

基于光纤链路的高精度时间频率传输与同步

高超^{1,2}, 王波^{1,2}, 白钰^{1,3}, 苗菁^{1,3}, 朱玺^{1,3}, 李天初⁴, 王力军^{1,2,3,4}

1. 清华大学精密测量联合实验室, 北京 100084
2. 清华大学精密仪器与机械学系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084
3. 清华大学物理系, 北京 100084
4. 中国计量科学研究院, 北京 100013

摘要 在清华大学与中国计量科学研究院之间往返 80 km 的商用光纤链路上进行了时间频率同时传输与同步实验。采用时间频率同时传输与同步的方法, 获得了 $7 \times 10^{-15}/s$, $5 \times 10^{-19}/d$ 的频率传输稳定度结果; 通过在发射端主动探测并补偿时间脉冲信号在光纤中传输的时间延迟, 实现了 ± 50 ps 的时间同步稳定度指标。鉴于目前基于光纤链路的频率传输方案均受限于点对点传输的问题, 设计并完成了可多点下载的频率接收系统, 使时间频率传输与同步网络的建设成为可能。

关键词 时间频率同步; 光纤传输; 原子钟比对; 稳定度

中图分类号 O59

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.34.005

Fiber Based Time and Frequency Synchronization System

GAO Chao^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, BAI Yu^{1,3}, MIAO Jing^{1,3}, ZHU Xi^{1,3}, LI Tianchu⁴, WANG Lijun^{1,2,3,4}

1. Joint Institute for Measurement Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument; Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China
4. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract The continuous, precise time and frequency synchronization system was built on an 80 km single urban fiber link, between Tsinghua University and the National Institute of Metrology. Through precise time and frequency synchronization, the frequency dissemination stability of $7 \times 10^{-15}/s$ and $5 \times 10^{-19}/d$ was obtained; with active transfer delay compensation at the transmitting site, the time synchronization inaccuracy was < 50 ps. For the current fiber based frequency dissemination schemes, the disseminated frequency signal can only be recovered at specific location. A multiple-access RF dissemination scheme was proposed and demonstrated. Using this method, the stable disseminated frequency signal can be recovered at an arbitrary node along the entire fiber pathway, which provides a solution for the time-frequency synchronization network in the future.

Keywords time and frequency synchronization; fiber dissemination; atomic clock comparison; stability

准确的守时, 时间传递与同步是几个世纪以来最重要的科技问题之一^[1,2]。拥有相同本振频率且时间同步的时钟在导航上有着重要的应用。在现代的全球卫星定位系统(例如

中国的北斗卫星导航系统, 美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS) 中, 所有星载钟都需要保持振荡频率和时间的高度同步, 时间的同步精度直接决定定位的精度。

收稿日期: 2014-09-25; 修回日期: 2014-10-30

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(N2013YQ09094303); 北京市高等学校优秀青年人才基金项目(YETP0088)

作者简介: 高超, 博士后, 研究方向为时间频率同步与应用, 电子信箱: chao_gao@126.com; 王波(通信作者), 副教授, 研究方向为时间频率系统, 电子信箱: bowang@tsinghua.edu.cn

引用格式: 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.

目前异地时钟的时间频率同步主要通过卫星链路进行。利用卫星双向时间频率传递(two-way satellite time transfer)^[3], 卫星共视(common-view)^[4]等方法可以实现 $10^{-15}/\text{d}$ 量级的频率传输稳定度以及纳秒量级的时间同步精度^[1,2]。随着现代高精度原子钟的飞速发展, 频率稳定度在 $10^{-16}/\text{s}$ 量级的频率振荡器^[5]及频率不确定度在 10^{-18} 量级的光钟^[6]相继出现, 现有的时间频率传输和同步技术已无法满足此类高精度原子钟时间频率比对的需求, 亟需发展具有更高精度的时间频率传输与同步方法。现代光纤通信网络中广泛使用的光纤具有传输损耗低、受外界环境影响小、可长期连续运行、分布广泛等特性。因此, 基于光纤链路的高精度时间频率传输与同步技术成为研究的热点。

