

基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递*

陈法喜^{1)2)†} 赵侃²⁾ 李立波^{2)‡} 郭宝龙¹⁾

1) (西安电子科技大学, 西安 710071)

2) (济南量子技术研究院, 济南 250101)

(2022年7月20日收到; 2022年8月5日收到修改稿)

时间传递不确定度是光纤时间传递系统的核心指标, 商用通讯激光模块波长的不一致和波长的漂移所引入的光纤色散效应是影响时间传递不确定度的主要因素. 本文提出了一种基于激光波长跟踪的高精度时间传递方法, 在双向同波分时方案基础上, 通过波长测量并利用双层控温保持了双向波长的长期一致性, 进而大幅改善了时间传递不确定度指标, 该方法在长距离光纤时间传递系统中尤其重要. 为了验证该方法的可行性, 在 0.005, 250, 500, 750 km 不同长度的实验室光纤链路上进行了实验验证, 时间同步偏差均优于 5 ps, 并在 750 km 实验室链路上实现了稳定度为 $4.7 \text{ ps}@1 \text{ s}$, $0.4 \text{ ps}@4 \times 10^4 \text{ s}$ 和时间传递不确定度 8.4 ps 的高精度时间传递, 为远距离高精度光纤时间传递工程奠定技术基础.

关键词: 光纤链路, 时间同步, 同步网络, 波长跟踪

PACS: 07.60.Vg, 06.30.-k, 42.81.Uv

DOI: 10.7498/aps.71.20221460

1 引言

高精度时间频率体系在导航定位、航空航天、大地测量、精密计量、深空探测、引力波探测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^[1-4]. 目前时间频率领域的研究飞速发展, 冷原子微波原子钟的天稳定度已达 10^{-16} 量级^[5], 铯原子光钟稳定度达到 $2 \times 10^{-17} \tau^{-1/2}$ ^[6], τ 为频率稳定度的平均时间, 铝离子光钟准确度达 8.6×10^{-18} ^[7]. 为了使高精度时间频率基准的性能不在传递过程中恶化, 时间频率传递的精度必须比被传递的时频基准高出一个量级以上. 因此, 如何提高时间传递精度, 成为科学家们关注的重大课题之一.

由于光纤具有抗电磁干扰、受外界环境干扰较小、低损耗以及传输带宽大等优势, 被认为是目前最适合用于高精度时间传递的工具. 欧美发达国家

一直以来都高度重视光纤授时技术的发展, 并使光纤时间传递的指标得到大幅提升^[8,9]. 光纤时间传递的主要指标包括时间传递的稳定度和准确度, 稳定度描述传递引入的时间信号的附加抖动和漂移, 一般用 TDEV 表示; 准确度描述传递引入的时间同步偏差, 由于影响准确度的因素较多且难以全部直接测量, 故通常采用不确定度表示. 2013 年, 波兰克拉科夫 AGH 科技大学在 420 km 的实地光纤链路上获得了优于 112 ps 的时间传递不确定度^[10]. 2020 年, Śliwczynski 等^[11] 开展了激光波长稳定技术方面的研究, 虽然提高了 TDEV, 但由于双向激光频率差异在 12.5 GHz 左右, 难以有效改善时间传递不确定度. 2018 年法国巴黎天文台和巴黎第二大学等机构为探索更高精度的光纤时间传递方案, 采用一台激光器模拟两个异地光源的方法, 验证了在双向激光波长差异极小的情况下, 获得更高时间传递性能指标的可能, 并在 86 km 实地城市

* 国家自然科学基金 (批准号: 12003042) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cfx2006xd@163.com

‡ 通信作者. E-mail: lilibo@jiqt.org

光纤链路上, 实现了 4.2 ps@1 s 和 0.4 ps@1000 s 的时间传输稳定度^[12]. 该实验仅进行了双向时间比对, 没有对输出时间进行补偿, 未能给出不确定度指标, 但该方案为本文方案提供了一定的研究参考. 国内多个研究小组在光纤时间传递领域陆续开展了研究, 并取得了重要突破^[13-18]. 上海交通大学在 2020 年使用多波长波分复用的方案, 在 200 km 链路上实现了时间传递不确定度为 28 ps, TDEV 为 29.8 ps@1 s 和 5.2 ps@1×10⁴ s 的长距离和多站点时间同步^[19,20], 但是色散对时间传递不确定度的影响依然未得到有效解决. 2016 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所 在 430 km 的实际商用链路上采用同纤双向波分复用的光纤授时方案, 时间传递不确定度为 94 ps^[21]. 国家授时中心于 2020 年在 1085 km 实地光纤链路中实现了 5.4 ps@4×10⁴ s 的 TDEV 和 63.5 ps 的不确定度^[22].

影响长距离光纤时间传递不确定度的主要因素是双向激光波长不一致导致双向传输延时的不对称性, 从而引起时间传递的色散偏差. 双向同纤波分复用时间传递方案有效抑制了瑞利后向散射和接头端面反射的影响, 但是长达千公里的光纤链路上, 色散参数不易精确测量并且光纤色散系数温度漂移也难以抑制. 目前国内外在长距离光纤时间传递中多采用双向同纤同波时分复用方案来克服上述问题, 该方案是采用相同标称波长的激光以时分复用的方式进行两地双向时间比对, 使双向传输延时的不对称性得到较好的抑制, 但不同激光器的波长依然存在皮米量级的差异, 且波长差异会随温度和老化等因素产生变化, 产生几十皮秒的偏差^[15,23], 使得时间传递的不确定度难以进一步提升. 虽然可以采用超稳腔或原子光谱作为参考进行激光稳频, 但往往由于系统过于复杂, 难以满足长距离高精度光纤系统广泛的工程应用需求.

