

长距离多站点高精度光纤时间同步

陈法喜 赵侃 周旭 刘涛 张首刚

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

Chen Fa-Xi Zhao Kan Zhou Xu Liu Tao Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 200701 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.200701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.200701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型长周期光纤光栅的设计与研制进展

Recent progress in design and fabrication of novel long-period fiber grating

物理学报.2017, 66(7): 070704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070704>

分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展

Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research

物理学报.2017, 66(7): 070705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070705>

基于相干光时域反射型的光纤分布式声增敏传感研究

Research on improving detection sensitivity to acoustic based on coherent-OTDR distributed fiber-sensing system

物理学报.2017, 66(7): 070706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070706>

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究

Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals

物理学报.2015, 64(12): 120702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120702>

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706>

长距离多站点高精度光纤时间同步*

陈法喜^{1)3)†} 赵侃¹⁾³⁾ 周旭¹⁾²⁾³⁾ 刘涛¹⁾³⁾ 张首刚¹⁾³⁾

1)(中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

2)(中国科学院大学, 北京 100039)

3)(中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

(2017年5月7日收到; 2017年7月5日收到修改稿)

为了保证长距离多站点间的高精度时间同步, 在利用双向时间比对法实现高精度长距离时间同步的基础上, 提出了一种利用一个波长信道同时对 1 PPS (pulse per second) 信号、时码信号以及 10 MHz 信号进行传递, 并使用时分多址和净化再生的方式实现多站点高精度光纤时间同步的方法. 以自行研制的工程样机在长度约 550 km 的实验室光纤链路以及 871.6 km 的实地光纤链路上进行了实验验证. 在实验室光纤链路上, 同时在 50, 300, 550 km 处测量得到的时间同步标准差分别为 16.7, 16.8, 18.4 ps, 时间稳定度分别为 1.78 ps@1000 s, 2.09 ps@1000 s, 2.92 ps@1000 s. 在实地光纤链路上, 实现了光纤链路沿途 11 个站点的时间同步, 测得 871.6 km 传递链路的时间同步标准差为 29.8 ps, 时间稳定度为 3.85 ps@1000 s, 不确定度为 25.4 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.66.200701

1 引言

近年来, 原子钟技术的不断发展进步, 不仅提高了时间频率测量的精度, 而且还为一些基础物理研究提供了精密的测量手段^[1-3], 同时也促进了全球卫星导航定位、深空探测等应用的关键技术发展研究^[4-6]. 常用的铯束原子钟的日稳定度已达到 10^{-14} 量级, 氢原子钟的日稳定度达到 10^{-15} 量级^[7], 同时随着光钟的出现, 其日稳定度已达到了 10^{-18} 量级^[8,9]. 为了能够对这些高精度的时间基准信号进行精确的传输, 则需要一种传输精度远高于传递时间精度的传输手段对时间信号进行传输, 这对高精度时间频率传输领域的研究带来了巨大的挑战.

在利用同轴电缆对时间信号的传输方式中, 由于传递电缆的带宽及损耗的限制, 传输距离一般限

制在 1 km 以内, 无法满足远程高精度时间传递的要求. 卫星双向比对时间传递^[10,11]和全球定位系统共视^[12,13]是目前最常见的时间授时手段, 其传输距离可达数千乃至上万公里, 但由于卫星轨道的波动、大气层温度变化、终端环境不稳定等因素的影响, 时间频率传输的日稳定度最高为 10^{-15} 量级^[14], 时间同步精度为纳秒量级. 为了提高时间频率传输的稳定度, 光纤以其受环境干扰较小、抗电磁干扰、路径单一、低损耗及带宽大等优势, 逐渐引起了国内外各研究小组的关注. 2013年, 波兰克拉科夫理工大学采用密集波分复用(DWDM) Round-trip法, 在 420 km 实地光纤链路上实现了时间传递的稳定度优于 50 ps@1 s^[15]. 2010年, 捷克教育科研网中心所采用 DWDM 双向时间比对方法, 在 744 km 的光纤链路上实现了时间传递的稳定度优于 100 ps@1 s, 时间同步不确定度为 112 ps^[16]. 同

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 91636101)、国家重点研发计划(批准号: 2016YFF0200200)和国家自然科学基金(批准号: 11273024)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cfx2006xd@163.com

时, 日本、瑞典、德国、美国等发达国家也在利用光纤进行时间频率传递方面已经实现了不同方案的光纤时间频率传递研究, 为下一代高精度光纤时间频率同步研究提供了重要的基础^[17-21]. 近几年, 国内多个小组在光纤时间频率传递方面也展开了相关研究工作, 并取得了突破性进展^[22-29]. 2016年, 上海交通大学采用双向时分复用同波光纤时间传递方案, 并利用自循环的方式, 在实验室光纤链路上实现了800, 6000 km的光纤时间传递实验, 测得光纤时间传递的稳定度分别为40 ps@1 s和5 ps@10⁵ s, 190 ps@1 s和61 ps@10⁵ s, 6000 km时间同步不确定度为69.5 ps^[22]. 2017年, 清华大学在光纤时间双向比对的基础上, 在30 km的实验室光纤上实现了高精度多路由的光纤时间信号同步, 测得光纤时间传递的稳定度为100 ps@1 s, 时间同步不确定度为100 ps^[29].