时间和频率是一对紧密关联而又相对独立的物理量。有时, 仅依靠稳定的频率传输与同步就可以满足某些应用的要求, 例如异地原子钟的比对^[7,8]以及物理常量定义(例如米, 坎德拉, 安培等)的比对。因此, 近年来提出并实验演示了多种基于光纤的频率传输与同步系统, 分别用于传输稳定的光频^[9-14]、微波^[15-21]以及飞秒光输信号^[22,23]。同样, 单纯的时间同步系统也可以满足某些特定应用的需求。例如, GPS系统的星载钟与地面站之间每天进行2次时间同步^[24], 但该同步仅调整钟面时刻数值而不对星载钟的频率进行调整。这种调时不调频的同步校准方法存在一个非常大的弊端, 如文献[25]指出, 若所有星载钟在一次校正后便自由运行, 运行一段时间 τ 之后, 各钟的时间偏差的不确定量为 $\tau \cdot \sigma(\tau)$ 。其中 $\sigma(\tau)$ 为描述原子钟频率稳定度的阿伦标准差, 典型原子钟的频率稳定度满足关系式 $\sigma(\tau) \propto 1/\tau^{1/2}$ 。因此, 独立星载钟之间的时间偏差会随着运行时间发生正比于 $\sqrt{\tau}$ 的积累, 不断变大, 以至于整个系统无法正常工作。

本文在清华大学与中国计量科学研究院(简称计量院)之间往返80 km的商用光纤链路上进行的时间频率同时传输与同步实验。采用时间频率同时传输与同步的方法, 首先将本地时钟频率信号稳定地传递给“远端”用户, 使异地时钟拥

有相同的本振频率; 然后, 通过对时钟脉冲信号在光纤中传输时间延迟的精确控制, 实现异地时钟的高精度同步。通过在发射端主动探测并补偿光纤传输过程中引入的相位噪声, 测试频率传输稳定度结果; 通过在发射端主动探测并补偿时间脉冲信号在光纤中传输的时间延迟, 测试时间同步稳定度指标。

相比于卫星链路, 尽管光纤链路的频率传输稳定度更高, 但基于卫星链路的时间频率传输与同步仍然在目前的实际应用中占据主导地位。其主要原因是传统的卫星链路可以在其信号覆盖范围内的任意点进行时间频率的传输与同步, 而目前所有的光纤链路传输方案都是点对点的传输, 即通过补偿单一路径中的相位噪声, 使接收端确定到高稳定度的频率信号, 限制了光纤传输技术的使用范围。针对光纤频率传输系统存在的问题, 本文提出并实验演示一种新的频率信号接收方案, 以实现在有补偿光纤链路的任意位置高稳定度频率信号的下载^[26], 促使光纤时间频率网的建设成为可能。

1 时间频率的同时传输与同步

图1是时间频率同时传输与同步的原理图。原子钟输出的频率信号被分为2路, 分别作为频率传输系统和时间同步系统的参考源。在频率传输系统中, 参考原子钟的频率振荡器产生发播频率信号, 通过相位噪声补偿系统和波分复用器进入光纤链路。在接收端, 利用高速光探测器探测解调, 获得的相位锁定于发射端原子钟的频率信号, 并作为伺服时钟振荡器的参考信号, 即实现了接收端和发射端时钟本振的同步。在时间同步系统中, 参考于发射端原子钟的时间脉冲发生器产生一系列时间脉冲, 经过时间延迟补偿系统和波分复用器等装置后进入光纤链路。同样地, 在接收端通过探测器解调得到具有固定传输时延的时间脉冲信号, 然后将其用于同步本振锁定于发射端原子钟的本地时钟的时刻值, 最终实现异地之间时间频率的同时传输与同步。

