

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.10

光纤网时间同步性能计量校准装置研制

林平卫¹, 齐苗苗², 宋振飞¹

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 2. 北京交通大学, 北京 100091)

摘要: 为解决光纤时间传递系统中存在的远距离传递准确度低的问题, 分析了环回法、双纤双向时间同步、双向波分复用、双向时分复用四种主流的高精度光纤时间传递方法的基本原理和技术特点, 在此基础上研制了单信道时频传递装置。该装置采用电学相位补偿法实现频率传递同步, 采用环回法与时分复用相结合的方法实现时间传递同步; 使用 1 秒脉冲 (Pulse Per Second, PPS) 和 100 MHz 共同标记时刻信号, 其中 1 PPS 作为时刻粗标记, 100 MHz 作为时刻细标记, 实现高精度时间同步。经实验证明, 单信道时频传递装置的不确定度约为 13 ps, 能够满足现有光纤时频同步网计量校准的要求。该装置在多级时间传递同步、光纤时频同步网计量校准等领域中具有广阔的应用前景, 为建设高稳定性、高可靠性和高精度的授时体系提供了重要技术支撑。

关键词: 计量学; 时间同步; 频率同步; 时分复用; 光纤网络; 校准

中图分类号: TB929.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795(2023)02-0082-09

Development of time synchronization performance measurement and calibration device for optical fiber network

LIN Pingwei¹, QI Miaomiao², SONG Zhenfei¹

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to solve the problem of low accuracy of long-distance transmission in fiber optic time transfer system, the basic principles and technical characteristics of four mainstream high-precision fiber optic time transfer methods, namely round-trip, dual-fiber bidirectional time synchronization, bidirectional wavelength division multiplexing and bidirectional time division multiplexing, were analyzed. Based on this, a single-channel time-frequency transmission device was developed. The device adopts the electrical phase compensation method to realize frequency transfer synchronization, and uses the round-trip method combined with bidirectional time division multiplexing to achieve time transfer synchronization. It uses 1 PPS and 100 MHz to jointly mark the time signal, with 1 PPS as the coarse time marker and 100 MHz as the fine time marker, to achieve high precision time synchronization. Experiments show that the uncertainty of the single-channel time-frequency transmission device is about 13 ps, which can meet the requirements of the existing fiber optic time-frequency synchronization network metrology calibration. The device has broad application prospects in the fields such as cascaded time transfer synchronization and fiber optic time-frequency synchronization network metrology calibration. It provides an important technical support for the construction of high stability, high reliability and high precision time service system.

Key words: metrology; time synchronization; frequency synchronization; time division multiplexing; optical fiber network; calibration

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-04-08

引用格式: 林平卫, 齐苗苗, 宋振飞. 光纤网时间同步性能计量校准装置研制[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 82-90.

Citation: LIN P W, QI M M, SONG Z F. Development of time synchronization performance measurement and calibration device for optical fiber network[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2):82-90.



0 引言

时间频率服务是国家的基本技术支撑,而高精度时间频率传递与同步是其主要的部分。伴随着原子钟技术的快速发展,时间频率传递同步手段也因为通信技术的快速发展而不断进步,精度不断提高^[1-2]。光纤具有低损耗、高精度、高稳定性以及高可靠性等优点,逐渐发展成为一种新型的时频传递介质^[3]。现有的光纤时频传输技术主要包括光纤光频传递、基于飞秒光纤光学频率梳的光纤时频传递以及光纤微波时频传递三种,其中光纤光频传递能够满足高精度光钟的频率传递需求,是三者中精度最高的时频传递技术,但由于需要使用光频段信号,实际操作较为困难;基于飞秒光纤光学频率梳的光纤时频传递技术目前处于实验测试阶段;光纤微波时频传递技术发展时间最长、应用范围最广,其传递精度完全可以满足现有微波原子频标信号的传递需求^[4]。

近年来,国内外科研人员在光纤微波时频传递方面开展了大量的研究工作,并取得了突破性进展^[5-11],其中光纤频率传递技术研究相对成熟。在光纤时间传递技术方面,根据不同的传输网络,光纤时间传递技术可分为基于同步数字技术(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)的传输方案和基于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)的全光链路的传输方案^[12]。由于SDH技术精度比较低,本文不重点讨论,而是主要讨论基于WDM的高精度光纤时间传输方案。2010年,捷克教育科研网Smotlacha等人^[13]基于WDM方案,通过将1 PPS信号调制到250 MHz正弦波载波信号进行时间信号传输,利用744 km的光纤实现了稳定度为8.7 ps@500 s的时间传输实验。2015年,法国激光物理实验室Lopez等人^[14]通过伪随机码将1 PPS时间信号调制到70 MHz的射频载波上,在540 km的光纤链路中进行时间信号传输,实验结果的秒稳定度和天稳定度约为10 ps,精度优于250 ps。2016年,波兰AGH理工大学Krehlik等人^[15]将1 PPS调制到10 MHz和100 MHz方波信号,制作专用可调延时线进行时延补偿,基于环回法在615 km的光纤中进行时间传递实验,稳定度达到300 fs@1 s和3 ps@10⁵ s,精度优于50 ps。

