

高精度光纤时间频率一体化传递

杨文哲^{①②③} 杨宏雷^{①②③} 王学运^{①②③} 张升康^{*①②③}
赵环^{①②③} 杨军^{①②③} 冯克明^③

^①(北京无线电计量测试研究所 北京 100854)

^②(计量与校准技术国家重点实验室 北京 100854)

^③(中国航天科工集团第二研究院 北京 100854)

摘要: 为满足各工程应用领域对于高精度时间频率同步的需求,降低系统复杂度,保障大规模光纤时频传递网络的顺利建设,该文提出基于伪码调制技术的光纤时间频率一体化传递方法,设计并搭建了光纤时间频率一体化传递系统,完成了光纤单向和双向时频一体化传递。在单向时频传递试验中,分析了温度变化对于系统传输时延的影响;在双向时频传递试验中,实现了时间频率的高精度传递,系统附加时间传递抖动为0.28 ps/s, 0.82 ps/1000 s,附加频率传递不稳定性为 $4.94 \times 10^{-13}/s$, $6.39 \times 10^{-17}/40000 s$ 。试验结果表明,该方法实现了时间、频率一体化高精度同步,且系统附加时间传递抖动优于目前各光纤时间同步方案。

关键词: 光纤; 时间传递; 频率传递; 伪码调制

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)07-1579-08

DOI: 10.11999/JEIT180807

High Precision Time and Frequency Integration Transfer via Optical Fiber

YANG Wenzhe^{①②③} YANG Honglei^{①②③} WANG Xueyun^{①②③}
ZHANG Shengkang^{①②③} ZHAO Huan^{①②③} YANG Jun^{①②③} FENG Keming^③

^①(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

^②(Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100854, China)

^③(The Second Academy of China Aerospace, Beijing 100854, China)

Abstract: To satisfy the demand of the high precision time and frequency synchronization for engineering application, to reduce system complexity and ensure the construction of large-scale optical fiber network for time and frequency transmission, a method of high precision time and frequency integration transfer via optical fiber based on pseudo-code modulation is developed. The optical fiber time and frequency transfer system is designed and built. The unidirectional and bidirectional time and frequency transfer test via optical fiber are completed. In the unidirectional time-frequency transfer test, the influence of temperature change on the transmission delay of the system is analyzed. In the bidirectional time-frequency transfer test, the system additional time transfer jitter is 0.28 ps/s, 0.82 ps/1000 s, the additional frequency transfer instability is $4.94 \times 10^{-13}/s$, and $6.39 \times 10^{-17}/40000 s$. The results show that the proposed method achieves high precision time and frequency integration synchronization, and the system additional time transfer jitter is better than the current optical fiber time synchronization schemes.

Key words: Optical fiber; Time transfer; Frequency transfer; Pseudo-code modulation

1 引言

高精度的时间、频率同步是分布式联合测量控制的基础,在雷达探测、卫星导航^[1]、电子对抗等领域具有重要的应用,特别是针对低雷达散射截面

目标的探测,通过空间分布的多个雷达对目标进行观测和相参处理是提升探测距离和目标发现概率的重要途径,提升雷达站间时间、频率的同步精度,对于进一步提升雷达探测能力具有非常重要的意义^[2,3]。此外,在基础物理^[4]、地球科学^[5]、空间科学^[6]等科学领域,高精度时间、频率同步可为检验相对论、测量地球自转等提供支撑。

收稿日期: 2018-08-17; 改回日期: 2019-01-28; 网络出版: 2019-02-16

*通信作者: 张升康 Shengkang.zhang@hotmail.com

传统的精密时频同步主要有GNSS共视(Common View, CV)法、GNSS全视(All in View, AV)法和卫星双向时间频率传递方法(Two Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)。GNSS CV可以消除由于卫星轨道、钟差和大气层引起的共模误差,因而具有较高的测量精度,利用载波相位观测量进行时间比对的精度可以达到1.5 ns左右^[7,8]。GNSS AV对所有可视导航卫星进行观测,利用国际GNSS服务机构发布的精密卫星星历、钟差和电离层改正数据,大大提高测站钟差的测量精度,GNSS AV和CV法具有相近的时间频率测量精度,GNSS AV数据处理量较大,但测量不受基线影响,GNSS CV操作简单但站间基线不能太大。TWSTFT法是一种利用通信卫星作为传输通道的高精度远程时频比对方法。由于双方向信号传输路径相同,大部分路径误差能够相互抵消,其时间比对精度可以达到1 ns,而且具有抗干扰、高实时性等优势^[9,10]。

