

275 km 京沪光纤干线高精度时频传递研究

陈 炜¹ 程 楠¹ 刘 琴² 王家亮² 冯子桐¹ 杨 飞¹ 韩圣龙³ 桂有珍² 蔡海文^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

²中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院量子光学重点实验室, 上海 201800

³中国科学技术大学量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 安徽 合肥 230026

摘要 为实现准国土范围内高精度授时和守时, 利用光纤传递铯钟、氢钟等高精度原子钟的时频信号, 在实际光纤链路上验证其长距离传递性能。采用波分复用和双向双波长的传输方法, 介绍了在 275 km 京沪干线上实现高精度时频传递的相关工作。针对长距离光纤链路的特点, 探讨了链路损耗与散射、色散与频率噪声、补偿系统动态范围和反馈带宽等对时频传递性能的影响。实验获得了频率信号的秒稳定度达 5×10^{-14} 和天稳定度达 7×10^{-18} 的传递性能, 同时, 千秒尺度下的时间方差可达 2.4 ps。

关键词 光纤光学; 时频传递; 时间同步; 波分复用

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0706001

High Precision Time and Frequency Transfer on 275 km Beijing—Shanghai Fiber Backbone

Chen Wei¹ Cheng Nan¹ Liu Qin² Wang Jialiang² Feng Zitong¹
Yang Fei¹ Han Shenglong³ Gui Youzhen² Cai Haiwen¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

³Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University
of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract To achieve high precision timing and punctuality in quasi national territory, time and frequency signal of high precision atomic clocks, such as cesium clock or hydrogen maser, is transferred by using fiber to examine the transfer performance of long distance on actual fiber link. By adopting the methods of wavelength division multiplexing and dual wavelength bi-directional transmitting, the related work of achieving high precision time and frequency signal is introduced on 275 km Beijing—Shanghai backbone. Based on the characteristics of long distance fiber link, the impact of loss and scattering of link, dispersion and frequency noise, feedback loop bandwidth and dynamic range of compensating system on time and frequency transfer performance is discussed. Results show that the frequency stabilities are up to 5×10^{-14} in one second averaging time and 7×10^{-14} in one day averaging time, and time synchronization stabilities are up to 2.4 ps in one thousand second averaging time.

Key words fiber optics; time and frequency transfer; time synchronization; wavelength division multiplexing

OCIS codes 060.2360; 060.2330; 120.3930; 060.5625

收稿日期: 2016-02-24; 收到修改稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61405212)

作者简介: 陈 炜(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: chenwei@siom.ac.cn

导师简介: 蔡海文(1975—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤时频传递、光纤传感、单频激光器等方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

随着现代原子钟技术的不断进步,商用化的氢原子钟秒稳定度已经达到 10^{-13} 量级,而近年来飞速发展的光钟,其稳定度更是达到 10^{-18} 量级^[1-2],这都为全球的时频基准和守时、授时系统提供了优良可靠的基本保证。然而,原子钟造价昂贵,对环境要求极高,国内仅中国科学院上海天文台、中国计量科学研究院、中国科学院国家授时中心等少数单位有能力制造并维护原子钟,而不同守时单位之间的原子钟组还需进行远程相互比对,以确定其权重和精度。在甚长基线干涉(VLBI)、深空探测(DSN)等场合,各观测站之间时频传递还需满足准确的时间同步。在现代化信息战中,实现精确打击依靠的是高精度的时间频率系统^[3]。因此,在国土范围内构建高精度时频同步网显得至关重要。