本文主要介绍了国家授时中心在利用光纤进行长距离多站点高精度时间传递方面开展的研究. 在利用双向时间比对法实现高精度长距离时间同步的基础上, 提出了一种只占用一个波长的信道就完成对1 PPS (pulse per second) 信号、时码信号及10 MHz信号同时进行传递, 并采用时分多址和净化再生的方式对多个站点进行时间同步的新方案. 首先, 对实验原理及实验装置设备进行了详细描述; 其次, 以自行研制的体积为1 U标准机箱的工程样机, 在长度约为550 km的实验室光纤及871.6 km的实地光纤链路上对本方案进行了实验测试验证. 在55 km实验室光纤上, 同时测得50, 300, 550 km处的时间同步标准差分别为16.7, 16.8, 18.4 ps, 时间稳定度分别为13.2 ps@1 s和1.78 ps@1000 s, 13.8 ps@1 s和2.09 ps@1000 s, 13.0 ps@1 s和2.92 ps@1000 s, 550 km光纤链路的时间同步不确定度为22.5 ps. 在871.6 km实地光纤链路上, 以南京为起点, 对光纤链路沿途的

10个城市站点进行了时间同步. 由于测量条件的限制, 只对最长距离光纤链路站点之间进行了测量, 测得时间同步标准差为29.8 ps, 时间稳定度为15.1 ps@1 s, 3.85 ps@1000 s, 通过分析得到871.6 km实地光纤的时间同步不确定度为25.4 ps. 最后, 对实验中影响时间同步精度的相关因素进行了分析讨论, 并提出了相应的解决方案, 以备进一步提高.

2 实验原理与装置

2.1 实验原理

长距离多站点高精度光纤时间同步系统的基本原理如图1所示, 光纤时间同步本地端设备首先将时间信号加载到光上, 再通过光纤链路传递到第一个站点的中继设备1, 中继设备1中的光学环形器(Ci1)将来自本地端下行方向的光信号分离出来, 并经过光放大器(Am1)放大后由光学分束器分为两路, 一路输出给站点1的光纤时间同步远程端设备, 另一路输入到中继设备1内的另一个光学环形器(Ci2)继续传递到下一站点. 下行方向的光信号到达第二个站点的中继设备2后, 采取与在中继设备1中相同的方法, 一路输出给站点2的光纤时间同步远程端设备, 另一路继续传递到下一站点的中继设备. 如此继往传递到下一站点的中继设备, 直到最后一个站点的远程端设备, 则可实现各个站点远程端设备持续接收来自本地端设备下行方向的光信号. 同时, 来自第 n 个站点的远程端设备的光信号, 到达第 $n-1$ 站点的中继设备后, 通过环形器(Ci2n-2)后到达光放大器(Am2n-2), 放大后的光信号经环形器(Ci2n-3)到达第 $n-2$ 站点的中继设备, 同样以此类推, 直至本地端设备接收到来自远程端设备 n 的光信号, 则可实现远程端设备与本地端设备时间信号的双向比对链路.

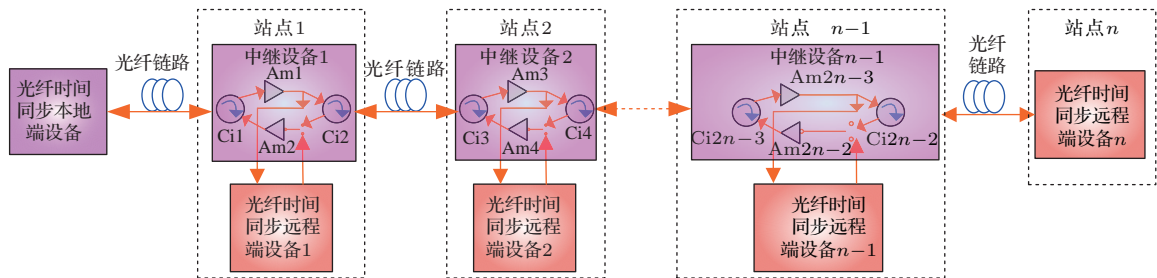


图1 (网刊彩色) 长距离多站点光纤时间同步系统原理图(Am, 光放大器; Ci, 光学环形器)

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the time synchronization on the multi-sites-connected long-distance fiber link (Am, optical amplifier; Ci, optical circulator).

各个站点的远程端设备都有各自唯一的设备地址,本地端设备采用时分多址的方式实现对各个站点的远程端设备进行轮询同步.当某个站点处的远程设备接收到本地端设备的呼叫指令时,该站点处中继设备内的光开关将会被切换到远程设备的输出激光上,未接收到呼叫指令时,光开关会切换到来自下一站点的上行光上.即本地端通过对某个站点的设备地址进行呼叫来切换光开关,从而建立本地端设备与该站点远程端设备之间的双向时间比对链路.通过双向时间比对,控制各个站点远程

端设备内的时延和相位控制模块,实现各个站点与本地端设备的时间同步.