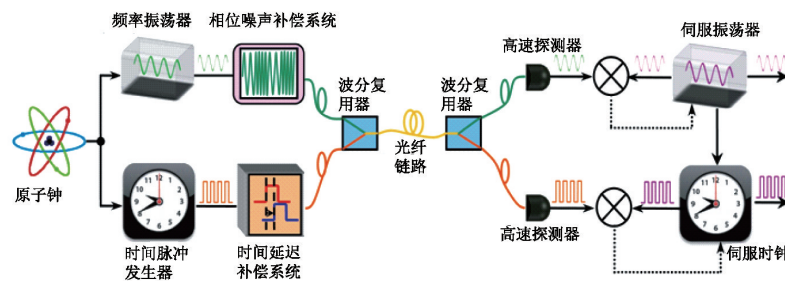


图1 时间频率同时传输与同步的原理

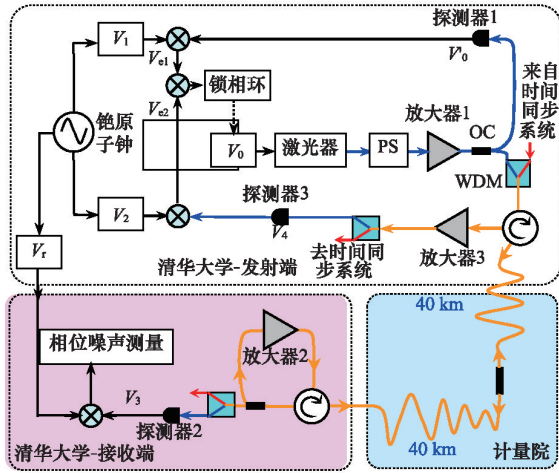
Fig. 1 Schematic of accurate time and frequency synchronization system

1.1 频率的稳定传输

图2是高稳定度频率传输系统的装置示意图。其主要原理是通过在发射端主动探测并预补偿光纤传输引入的相位噪声, 保证接收端得到相位锁定于发射端原子钟的频率信

号。为了方便系统传输稳定度的测量, 频率传输系统的发射端和接收端均放置于清华大学精密测量联合实验室内。发射端发射的频率信号经过40 km的光纤链路传输至计量院后又经过另一条40 km的光纤链路传输回清华大学精密测量联

合实验室。传输至接收端的光信号一部分解调后与发射端的原始信号比相,进行传输稳定度的测量,另一部分经放大后通过光纤环形器按原路返回,用于产生补偿用的误差信号。



PS—光纤扰偏器;OC—光纤耦合器;WDM—波分复用器

图2 频率传输系统的装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the frequency dissemination system

实验中通过反馈控制恒温压控晶振 V_0 的相位来补偿传输链路的相位噪声,将 V_0 产生的频率信号记为

$$V_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中传输信号的频率为 9.1 GHz,为表述方便一律忽略公式中信号的幅值。为得到信号在光纤链路传输过程中引入的相位起伏和系统的稳定度测量,系统中还需另外 3 个相位分别锁定于原子钟的恒温压控晶振,它们产生的频率信号分别记为: $V_1 = \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$, $V_2 = \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$, $V_r = \cos(\omega_r t + \varphi_r)$,且满足

$$\begin{cases} \omega_1 + \omega_2 = 2\omega_r \\ \varphi_1 + \varphi_2 = 2(\varphi_r + \xi) \end{cases} \quad (2)$$

其中 ξ 是一个固定的相位差。信号 V_r 是发射端意图向外发播的频率信号(频率为 9.1 GHz)。 V_1 (频率为 9.0 GHz)和 V_2 (频率为 9.2 GHz)是 2 个用于产生误差信号从而反馈控制晶振 V_0 相位的辅助信号。经信号 V_0 调制的激光通过光纤扰偏器,掺铒光纤激光放大器 1,光纤耦合器,光纤环形器和波分复用器等设备后,进入 80 km 商用光纤链路。其中,为了进一步补偿传输系统中环外器件(例如光纤激光器至光纤耦合器之间的单次传输路径)引入的相位噪声^[17],利用耦合器耦合出部分载波激光后由高速探测器探测并解调,可得到信号 $V'_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi'_0)$,式中 φ'_0 包含了恒温压控晶振 V_0 和环外器件的相位信息。在接收端将接收到的光信号解调,得到频率信号为 $V_3 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_p)$ 。为了补偿传输过程中光纤链路所引入的相位噪声 φ_p ,在接收端将一部分光放大后通过光纤环

行器原路返回,在发射端将返回光信号探测解调,得到包含 2 倍光纤链路相位噪声的频率信号 $V_4 = \cos(\omega_0 t + \varphi'_0 + 2\varphi_p)$ 。为了进一步得到用于反馈控制 V_0 相位的误差信号,需将信号 V_1 和 V_4 混频,低通滤波得到

$$V_{c1} = \cos[(\omega_0 - \omega_1)t + (\varphi'_0 - \varphi_1)] \quad (3)$$

将信号 V_2 和 V_4 混频,低通滤波得到

$$V_{c2} = \cos[(\omega_2 - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi'_0 - 2\varphi_p)] \quad (4)$$