近年来,光纤实现时间频率传递比传统的卫星传递方式具有更高同步精度和传递稳定度,因而被国际同行广泛重视。国内已有多个研究小组在理论分析、单元器件、多点传输等方面进行了深入研究^[4-7],但都未能满足在准国土范围内构建时频同步网的要求,缺乏对实际长距离商用光纤网络的相关验证实验,故探讨并解决限制传递稳定度的问题迫在眉睫。本文介绍了在 275 km 京沪光纤干线中开展的高精度光纤时频传递工作,针对实际长距离光纤链路中存在的损耗大、熔接点多、色散效应明显等问题设计合理的时频传递系统,实现频率信号的秒稳定度达 5×10^{-14} 和天稳定度达 7×10^{-18} ,同时,千秒尺度下的时间方差达 2.4 ps。

2 时频传递系统原理

光纤时频传递系统的基本原理如图 1 所示,为避免秒脉冲时间信号(1PPS)与频率信号(10 MHz)相互串扰,且防止光纤链路的背向散射,采用双向双波长的复用方案实现时频传递。具体过程是将高精度原子钟产生的时间信号和频率信号分别经过数字时延产生器(TDG)和倍频器(FM)后,调制在相邻波长通道的激光器上(C35 和 C36),经过波分复用器(WDM)复用后,通过扰偏器(PS)降低偏振模色散的影响^[8]。以频率信号为例,本地中心站的频率信号 V_0 可以表示为

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

式中 φ_0 为初始相位, ω 为角频率, t 为传输时延。时频信号复用后的光载波通过光纤延时线(ODL),该光纤延时线由压电陶瓷拉伸器和温控延时线组成^[9],用于抑制链路因振动及环境温度变化而引起的相位波动。光载波通过光纤链路后,由远端探测器(PD)输出,此时远端的频率信号 V_{out} 表示为

$$V_{\text{out}} = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{\text{ODL}} + \Delta\varphi), \quad (2)$$

式中 φ_{ODL} 为光纤延时线引入的固定相移, $\Delta\varphi$ 为链路受到温度变化和振动而产生的相位波动。为了稳定远端的时频信号输出,将输出信号调制至另外两个临近波长的激光器上(C34 和 C37),最后返回本地中心站。假设往返链路由噪声所引起的相位波动几乎相同,则回到中心站的频率信号 V_{ret} 表示为

$$V_{\text{ret}} = \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\varphi_{\text{ODL}} + 2\Delta\varphi), \quad (3)$$

该信号与中心站的参考信号 $V_{\text{ref}} = V_0 = \cos(\omega t + \varphi_0)$ 通过混频鉴相,获得鉴相信号 $V_{\text{PD}} \propto 2\varphi_{\text{ODL}} + 2\Delta\varphi$,将该鉴相信号经过比例积分(PID)运算后,可得到误差信号 $V_{\text{err}} = -\Delta\varphi$,将该信号反馈控制光纤延时线,使其产生相应的相移 φ'_{ODL} ,即 $\varphi'_{\text{ODL}} = \varphi_{\text{ODL}} - \Delta\varphi$ 。于是,由链路温度变化和振动引起的相位波动得以补偿,远端获得相位稳定的频率信号输出 V'_{out} ,即

$$V'_{\text{out}} = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi'_{\text{ODL}} + \Delta\varphi) = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{\text{ODL}}), \quad (4)$$

最终通过相位分析(PA)验证传递性能。

时间信号和频率信号经过相同的光纤链路,光纤延时线在稳定频率信号的同时,也抑制了链路噪声对时间信号的影响,但由于时间与频率传递采用了不同的激光频率,链路噪声对时间信号和频率信号的影响仍存在差异。由链路噪声引起的时延抖动可表示为

$$dt = \frac{n}{c} \cdot \frac{\partial L}{\partial T} dT + \frac{L}{c} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} dT + \frac{L}{c} \cdot \frac{\partial n}{\partial \lambda} d\lambda, \quad (5)$$

式中 n 为光纤折射率, c 为光速, L 为链路长度, T 为光纤温度, λ 为激光波长。 $\frac{n}{c} \cdot \frac{\partial L}{\partial T} dT$ 为由热膨胀引起的

