

引用格式: 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.

高精度长距离光纤时间传递的研究进展及应用

陈法喜^{1,2}, 孔维成^{1,3}, 赵侃¹, 李博¹, 刘博^{1,3}, 郭新兴^{1,3},

陈国超^{1,3}, 张首刚^{1,3}, 刘涛^{1,3,*}, 董瑞芳^{1,3,*}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 西安电子科技大学, 西安 710071;

3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要: 中国科学院国家授时中心已启动建设国家高精度地基授时系统。光纤时间传递分系统作为高精度授时系统的重要组成部分, 需要不断针对关键技术问题提出解决方案, 从而提升光纤时间同步的准确度与稳定度, 以达到构建与国家标准时间偏差优于 100 ps 的高精度光纤时间同步网络的目标。本文报告了中国科学院国家授时中心在长链路光纤时间传递的研究进展。利用研制的光纤时间同步设备在 871.6 km 的实地光纤链路上得到了 29.8 ps 的时间同步标准差, 3.85 ps @ 1 ks 的时间稳定度, 25.4 ps 的不确定度; 在此基础上针对后向反射光噪声的关键问题进行技术改进, 在总长度为 1085 km 的实地光纤链路上实现了色散误差修正功能的双波长光纤时间同步, 得到了 18 ps 的时间同步标准差, 5.4 ps @ 4×10^4 s 的稳定度, 63.5 ps 的不确定度。
关键词: 高精度; 长距离; 实地光纤; 时间传递

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0266-13

Research on high-precision long-distance optical fiber time transfer and its application

CHEN Fa-xi^{1,2}, KONG Wei-cheng^{1,3}, ZHAO Kan¹, LI Bo¹, LIU Bo^{1,3}, GUO Xin-xing^{1,3},
CHEN Guo-chao^{1,3}, ZHANG Shou-gang^{1,3}, LIU Tao^{1,3,*}, DONG Rui-fang^{1,3,*}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences has launched the National High-precision Ground-based Time Service System. As an important part of the Ground-based Time Service System, the fiber-optic time transfer subsystem aims for realizing high-precision time synchronization network

收稿日期: 2021-05-01; 接受日期: 2021-10-21; *通讯作者

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91636101; 91836301; 12033007; 61801458; 12003042); 中国科学院战略先导 B 专项(XDB21030200); 广东省重点领域研发计划(2018B030325001); 中国科学院前沿重点研究资助项目(QYZDB-SW-SLH007)

with its deviation from the national standard time within 100 ps. This article reports the development progress of the National Time Service Center in long-distance fiber-optic time transfer. Using the self-developed optical fiber time synchronization equipment, the experimental results on an 871.6 km field optical fiber link have shown a time synchronization standard deviation of 29.8 ps, time stability of 3.85 ps at 1 ks, and uncertainty of 25.4 ps. Further utilizing the technique of dual-wavelength fiber time synchronization with dispersion error correction function to suppress the inherent retro-reflected optical noise in the fiber transfer, the time synchronization on the field optical fiber link with a record length of 1 085 km has been implemented. The time synchronization standard deviation achieves 18 ps and the stability is 5.4 ps at 4×10^4 s, the uncertainty is 63.5 ps.

Key words: high precision; long distance; field fiber link; time transmission

0 引言

高精度时间频率信号在诸多领域，如航空航天、国防安全等国家重大系统；导航定位、交通运输等工程技术领域；天文学、物理学等基础研究领域中都承担着很重要的角色。随着原子钟、光钟等计时仪器领域取得了重大进展，目前已经在单离子光钟和光晶格钟上实现了 10^{-18} 量级的频率不确定度和稳定度指标^[1-3]，由美国国家标准与技术研究院 NIST 实验室的镱原子钟已经实现了 10^{-19} 量级的频率不确定度和稳定度指标^[4]，但光钟系统体积庞大、结构复杂，主要用于计量机构和大学等科研单位^[5]。为了能够将这些高精度的时间基准信号广泛应用于国家重大系统、工程技术及基础研究领域，需要高精度的授时技术作为支撑。

卫星双向比对时间传递 (TWSTFT) 和全球定位系统共视 (GPS CV) 是目前比较常用的授时手段，但由于多重因素的影响，时间同步精度一般在纳秒量级^[6-7]。光纤时间传递以其传输介质稳定、损耗低、抗电磁干扰、受环境干扰较小、路径单一等明显的稳定性与安全性优势，逐渐成为高精度时间传递技术的发展方向^[8]。在中国科学院国家授时中心提出的高精度地基授时系统中，光纤时间传递分系统将依托现有光纤通信网，构建与国家标准时间偏差优于 100 ps 的高精度光纤时间同步网络。网络化的光纤授时系统，不仅可以满足各地用户的需求，更可以利用网络化的特点，大大增强该授时系统的可靠性与抗打击能力，为我国基础科研领域、军事领域以及诸多工程应用领域提供我国最高精度的时间信号以满足各类用户的需求。

近年来，国外多家研究机构在实地光纤时间传递方面展开了研究测试，2009 年瑞典 SP 技术研究所 (SP Technical Research Institute of Sweden) 在 560 km 的光纤链路上实现了优于 1 ns 的光纤时间同步指标^[9]；2010 年捷克教育科研网络 (CESNET) 在 744 km 的光纤链路上实现了时间传递的秒级稳定度优于 100 ps，时间同步不确定度为 112 ps 的光纤时间传递^[10]；2013 年法国巴黎天文台在 540 km 的光纤链路上实现了时间偏差 20 ps 的时间同步精度^[11]；同年波兰克拉科夫理工大学在 420 km 光纤链路上实现了时间传递，其稳定度优于 50 ps @ 1 s^[12]。在 2011 年，欧洲还发起了欧洲精确时频传输网络 (NEAT-FT) 联合研究项目拟建设时间同步不确定度优于 100 ps 的欧洲时频光纤同步网络^[13-14]。

国内的多个研究机构在光纤时间同步领域也开展了研究，2010 年解放军理工大学通信工程学院在 125 km 室内光纤上的时间同步精度优于 0.5 ns^[15]；2014 年清华大学在实地 80 km 的光纤链路上实现了 ± 50 ps 的时间同步指标^[16]；2016 年中国科学院上海光学精密机械研究所在实地 230 km (150 km + 80 km 级联) 光纤链路上的时间同步准确度为 90 ps，平均时间 $10^2 \sim 10^4$ s 时的时间稳定度为 3.5 ps^[17]；同年上海交通大学在约 6 000 km 实验室光纤链路上的光纤时间同步偏差小于 70 ps^[18]；从 2003 年开始，国家授时中心就持续开展设备研制与实验测试，现已建立了多条完整的千 km 实地光纤时间频率传递实验平台。

