

基于波分复用的高精度光纤时频传递方法

李博, 薛艳荣*, 孔维成, 张首刚

中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600

摘要 为了满足原子钟时频比对的工程应用需求,研究了基于波分复用的光纤时频传递方法,时间传递采用双波长双向比对远程端补偿的方法,频率传递采用单波长前置补偿的方法,实现了 1PPS 时间信号和 10 MHz 频率信号的高精度同纤传递。分析了光纤时间传递原理和光纤频率传递原理,进行了设备本底噪声测试,并在 102 km 长的实地光纤链路上进行了时频同传测试,实现了稳定度为 $3.4 \times 10^{-14}@1\text{ s}$ 、 $1.5 \times 10^{-15}@10^4\text{ s}$ 的 10 MHz 频率传递。通过设备时延和色散的校准,实现了稳定度为 15.7 ps@1 s 和 3.9 ps@1000 s,不确定度为 25.3 ps 的时间传递,满足了以氢原子钟为守时时钟的时频基准间的长距离比对需求。

关键词 光通信; 时间传递; 频率传递; 波分复用; 自动补偿

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221504

1 引言

高精度的时频传递在天文学^[1]、大地测量^[2]等前沿科学研究和重大基础设施^[3]中发挥着举足轻重的作用。目前主要通过卫星双向时频传递(TWSTFT)^[4]和卫星共视(CV)^[5]等方法来实现异地时钟的时频信号的传递与同步,这类基于无线电传输的传统方案不能满足部分用户对超高精度^[6]、稳定性和安全性等方面的特殊要求。与卫星和长波等时间传递方式相比,光纤具有低损耗、低噪声和抗电磁干扰等优点。利用单根光纤信号双向传递的特性保证了信号往返传输的高度对称性,可以对链路时延进行精确的补偿,从而实现皮秒量级的时间传递和 10^{-17} 量级的频率传递^[7]。使用光纤进行时频传递已逐步发展成为高精度时频传递的主要方法。

目前国内外已有多家单位开展了光纤时频传递方面的研究^[7-10],并取得了突破性的进展。高超等^[11]在 80 km 长的光纤链路上实现了稳定度(ADEV)为 $7 \times 10^{-15}@1\text{ s}$ 的频率传递和 $\pm 50\text{ ps}$ 的时间同步。Liu 等^[12]在 430 km 的光纤链路上,实现了稳定度为 $1.94 \times 10^{-13}@1\text{ s}$ 的 10 MHz 频率传递,并通过逐级标定的方法实现了 94 ps 的时间传递。Wang 等^[13]在 110 km 光纤链路上实现了稳定度分别为 $1.7 \times 10^{-14}@1\text{ s}$ 与 $5.9 \times 10^{-17}@10^4\text{ s}$ 的 1GHz 频率传递和 $1.6 \times 10^{-11}@1\text{ s}$ 与 $9.1 \times 10^{-13}@10^4\text{ s}$ 的时间传递。Gozzard 等^[14]在

166 km 长的光纤链路上实现了稳定度为 $9.7 \times 10^{-12}@1\text{ s}$ 和 $3.9 \times 10^{-14}@1000\text{ s}$ 的 160 MHz 频率传递。Turza 等^[15]在 1550 km 的实地光纤链路上,实现了稳定度优于 20 ps 的时间传递。

随着原子钟技术的不断发展,商用化氢原子钟的秒稳定度已经达到 10^{-13} 量级。在异地时频基准的比对中,比对链路的附加稳定度应小于原子钟的稳定度。虽然目前的频率传递稳定度可达 10^{-15} 甚至更高量级^[16],时间传递稳定度可以达到皮秒量级^[17],但是同时进行时频信号高精度传递的报道比较少。为了提高频率传递的稳定度,频率传递往往采用 GHz 量级的高频信号^[18],这难以满足以原子钟为参考的时频基准间 10 MHz 频率信号直接比对的需求。时间传递的不确定度受校准精度和双向激光波长的影响,往往在 50 ps 以上^[10-11],难以满足时频基准间的时间信号高精度比对需求。

本文设计了一个基于波分复用方案的光纤时频传递系统,并完成了设备的研制。时间传递采用双波长双向比对远程端补偿的方法,频率传递采用单波长前置补偿的方法,实现了 1PPS(one pulse per second)时间信号和 10 MHz 频率信号的高精度同纤传递。本文分析了光纤时频传递原理,并利用自研设备在 102 km 长的实地光纤链路中进行了时频传递测试,实现了稳定度为 $3.4 \times 10^{-14}@1\text{ s}$ 和 $1.5 \times 10^{-15}@10^4\text{ s}$ 的 10 MHz 频率传递。通过设备时延和色散的校准,实现了稳定

