

# 基于单光子探测的高精度长距离光纤双向时间比对

付鑫宇, 胡亮\*, 周子杰, 陈建平, 吴龟灵

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 在长距离光纤时间传递链路中, 为了避免使用中继放大导致双向传输时延不对称以及引入附加的噪声, 提出一种基于单光子探测的长距离光纤时间传递方案。将经过主端(从端) 1 pulse/s 时间信号控制的激光脉冲序列作为发送信号, 利用从端(主端) 具有极高探测灵敏度的单光子探测器接收到达信号, 并基于双向时分复用同纤同波时间比对方案得到双向光纤链路传输时延变化, 进而根据时间相关单光子计数和高斯拟合的数据处理方式得到两端之间钟差的时间稳定度。为了实现单光子探测器在门控模式下对长距离光纤实验系统的长期测试, 设计并实现了外部触发门控工作方式下动态调整的触发控制系统。通过利用光纤链路传输时延变化量, 实现对门控触发信号的控制。350 km 单模光纤和对应长度的色散补偿光纤(链路总损耗约为 100 dB) 的时间传递系统实验结果表明, 时间传递稳定度优于 1.5 ps@1 s 和 0.4 ps@8192 s。所提方法为长距离高精度光纤时间传递提供了一种有效的解决方案。

**关键词** 光纤; 时间传递; 单光子探测; 双向时分复用; 传输时延

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230517

## 1 引言

高精度时间传递在地球科学、导航定位全等领域扮演着重要角色<sup>[1-4]</sup>。光纤传输的损耗低、带宽高和抗干扰能力强等特点, 使得光纤时间传递成为实现长距离高精度时间传递的主要手段<sup>[5-8]</sup>。光纤时间传递方法分为单向法和双向法, 双向法传输时延的对称性能够有效降低环境对时间传递准确度的影响, 因此受到广泛关注<sup>[9-12]</sup>。捷克团队采用波分复用和中继放大技术在 740 km 光纤中实现了稳定度优于 8.7 ps@500 s 的双向时间比对<sup>[13]</sup>。波兰 AGH 理工大学利用环回法在 615 km 光纤中实现了稳定度达 300 fs@1 s 和 3 ps@10<sup>5</sup> s 的双向时间比对<sup>[14]</sup>。上海交通大学基于双向时分复用同纤同波方案在 13134 km 光纤中实现了稳定度优于 32 ps@10 s、不确定度小于 89.6 ps 的双向时间比对<sup>[15]</sup>。对于长距离光纤时间传递, 为了避免由链路损耗导致的接收端无法正确探测信号, 需要采用中继放大<sup>[16-18]</sup>。对于双向中继放大, 双向传递链路不一致会引入前后向传输时延不对称<sup>[19-20]</sup>, 必须进行校准标定才能满足高精度时间传递的要求。即使可以实现双向传输时延对称<sup>[21-22]</sup>, 传输信噪比也会随着传输距离的增加和引入噪声的累积逐渐恶化。因此, 在长距离光

纤时间传递中避免使用中继放大, 不仅可以跳过链路标定, 降低实验复杂度, 还能保证双向传输时延对称性, 提高时间传递精度。

单光子探测器具有极高的探测灵敏度, 能够探测极微弱的光信号<sup>[23]</sup>, 在激光测距、深度成像、高精度激光时间传递及光纤传输特性测量等信道损耗较大, 且需要精确测量光信号传输时间的领域被广泛应用<sup>[24-30]</sup>。捷克技术大学基于单光子探测完成了精度从 3 ps 到亚皮秒的空间双向时间传递<sup>[31]</sup>, 随后结合移位非负矩阵分解算法实现了在数小时内的平均精度达亚皮秒的空间双向时间传递<sup>[32]</sup>。中国科学院国家授时中心基于量子测量技术在 9.76 km 实地光纤中完成了稳定度为 1.55 ps@10 s 和 92 fs@20480 s 的双向量子时间传递<sup>[33]</sup>。考虑到实际应用, Hong 等<sup>[34]</sup>在 50 km 光纤中实现了稳定度分别为公共参考时钟下 54.6 fs@57300 s 和独立参考时钟下 89.5 fs@57300 s 的双向量子时间传递。目前, 基于量子光源的方案由于其输入光信号功率较低, 只能达到单光子量级, 因此传递距离有限。

本文结合光纤时间传递和单光子探测的优点, 提出一种基于单光子探测的长距离无中继光纤时间传递方案。主端(从端) 利用与参考时钟同步的 1 pulse/s 时间信号控制锁模激光脉冲序列作为发送信号, 从端

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-02-22; 录用日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(62120106010)、浙江省领雁计划(2022C01156)、上海市自然科学基金(22ZR1430200)

