



## 基于1085 km实地光纤链路的双波长光纤时间同步研究

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

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

Chen Fa-Xi Zhao Kan Li Bo Liu Bo Guo Xin-Xing Kong Wei-Cheng Chen Guo-Chao Guo Bao-Long Liu Tao Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 070702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201277

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201277>

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

长距离多站点高精度光纤时间同步

High-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations

物理学报. 2017, 66(20): 200701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.200701>

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>

长距离分布式光纤传感技术研究进展

Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing

物理学报. 2017, 66(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074207>

不确定分数阶时滞混沌系统自适应神经网络同步控制

Synchronization of uncertain fractional-order chaotic systems with time delay based on adaptive neural network control

物理学报. 2017, 66(9): 090504 <https://doi.org/10.7498/aps.66.090504>

高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展

Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber

物理学报. 2018, 67(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180724>

光纤 $1/f$ 热噪声的实验研究

Experimental study on  $1/f$  intrinsic thermal noise in optical fibers

物理学报. 2019, 68(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181838>

# 基于 1085 km 实地光纤链路的双波长 光纤时间同步研究\*

陈法喜<sup>1)2)†</sup> 赵侃<sup>2)‡</sup> 李博<sup>2)</sup> 刘博<sup>2)</sup> 郭新兴<sup>2)</sup> 孔维成<sup>2)3)</sup>  
陈国超<sup>2)3)</sup> 郭宝龙<sup>1)</sup> 刘涛<sup>2)</sup> 张首刚<sup>2)</sup>

1) (西安电子科技大学, 西安 710071)

2) (中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

3) (中国科学院大学, 北京 100039)

(2020 年 8 月 6 日收到; 2020 年 10 月 31 日收到修改稿)

在长距离高精度光纤时间同步系统中, 为了减少后向反射光与光纤色散对传输精度的影响, 本文在双波长光纤时间同步传输方法之上, 提出了一种具有色散误差修正功能的双波长光纤时间同步传输方法. 以自行研制的工程样机在长度约为 800 km 的实验室光纤链路上和 1085 km 的实地光纤链路上进行了实验测试, 也是国内首次实现千公里级实地光纤时间同步传输. 在实验室光纤链路上, 测得传输链路色散补偿后的色散时延误差为 10 ps, 时间同步标准差为 5.7 ps, 稳定性为 1.12 ps@ $10^5$  s, 不确定度为 18.4 ps. 在实地光纤链路上, 测得传输链路色散补偿后的色散时延误差为 60 ps, 时间同步标准差为 18 ps, 稳定性为 5.4 ps@ $4 \times 10^4$  s, 不确定度为 63.5 ps.

**关键词:** 光纤光学, 时间同步, 同步网络

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201277

## 1 引言

高精度时间频率信号传输技术在许多领域都有着重要的应用, 如全球卫星导航<sup>[1]</sup>、深空探测<sup>[2]</sup>、射电天文<sup>[3]</sup>以及精密物理测量<sup>[4-6]</sup>等. 在时间频率信号传输领域, 卫星共视 (CV)<sup>[7,8]</sup>和卫星双向比对 (TWSTFT)<sup>[9,10]</sup>是目前最为常用的授时手段, 可实现的时间频率传输日稳定度最高为  $10^{-15}$  量级<sup>[11]</sup>, 时间同步精度为纳秒量级<sup>[12]</sup>. 随着高精度原子钟技术的不断进步, 铯喷泉钟的日稳定度已达到  $10^{-15}$  量级<sup>[13]</sup>, 光钟的日稳定度也已达到了  $10^{-19}$

量级<sup>[14]</sup>, 已远超目前的卫星授时精度. 为了保证这些高精度的时间频率信号能够进行远程传输与比对, 需要发展具有更高精度的时间频率信号传输手段. 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频率传输的一种工具. 欧美等发达国家均已开展了光纤时间频率信号传输方面的研究, 并取得了突破性的进展<sup>[15-22]</sup>. 2010 年, 捷克教育科研网中心利用波分复用 (DWDM) 双向时间比对的方法, 在 744 km 的实地光纤链路上实现了时间同步传输, 稳定度优于 100 ps@1 s, 不确定度为 112 ps<sup>[20]</sup>. 2016 年, 荷兰国家计量院 VSL

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFF0200200)、国家自然科学基金 (批准号: 91636101, 91836301, 11803041)、中国科学院战略先导 B 专项 (批准号: XDB21000000) 和广东省重点领域研发计划 (批准号: 2018B030325001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cfx2006xd@163.com

‡ 通信作者. E-mail: zhaokan@ntsc.ac.cn



通过编码器 2 加载到激光器 2 上返回到本地端, 光电探测器 1 探测到的信号通过解码器 1 进行解调, 并将解调得到的信号输送给时差测量模块与本地端的 1PPS 信号进行比对, 从而实现高精度光纤时间同步。