本地端与远程端设备间双向信号的帧结构如图2所示.每帧信号的长度为10 ms,其中前100 μ s包含设备地址、时码信息、比对数据及其他数据,剩余9.9 ms是10 MHz载波信号.每个站点的远程端设备都可以连续接收到本地端设备发送的帧信号,通过内部解码器进行解析,其中10 MHz载波信号用于内部守时模块,使远程端设备具有良好的守时能力,为时分多址提供保障.

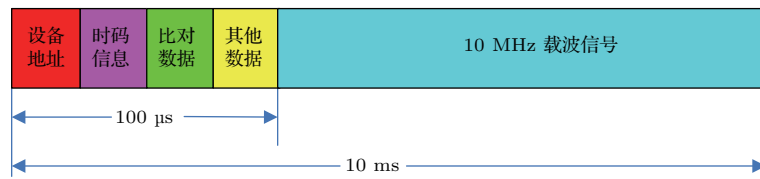


图2 本地端与远程端设备间信号的帧结构

Fig. 2. Frame structure of the timing signal between local and remote ends.

2.2 实验装置

实验装置如图3所示,本地端设备与远程端设备间的双向时间比对是由两个波长相等的激光器通过光学环形器实现的.本地端设备将输入的时码信息、10 MHz信号、时间信号及双向时间比对的时差数据输入到控制编码器内,将编码后的信号加载到激光器的输出激光上,激光器发出的光信号作为下行光信号,经过环形器、光纤链路及中继设备后到达某一个站点处的远程端设备.远程端设备内将

来自本地端设备的下行光信号通过光电探测器转换为电信号并分为两路,一路通过载波恢复模块获得10 MHz载波信号,另一路通过解码器解调出时间信号、时码信息以及双向时间比对的数据.恢复得到的10 MHz载波信号经过锁相环(PLL)模块净化后作为远程端设备内部守时模块的时钟源.当该站点的远程端设备被呼叫时,该远程端设备将守时模块输出的时间信号与解调出的时间信号通过时差测量模块进行比对,将得到的比对结果输入到运算控制模块中,通过时延和相位控制对守时模块输

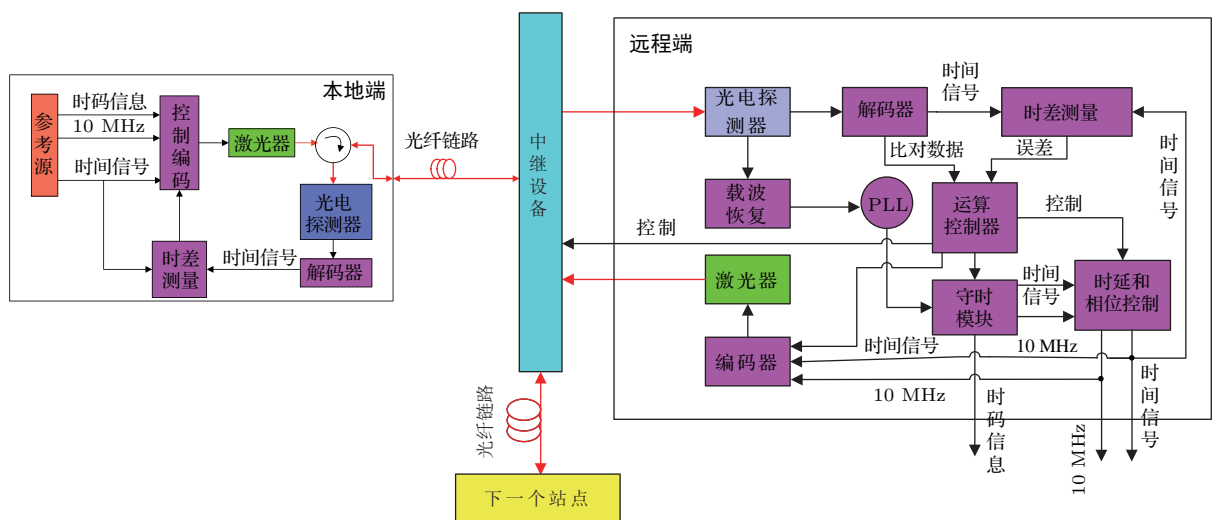


图3 本地端与远程端实验装置图

Fig. 3. Experimental setup at the local and remote ends.

出的时间信号进行反馈修正, 最后再将输出的时间信号、10 MHz 信号以及当前进行双向时间比对的数据经编码器编码后, 加载到激光器输出的激光上, 经过环形器的上行光路、中继设备、光纤链路和环形器后到达本地端设备. 本地端设备利用光电探测器将光信号转换为电信号, 将解码器解调出来的时间信号与输入的参考时间信号进行时间比对, 实现光纤链路的双向时间比对. 远程端设备再将双向时间比对的数据经解码器解调出后, 通过运算控制器控制其内部的时延和相位控制模块, 使其输出的时间信号与输入到本地端设备的时间信号同步.