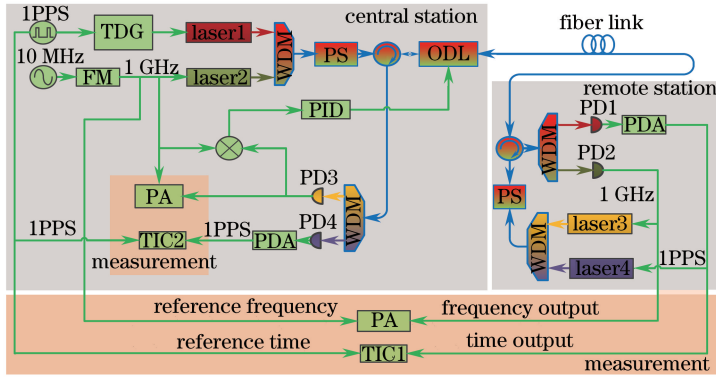


图 1 双向双波长方案传递原理图

Fig. 1 Diagram of bi-directional dual-wavelength transfer scheme

时延抖动, $\frac{L}{c} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} dT$ 为由温度导致的折射率变化引起的时延抖动, $\frac{L}{c} \cdot \frac{\partial n}{\partial \lambda} d\lambda$ 为由色散引起的时延抖动。对于时间信号和频率信号,前两项的影响完全相同,可以通过光纤延时线达到噪声抑制的作用。当系统进入噪声抑制状态时,由波长不同而引起的残余时延抖动取决于二阶色散的影响。于是,由(5)式的第 3 项对温度进行求导可得

$$\frac{\partial(\Delta t)}{\partial T} = D \frac{\partial L}{\partial T} \Delta \lambda + L \frac{\partial D}{\partial T} \Delta \lambda = D\beta \Delta \lambda + L\kappa \Delta \lambda, \quad (6)$$

式中 D 为色散系数, $D = \frac{\partial n}{\partial \lambda} \times \frac{1}{c}$; β 为热膨胀系数, $\beta = \frac{\partial L}{\partial T}$; κ 为表示温度导致的色散变化, $\kappa = \frac{\partial D}{\partial T}$ 。由此可见不同波长之间由链路温度波动引起的时延抖动不同,这部分噪声无法通过基于频率信号的反馈系统实现有效的抑制。对于常见的 G.652 光纤, $D = 17 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$, $\beta = 5.6 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$, $\kappa = -1.45 \times 10^{-3} \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm} \cdot ^\circ\text{C})$ 。于是,对于时间、频率信号相差 0.8 nm 的波长间隔,假设链路长度为 300 km,即便链路温度波动为 15 °C,由此引起的残余时间信号抖动也仅为 5.04 ps,远小于 1PPS 信号自身产生的抖动。因此,可认为此时的链路温度波动不影响时间信号的传递稳定度性能。除此之外,(6)式也是导致往返链路噪声不对称的原因,但与由链路温度波动直接引起的相位变化相比,其影响暂可忽略。

与频率信号不同的是,时间信号传递还需要中心站和远端站同步。采用严格的时延校准算法^[10-11],获得实际链路中传递端机分别在中心站和远端站时的绝对时延值

$$t'_{\text{TIC1}} = t_{\text{TIC1}} + \frac{t'_{\text{TIC2}} - t_{\text{TIC2}}}{2} + \frac{\Delta t_{\text{asym}}}{2}, \quad (7)$$