根据双向时间比对的基本原理, 可以得到双波长时间同步过程中的时延补偿控制量为

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

其中,  $T_{LR}$ ,  $T_{RL}$  分别为本地端与远程端的双向时间比对测量结果, 可直接通过时差测量模块进行测量.  $T_{DL}$ ,  $T_{DR}$  分别为从本地端到远程端与远程端到本地端的光纤链路传输时延.  $T_{SE}$  为本地端和远程端设备内电子学和光学部分传输时延引入的系统误差, 实验上可以对其进行校准修正, 从图 1 中可以看出  $T_{SE}$  对应的值应该为

$$T_{SE} = T_{DDL S} - T_{DDRR} + T_{DDL R} - T_{DDRS}, \quad (2)$$

其中,  $T_{DDL S}$  为本地端设备内发送部分的时延,  $T_{DDRR}$  为远程端设备内接收部分的时延,  $T_{DDL R}$  为本地端设备内接收部分的时延,  $T_{DDRS}$  为远程端设备内发送部分的时延. 为了避免后向散射的影响, 本文中远程端与本地端采用的激光器波长不相同  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ , 因此, 由于光纤色散产生的影响使得  $T_{DL} \neq T_{DR}$ . 对于光纤色散产生的链路时延, 可通过 (3) 式得到,

$$T_{err} = (T_{DL} - T_{DR}) = \frac{1}{2}D \times (\lambda_1 - \lambda_2) \times L, \quad (3)$$

其中,  $D$  为光纤链路的色散系数,  $L$  为光纤的长度,

$\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为本地端与远程端激光器的输出波长. 理想情况下, 同批生产的光纤色散系数应该相同, 对应的时延误差与光纤长度成正比. 则双波长时间同步过程中的时延补偿控制量为

$$T_{DA} = \frac{1}{2}(T_{LR} - T_{RL}) + T_{SE} + T_{err}. \quad (4)$$

## 2.2 双波长光纤时间同步的实验装置

双波长光纤时间同步的实验装置原理如图 2 所示, 本地端设备与远程端设备之间的双向时间同步传输比对, 主要是利用波分复用器与两个标称波长相差一个波道的激光器实现的. 本地端设备通过编码器 1 将时码信息、10 MHz 信号、1PPS 时间信号、光纤色散参数信息以及比对后的时差数据加载到激光器 1 的输出激光上, 且激光器 1 的输出波长为  $\lambda_1$ . 激光器 1 的输出光作为下行光信号, 经过波分复用器、光纤链路及中继设备后到达远程端设备. 为了减小后向反射光的影响, 中继设备采用波分复用器对下行光与上行光进行了分离处理. 同时, 利用自行研制的光-电-光中继净化再生设备 (OEO) 对接收到的载波信号进行净化处理, 以提高链路中载波信号的信噪比. 远程端设备  $n$  将来自本地端标称波长为  $\lambda_1$  的下行光信号通过光电探测器  $n$  转换为电信号, 并且分为两路. 一路通过载波恢复模块获得 10 MHz 信号, 另一路通过解码器  $n$  解调出 1 PPS 时间信号、时码信息、光纤色散误差以及时差数据. 恢复的 10 MHz 信号经过 PLL 模块净化处理后, 作为远程端设备内部守时模块的

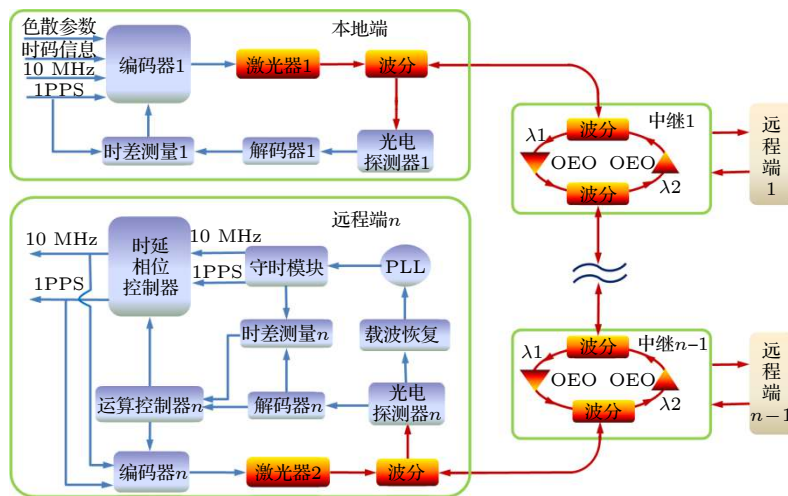


图 2 双波长光纤时间同步装置图 (OEO: 光-电-光信号净化处理模块;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ : 激光波长; PLL: 锁相环)

Fig. 2. Device diagram of dual wavelength time transfer. (OEO: Optical-electric-optical signal purification and processing module;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ : Laser wavelength; PLL: Phase locked loop).

频率参考源. 当远程端设备  $n$  被呼叫时, 该远程端设备守时模块输出的 1PPS 时间信号与解调出的 1PPS 时间信号通过时差测量模块  $n$  进行比对. 再将比对后的时差信号与解调出的光纤色散信息输入到运算控制模块  $n$  中进行处理, 处理后的信号直接反馈给时延相位控制器, 从而对守时模块输出的时间信号进行修正, 使远程端的时间信号与本地端的时间信号进行同步. 同时, 将远程端输出的 1PPS 时间信号、10 MHz 信号以及运算控制器  $n$  输出的时间差数据经过编码器  $n$  编码后, 加载到标称波长为  $\lambda_2$  的激光器 2 上. 激光器 2 的输出光经过波分复用器、中继设备、光纤链路和波分复用器后到达本地端设备. 本地端设备将接收到的光信号通过光电探测器 1 转换为电信号, 再将解调得到的 1PPS 时间信号与本地端 1PPS 时间信号进行比对, 从而实现光纤链路的双向时间比对传输. 其中, 每个站点的远程端设备基本相同, 且每个站点的远程端设备、中继设备都有各自唯一的设备地址. 本地端设备可采用时分多址的方式对各个站点的远程端设备进行轮询双向时间比对传输, 从而实现各个远程端与本地端的时间同步.