为了保证各个站点之间互不影响, 各个远程端都设置了不同的设备地址号. 各个站点的远程端设备都是持续接收来自本地端设备的信号, 利用 PLL 模块对其中的载波频率信号进行净化处理, 净化后的载波频率信号通过守时模块再生出时间信号, 这样不仅使远程端设备具有良好的时间和相位保持能力, 而且提高了远程端设备时间频率信号的短期稳定度, 减小光纤链路引入的噪声.

3 实验方案与结果分析

在长距离多站点高精度光纤时间同步的实验测试中, 通常由于本地端和远程端设备不在同一个地点、测量设备及测量人员数量等条件的限制, 给本方案在实地光纤链路中的验证带来了一定的困难, 因此在对实地光纤进行实验验证之前, 首先采用实验室光纤对本方案进行了测试评估, 最后再采用实地光纤链路进行实验验证.

3.1 实验室光纤链路测量结果与分析

实验室光纤链路的测试结构如图 4 所示. 将 1 台本地端设备、11 台接收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, 测试中以 11 捆

50 km 的实验室光纤作为传递链路. 由于实验测试中使用的仪器设备数量有限, 抽取“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, 并同时进行了实验测试.

一般在实际应用中, 由于相邻两个站点之间的距离较长, 需利用中继对传输信号进行放大. 直接采用掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行级联放大, 引入的噪声会恶化时间信号的传输质量, 影响系统的正常工作. 本实验采用光-电-光中继放大的方式, 避免了光纤链路噪声和 EDFA 自身噪声被逐级叠加放大带来的影响. 在采用光-电-光中继放大的方式中, 激光器输出光波长的一致性和稳定性对时间同步的准确度和稳定度起着至关重要的作用. 在实验测试中, 采用了 32 个输出中心波长为 1542.936 nm 的激光器, 其中 20 个激光器用在 10 个中继设备内, 11 个激光器用在 11 个远程端设备内, 1 个激光器用在本地端设备内. 这 32 个激光器的输出波长是通过波长计进行逐一测量标定, 误差小于 0.0002 nm. 为了避免实验室温度变化 (峰-峰值为 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的变化小于 0.0001 nm/°C.

在测试过程中, 远程端 1 与本地端间的光纤传输时延为 251458378 ps, 时延变化峰值为 3886 ps, 远程端 6 与本地端设备间的光纤传输时延为 1500799014 ps, 时延变化峰值为 24305 ps, 远程端 11 与本地端间的光纤传输时延为 2772999504 ps, 时延变化峰值为 44641 ps. 当整个实验测试系统正常工作时, 同时对这三个远程端设备输出的 1 PPS 信号与输入到本地端的 1 PPS 信号进行比对测试, 时延测量结果如图 5 所示, 红色线段表示远程端 1 输出的 1 PPS 信号与输入到本地端的 1 PPS 信号的时差变化, 其标准差值为 16.7 ps, 峰-峰值为 121 ps; 黑色线段表示远程端 6 输出的 1 PPS 信号与输入到本地端的 1 PPS 信号的时差变化, 其标准

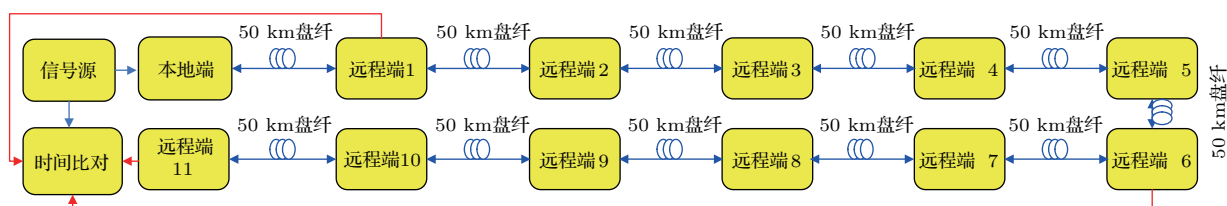


图 4 实验室测试方案

Fig. 4. Scheme of laboratory test.

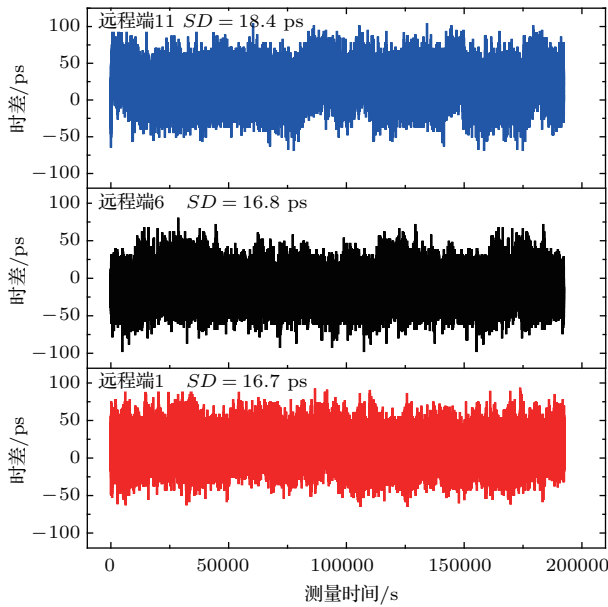


图5 (网刊彩色) 实验室光纤时差测量结果图 (红色线段为 50 km 光纤, 黑色线段为 300 km 光纤, 蓝色线段为 550 km 光纤)
 Fig. 5. (color online) Time interval measurement results of laboratory fiber link (red line, 50 km fiber link; black line, 300 km fiber link; blue line, 550 km fiber link).