为了解决这一问题并满足工程应用需求, 本文

提出了一种基于激光波长跟踪的高精度时间传递方法, 在双向同波分时方案基础上, 采用商用的通信激光模块, 经双层控温和波长跟踪后保证了双向波长的长期一致性. 在双向时间比对过程中, 用本地端发出的激光作为参考光, 系统中其他激光器跟踪该参考光, 并使双向激光波长的差异足够小且保持长期稳定, 从而大幅减小双向激光波长不一致引入的时间传递偏差. 通过在实验室对 0.005, 250, 500, 750 km 长度的光纤链路进行实验验证, 结果表明采用激光波长跟踪后不同长度光纤链路的时间传递偏差均优于 5 ps, 并在 750 km 链路上获得 4.7 ps@1 s, 0.4 ps@4×10⁴ s 的时间传递稳定性和 8.4 ps 的不确定度, 为远距离高精度光纤时间传递工程奠定基础.

2 基本原理及实验装置

2.1 基于双向同波分时方案的光纤时间传递基本原理

基于双向同波分时方案的光纤时间传递基本原理如图 1 所示, 本地端和远程端在不同的时段分别向对端发送各自的时间信号, 确保在任意时段光纤链路上只有上行光或下行光在传播. 在本地端用事件计时器 1 比对来自远程端的时间信号与本地端时间信号, 并将时间间隔值发送给远程端; 远程端用事件计时器 2 比对来自本地端的时间信号与远程端时间信号, 并根据事件计时器 2 测得的时间间隔值和来自本地端的时间间隔值, 控制时延补偿器的时延补偿量, 使输出的时间信号与输入到本地端的时间信号精确同步.

由双向时间比对的原理可计算出时延补偿控制量为

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

其中, T_{LR} 和 T_{RL} 分别为本地端与远程端比对得到

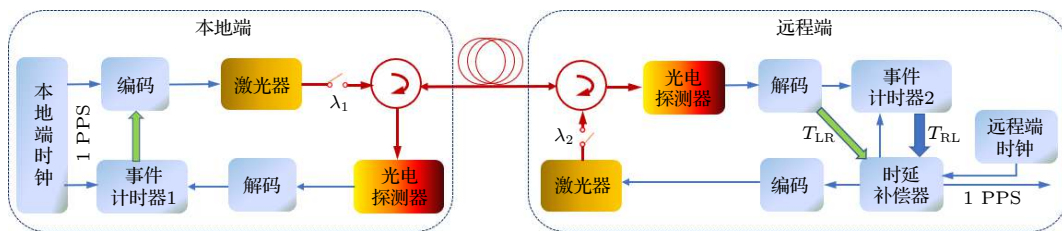


图 1 双向同波分时光纤时间传递原理

Fig. 1. Functional block diagram of bidirectional same-wave time division optical fiber time transfer.

的时间间隔值, T_{DL} 为 λ_1 波长的激光从本地端到远程端的传输时延, T_{DR} 为 λ_2 波长的激光从远程端到本地端的传输时延. T_{LR} 和 T_{RL} 由事件计时器直接测得, 而 T_{DL} 和 T_{DR} 无法直接测量. 在光纤时间传递系统中往往假设双向传输时延对称, 即令 $T_{DL} = T_{DR}$, 则可以计算出链路时延的补偿量, 其表达式为 $T_{DA} = (T_{LR} - T_{RL})/2$. 但实际 $\lambda_1 \neq \lambda_2$, 即 $T_{DL} \neq T_{DR}$. 此时, 双向传输时延存在不对称性, 引入时间传递的不确定度为

$$T_{err} = (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot D \cdot L/2, \quad (2)$$

其中, D 为光纤的色散系数, L 为光纤链路的长度. 根据 (2) 式可知, 光纤时间传递距离越长, 色散偏差问题越突出.

密集波分复用-小型可插拔 (DWDM-SFP) 通信光模块内部使用的激光模块存在波长老化问题, 根据国际电信联盟电信标准分局 (ITU-T) 的相关标准, 波长长期漂移在 10 pm 量级. 例如在 1000 km 的光纤链路上, 双向激光波长漂移 10 pm, 色散系数 $D = 17 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, 时间传递中色散偏差引入的不确定度约为 85 ps; 如果双向激光波长差异减小到 0.5 pm, 则色散偏差引入的不确定度约为 4 ps. 由此可见保证双向激光波长的长期一致性, 对改善时间传递的不确定度有重要意义.

2.2 波长跟踪原理

为了解决由于双向激光波长不一致引入的时间传递色散偏差的问题, 本文提出了激光波长跟踪方法, 通过拍频测量两束激光的波长差, 采用控制被控激光器工作温度的方法使其与参考激光信号波长保持足够小的偏差, 从而实现波长跟踪, 具体原理如图 2 所示. 激光器 LD1 的激光信号作为参考光, 激光器 LD2 的激光信号作为跟踪光, LD1 与 LD2 的激光拍频后由光电探测器转换为电信号, 再经过分频器后使用频率测量单元测量其频差; 运算控制单元根据频差数据, 自动精密控制激光管 LD2 的工作温度, 使其波长 $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ 为波长差的设置值, 从而实现波长自动跟踪.

参考光信号受链路传播过程的影响, 偏振状态不稳定, 拍频输出电信号的功率存在起伏. 本文结合自动增益控制技术和限幅放大技术, 获得 50 dB 的增益动态范围, 可将拍频后信号转换为幅度稳定的方波, 便于分频和频率测量.