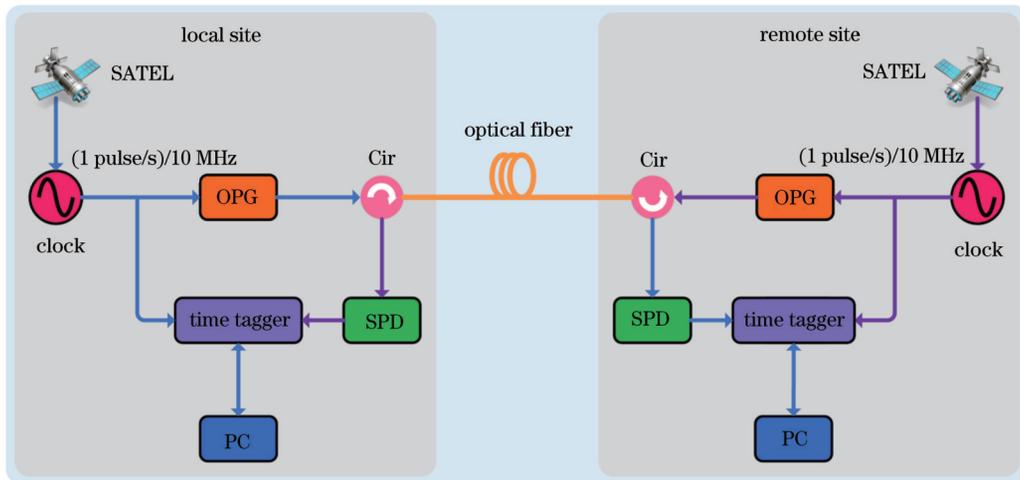
通信作者: \*liang.hu@sjtu.edu.cn

(主端) 利用具有极高探测灵敏度的单光子探测器探测接收的信号。光纤链路无需设置中继放大, 也无需链路标定。基于双向时分复用同纤同波时间比对方案设置传递信号形式并搭建实验系统, 根据时间相关单光子计数和高斯拟合数据处理获得双向光纤链路传输时延变化数值, 再得到两端之间钟差的时间稳定度。此外, 实现了单光子探测器在外部触发门控工作方式下的动态触发控制系统, 以及用于时延变化的长距离光纤时间传递。通过利用光纤链路传输时延变化量, 实现对门控触发信号的控制, 进而达到探测门控信号可以长期跟踪探测待测目标信号的目的。在 350 km 长的实验室光纤链路中进行测试, 实现的时间稳定度优于 1.5 ps@1 s 和 0.4 ps@8192 s。

## 2 系统方案与原理

基于单光子探测的长距离光纤时间传递方案如图 1 所示。对于双向传输可采用同纤双向波分复用的方案, 虽然滤波作用可以避免因后向散射造成的接收信噪比恶化及时间信号抖动增强, 但是两个方向采用

不同的传输波长, 会引入双向时延不对称性, 因此需要进行复杂的时延标定。随着光纤长度的增加, 由标定引起的时间传递不确定度也将增大。本课题组提出的双向时分复用同纤同波时间比对方案无需进行链路标定, 不仅能够最大限度地保证双向传输时延的对称性, 还能有效抑制后向散射对传递时间信号的影响。利用主端(从端)参考时钟输出的(1 pulse/s)/10 MHz 时间信号控制光脉冲发生器(OPG)同步输出光脉冲序列, 以此作为发送信号并经过环形器(circulator)和长距离光纤向从端(主端)传输, 再利用从端(主端)具有极高探测灵敏度的单光子探测器(SPD)接收信号。通过时分复用, 各端的信号发送和接收可以在时间上交替完成, 保证在接收信号的过程中本地光源不发送光信号。通过时间数字转换器(time tagger)获取主端(从端)时钟信号和接收信号的到达时间, 根据这些时间戳数据得到双向光纤链路传输时延变化, 由此获得两端之间钟差的时间稳定度, 完成双向时间比对。此外, 钟差的整数脉冲周期的模糊度可通过卫星进行标定。



SATEL: satellite; OPG: optical pulse generator; Cir: circulator; SPD: single photon detector; PC: personal computer

图 1 基于单光子探测的长距离光纤时间传递方案

Fig. 1 Long-distance optical fiber time transfer scheme based on single photon detection

基于双向时分复用同纤同波的时间比对比序如图 2 所示, 其中虚线表示本端的参考时钟信号。主端将波长为  $\lambda$ , 且经过 1 pulse/s 时间信号控制的光脉冲序列发送给从端, 其中  $\tau$  为 1 pulse/s 秒脉冲的占空比。从端不是在参考时钟到来时立即控制信号, 而是将 1 pulse/s 时间信号延迟一段时间  $T_d$ , 直到完成对主端发送信号的接收再进行输出控制。从端将延迟后的由 1 pulse/s 时间信号控制的同波长( $\lambda$ )光脉冲序列通过同一光纤链路发送给主端, 同时主端在执行下一次控制输出前要完成对从端发送信号的接收。在任何时段内, 实验系统中存在的光信号只来源于同一端, 这样可有效保证大部分后向散射对时间信号的影响已被消除。根据图 2, 可以得到

$$\tau_{LR}^F + \tau_L^T + \tau_R^R = \Delta T + N_R T_0 - \tau_{LR}^J, \quad (1)$$

$$\tau_{RL}^F + \tau_R^T + \tau_L^R + \Delta T + T_d = N_L T_0 - \tau_{RL}^J, \quad (2)$$

式中:  $\Delta T$  为两端之间的钟差;  $\tau_{LR}^F$  ( $\tau_{RL}^F$ ) 为从主端(从端)到从端(主端)的光纤链路传输时延;  $\tau_L^T$  ( $\tau_R^T$ ) 为主端(从端)的发送时延;  $\tau_L^R$  ( $\tau_R^R$ ) 为主端(从端)的接收时延;  $\tau_{LR}^J$  ( $\tau_{RL}^J$ ) 为从主端(从端)到从端(主端)的光纤链路传输时延变化;  $T_0$  为参考时钟信号的重复周期;  $T_d$  为从端 1 pulse/s 时间信号的延迟时间;  $N_L$  ( $N_R$ ) 的取值为某个整数。由于双向采用同一光纤链路和同一波长传输光信号, 在通常缓慢变化的环境下, 可以认为每秒时间内  $\tau_{LR}^F$  和  $\tau_{RL}^F$  是相等的。因此, 根据式(1)和式(2), 可以得到两端的钟差为

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(\tau_{LR}^L - \tau_{RL}^L) + (\tau_L^T - \tau_L^R + \tau_R^R - \tau_R^T) + (N_L - N_R)T_0 - T_d] \quad (3)$$

由于式(3)中的  $\tau_L^T - \tau_L^R + \tau_R^R - \tau_R^T$  是由两端发送时延和接收时延的不对称导致的,可以通过高精度的光(电)仪器进行校准标定,记为一个固定值  $\tau_0$ ,且  $N_L$  和  $N_R$  均为整数,式(3)可以改写为

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(\tau_{LR}^L - \tau_{RL}^L) + (\tau_0 + NT_0 - T_d)], \quad (4)$$

式中:  $N = N_L - N_R$ , 且  $N$  的取值为某一整数。由于  $\tau_0 + NT_0 - T_d$  可以看作一个固定值,因此  $\frac{1}{2}(\tau_{LR}^L - \tau_{RL}^L)$  与  $\Delta T$  的时间稳定度完全相同。利用时间相关单光子计数方式分别对每秒时间获得的双向光纤链路传输时延变化进行统计,再通过高斯拟合方式得到每秒时间内具有最大出现概率的光纤链路传输时延变化数值,作为  $\tau_{LR}^L$  和  $\tau_{RL}^L$ 。由式(4)可得到两端之间钟差的时间稳定度。对于脉冲信号的整数周期  $N$  可采用卫星(如 GPS、北斗)等标定<sup>[35-36]</sup>。