式中 t_{TIC1} 为传递端机均放置于本地时,两端机通过短光纤连接,由时间间隔计数器 TIC1 测得的传递系统的单向时延; t_{TIC2} 为传递端机均放置于本地中心站时,由 TIC2 测得的传递系统的往返时延; t'_{TIC2} 为传递端机在实际链路中分别放置于中心站和远端站时,两端机通过实际长距离光纤链路连接,由 TIC2 重新测得的传递系统的往返传输时延; Δt_{asym} 为链路不对称部分的时延,它主要由色散、偏振模色散、萨尼亚克效应等不对称性引起, $\Delta t_{\text{asym}} = (\lambda_F - \lambda_B) \cdot DL + t_{\text{PMD}} + t_{\text{SA}}$, 式中 λ_F 为正常传递波长, λ_B 为反向传递波长, t_{PMD} 为偏振模色散引起的时延差, t_{SA} 为萨尼亚克效应引起的时延差。在实际链路中,需对上述不对称的部分进行测量和估算,使得远地端脉冲分配放大器(PDA)输出同步的时间信号。

3 实地长距离链路的参数设计及实验结果

3.1 实地链路情况

根据第 2 节的基本原理,在京沪干线中验证长距离商用链路的传递性能,如图 2 所示,图中 Bi-EDFA 为双向掺铒光纤放大器。使用两根双向平行的商用光纤,将时频传递中心站和远地终端放置于常州机房,中心站的光载波途经无锡机房于苏州机房,在苏州机房用光跳线连接后反向传回常州的远地终端,由此将链路分为 4 段。上述链路结构使得光纤在赤道平面的投影为零,因此可不考虑萨尼亚克效应所带来的影响。

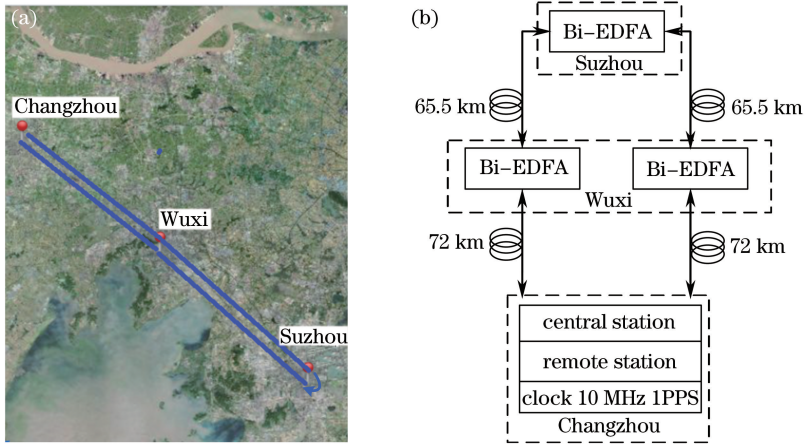


图 2 (a)275.02 km 光纤链路地理位置和(b)端机设置示意图

Fig. 2 (a) 275.02 km fiber link location map and (b) schematic of link stations

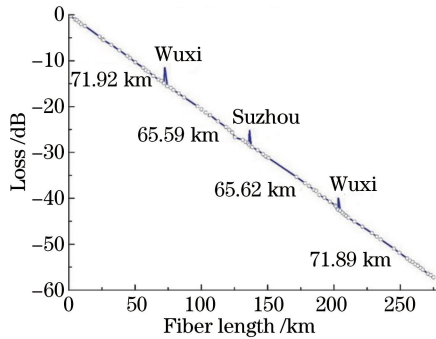


图 3 OTDR 损耗测试曲线

Fig. 3 Loss test curve of OTDR

通过光时域反射计(OTDR)分段测试链路的具体长度和损耗,如图 3 所示。链路总长度约 275.02 km,总损耗达 58.2 dB,共有 78 个熔接点(如图 3 中“o”所示)。大多数熔接点连接良好,熔接损耗较小,但部分熔接点熔接状况不理想,存在气泡或端面不平整的情况,这些情况都可能会产生额外的光散射,从而劣化时频信号性能。此外,链路上还存在 3 个较大的反射点,分别位于无锡机房和苏州机房,为机柜间光纤跳线接头引起的端面反射。若采用双向同波长的传递方法,这些相同波长的散射和反射都将劣化系统的接收信噪比,尤其在使用光放大器的情况下,反射光还会被商用的双向光放大器进一步放大,从而严重影响传递性能。