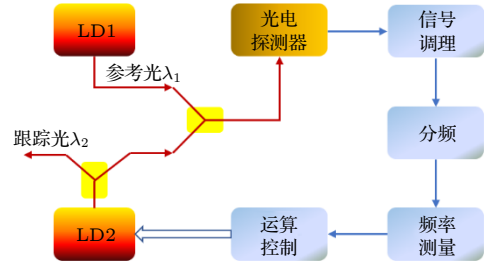


图 2 激光波长自动跟踪原理框图

Fig. 2. Functional block diagram of laser wavelength automatic tracking.

2.3 实验装置工作原理

基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递实验装置原理如图 3 所示, 在本地端中, 10 MHz 参考频率信号经过 10 倍频后作为载波信号输入到编码器, 对输入的 1 秒脉冲时间信号 (1 pulse per second, 1PPS)、时码信息、对比时差数据, 以及正在建立双向比对的远程端设备地址信息等进行编码, 编码信号调制在激光上并由光学环形器耦合到光纤链路中, 作为系统的下行光. 来自远程端的上行光信号通过光学环形器输出到光电探测器, 解调出正在进行双向时间比对的远程端的编码信号, 经过解码器和时间再生输出来自远程端的时间信号, 并通过事件计时器与本地端 1PPS 信号进行比对.

在远程端, 来自本地端的下行光经过光纤链路和中继设备到光电探测器, 解调出编码信号, 通过载波恢复得到载波信号. 恢复出的载波信号与编码信号一起输入到解码器中, 得到来自本地端的帧头脉冲信号、对比时差与时码信息等数据, 由此时间再生模块再生出本地端的 1PPS 信号. 恢复出的载波信号和再生的时间信号经过时延补偿模块后, 输出补偿过的 1PPS 信号和频率信号. 事件计时器测量时延补偿模块输出的 1PPS 信号与时间再生输出的 1PPS 信号之间的时间差, 完成远程端的时间比对. 运算控制器根据来自本地端的比对数据和远程端测得的比对数据, 控制时延补偿模块的延迟, 使其输出的 1PPS 信号与本地端参考 1PPS 信号同步. 同时, 时延补偿模块输出的频率信号经过 10 分频后得到的 10 MHz 信号也实现了对本地端的参考 10 MHz 信号同步.

为了阻断链路的光噪声在级间的传递和累加, 提高信噪比, 中继设备采用光-电-光 (OEO) 的方式. OEO 中继部分同样采用波长跟踪技术, 保证输入与输出的激光波长的差值足够小且保持长期稳定,

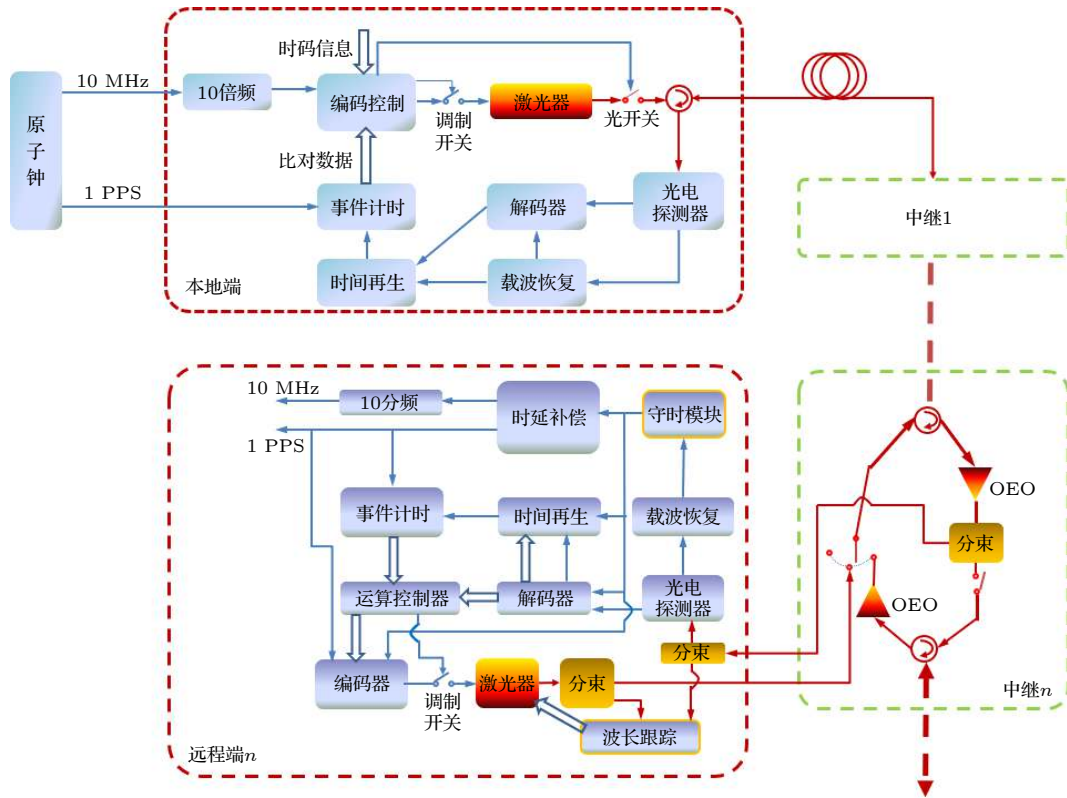


图 3 基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递实验装置原理

Fig. 3. Schematic diagram of high-precision optical fiber time transfer experimental device based on laser wavelength tracking.

并通过合理设置各个中继设备的跟踪波长差值将双向时间比对中各段链路的残余的双向时延不对称误差相互抵消. 中继设备通过增加分束器和光开关实现时分多址时间传递功能. 下行光经过 OEO 中继后再经过分束器分两路, 90% 的光经过光学环形器耦合到往下一个远程端设备方向的光学链路中, 10% 的光输入到位于该站点的远程端设备的光电探测器中.