本文介绍了国家授时中心在光纤时间传递方面的研究工作进展,包括在苏南广电 871.6 km 实地光纤链路与陕西电信陕南 1085 km 实地光纤链路上完成的光纤时间同步测试结果。目前已在千 km 实地光纤链路中实现 18 ps 的时间同步标准差; 5.4 ps @ 4×10^4 s 的时间稳定度; 63.5 ps 的不确定度^[19], 为全国土覆盖的高精度地基授时系统中, 构建全网光纤总长度约 2 万 km 的光纤时间传递分系统奠定了技术及工程基础。

1 光纤时间传递基本原理

光纤时间传递利用光纤作为信号传递信道, 将时间信号从本地端传递到光纤末端用户, 通过实时测量光纤链路的传输时差, 并予以补偿使得用户得到与本地端高精度同步的时间信号。目前高精度光纤时间传递多采用基于密集波分复用 (DWDM) 的时间同步方案, 在链路对称的情况下, 主要通过环回法^[17]和双向比对法^[20]两种方式^[21]计算传输时差并补偿, 实现高精度光纤时间同步。

环回法一般采用本地端补偿, 其优势在于远程端接收到的信号是与本地端高度同步的信号, 可供用户直接使用, 无需数据后处理。基于双向比对的光纤时间同步可选择本地端补偿也可选择远程端补偿, 远程端补偿方式在比对过程得到误差数据, 在远程端控制时差实现时间同步, 更易于扩展远程端, 可为使用一个本地端对多个远程端进行时间同步奠定基础, 资源利用率较高, 利于实现光纤时间频率传递的网络化。

因此, 在长距离高精度光纤时间传递中往往采用双向时间比对法, 光纤时间传递双向时间比对法远程端补偿基本结构框图, 如图 1 所示, 在本地端由时间频率源输出时间频率信号; 通过光电探测器对从远程端返回的光信号进行光电转换, 得到电信号, 并将其与时间参考源输出的时间信号通过时差测量单元进行时差测量, 得到本地端比对数据, 时差量 T_{AB} ; 编码单元将时间频率信号、时码信息与本地端比对数据进行编码, 通过激光器发送至远程端设备。远程端设备通过光电探测器接收来自本地端的光信号进行光电转换, 得到电信号; 解码出时间频率信号、时码信息与来自本地端的比对数据 T_{AB} ; 载波处理器具有载波恢复、守时振荡及产生时间信号的功能, 其中的守时振荡器由来自本地端的时间频率信号驯服, 并对来自本地端的信号起到净化再生作用; 时差测量单元对来自本地端设备的 1 PPS 信号与远程端通过载波处理器保持的 1 PPS 信号进行时差测量, 得到时差量 T_{AB} ; 由处理器根据双向比对数据计算出系统需要的时差补偿量 ΔT , 并控制时差控制补偿单元, 以实现远程端设备与本地端之间时间信号的实时同步。

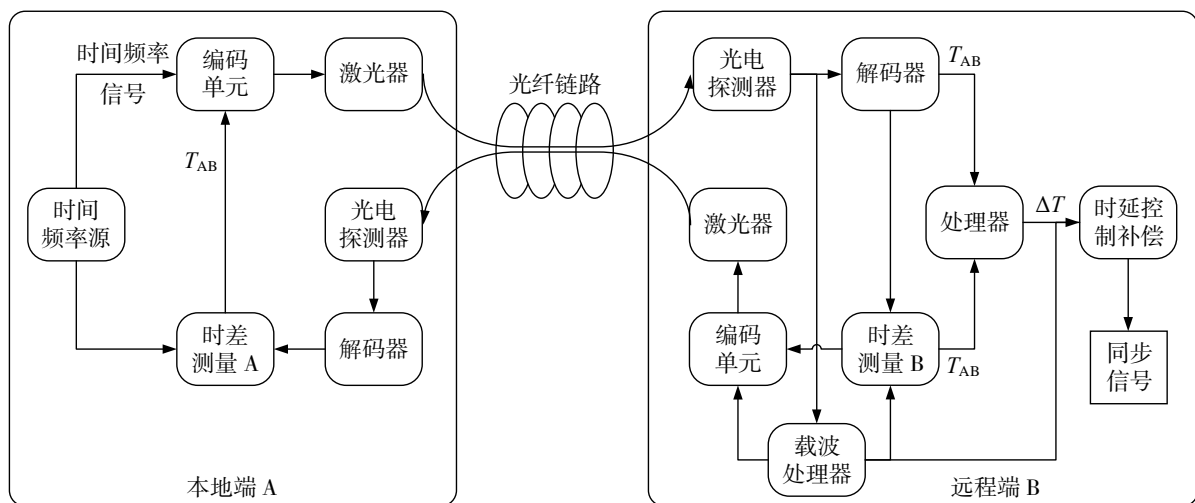


图 1 光纤时间传递双向时间比对法远程端补偿基本结构框图

本地端 A，远程端 B 分别通过各自的时差测量器 A 与 B，来测量设备内部时间信号和接收到时间信号的时间间隔，它们分别可表示为：

$$T_{AB} = \Delta T + \tau_B^T + \tau_{BA}^F + \tau_A^R, \tag{1}$$

$$T_{BA} = -\Delta T + \tau_A^T + \tau_{AB}^F + \tau_B^R. \tag{2}$$

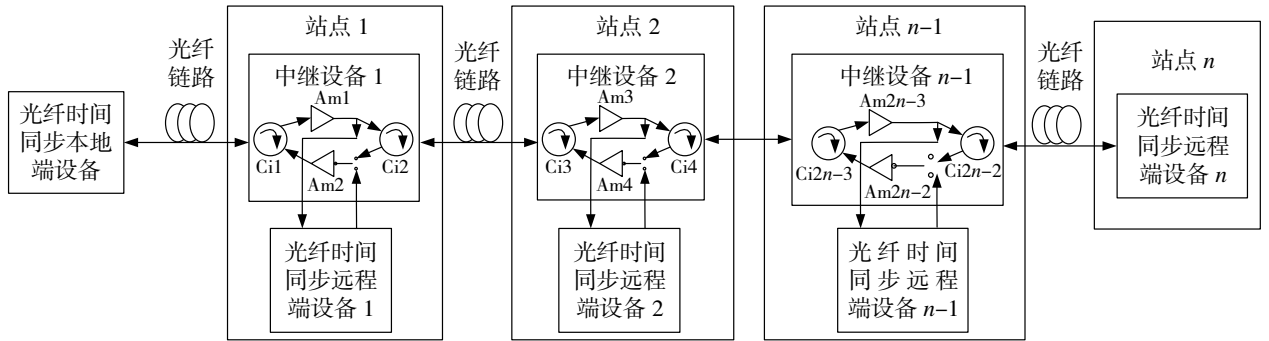
式 (1) 和 (2) 中， T_{AB} (T_{BA}) 为 A (B) 端设备测得的时间间隔， τ_A^T (τ_B^T) 为 A (B) 端发送设备延时， τ_A^R (τ_B^R) 为 A (B) 端接收设备延时， τ_{AB}^F (τ_{BA}^F) 为 A 端到 B 端 (B 端到 A 端) 信号在光纤链路中的传输时延， ΔT 即为系统需要的时差补偿量：