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-09-13; 录用日期: 2022-11-02; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(12003042, 12103059)、中国科学院青年创新促进会(2018444)、中国科学院西部青年学者(XAB2021YN24)

通信作者: *xueyanrong@ntsc.ac.cn

度为 15.7 ps@1s 和 3.9 ps@1000 s, 不确定度为 25.3 ps 的时间传递, 满足了以氢原子钟为守时时钟的时频基准间的高精度比对需求。

2 光纤时频传递基本原理

光纤时频传递系统基本原理如图 1 所示, 主要由光纤时频传递本地端设备和远程端设备组成。将原子钟输出的 10 MHz 频率信号和 1PPS 时间信号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和频率传递远程端部分。时间传递本地端部分与时间传递远程端部分构成时间传递系统, 采用双向时间比对的方式实现时间信号的传递, 通过实时测量光纤链路的总时延及其变化并在远程端采用时延相位控制器补偿光纤链路时延的方式, 使远程端输出的 1PPS 信号与本地端的参考 1PPS 信号精准同步。

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, 通过锁相环控制发射端频率信号的相位, 实现对光纤链路引入的时延漂移和相位噪声的补偿, 使远程端输出与参考 10 MHz 频率信号相位稳定的 10 MHz 频率信号。

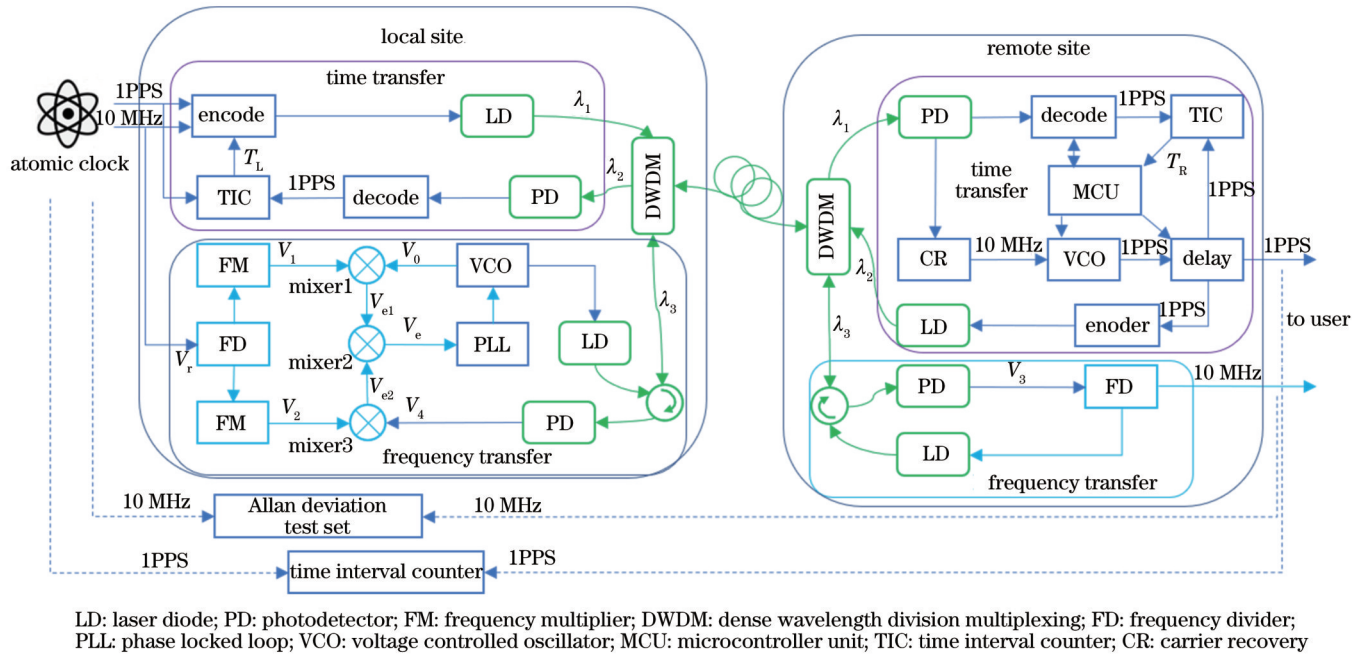


图 1 光纤时频传递原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber time and frequency transfer