近年来,时频同步需求不断提升,利用更加稳定的光纤信道作为传输介质以提升时频同步的精度成为新的研究热点。目前,光纤时间频率传递方案主要分为3类:(1)光纤微波时间频率传递方案:原子钟产生的微波时间和频率标准信号或锁定到原子钟的微波信号,调制连续波光信号,在光纤中进行传输。(2)光纤光频传递方案:超稳激光器产生的光信号通过光纤直接传递光学频率标准。(3)基于飞秒光频梳的光纤时间频率传递方案:飞秒光学频率梳产生的脉冲光信号通过光纤直接传输,用户通过探测脉冲光信号的重复频率能够获得高稳定度的频率标准;通过测量脉冲光信号的脉冲宽度能够获得高精度的时间标准。光纤光频传递方案能够传递光学频率标准,频率稳定度非常高^[11,12],但如果需要传递时间标准,则需要结合其他两类技术;而基于飞秒光频梳的光纤时间频率传递方案仍然处于实验室理论验证阶段^[13-15],尤其是对于飞秒脉冲边沿的高精度探测技术需要各国专家学者进一步的研究和改进。光纤微波时间频率传递方案是3类技术中发展时间最长的,技术十分成熟,应用经验丰富。国内外诸多单位已经在实地商用光纤中完成了实验验证^[16-19],甚至还提出了级联式系统^[16,19]、用户端补偿技术^[20]、多点下载技术^[21]等方案来解决大规模组网时将会遇到的传输距离过长、授时中心站点设备冗余等问题。然而光纤微波时间频率传递方案仍然有不足之处。首先,由于频率信号呈正弦形式而时间信号呈脉冲形式,因此为保证线性调制,通常选用不同的调制电压偏置点,那么时间信号和频率

信号需要分别占用一个调制激光器。其次,波分复用技术使时间和频率信号所经历的传输时延并不相同,因此时间和频率信号的补偿系统就需要独立工作,造成整个系统的复杂。本文提出了一种基于扩频调制的光纤时间频率一体化传递方法,利用同时含有时间和频率信息的伪码调制信号对光信号进行调制,从而减少了系统激光器占用量,降低了系统复杂度;研制了光收发模块,搭建了100 km光纤时频一体化传递试验系统,完成了光纤单向、双向时频一体化传递。在单向时频传递试验中,分析了温度变化对于系统时延的影响。在双向时频传递实验中,实现了高精度的时频传递,系统时间传递附加抖动为0.28 ps/s, 0.82 ps/1000 s,系统附加频率传递稳定度为 $4.94 \times 10^{-13}/s$, $6.39 \times 10^{-17}/40000 s$ 。

2 光纤单向时频一体化传递

2.1 单向时频传递原理

光纤单向时间频率一体化传递原理如图1所示。基于本地时钟的1 pps和10 MHz标准信号,站点A产生二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)伪码调制信号。该信号经过光学强度调制后,发射进入光纤。站点B接收信号,经过光电解调、放大整形后,恢复出伪码调制信号。随后,站点B产生站点A对应伪码序列,与接收的伪码信号进行相关运算,利用伪码良好的自相关特性,重建信号中携带的信号发射时间戳。然后通过时间间隔计数器与B站时钟进行比较,得到钟差和传输时延之和,再利用锁相环跟踪信号相位,获得信号载波频率值。

2.2 单向时频传递系统设计

光纤单向时间频率一体化传递系统装置图如图2。为测量系统误差及噪声,采用两站同钟的形式进行100 km光纤单向时频传递试验。由同一氢原子钟为站点A和站点B提供1 pps和5 MHz参考信号。作为主站,站点A处的伪码调制模块产生BPSK伪码调制信号,并调制连续波激光器。光纤链路由

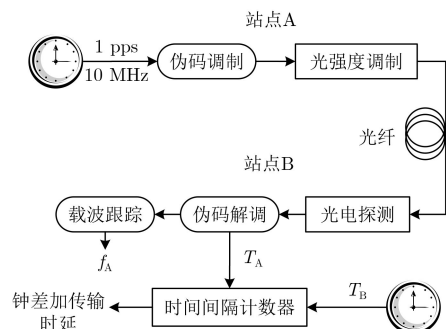


图1 光纤单向时间频率一体化传递原理图

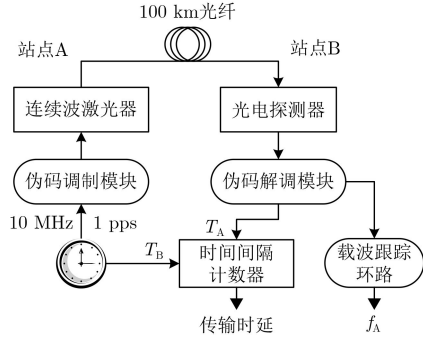


图2 光纤单向时间频率一体化传递系统装置图

2个50 km光纤盘、1个掺铒光纤放大器组成。2个光纤盘均为单模光纤，衰减系数为0.18 dB/km @ 1550 nm，串行连接构成100 km链路。掺铒光纤放大器工作在2个光纤盘之间，放大光信号，保证光电探测器接收到的功率足够大，能够顺利探测信号。作为从站，站点B处的光电探测器接收光信号，恢复出伪码调制信号，并输出给伪码解调模块。模块解调信号后，重建信号发射时间，并与本地时钟比较，得到系统传输时延；同时，载波跟踪环路跟踪信号相位。