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(T_{AB} - T_{BA}) + (\tau_{AB}^F - \tau_{BA}^F) + (\tau_A^T - \tau_A^R + \tau_B^R - \tau_B^T)]. \tag{3}$$

由于发送和接收设备传输时延可以提前测得并补偿，在双向链路完全对称的情况下，可认为双向链路时延 $\tau_{AB}^F = \tau_{BA}^F$ ^[22]，从而得到：

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(T_{AB} - T_{BA}) + (\tau_A^T - \tau_A^R + \tau_B^R - \tau_B^T)]. \tag{4}$$

由于高精度地基授时系统不仅需要长距离高精度的光纤时间同步还需要配合灵活且合理的组网方式。因此，光纤时间传递在 1 对 1 时间同步方案的基础上发展了适应光纤网络结构的 1 对多的时分多址多用户时间同步方案，时分多址多用户光纤时间同步系统原理图如图 2 所示。本地端设备通过时分复用的方式对各个远程端设备进行轮流呼叫，中继设备在放大光信号的同时，通过指令来切换光开关，至本地端设备接收到来自远程端设备 n 的光信号，则成功建立了双向时间比对链路，从而实现长距离多站点高精度光纤时间同步。值得注意的是，每个站点的远程端设备及中继设备具有很高的可复制性，但系统分别为其分配了唯一的设备地址。



注：Am 为光学放大器；Ci 为光学环形器

图 2 时分多址多用户光纤时间同步系统原理图

2 871.6 km 实地光纤时间传递实验

基于双向时间比对远程端补偿及时分多址多用户光纤时间同步原理，国家授时中心于 2017 年利用一个波长信道同时对 1 PPS (pluse per second) 信号、时码信号以及 10 MHz 信号进行传递，并使用时分多址多用户和净化再生的方式实现了多站点高精度光纤时间同步，该 871.6 km 的实地光纤链路共计 11 个站点，共放置了 1 台本地端设备、10 台中继设备及 11 台远程端设备。为验证方案的可行性，首先在每两个站点间间隔 50 km 总长为 550 km 的实验室光纤链路上，进行了验证性测试，实验室光纤测试方案如图 3 所示。

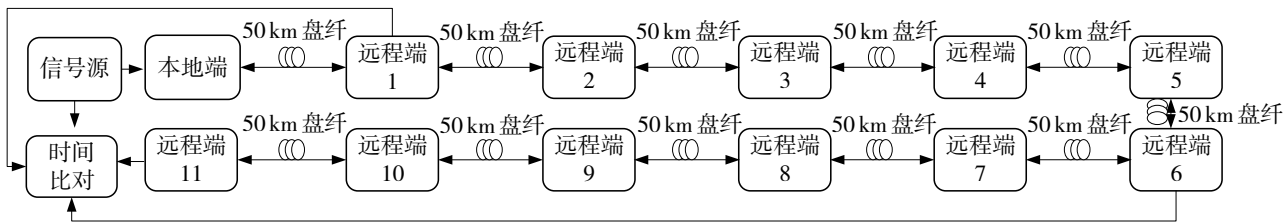


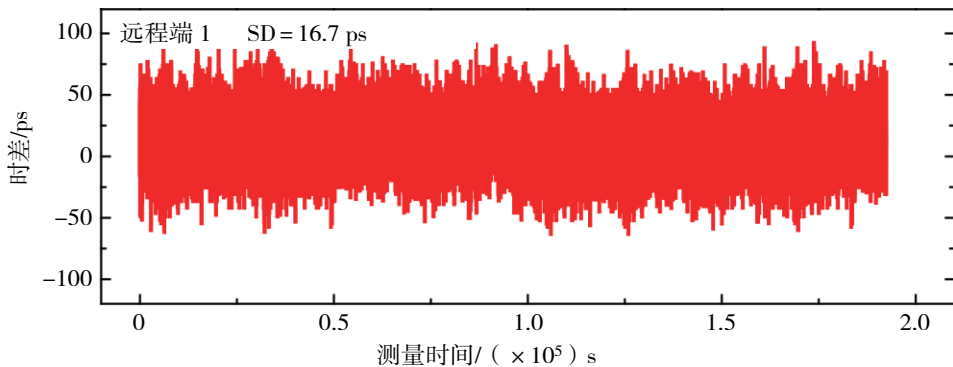
图 3 实验室光纤测试方案

由于测试仪器设备有限，选择分别位于在 50, 300, 550 km 处的“远程端 1”、“远程端 6”和“远程端 11”作为时间同步的比对测试对象，同时进行实验测试测量。在测试过程中，远程端与本地端间的光纤传输时差如表 1 所示。

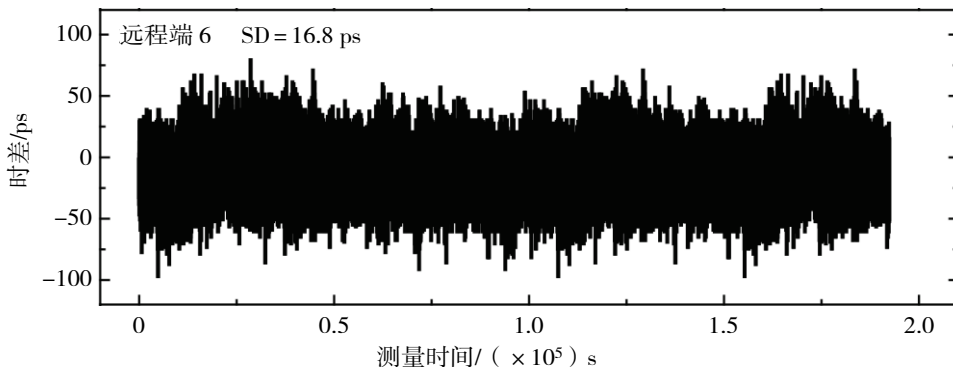
表 1 各远程端与本地端间的光纤传输时差 单位: ps

远程端设备编号	时差值	时差变化峰值
1	251 458 378	3 886
6	1 500 799 014	24 305
11	2 772 999 504	44 641