基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递系统工作时序如图 4 所示, 一个控制周期 T_{CTR} 内包含 n 次双向比对进程和两次波长跟踪进程, 每个远程端在一个控制周期内都完成一次双向时间比对. 为了保证各个激光波长的精确跟踪, 激光波长跟踪进程中激光器都处于无调制状态, 即断开本地端和远程端设备内的调制开关.

本地端闭合光开关发送下行光信号, 并通过下行光信号控制链路上的中继设备闭合其内部的下行光信号光开关, 从而使每个远程端设备都可以接收到下行光, 此时中继设备内的上行光选择开关保持关断. 下行光信号中包含下一进程中参与双向比对的远程端设备的地址信息. 各个远程端设备内的事件计时模块比对来自本地端的时间信号与各自

内部的守时模块保持的时间信号. 本地端关断输出下行光信号的光开关, 进入下一进程. 此时, 参与双向比对的远程端将上行光选择开关切换到该节点的输出光信号上, 参与双向时间比对, 其余中继设备内的上行光开关切换到来自下一个远程端的光信号上, 起到中继的作用, 使上行光信号到达本地端. 本地端的事件计时模块依次比对来自各个远程端的时间信号与本地端输入的时间信号, 并将双向比对数据在下一个进程中发送到各个远程端. 远程端设备内的运算控制器根据双向比对数据, 控制其内部的时延补偿模块的延迟, 使远程端的输出时间信号与输入本地端的时间信号同步, 从而实现高精度光纤时间传递.

3 实验测试与数据分析

3.1 波长跟踪实验

为了验证激光波长跟踪性能, 本文设计了双层恒温外调制激光器, 搭建了激光波长自动跟踪实验装置, 进行了激光波长跟踪实验测试. 激光波长跟踪实验装置如图 5 所示, 波长计用于监测激光器 LD1 和 LD2 的波长 λ_1 和 λ_2 , 频率计数器实时记录

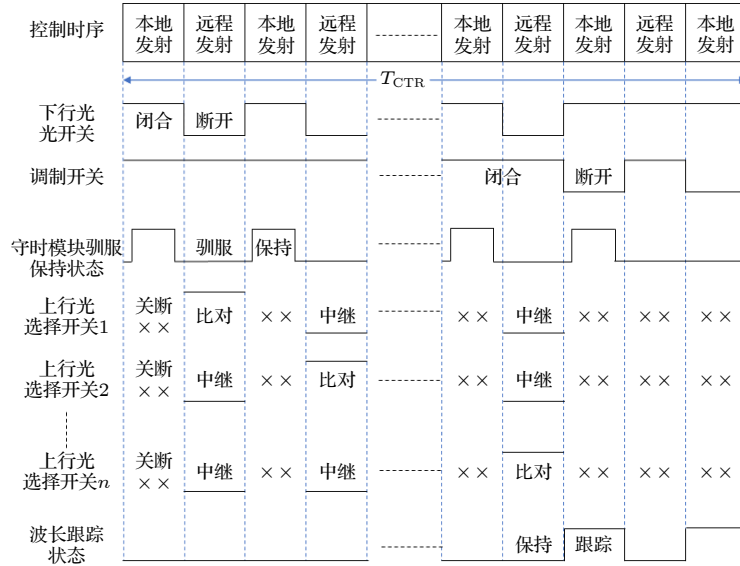


图 4 基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递系统工作时序图

Fig. 4. Working sequence diagram of high-precision optical fiber time transfer system based on laser wavelength tracking.

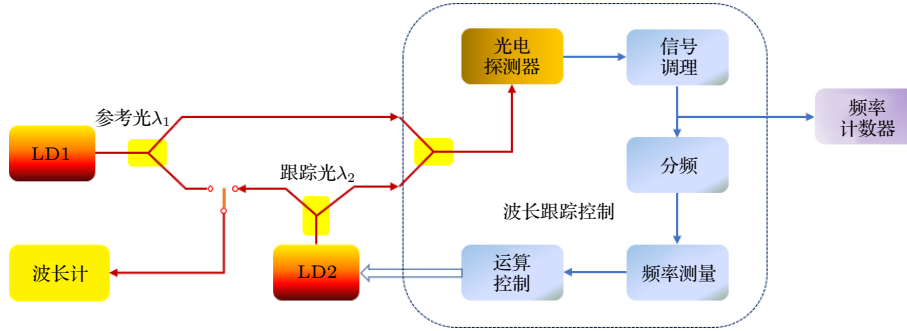


图 5 激光波长自动跟踪实验装置图

Fig. 5. Experimental device diagram of laser wavelength automatic tracking.

拍频光信号分频前的频率用于观察两个波长的相对偏差. 经过实验测试, 自行研制的双层恒温外调制激光器波长稳定度可以优于 0.04 pm, 激光管工作温度设定为 20 °C, 波长设置在 2 nm 左右. 实验中将波长差 $\Delta\lambda$ 设置为 0.5 pm, 即拍频信号目标频率设定为 62.5 MHz. 虽然波长差值越小, 引入的时间传递的色散偏差越小, 但要保证系统运行过程中不会因为激光线宽和短期稳定度的影响导致拍频信号正负极性的变化, 引起波长跟踪错误.

实验开始时, 用波长计测得波长 λ_1 的 10 s 平均值为 1542.921613 nm. 随后, 波长跟踪控制模块通过改变 LD2 激光管工作温度, 在 ± 2 °C 范围扫描拍频信号, 找到波长差正负极性的正确工作温度, 然后启动波长自动跟踪. 待系统稳定后用波长计测得波长 λ_2 的 10 s 平均值为 1542.921118 nm, 说明波长跟踪功能正常. 经过近 24 h 测试, 波长相对抖

动如图 6(a) 所示, 其标准差 $\lambda_{STD} = 55$ fm. 激光波长跟踪相对稳定度如图 6(b) 所示, 长期相对稳定度优于 5 fm@ 1×10^4 s, 保证了两个激光器波长差值长期稳定保持在 0.5 pm 左右.