2.3 实验数据及其温度影响分析

搭建上述实验系统，完成了持续3天的时频传递，系统时延变化范围较大，从494482~494467 ns，并发现其系统时延结果与环境温度之间存在线性关系，如图3所示。除儒略日58189.8处环境温度的短时间跳跃性变化以外，其他时间系统时延曲线与环境温度曲线变化趋势十分相似，经计算，系统时延与环境温度之间的线性相关系数高达0.988。环境温度的跳跃性变化可能是由于实验室人为因素引起的。总之，环境温度变化引起的光纤时延变化占据了系统时延变化的主导地位。根据采集数据，对光纤温度影响系数进行了推算。假设温度影响系数为 α ps/(°C·km)。温度变化曲线记为 $f_T(t)$ ，时延测量结果曲线记为 $f_D(t)$ ，由此可得

$$f(t) = f_D(t) - \alpha \times f_T(t) \times 100 \quad (1)$$

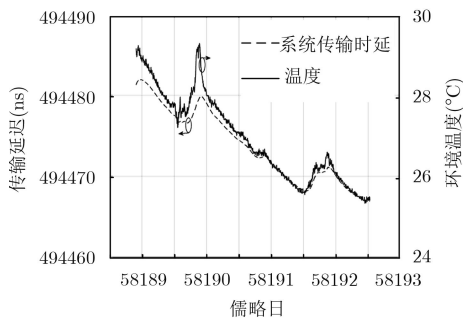


图3 时延测量结果与温度变化曲线

为便于后续计算，令 $f(t) = Z$, $f_D(t) = Y$, $f_T(t) = X$ ，根据最小二乘原理，则有

$$\begin{aligned} S(Z) &= \sum_{i=1}^N (Z(i) - E\{Z\})^2 \\ &= \sum_{i=1}^N [Y(i) - E\{Y\} - 100\alpha(X(i) - E\{X\})]^2 \\ &= \alpha^2 - \left[\sum_{i=1}^N (X(i) - E\{X\})(Y(i) - E\{Y\}) \right. \\ &\quad \left. / 50 \sum_{i=1}^N (X(i) - E\{X\})^2 \right] \alpha \\ &\quad + \left[\sum_{i=1}^N (Y(i) - E\{Y\})^2 \right. \\ &\quad \left. / 100^2 \sum_{i=1}^N (X(i) - E\{X\})^2 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

最终计算得到

$$\begin{aligned} \alpha &= \min_{\alpha} S(Z) \\ &= \sum_{i=1}^N (X(i) - E\{X\})(Y(i) - E\{Y\}) \\ &\quad / 100 \sum_{i=1}^N (X(i) - E\{X\})^2 \\ &= 42.7 \text{ ps}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}) \end{aligned} \quad (3)$$

目前对于SMF-28单模光纤的热效应并没有明确的结论。各光纤生产厂家也只提供笼统的参数作为参考。作为本文的参考，文献[22]中这一系数为37 ps/(°C·km)。本文计算的温度影响系数与上述结果基本相符，证明了其正确性，但略大于上述结果，可能是由于本文计算过程中包含了温度对于系统中其他设备的影响。

此外，系统频率传递稳定度结果如图4所示。

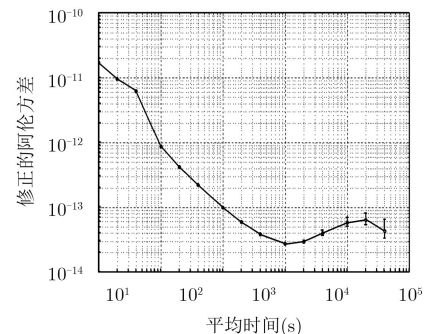


图4 单向传递系统频率传递稳定度曲线

系统频率传递稳定度为 $1.70 \times 10^{-11}/s$, $2.75 \times 10^{-14}/1000 s$, 以及 $4.30 \times 10^{-14}/40000 s$ 。由此可见, 没有补偿结构的单向频率传递系统的稳定度结果较差, 难以传递目前常用的一些高精度原子钟。因此, 对于需求高精度的长距离光纤时频传递系统来说, 单向传输系统的时延抖动和频率噪声是无法接受的。因此进一步研究光纤双向时频一体化传递方法, 建立补偿结构, 尝试消除系统时延抖动并抑制系统频率噪声。