为进一步了解链路色散情况,便于准确地计算链路受不对称性的影响,采用色散测量仪(JDSU-MDS8000A)进行实地链路色散测试,测得在 1550 nm 处的色散斜率为 4597.3 ps/nm,并通过光谱仪(APEX-AP2041B)测得正反向激光器的准确波长差为 0.652 nm。于是可以得到由色散引起的时延差约为 2997 ps。而对于链路中的偏振模式色散,因扰偏器的使用,使得光载波在平均时间尺度下显示出偏振无关性,故认为该部分影响可以忽略^[11]。

3.2 有源器件的强度噪声

了解链路情况后,需进一步估计影响长距离传递系统的主要噪声,从而合理地设置相应参数。时频传递系统远地终端的接收信噪比 R_{SN} 可表示为

$$R_{SN} = \frac{P_s}{P_{RIN} + P_{shot} + P_{th} + P_{ray} + P_{sp} + P_{s-sp} + P_{sp-sp}}, \quad (8)$$

式中 P_s 是探测器接收到的信号光功率, P_{RIN} 为激光器强度噪声功率, P_{shot} 为探测器散粒噪声功率, P_{th} 为探测器热噪声功率, P_{ray} 为链路相干瑞利散射噪声功率, P_{sp} 为光放大器自发辐射噪声功率, P_{s-sp} 为信号与自发辐射拍频噪声功率, P_{sp-sp} 为自发辐射自拍频功率^[12-13]。为了提高时频系统的接收信噪比,必须提升信号光功率,减小因光放大器的使用而引入的自发辐射等噪声,同时还需避免由背向瑞利散射光产生的影响。因

此,在实际链路实验中,如图 2(b)所示,在无锡、苏州两地,放置 3 个特制的高对称的 Bi-EDFA^[14],以提高信号光功率。该放大器内部也采用双向双波长的方法,利用 Bi-EDFA 内隔离器和波分复用器的滤波带宽,仅允许正向通过 C35、C36 波长通道,反向通过 C34 和 C37 波长通道,减少自发辐射噪声进入光纤链路,有效抑制了背向瑞利散射对正向信号光的影响,从而提高了传递系统的信噪比。

3.3 激光器的频率噪声

随着光纤链路长度的不断增长,除了上述各类强度噪声外,激光器的频率噪声也是影响系统传递性能的关键因素之一。由于链路中存在色散,光纤折射率随着光载波中心频率波动而变化,导致时频信号产生额外的时延抖动,这就是激光器频率噪声与色散相互作用对时频传递性能产生的影响,并且这种影响随着光纤链路长度的增加而增大。由色散引起的时频信号瞬时相位波动可表示为

$$d\varphi = \frac{2\pi f_0 LD\lambda^2}{c} dv, \quad (9)$$

式中 f_0 为传递频率。根据(9)式进行傅里叶变换得到相位波动的功率谱密度(PSD),进而得到相对频率波动谱

$$S_y(f) = \left(\frac{2\pi LD\lambda^2}{c}\right)^2 f^2 S_v(f). \quad (10)$$

对于分布式反馈(DFB)激光器而言,其频率噪声功率谱密度可表示为^[15]

$$S_v(f) = \frac{C}{P} + \frac{K}{f}, \quad (11)$$

式中 C, K 为噪声系数, P 为光功率, C/P 常被称为功率涨落噪声,由激光器自发辐射产生; K/f 即为激光器的 $1/f$ 噪声。将(11)式代入(10)式后,可求得频率噪声与色散对信号阿伦方差(ADEV)的影响:

$$\sigma^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \left[\frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} \right] df = \left(\frac{2\pi LD\lambda^2}{c}\right)^2 \left[\frac{1.038K + 3\ln(2\pi f_h \tau)K}{(2\pi)^2} + \frac{3f_h C}{(2\pi\tau)^2 P} \right], \quad (12)$$