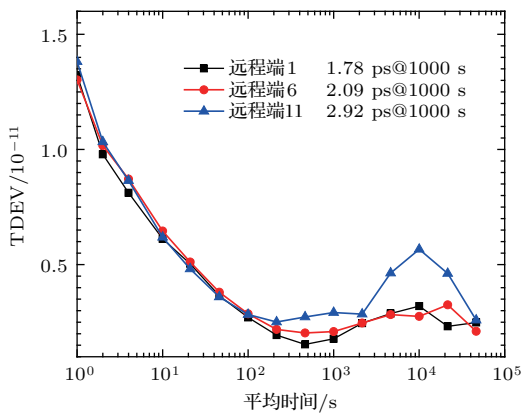


图6 (网刊彩色) 实验室光纤链路时间稳定度测量结果 (红色曲线为 50 km 光纤, 黑色曲线为 300 km 光纤, 蓝色曲线为 550 km 光纤)
 Fig. 6. (color online) Time deviation measurement results of laboratory fiber link time stability (red line, 50 km fiber link; black line, 300 km fiber link; blue line, 550 km fiber link).

差值为 16.8 ps, 峰-峰值为 132 ps; 蓝色线段表示远程端 11 输出的 1 PPS 信号与输入到本地端的 1 PPS 信号的时差变化, 其标准差值为 18.4 ps, 峰-峰值为 158 ps. 将采集到的时差数据经处理, 得到的时间稳定度如图 6 所示, 远程端 1 的时间信号稳定度为 13.2 ps@1 s, 1.78 ps@1000 s, 远程端 6 的时间信号稳定度为 13.0 ps@1 s, 2.09 ps@1000 s, 远程端 11 的时间信号稳定度为 13.8 ps@1 s, 2.92 ps@1000 s.

3.2 实地光纤链路测量结果与分析

以自行研制的工程样机在江苏南部 871.6 km 的实地光纤链路上进行实验测试的地理位置如图 7 所示. 光纤链路以南京中心机房为出发点, 途径镇江、常州、无锡、苏州、常熟、南通、海安、泰州、扬州、六合 10 个站点, 最后回到南京中心机房. 图 8 是本次测试的方案示意图, 在南京中心机房放置一台光纤时间同步本地端设备和一台远程端设备, 在其余站点各放置一台远程端设备和一台中继设备. 以南京机房为中心机房, 对各个站点 (包括南京站点) 远程端设备进行时间同步, 并在南京机房测试远程端 11 输出的时间信号.

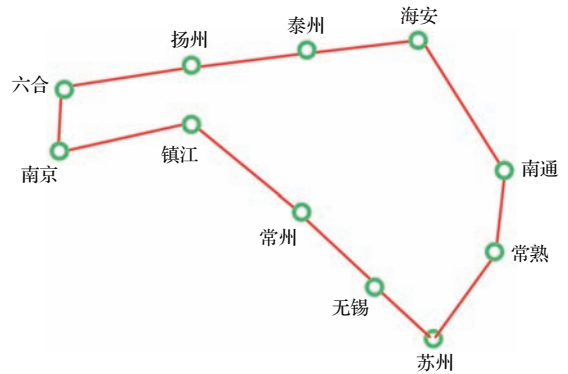


图7 实地光纤链路地理位置

Fig. 7. Geographical distribution of the field fiber link.

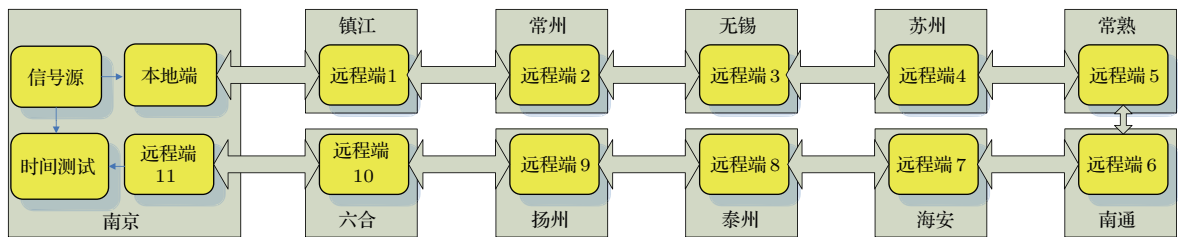


图8 实地光纤测试方案

Fig. 8. Scheme of field fiber test.

表1 光纤链路的详细参数

Table 1. Detailed parameters of the individual sites in the field fiber link.