当实验测试系统稳定工作后，同时对编号为 1, 6, 9 的远程端设备输出的时间信号与本地端的时间信号进行时差测量，结果如图 4 所示，曲线为各远程端输出的 1 PPS 信号与本地端 1 PPS 信号的时差变化：图 (a) 为远程端 1 的时差变化，其标准差值为 16.7 ps；图 (b) 为远程端 6 的时差变化，其标准差值为 16.8 ps；图 (c) 为远程端 11 的时差变化，其标准差值为 18.4 ps。具体时差变化与峰峰值数据如表 2 所示。



(a) 50 km 光纤



(b) 300 km 光纤

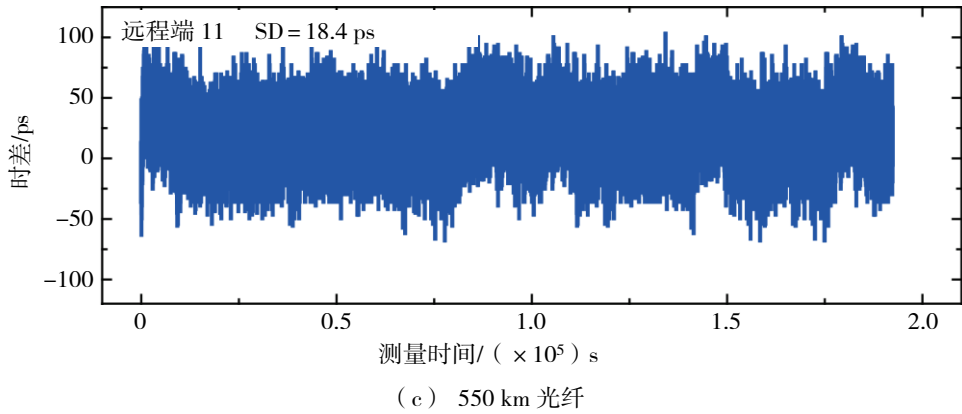


图 4 实验室光纤时差测试结果图

表 2 各远程端输出 1 PPS 信号与本地端 1 PPS 信号间的实时时差

远程端设备编号	标准差值	峰-峰值
1	16.7	121
6	16.8	132
11	18.4	158

采集到的时差数据经处理，得到的时间稳定度如图 5 所示，远程端的秒级时间信号传递稳定度均小于为 15 ps@1 s，传递稳定度在 500 s 左右最小，均小于 4 ps。此外，最远端设备 11 的时间信号稳定度为 13.8 ps@1 s，2.92 ps@1 ks。

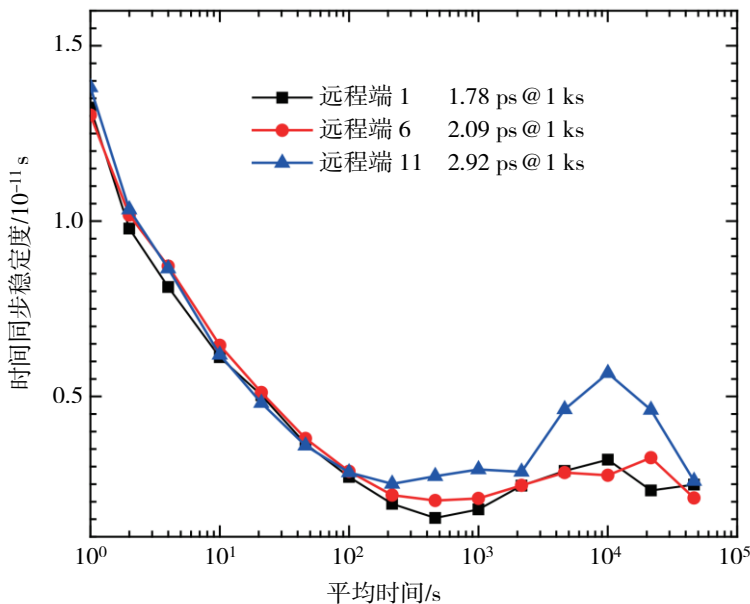


图 5 实验室环境下时间稳定度测试结果

实验测试结果高度表明了方案的可行性及设备的可靠性。进一步在以南京中心机房为起止点，途径镇江、常州、无锡、苏州、常熟、南通、海安、泰州、扬州、六合，沿途共 11 个站点，光纤链路总长度为 871.6 km 的实地光纤链路上进行了测试，实地光纤测试方案如图 6 所示。

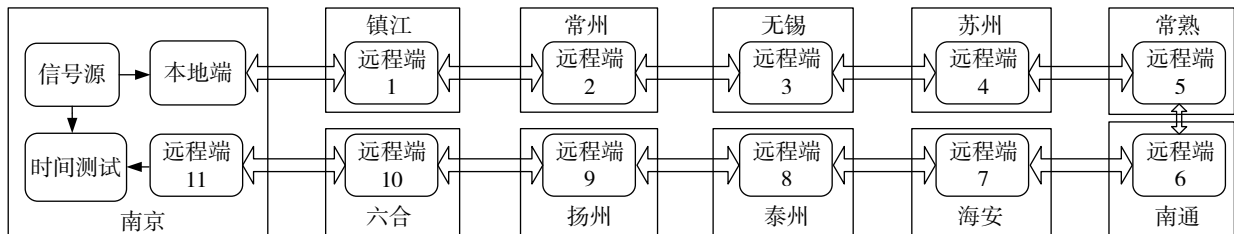
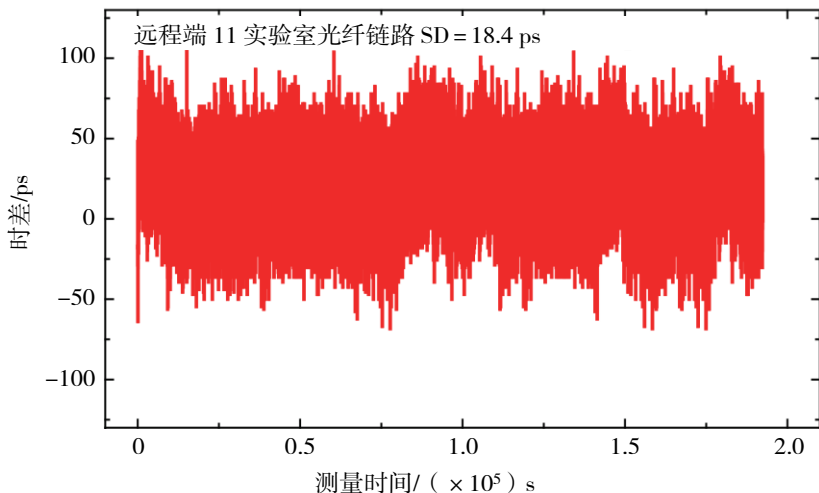