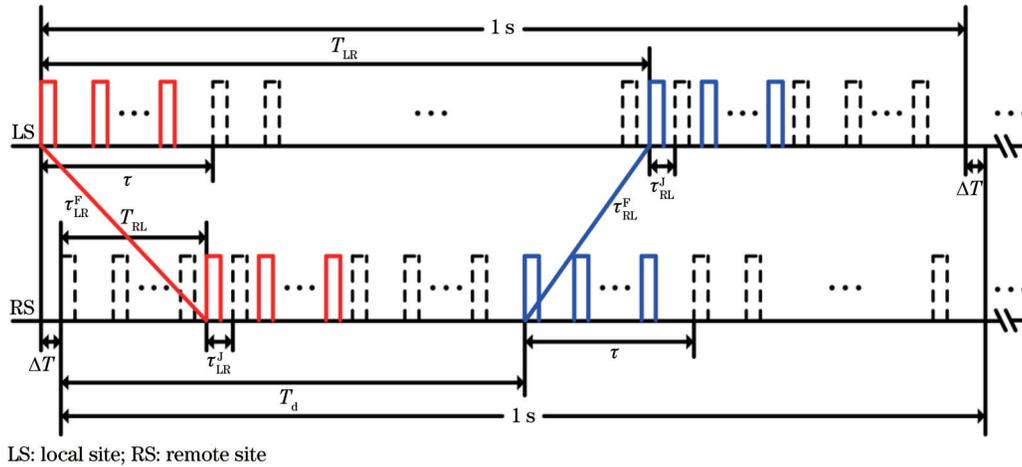


图 2 基于双向时分复用同纤同波的时间比对应序

Fig. 2 Time comparison sequence based on bidirectional time division multiplexing transmission over a single fiber with the same wavelength

### 3 系统设计与实现

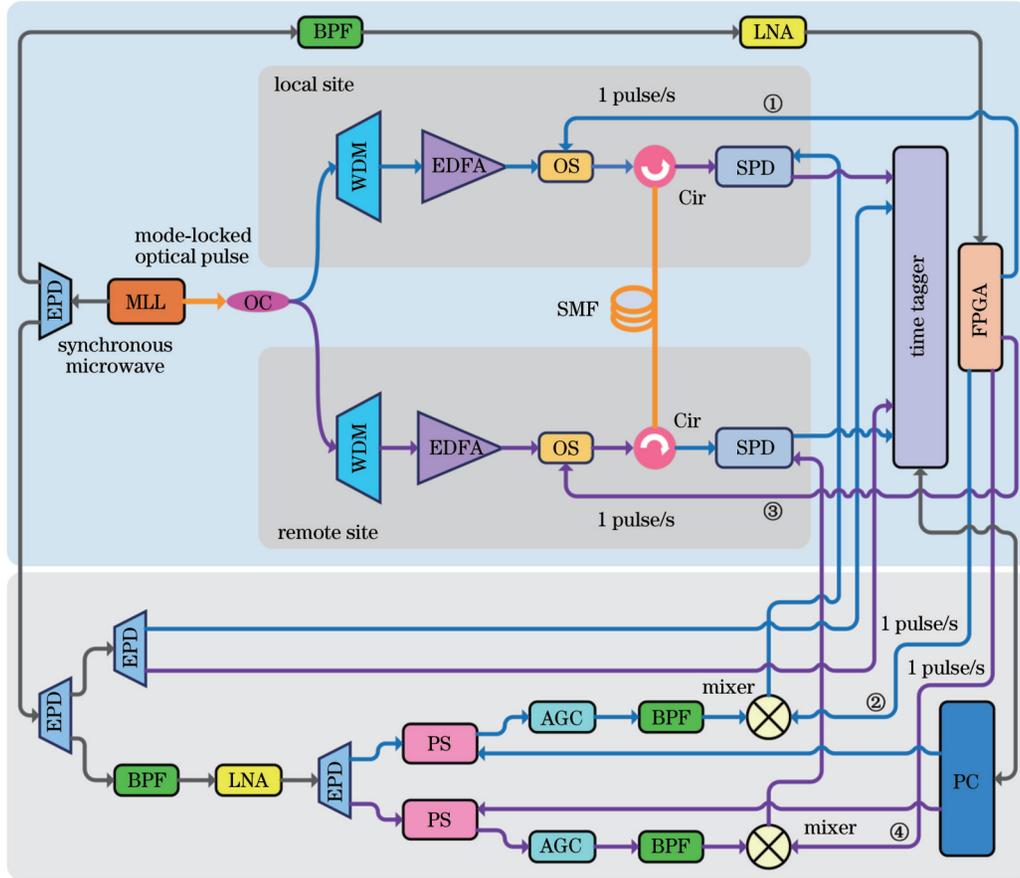
本实验搭建的基于单光子探测的长距离光纤时间传递系统如图 3 所示。由于实验条件有限,采用同一台脉冲重复频率为 36.457 MHz 的锁模激光器 (MLL) 共同为主端和从端提供参考时钟和脉冲光源,同时也可以避免时钟漂移对时间传递结果的影响。将参考时钟功分出一路作为现场可编程门阵列 (FPGA) 的输入信号,通过分频产生两路时分 1 pulse/s 时间信号,设置信号占空比为 40%,两路信号的时间间隔为 0.5 s,并将其作为双向时分复用同纤同波时间比对的传递信号形式。由于在任意时刻,光纤链路中只存在单向传输的光信号,因此由本地光源引起的后向散射和反射噪声对接收时间信号的影响可以得到有效抑制。利用光耦合器 (OC) 将脉冲光源均分为两路,分别经过波分复用 (WDM) 器得到相同波长的连续光脉冲。考虑到脉冲光源光谱的半峰全宽 (FWHM, 3 dB 带宽) 约为 45 nm,而波分复用器每条通道的半峰全宽约为 0.65 nm,滤波后连续光脉冲的平均光功率约为 -27 dBm,因此加入掺铒光纤放大器 (EDFA) 来保证其可用光功率。将放大后的连续光脉冲利用上述时分 1 pulse/s 时间信号通过光开关 (OS) 进行控制,将得到的双向时分光脉冲序列作为两端的