### 3 测试方法与数据分析

在长距离高精度双波长光纤时间同步的实验测试中, 为了减少设备时延误差及光纤色散误差带来的影响, 利用短光纤对各个站点的设备进行了校准, 同时也对传输链路中光纤色散带来的误差进行了补偿. 为了验证自行研制的设备在千公里级实地光纤时间同步研究工作中的可靠性, 首先在 800 km 的实验室光纤链路上对本方案进行了测试评估, 最后在 1085 km 实地光纤链路进行了实验测试, 获得时间同步稳定度为  $9.2 \text{ ps}@1 \text{ s}$  和  $5.4 \text{ ps}@4 \times 10^4 \text{ s}$ .

#### 3.1 设备误差修正

在设备的研制过程中, 很难保证每个设备的参数完全相同, 如设备中光路的不对称性和电路的传输时延, 都会导致每台设备产生一定的时延误差. 由于该 1085 km 的实地光纤链路被分为 16 个站点, 包含 15 个中继设备以及 16 个远程端设备, 因此为了保证各个站点之间的时间同步传输精度, 将各个站点的设备按照图 3 所示的方法进行连接, 对每个设备的参数进行修正. 在设备校准前, 将信号

源输出的 1PPS 信号通过脉冲分配放大器分为两路, 一路 1PPS 信号通过同轴线直接输入到时时差测量模块 (SR620) 上, 另一路 1PPS 信号通过两根互相连接的同轴线后输入到 SR620 上, 测量出两路 1PPS 信号之间的时延差, 并记录为  $\tau$ . 在对设备校准时, 首先将其中一路的两根同轴线拆开, 分别接在本地端的输入端与远程端 1 的输出端, 利用 SR620 测量出此时的时差  $\tau + \Delta\tau_1$ . 然后再通过远程端 1 的时延相位控制模块来调节其时延值, 直至 SR620 的测量结果接近  $\tau$  为止. 在远程端 1 的时延校准完后, 将远程端 1 输出端的同轴线接在远程端 2 的输出端, 对其输出的时延值进行修正. 同理, 采用同样的方法对其他远程端设备的时延输出值依次进行修正. 其中, 本地端、中继及远程端之间采用 1 m 的光纤和 15 dB 的衰减器进行连接.

在设备误差修正的测试过程中, 由于采用长度为 1 m 的光纤对各个站点之间的设备进行连接, 因此激光波长引入的色散误差可忽略不计. 每个远程端设备的时延误差测量结果如表 1 第 2 列与第 5 列所列, 可以看出, 每个远程端设备的时延测量结果保持在 1300—2500 ps 之间. 在开始自动时延补偿时, 测量出各个远程端设备 1 PPS 时间信号

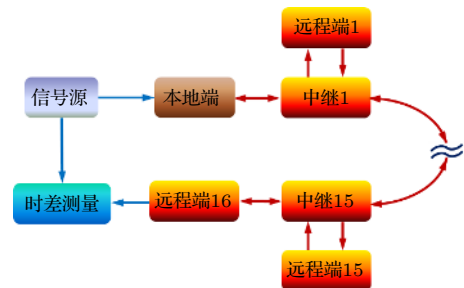


图 3 实验室测试连接图

Fig. 3. Scheme of laboratory test.

表 1 各个站点设备时延误差测量结果

Table 1. Measurement results of equipment delay error in each station.

编号	校准前/ps	校准后/ps	编号	校准前/ps	校准后/ps
1	2453	12	9	18354	7
2	4669	-5	10	20323	13
3	6056	10	11	22340	-11
4	8375	8	12	24098	6
5	9950	-10	13	25637	5
6	12144	9	14	28031	-8
7	13993	-6	15	29992	-12
8	16058	11	16	31862	8

与信号源 1 PPS 时间信号之间的时差, 同时在各个远程端设备上输入相应的参数进行修正. 每个远程端设备修正后的时延误差测量结果如表 1 第 3 列与第 6 列所列. 从表中可以看出, 每个站点的时延误差都优于 15 ps.

在测试中, 采用了 16 个中心波长为 1543.730 nm 的激光器和 31 个中心波长为 1542.936 nm 的激光器. 其中, 16 台中心波长为 1543.730 nm 的激光器分别放置在 15 个中继设备及本地端, 31 台中心波长为 1542.936 nm 的激光器放置在 15 个中继设备及 16 个远程端. 这 47 台激光器的输出波长通过波长计进行逐一测量标定, 误差分别小于 0.2 pm. 为了避免实验室温度变化 (峰峰值 2 °C/d) 对激光器输出波长的影响, 对激光器外部进行了温度控制, 使输出波长随环境温度变化小于 0.1 pm/°C.

### 3.2 链路色散误差修正方法

在单模光纤中, 激光的波长越长, 则波导色散越明显, 传输的时延误差也随着增大. 通常光纤链路中的时延补偿是建立在双向时延对称的基础之上, 而在双波长光纤时间同步系统中, 下行光与上行光的波长差异会使各个远程端设备输出的 1PPS 时间信号产生时延差, 该时延差可通过 (3) 式得到. 理想情况下, 同批生产的光纤色散系数应该相同, 对应的时延误差与光纤长度成正比. 但在实际应用中, 光纤中材质分布差异会导致每段光纤散射系数不同.