2016年,吴龟灵等人^[16]采用双向时分复用技术进行了同纤同波长传输实验,在实验室模拟的2000 km超长距离光纤链路上,实现了时间传递稳定度优于89 ps@1 s和23 ps@10⁵ s的高精度双向传输。2020年,中国科学院上海光机所^[17]在110 km长的实验室光纤链路上实现了稳定度为16 ps@1 s和0.91 ps@10⁴ s的时间传递。

时间同步技术的原理为:通过传输媒介将标准时间信号从源头的一端传输到终点另一端,通过时间比对的方式消除钟源间的系统偏差,进而为远端用户提供标准时间信号^[18]。基于WDM的光纤时间传输方案中,目前主流的方案有环回法(Round-trip)、双纤双向时间同步、双向WDM传输、双向时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)传输四种。本文重点比较四种高精度光纤时间传递方法的基本原理和技术特点,针对目前时间传递方案中存在的不足,研制了单信道时频传递装置,阐述该装置的工作原理,介绍其核心模块的结构及性能,分析系统的不确定度来源,并探讨未来在光纤时频同步网计量校准中的应用前景。

1 时间同步基本原理

1.1 环回法

环回法^[19-20]将高精度时钟A设在主站处,通过时间间隔计数器(Time Interval Counter, TIC)测量并计算主站到从站再到主站的往返总时延,取往返总延时的一半作为主站到从站间的单程时延,通过补偿从站时钟以达到主、从站的时间同步。环回法是实现主站与从站间时间传递较为常用的方法。其原理图如图1所示。

环回法计算主站到从站的时延时,默认往返链路的时延是对称的。但在工程应用中,由于往返信号波长不同导致传输时间不同、主从设备之间存在误差等原因,实际往返链路时延是不完全对称的。当往返波长间隔较大时,随着光纤长度的增加,系统相对误差会逐渐累计。因此环回法性能受限于长距离传输^[12]。

1.2 双纤双向时间同步

双纤双向时间同步技术^[21]原理图如图2所示,在主站和从站分别放置一个高精度时钟,使用两

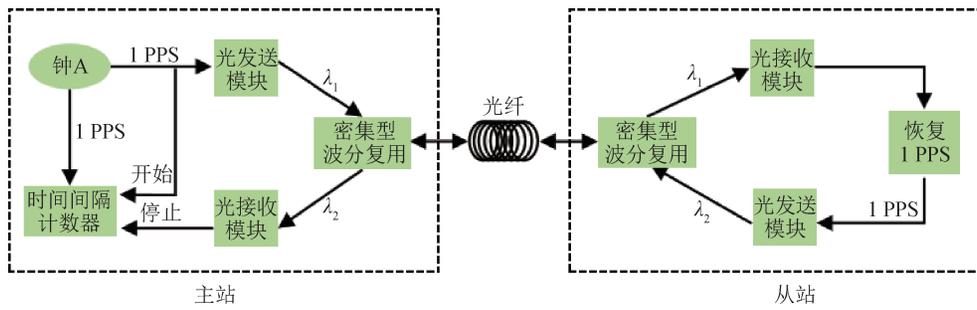


图1 环回法原理图

Fig.1 Principle block diagram of round-trip method

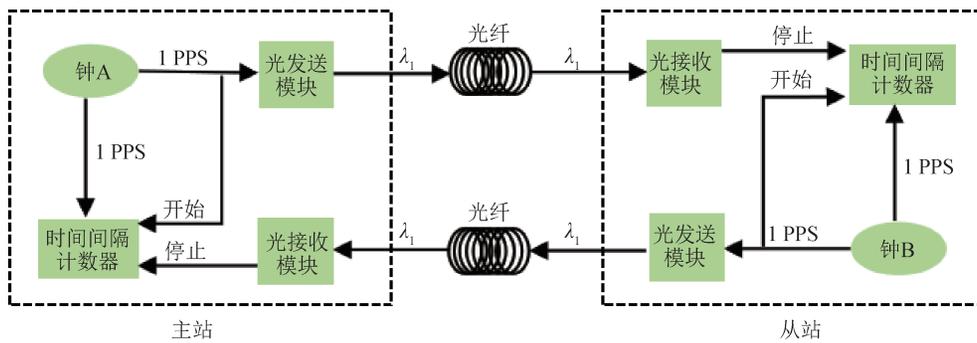


图2 双纤双向时间同步原理图

Fig.2 Schematic of dual-fiber bidirectional time synchronization technology

根相同长度的光纤将两个站点进行连接，主站和从站分别使用其中一根光纤以相同波长向对方发送时间信号，并接收来自对方的时间信号。通过时间间隔计数器计算两根光纤链路的传输时延差，计算并补偿主、从钟差，从而实现两地的精准时间同步。