发送信号,并经环形器发送到光纤中进行长距离传输。由于两端时间信号采用同纤同波的方式传输,可最大程度地消除色散导致的双向传输时延及其变化的不对称性,避免由复杂的光纤链路时延标定带来的时间传递不确定性。具有极高探测灵敏度的单光子探测器可探测微弱的光信号,并在探测输出端输出标志脉冲,因此光纤链路无需设置中继放大。利用 time tagger 采集两路单光子探测器的探测输出信号和由参考时钟功分出的同步信号的上升沿绝对到达时间,其中前者为开始时间,后者为结束时间,二者的差值即为每一条光纤链路传输时延变化。根据式(4)得到两端之间钟差的时间稳定度,完成双向时间比对。

本实验使用的单光子探测器是 ID Quantique 公司生产的 ID210 型探测器,基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的盖格模式工作,在 1550 nm 的工作波长下探测效率最高可达 25%,时间分辨率低于 200 ps,探测门控宽度在 0.5~25 ns 可调,死时间在 0.1~100 μs 可调,可以在 100 MHz 的高速门控频率下工作,工作模式包括自由运行和门控模式两种,其中门控模式包括内部门控和外部触发门控两种。为了尽可能地减少暗计数,系统采用单光子探测器门控模式下的外部触发门控工作方式对信号进行探测。由于长距离光纤时延的变化,需要动态调整探测门控触发信号,以保证到达单

光子探测器的光脉冲完全出现在门控信号之内<sup>[37-38]</sup>, 将探测门宽设为 5 ns。已知单模光纤的温度系数约为 35 ps/(km·°C), 环境温度随时间的变化将导致光纤链路传输时延发生变化。由于锁模激光器的脉冲重复周期约为 27.43 ns, 如果门控信号位置保持不变, 会导致

从某时刻开始待探测的光脉冲出现在门控信号之外。可以根据光纤链路传输时延的变化相应调节门控信号的时移量, 使光脉冲始终保持在门控信号之内。因此, 设计单光子探测器触发控制系统来完成探测门控的自动时移, 以实现整体系统的长期测试。



MLL: mode-locked laser; OC: optical coupler; WDM: wavelength division multiplexer; EDFA: erbium doped fiber amplifier; OS: optical switch; Cir: circulator; SMF: single mode fiber; SPD: single photon detector; FPGA: field programmable gate array; EPD: electrical power divider; BPF: bandpass filter; LNA: low noise amplifier; PS: phase shifter; AGC: automatic gain circuit; PC: personal computer

图 3 基于单光子探测的长距离光纤时间传递实验系统

Fig. 3 Experimental system for long-distance optical fiber time transfer based on single photon detector

由于单光子探测器存在死时间, 到达的光脉冲不可能被全部探测到。为了使光脉冲持续保持在门控信号之内并尽可能多地被探测到, 需要将单光子探测器的探测门控触发信号设置为与对端发送光信号具有相同的脉冲重复周期。如图 3 所示, 将参考时钟功分出的一路同步信号分别经过中心频率为 36.5 MHz 的带通滤波器 (BPF) 和低噪声功率放大器 (LNA), 得到与同步信号同频率的正弦信号, 将其功分为两路并分别作为两端移相器 (PS) 的输入信号。将移相器连接到计算机, 设置串口波特率为 9600 bit/s, 根据待移相大小配置相应的十六进制数作为串口发送指令控制移相器进行移相。后续将利用移相输出信号产生单光子探测器探测门控的触发信号。综上所述, 可以采用 LabVIEW 上位机完成对 time tagger 时间戳数据的实时获取、动态处理和移相指令输出。移相规则可以表

示为

$$D_{curr} = D_{orig} + (\tau_{gs}^j - \tau_{min}^j - \tau_{hf})\alpha, \quad (5)$$

式中:  $D_{curr}$  为当前待移相大小;  $D_{orig}$  为原移相大小, 实验开始时的初始值可结合门控信号与光脉冲的间距来设置;  $\tau_{hf}$  为单光子探测器探测门宽的一半;  $\alpha$  为移相系数, 影响门控信号时移调整的快慢, 实验中设置为 0.01;  $\tau_{gs}^j$  为每秒内链路传输时延变化的高斯拟合数值;  $\tau_{min}^j$  为采集的每秒内链路传输时延变化的最小值, 由于单光子探测器探测的单光子信号的统计高斯分布宽度小于探测门宽, 因此该值通常来源于暗计数。又因为暗计数均匀分布在整個门控信号之内,  $\tau_{gs}^j - \tau_{min}^j$  即反映了高斯峰值到门一侧的时差。将移相后的信号经过自动增益电路 (AGC) 保持电压峰值不变, 再经过带通滤波器滤除杂波, 以此保证移相后信号的稳定, 避免在不同的相移量下信号峰值发生跳变。

由于光纤传输距离较长,各端经环形器发出的光信号产生的后向散射比从对端传输过来的有用光信号的光功率更大,单光子探测器的接收信噪比较低。因此,可以使单光子探测器在信号发送时关闭探测,等信号发送完毕再启用探测。图 4 所示为现场可编程门阵列产生的四路 1 pulse/s 时间信号(图 3 的①~④)之间的关系。在不考虑发送和接收时延的理想情况下,经过主端(从端)信号①(③)控制的光脉冲序列发送完毕 0.1 s 后,利用信号②(④)控制移相后的信号,以此作为单光子探测器的探测门控触发信号。下一秒信号①(③)开

始控制连续光脉冲的前 0.1 s,停止为单光子探测器输入门控触发信号。但在实际中发送和接收时延不可避免,将信号①、②(③、④)前后之间的时间间隔设置为 0.1 s,这样可以有效避免由光开关控制信号时引起的发送时延导致主端(从端)没有将光脉冲序列发送完毕,单光子探测器就启用探测,以及由混频器控制信号时引起的发送时延和单光子探测器门控触发信号的接收时延导致主端(从端)单光子探测器没有关闭探测就开始向从端(主端)发送光脉冲序列,确保两端单光子探测器探测的光信号始终来自对端的发送光信号。