由于本方案采用的是双波长光纤时间同步方法, 其中下行光的标称波长为  $\lambda_1 = 1543.730$  nm, 上行光的标称波长为  $\lambda_2 = 1542.936$  nm, 因此, 在传输过程中会产生明显的色散误差, 从而对链路的时间传输精度产生影响. 为了保证光纤时间传输系

统的精度, 在光纤时间同步设备误差修正的基础之上, 利用图 3 所示的链路结构对光纤链路的色散误差进行修正, 其中, 将各个设备之间的 1 m 光纤跳线改为 16 捆同批次的 50 km 光纤盘. 在色散误差补偿功能开启前, 仅开启设备中链路时延补偿功能, 通过 SR620 测量出各个远程端设备输出的 1PPS 信号引入的时延偏差, 即光纤色散时延偏差. 再根据光纤链路长度计算出各段光纤链路的色散系数, 并输入到本地端设备与各个远程端设备. 在色散误差功能开启后, 本地端会根据双向比对的数据计算出每段的光纤链路的长度, 根据 (3) 式自动计算出光纤链路中的色散误差, 再通过各个远程端的时延相位控制模块对输出的 1PPS 信号时延进行调节.

对 800 km 实验室光纤链路中各个远程端的色散时延误差进行了测量, 并结合 (1) 式计算出了各段光纤链路的平均色散系数, 测量结果如表 2 所列, 其中各段的时延偏差如第 2 和第 6 列所列, 光纤色散系数如第 3 列与第 7 列所列. 从表中可以看出, 每段光纤的色散系数都不相同, 这可能是由于每个光纤盘的材质存在差异. 实验上将各段链路的光纤色散系数及距离进行编号, 并输入到本地端设备中, 系统会自动计算出各段光纤链路的色散时延误差. 在开启系统的色散时延自动补偿功能时, 本地端设备根据编写好的地址呼叫各个远程端设备, 并将各段光纤链路产生的色散时延差发送给远程端, 通过时延相位补偿器进行补偿. 各个远程端的 1PPS 时间信号与本地端 1PPS 时间信号之间的时差测量结果如表 2 中第 4 列与第 8 列所列. 从表中可以看出, 在开启远程端设备的色散时延自动补偿功能后, 各个远程端的时间传输误差优于 20 ps, 这表明所研制设备的色散误差补偿精度基本不受

表 2 800 km 实验室光纤链路的详细参数  
Table 2. Detailed parameters of 800 km fiber link in the laboratory.

距离/km	偏差/ps	色散系数/(ps·km <sup>-1</sup> ·ns <sup>-1</sup> )	校准后/ps	距离/km	偏差/ps	色散系数/(ps·km <sup>-1</sup> ·ns <sup>-1</sup> )	校准后/ps
50	267	13.45	19	450	2428	13.59	16
100	530	13.35	-5	500	2683	13.52	-19
150	799	13.41	-10	550	2946	13.49	-9
200	1070	13.47	15	600	3206	13.46	17
250	1341	13.53	-12	650	3466	13.43	18
300	1613	13.54	-14	700	3715	13.37	13
350	1891	13.61	-17	750	3996	13.42	16
400	2171	13.67	11	800	4243	13.36	10

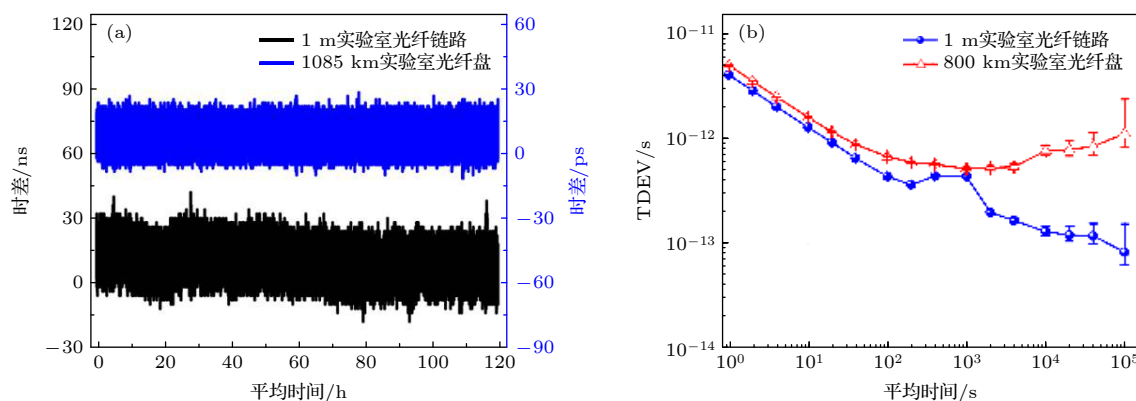


图 4 实验室光纤链路的时间同步测量结果 (a) 光纤链路的时差测量结果 (蓝色曲线: 系统噪声底, 黑色曲线: 800 km 实验室光纤链路); (b) 光纤链路的时间同步稳定度测量结果 (蓝色曲线: 系统噪声底; 红色曲线: 800 km 实验室光纤链路)

Fig. 4. Time synchronization measurement results of the laboratory fiber link: (a) The measured time interval variation results of the laboratory fiber link (blue line: noise floor of the system; black line: 800 km fiber link in laboratory); (b) the measured time deviation results of the laboratory fiber link (blue line: noise floor of the system; black line: 800 km fiber link in laboratory).

光纤距离的影响, 同时也具有一定的可靠性. 在标称 800 km 的实验室光纤链路上, 测得光纤的色散系数为 13.36 ps/(km·ns).