3 光纤双向时频一体化传递

3.1 双向时频传递原理

光纤双向时间频率一体化传递技术原理如图5所示。其中, 时间传递原理是利用双方向链路时延相互抵消, 如图5(a)。将A, B两地钟差记为 ΔT , 通过光纤链路连接的A站和B站分别向对方发送信号, 同时接收来自对方的信号。将A站测量的发送信号时间与接收信号时间的差记为 T_A , B站测量的发送信号时间与接收信号时间的差记为 T_B 。

比对过程中信号流程如图5(b)。A站和B站同时向对方站点发出伪码调制信号, 信号中携带发射时刻时间戳, 设A站, B站发射时刻分别为 T_{A1} , T_{B1} 。随后, 伪码调制信号进行上变频, 转换为L波段信号, 设A站, B站的上变频时延分别为 τ_{A1} , τ_{B1} 。再后, L波段信号对激光强度进行调制, 使光信号携带时间信息, 设A站, B站光强度调制时延分别为 τ_{TXA} , τ_{TXB} 。调制后的激光信号经过光纤, 传输到对方站点, 设双方向光纤传输时延分别为 τ_{AB} 和 τ_{BA} 。激光信号经过光电探测后, 恢复出L波段信号, 设A站, B站的光电探测时延分别为 τ_{REA} , τ_{REB} 。随后, L波段信号进行下变频, 转换为伪码

调制信号, 设A站, B站的下变频时延分别为 τ_{A2} , τ_{B2} 。最终, 解调接收到的伪码调制信号, 恢复出发射时间戳, 设A站, B站接收时刻分别为 T_{A2} , T_{B2} 。因此结合图5, 站点A, B测量的时延为

$$T_A = \Delta T + (\tau_{A2} - \tau_{B1})$$

$$= \Delta T + \tau_{B1} + \tau_{TXB} + \tau_{BA} + \tau_{REA} + \tau_{A2} \quad (4)$$

$$T_B = -\Delta T + (\tau_{B2} - \tau_{A1})$$

$$= -\Delta T + \tau_{A1} + \tau_{TXA} + \tau_{AB} + \tau_{REB} + \tau_{B2} \quad (5)$$

式(4)、式(5)相减得

$$T_A - T_B = 2\Delta T + (\tau_{B1} - \tau_{A1} + \tau_{A2} - \tau_{B2})$$

$$+ (\tau_{TXB} - \tau_{TXA} + \tau_{REA} - \tau_{REB})$$

$$+ (\tau_{BA} - \tau_{AB}) \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} [T_A - T_B - (\tau_{B1} - \tau_{A1} + \tau_{A2} - \tau_{B2})$$

$$- (\tau_{TXB} - \tau_{TXA} + \tau_{REA} - \tau_{REB})$$

$$- (\tau_{BA} - \tau_{AB})] \quad (7)$$

A, B两站通过交换 T_A , T_B 的测量结果, 并预先测定调制、跟踪及上下变频时延 τ_{A1} , τ_{A2} , τ_{B1} , τ_{B2} 和强度调制及光电探测时延 τ_{TXA} , τ_{TXB} , τ_{REA} , τ_{REB} , 最终A, B两站能够计算得到两地钟差 ΔT , 完成时间同步。

而频率传递原理与时间同步原理相似, 利用双向传输频率噪声近似相等的原理对频率测量结果进行联合解算, 消除系统频率噪声, 从而实现频率传递, 具体过程如下。站点A, B的标准频率分别记为 f_A 和 f_B , 并假设两者之间相差 df , 为便于计算, 假设站点A为基准站, 频率为 f_0 , 于是有

$$\left. \begin{aligned} f_A &= f_0 \\ f_B &= f_0 + df \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