再将 V_{c1} 和 V_{c2} 混频,低通滤波得到

$$V_c = \cos[(2\omega_0 - \omega_1 - \omega_2)t + 2\varphi'_0 + 2\varphi_p - \varphi_1 - \varphi_2] = \cos[2(\omega_0 - \omega_r)t + 2(\varphi'_0 + \varphi_p - \varphi_r - \xi)] \quad (5)$$

其中, V_c 为反馈到压控晶振 V_0 上的误差信号, ξ 是一个固定相位差,对频率的稳定度没有影响,可以忽略。通过 V_r 反馈控制压控晶振 V_0 的频率和相位,使其满足

$$\begin{cases} \omega_0 = \omega_r \\ \varphi'_0 + \varphi_p = \varphi_r \end{cases} \quad (6)$$

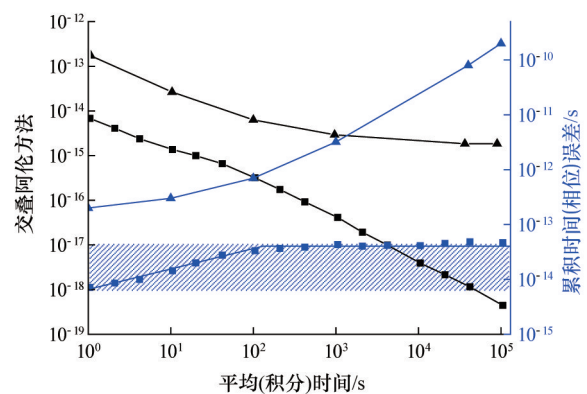
接收端接收到的信号 V_3 ,可表示为

$$V_3 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_p) = \cos(\omega_r t + \varphi_r) \quad (7)$$

式(7)表明在接收端复现了相位锁定于发射端频率信号 V_r 的信号 V_3 ,即实现了频率的高稳定度传输与同步。

通过比较参考频率信号 V_r 与接收频率信号 V_3 的相对相位起伏,计算出接收信号相对于发射端参考信号的频率稳定度,即传输系统的稳定度。

图 3 是频率传输系统的传输稳定度测试结果。其中,有补偿的光纤链路(黑线,方形点)的传输稳定度为 $7 \times 10^{-15}/s$ 和 $5 \times 10^{-10}/d$ 。商用氢钟^[27]的频率稳定度(黑线,三角点)为 $2 \times 10^{-13}/s$ 和 $2 \times 10^{-15}/d$ 。可以看出,在不同平均时间上有补偿光纤链路的传输稳定度比氢钟的频率稳定度普遍高一个数量级以上,因此它可以“保真”地实现氢钟信号的传输与发播。



黑线三角—氢钟的典型频率稳定度;黑线方形—光纤链路的频率稳定度;蓝线三角—初始时刻同步的氢钟间的时间累积误差;蓝线方形(阴影)—光纤传输链路所引入的时间(相位)累积误差范围

图3 频率传输系统稳定度的测试结果

Fig. 3 Measured stability of the frequency dissemination system

更重要的是,在经过 100 s 的运行时间后,传输系统的稳定度 $\sigma(\tau)$ 与运行时间的 $1/\tau$ 成正比,表现出了典型的锁相环路的稳定度曲线。因此,由传输链路引入的时间(相位)累积误差始终保持在 50 fs 的水平(图 3 阴影部分)。蓝线(三角点)是初始时刻同步的 2 台氢钟之间的时间(相位)累积误差随运行时间变化的曲线。由于氢钟的稳定度 $\sigma(\tau)$ 与运行时间的关系为 $\sigma(\tau) \propto 1/\sqrt{\tau}$, 因此初始时刻同步的 2 台氢钟时间累积误差会随着运行时间的累计而不断增大,经过大约一天的积分时间后 2 台氢钟的时间累积误差就会达到 200 ps 的量级。