### 3.3 实验室光纤时间同步测试验证

为了验证双波长色散误差补偿方案的可行性, 首先利用自行研制的时间同步设备在实验室光纤链路上进行了时间同步的稳定度测试. 该实验室光纤链路由 16 盘标准的 50 km 光纤盘、16 个远程端以及 15 个中继组成, 以满足实地光纤链路的测试模型. 该光纤测试链路的结构如图 3 所示, 将各个设备之间的光纤跳线改为 50 km 的标准光纤盘. 将 1 台本地端设备、15 台中继设备、16 台远程端设备以及测量设备放在同一个地点, 便于对本地端的输入信号与各个远程端的输出信号进行精确比对测量.

当整个实验测试系统正常工作时, 将远程端 16 个输出的 1PPS 信号与本地端的 1PPS 信号输入到时差测量设备 (SR620) 中进行比对, 测量结果如图 4(a) 中黑色曲线所示, 其峰峰值约为 50 ps, 通过计算得到其标准差值为 5.7 ps, 其中蓝色曲线表示采用 1 m 光纤跳线时, 整个光纤时间同步链路的噪声极限. 将采集到的时差数据经过处理, 得到的时间同步传输稳定度如图 4(b) 中红色曲线所示, 分别为 4.9 ps@1 s 和 1.12 ps@10<sup>5</sup> s. 整个光纤链路的时间信号传输稳定度极限如图 4(b) 中蓝色曲线所示, 分别为 4.0 ps@1 s 和 0.083 ps@10<sup>5</sup> s. 从图 4(b) 中可以看出, 在 1000 s 以内, 该光纤链

路的时间传输稳定度较为接近链路噪声底. 在 1000 s 以上, 由于实验室环境温度变化的影响, 各个站点的设备时延和激光波长产生漂移, 从而导致长期稳定度出现了一定程度的恶化. 由于实验室空调温度变化的周期约为 16 min, 因此导致系统的噪声底在 1000 s 附近变差.

### 3.4 1085 km 实地光纤时间同步测试

为了验证自行研制的时间同步设备在实际应用中的可靠性, 利用千公里级实地光纤链路实现了 ps 量级的时间同步传递研究, 该链路的地理位置分布如图 5 所示. 以中科院国家授时中心临潼园区为光纤链路的始发站, 途径一长、涝峪、筒车湾、洋县、汉中、勉县、宁强 7 个站点, 最后整个光纤链路又返回到国家授时中心临潼园区, 其中勉县和宁强两个站点之间利用四根光纤进行了两次往返传输. 在国家授时中心临潼园区放置一台光纤时间同步本地端设备和一台远程端设备, 其余各个站点分别放置一台远程端设备和一台中继设备. 利用光时域反射计 (OTDR) 对实地光纤链路的长度和衰减情况进行了分段测试, 测试结果如表 3 所列. 经统计, 光纤链路全程为 1085 km, 总衰减为 287.5 dB. 实验测试前, 通过环回测试得到整段链路的平均色散系数为 16.67 ps/(km·ns), 引入的色散误差为 7180 ps, 修正后的色散误差优于 60 ps.

以自行研制的工程样机在往返约 1085 km 的实地光纤链路上实现了光纤时间同步传输测试. 将位于国家授时中心的远程端 1PPS 时间信号与本



图 5 实地光纤链路地理位置

Fig. 5. Geographical distribution of the field fiber link.

表 3 1085 km 实地光纤链路各个站点的详细参数  
Table 3. Detailed parameters of the individual sites in the 1085 km field fiber link.

编号	站点	距离/km	衰减/dB
1	临潼	0	0
2	二长	41.69	12
3	捞浴	72.75	21
4	筒车湾	81.90	21
5	洋县	76.50	19
6	汉中	60.48	16
7	勉县	60.55	16
8	宁强	73.20	19
9	勉县	73.20	19
10	宁强	74.32	19
11	勉县	74.32	19
12	汉中	60.55	16
13	洋县	60.48	16
14	筒车湾	76.50	19
15	捞浴	81.90	21
16	一长	72.75	21
17	临潼	41.69	12
总计		1085	287.5

地端 1 PPS 时间信号输入到时差测量设备 (SR620) 中进行比对, 测量结果如图 6(a) 所示, 其中黑色曲线表示光纤链路自由运转时的时差测量结果, 蓝色曲线表示的是光纤链路补偿后的时差测量结果. 从图 6(a) 中可以看出, 当光纤链路自由运转时, 时差峰峰值达到了 160 ns, 时差变化的标准差为 47 ns. 当对光纤链路补偿后, 时差峰峰值为 170 ps, 时差变化标准差为 18 ps. 从测量结果可以明显地看出, 在链路自由运转和锁定时, 链路中的时差测量结果

呈现出 24 h 周期性变化, 这主要是由于昼夜环境温度变化导致光纤链路长度发生改变而引起的. 光纤链路补偿后的时间同步传输测量结果如图 6(b) 所示, 其时间传输稳定度为 9.2 ps@1 s 和 5.4 ps@4 × 10<sup>4</sup> s. 由于外界环境的干扰以及系统控制带宽的限制, 使 1085 km 实地光纤链路的短期传输稳定度相对于实验室 800 km 光纤链路发生恶化. 同时, 由于昼夜环境温度变化以及各个站点之间温度变化的差异, 从而对光纤链路的长期传输稳定度产生影响.