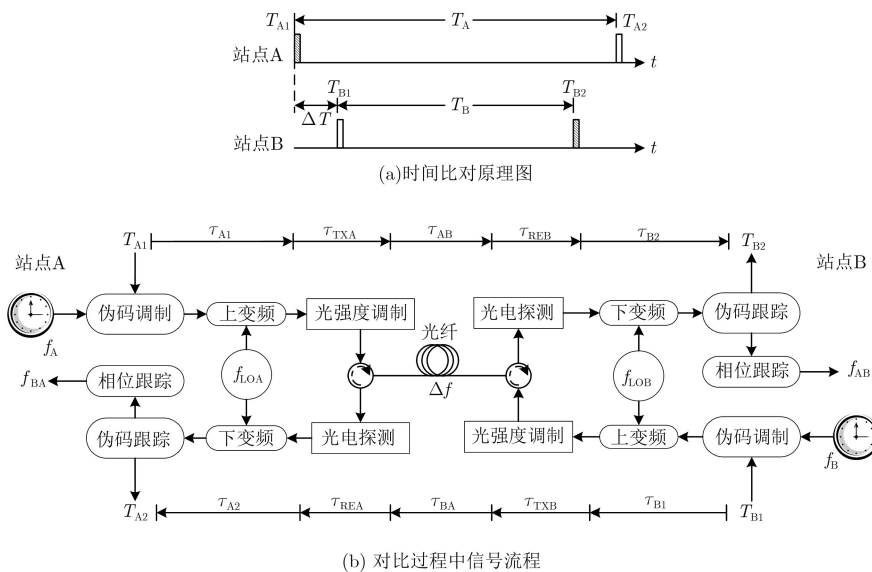


图5 光纤双向时间频率一体化同步原理图

以A站发射B站接收为例，站点A处双向调制解调器发射信号载波频率记为 f_{IF} ，站点A处变频器本地振荡频率记为 f_{LOA} 。因此，站点A发射电信号的载波频率

$$f_{TX} = f_{IF} + f_{LOA} \quad (9)$$

将光发射机、光接收机以及光纤链路引入频率噪声记为 Δf ，于是站点B处接收电信号的载波频率

$$f_{RE} = f_{TX} + \Delta f \quad (10)$$

然而，式(10)的结果是所有频率均以基准频率 f_0 为参考得到的，这是不合理的。站点A处的所有频率值以 f_A 为参考，而站点B处的频率值应以 f_B 为参考。于是根据不同参考下的频率测量值转换公式，式(10)应变为

$$f_{RE} = (f_{TX} + \Delta f) \left(\frac{f_A}{f_B} \right) \quad (11)$$

而站点B处变频器本地振荡频率记为 f_{LOB} ，最终站点B处双向调制解调器接收信号的载波频率值记为 f_{AB}

$$f_{AB} = f_{RE} - f_{LOB} = (f_{IF} + f_{LOA} + \Delta f) \cdot \left(\frac{f_0}{f_0 + df} \right) - f_{LOB} \quad (12)$$

同理，站点A接收到的载波频率值为

$$f_{BA} = (f_{IF} + f_{LOB}) \left(\frac{f_0 + df}{f_0} \right) + \Delta f - f_{LOA} \quad (13)$$

式(12)和式(13)中含有 f_{LOA} 、 f_{LOB} 、 df 、 Δf 4个未知数，当变频器使用外部参考时， f_{LOA} 和 f_{LOB} 视为已知量。因此，通过式(12)和式(13)能够解算未知数 df 和 Δf ，完成A、B两站点间的频率传递。

3.2 双向时频传递系统设计

高精度光纤双向时间频率一体化同步试验系统装置图如图6。同样采用两站同钟的形式进行100 km光纤双向时间频率一体化同步试验。系统

装置主要由双向调制解调器、光收发模块、变频器组成。

双向调制解调器采用德国TimeTech公司生产的SATRE Modem，用于完成伪码调制，伪码跟踪以及载波跟踪。参考本地时钟提供的1 pps和5 MHz参考信号，双向调制解调器能够产生载波频率在50~80 MHz、伪码速率为1, 2.5, 5, 10或20 MChip/s的中频伪码调制信号，调制方式为BPSK。伪码速率越高，信号比对的时间不确定度越低。不同站点的双向调制解调器选择不同的伪码码型进行调制，便于区分。

光收发模块采用自研设备，分为光发射部分和光接收部分，分别完成光强度调制和光电探测。光发射部分主要由多级放大器、连续波激光器构成。在光发射过程中，射频调制信号经过放大后，控制激光器腔壁，从而使激光器输出光的强度随调制信号强度的变化而变化。光接收部分主要由放大器、光电探测器构成。在光接收过程中，光信号经过光电探测器，恢复出射频电信号，再经过放大器后输出。

变频器采用Comtech公司生产的变频设备LBC-4000。LBC-4000能够同时完成信号的上变频和下变频。根据混频原理，LBC-4000将中频信号上变频为L波段信号；同时，将L波段信号下变频为中频信号。LBC-4000将双向调制解调器产生的10 MHz信号作为外部参考信号，保证整个电学系统的参考一致性。

在试验中，由同一氢原子钟为2台双向调制解调器提供1 pps和5 MHz参考信号。双向调制解调器选择20 MChip/s伪码速率，载波频率选择为70 MHz。双向调制解调器产生的伪码调制信号输出到变频器，上变频为1.75 GHz射频调制信号。光发射部分再将1.75 GHz信号调制为1550 nm波长的连续光信号，并输入到光纤链路中。光纤链路相比单向时频传递系统中的光纤链路多出2个环形器。环形器使双方向光信号能够经过同一段光纤传输，最大程度的保证双方向链路时延的一致性。在接收端，光接收部分探测光信号，恢复出1.75 GHz射频调制信号，并输出给变频器。变频器将该信号下变频为70 MHz信号，输出给双向调制解调器。计算机通过串口采集调制解调器数据，同时采集温湿度等环境数据。NTP服务器为2台双向调制解调器和计算机提供统一的时标。