双纤双向时间同步技术采用相同波长信号往返于两根独立的光纤链路，避免了因波长不同导致的色散时延不对称，但是很难保证两条光纤的物理长度完全相等，因此会导致系统时延误差。

1.3 双向WDM技术

双向WDM时间同步技术^[22]的原理如图3所示，在主站和从站分别放置一个高精度时钟，主

站向从站发送波长为 λ_1 的时间信号，时间间隔计数器1开始计时；同时，从站向主站发送波长为 λ_2 的时间信号，时间间隔计数器2开始计时。当时间间隔计数器1接收到从站传来的信号时停止计时，当时间间隔计数器2接收到主站传来的信号时停止计时。根据两个时间间隔计数器的计数值计算出两地钟差，对从站进行时延补偿，实现主从时间同步。

双向WDM时间同步技术物理链路绝对对称，但因往返信号波长不同存在色散效应，使得双向时延不对称，且不对称性会随着光纤长度的增加而增大。

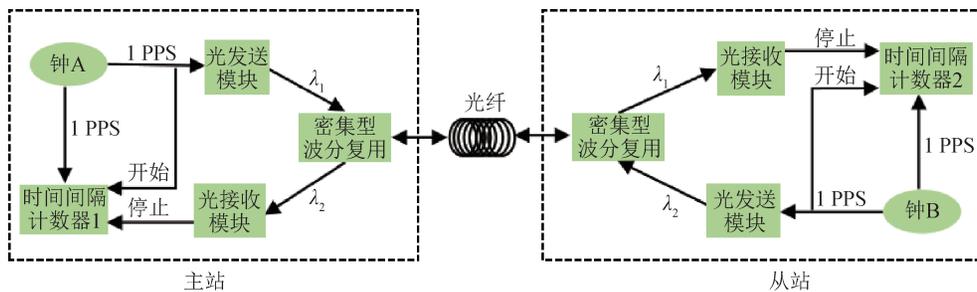


图3 双向波分复用时间同步原理图

Fig.3 Principle diagram of time synchronization for bidirectional WDM

1.4 双向TDM技术

不同于双向WDM技术，双向TDM技术^[23]使用相同波长的光信号在单根光纤链路中进行时间信号传输，此时光纤链路完全对称，避免了色散效应引起的链路双向不对称，传输精度相对WDM更高。其原理如图4所示。

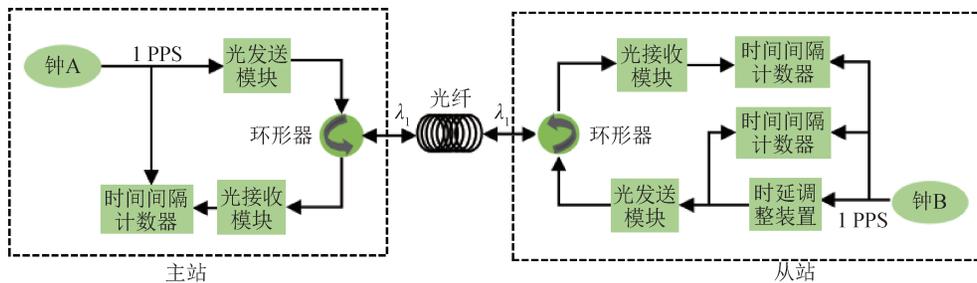


图4 双向时分复用时间同步原理图

Fig.4 Principle diagram of time synchronization for bidirectional TDM

以上4种光纤时间同步技术中，环回法和双向WDM技术因往返信号波长不同，长距离时间传递准确度难以提高，而双纤双向时间同步技术和双向TDM技术虽然不存在色散时延不对称的问题，但在系统结构方面，主站和从站都需要一个时钟，并且双纤双向技术还需要另加一条光纤链路，硬件结构较为复杂。

针对以上问题，本实验室在2019年提出一种新颖的时刻表征方法^[24]，经过近3年的技术攻关，2021年在此基础上，基于环回法和时分复用相结合的方式成功研制单信道时频传递装置^[25]，该装置实现了时间频率的同时传递，且在长距离时间传递不确定度指标方面有明显优势。