3.2 基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递实验

基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递方案的测试系统, 如图 7 所示. 测试系统包含 1 个本地端设备、5 个中继设备以及 5 个远程端设备. 此外, 共包含 16 个标称波长为 1542.9 nm 的激光器, 其中本地端设备 1 个, 每个中继设备各 2 个, 每个远程端设备各 1 个. 在实验开始前, 先用 1 m 光纤和 30 dB 衰减器代替长距离光纤链路, 进行系统时延校准, 以校正中继设备和远程端设备内部的系统时延偏差.

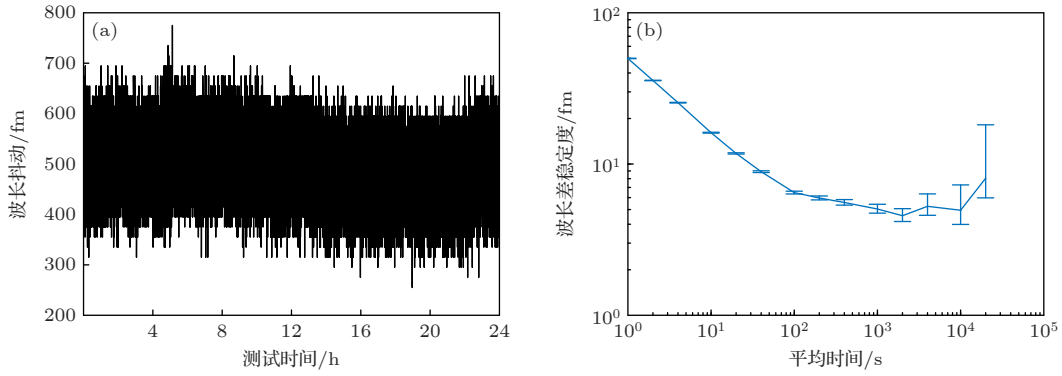


图 6 激光波长跟踪测试结果 (a) 波长跟踪抖动; (b) 波长跟踪稳定度

Fig. 6. Laser wavelength tracking test results: (a) Wavelength tracking jitter; (b) wavelength tracking stability.

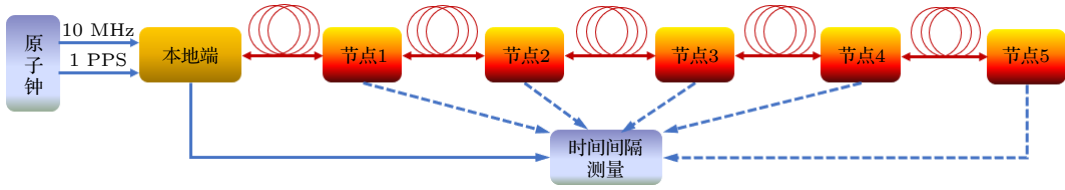


图 7 基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递测试系统

Fig. 7. High precision optical fiber time transfer test system based on laser wavelength tracking.

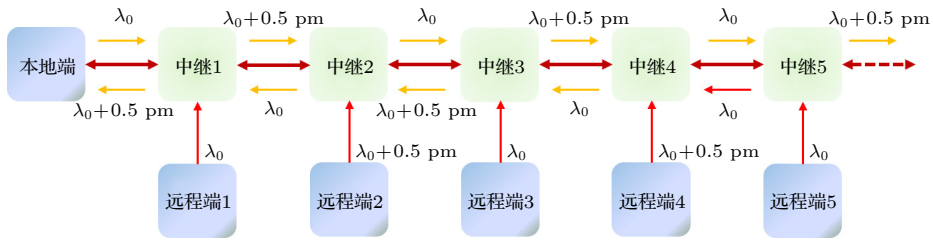


图 8 测试系统波长跟踪差值设置

Fig. 8. Wavelength tracking difference setting of test system.

实验测得系统中用到的 16 个自行研制的激光器, 未经波长校准时, 波长存在 ± 100 pm 左右的离散度. 为了验证激光波长跟踪对时间传递的色散偏差的改善效果, 先将下行光方向的 6 个激光器的波长, 经波长计校准后设置为 1542.9 nm, 上行光方向的 10 个激光器的波长设置为 1542.8 nm, 关闭波长自动跟踪功能, 1 m 光纤和 30 dB 衰减器连接各个节点, 测试每个远程端设备输出的 1PPS 时间信号的时延; 同理用 50 km 光纤加 20 dB 衰减器、100 km 光纤加 10 dB 衰减器、150 km 光纤连接各个节点, 分别测试每个远程端设备输出的 1PPS 时间信号的时延, 并记录每次测试的数据. 然后开启激光波长跟踪, 重复上述实验. 激光波长跟踪的波长差值设置如图 8 所示, 由于连接每个节点的各段光纤的长度差异较小, 远程端 2 号和 4 号由双向

波长差异引入的色散偏差基本消除; 远程端 1, 3, 5 号色散偏差残差 $T_{\lambda\text{err}} = 0.5\Delta\lambda \cdot D \cdot \Delta L$, ΔL 只是一段光纤链路的长度, 接入 5 段 150 km 光纤时, $T_{\lambda\text{err}}$ 约为 0.6 ps. 接入不同长度光纤链路, 在开启激光波长自动跟踪前后时间偏差数据见表 1. 激光波长跟踪关闭时, 由于色散偏差导致远程端设备输出的 1PPS 信号产生了滞后, 偏差值随光纤链路长度的增加而增加, 远程端 5 号在 750 km 光纤上出现了 569 ps 的偏差. 激光波长自动跟踪开启后, 色散偏差大大降低, 在不同的光纤链路长度下每个远程端设备偏差都在 ± 5 ps 内.