3.3 结果分析及讨论

从北京时间2018年3月15日18时—2018年3月19日8时(MJD 58 192.91~58 196.52)，完成了持续86 h的时间频率一体化传递，时间同步结果如图7。

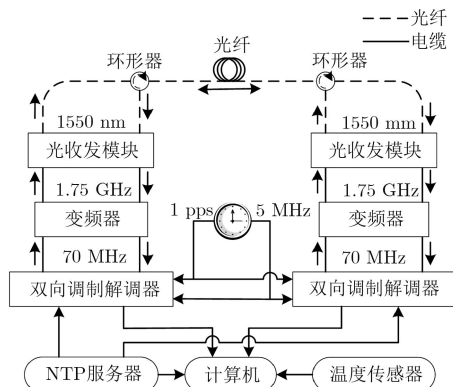


图6 光纤双向时间频率一体化同步试验系统装置图

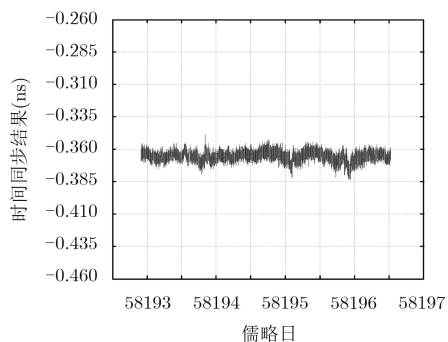


图7 光纤双向时间同步结果

在长达86 h的时间里, 时间比对结果变化峰峰值小于35 ps, 标准差即系统附加时间传递不确定度为3.6 ps。时间同步结果对应的系统附加时间传递抖动曲线如图8。抖动结果在初始位置最小, 约为0.28 ps/s, 随后在1~100 s之间逐渐变大, 达到1.55 ps/100 s, 而在100~40000 s之间抖动结果趋于平稳, 始终小于2 ps, 约为0.82 ps/1000 s, 1.19 ps/10000 s。

系统附加频率传递不稳定性结果如图9。图中曲线下降趋势稳定, 系统附加频率传递不稳定性为 $4.94 \times 10^{-13}/s$, $1.43 \times 10^{-15}/1000 s$, 以及 $6.39 \times 10^{-17}/40000 s$ 。相比单向系统的频率传递结果, 系统附加频率传递不稳定性改善了2~3个量级, 满足了常用原子钟频率信号的传递需求, 达到了国内外先进水平, 但相比国际顶尖水平仍略显不

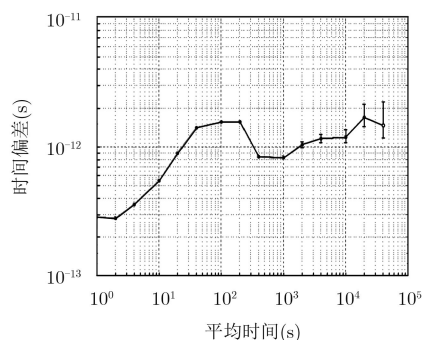


图8 光纤双向时间传递稳定度结果

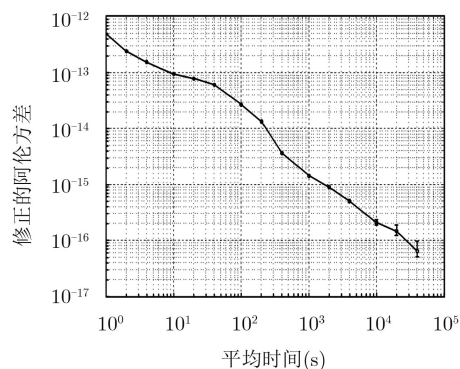


图9 光纤双向频率传递稳定度结果

足。而在100 s处, 稳定度曲线出现了一个异常的凸起, 可能是由于系统所采用的变频设备、锁相环路单元造成的。

表1比较了光纤双向时频一体化传递系统的实验结果和国际顶尖水平的同类时间频率传递系统的实验结果。能够看出, 光纤双向时频一体化传递系统的时间同步结果达到国际顶尖水平, 优于同类方案的时间同步结果; 而频率传递结果略低于国际顶尖结果, 仍然有待提高。此外, 将进一步研究利用载波相位同步结果提升光纤时间同步精度的方法。目前利用载波相位观测量提升传递精度的类似方法已经应用于GNSS导航定位、GNSS CV以及TWSTFT中, 均取得了良好的效果。因此, 利用载波相位测量值计算双向钟差结果预计会优于通过伪码跟踪方式得到的时间同步结果。