1.2 准确的时钟同步

稳定的频率传输可以实现异地时钟本振的同步,体现为 2 台时钟的秒间隔一致,而时间的同步则要求这 2 台钟的钟面时刻一致。时间准确同步的核心是同步信号在 2 台钟之间传输时延的精确测量。受环境的影响,信号在两地之间传输的时延不断变化,因此只有对信号传输过程中的时延进行精确的测量和补偿,才可以实现异地时钟的准确同步。图 4 是时间信号传输时延补偿系统的装置示意图,其实验实施流程为:首先在发射端由频率参考于原子钟的时间脉冲发生器产生一系列 500 Hz 的时间脉冲信号,然后经延迟控制器将该脉冲序列延迟 Δt_{i-1} (其中 i 是补偿回路循环的次数, $i=1, 2, 3, \dots$, 实验中预先设定 $\Delta t_0 = 20$ ns)。利用经过延迟的时间脉冲信号调制激光器的功率,然后将调制后的激光信号通过光纤链路传输至接收端。信号在光纤链路传输过程中引入的时间延迟记为 t_i , 则信号由时间脉冲发生器传输至接收端引入的总时延为 $\Delta t_{i-1} + t_i$ 。与频率传输系统类似,在接收端将一部分激光信号探测解调,另一部分沿光纤链路原路返回,在发射端探测返回的激光信号,可以得到时间脉冲信号 2 次通过光纤链路和单次通过延迟控制器所引入的总时延 $\Delta t_{i-1} + 2t_i$ (为表述方便将其记为 T_i)。

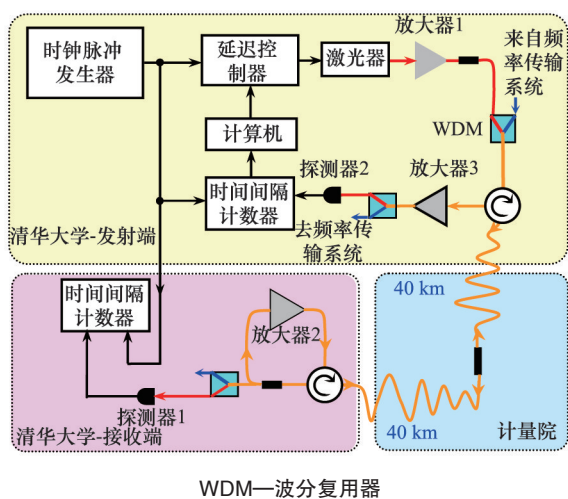


图 4 时间信号传输时延补偿系统的装置示意

Fig. 4 Schematic diagram of the time synchronization system

使用时间间隔计数器测量时间延迟 T_i 后送入计算机,求解用于反馈控制延迟器的时延量 Δt_i , 计算机通过迭代公式为

$$\Delta t_i = C + (\Delta t_{i-1} - T_i)/2 \quad (8)$$

计算后得到反馈控制时间延迟器的信号 Δt_i , 使它始终满足

$$\Delta t_i = C - t_i \quad (9)$$

其中, C 为恒定常数。这样便可以保证

$$\Delta t_i + t_i = C \quad (10)$$

即接收端接收到的信号传输时延始终为 1 个恒定值 C (本实验中,将第 1 次测量的时间延迟记为 C , $C = t_1 + \Delta t_0 = 400086216$ ps)。

图 5 是清华大学与中国计量科学研究院昌平园区之间进行时间传输与同步的实验结果。可以看出,自由运转光纤链路的传输时延在一天的变化大概在 4 ns 的量级(红线),而经过时延补偿系统后,信号传输时延一天的变化大概在 ± 50 ps 的量级(黑线)。如黑线所示,在一天的运行中,整个光纤链路的总时延始终被稳定在 (400086216 ± 50) ps 的范围内。

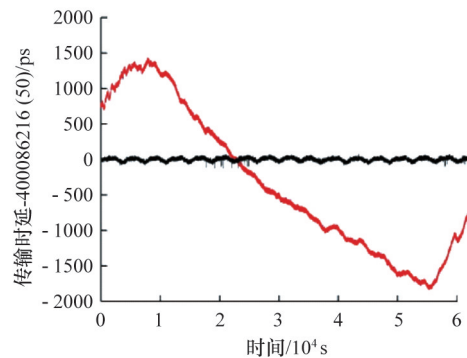


图 5 时延补偿系统的测试结果

Fig. 5 Measured transfer delay of the time-dissemination system

2 可多点下载的频率接收系统

相比于卫星链路,尽管光纤链路的频率传输稳定度更高,但基于卫星链路的时间频率传输与同步仍然在目前的实际应用中占据主导地位。卫星链路可以在卫星信号覆盖的所有区域内实现时间频率的传输与同步,而现有的基于光纤的频率传输方案只能实现点对点的频率传输,限制了光纤链路方案的适用范围。针对这一问题,清华大学设计并完成了一种可多点下载的频率传输系统^[28]。