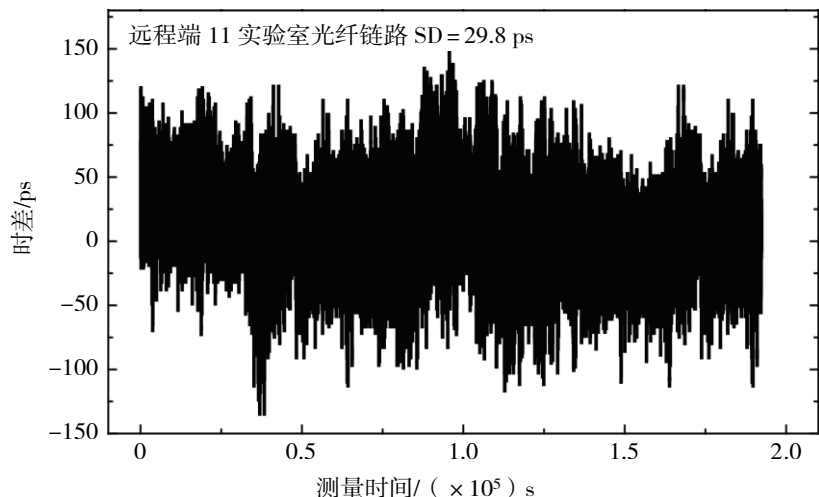
图 6 实地光纤测试方案

在南京中心机房，将南京远程端设备输出的 1 PPS 信号与输入到南京本地端设备的 1 PPS 信号进行比对测试，在测试过程中，871.6 km 光纤链路的总传输时差平均值为 4 303 540 527 ps，时差变化的峰-峰值为 66 423 ps，时间同步标准差为 29.8 ps，时间稳定度为 3.85 ps @ 1 ks。

将测试结果与 550 km 实验室环境情况相比较，其结果如图 7 所示。图 (a) 曲线代表 550 km 实验室光纤链路时差变化；图 (b) 曲线表示 871.6 km 实地光纤链路时差变化。时间同步稳定度如图 8 所示，下方曲线表示经过 550 km 实验室光纤测试的 TDEV(时间同步稳定度)数据；上方曲线表示经过 871.6 km 实地光纤测试的 TDEV。

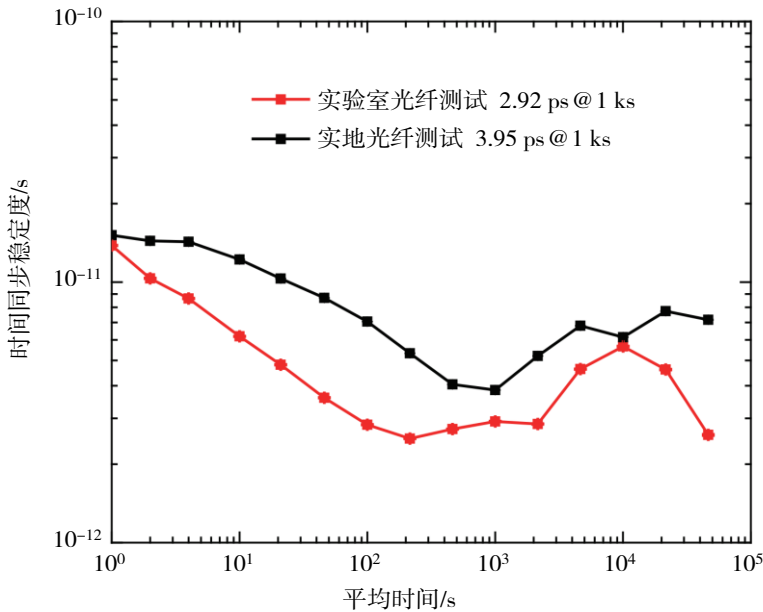


(a) 实验室环境下时差变化



(b) 实地环境下时差变化

图 7 实验室环境与实地环境下的时差测试结果



注：实验室环境下 TDEV 变化如下方圆点曲线所示；实地环境下 TDEV 变化如上方方块曲线所示

图 8 实验室光纤环境与实地环境下光纤链路的 TDEV 测试结果

经分析，影响 550 km 实验室光纤链路与 871.6 km 实地光纤链路时间传递的不确定度因素主要包含以下 4 个方面：

各设备时延温漂 u_{DT} 约为 $3\text{ps}/(\text{ }^\circ\text{C})$ ，实验室环境下温度变化峰-峰值约为 $2\text{ }^\circ\text{C}$ ，实地光纤链路中各站点温度变化峰-峰值约为 $4\text{ }^\circ\text{C}$ ；时差测量误差 u_{TIM} （主要包括设备时差测量差异性及传输过程中时间信号的时延测量误差）；激光器波长误差为 $u_{\Delta\lambda}$ ，($u_{\Delta\lambda} = 0.5DL$ ，其中 D 为色散系数，典型值为 $17\text{ ps}/(\text{nm km})$ ， L 为光纤长度)；中继放大设备引入的不对称性误差为 u_{DA} ，约为 7.9 ps ，系统总不确定度可根据 $U_C = \sqrt{u_{DT}^2 + u_{TIM}^2 + u_{\Delta\lambda}^2 + u_{DA}^2}$ 计算得出，光纤时间传递不确定度分析如表 3 所示。

表 3 光纤时间传递不确定度分析

不确定度因素	误差估计值	
	550 km 实验室光纤	871.6 km 实地光纤
各设备时延温漂 u_{DT}	6	12
时差测量误差 u_{TIM}	21	21
激光器波长误差 $u_{\Delta\lambda}$	1.1	2.96
不对称性误差 u_{DA}	7.9	7.9
总不确定度 U_C	23.2	25.6

3 1 085 km 实地光纤时间传递实验

为进一步拓展光纤时间同步的链路长度及提升光纤时间同步指标，2020 年聚焦于后向反射光与光纤色散对长距离光纤时间同步指标的影响，提出了一种双波长光纤时间同步方法，此方法可修正色散误差，实验原理如图 9 所示，本地端设备与各远程端设备采用的激光器可输出相差一个波道的两种标称波长，双波长光纤时间同步方案在双向时间比对方案的基础上，将光纤色散信息通过编码方式一起与时间

频率信号及时码信息通过光纤链路传输至远程端，并采用波分复用的方式使得上行光与下行光分离，从而降低了后向反射光的干扰；为提高传递过程中载波信号的信噪比，在中继设备内采用光电光方式（OEO）对载波信号进行了净化再生处理，使远程端获得一个高稳时间频率源，进一步地，远程端通过修正净化再生后的时间信号，从而实现与本地端时间信号的同步。