4 结束语

本文提出了基于伪码调制技术的光纤时间频率一体化传递方法, 研发了光收发模块, 搭建了100 km 光纤时间频率一体化传递系统。本文分析了温度变化对于系统单向传输时延的影响, 推算了光纤温度影响系数。实现了持续86 h的双向时频一体化传递, 系统时间同步结果变化峰峰值小于35 ps, 时间传递不确定度为3.6 ps, 对应的时间传递附加抖动为0.28 ps/s, 0.82 ps/1000 s; 附加频率传递不稳定性为 $4.94 \times 10^{-13}/s$, $6.39 \times 10^{-17}/40000 s$ 。本文的

表1 光纤双向传递实验结果与国际顶尖实验结果比对

方案	年份	传输距离(km)	时间同步稳定度结果		频率传递稳定度结果	
			秒稳定度(ps/s)	长期稳定度	秒稳定度(/s)	长期稳定度
文献[23]	2014	300	40	11 ps/86400 s	—	—
文献[20]	2015	120	30	0.7 ps/1000 s	—	—
文献[24]	2015	短光纤(米级)	0.3	20 fs/10000 s	—	—
文献[16]	2010	204	—	—	6×10^{-14}	$5 \times 10^{-17}/10^5 s$
文献[18]	2012	80	—	—	7×10^{-15}	$5 \times 10^{-19}/86400 s$
本文	2018	100	0.28	1.19 ps/10000 s	4.94×10^{-13}	$6.39 \times 10^{-17}/40000 s$

时间频率一体化同步方法可用于雷达探测、精确导航制导、空间探测等工程应用领域, 以及基础物理、地球科学、空间科学等科学研究领域。

参 考 文 献

- [1] HE Wei, LIAN Baowang, and YANG Qiong. Time synchronization system design and research in GPS/INS Integrated Navigation System on complex dynamic situation[C]. Proceedings of 2013 IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013), Xi'an, China, 2013: 1–5. doi: [10.1109/TENCON.2013.6718486](https://doi.org/10.1109/TENCON.2013.6718486).
- [2] 曾涛, 殷丕磊, 杨小鹏, 等. 分布式全相参雷达系统时间与相位同步方案研究[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 105–110. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20104](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20104).
ZENG Tao, YIN Pilei, YANG Xiaopeng, *et al.* Time and phase synchronization for distributed aperture coherent radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 105–110. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20104](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20104).
- [3] 方立军, 马骏, 柳勇, 等. 一种大型分布式阵列雷达频率与相位同步[J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(1): 85–88. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.015).
FANG Lijun, MA Jun, LIU Yong, *et al.* Frequency and phase coherence in large distributed digital array radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2017, 15(1): 85–88. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2017.01.015).
- [4] SCHILLER S, TINO G M, GILL P, *et al.* Einstein gravity explorer-a medium-class fundamental physics mission[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 23(2): 573–610. doi: [10.1007/s10686-008-9126-5](https://doi.org/10.1007/s10686-008-9126-5).
- [5] BONDARESCU R, BONDARESCU M, HETÉNYI G, *et al.* Geophysical applicability of atomic clocks: Direct continental geoid mapping[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(1): 78–82. doi: [10.1111/j.1365-246X.2012.05636.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05636.x).
- [6] CALHOUN M, HUANG S, and TJOELKER R L. Stable photonic links for frequency and time transfer in the deep-space network and antenna arrays[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(10): 1931–1946. doi: [10.1109/JPROC.2007.905048](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.905048).
- [7] LEWANDOWSKI W, AZOUBIB J, and KLEPCZYNSKI W J. GPS: Primary tool for time transfer[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1999, 87(1): 163–172. doi: [10.1109/5.736348](https://doi.org/10.1109/5.736348).
- [8] GUANG Wei, DONG Shaowu, WU Wenjun, *et al.* Progress of BeiDou time transfer at NTSC[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 175–187. doi: [10.1088/1681-7575/aaa673](https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaa673).
- [9] 王学运, 赵博, 张升康, 等. 卫星双向时间频率传递调制解调器研制进展[J]. 宇航计测技术, 2014, 34(5): 23–26. doi: [10.3969/j.issn.1000-7202.2014.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7202.2014.05.006).
WANG Xueyun, ZHAO Bo, ZHANG Shengkang, *et al.* The progress of BIRMM two-way satellite time and frequency transfer modem[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2014, 34(5): 23–26. doi: [10.3969/j.issn.1000-7202.2014.05.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7202.2014.05.006).
- [10] 王学运, 王海峰, 张升康, 等. 全新卫星双向时间比对调制解调器设计[J]. 电子学报, 2017, 45(10): 2555–2560. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.034).
WANG Xueyun, WANG Haifeng, ZHANG Shengkang, *et al.* Design of a new two-way satellite time and frequency transfer modem[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(10): 2555–2560. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2017.10.034).
- [11] DROSTE S, UDEM T, HÄNSCH T W, *et al.* Optical frequency transfer over a single-span 1840-km fiber link[C]. Proceedings of the 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Prague, Czech Republic, 2013: 1004–1006. doi: [10.1109/EFTF-IFC.2013.6702150](https://doi.org/10.1109/EFTF-IFC.2013.6702150).
- [12] 刘涛, 刘杰, 邓雪, 等. 光纤时间频率信号传递研究[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 207–215. doi: [10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0207-09](https://doi.org/10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0207-09).
LIU Tao, LIU Jie, DENG Xue, *et al.* Research on fiber-based time and frequency transfer[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2016, 39(3): 207–215. doi: [10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0207-09](https://doi.org/10.13875/j.issn.1674-0637.2016-03-0207-09).
- [13] MARRA G, SLAVIK R, MARGOLIS H S, *et al.* High-resolution microwave frequency transfer over an 86-km-long optical fiber network using a mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4): 511–513. doi: [10.1364/OL.36.000511](https://doi.org/10.1364/OL.36.000511).
- [14] LESSING M, MARGOLIS H S, BROWN C T A, *et al.* Frequency comb-based time transfer over a 159 km long installed fiber network[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22): 221101. doi: [10.1063/1.4984144](https://doi.org/10.1063/1.4984144).
- [15] KIM J, CHEN J, ZHANG Zhigang, *et al.* Long-term femtosecond timing link stabilization using a single-crystal balanced cross correlator[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1044–1046. doi: [10.1364/OL.32.001044](https://doi.org/10.1364/OL.32.001044).
- [16] FUJIEDA M, KUMAGAI M, and NAGANO S. Coherent microwave transfer over a 204-km telecom fiber link by a cascaded system[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(1): 168–174. doi: [10.1109/TUFFC.2010.1394](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1394).
- [17] 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(1): 3–6. doi: [10.1007/s00340-012-5241-0](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5241-0).
- [18] WANG Bo, GAO Cao, CHEN Weiliang, *et al.* Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 556. doi: [10.1038/srep00556](https://doi.org/10.1038/srep00556).