式中 f_h 为测量系统的高端截止频率, τ 为平均时间。因此,对于所有的 DFB 激光器,取 $C = 1.5 \times 10^4$ Hz/W, $K = 1.6 \times 10^{11}$ Hz², $f_h = 5$ Hz, 当链路长度为 50 km 时,频率噪声对时频信号阿伦方差的秒稳定度为 9.2×10^{-15} ,并不限制时频信号的短期稳定度性能。而当光纤链路长度达到 300 km 时,其 ADEV 秒稳定度劣化到 5.5×10^{-14} ,对时频信号短期稳定度产生了限制。

于是,在实际链路实验中,采用色散补偿光纤(DCF)来降低频率噪声对传递系统的影响。将相当于 60 km 的负色散光纤放置于时频传递中心站中,采用相位噪声测量仪(TSC5125)对 275 km 含有 EDFA 的实际链路进行测量,测得的远地终端 10 MHz 频率信号相位噪声情况如图 4 所示。可以看出,比起未采用 DCF 的情况,频率信号的相位噪声在整个测量频率范围内均略有提高,在 1 Hz 处相位噪声提高约 3 dBc/Hz。下一步还可采用色散补偿模块(DCM)来替代 DCF,以避免 DCF 因数值孔径较小而容易引起一定的非线性效应,从而优化传递性能;或采用更低频率噪声的激光器,以解除频率噪声与色散相互作用对长距离时频传递系统的限制。

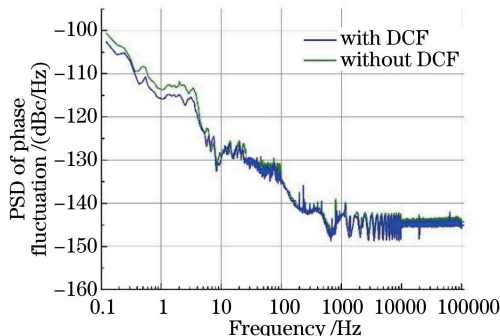


图 4 频率信号相位噪声曲线

Fig. 4 Phase noise curve of frequency signal

3.4 反馈带宽与动态范围

当传递系统进入噪声抑制状态时,需考虑补偿系统的反馈带宽和动态范围对时频传递系统产生的限制。补偿系统的反馈带宽受到传递系统的单向传输时延 t 的限制,即反馈带宽 $B \leq 1/4t$ ^[16],若反馈系统带宽大于 $1/4t$,则相当于把无关的误差信号引入到反馈控制系统,从而劣化了远地终端得到的时频信号性能。相反,若系统的反馈带宽设计得过小,则有部分噪声无法通过反馈系统进行实时噪声抑制。因此,在参数设计中,需根据实际链路的长度进行反馈带宽调整。表 1 列出了在不同传递距离下的合理反馈带宽值。

表 1 不同传递距离下的有效反馈带宽值

Table 1 Feedback bandwidth value with different transfer distances

Distance /km	10	50	100	275	500	1000
Loop bandwidth /Hz	5400	1000	536	195	107	54

为了对反馈补偿系统的动态范围进行有效设计,需进一步了解埋地光纤链路随环境温度波动的特性,估算埋地光纤温度波动与城市间气温波动的相互关系。常见的方法是将温度探针置于埋地光纤附近,得到埋地光纤附近环境温度变化情况。该方法可以获得单点的埋地光纤温度波动情况,但难以得到长距离光纤链路的平均温度波动。实验中,将时频系统置于开环测试环境,通过相位分析,测量频率信号的相对相位漂移,根据光纤相位与温度的相互关系,反演出作用在光纤链路上的温度波动,即

$$\Delta T = \frac{c}{2\pi n \nu_0 L \alpha} \Delta \varphi, \quad (13)$$

式中 α 为光纤总热系数, ν_0 为传递的信号频率。根据(13)式反演出的光纤链路温度变化如图 5(a)所示,同时记录下苏州、无锡、常州 3 地的平均温度波动情况,如图 5(b)所示。