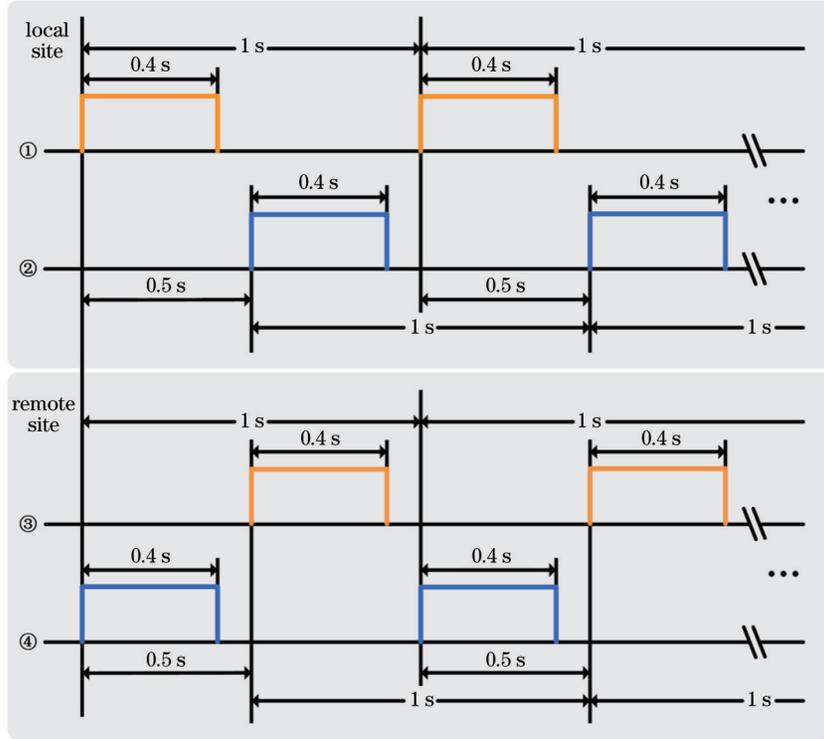


图 4 现场可编程门阵列产生的四路 1 pulse/s 时间信号的关系  
Fig. 4 Relation of 4-channel 1 pulse/s time signals generated by field programmable gate array

### 4 实验结果与分析

为了匹配单光子探测器在 1550 nm 工作波长下的最大探测效率,实验选择波分复用器的 C34 通道波长(1550.12 nm)作为系统的传输波长,适当调节掺铒光纤放大器的增益值,使各端发送至光纤前的光脉冲序列的平均光功率约为 0 dBm。将锁模激光器功分出的一路时钟信号分别经过带通滤波器和低噪声功率放大器,再发送给现场可编程门阵列,确保其输入信号有效。 $T_d$  设置为 0.5 s。将两端发送光信号分别输入到光电探测器中,通过示波器可观测到信号的时域波形满足所需时分条件,且光脉冲的脉冲宽度约为 200 ps。所使用的单模光纤(SMF)长度为 350 km,衰减约为 74.20 dB。光纤传输存在色散效应,导致光脉冲展宽,因此加入对应单模光纤长度的色散补偿光纤来补偿色散,衰减约为 25.23 dB。光纤链路的总衰减约为

100 dB。设置单光子探测器的工作参数如下:死时间为 10  $\mu$ s,探测效率为 25%,调节探测门控触发信号的电压阈值,使门控信号的频率为 1.3~1.5 MHz,将暗计数率控制在 400~500 Hz 范围内。调节单光子探测器的探测门控触发信号与门控信号之间的延时,找到探测率最大值处,认为此时的光脉冲恰好出现在门控信号中间,此后就可以利用单光子探测器触发控制系统来完成门控信号的自动时移。此时有效探测率为 1.5~2 kHz,保证了接收信噪比足够高。

为了验证单光子探测器触发控制系统的有效性,找到两端单光子探测器的探测率最大值处,并使二者基本相等。对于门控信号自动时移调节,一端启用,另一端关闭。通过对 LabVIEW 上位机获取的 time tagger 时间戳数据进行处理,得到的双向传输时延变化的高斯拟合数值如图 5 所示。可以看到,当两路数值在时延波动约为 1.8 ns 时,关闭自动时移调节的第

二路的数值发生了间接性的剧烈跳变,在此之前其均与第一路数值的变化趋势完全一致。原因是对于 5 ns 的探测门宽,1.8 ns 基本达到其有效门宽的一半,导致光脉冲出现在门控信号的边缘,且光脉冲的一部分已经出现在门控信号之外。此时单光子探测器的输出可

能并非来自光脉冲,而是来自暗计数。如果探测器的输出来自暗计数,就会导致高斯拟合的结果出错。从启用自动时移调节的第一路信号与关闭自动时移调节的第二路信号的对比结果发现,单光子探测器触发控制系统可以正常工作。

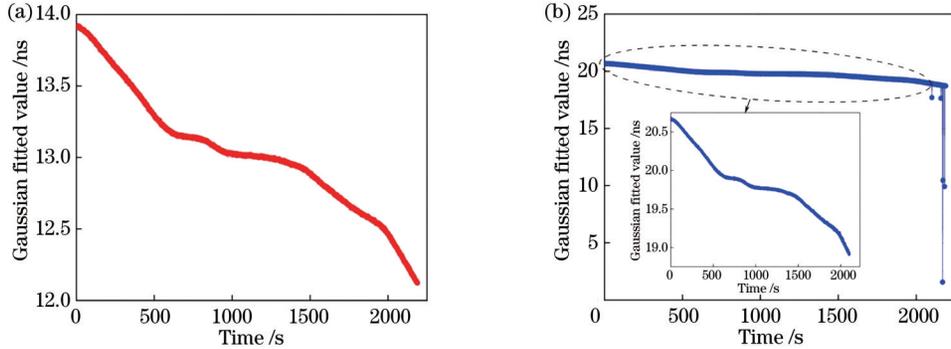


图 5 双向传输时延变化的高斯拟合结果。(a) 第一路 (启用自动时移);(b) 第二路 (关闭自动时移)

Fig. 5 Gaussian fitted results of variations for two-way transmission delays. (a) First way (enable automatic time shift); (b) second way (turn off automatic time shift)

在两端均启用自动时移调节的情况下,得到的双向传输时延变化的高斯拟合数值如图 6 所示。可以看到,两路数值随时间的变化趋势完全相同。由于受到温度变化和环境影响,两路数值在 47137 s 的测