2.1 光纤时间传递原理

光纤时频传递本地端设备中的时间传递部分将 1PPS 时间信号、10 MHz 频率信号和本地的时差测量值 T_L 等信息进行编码, 并调制到激光器上以发送至远程端。本地端设备接收来自远程端的时间信号, 进行解码后与本地端的时间信号进行比对, 得到测量值 T_L 。远程端从接收到的信号中解调出测量值 T_L 和时间信号, 并与守时模块产生的时间信号进行比对, 得到远程端的时差测量值 T_R 。微控制器(MCU)控制编码器将时间信号加载到激光器上以发送至本地端, 并根据时差测量值等数据控制时延模块使输出的时间信号与本地端输入的时间信号同步, 从而实现时间信号的高精度传递。通过编码技术将对数据等信息加载到光载波上实现信息的传递, 避免了利用额外的链路进行比对数据的传送^[19]。

为了实现高精度的时间传递, 需要保证远程端输出的时间信号的上升沿与本地端输入的时间信号的上升沿准确对齐。这就需要对设备时延和链路时延进行精确的测量, 并通过时延控制模块控制系统输出 1PPS 时间信号的时延。时延控制量可以表示为

$$T_{\text{delay}} = (T_L - T_R) / 2 + T_{\text{Sysdelay}} + T_{\text{CD}}, \quad (1)$$

式中: T_{Sysdelay} 为设备的系统时延; T_{CD} 为光纤色散引入的时延。在系统中可以先对光纤链路的色散系数进行测量, 或者根据经验值进行计算。由光纤色散产生的时延 T_{CD} 的计算公式为

$$T_{\text{CD}} = T_{\text{DL}} - T_{\text{DR}} = D \times \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \times L, \quad (2)$$

式中: D 为光纤链路的色散系数; L 为光纤链路的长度; λ_1 和 λ_2 分别为本地端与远程端激光器的输出波长。

设备内部电子学部分和光学部分的系统固有时延

T_{Sysdelay} 为

$$T_{\text{Sysdelay}} = T_{\text{LS}} - T_{\text{RR}} + T_{\text{LR}} - T_{\text{RS}}, \quad (3)$$

式中: T_{LS} 为本地端设备内发送部分的时延; T_{RR} 为远程端设备内接收部分的时延; T_{LR} 为本地端设备内接收部分的时延; T_{RS} 为远程端设备内发送部分的时延。

2.2 光纤频率传递原理

为了实现频率信号的高精度传递,通常使信号沿光纤链路往返传输,通过比较往返信号的相位,得到传递过程中光纤链路因外界环境温度变化、机械振动等因素产生的时延扰动量,并在本地端利用锁相环路对由光纤链路引入的相位扰动进行实时补偿,从而实现频率信号的高稳定度传递。

本地端的发射信号 $V_0 = \cos(\omega_0 \times t + \phi_0)$ 由高稳压控晶体振荡器(VCO)产生,其频率为 ω_0 , 相位为 ϕ_0 。利用激光器将信号 V_0 调制到波长为 λ_3 的激光载波上,耦合入光纤链路中并发送至远程端。在远程端通过光电探测器解调出频率信号 $V_3 = \cos(\omega_0 \times t + \phi_0 + \phi_p)$, 其中 ϕ_p 为传输过程中引入的相位扰动量。使用分频器将信号 V_3 分为两路,一路分频后输出给用户,另一路将信号直接调制到激光器上并发送至本地端。

在本地端利用光电探测器解调得到远程端返回来的信号 $V_4 = \cos(\omega_0 \times t + \phi_0 + 2\phi_p)$, 由于光纤链路引入的相位起伏与传递频率成正比,故返回信号 V_4 的相位包含了往返链路引起的相位起伏。链路引入的相位噪声探测与补偿在本地端完成,本地端的参考频率信号 $V_r = \cos(\omega_r \times t + \phi_r)$ 经过倍频后得到高频信号 V_1 和 V_2 , V_1 与发射信号 V_0 混频得到误差信号 V_{e1} , V_2 与返回信号 V_4 混频得到误差信号 V_{e2} , V_{e1} 与 V_{e2} 混频后得到误差信号 V_e , V_e 可以表示为

$$V_e = \cos\left[2 \times (\omega_0 - N \times \omega_r) \times t + 2 \times (\phi_0 + \phi_p - N \times \phi_r)\right], \quad (4)$$