2 单信道时频传递装置

2.1 同步原理

单信道时频传递装置同步原理如图5所示，原

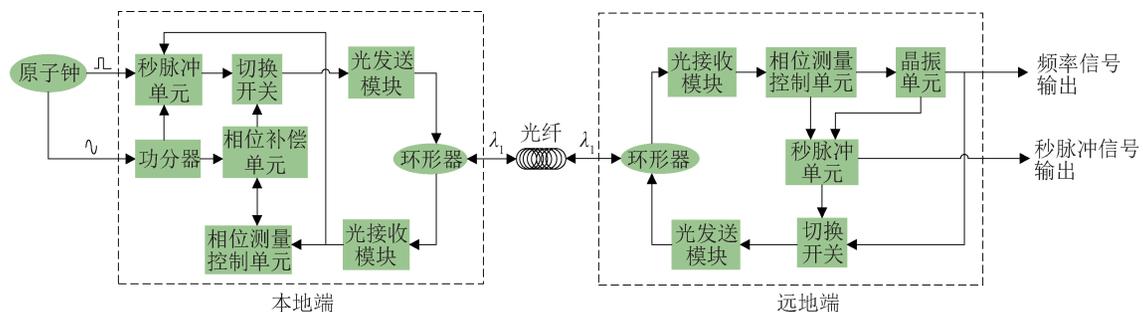


图5 单信道时频传递装置同步原理

Fig.5 Synchronization principle of single channel time-frequency transmission device

为了避免光波冲突，主站和从站交替地向光纤链路传输相同波长的光信号，在从站处加入时延调整装置，从站在发送信号前先进行时延调整，从而保证在任意时刻光纤链路中只有单路光信号。根据时间间隔计数器的计数值计算钟差，以某一端时钟为基准调整另一端时钟，最终实现时间同步。

子钟输出的标准100 MHz信号和秒脉冲信号输入到本地端装置，对于频率传递同步，采用电学相位补偿法，在本地端提前补偿光纤链路相位变化，实现本地端和远地端的正弦波相位一致；对于时间传递同步，采用环回法与时分复用相结合的方法，在本地端提前补偿光纤链路时延实现时间信号的粗同步，同时获得粗同步秒脉冲信号；最后在频率同步基础上，远地端在接收的正弦波信号过零点处生成一系列脉冲信号，找出与粗同步秒脉冲信号最接近的信号作为远地端标准秒脉冲信号，实现两地时刻精准同步。正弦波相位同步精度比秒脉冲同步精度高2个数量级以上，因此秒脉冲经远距离多级传递后同步性能基本不变。

2.2 关键技术——时刻表征

现有技术通常使用秒脉冲信号的上升沿来表示时刻，由于脉冲信号的上升沿有一定的宽度，且脉冲信号容易失真、畸变，会影响秒脉冲传递

的准确度和短期稳定度。本文使用正弦波信号和秒脉冲信号共同标记时刻信号，其中秒脉冲信号用于时刻粗标记，正弦波信号相位用于时刻精细标记。时刻表征过程如图6所示。

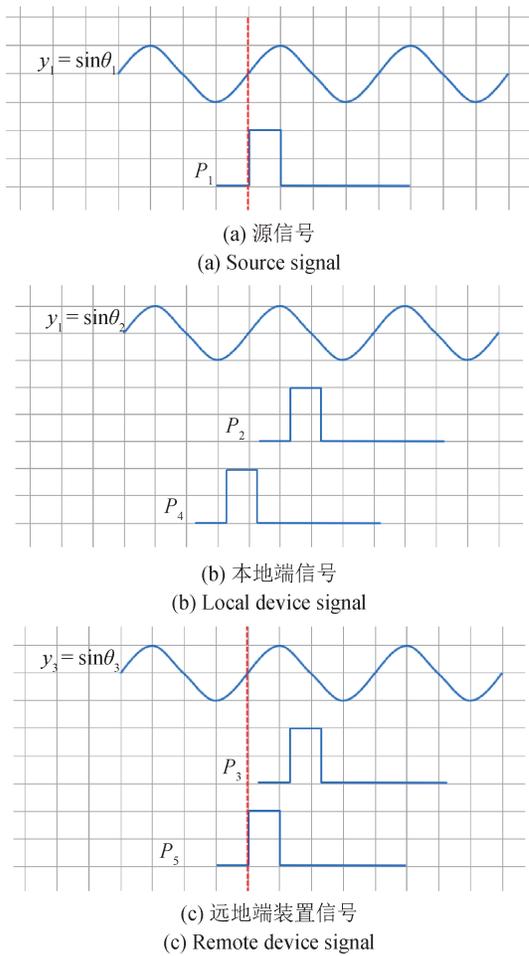


图6 时刻表征过程图

Fig.6 Time representation process diagram

源信号中正弦波信号相位和秒脉冲信号保持固定对齐关系，即正弦波信号 y_1 的过零点和秒脉冲信号 P_1 的上升沿对齐。

正弦波信号 y_1 输入本地端，经过相位调整后信号 y_2 向远地端发送，远地端将接收到的正弦波信号 y_3 并发送回本地端，本地端测量出本地端发送的相位调整后的正弦波信号 y_2 与收到的正弦波信号的相位差，扣除远地端和本地端接收与发送的固定时延后，计算出链路单程时延，调整本地端正弦波信号的相位，实现远地端与本地端输入正弦波相位一致。