编号	站点名称	相邻站点 距离/km	衰减/dB	光纤链路传输 时延及变化/ps
1	南京	0	0	0
2	镇江	102	23	506892384±12672
3	常州	97	23	950342656±21382
4	无锡	59	14	1309193728±23911
5	苏州	71	17.5	1660607616±33212
6	常熟	68	15.5	1992951424±34451
7	南通	93.4	21	2451252258±43635
8	海安	89	19.5	2887329663±45178
9	泰州	69	17.5	3228732983±53682
10	扬州	72	18	3581541839±55037
11	六合	68	15.5	3905313243±56369
12	南京	83.2	18.5	4303540527±66423
	全程	871.6	203	4303540527±66423

实验前, 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分段测试, 测试结果如表 1 所列. 经统计, 光纤链路全程为 871.6 km, 总衰减为 203 dB. 其中表 1 第 5 列表示实验过程中通过实验设备内部的实时时延测量功能测得的本地端与各个站点远程端之间的光纤链路时延及其变化情况. 从表 1 中可以看出, 871.6 km 光纤链路的总传输时延平均值为 4303540527 ps, 时延变化的峰值为 66423 ps.

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, 并将测量结果与 550 km 实验室光纤的情况进行对比, 结果如图 9 所示. 550 km 实验室光纤链路时差变化的标准差值为 18.4 ps, 峰-峰值为 158 ps; 871.6 km 实地光纤链路时差变化的标准差值为 29.8 ps, 峰-峰值为 285 ps. 时间同步稳定度如图 10 所示, 红色曲线表示经过 550 km 实验室光纤后, 其时间稳定度为 13.8 ps@1 s, 2.92 ps@1000 s, 黑色曲线表示经过 871.6 km 实地光纤链路后, 其时间稳定度为 15.1 ps@1 s, 3.85 ps@1000 s.

从测量结果可以看出, 实地光纤链路时间同步结果的标准差值及时间稳定度相对采用实验室光纤链路的测量结果有较大恶化, 这是由于实地光纤链路受到的机械振动、声音及各种噪声的影响较大, 并且这些噪声的频谱比较宽, 采用光电光中继和 PLL 净化的方式难以彻底消除, 从而对时间同步的

结果带来了一定的影响. 这从测量结果可以看出, 实地光纤链路前 100 s 的时间稳定度明显比实验室光纤链路较差; 同时由于测量环境温度的变化, 导致本地端、远程端及中继设备内的激光器的输出波长和电子线路的传输时延发生变化, 这将对时间同步的长期稳定度产生严重的影响, 从时间稳定度测量的结果中也可以看出, 其稳定度在 1000 s 之后发生了严重的恶化.

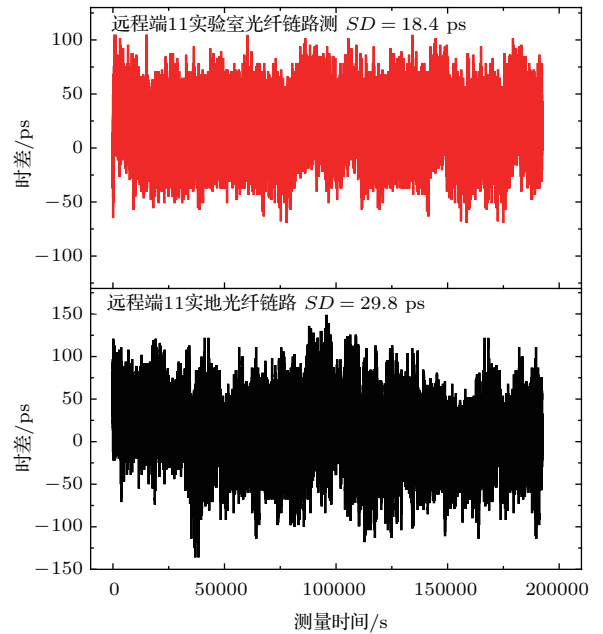


图9 (网刊彩色) 实验室光纤与实地光纤链路时差变化测量结果 (红色曲线表示实验室光纤, 黑色曲线表示实地光纤)
Fig. 9. (color online) The measured time interval variation results of the laboratory fiber link (red line) and the filed fiber link (black line).

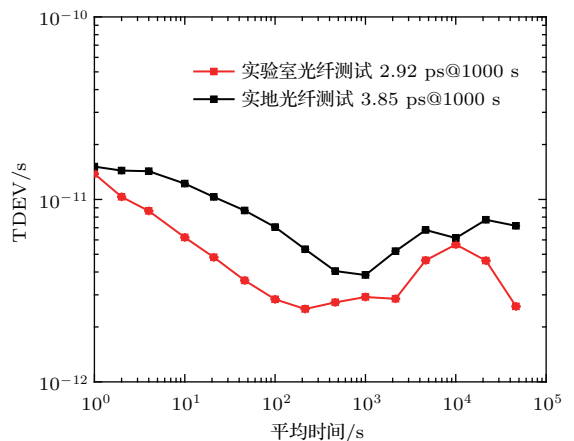


图10 (网刊彩色) 实验室光纤与实地光纤链路时间传递稳定度测量结果 (红色曲线表示实验室光纤链路, 黑色曲线表示实地光纤链路)
Fig. 10. (color online) The measured time deviation results of the laboratory fiber link (red line) and the filed fiber link time stability (black line).