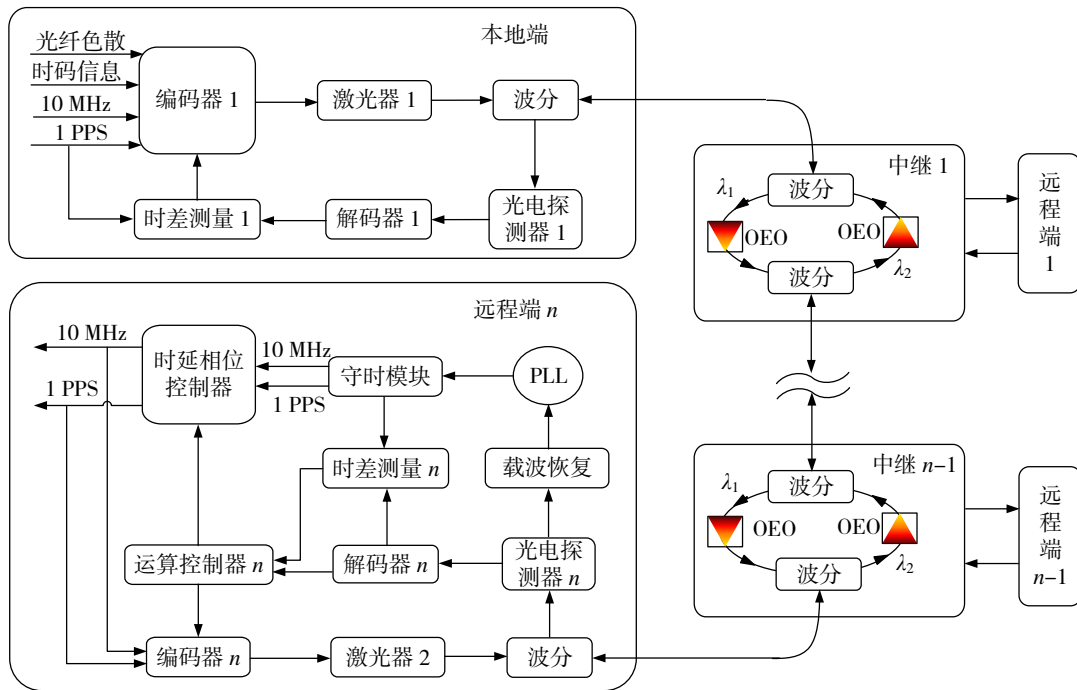


图 9 具有色散误差修正功能的双波长光纤时间同步实验原理

基于上述具有色散误差修正功能的双波长光纤时间同步实验原理及时分多址多用户光纤时间同步原理，国家授时中心于 2020 年进行了 1 085 km 实地光纤链路的双波长光纤时间同步测试，本次测试实现了国内首次千 km 级实地光纤时间同步传递。在 1 085 km 的实地光纤链路中，共有 16 个站点，在本次双波长测试方案中，上行光采用的标称波长是 $\lambda_1=1\ 543.730\text{nm}$ ，下行光采用的标称波长是 $\lambda_2=1\ 542.936\text{nm}$ 。为验证方案的可行性，首先在每两个站点间间隔 50 km 总长为 800 km 的实验室光纤链路上，进行了实验验证性测试，测得光纤的色散系数为 $13.36\text{ps}/(\text{km ns})$ ，实验室光纤测试方案如图 10 所示。

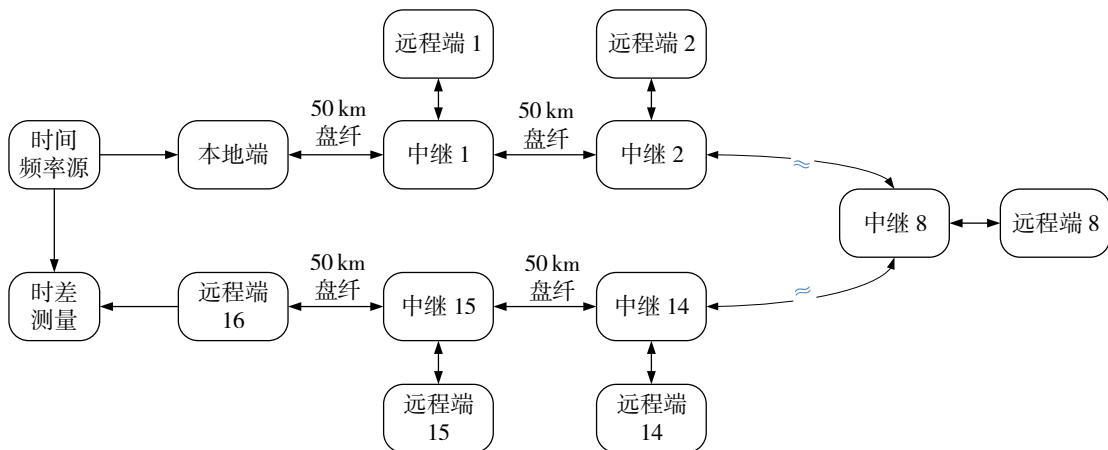
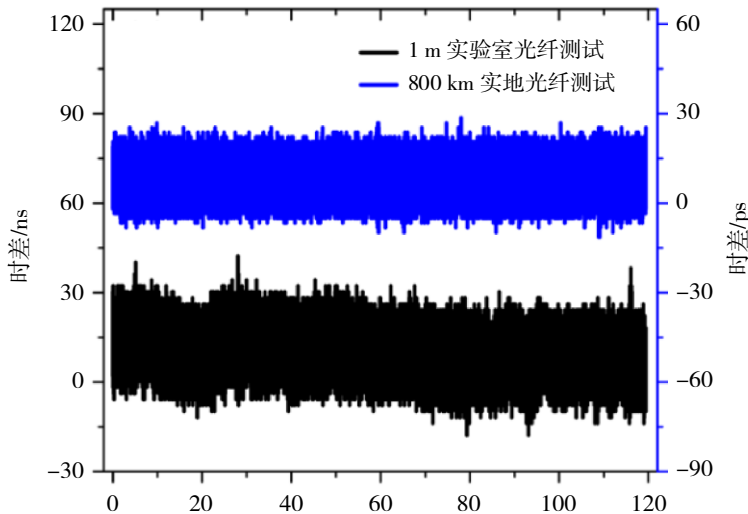