秒脉冲信号 P_1 输入本地端，经过时延调整后

信号 P_2 向远地端发送，远地端接收到秒脉冲信号 P_3 后向本地端回送秒脉冲信号，本地端收到远地端发回的秒脉冲信号 P_4 后，测量出秒脉冲信号发送 P_2 到接收 P_4 的时延，扣除远地端和本地端的发送和接收的固定时延后，得出链路中信号单次传输时延，调整本地端的发送秒脉冲信号时延，实现远地端与本地端秒脉冲初步同步。

在实现远地端与本地端正弦波相位一致及秒脉冲初步同步的基础上，远地端接收的秒脉冲信号 P_3 作为初步同步信号，利用远地端接收的正弦波信号 y_3 的过零点作为秒脉冲信号的上升沿，生成多个秒脉冲信号，筛选出与初步同步信号 P_3 最接近的秒脉冲信号 P_5 ，作为远地端的标准秒脉冲信号，实现远地端与本地端的时刻同步。

3 样机展示

3.1 本地端装置

本地端装置机箱前面板分为接口区和液晶显示屏两部分。其中接口区包含2个100 MHz正弦波信号输入接口、2个秒脉冲信号输入接口、1个100 MHz正弦波信号监测接口、1个FC/APC光纤接口以及2个SMA状态输入接口。本地端装置由秒脉冲单元、相位补偿单元、切换开关、光收发模块以及相位测量控制单元等部分组成，如图7所示。输入信号为原子钟输出的标准100 MHz信号和秒脉冲信号，通过光纤和远地端装置进行信号传输。

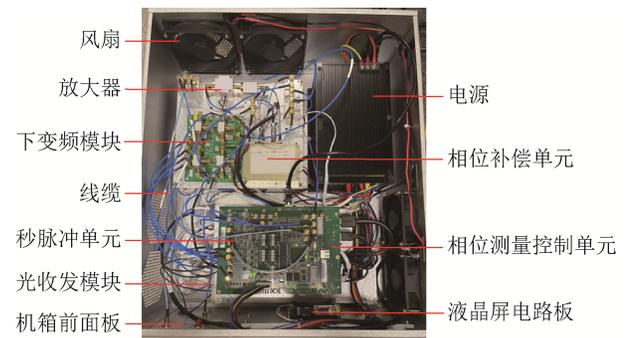


图7 本地端装置机箱内部图

Fig.7 Internal diagram of local terminal

3.2 远地端装置

远地端装置机箱前面板分为接口区和液晶显示屏。接口区包括4个100 MHz正弦波信号输出接口、4个秒脉冲信号输出接口、1个FC/APC光纤接

口、2个SMA状态输出口和一个装置工作状态指示灯。标准220V三线电源接头、RJ45网口和开关都在近地端装置和远地端装置的背面板。远地端装置由光收发模块、相位测量控制单元、切换开关、秒脉冲单元、变频移相模块以及晶振单元等部分组成，如图8所示。同步完成后输出的100MHz信号和秒脉冲信号供用户使用。

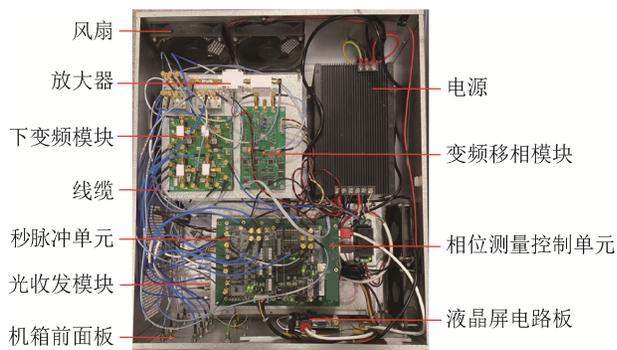


图8 远地端装置机箱内部图
Fig.8 Internal diagram of remote terminal

单信道时频传递装置中光收发模块调制带宽和探测器响应带宽均为10GHz（经测试10GHz带宽的调制器和探测器相较百MHz带宽的调制器和探测器延迟更小、性能更优），光纤双向放大器（Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA）增益大于30dB@-35dBm；相位测量控制模块测量精度优于1ps；切换开关切换时间为20ns左右；晶振单元输出100MHz信号幅度约为10dBm，秒稳定度优于 3×10^{-13} 。

3.3 频率稳定度/时差(相位)测量装置

为测量光纤时频传递系统的同步性能，2018年自制了频率稳定度/时差（相位）测量装置，主要由放大器、功分器、下变频模块、相位测量控制单元等部分组成，如图9所示，频率测量能力秒稳定度约为 2×10^{-13} ，相位分辨力达到0.2~0.3ps，长期稳定性优于1ps。