3.3 时间同步标准差及不确定度分析

3.3.1 时间同步标准差分析

表2列出了550 km实验室光纤链路与871.6 km实地光纤的时间传递的稳定度主要因素影响. 其中电子线路延时误差主要是由工作温度变化引起的, 实验室温度变化峰-峰值约2 °C, 各个站点机房总温度变化峰-峰值约4 °C; 补偿滞后误差、测量模块误差及校准误差由系统自身决定; 光纤残余噪声是由光纤链路噪声导致系统中信噪比降低而产生的, 主要是由外界环境振动及声音引起的.

表2 光纤时间同步标准差分析

Table 2. Instability analysis of the fiber synchronized timing signal.

误差源	误差估计/ps	
	550 km	871.6 km
电子线路	5	10
补偿滞后	2	2
测量模块	8	8
校准误差	8	8
光纤残余噪声	13.6	25.6
总标准差	18.5	29.8

3.3.2 时间同步不确定度分析

表3列出了550 km实验室光纤链路与871.6 km实地光纤的时间传递的不确定度主要因素影响. 其中主要包括以下几个方面: 本地端和远程端设备时延温漂, 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, 各个站点机房总温度变化峰-峰值约4 °C; 时差测量的误差(本地端和远程端设备的时延校准误差以及设备在运行过程中对光纤链路传输时延的测量误差); 激光器波长变化引起的光纤色散误差, 经过对激光器外部的温度控制, 输出波长随环境温度的变化小于0.0001 nm/°C; 中继放大器引入的时延不对称性误差约5 ps. 表3中, D 为光纤的色散系数, 典型值为17 ps/(nm·km), L 为光纤链路长度.

本方案采用时分多址的方式, 当接入设备数量增加时会延长系统的轮询周期, 对时间同步稳定度及不确定度会产生一定影响. 下一步我们计划对远程端设备内的PLL采用数字锁相方式, 这样不仅可

增大锁相环路的时常数, 也可更大程度地抑制带外噪声, 获得更好的时间同步短期稳定度, 并对激光器、本地端设备及远程端设备的温控进行改进, 以减小温度变化对时间同步长期稳定度及不确定度的影响.

表3 光纤时间传递不确定度分析

Table 3. Uncertainty analysis of the fiber synchronized timing signal.

误差源	误差估计值/ps	
	55 km 实验室光纤	871.6 km 实地光纤
本地端和远程端设备时延温漂	6	12
时差测量的误差	21	21
激光器波长误差 (0.5DL)	1.9	6
中继放大器	5	5
总不确定度	22.5	25.4

4 结 论

介绍了中国科学院国家授时中心在高精度光纤时间同步方面的研究进展. 以自行研制的工程样机, 在长度为550 km长的实验室光纤及871.6 km的实地光纤链路上进行了实验测试. 在长度为550 km的实验室光纤链路上, 测得50, 300, 550 km处的时间同步的标准差分别为16.7, 16.8, 18.4 ps, 时间同步的稳定度分别为1.78 ps@1000 s, 2.09 ps@1000 s, 2.92 ps@1000 s. 在实地光纤链路上, 由于条件的限制, 只对经过871.6 km光纤链路后的时间信号进行了测量, 测得时间同步的标准差为29.8 ps, 时间同步的稳定度为3.85 ps@1000 s, 时间同步不确定度为25.4 ps. 通过实验实现了光纤链路中多个站点的远程端设备与本地端设备的时间同步, 也验证了本方案的可行性, 并对实验中的主要影响因素进行了分析. 在本文提出的方案的基础上, 下一步将采用星形和链形连接相组合的多站点同步方法和级联传递方式进行高精度的时间同步, 这将为全国性的网络化光纤时间同步研究奠定一定的基础.