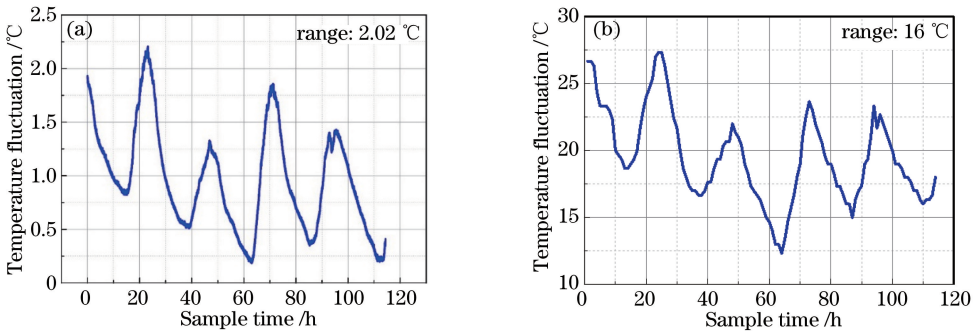


图 5 (a) 光纤链路和 (b) 研究区的温度波动

Fig. 5 Temperature fluctuation of (a) fiber link and (b) research district

由图 5 可知,光纤温度波动与链路环境温度波动整体趋势一致。120 h 内,苏州、无锡、常州 3 地平均气温波动约 16 °C,埋地光纤温度波动约为 2 °C,为气温波动的 1/8,而沙漠中的埋地光纤温度波动为气温波动的 1/3^[17]。由此,可根据不同地区全年温度波动情况,计算出长距离时频传递时延时线所必要的动态范围。在本实验中,对于 275 km 光纤链路,采用动态范围约为 36 ns 的光纤延时线,以保证足够的补偿范围。

3.5 链路实验结果

通过上述参数配置时频传递系统,并完成传递时延校准后,获得噪声抑制前后的频率信号阿伦方差和

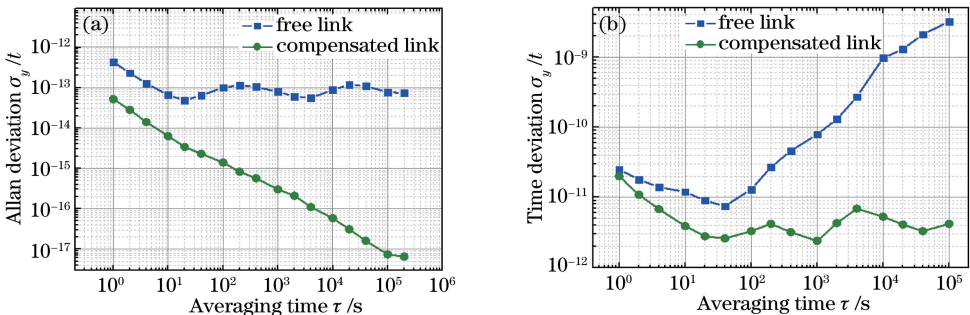


图 6 (a) 频率信号 ADEV 和 (b) 1PPS 信号 TDEV

Fig. 6 (a) ADEV of frequency signal and (b) TDEV of 1PPS signal

1PPS 信号的时间方差(TDEV),如图 6 所示。自由链路状态下,由于链路途经高速公路、桥梁等,受到振动的影响,频率信号的秒稳定度约为 4×10^{-13} ,而链路受到温度波动的影响则更为显著,长期稳定度受到较大的限制,频率信号的天稳定度约为 9×10^{-14} 。而从 TDEV 来看,长期稳定度随着平均时间的延长而不断劣化,千秒尺度下的时间方差约为 83 ps;当系统进入噪声抑制状态时,频率信号短期稳定度和长期稳定度都有显著的改善,短期稳定度提高了约 1 个数量级,秒稳定度可达 5×10^{-14} ,长期稳定度上基本消除了由温度引起的调频闪烁噪声和调频游走噪声的影响,天稳定度达到 7×10^{-18} 。与此同时,千秒尺度的时间方差也可达到 2.4 ps。