### 3.5 时间同步不确定度分析

本文对双波长光纤时间同步系统各个部分的不确定进行了分析和估算, 根据 (5) 式可得到系统的合成标准不确定  $U_c$  为

$$U_c = \sqrt{u_{DT}^2 + u_{TIM}^2 + u_{\Delta\lambda}^2 + u_{D_{err}}^2 + u_{\Delta D}^2}, \quad (5)$$

其中,  $u_{DT}$  为本地端和远程端设备时延温漂, 实验测得每台设备的漂移约为 3 ps/°C, 实验室温度变化峰峰值约 2 °C, 各个站点机房内部温度变化的峰峰值约 4 °C. 在 800 km 实验室光纤测试中, 设备时延温漂引入的不确定度约为 6 ps. 在 1085 km 的实地光纤测试中, 设备时延温漂引入的不确定度约为 12 ps;  $u_{TIM}$  为时差测量误差, 表示本地端和远程端在双向比对过程中时差测量模块引入的误差, 不确定度约为 10 ps;  $u_{\Delta\lambda}$  为激光器波长变化引起的光纤色散误差 ( $0.5D \cdot L$ ), 经过对激光器进行温度控制, 各个站点的激光器输出波长随环境温度变化小于 0.1 pm/°C. 按照实验室和不同机房之间



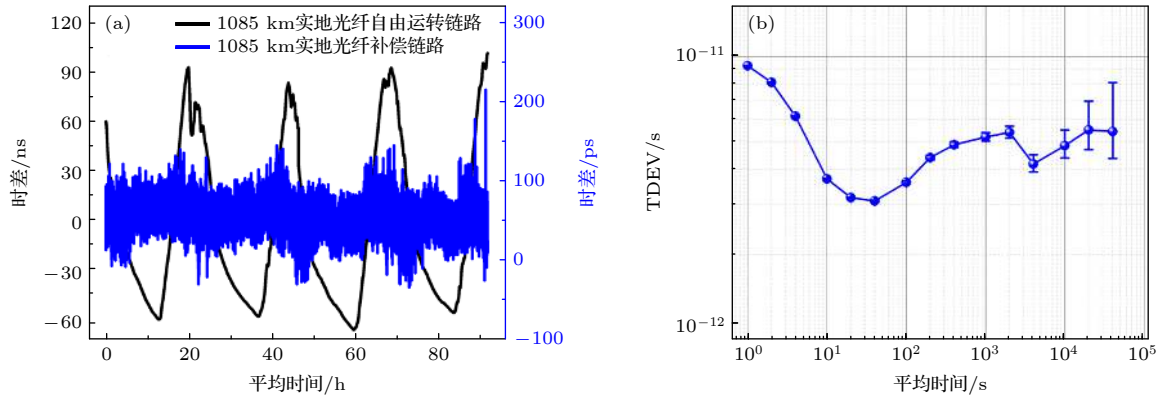


图 6 1085 km 实地光纤链路的时间同步测量结果 (a) 光纤链路的时差测量结果 (黑色曲线: 自由运转链路, 蓝色曲线: 补偿后的链路); (b) 补偿后链路的时间同步稳定度测量结果

Fig. 6. Time synchronization measurement results of 1085 km field fiber link: (a) The measured time interval variation results of the laboratory fiber link (black line: free running fiber link; blue line: compensated fiber link); (b) the measured time deviation results of the field fiber link after compensated.

的昼夜温差变化约为 15 °C 计算, 激光器波长单向的累计变化约为 1.5 pm. 对于 800 km 实验室光纤, 其光纤色散系数约为 13.36 ps/(km·ns), 则由激光器波长变化引入的不确定度约为 8.0 ps. 对于 1085 km 的实地光纤链路, 其色散系数取 16.67 ps/(km·ns), 激光器波长变化引入的不确定度约为 13.8 ps;  $u_{D_{err}}$  为光纤链路色散系数测量引起的误差 ( $0.5 D_{err} \cdot \Delta\lambda L$ ),  $D_{err}$  为光纤色散系数测量误差,  $\Delta\lambda$  为双向激光波长的差值. 实验上采用调制相移法对光纤的色散系数进行测量, 对于 800 km 的实验室光纤, 可逐段进行测量, 测得其精度约为 0.037 ps/(km·ns), 所以光纤色散系数引起的误差约为 9.6 ps. 对于 1085 km 实地光纤链路, 由于每段光纤链路的两端不在同一个地点, 采用调制相移法测量难以逐段精确测量. 只能将链路上的两芯光纤进行环回测量, 测量出两芯光纤的平均色散系数, 其测量结果约为 0.13 ps/(km·ns), 计算得到光纤色散系数引起的误差约为 56.7 ps;  $u_{\Delta D}$  为光纤色散参数随温度变化引入的误差, 光纤色散系数随温度变化约为  $4.5 \times 10^{-3}$  ps·(nm·km·°C)<sup>-1</sup>, 实验室温度变化的峰峰值按 2 °C 计算, 在 800 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 2.9 ps. 实地光纤链路的昼夜温度变化约为 20 °C, 在 1085 km 实地光纤测试中, 光纤色散系数引起的误差约为 19.5 ps. 光纤时间同步测试系统中各部分的不确定度估算结果如表 4 所示, 通过 (5) 式可得到 800 km 实验室光纤链路的时间同步不确定度约为 18.4 ps, 1085 km 实地光纤链路

的时间同步不确定度约为 63.5 ps.