式中: ω_r 为本地端的参考频率信号的频率; ϕ_r 为本地端的参考频率信号的相位。 V_e 不仅包含链路引入的相位差,还包含发射信号 V_0 相对于参考信号 V_r 的相位差。

在锁相环路闭环后,环路滤波器控制发射信号的相位使 $V_e = 0$ 。此时, $\omega_0 = N \times \omega_r$, $\phi_0 + \phi_p = N \times \phi_r$, 远程端的信号 V_3 可以表示为

$$V_3 = \cos(\omega_0 \times t + \phi_0 + \phi_p) = \cos(N \times \omega_r \times t + N \times \phi_r). \quad (5)$$

因此,远程端输出的频率信号被锁定在参考频率信号 V_r 上,即完成了对光纤链路噪声的补偿,实现了频率信号的高精度传递。

3 性能测试与分析

3.1 光纤时频传递系统时延校正与本底噪声测试

为了对自研光纤时频传递设备内部的固有时延进行校正和对系统本底噪声进行测试,在实验室内使用 1 m 长的短跳纤进行了测试,由 1 m 光纤引入的飞秒量级的测试误差可以忽略。

系统时延的校正方法如图 2 所示。首先,测量长度为 l_1 的电缆和长度为 $l_2 + l_3$ 的电缆的时延差 T_1 。然后,将本地端设备和远程端设备采用短纤相接的方式接入长度为 l_2 的电缆和长度为 l_3 的电缆之间,测量得到时延值 T_2 。设备的内部时延为 $T_{\text{Sysdelay}} = T_2 - T_1$, 并将时延值 T_{Sysdelay} 写入控制器中。设备内部固有时延不受应用场景的影响,仅在设备研制完成后进行一次校正即可,在后续使用中无需再次校准,方便用户使用。设备内部固有时延校正保证了系统输入时间信号与输出时间信号的高精度同步。

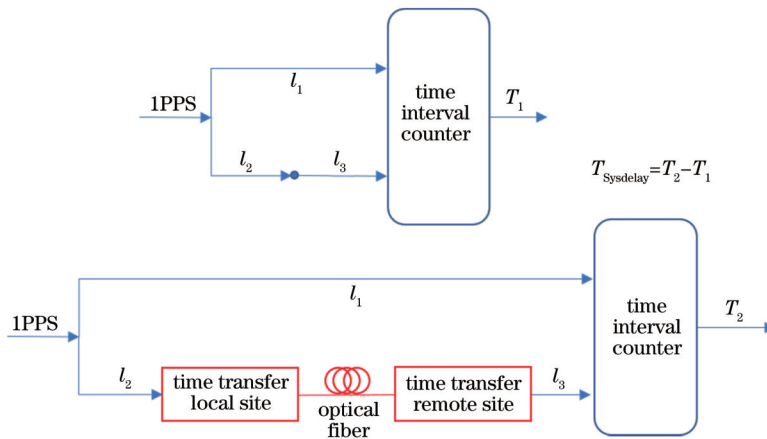


图 2 设备内部时延测试方法

Fig. 2 Measurement method for device internal delay

光纤时频传递设备本底噪声测试方法如图 3 所示。光纤时频传递本地端设备和远程端设备放置于实验室中,接入同源的 10 MHz 频率信号和 1PPS 时间信

号。使用时间间隔计数器测量输入的 1PPS 时间信号与远程端设备输出的 1PPS 时间信号的时差,使用相噪分析仪 TSC5125 测量频率信号的稳定度。光纤时

间传递部分使用 C42 和 C43 光波长通道进行 1PPS 时间信号的传递,光纤频率传递部分使用 C36 光波长通道进行 10 MHz 频率信号的传递。

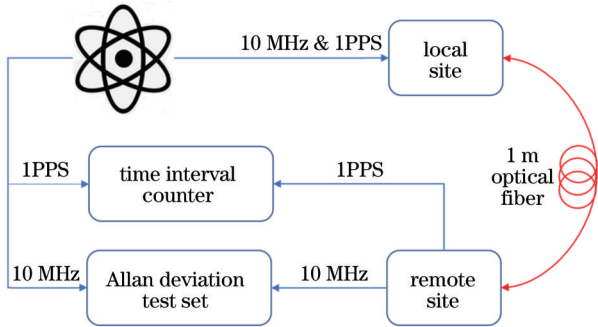


图 3 光纤时频传递实验装置的本底噪声测试

Fig. 3 Noise floor measurement of optical fiber time and frequency transfer experimental equipment