试时长中均发生了 9.6 ns 以内的时延波动。两端同种器件的工作性能存在差异,造成两端信号的发送时延和接收时延不可能完全相同,由此导致两路数值在同时刻存在约 6.7 ns 的差异。

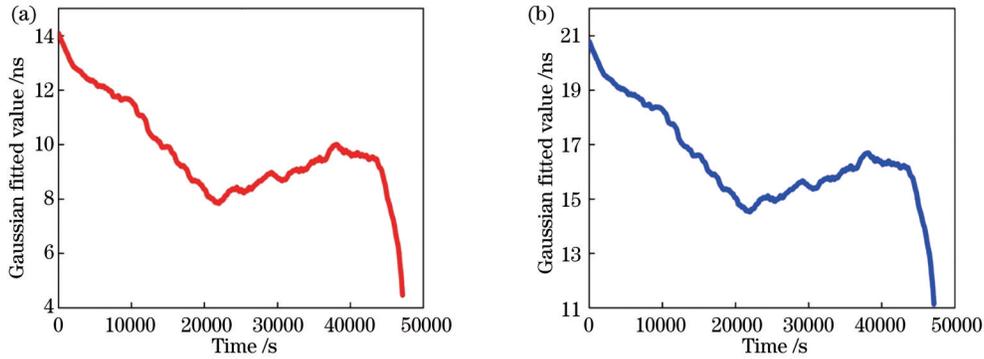


图 6 双向传输时延变化的高斯拟合结果。(a) 第一路 (主端到从端);(b) 第二路 (从端到主端)

Fig. 6 Gaussian fitted results of variations for two-way transmission delays. (a) First way (local site to remote site); (b) second way (remote site to local site)

根据式 (4) 得到的双向比对结果和双向比对的时间稳定度 (TDEV) 计算结果如图 7 所示,作为基于单光子探测的长距离光纤时间传递的实验结果。可以看到,在整个测试过程中,双向比对结果的平均值约为 3.34 ns,且波动的峰峰值不超过 30 ps。根据计算结果得到两端之间钟差的时间稳定度优于 1.5 ps@1 s (短稳) 和 0.4 ps@8192 s (长稳),这得益于较大的发射功率,时间传递距离远大于量子时间传递<sup>[33-34,39-41]</sup>,同时稳定度优于很多具有相近或更短传递距离的传统光纤的时间传递稳定度<sup>[42-46]</sup>。

的对称性可以有效降低环境对光纤链路时延的影响。稳定度在 2048 s 后稍有恶化,原因是长稳主要和光纤温度及传输波长变化引起的双向传输时延不对称有关:由于采用波分复用器的滤波输出作为系统的传输波长,被单光子探测器探测的光波长服从动态范围为 0.8 nm 的近似高斯分布,可能导致双向传输波长不一致;由于测试时间较长且实验室非恒温,光纤温度将发生不均匀分布和持续性变化。以上二者都将导致双向传输时延不对称,影响长期稳定性,并且光纤温度随时间的变化越快,对稳定度的影响越大。系统短稳主要受时间信号发送、传输和接收过程中累积噪声的影响,包括锁模激光器相对强度噪声、光纤链路中端面反射和单光子探测器散弹噪声和热噪声等,这类噪声通过

由图 7 可知,双向比对的长稳相较于两路单向传输时延变化的长稳提高了 3 个数量级,且其整体稳定度优于单向传输的整体稳定度,原因是双向传输时延

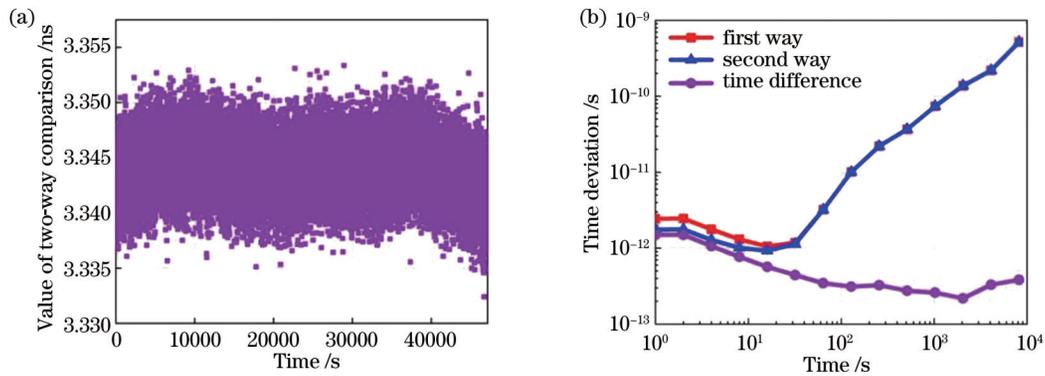


图 7 基于单光子探测的长距离光纤时间传递的实验结果。(a) 双向比对结果;(b) 双向比对的 TDEV 计算结果

Fig. 7 Experimental results of long-distance optical fiber time transfer based on single photon detection. (a) Results of two-way comparison; (b) TDEV calculation results of two-way comparison

恶化接收信号的信噪比直接影响系统短稳。除此之外,色散补偿光纤的补偿效果、接收到的单光子高斯分布宽度及单光子探测器的时间分辨率都将对系统整体稳定度产生影响,通过使用可调色散光纤精确地调节色散量,可以对稳定度起到一定的改善效果。本实验中两端利用同一光源,且两端的 time tagger 采用同一频率信号对时间信号进行测量,对基于单光子探测的实验系统进行验证,而对于主从端采用不同频率信号的影响,已有学者进行研究<sup>[34]</sup>。

## 5 结 论

基于单光子探测技术和双向时分复用同纤同波时间比对方案设计了长距离光纤时间传递系统。由于单光子探测器具有极高的探测灵敏度,光纤链路无需设置中继放大,在保证高双向传输时延对称性的同时,有效抑制了后向散射对传递时间信号的影响,提升了接收信噪比。350 km 长光纤链路的实验结果表明,时间比对稳定度优于 1.5 ps@1 s 和 0.4 ps @8192 s。所提方法为长距离光纤时间比对提供了一种有效的解决方案。