如图 6 所示,在清华大学与中国计量院之间原有 80 km 光纤链路的发射端熔接一段 3 km 长的光纤并在该熔接位置引入一个探测节点。由光纤补偿的原理可知,若在此处直接探测链路中往返传输的激光信号,可获得的频率信号为

$$V_a = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_a) \quad (11)$$

$$V_b = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_a + 2\varphi_b) \quad (12)$$

可以发现这 2 路信号的相位并没有与基准源的信号相位 φ_0 保持一致,都包含由光纤链路引入的相位噪声。由于 φ_a 和

φ_b 分别是光纤链路的前半段和后半段引入的相位噪声,因此它们与光纤链路引入的总相位噪声 φ_p 之间有: $\varphi_a + \varphi_b = \varphi_p$, 利用这一关系,式(11)和式(12)可改写为

$$V_a = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_p - \varphi_b) = \cos(\omega t + \varphi_r - \varphi_b) \quad (13)$$

$$V_b = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_p + \varphi_b) = \cos(\omega t + \varphi_r + \varphi_b) \quad (14)$$

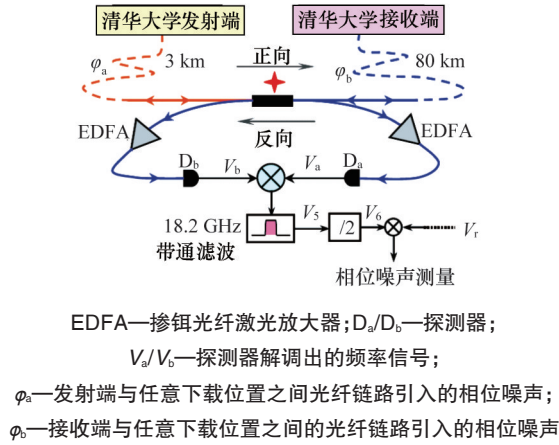


图6 可多点下载的频率接收系统示意

Fig. 6 Schematic diagram of the multiple-access RF dissemination system

可以看出,信号 V_a 和 V_b 的相位起伏主要来自 φ_b (任意下载位置与接收端之间的光纤链路引入的相位噪声),即离发射端越近, φ_b 的起伏越大。由式(13)和式(14)可以看出, V_a 与 V_b 的相位起伏存在明显的负相关。在接入位置采用2个探测器同时测量正反2个方向传输的频率信号,得到测试结果与理论预期一致(见图7红线和蓝线)。将这2路信号进行混频,高通滤波后将式(13)和式(14)中光纤引入的相位噪声抵消,得到

$$V_5 = \cos(2\omega t + 2\varphi_r) \quad (15)$$

进一步采用频率除法器,将信号 V_5 频率转换至

$$V_6 = \cos(\omega t + \varphi_r) \quad (16)$$

显然,信号 V_6 与发射端的参考频率信号 V_r 的相位始终保持一致。

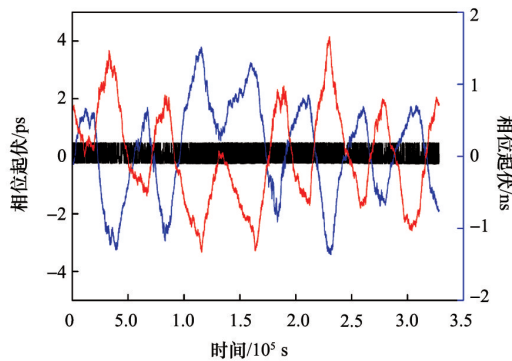


图7 中间接入位置使用不同方法测得9.1 GHz信号的相位起伏

Fig. 7 Measured relative phase delay of the reproduced frequency signal at an arbitrary accessing node of the fiber link