3.2 实地光纤链路测试实验

为了测试自研的光纤时频传递设备在实地光纤链路中的性能,在 102 km 长的实地光纤链路上进行了测试。实验装置的连接方式如图 4 所示,光纤时频传递本地端设备和远程端设备均放置于中国科学院国家授时中心临潼园区实验室中,接入中国科学院国家授时中心建立并持有的协调世界时[UTC(NTSC)]主钟输出的 10 MHz 频率信号和 1PPS 时间信号。中继设备放置于中国科学院国家授时中心航天城园区。中国科学院国家授时中心临潼园区与航天城园区之间光纤单程长度为 51 km,以地理方式为主。信号通过光纤链

路在中国科学院国家授时中心临潼园区与航天城园区之间往返传输,链路全长共计 102 km。

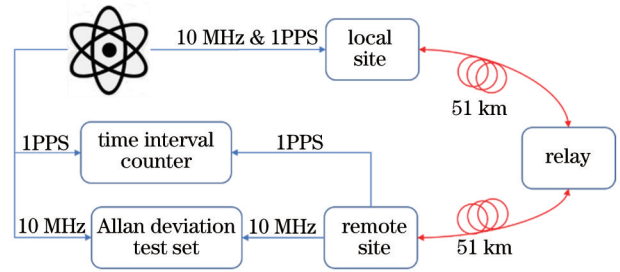


图 4 光纤时频传递实验装置

Fig. 4 Optical fiber time and frequency transfer experimental equipment

光纤时间传递实地链路测试结果如图 5 中实线所示,在 24 h 测试中测得其标准差为 21.8 ps。时间传递稳定度如图 6 中实线所示,分别为 15.7 ps@1 s、3.9 ps@1000 s。由于实地链路会受到振动和温度漂移的影响,时间传递补偿过程的带宽有限,故噪声难以被彻底抑制,稳定度会出现一定程度的恶化。时间传递的测试结果如图 5 中虚线所示,在 24 h 测试中测得其标准差为 6.38 ps。稳定度如图 6 中虚线所示,分别为 4.2 ps@1 s、1.6 ps@10 s、0.84 ps@100s 和 1.2 ps@104 s。10 MHz 频率传递稳定度如图 7 中实线所示,分别为 1.9×10^{-14} @1 s、 4.2×10^{-15} @10 s 和 4.8×10^{-16} @ 10^4 s。10 MHz 频率传递稳定度远优于氢原子钟的稳定度 1×10^{-13} @1 s,时间传递的稳定度优于通用时间间隔计数器 SR620 本底噪声指标。

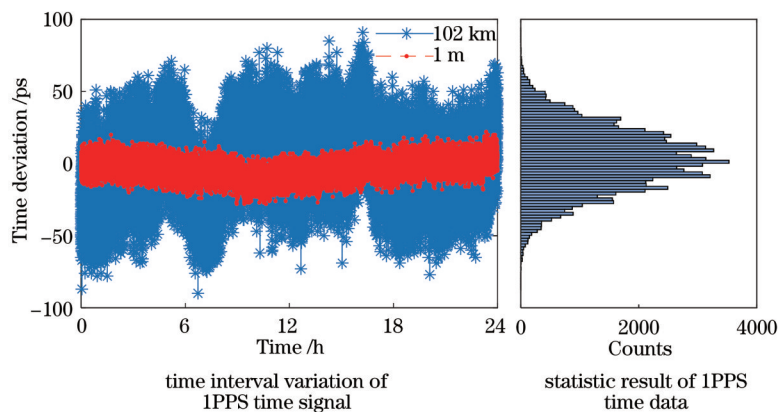


图 5 基于 102 km 长光纤链路的时间传递测试结果

Fig. 5 Test results of time transfer based on 102-km optical fiber link

光纤频率传递测试结果如图 7 所示。在 24 h 测试中 10 MHz 频率信号的稳定度为 3.4×10^{-14} @1 s、 3.6×10^{-15} @ 10^2 s 和 1.5×10^{-15} @ 10^4 s。与系统本底噪声相比,在实地链路中因受到链路噪声抑制的残差的影响,稳定度有所恶化。从图 7 中也可以看出,10 MHz 频率传递的附加稳定度要优于 BM2101-01 和 SOHM4 氢原子钟的稳定度。