待测的100MHz信号接入时差测量装置的通道，先经过下变频模块，然后通过AD采集经下变频后的低频信号，比对任意两个通道的数据，计算得到各个通道之间的时差变化、频差变化以及频率稳定度曲线。图10为时差测量装置原理流程图。实验中通常将本地端输入的100MHz信号和远地端输出的100MHz信号分别接入时差测量装置的

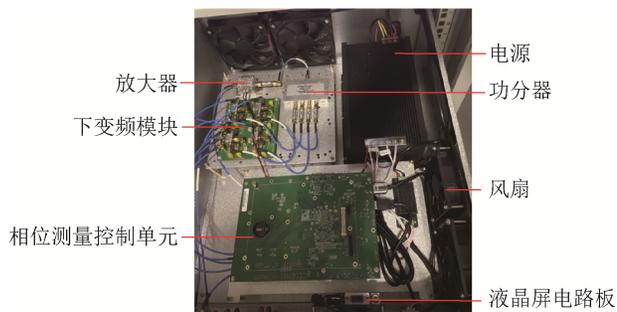


图9 时差测量装置
Fig.9 Time difference measurement device

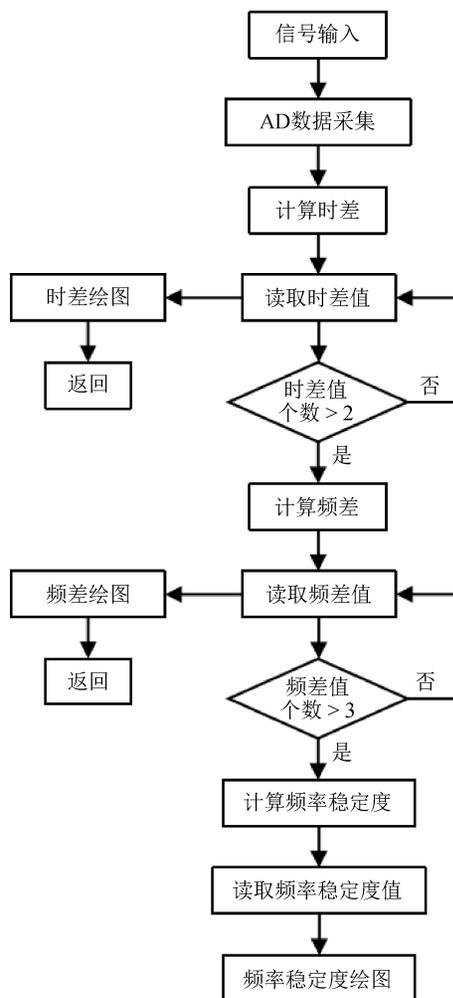


图10 时差测量装置原理流程图
Fig.10 Schematic flowchart of time difference measurement device

两个通道进行测量，可以得到时差结果（包括秒时差、十秒时差、百秒时差、千秒时差、万秒时差、天时差）、频差结果（秒频差、十秒频差、百秒频差、千秒频差、万秒频差和天频差）和频率稳定度。

4 系统不确定度分析

在单信道时频传递系统的实验测试中, 不确定度主要来源于单信道时频装置不确定度、时差测量仪不确定度、EDFA不确定度、Sagnac效应以及光纤偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)效应引起的不确定度。单信道时频装置经过超24 h的测量, 得到不确定度 u_1 约为13 ps; 时差测量仪不确定度 u_2 约为1 ps。

实验中光纤长度为100 km, 为补偿链路损耗, 使用EDFA进行信号放大, 该元器件的不对称性会引入系统不对称时延。在恒温实验室, 将EDFA按照不同方向接入光纤链路, 测得不确定度 u_3 为1 ps。

Sagnac效应是指: 由地球自转引起的信号传播路径变化导致双向传输时延不同^[26]。本文中同步系统所使用的光纤为盘纤, 整个光纤链路在地球上可视为一个点, 因此Sagnac效应引起的不确定度 u_4 可忽略不计。

PMD效应是指: 光信号能量的两个正交偏振因双折射度不同导致传播速率不同、偏振发生旋转, 产生时延差, 该值的大小与光纤长度紧密相关^[27]。本系统光纤链路长度为100 km, PMD效应引起的不确定度 u_5 为0.6 ps^[21]。

系统合成标准不确定度 u 为

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} \quad (1)$$

单信道时频传递系统不确定度如表1所示。

2017年, 中国科学院国家授时中心^[28]采用双向WDM时间比对的方法, 应用远程端设备后置补偿和级联, 实现高精度的时间同步, 在248 km的实地商用光纤中进行实验, 得到时间同步不确定度

表1 单信道时频传递系统不确定度

Tab.1 Uncertainty of single-channel time-frequency transmission system

不确定度来源	不确定度/ps	不确定度类型
单信道时频装置	13	A&B
时差测量仪	1	A
EDFA	1	A
Sagnac效应	0	B
PMD效应	0.6	B
合成不确定度	13.09	A&B