### 参 考 文 献

- [1] Bondaescu R, Bondaescu M, Hetényi G, et al. Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(1): 78-82.
- [2] Tavella P, Petit G. Precise time scales and navigation systems: mutual benefits of timekeeping and positioning[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-12.
- [3] 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.
- [4] 徐季平, 王拂为, 徐旻, 等. 精密时间频率技术及在军事领域的应用[J]. *国防科技*, 2010, 31(6): 8-13.  
Xu J P, Wang F W, Xu M, et al. Chronometric frequency technology and its military application prospect[J]. *National Defense Science & Technology*, 2010, 31(6): 8-13.
- [5] Wang B, Gao C, Chen W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the  $5 \times 10^{-19}$  accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 1-5.
- [6] Śliwczyński L, 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.
- [7] 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.
- [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] 魏恒, 卢麟, 蒲涛, 等. 基于双纤单向传输的授时方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0606005.  
Wei H, Lu L, Pu T, et al. One-way time transfer method based on dual-fiber link[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0606005.
- [10] Jefferts S R, Weiss M A, Levine J, et al. Two-way time and frequency transfer using optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1997, 46(2): 209-211.
- [11] Zhao B W. Two-way time synchronization using optical fibers [J]. *Electronic and Electro-Optical Systems*, 2005(3): 5-7, 10.  
赵炳文. 利用光纤进行双向时间同步[J]. *电光系统*, 2005(3): 5-7, 10.
- [12] 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.
- [13] Smotlacha V, Kuna A, Mache W. Time transfer using fiber links[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, April 13-16, 2010, Noordwijk, Netherlands. New York: IEEE Press, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Liang J X, Liu C X, Wu R H, et al. The bidirectional recirculating loop system for 10000 km fiber-optic time transfer [C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York:

- IEEE Press, 2018.
- [17] Amemiya M, Imae M, Fujii Y, et al. Precise frequency comparison system using bidirectional optical amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(3): 631-640.
- [18] Sliwczynski L, Kolodziej J. Bidirectional optical amplification in long-distance two-way fiber-optic time and frequency transfer systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(1): 253-262.
- [19] Liu Q, Chen W, Xu D, et al. Bidirectional erbium-doped fiber amplifiers used in joint frequency and time transfer based on wavelength-division multiplexing technology[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(11): 110601.
- [20] Lu Z, Gui Y Z, Wang J L, et al. Fiber-optic time-frequency transfer in gigabit ethernet networks over urban fiber links[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11693-11701.
- [21] Śliwczynski L, Krehlik P, Buczek Ł, et al. Fiber optic RF frequency transfer on the distance of 480 km with the active stabilization of the propagation delay[C]//2012 European Frequency and Time Forum, April 23-27, 2012, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2013: 424-426.
- [22] Sliwczynski L, Krehlik P, Buczek Ł, et al. Frequency transfer in electronically stabilized fiber optic link exploiting bidirectional optical amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(9): 2573-2580.
- [23] 程碑彤, 代千, 谢修敏, 等. 单光子探测器的研究进展[J]. *激光技术*, 2022, 46(5): 601-609.  
Cheng B T, Dai Q, Xie X M, et al. Research progress of single-photon detectors[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(5): 601-609.
- [24] Pellegrini S, Buller G S, Smith J M, et al. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting[J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(6): 712.
- [25] Kostamovaara J, Huikari J, Hallman L, et al. On laser ranging based on high-speed/energy laser diode pulses and single-photon detection techniques[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(2): 7800215.
- [26] Li Z P, Ye J T, Huang X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [27] 戴辉. 基于墨子号卫星的激光时间传递的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 56-68.  
Dai H. Experimental research on laser time transfer based on micus satellite[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 56-68.
- [28] Shentu G L, Sun Q C, Jiang X, et al. 217 km long distance photon-counting optical time-domain reflectometry based on ultra-low noise up-conversion single photon detector[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24674-24679.
- [29] 邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011020.  
Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011020.
- [30] 黄润宇, 赵伟林, 曾辉, 等. InP 基单光子探测器的发展和应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011009.  
Huang R Y, Zhao W L, Zeng H, et al. Development and application of InP-based single photon detectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011009.
- [31] Blazej J, Prochazka I, Kodet J, et al. Indoor demonstration of free-space picosecond two-way time transfer on single photon level[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9224: 92241E.
- [32] Trojanek P, Prochazka I. Optical fiber two-way time transfer based on single photon counting approach[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(8): 086106.
- [33] 侯飞雁, 权润爱, 项晓, 等. 基于实地光纤的双向量子时间传递实验研究[J]. *时间频率学报*, 2020, 43(4): 253-261.  
Hou F Y, Quan R A, Xiang X, et al. Experimental research on two-way quantum time transfer based on solid fiber[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2020, 43(4): 253-261.
- [34] Hong H B, Quan R N, Xiang X, et al. Demonstration of 50 km fiber-optic two-way quantum clock synchronization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(12): 3723-3728.
- [35] Hachisu H, Fujieda M, Nagano S, et al. Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000 km[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4072-4075.
- [36] Pizzocaro M, Sekido M, Takefuji K, et al. Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry[J]. *Nature Physics*, 2021, 17(2): 223-227.
- [37] 方俊彬, 廖常俊, 魏正军, 等. 超短光脉冲波形对门模单光子探测的影响[J]. *光子学报*, 2009, 38(9): 2192-2195.  
Fang J B, Liao C J, Wei Z J, et al. Influence of ultra-short laser pulse shapes on gate-mode single photon detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2192-2195.
- [38] 曾智龙, 朱勇, 卢麟, 等. 单光子探测峰值扫描法高精度光纤传输时间测量研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508003.  
Zeng Z L, Zhu Y, Lu L, et al. Research of peak count rate scanning method for single photon detector used in high precision optical transfer time measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508003.
- [39] Quan R N, Hong H B, Xue W X, et al. Implementation of field two-way quantum synchronization of distant clocks across a 7 km deployed fiber link[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 10269-10279.
- [40] Hou F Y, Quan R N, Dong R F, et al. Fiber-optic two-way quantum time transfer with frequency-entangled pulses[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(2): 023849.
- [41] 权润爱. 基于频率一致纠缠源及二阶量子干涉的时间同步研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2019: 35-76.  
Quan R A. Investigation of quantum clock synchronization based on coincident-frequency entanglement and second-order quantum coherence[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2019: 35-76.
- [42] Hu L, Wu G, Zhang H, et al. A 300-kilometer optical fiber time transfer using bidirectional TDM dissemination[C]//Proceedings of the 46th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, December 1-4, 2014, Boston, Massachusetts. [S.l.: s.n.], 2014: 41-44.
- [43] Zuo F X, Chen Z F, Hu L, et al. WDM-based fiber-optic time synchronization without requiring link calibration[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 114656-114662.
- [44] Wu G L, Hu L, Zhang H, et al. High-precision two-way optical-fiber time transfer using an improved time code[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 114701.
- [45] 程楠, 陈炜, 刘琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0705002.  
Cheng N, Chen W, Liu Q, et al. Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0705002.
- [46] Rost M, Piester D, Yang W, et al. Time transfer through optical fibres over a distance of 73 km with an uncertainty below 100 ps[J]. *Metrologia*, 2012, 49(6): 772-778.