3.3 不确定度分析

为了提高频率传递的稳定度,通常将低频信号倍频到 GHz 量级后通过光纤进行传递,同时在远程端下变频至低频信号以提供给用户使用。10 MHz 信号直接倍频至 GHz 量级将会引入 5×10^{-14} @1 s 左右的稳定度恶化。先将输入的 10 MHz 频率信号倍频到 100 MHz,再将 100 MHz 分别倍频到 1.1 GHz、

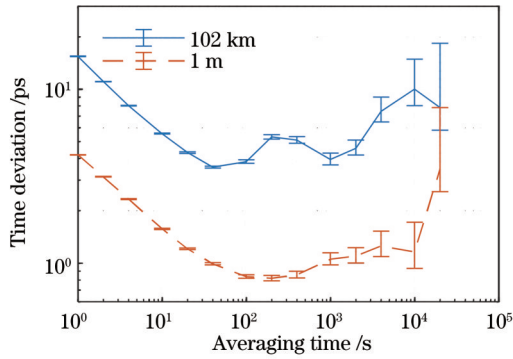


图 6 光纤时间传递稳定度

Fig. 6 Time transfer stability of optical fiber

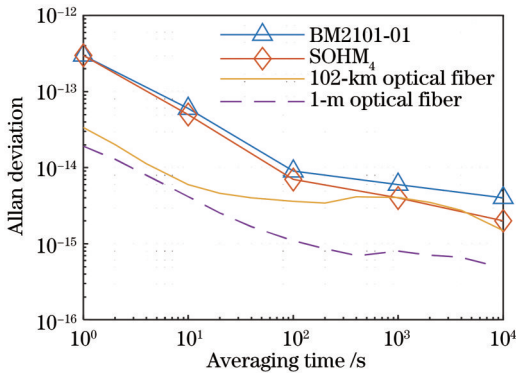


图 7 光纤频率传递稳定度

Fig. 7 Frequency transfer stability of optical fiber

1.3 GHz 和 1.2 GHz 用于信号的混频和传递,同时在远端将传递的频率信号分频至 10 MHz 后输出。当然,频率传递的性能主要受限于 10~100 MHz 的倍频器性能。从图 8 也可以看出,10~100 MHz 倍频器的稳定度与频率传递稳定度的变化趋势大体相同。

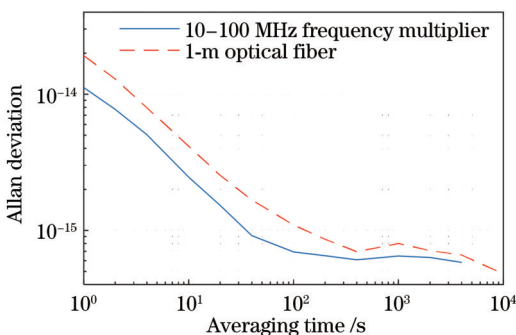


图 8 光纤频率传递稳定度与倍频器稳定度对比图

Fig. 8 Stability comparison between optical fiber frequency transfer stability and frequency multiplier stability

在光纤时间传递中的不确定度主要包含本地端和远端设备系统时延的温度漂移、时间间隔测量、激光器波长变化引起的色散偏差、色散系数测量误差引起的色散补偿误差和光纤色散系数温度漂移产生的误差。

1) 设备系统时延的不确定度

在系统设计时,采用保温与精密控温方式对激光器和敏感元件等部分进行恒温处理,以减小因温度漂移引起的设备时延误差和波长变化引入的误差。在实验室测得光纤时间传递设备的漂移约为 $2 \text{ ps}/^\circ\text{C}$,测试过程中实验室温度变化峰值约为 3°C ,则在测试过程中设备因温度变化引入的不确定度约为 6 ps 。

2) 光纤时间传递中时差测量的不确定度

光纤链路随温度变化会引起时延波动,在传递过程中需要不断地对时延进行大范围的补偿。经实验测试,TIC 时差测量引入的不确定度约为 10 ps 。

3) 光纤链路色散测量的不确定度

在实验测试前,使用链路色散误差修正方法^[17]对实地光纤链路的色散系数进行测量,并通过控制远端端的时延相位控制器对色散引入的时延进行自动补偿,经计算获得 102 km 长的实地光纤链路因色散引入的不确定度为 5.7 ps 。在 102 km 实地光纤链路测试中根据各部分的不确定度估算结果,分析可得时间传递的不确定度分量约为 12.9 ps 。在 102 km 实地光纤链路测试实验中测得时间传递的标准差为 21.8 ps ,计算得到其综合不确定度(B类)为 25.3 ps 。