由图7可以看出,直接探测正向和反向传输的频率信号,它们的相位起伏(红线和蓝线)约为4 ns,而通过可多点下载的频率接收系统得到的相位起伏(黑线)大约为 ± 500 fs。图8是可多点下载的频率接收系统的频率稳定度测试结果:通过直接探测2个方向传输的激光,解调得到频率信号(蓝线和红线)的频率稳定度为 $3.5 \times 10^{-13}/s$ 和 $3 \times 10^{-14}/d$,而采用本实验方案得到的频率信号的频率稳定度为 $7 \times 10^{-14}/s$ 和 $5 \times 10^{-18}/d$,相关指标在不同平均时间均优于氢钟的稳定度指标,可以实现氢钟信号的“无损”传输。

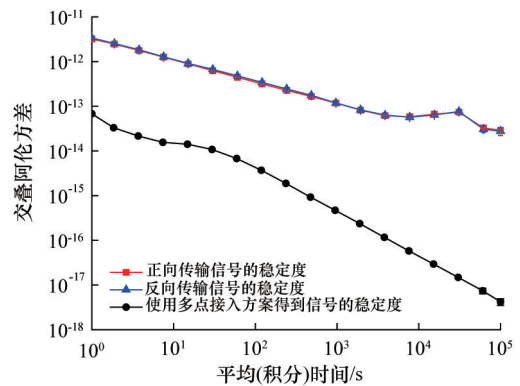


图8 可多点下载的频率接收系统的测试结果

Fig. 8 Measured relative frequency stability of the reproduced frequency signal at an arbitrary accessing node of the fiber link

3 讨论

通过使用现有的商用光纤网络,本文在80 km城市光纤链路上实现了时间和频率信号的同时传输与同步,同现有的光频传输方案相比^[9-14],该方案更加简单,可靠。同时,本实验所达到的频率传输稳定度比目前使用卫星传输的方法高20000倍,天稳定度比直接使用最好的守时氢钟异地守时高4000倍。针对光纤频率传输已有方案的不足,清华大学提出并验证了可多点下载的频率接收系统,该系统可以大大扩展光纤传输系统的应用范围,为时间频率体系的网络化建设提供了一套切实可行的方法。

光纤时频同步技术的另一个重要优势是长距离传输过程中的稳定度恶化的不敏感性。由于基于光纤的传输系统可以与普通商业光纤链路上的放大中继模块一样,对时频信号实现“接力”传输,假定接力传输方法引入的总相位起伏为 σ_{total} ,若传输过程中所使用中继的数量为 N ,则总相位起伏与单一相位恶化的关系为: $\sigma_{total} = \sqrt{N} \sigma$ (σ 为单一光纤传输中继的频率传输稳定度)。即,一个级联 N 次的传输系统引入的稳定度恶化仅为一个中继相位起伏的 \sqrt{N} 倍,而非 N 倍。

在射电天文学中,甚长基线干涉测量技术高度依赖于异地时钟的同步^[28],目前的测量方案为:不同的天文观测基站使用原子钟各自守时,对观测到事件各自独立记录后,将数据

汇总处理,以实现同步观测的目的。因此使用现有方法时必须仔细考虑各种相对论效应^[24]对异地时钟产生的影响,例如引力频移,重力频移^[29],这些效应与时钟所处位置的重力势场、经纬度分布息息相关,限制了天文观测精度的提高。若采用光纤链路传输时间频率信号的方法同步异地时钟,不仅可以使系统更加简单可靠,而且同步后的异地时钟之间不受相对论引力频移等效果的影响,可以有效的提高天文观测的精度。

4 结论

在清华大学与中国计量科学研究院之间往返 80 km 的商用光纤链路上进行的时间频率同时传输与同步实验。采用时间频率同时传输与同步的方法,将本地时钟频率信号稳定地传递给“远端”用户,使异地时钟拥有相同的本振频率;通过对时钟脉冲信号在光纤中传输时间延迟的精确控制,实现异地时钟的高精度同步。通过在发射端主动探测并补偿光纤传输过程中引入的相位噪声,获得了 $7 \times 10^{-15}/s$, $5 \times 10^{-19}/d$ 的频率传输稳定度结果;通过在发射端主动探测并补偿时间脉冲信号在光纤中传输的时间延迟,获得了 ± 50 ps的时间同步稳定度指标。

参考文献(References)