- [19] 刘琴, 韩圣龙, 王家亮, 等. 采用级联方式实现430 km高精度频率传递[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0906001. doi: [10.3788/CJL201643.0906001](https://doi.org/10.3788/CJL201643.0906001).
- LIU Qin, HAN Shenglong, WANG Jialiang, *et al.* High precise frequency transfer over a 430 km fiber backbone network using cascaded system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0906001. doi: [10.3788/CJL201643.0906001](https://doi.org/10.3788/CJL201643.0906001).
- [20] CHEN Xing, LU Jinlong, CUI Yifan, *et al.* Simultaneously precise frequency transfer and time synchronization using feed-forward compensation technique via 120 km fiber link[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18343. doi: [10.1038/srep18343](https://doi.org/10.1038/srep18343).
- [21] BAI Yu, WANG Bo, GAO Cao, *et al.* Fiber-based multiple-access ultrastable radio and optical frequency dissemination[C]. Proceedings of the 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Prague, Czech Republic, 2013: 1014–1017. doi: [10.1109/EFTF-IFC.2013.6702187](https://doi.org/10.1109/EFTF-IFC.2013.6702187).
- [22] SLAVIK R, MARRA G, FOKOUA E N, *et al.* Ultralow thermal sensitivity of phase and propagation delay in hollow core optical fibres[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15447. doi: [10.1038/srep15447](https://doi.org/10.1038/srep15447).
- [23] HU Liang, WU Guiling, ZHANG Hao, *et al.* A 300-kilometer optical fiber time transfer using bidirectional TDM dissemination[C]. Proceedings of the 46th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Boston, USA, 2014: 41–44. doi: [10.13140/RG.2.1.3254.9608](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3254.9608).
- [24] KODET J, PÁNEK P, and PROCHÁZKA I. Two-way time transfer via optical fiber providing subpicosecond precision and high temperature stability[J]. *Metrologia*, 2016, 53(1): 18–26. doi: [10.1088/0026-1394/53/1/18](https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1/18).
- 杨文哲: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为时间同步与校准技术等.
- 杨宏雷: 男, 1990年生, 工程师, 研究方向为光频梳及其精密测量应用等.
- 王学运: 男, 1982年生, 高级工程师, 研究方向为时间同步与校准技术等.
- 张升康: 男, 1980年生, 研究员, 研究方向为时间同步与校准技术等.
- 赵 环: 女, 1980年生, 高级工程师, 研究方向为光学等.
- 杨 军: 男, 1970年生, 研究员, 研究方向为守时与时间同步技术等.
- 冯克明: 男, 1966年生, 研究员, 研究方向为信号与系统等.