4 结 论

研究了基于波分复用的光纤时频传递方法,实现了 1PPS 时间信号和 10 MHz 频率传递在实地光纤链路上的高精度传递,满足了以氢原子钟为守时时钟的时频基准间的长距离比对需求。分析了光纤时间传递和频率传递的基本原理,利用自研设备在 102 km 长的实地光纤链路中进行了实验测试,实现了稳定度为 $15.7 \text{ ps}@1\text{s}$ 和 $3.9 \text{ ps}@1000\text{s}$ 的 1PPS 时间传递,以及稳定度为 $3.4 \times 10^{-14}@1\text{s}$ 的 10 MHz 频率传递。最后,对时间传递中的主要不确定度分量进行了分析,经计算获得其不确定度为 25.3 ps 。

参 考 文 献

- [1] Schediwy S W, Gozzard D R, Gravestock C, et al. The mid-frequency Square Kilometre Array phase synchronisation system [J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2019, 36: e007.
- [2] Bondarescu R, Bondarescu M, Hetényi G L, et al. Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping [J]. Geophysical Journal International, 2012, 191(1): 78-82.
- [3] 魏孝锋, 车爱霞, 乔建武, 等. 光纤传输高精度时频信号在长波授时中的应用[J]. 时间频率学报, 2015, 38(2): 95-100.
Wei X F, Che A X, Qiao J W, et al. Application of transmitting high-accuracy time-frequency signal via optical fiber to long wave time service[J]. Journal of Time and Frequency, 2015, 38(2): 95-100.
- [4] Jiang Z H, Zhang V, Parker T E, et al. Improving two-way satellite time and frequency transfer with redundant links for UTC generation[J]. Metrologia, 2019, 56(2): 025005.
- [5] 杨旭海, 李孝辉, 华宇, 等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 1-10.
Yang X H, Li X H, Hua Y, et al. Technical progress of satellite

- time service and time transfer[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(4): 1-10.
- [6] 陈法喜, 孔维成, 赵侃, 等. 高精度长距离光纤时间传递的研究进展及应用[J]. *时间频率学报*, 2021, 44(4): 266-278.
Chen F X, Kong W C, Zhao K, et al. Research on high-precision long-distance optical fiber time transfer and its application[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2021, 44(4): 266-278.
- [7] 王灵东, 吴龟灵, 沈建国, 等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406004.
Wang L D, Wu G L, Shen J G, et al. Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406004.
- [8] 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.
- [9] Zuo F X, Xie K F, Hu L, et al. 13134-km fiber-optic time synchronization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6373-6380.
- [10] 王力军. 超高精度时间频率同步及其应用[J]. *物理*, 2014, 43(6): 360-363.
Wang L J. High precision synchronization of time and frequency and its applications[J]. *Physics*, 2014, 43(6): 360-363.
- [11] 高超, 王波, 白钰, 等. 基于光纤链路的高精度时间频率传输与同步[J]. *科技导报*, 2014, 32(34): 41-46.
Gao C, Wang B, Bai Y, et al. Fiber based time and frequency synchronization system[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(34): 41-46.
- [12] Liu Q, Han S L, Wang J L, et al. Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a 430 km fiber backbone network using a cascaded system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 070602.
- [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*, 2019, 45(1): 208-211.
- [14] Gozzard D R, Schediwy S W, Courtney-Barrer B, et al. Simple stabilized radio-frequency transfer with optical phase actuation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(3): 258-261.
- [15] Turza K, Krehlik P, Śliwczynski L. Stability limitations of optical frequency transfer in telecommunication DWDM networks[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2020, 67(5): 1066-1073.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 全洪雷, 赵文宇, 薛文祥, 等. 基于微波相位补偿的 56 km 高精度光纤微波频率传递[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0406003.
Quan H L, Zhao W Y, Xue W X, et al. High-resolution microwave frequency dissemination via 56 km optical fiber based on microwave phase compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406003.
- [19] Krehlik P, Śliwczynski L, Buczek Ł, et al. Fiber-optic UTC(k) timescale distribution with automated link delay cancelation[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2019, 66(1): 163-169.