为100 ps; 之后采用环回法和双向TDM相结合的方法, 利用112 km实地光纤展开时间同步实验^[29], 得到不高于100 ps的时间同步不确定度; 2019年, 北京无线电计量测试研究所^[21]采用双向WDM技术在100 km光纤中进行测试, 测量结果的合成标准不确定度约为34.17 ps, 相比之下, 单信道时频传递装置在远距离传递准确度方面具有明显优势。

5 应用前景探讨

近年来, 国内外光纤通信发展迅猛, 被广泛用于构建各国通信网络, 我国建成的光纤主干网络已经覆盖全国所有省会城市和70%以上县市^[21], 为国民生活、国防、金融等领域提供授时服务。随着各行各业对时间同步精度要求的提高, 预计未来会建设更多的光纤时频同步网。

在点对点时间传递同步时, 传统的直接脉冲同步实现的秒脉冲同步精度还在可接受的范围内, 而经多级类似的点对点时间传递同步后, 秒脉冲同步精度则会降低。而先同步正弦波相位再生成秒脉冲的时间传递同步方法, 因每级传递同步正弦波相位的精度远远高于秒脉冲的传递同步精度, 经多级点对点的传递同步, 秒脉冲同步精度基本没有变化。光纤时频同步网中大量存在时间多级传递同步的情况, 因此, 先同步正弦波相位再生成秒脉冲的时间传递同步方法有很大的优势。

本文所研制的单信道光纤时频传递装置因其时间同步精度高以及在多级时间传递同步中的优势, 可作为光纤时频同步网中高精度时间传递同步设备使用, 也可以作为光纤时频同步网中任意两节点间时间传递同步性能的计量测试校准装置使用, 满足各行业的高精度时间同步要求。

假设存在如图11所示的局域光纤网, 光纤链路包含西安、郑州、合肥、南京、上海、杭州、福州、南昌、武汉、长沙共10个节点, 若想要实现任意两节点间(例如: 郑州-武汉或西安-长沙)时间同步性能的计量测试校准, 只需要将单信道时频测量装置放在两地, 中间使用光纤和光放大器进行连接。

两节点之间通过光纤链路进行连接, 为保证在不影响时频同步网正常运行的情况下实现计量校准, 需留出一个专门信道用于时间传递同步性



图 11 假设现存局域光纤网

Fig.11 Assume the existing local optical network

能测试校准。校准过程比较简单，在远地端将校准装置输出时间与时频网时频装置输出时间用时间间隔测量仪进行测量比对，得出时间差，再用这个差值进行修正即可。校准关键节点时间同步性能，可以提高整个光纤网的时频同步精度。

6 总结

重点比较了四种主流的高精度光纤时间传递方法的基本原理和技术特点，针对目前光纤时间同步技术存在的远距离传递准确度低等问题，提出了单信道时频传递技术并研制了相应装置，不仅提高了远距离传输时间同步精度和稳定度，同时实现了时间和频率的同时传递。单信道时频传递装置还可以作为光纤时频同步网中任意两节点间时间传递同步性能的计量测试校准装置使用，提高节点以及整个光纤网的时间同步精度，对实现安全、稳定、高效的地基授时体系建设具有重要意义。

参考文献

- [1] 王力军. 超高精度时间频率同步及其应用[J]. 物理, 2014, 43 (6): 360-363.
WANG L J. Ultra-high precision time and frequency synchronization and its application [J]. Physical, 2014, 43 (6): 360-363. (in Chinese)
- [2] 刘杰, 高静, 许冠军, 等. 基于光纤的光学频率传递研究[J]. 物理学报, 2015, 64 (12).
LIU J, GAO J, XU G J, et al. Research on optical frequency transmission based on fiber [J]. Journal of Physics, 2015, 64(12). (in Chinese)
- [3] 瞿海燕, 潘惠玲, 刘芙蓉, 等. 光纤时间频率传递研究发展态势的文献计量分析[J]. 科学观察, 2017, 12 (3): 24-32.
ZHAI H Y, PAN H L, LIU F R, et al. Bibliometric analysis of the development trend of optical fiber time - frequency transmission [J]. Scientific Observation, 2017, 12 (3): 24-32. (in Chinese)
- [4] 张安旭. 基于光纤的稳相传输技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
ZHANG A X. Research on optical fiber - based stable phase transmission technology [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015. (in Chinese)
- [5] 李忠文, 李高峰, 王科, 等. 2000 km 超长距超精密时间频率量值传递技术研究[J]. 计测技术, 2016, 36 (S1): 201-203.
LI Z W, LI G F, WANG K, et al. Research on the transmission technology of 2000 km ultra - long distance ultra precision time frequency values [J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36 (S1): 201-203. (in Chinese)
- [6] 胡珍源, 岳耀笠, 张颜艳, 等. 一种基于3×3光纤耦合器的短距离光纤频率传递的噪声抑制方法[J]. 光子学报, 2023, 52 (1): 96-106.
HU Z Y, YUE Y L, ZHANG Y Y, et al. Noise suppression of frequency transfer on short-distance optical fiber link based on 3×3 fiber coupler [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1): 96-106. (in Chinese)
- [7] 白钰. 光纤时频网络化精密同步及航天测量应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.
BAI Y. Precision synchronization of fiber optic time - frequency network and its application in aerospace measurement [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [8] 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研究[J]. 中国激光, 2015, 42 (7).
CHENG N, CHEN W, LIU Q, et al. Research on time synchronization method in optical fiber time and frequency simultaneous transmission system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7). (in Chinese)
- [9] FUJIEDA M, KUMAGAI M, GOTOH T, et al. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1223-1228.
- [10] KUMAGAI M, FUJIEDA M, NAGANO S, et al. Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link [J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2949-2951.
- [11] WANG B, GAO C, Chen W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronization at the 5×10^{-19} accuracy level [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 556.
- [12] 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.

