
- [21] Ding X, Wu G L, Zuo F X, et al. Bidirectional optical amplifier for time transfer using bidirectional WDM transmission[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(6): 401-405.
- [22] 陈法喜, 赵侃, 李博, 等. 基于 1085 km 实地光纤链路的双波长光纤时间同步研究[J]. 物理学报, 2021, 70(7): 070702.
Chen F X, Zhao K, Li B, et al. High-precision dual-wavelength time transfer via 1085-km telecommunication fiber link[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(7): 070702.
- [23] Krehlik P, Śliwczynski Ł, 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.
- [24] 赵晓宇, 卢麟, 朱勇, 等. 光纤时间传递系统中终端站自主伺服的设计实现[J]. 光通信技术, 2018, 42(8): 10-13.
Zhao X Y, Lu L, Zhu Y, et al. Design and realization of disciplining time automatically in remote module of the optical fiber time transfer system[J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(8): 10-13.
- [25] 王翔, 卢麟, 王荣, 等. 基于光纤的时间伺服传递距离拓展研究[J]. 光通信技术, 2015, 39(2): 28-30.
Wang X, Lu L, Wang R, et al. Study on extending transfer distance of disciplined time transferring based on optical fiber[J]. Optical Communication Technology, 2015, 39(2): 28-30.
- [26] Yin F F, Wu Z L, Dai Y T, et al. Stable fiber-optic time transfer by active radio frequency phase locking[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 3054-3057.
- [27] Wang X C, Wei W, Liu Z, et al. Joint frequency and time transfer over optical fiber with high-precision delay variation measurement using a phase-locked loop[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 18501207.