对基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递系统的稳定度进行测试, 先用 1 m 光纤和 30 dB 的衰减器连接各个节点, 测试远程端 5 号输出的 1PPS 时间信号与输入到本地端的 1PPS 时间信号

表 1 不同长度光纤链路开启激光波长跟踪前后时延值 (单位: ps)
 Table 1. Time delay before and after laser wavelength tracking for different length fiber links (in ps).

跟踪前后	节点间光纤长度/km							
	0.001		50		100		150	
	前	后	前	后	前	后	前	后
远程端1号	2	1	36	3	79	2	115	4
远程端2号	-3	-2	76	-1	148	-3	217	-2
远程端3号	5	3	123	4	229	6	340	3
远程端4号	-4	-2	141	1	301	-3	451	-2
远程端5号	3	4	190	2	377	5	569	4

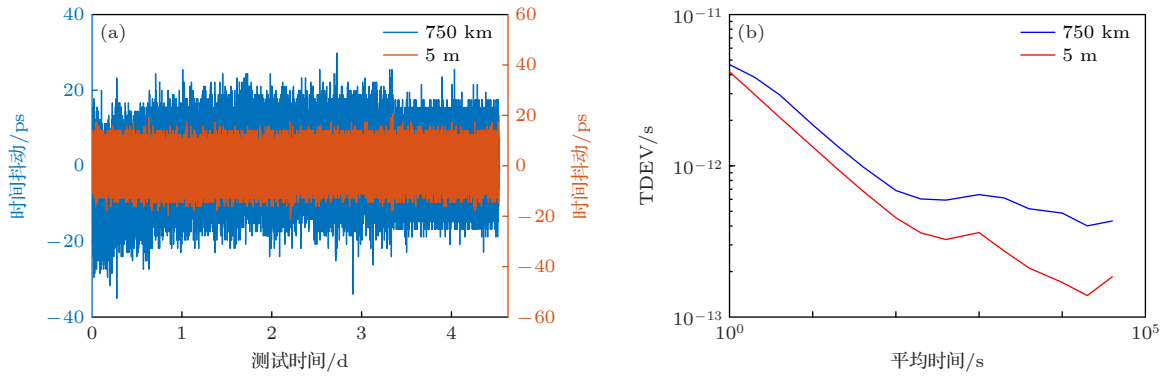


图 9 基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递系统稳定度测试结果 (a) 时间抖动; (b) 时间传递稳定度

Fig. 9. Stability test results of high-precision optical fiber time transfer system based on laser wavelength tracking: (a) Time jitter; (b) time transfer stability.

的时间间隔,并用计算机采集数据;再用 150 km 实验室光纤连接各个节点,重复上述测试.实验过程数据采集时间超过 100 h,室温变化约 2 °C.如图 9 所示,使用 5 m 光纤时,远程端 5 的时间信号标准差为 4.26 ps, TDEV 为 4.2 ps@1 s, 0.2 ps@ 4×10^4 s;使用 750 km 光纤链路时,标准差为 5.81 ps, TDEV 为 4.7 ps@1 s, 0.4 ps@ 4×10^4 s.使用实验室 750 km 光纤链路时长期稳定度有所恶化,主要原因是光纤链路一天内的时延变化约为 60 ns,链路时延测量的非线性和温度漂移不容忽视.

3.3 不确定度分析

基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递方案的不确定度主要因素为设备系统时延的温度漂移误差、时间间隔测量的误差,而双向激光波长差异引起的时间传递的色散偏差由于采用了激光波长跟踪后得到有效抑制.偏振模色散也会对时间传递的不确定度产生影响,但可以通过在链路中加入扰偏器进行抑制,此处不讨论.采用以下公式来评估系统的合成不确定度 U_c :

$$U_c = \sqrt{u_{DT}^2 + u_{TIM}^2 + u_{\Delta\lambda}^2 + u_{\Delta D}^2}, \quad (3)$$

其中, u_{DT} 为设备系统时延的温度漂移引入的不确定度, u_{TIM} 为时间间隔测量不确定度, $u_{\Delta\lambda}$ 为光纤色散偏差引入的不确定度, $u_{\Delta D}$ 为光纤色散系数变化引入的不确定度.由于双向时间比对过程中采用事件计时器模块测量时间间隔,减小了系统时延的漂移问题,经过实验测得设备系统时延的温度系数约为 2 ps/°C,实验室室温变化峰峰值约为 2 °C,该项引入约 4 ps 的不确定度.时间间隔测量不确定度 u_{TIM} 包括系统时延校准过程、本地端和远程端设备在双向时间比对时对链路传输时延的测量过程引入的误差.系统时延校准过程采用时间间隔测量模块进行测量,引入的不确定度约为 6 ps;双向时间比对过程采用事件计时器模块进行测量,单个计时器模块引入的不确定度约为 3 ps,所以整个测量过程引入约 7.3 ps 的不确定度.