High-Precision Optical Fiber Time and Frequency Transfer Method Based on Wavelength Division Multiplexing

Li Bo, Xue Yanrong*, Kong Weicheng, Zhang Shougang

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

Abstract

Objective High-precision time and frequency transfer plays an important role in frontier scientific research and major science and technology infrastructure projects, such as astronomy and geodetic surveying. At present, two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) and satellite common-view (CV) are primarily applied for the transfer and synchronization of time and frequency signals from different time-keeping clocks. However, these conventional methods, which are based on radio transmission, are unable to satisfy some customers' unique requirements for ultra-high accuracy, stability, and security. Compared with the global navigation satellite system (GNSS)-based time transfer and long-wave time transfer, optical fiber time transfer has the advantages of low loss, low noise, and anti-electromagnetic interference. The bidirectional signal transfer characteristic of single optical fiber ensures a highly symmetric time delay of a bidirectional signal. For this reason, the optical fiber time delay can be compensated to pave the way for picosecond time transfer and frequency transfer. This research is expected to achieve the high-precision common optical fiber transfer of a 1PPS time signal and a 10 MHz frequency signal and ultimately meet the requirements of long-range comparison among time and frequency standards with hydrogen atomic clocks as time-keeping clocks.

Methods To fulfill the engineering application requirements of atomic clock time and frequency comparison, this paper designs an optical fiber time and frequency transfer system based on a wavelength division multiplexing scheme. The methods of dual-wavelength bidirectional comparison and remote site compensation are applied to the time transfer. The time delay of the optical fiber link and its change are measured in real time, and a time-delay phase controller is used at the

remote site to compensate for the time delay of the optical fiber link. In this way, the 1PPS signal output at the remote site is accurately synchronized with the reference 1PPS signal at the local site. The information, such as the comparison data, is loaded onto the optical carrier by the encoding technology to achieve information transfer. The transfer of the comparison data by additional links is thereby avoided. The single-wavelength pre-compensation method is employed for the frequency transfer, and phase detection and compensation are carried out at the local site. The phase of the transmitted frequency signal is controlled by a phase-locked loop to compensate for the time delay shift and phase noise caused by the optical fiber link. On this basis, the remote site outputs a 10 MHz frequency signal that is stable relative to the reference frequency signal. The remote-site equipment is connected with the local-site equipment by the standard single-mode optical fiber. The high-precision common optical fiber transfer of the 1PPS time signal and the 10 MHz frequency signal is achieved by wavelength division multiplexing. The fixed time delay of the equipment is further corrected to ensure the high-precision synchronization between the input and output time signals of the system.

Results and Discussions To test the noise floor of the equipment, this study presents a test system constructed in the laboratory, which uses short optical fiber to connect the local-site equipment with the remote-site equipment. The test results show that the time transfer stability can reach 4.2 ps@1 s, 1.6 ps@10 s, 0.84 ps@100 s and 1.2 ps@10⁴ s. The stability of 10 MHz frequency transfer can reach 1.9×10^{-14} @1 s, 4.2×10^{-15} @10 s and 4.8×10^{-16} @10⁴ s and is thus much better than that of the hydrogen atomic clocks, which reaches 1×10^{-13} @1 s. Finally, an optical fiber time and frequency transfer test is carried out on a 102-km field optical fiber link, and the stability of 10 MHz frequency transfer is 3.4×10^{-14} @1 s and 1.5×10^{-15} @10⁴ s. Time transfer with the stability of 15.7 ps@1s and 3.9 ps@1000 s, and the uncertainty of 25.3 ps is accomplished by correcting the time delay and dispersion of the equipment.

Conclusions In the present study, high-precision transfer of a 1PPS time signal and a 10 MHz frequency signal on a field optical fiber link is achieved by dense wavelength division multiplexing (DWDM). The methods of dual-wavelength bidirectional comparison and remote-site compensation are applied to the time transfer, which raises transfer precision to more than 30 ps on a 100-km optical fiber link. The single-wavelength pre-compensation method is employed for the frequency transfer, and the stability of the 10 MHz frequency transfer achieved is superior to that of a hydrogen atomic clock. Finally, the development of the equipment is completed to satisfy the requirements of long-range comparison among time and frequency standards with hydrogen atomic clocks as time-keeping clocks.

Key words optical communications; time transfer; frequency transfer; wavelength division multiplexing; automatic compensation