# Two-Way Time Comparison of High-Precision and Long-Distance Optical Fiber Based on Single Photon Detection

Fu Xinyu, Hu Liang\*, Zhou Zijie, Chen Jianping, Wu Guiling

*State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

## Abstract

**Objective** With the continuous progress in science and technology, the performance of time and frequency standards have been constantly improved, which brings about higher requirements for the accuracy of time and frequency transfer technology. Optical fiber has the advantages of low loss, large bandwidth, high stability, and resistance to electromagnetic interference, and optical fiber networks have spread all over the world. Optical fiber time transfer has been recognized as an effective solution to long-distance and high-precision time transfer. When optical fibers reach a certain length, the regeneration and amplification of signals must be installed for boosting the signals' amplitude. Additionally, optical amplifiers will lead to asymmetric bidirectional transmission delays, and complex delay calibration must be carried out to meet the requirements of high-precision time transfer. At the same time, the signal-to-noise ratio (SNR) will gradually deteriorate with the increasing transmission distance, which will reduce the stability of time transfer. Based on the high sensitivity of single photon detectors, this paper proposes a non-relay long-distance optical fiber time transfer scheme based on single photon detection. The scheme not only does not require link calibration, which reduces the complexity of the experiment, but also ensures the symmetry of bidirectional transmission delays to improve the accuracy of time transfer. The dynamically adjustable external trigger control system is designed and implemented to achieve the gating mode of single photon detectors with low dark counts. Consequently, the detectors can continuously detect the time signals without the effect of transmission delay variations of the optical fiber link.

**Methods** Optical fiber time transfer mainly includes one-way and two-way methods, and this paper adopts the two-way method to design the experimental scheme. The scheme employs the laser pulse sequence controlled by the local (remote) 1 pulse/s time signal as the transmission signal and utilizes single photon detectors with extremely high detection sensitivity to receive the signals arriving at the remote (local) site. It is unnecessary to install optical amplifiers or perform link calibration. The system adopts the bidirectional time-division multiplexing time comparison method over a single fiber with the same wavelength. According to the time-correlated single-photon counting method, the two-way variations at both the sites obtained per second are counted separately. Then the statistical values of the two-way variations with the maximum probability per second are obtained by the Gaussian fitting method. Finally, the time transfer stability (time deviation, TDEV) of the clock difference between both the sites is acquired. The ambiguity of the integer number of the pulse periods of the clock difference can be calibrated by other methods such as GPS or Beidou satellites. In addition, the gating signal is dynamically adjusted to ensure that the optical pulses arriving at the single photon detector always appear in the gating signal.

**Results and Discussions** The Gaussian fitted values of the variations for the two-way transmission delays of the optical link are obtained to verify the effectiveness of the trigger control system of the single photon detector, which proves that the system can work normally (Fig. 5). The changes of these values of the variations for two-way transmission delays during the test time of 47137 s have the same trends over time. Because the sending and receiving delays of signals between the local and remote sites are not exactly the same, there is a difference of about 6.7 ns between the two-way Gaussian fitted values at the same time (Fig. 6). The results of the bidirectional comparison and TDEV of the bidirectional comparison are acquired by the two-way Gaussian fitted values (Fig. 7). The peak-to-peak value of the fluctuation is no more than 30 ps. The TDEV of the bidirectional comparison, which is the TDEV of the clock difference between both the sites, is better than 1.5 ps@1 s (short-term stability) and 0.4 ps@8192 s (long-term stability). Since the symmetry of the bidirectional transmission delays can greatly reduce the effect of the environment on transmission delays of the optical fiber link, the long-term stability of the bidirectional comparison is optimized by three orders of magnitude compared with that of the free-running mode. However, the changes in the delay of the outside of the loop signal can bring about the asymmetry of the bidirectional transmission delays, thus resulting in slight deterioration of the stability after 2048 s.

**Conclusions** In this paper, a long-distance optical fiber time transfer system is designed based on single photon detection and bidirectional time-division multiplexing transmission over a single fiber with the same wavelength. Owing to the

extremely high detection sensitivity of the single photon detector, it is unnecessary to adopt optical amplifiers in the optical fiber link. While the high symmetry of the bidirectional transmission delays is guaranteed, the effect of the backscattering on the time signals transmitted is effectively suppressed, thus improving the received SNR. Experimental results of the optical fiber link of 350 km show that the TDEV of the bidirectional time comparison is better than 1.5 ps@1 s and 0.4 ps@8192 s, providing an effective solution for long-distance and high-precision optical fiber time transfer. In conclusion, the asymmetry of the bidirectional transmission delays caused by the delay changes of the outside of the loop signal affects the long-term stability. The noises accumulated during sending, transmitting, and receiving the time signals affect the short-term stability. The compensation effect of the dispersion compensation fiber, the width of the single photon Gaussian distribution received, and the time resolution of the single photon detector all influence the overall stability. The dispersion can be adjusted accurately by adjustable dispersion compensation fiber, thereby improving the system stability. The experimental results show that the time transfer distance of the scheme is much longer than that of quantum time transfer, and the stability is better than those of some traditional optical fiber time transfers with a similar or shorter transfer distance.

**Key words** optical fiber; time transfer; single photon detection; bidirectional time division multiplexing; transmission delay