双向激光波长差异因引入的色散偏差对不确定度的影响可以从长期和短期两个方面分析.长期不确定度 $u_{\Delta\lambda} = 0.5D \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta L$, $\Delta\lambda$ 为双向激光波长的差异,约为 0.5 pm, D 为光纤的色散系数, ΔL

为色散偏差未被抵消的部分的光纤链路长度. 短期不确定度主要受到每个激光器波动的影响, 并随着中继级数的增加随之增大. 短期不确定度 $u_{\Delta\lambda} = 0.5D \cdot \lambda_{STD} \cdot L \cdot \sqrt{n}$, 其中 n 为中继级数, λ_{STD} 为激光波动的标准差 55 fm, L 为光纤链路总长度. 在实验室 750 km 光纤链路测试中, ΔL 为 150 km, 长期不确定度约为 0.6 ps, 短期不确定度约为 0.8 ps. 由于光纤色散系数变化引入的不确定度 $u_{\Delta D} = 0.5\Delta\lambda \cdot \Delta D \cdot \Delta L$, 其中, ΔD 为色散系数的变化量, 色散系数的温度漂移系数典型值为 $4.5 \text{ fs} \cdot (\text{nm} \cdot \text{km} \cdot \text{C})^{-1}$ 在 750 km 的实验室光纤测试中, 光纤色散系数变化引起的误差约为 0.3 fs, 可以忽略不计.

基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递方案主要的不确定度见表 2, 750 km 实验室光纤链路的合成不确定度约为 8.4 ps. 基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递方案的不确定度主要来自时间间隔测量的不确定度和设备温度漂移引起的不确定度, 而光纤链路的长度对不确定度的影响得到有效抑制. 对于不同长度的光纤链路其时间传递不确定度理论计算结果如图 10 所示, 可以看出在仅考虑设备系统时延的温度漂移误差、时间间隔测量的误差和双向激光波长差异这 3 个因素的情况下, 当链路长度达到 4000 km 时, 依然可获得约 12.8 ps 的时间传递不确定度. 但在实地光纤链路中, 需要进一步解决光纤链路铺设引起的 Sagnac 效应与偏振模色散等影响因素, 才可以得到接近理论分析的时间传递不确定度.

表 2 750 km 实验室光纤时间传递不确定度
Table 2. Uncertainty of 750 km optical fiber time transfer in laboratory.

误差源	误差估计值
设备系统时延温漂 u_{DT}/ps	4.0
时间间隔测量误差 u_{TIM}/ps	7.3
光纤色散系数温度漂移 $u_{\Delta D}/\text{ps}$	3.0×10^{-4}
合成不确定度 U_c/ps	8.4
激光器波长误差 $u_{\Delta\lambda}/\text{ps}$	0.8 (短期)
	0.6 (长期)

4 结 论

本文提出了一种基于激光波长跟踪的高精度时间传递方法, 解决了由于双向激光波长不一致引入的时间传递的色散偏差的科学问题. 通过在实验

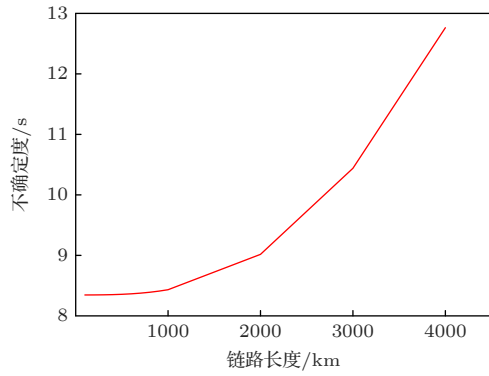


图 10 时间传递不确定与链路长度关系

Fig. 10. Relationship between time transfer uncertainty and link length.

室使用 0.005, 25, 500, 750 km 不同长度的光纤链路验证了其可行性, 不同长度光纤链路的时间同步偏差均优于 5 ps, 在 750 km 链路上时间传递稳定度分别为 4.7 ps@1 s, 0.4 ps@ 4×10^4 s, 不确定度为 8.4 ps. 在光纤时间传递工程应用中, 可通过优化系统工作时序, 减少远程端时间保持时长, 进一步提高光纤时间传递精度, 为实现远距离高精度光纤时间传递工程奠定基础.

参考文献

- [1] Bartels A, Diddams S A, Oates C W, Wilpers G, Hollberg L 2005 *Optics Lett.* **30** 667
- [2] Marion H, Santos F, Abgrall M, Zhang S, Sortais Y, Bize S 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 150801
- [3] Decamp M F, Reis D A, Bucksbaum P H, Adams B, Caraher J M, Clarke R, Conover C W, Dufresne E M, Merlin R, Stoica V, Wahlstrand J K 2001 *Nature* **413** 825
- [4] Shillue B, AlBanna S, D'Addario L 2004 *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics Ogunquit, ME, USA, October 4-6, 2004* p201
- [5] Jefferts S R, Shirley J, Parker T E, Heavner T P, Meekhof D M, Nelson C, Levi F, Costanzo G, Marchi A D, Drullinger R, Hollberg L, Lee W D, Walls F L 2002 *Metrologia* **39** 321
- [6] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, Blatt S, Boyd M M, Demiranda M H G, Martin M J, Thomsen J W 2008 *Science* **319** 1805
- [7] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J, Wineland D J, Rosenband T 2009 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802
- [8] Rost M, Piester D, Yang W, Feldmann T, Wübbena T, Bauch A 2012 *Metrologia* **49** 772
- [9] Lopez O, Chardonnet C, Amy-Klein A, Kanj A, Pottie P E, Rovera D 2013 *Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium Prague, Czech Republic, July 21-25, 2013* p474
- [10] Śliwczyński Ł, Krehlik P, Czubla A, Buczek Ł, Lipinski M 2013 *Metrologia* **50** 133
- [11] Śliwczyński Ł, Krehlik P, Czubla A, Buczek Ł, Lipinski M 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 5056
- [12] Frank F, Stefani F, Tuckey P, Pottie P 2018 *IEEE Trans.*