本方案采用的是双波长光纤时间同步, 当光纤链路中接入的站点增加时, 将使得上行光与下行光波长的差异逐渐增加, 从而导致光纤色散对时间同步的稳定度及不确定度影响较为明显. 为了提高光纤时间同步系统的长期稳定度, 下一步将通过改进激光器的控温进行改进, 进一步提高上行光的波长与下行光的波长稳定性, 以减小色散对光纤时间同步链路的影响. 同时, 对本地端设备及远程端设备的温控进行改进, 以减小温度变化对设备中的光路不对称产生影响.

表 4 光纤时间传递不确定度分析

Table 4. The uncertainty analysis of the fiber synchronized timing signal.

误差源	误差估计值/ps	
	800 km 实验室光纤	1085 km 实地光纤
本地端和远程端设备时延温漂/ $u_{DT}$	6.0	12.0
时差测量的误差/ $u_{TIM}$	10.0	10.0
激光器波长误差/ $u_{\Delta\lambda}$	8.0	13.6
光纤色散系数测量误差/ $u_{D_{err}}$	11.5	56.8
光纤色散系数温度漂移/ $u_{\Delta D}$	2.9	19.5
总不确定度	18.4	63.5

## 4 结 论

为了减小后向反射光与光纤色散对光纤时间同步传输精度的影响, 本文在双波长光纤时间同步传输方法之上, 提出了一种具有色散误差修正功能

的双波长光纤时间同步传输方法. 基于该方法自行研制了用于光纤时间同步传输的设备, 并在 800 km 的实验室光纤链路与 1085 km 的实地光纤链路上进行了实验测试, 时间同步传输稳定度达到了 ps 量级, 优于其他相关报道, 也是国内首次实现千公里级实地光纤时间同步传输. 首先, 通过对各个站点的设备进行误差修正, 使设备产生的时延误差优于 15 ps. 以光纤色散系数 13.36ps/(km·ns) 和 16.67 ps/(km·ns) 分别对 800 km 的实验室光纤链路和 1085 km 的实地光纤进行了色散补偿, 补偿后的色散时延误差为 10ps 和 60 ps. 其次, 利用自行研制的工程样机在 800 km 的实验室光纤链路上进行了实验测试, 测得时间同步传输的标准差为 5.7 ps, 稳定度为 1.12 ps@10<sup>5</sup>s, 不确定度为 18.4 ps. 在 1085 km 的实地光纤链路上, 测得时间同步传输的标准差为 18 ps, 稳定度为 5.4 ps@4 × 10<sup>4</sup> s, 不确定度为 63.5 ps. 最后, 对该光纤时间同步传输系统中的主要影响因素进行了分析, 并提出了相应的解决方案. 在本文提出的光纤时间同步传输方法的基础上, 下一步将结合多站点同步方法进行更高精度的长距离多站点时间同步传输研究, 为全国网络化的光纤时间同步传输研究奠定基础.

## 参考文献

- [1] He W, Lian B, Yang Q 2013 Proceedings of 2013 *IEEE International Conference of IEEE Region 10 Xi'an, China*, October 23–25, 2013 p1
- [2] Lau K Y, Lutes G F, Tjoelker R L 2014 *J. Lightwave Technol.* **20** 3440
- [3] Krehlik P, Buczek L, Kotodziej J, Lipinski M, Sliwczynski L, Nawrocki J, Nogas P, Marecki A, Pazderski E, Ablewski P, Bober M, Ciuryło R, Cygan A, Lisak D, Maslowski P, Morzynski P, Zawada P M, Campbell R M, Pieczerak J, Binczewski A, Turza K 2017 *Astron. Astrophys.* **60** 3
- [4] Parthey C G, Matveev A, Alnis J, Bernhardt B, Beyer A, Holzwarth R, Maistrou A, Pohl R, Predehl K, Udem T, Wilken T, Kolachevsky N, Abgrall M, Rovera D, Salomon C, Laurent P, Hansch T W 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 203001
- [5] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, Chou C W, Bruschi A, Lorini L, Oskay W H, Drullinger R E, Fortier T M, Stalnaker J E, Diddams S A, Swann W C, Newbury N R, Itano W M, Wineland D J, Bergquist J C 2008 *Science* **319** 1808
- [6] Shelkovich A, Butcher R J, Chardonnet C, Amy-Klein A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 150801
- [7] Lewandowski W, Thomas C 1991 *Proc. IEEE* **79** 991
- [8] Lewandowski W, Azoubib J, Klepczynski W J 1999 *Proc. IEEE* **87** 163
- [9] Jiang Z 2009 *Proceedings of 2009 Frequency Control Symposium & the 22nd European Frequency and Time forum* Besancon, France, April 20–24, 2009 p1194
- [10] Chu F D, Tseng W H, Hsu W C, Ting P Y 2014 *Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium* Taipei, China, May 19–22, 2014 p11
- [11] Kong Y, Yang X H, Qin W J, Cao F, Li Z G, Sun B Q, Chang H 2014 *Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium* Taipei, China, May 19–22, 2014 p1
- [12] Guagn W, Dong S, Wu W, Zhang J, Yuan H, Zhang S 2018 *Metrologia* **55** 175
- [13] Heavner T P, Donley E A, Levi F, Costanzo G, Parker T E, Shirley J H, Ashby N, Barlow S, Jefferts S R 2014 *Metrologia* **51** 174
- [14] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, Goban A, Oppong N D, McNally R L, Sonderhouse L, Robinson J M, Zhang W, Bloom B J, Ye J 2017 *Science* **358** 90
- [15] Ebenhag S C 2008 *Proceedings of the 22nd European Frequency and Time Forum* Toulouse, France, April 22–25, 2008 p23
- [16] Piester D, Fujieda M, Rost M, Bauch A 2009 *41st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting* Santa Ana Pueblo, America, November 16–19, 2009 p16
- [17] Smotalacha V, Kuna A, Mache W 2010 *Proceedings of the 42nd Annual Precise Time and Time Interval Meeting* Reston, America, November 16–19, 2010 p427
- [18] Schnatz H 2012 *Conference on Precision Electromagnetic Measurement* Washington DC, America, July 1–6, 2012 p185
- [19] Akiyama T, Matsuzawa H, Haraguchi E, Ando T, Hirano Y 2012 *Microwave Symposium Digest. IEEE/MTT-S International* Montreal, Canada, June 17–22, 2012, p1
- [20] Smotalacha V, Kuna A, Mache W 2010 *EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum* Noordwijk, Netherlands, April 13–16, 2010 p1
- [21] Dierikx E F, Wallin A E, Fordell T, Myyry J, Koponen P, Merimaa M, Pinkert T, Koelemeij J C, Peek H Z, Smets R 2016 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **63** 945
- [22] Turza K, Krehlik P, Siwczynski L 2019 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **4** 797
- [23] Cheng H, Wu G L, Zuo F, Hu L, Chen J 2019 *Opt. Lett.* **21** 5206
- [24] Li D L, Cheng Q M, Zhang B F, Lu L, Lei P J, Li X Y 2014 *Laser and Photo-electronic Progress* **51** 010602 (in Chinese) [李得龙, 程清明, 张宝富, 卢麟, 雷平纪, 李晓亚 2014 激光与光电子进展 **51** 010602]
- [25] 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]
- [26] 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
- [27] Chen W, Liu Q, Cheng N, Xu D, Yang F, Gui Y Z, Cai H W 2015 *IEEE Photonics J.* **7** 7901609
- [28] 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, 刘涛, 张首刚 2015 物理学报 **64** 120602]
- [29] Deng X, Jiao D D, Liu J, Zang Q, Zhang X, Wang D, Gao J, Dong R F, Liu T, Zhang S G 2015 *Chin. Phys. B* **24** 054205
- [30] Yuan Y B, Wang B, Gao C, Wang L J 2017 *Chin. Phys. B* **26** 040601
- [31] 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]
- [32] Wang J, Yue C, Xi Y, Sun Y, Cheng N, Yang F, Jiang M, Sun J, Gui Y, Cai H 2020 *Opt. Lett.* **1** 208