- JIANG S P. Research and analysis on the performance of high precision optical fiber time transfer link [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese)
- [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.
- [14] LOPEZ O, KÉFÉLIAN F, JIANG H F, et al. Frequency and time transfer for metrology and beyond using telecommunication network fibres [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 531-539.
- [15] 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.
- [16] WU G L, CHEN J P. Ultra-long distance high-precision optical fiber two-way time transfer [J]. *Science and Technology Review*, 2016, 34(16): 99-103.
- [17] WANG J L, YUE C L, XI Y L, et al. Fiber-optic joint time and frequency transfer with the same wavelength [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 208-211.
- [18] 朱玺. 光纤时间频率同步网络技术及应用 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
ZHU X. Fiber-based time and frequency synchronization Network and application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [19] IMLAOKA A, KIHARA M. Accurate time/frequency transfer method using bidirectional WDM transmission [J]. *IEEE transmission on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(2): 537-542.
- [20] 丁小玉, 张宝富, 卢麟, 等. 高精度时间信号的光纤传递 [J]. *激光与光电子进展*, 2010, 47.
DING X Y, ZHANG B F, LU L, et al. High precision time transfer with optical fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47. (in Chinese)
- [21] 杨文哲, 王海峰, 张升康, 等. 光纤双向时间同步系统不确定度评定 [J]. *光通信技术*, 2019, 43 (6): 30-33.
YANG W Z, WANG H F, ZHANG S K, et al. Uncertainty evaluation of fiber optic bidirectional time synchronization system [J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(6): 30-33. (in Chinese)
- [22] LOPES C, RIONDET B. Ultra precise time dissemination system [C]// Frequency & Time Forum, & the IEEE International Frequency Control Symposium, Joint Meeting of the European, IEEE Xplore, 1999: 296-299.
- [23] 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): 105-111.
- HUANG H, WU G L, HU L, et al. Influence of temperature on the precision of bidirectional TDM based fiber-optic time transfer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 105-111. (in Chinese)
- [24] 林平卫. 时刻信号精确表征和传递方法: CN 201910318690. 8 [P]. 2019-08-23.
LIN P W. Accurate representation and transmission method of time signals: CN 201910318690. 8 [P]. 2019-08-23. (in Chinese)
- [25] 林平卫. 单信道时间频率高精度传递装置: CN 201910318706. 5 [P]. 2020-08-27.
LIN P W. Single channel time frequency high-precision transmission device: CN 201910318706. 5 [P]. 2020-08-27. (in Chinese)
- [26] TEISSEYRE R, MAJEWSKI E, TAKEO M. Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [27] 宋家麟. 光纤传输系统中的 PMD 效应及其补偿分析 [J]. *通信电源技术*, 2019, 36 (11): 161-164.
SONG J L. PMD effect and compensation analysis in fiber optic transmission systems [J]. *Telecom Power Technologies*, 2019, 36(11): 161-164. (in Chinese)
- [28] 陈法喜, 赵侃, 刘涛, 等. 光纤时间传递工程应用研究: 第八届中国卫星导航学术年会论文集 [C]. 上海, 2017.
CHEN F X, ZHAO K, LIU T, et al. Research on the application of fiber optic time transfer engineering: proceedings of the 8th China satellite navigation academic annual conference [C]. Shanghai, 2017. (in Chinese)
- [29] 周旭, 陈法喜. 国家授时中心 112 km 光纤时间传递工程: 第八届中国卫星导航学术年会论文集 [C]. 上海, 2017.
ZHOU X, CHEN F X. National time service center 112 km fiber optic time transmission project: proceedings of the 8th China satellite navigation academic annual conference [C]. Shanghai, 2017. (in Chinese)

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 林平卫 (1966-), 男, 研究员, 主要研究方向为冷原子喷泉守时钟、光纤高精度时间频率传递及组网技术、芯片级原子钟等。