- Ultrason. Ferr.* **65** 1001
- [13] Chen F X, Zhao K, Zhou X, Liu T, Zhang S G 2017 *Acta Phys. Sin.* **20** 200701 (in Chinese) [陈法喜, 赵侃, 周旭, 刘涛, 张首刚 2017 物理学报 **20** 200701]
- [14] Cheng H, Wu G L, Zuo F, Hu L, Chen J 2019 *Opt. Lett.* **21** 5206
- [15] Wu G L, Chen J P 2016 *Science and Technology Herald* **34** 99 (in Chinese) [吴龟灵, 陈建平 2016 科技导报 **34** 99]
- [16] Gao C, Wang B, Zhu X, Chen W L, Bai Y, Miao J, Zhu X, Li T C, Wang L J 2012 *Opt. Lett.* **37** 4690
- [17] Liu J, Gao J, Xu G J, Jiao D D, Yan L L, Dong R F, Jiang H F, Liu T, Zhang S G 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120602 (in Chinese) [刘杰, 高静, 许冠军, 焦东东, 闫露露, 董瑞芳, 姜海峰, 刘涛, 张首刚 2015 物理学报 **64** 120602]
- [18] Yuan Y B, Wang B, Gao C, Wang L J 2017 *Chin. Phys. B* **26** 040601
- [19] Zuo F, Chen Z, Hu L, Chen J, Wu G L 2020 *IEEE Access* **8** 114656
- [20] Zuo F, Chen Z, Hu L, Chen J, Wu G L 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 2015
- [21] Liu Q, Han S L, Wang J L, Feng Z T, Chen W 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 070602
- [22] Chen F X, Zhao K, Li B, Liu B, Guo X X, Kong W C, Chen G C, Guo B L, Liu T, Zhang S G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 070702 (in Chinese) [陈法喜, 赵侃, 李博, 刘博, 郭新兴, 孔维成, 陈国超, 郭宝龙, 刘涛, 张首刚 2021 物理学报 **70** 070702]
- [23] Zhang H, Wu G L, Hu L, Li X, Chen J 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 7600208

High precision time transfer based on laser wavelength tracking*

Chen Fa-Xi^{1)2)†} Zhao Kan²⁾ Li Li-Bo^{2)‡} Guo Bao-Long¹⁾

1) (*Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Jinan Institute of Quantum Technology, Jinan 250101, China*)

(Received 20 July 2022; revised manuscript received 5 August 2022)

Abstract

In a high-precision optical fiber time transfer system, in order to solve the scientific problem of time transfer dispersion deviation caused by the inconsistency of the two-way laser wavelengths, a high-precision time transfer method based on laser wavelength tracking is proposed in this paper. In the two-way time comparison, the laser emitted by the local site is used as a reference, and other lasers in the system track the reference, and the difference between the two-way laser wavelengths is small enough and stable for a long time, thereby greatly reducing the time transfer deviation caused by the inconsistency of the two-way laser wavelengths. In order to verify the performance of laser wavelength tracking, a double-layer temperature controlled externally modulated laser is designed, an experimental device for automatic laser wavelength tracking is designed, and laser wavelength tracking experimental modules are developed. The results show that the standard deviation of wavelength jitter is 55 fm, and the long-term relative stability of laser wavelength tracking is better than 5 fm@ 1×10^4 s, which ensures that the two laser wavelengths can remain relatively stable for a long time. In the case of long-distance fiber time transfer, by optimizing the setting value of the wavelength difference between each laser and the reference light on the link, the dispersion deviation of time transfer can be further reduced. In order to verify the feasibility of the high-precision optical fiber time transfer method based on laser wavelength tracking, a long-distance multi-station optical fiber time transfer experimental setup is built in our laboratory. The experiment is carried out in the laboratory by using 0.005, 250, 500, 750 km optical fiber links. The experimental results obtained on 750 km link show that the time transfer deviation is better than 5 ps, the stability is 4.7 ps@1 s, 0.4 ps@ 4×10^4 s, and the uncertainty is 8.4 ps. In the engineering application of optical fiber time transfer, by optimizing the working sequence of the system, the holding time length of the remote site clock can be reduced, and the accuracy of optical fiber time transfer can be further improved, which lays a foundation for realizing high-precision long-haul optical fiber time transfer.

Keywords: optical fiber link, time synchronization, synchronization network, laser wavelength tracking

PACS: 07.60.Vg, 06.30.-k, 42.81.Uv

DOI: 10.7498/aps.71.20221460

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12003042).

† Corresponding author. E-mail: cfx2006xd@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: lilibo@jiqt.org



基于激光波长跟踪的高精度光纤时间传递

陈法喜 赵侃 李立波 郭宝龙

High precision time transfer based on laser wavelength tracking

Chen Fa-Xi Zhao Kan Li Li-Bo Guo Bao-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 230702 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221460

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221460>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于1085 km实地光纤链路的双波长光纤时间同步研究

High-precision dual-wavelength time transfer via 1085-km telecommunication fiber link

物理学报. 2021, 70(7): 070702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201277>

基于光学-微波同步的低噪声微波产生方法

Low-noise microwave generation based on optical-microwave synchronization

物理学报. 2022, 71(4): 044204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211253>

200 km沙漠链路高精度光纤时频传递关键技术研究

Key technology of high-precision time frequency transfer via 200 km desert urban fiber link

物理学报. 2019, 68(6): 060602 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182000>

基于1.06 μm 波长的空间合作目标及碎片高精度激光测距试验

1.06 μm wavelength based high accuracy satellite laser ranging and space debris detection

物理学报. 2020, 69(1): 019502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191299>

激光局域网络的混沌控制及并行队列同步

Chaos-control and parallel queue synchronization of laser local area network

物理学报. 2021, 70(8): 080501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201251>

基于波长调制-直接吸收光谱方法的CO分子1567 nm处谱线参数高精度标定

High precision calibration of spectral parameters of CO at 1567 nm based on wavelength modulation-direct absorption spectroscopy

物理学报. 2020, 69(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191865>