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

Chen Fa-Xi<sup>1)2)†</sup> Zhao Kan<sup>2)‡</sup> Li Bo<sup>2)</sup> Liu Bo<sup>2)</sup> Guo Xin-Xing<sup>2)</sup>  
 Kong Wei-Cheng<sup>2)3)</sup> Chen Guo-Chao<sup>2)3)</sup> Guo Bao-Long<sup>1)</sup>  
 Liu Tao<sup>2)</sup> Zhang Shou-Gang<sup>2)</sup>

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

2) (*National Time Service Centre, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

( Received 6 August 2020; revised manuscript received 31 October 2020 )

## Abstract

To reduce the influence of fiber dispersion on accuracy of fiber-based time synchronization, a method of dispersion-error corrected dual-wavelength time synchronization is proposed in this paper. Specifically, the method is to measure the dispersion coefficient of the fiber link, and then input it to each remote terminal, the time delay error caused by the fiber dispersion is eliminated through the delay phase controller. With the self-developed engineering prototypes, the experimental verifications are subsequently made both in laboratory and real field. Before the test, 16 devices of time synchronization are connected in series for calibration. The time synchronization system is able to keep delay difference within  $\pm 15$  ps after being calibrated. In the laboratory, the experimental setup is built by cascading 16 rolls of 50km-long fiber coils, and the total length of the fiber link is 800 km. The experimental results show that the dispersion coefficient of 800 km fiber link is 13.36 ps/(km·nm), and the delay error caused by dispersion is maintained within 10 ps after correction. The stability of the time transfer is 5.7 ps in standard deviation and the time deviation is 1.12 ps at an averaging time of 100000 s. In the real field test, a 1085-km-long field fiber link is utilized, along which 16 self-developed time-frequency transceivers are set at the cascaded fiber-optic stations. After being corrected with a dispersion coefficient of 16.67 ps/(km·nm) for 1085 km urban fiber link, the time transfer is demonstrated to have a dispersion-caused delay error of 60 ps. The experimental results show that the time standard deviation is 18 ps and the time transfer instability is 9.2 ps at an averaging time of 1 s and 5.4 ps at an averaging time of 40000 s. Finally, the time uncertainty of 800-km-long laboratory optical fiber link and 1085-km-long urban optical fiber link are evaluated, and the time uncertainty is 18.4 ps and 63.5 ps, respectively. This work paves the way for constructing the time synchronization fiber network in China. To further reduce the delay error caused by dispersion in a long-distance time transfer link, the more accurate thermal control of the lasers should be adopted to reduce the shifts of forward and backward wavelengths.

**Keywords:** fiber link, time synchronization, synchronization network

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201277

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFF0200200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91636101, 91836301, 11803041), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB21000000), and the Key R&D Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030325001).

† Corresponding author. E-mail: [cfx2006xd@163.com](mailto:cfx2006xd@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [zhaokan@ntsc.ac.cn](mailto:zhaokan@ntsc.ac.cn)