参考文献

[1] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, Chou C W, Brusch 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
- [2] 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
- [3] Shelkownikov A, Butcher R J, Chardonnet C, Amy-Klein A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 150801
- [4] Bartels A, Diddams S A, Oates C W, Wilpers G, Bergquist J C, Oskay W H, Hollberg L 2005 *Opt. Lett.* **30** 667
- [5] Marion H, Pereira D S F, Abgrall M, Zhang S, Sortais Y, Bize S, Maksimovic I, Calonico D, Grunert J, Mandache C, Lemonde P, Santarelli G, Laurent P, Clairon A 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 150801
- [6] DeCamp M F, Reis D A, Bucksbaum P H, Adams B, Caraher J M, Clarke R, Conover C W S, Dufresne E M, Merlin R, Stoica V, Wahlstrand J K 2001 *Nature* **413** 825
- [7] Ruan J 2012 *Ph. D. Dissertation* (BeiJing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [阮军 2012 中国科学院大学博士论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [8] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, Fox R W, Sherman J A, Ma L S, Oates C W 2011 *Nat. Photon.* **5** 158
- [9] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, Campbell S L, Bishof M, Zhang W, Bromley S L, Ye J 2014 *Nat. Lett.* **506** 71
- [10] Jiang Z 2009 *Proceedings of 2009 Frequency Control Symposium & the 22nd European Frequency and Time forum* Besancon, France, April 20–24, 2009 p1194
- [11] Chu F D, Tseng W H, Hsu W C, Ting P Y 2014 *Proceedings of IEEE International Frequency Control Symposium* Taipei, Taiwan, May 19–22, 2014 p11
- [12] Lewandowski W, Thomas C 1991 *Proc. IEEE* **79** 991
- [13] Lewandowski W, Azoubib J, Klepczynski W J 1999 *Proc. IEEE* **87** 163
- [14] 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, Taiwan, May 19–22, 2014 p1
- [15] Siwczynski L, Krehlik P, Czubla A, Lipinski M 2013 *Metrologia* **50** 133
- [16] Smotlacha V, Kuna A, Mache W 2010 *EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum* Noordwijk, Netherlands, April 13–16, 2010 p1
- [17] Ebenhag S C 2008 *Proceedings of the 22nd European Frequency and Time Forum* Toulouse, France, April 22–25, 2008 p23
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Schnatz H 2012 *Conference on Precision Electromagnetic Measurement* Washington DC, America, July 1–6, 2012 p185
- [21] 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
- [22] Wu G L, Chen J P 2016 *Sci. Technol. Herald* **34** 99 (in Chinese) [吴龟灵, 陈建平 2016 科技导报 **34** 99]
- [23] 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]
- [24] Wu L, Wu G L, Shen J G, Zou W W, Chen J P 2012 *Optical Fiber & Electric Cable* **3** 15 (in Chinese) [吴雷, 吴龟灵, 沈建国, 邹文卫, 陈建平 2012 光纤与电缆及其应用技术 **3** 15]
- [25] 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
- [26] Chen W, Liu Q, Cheng N, Xu D, Yang F, Gui Y Z, Cai H W 2015 *IEEE Photon. J.* **7** 7901609
- [27] 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]
- [28] Jiao D D, Gao J, Liu J, Deng X, Xu G J, Chen J P, Dong R F, Liu T, Zhang S G 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 190601 (in Chinese) [焦东东, 高静, 刘杰, 邓雪, 许冠军, 陈玖朋, 董瑞芳, 刘涛, 张首刚 2015 物理学报 **64** 190601]
- [29] Yuan Y B, Wang B, Gao C, Wang L J 2017 *Chin. Phys. B* **26** 040601

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

Chen Fa-Xi^{1)3)†} Zhao Kan¹⁾³⁾ Zhou Xu¹⁾²⁾³⁾ Liu Tao¹⁾³⁾ Zhang Shou-Gang¹⁾³⁾

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

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

3) (Key Laboratory of Time and Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

(Received 7 May 2017; revised manuscript received 5 July 2017)

Abstract

To achieve high-precision fiber-optic time transfer, the method of two-way transmission is usually used. Therefore in this paper we propose to develop a high-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations by simultaneously transferring the 1 pulse per second signal, time code signal and 10 MHz frequency signal over single fiber with the same wavelength, and adopting the time division multi address (TDMA) as well as the purification and regeneration method at individual station. In this proposal, the equipment at each remote station has its own address, and the equipment at the local station can establish the periodic two-way time transfer with any remote station by using the TDMA method, therefore each remote station is synchronized with the local station. To avoid the superimposed effect of optical noises during propagation in fiber, the optical-electro-optical relay amplifiers are utilized. In the meantime the propagation delay of the fiber link is compensated for at each remote station. With the self-developed engineering prototypes, the experimental verifications are subsequently conducted both in laboratory and real field. In the laboratory, the experimental setup is built by cascading 11 rolls of 50 km-long fiber coils, and locating three monitoring devices at different fiber distances of 50, 300, and 550 km from the local station. The stabilities of the time transfer at these three points are achieved to be 16.7, 16.8, and 18.4 ps in standard deviation, and the time deviations are 1.78, 2.09, and 2.92 ps at an averaging time of 1000 s respectively. In the real field test, a field fiber link of 871.6 km in length is utilized, along which 11 self-developed time-frequency transceivers are set at the cascaded fiber-optic stations. Since only the 11th remote station is co-located at the local station, the performance and the time transfer between the 11th remote station and the local station are measured accurately. The time transfer is experimentally demonstrated with the time standard deviation of 29.8 ps and the time deviations of 3.85 ps/1000 s. The timing uncertainty on the field fiber link is also checked and gives a value of 25.4 ps. To further improve the long-term stability of time transfer, the more accurate thermal control of the lasers used in the system should be adopted to reduce the optical wavelength drift. By compressing the bandwidth of the phase locked loop module in each remote device, the short-term stability of time synchronization can also be better. This proposal can also be extended to the fiber networks with star-shaped and chain-shaped connections. Therefore time synchronization in even larger areas and more stations can be realized.

Keywords: fiber optics, time synchronization, synchronization network

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

DOI: 10.7498/aps.66.200701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91636101, 11273024) and the National Key Research and Development Plan of China (Grant No. 2016YFF0200200).

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