- [1] Bauch A, Achkar J, Bize S, et al. Comparison between frequency standards in Europe and USA at the 10^{-15} uncertainty level[J]. *Metrologia*, 2006, 43(1): 109–120.
- [2] Levine J. A review of time and frequency transfer methods[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): 162–174.
- [3] Michito I, Mizuhiko H, Kuniyasu I, et al. Two-way satellite time and frequency transfer networks in pacific rim region[J]. *IEEE Transactions on Instruments Measurement*, 2001, 50(2): 559–562.
- [4] Allan D W, Weiss M A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite[C]. 34th Annual Frequency Control Symposium, Fort Monmouth, New Jersey, USA, May 28–30, 1980.
- [5] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F, et al. Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 425–429.
- [6] Jiang Y Y, Ludlow A D, Lemke N D, et al. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} level laser stabilization[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 158–161.
- [7] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, et al. Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock [J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1805–1808.
- [8] Hong F L, Musha M, Takamoto M, et al. Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 692–694.
- [9] Predehl K, Grosche G, Raupach S M F, et al. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[J]. *Science*, 2012, 336(6080): 441–444.
- [10] Foreman S M, Ludlow A D, Miranda M H G, et al. Coherent optical phase transfer over a 32-km fiber with 1 s instability at 10^{-17} [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(15): 153601.
- [11] Williams P A, Swann W C, Newbury N R. High-stability transfer of an optical frequency over long fiber-optic links[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(8): 1284–1293.
- [12] Jiang H, Kéfélian F, Crane S, et al. Long-distance frequency transfer over an urban fiber link using optical phase stabilization[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(12): 2029–2035.
- [13] Grosche G, Terra O, Predehl K, et al. Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(15): 2270–2272.
- [14] Musha M, Hong F L, Nakagawa K, et al. Coherent optical frequency transfer over 50-km physical distance using a 120-km long installed telecom fiber network[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16459–16466.
- [15] 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.
- [16] Wang B, Gao C, Chen W L, et al. Fiber-based time and frequency dissemination between THU and NIM[C]. IEEE International Frequency Control Symposium (FCS), Baltimore, MD, USA, May 21–24, 2012.
- [17] Wang B, Gao C, Chen W L, et al. A $10^{-18}/\text{day}$ fiber-based RF frequency dissemination chain[C]. CLEO: Science and Innovations, San Jose, California, USA, May 6–11, 2012.
- [18] Wang B, Gao C, Chen W L, et al. Precise time and frequency synchronization at the 5×10^{-19} level[C]. The 5th International Symposium on Cold Atom Physics, The Three Gorges, China, June 23–27, 2012.
- [19] 王波, 高超, 陈伟亮, 等. 原子时信号的高稳定度传输与比对[C]. 全国时间频率学术会议, 北京, 10.20–21, 2011. Wang Bo, Gao Chao, Chen Weiliang, et al. Precise time and frequency comparison of the atomic frequency standard[C]. China Time and Frequency Symposium, Beijing, October 20–21, 2011.
- [20] Fujieda M, Kumagai M, Gotoh T, et al. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber an NICT[J]. *IEEE Transactions on Instruments Measurement*, 2009, 58(4): 1223–1228.
- [21] Lopez O, Amy-Klein A, Lours M, et al. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(4): 723–727.
- [22] Marra G, Margolis H S, Lea S N, et al. High-stability microwave frequency transfer by propagation of an optical frequency comb over 50 km of optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2011, 35(7): 1025–1027.
- [23] Hou D, Li P, Liu C, et al. Long-term stable frequency transfer over an urban fiber link using microwave phase stabilization[J]. *Optics Express*, 2010, 19(2): 506–511.
- [24] Ashby N. Relativity in the global positioning system[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2003, 6(1): 1–42.
- [25] Wang Z B, Zhao L, Wang S G, et al. COMPASS time synchronization and dissemination[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2014, 57(9): 1788–1804.
- [26] Gao C, Wang B, Chen W L, et al. Fiber based multiple-access ultrastable frequency dissemination[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4690–4692.
- [27] Microsemi. MHM2010 active hydrogen maser datasheet[EB/OL]. [2014-01-12]. <http://www.microsemi.com/products/timing-synchronization-systems/time-frequency-references/active-hydrogen-maser/mhm-2010-active-hydrogen-maser#documents>.
- [28] Robertson D S. Geophysical applications of very-long-baseline interferometry[J]. *Review of Modern Physics*, 1991, 63(4): 899–918.
- [29] Vanier J, Audoin C. The quantum physics of atomic frequency standard [M]. London UK: IOP Publishing Limited, 1989.

(编辑 陈华姣)