4 结 论

综上所述,在长距离商用链路中实现高精度时频传递时,需关注链路中由散射和损耗引起的信噪比劣化,双向双波长的方法可在实际链路中有效避免该问题。当传递距离进一步增长时还需考虑激光器的频率噪声与色散所带来的影响,必要时应采用有效的色散补偿技术或者进一步优化激光器频率噪声。而对于反馈补偿系统的动态范围,可以根据该地区的气温波动进行估算。系统的反馈带宽受限于链路长度,选取合适的反馈带宽才能有效抑制噪声。当由于链路长度增长而导致反馈带宽过小时,还需采用级联传递方式或锁相净化技术来突破其限制。基于对上述各项参数的合理设计,验证了在 275 km 长距离商用光纤链路上实现高精度时频传递的可行性,以期为进一步实现准国土范围内的长距离、多点网络化的时频传递奠定基础。

参 考 文 献

- 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(3): 158-161.
- Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, *et al.*. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- Wang Yiqiu. Thinking about the construction of an independent Chinese time and frequency system [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2004, 24(1): 1-10.
王义遒. 建设我国独立自主时间频率系统的思考 [J]. *宇航计测技术*, 2004, 24(1): 1-10.
- Li Delong, Cheng Qingming, Zhang Baofu, *et al.*. Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stabilities[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010602.
李得龙, 程清明, 张宝富, 等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响 [J]. *激光与光电子进展*, 2014, 51(1): 010602.
- Wu Lei, Wu Guiling, Shen Jianguo, *et al.*. Design and fabrication of wavelength continuous tunable fiber true-time-delay lines with wide dynamic range[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2012(3): 15-17.
吴 雷, 吴龟灵, 沈建国, 等. 大动态范围连续可调光纤实时延迟线的设计与制作 [J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2012(3): 15-17.
- Gao C, Wang B, Chen W L, *et al.*. Fiber-based multiple-access ultrastable frequency dissemination[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4690-4692.
- Chen W, Liu Q, Cheng N, *et al.*. Joint time and frequency dissemination network over delay-stabilized fiber optic links [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 7901609.
- Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, *et al.*. 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer[J]. *European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 35-41.
- Chen W, Xu D, Cheng N, *et al.*. Fiber based radio frequency dissemination scheme to multiple users[C]. *China Satellite Navigation Conference*, 2015, 3: 379-387.
- Cheng Nan, Chen Wei, Liu Qin, *et al.*. Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0705002.
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的研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0705002.
- Cheng N, Chen W, Liu Qin, *et al.*. Joint transfer of time and frequency signals and multi-point synchronization via fiber network[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(1): 014206.
- Olsson N A. Lightwave systems with optical amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(7): 1071-1082.

- 13 Wood T H, Linke R A, Kasper B L, *et al.*. Observation of coherent Rayleigh noise in single-source bidirectional optical fiber systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(2): 346-352.
- 14 Liu Q, Chen W, Cheng N, *et al.*. Bi-directional erbium-doped fiber amplifiers used in joint frequency and time transfer based on wavelength division multiplexing technology[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(11): 110601.
- 15 Kikuchi K. Effect of $1/f$ -type FM noise on semiconductor-laser linewidth residual in high-power limit[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(4): 684-688.
- 16 Newbury N R, Williams P A, Swann W C. Coherent transfer of an optical carrier over 251 km[J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3056-3058.
- 17 Lau K Y, Lutes G F, Tjoelker R L. Ultra-stable RF-over-fiber transport in NASA antennas, phased arrays and radars [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3440-3451.