图 10 实验室光纤测试方案

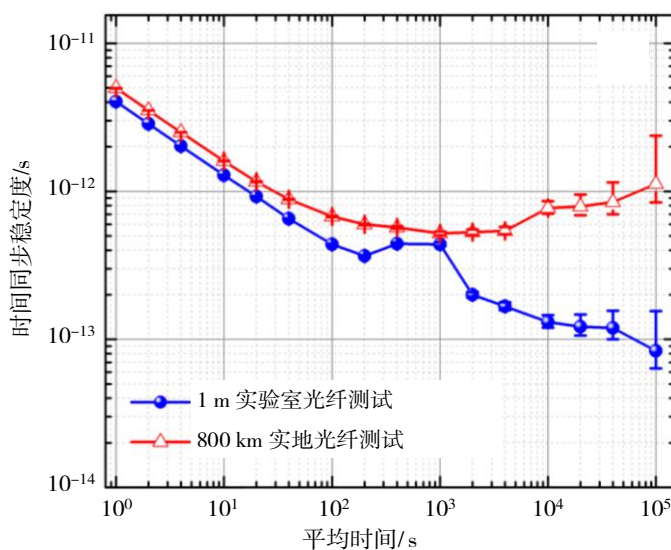
为测试系统性能，将本地端 1 PPS 信号与远程端 16 输出的 1 PPS 信号接到 SR620（时差测量设备）上，进行时差测量，测试结果如图 11 所示，下方曲线表示经 800 km 实验室光纤链路传递后的时差峰峰值约为 50 ps，经计算此次测量结果的标准差值为 5.7 ps，当各设备采用 1 m 光纤跳线连接时，可测得整个时间同步的噪声极限，测试结果如图 11 上方曲线所示。



注：系统噪底情况如上方曲线所示；800 km 实验室光纤链路时差测试结果如下方曲线所示

图 11 实验室光纤链路的时差测试结果

为表示本系统时间同步稳定度，将图 11 所示时差数据进行计算得到 TDEV 数据，如图 12 所示，上方三角曲线表示 800 km 实验室光纤链路的时间同步稳定度情况，TEDV 秒稳为 4.9 ps，十万秒稳为 1.12 ps。下方圆点曲线表示系统噪底 TDEV 秒稳为 4.0 ps，十万秒稳为 0.083 ps。值得注意的是，1 ks 以上时，800 km 实验室光纤的长期稳定度开始恶化，其原因主要是实验室温度变化导致了激光波长及设备时差的漂移。



注：系统噪底 TDEV 变化如下方圆点曲线所示；800 km 实验室光纤链路 TDEV 变化如上方三角曲线所示

图 12 光纤链路的时间同步稳定度测试结果

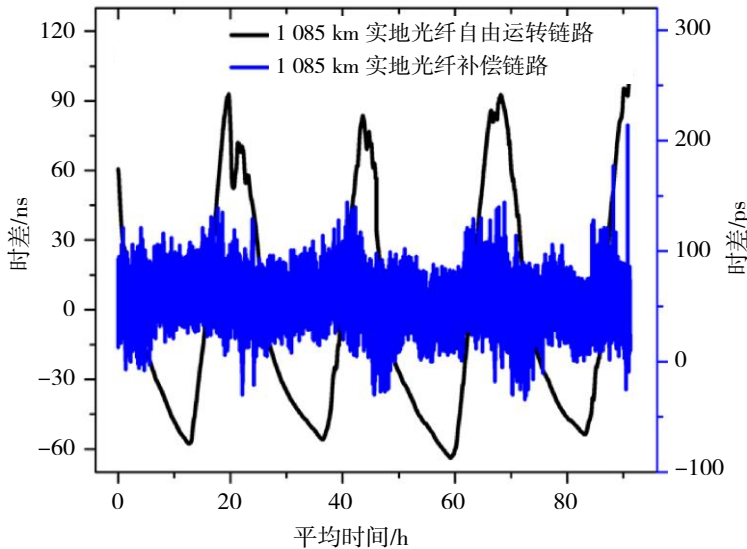
实验测试结果高度表明了方案的可行性及设备的可靠性。进一步在以中科院国家授时中心临潼园区为光纤链路的始发站，沿途设置了一长、涝峪、筒车湾、洋县、汉中、勉县、宁强 7 个站点，在末端的

勉县及宁强两个站点进行了两次往返传输，链路最终至环回国家授时中心临潼园区，沿途共 16 个站点，光纤链路总长度为 1 085 km。实地光纤链路的地理位置分布如图 13 所示。在国家授时中心临潼园区放置本地端设备与远程端 16 号设备，其余各站点分别放置一台远程端设备与一台中继设备。



图 13 实地光纤链路具体位置

为测试实地光纤时间同步指标在国家授时中心园区采用 SR620 对本地端设备与远程端 16 号设备输出的 1 PPS 信号进行时差测量，测试结果如图 14 所示，未加补偿的光纤自由运转链路的时差测试结果如图 14 中幅度较大的波动曲线所示，时差峰值为 160 ns，经计算，其标准差为 47 ns；经链路补偿后的时差测试结果如图 14 中较为稳定的中心曲线所示，时差峰峰值为 170 ps，经计算其标准差为 18 ps。由图可见自由运转时时差值呈周期性波动，主要是由每天的温度波动引起。



注：1 085 km 实地光纤链路自由运转时的测试结果由幅度较大的波动曲线所示；
1 085 km 实地光纤补偿链路的时间同步测试结果由较为稳定的中心曲线所示

图 14 1 085 km 实地光纤链路的时差测试结果

1 085 km 实地光纤补偿链路的 TDEV 计算结果如图 15 所示，其 TDEV 秒稳为 9.2 ps、4 万秒稳为 5.4 ps。对比于实验室环境下，短期稳定度发生明显恶化的主要原因在于外界环境噪声较为复杂及系统控制带宽的限制，而长期稳定度恶化的主要原因在于各站点之间的温度差及昼夜较大温差变化的影响。

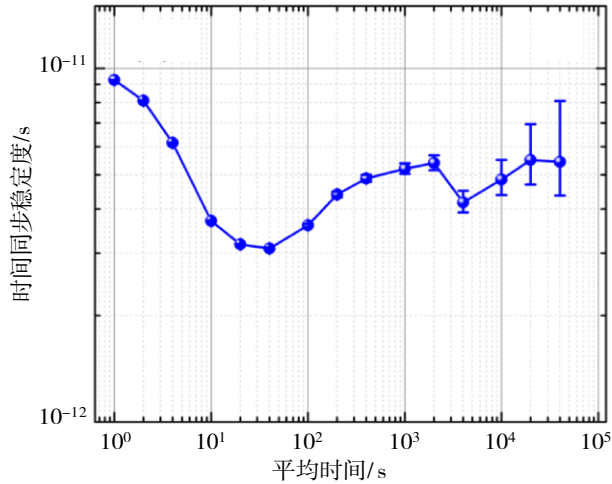


图 15 1 085 km 实地光纤补偿链路的 TDEV 变化

影响 1 085 km 实地光纤链路时间传递的不确定度因素主要包含以下 5 个方面：各设备时延温漂 u_{DT} 约为 3ps/($^{\circ}C$)，实验室环境下温度变化峰-峰值约为 2 $^{\circ}C$ ，实地光纤链路中各站点温度变化峰-峰值约为 4 $^{\circ}C$ ；时差测量误差 u_{TMI} 约为 10 ps；激光器波长变化引起的光纤色散误差 $u_{\Delta\lambda}$ （其中，实验室光纤光纤色散系数约为 13.36 ps/(km nm)，实地光纤链路色散系数取 16.67 ps/km)；光纤链路色散系数测量引起的误差 u_{Derr} ($u_{Derr}=0.5 Derr \cdot \Delta\lambda \cdot L$ ，其中， $Derr$ 为光纤色散系数测量误差，实验室光纤色散系数测量系数约为 0.037 ps/(km nm)，实地光纤色散系数测量系数约为 0.13ps/(km nm)， $\Delta\lambda$ 为双向激光波长的差值， L 为光纤长度)。光纤色散参数随温度变化引入的误差 $u_{\Delta D}$ ，光纤色散系数随温度变化参数约为 4.5×10^{-3} ps · (nm km · $^{\circ}C$)⁻¹，实验室温度变化峰峰值约为 2 $^{\circ}C$ ，实地光纤链路的昼夜温度变化约为 20 $^{\circ}C$ 。系统合成标准不确定度 U_C 可根据 $U_C = \sqrt{u_{DT}^2 + u_{TMI}^2 + u_{\Delta\lambda}^2 + u_{Derr}^2 + u_{\Delta D}^2}$ 计算得出，光纤时间传递不确定度分析如表 4 所示。

表 4 光纤时间传递不确定度分析

单位：ps

不确定度因素	误差估计值	
	800 km 实验室光纤	1 085 km 实地光纤
各设备时延温漂 u_{DT}	6	12
时差测量误差 u_{TMI}	10	10
激光器波长误差 $u_{\Delta\lambda}$	8	13.6
链路中光纤色散系数 测量误差 u_{Derr}	11.5	56.8
光纤色散系数温度 漂移误差 $u_{\Delta D}$	2.9	19.5
总不确定度	18.4	63.5

4 结论

本文介绍了中国科学院国家授时中心在长链路光纤时间传递的研究进展。目前利用研制的光纤时间同步设备在 871.6 km 的实地光纤链路上得到了时间同步标准差为 29.8 ps，TDEV 千秒稳定性为 3.85 ps，不确定度为 25.4 ps 的实验结果；在此基础上针对后向反射光噪声的关键问题进行技术改进，在总长度为 1085km 的实地光纤链路上实现了色散误差修正功能的双波长光纤时间同步，时间同步标准差为 18 ps，

TDEV 4 万秒稳定度为 5.4 ps, 不确定度为 63.5 ps。测试结果为高精度地基授时系统的进一步开展提供了重要支撑, 接下来我们将继续针对关键问题进行深入研究, 不断提升光纤时间同步准确度与稳定度, 以早日达到全国土覆盖的高精度地基授时系统的要求。

参考文献:

- [1] CAMPBELL S L, HUSTON R B, MARTI G E, et al. A fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock[J]. *Science*, 2017, 6359(358): 90-94.
- [2] USHIJIMA I, TAKAMOTO M, DAS M, et al. Cryogenic optical lattice clocks[J]. *Nature Photon*, 2015(9): 185-189.
- [3] 北京大学量子电子学研究所. 主动光频标[EB/OL]. (2020-10-18)[2020-09-05]. https://iqe.pku.edu.cn/dht/gz_01/yjfx_04/zdgz/index.htm.
- [4] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. *Nature*, 2018(564): 87-90.
- [5] 楚珺尧, 王强. NIST 下一代芯片级原子钟研究进展[J]. *中国计量*, 2020(2): 62-63.
- [6] 张虹, 董绍武, 袁海波, 等. 基于软件接收机技术的卫星双向时间传递性能分析[J]. *时间频率学报*, 2019, 42(4): 284-291.
- [7] 朱江森, 韩东, 高源, 等. 卫星双向法时间频率比对系统的研究与构建[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(3): 509-516.
- [8] 陈法喜, 赵侃, 周旭, 等. 长距离多站点高精度光纤时间同步[J]. *物理学报*, 2017, 66(20): 27-35.
- [9] EBENHAG S, HEDEKVIST P O, JARLEMARK P, et al. Measurements and error sources in time transfer using asynchronous fiber network[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1918-1924.
- [10] SMOTLACHA V, KUNA A, MACHE W. Time transfer using fiber links[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, Noordwijk: IEEE, 2010: 1-8.
- [11] LOPEZ O, KANJ A, POTTIE P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network[J]. *Applied Physics B*, 2013(110): 474-476.
- [12] ŚLIWCZYŃSKI Ł, KREHLIK P, BUCZEK Ł, et al. Multipoint dissemination of RF frequency in delay-stabilized fiber optic link in a side-branch configuration[C]//2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium, Prague: IEEE, 2013: 876-878.
- [13] SCHNATZ H, BOLOGNINI G, ALONICO D C, et al. NEAT-FT: the European fiber link collaboration[C]//European Frequency & Time Forum, Switzerland: [s.n.], 2014.
- [14] 杨文哲, 杨宏雷, 赵环, 等. 光纤时频传递技术进展[J]. *时间频率学报*, 2019, 42(3): 214-223.
- [15] 卢麟, 吴传信, 朱勇, 等. 125 km 高精度光纤时间传递实验[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集, 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2010: 594-599.
- [16] 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.
- [17] LIU Q, CHEN W, XU D, et al. Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a cascaded fiber link of 230 km[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 070602.
- [18] ZHANG H, WU G, LI H, et al. High-precision ultralong distance time transfer using single-fiber bidirectional-transmission unidirectional optical amplifiers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-8.
- [19] 陈法喜, 赵侃, 李博, 等. 基于 1 085 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): 63-72.
- [20] 于龙强, 卢麟, 王荣, 等. Sagnac 效应对光纤时间传递精度的影响分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 91-96.
- [21] 黄璜, 吴龟灵, 胡亮, 等. 温度对双向时分复用光纤时间传递精度的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 97-103.
- [22] 江少平. 高精度光纤时间传递链路性能研究与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.