

引用格式: QUAN Honglei, ZHAO Wenyu, XUE Wenxiang, et al. High-resolution Microwave Frequency Dissemination via 56 km Optical Fiber Based on Microwave Phase Compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0406003
全洪雷,赵文宇,薛文祥,等.基于微波相位补偿的56 km高精度光纤微波频率传递[J].光子学报,2021,50(4):0406003

基于微波相位补偿的 56 km 高精度光纤微波频率传递

全洪雷^{1,2},赵文宇^{1,2},薛文祥¹,邢燕¹,姜海峰^{1,2},郭文阁^{1,3},张首刚^{1,2}

(1 中国科学院国家授时中心 中国科学院时间频率基准重点实验室,西安 710600)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

(3 西安石油大学 理学院,西安 710065)

摘 要:报道了实验室内 56 km 光纤微波频率传递的实验研究,在 56 km 的传递距离上实现了 $1.8 \times 10^{-15}/\text{s}$, $4 \times 10^{-18}/10^4\text{s}$ 的传递稳定度。系统通过环回法比较往返传递的微波信号相位获得链路上的相位扰动量,并实时控制本地发射端的微波发射信号相位实现预补偿。在环回往返传递的不同方向上,系统方案采用不同频率的微波调制信号,这种方法极大避免了光寄生反射效应的影响,同时利用色散补偿光纤改善探测信号相噪等措施,提高了系统的传递稳定度。

关键词:光纤;微波频率;频率传递;相位扰动;锁相技术

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215004.0406003

High-resolution Microwave Frequency Dissemination via 56 km Optical Fiber Based on Microwave Phase Compensation

QUAN Honglei^{1,2}, ZHAO Wenyu^{1,2}, XUE Wenxiang¹, XING Yan¹, JIANG Haifeng^{1,2},
GUO Wenge^{1,3}, ZHANG Shougang^{1,2}

(1 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Time and Frequency Standards of CAS, Xi'an 710600, China)

(2 University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: This paper reports a microwave frequency dissemination experiment over a 56 km-long-fiber link in the laboratory, exhibiting frequency instabilities of $1.8 \times 10^{-15}/\text{s}$ and $4 \times 10^{-18}/10^4\text{s}$. The phase perturbation accumulated along the fiber link is detected by comparing the round-trip signal with the reference signal. By controlling the phase of the transmitted signal in real time, the phase perturbation along the fiber link is compensated. Different modulation frequencies are used to avoid stray reflection effect. To improve the phase noise of the detection signal, we also implemented dispersion compensation.

Key words: Microwave frequency; Fiber link; Frequency dissemination; Phase perturbation; Phase lock technology

OCIS Codes: 060.2330; 120.0280; 230.2035; 230.7370; 120.3940

基金项目:国家杰出青年科学基金(No.61825505)

第一作者:全洪雷(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为光纤微波频率传递。Email: quanhonglei17@mailsucas.ac.cn

导师:姜海峰(1973—),男,研究员,博士,主要研究方向为光梳及其应用。Email: haifeng.jiang@ntsc.ac.cn

通讯作者:赵文宇(1982—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为光纤微波频率传递。Email: zhaowuy@ntsc.ac.cn

收稿日期:2020-11-03;录用日期:2020-12-12

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

高精度频率信号传递在射电天文观测^[1]、基础物理研究^[2]、时间频率计量^[3]等领域都有着重要的应用价值。目前远距离频率传递,主要通过卫星链路等无线方式实现。卫星双向时间频率传递(Two-way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)可实现 $3 \times 10^{-16}/\text{d}$ 的传递稳定度^[4-5],卫星共视(Common View, CV)可以实现 $8 \times 10^{-15}/\text{d}$ 的传递稳定度^[6]。但基于卫星链路的传递方式,易受大气环境的影响,抗干扰性较差,这些方法在性能上将无法满足高精度原子钟(如铯喷泉钟、光钟等)频率信号的传递需求,也不能应用于有电磁静默要求的特殊场合。而借助于具有损耗低、抗干扰性强、电磁静默等优点的光纤介质,基于光纤链路可以实现超高精度的频率传递,在未来具有广泛的应用前景。目前,欧洲已经建成泛欧的光纤时频传递网络,我国也启动了覆盖全国的基于实地通讯光纤的时间频率传递网络建设(国家十三五重大科技基础设施-高精度地基授时系统)。

光纤频率传递方式根据传递的信号类型可分为:光学频率传递、光学频率梳信号传递和微波频率信号传递。根据已有的报道显示,光学频率传递对信号光的链路衰减不敏感,单级可以实现千公里级的长距离传递^[7-9],2015年德国联邦物理技术研究院在1400 km的实地光纤上实现了 $1 \times 10^{-20}/10^4\text{s}$ 的传递稳定度^[10]。但光频信号需要昂贵的光学频率梳下变频到微波频段,才能被电子学设备使用。光学频率梳信号传递具有同时传递光频标与微波频标的优点^[11],2011年英国国家物理实验室在86 km光纤上实现了 $4 \times 10^{-17}/1600\text{s}$ 的传递稳定度^[12]。但所传输的光学频率梳信号是一系列超窄光脉冲信号,频谱较宽,易受光纤色散影响,在远距离传输过程中信噪比恶化明显,同时其应用也受限于光学频率梳的高成本。光纤微波频率传递是将微波信号强度调制到载波激光上,经光纤传输到远端,可以直接传递微波原子钟的信号并用于远距离比对,标准微波信号在目前应用领域中的需求最为广泛。

目前远距离高精度光纤微波频率传递的实现方案分为两类,包括光学相位补偿^[11,13]与微波相位补偿^[14-16]。光学相位补偿方案通过控制信号光的传输延迟,实现对光纤链路附加扰动补偿。2010年,法国巴黎天文台利用光学相位补偿方案在86 km光纤实现9.15 GHz信号传递,传递稳定度为 $1 \times 10^{-15}/\text{s}$ 和 $2 \times 10^{-19}/\text{d}$ ^[17]。而这种方案通常需要一个快速补偿机构与一个慢补偿机构互相配合,慢补偿机构通常由温控光纤卷轴实现,体积较大且会引入额外损耗,补偿装置相对复杂。相对而言,微波相位补偿方案直接控制微波发射信号的相位,在电学部分对光纤链路附加扰动补偿,补偿执行机构通常为压控振荡器。2012年清华大学在80 km实地光纤实现了9.1 GHz微波相位补偿传递,传递稳定度为 $7 \times 10^{-15}/\text{s}$ 和 $5 \times 10^{-19}/\text{d}$ ^[15];2015年国家授时中心利用微波相位补偿方案,在50 km光纤卷轴上进行了初步的实验,传递稳定度为 $5.8 \times 10^{-14}/\text{s}$ 和 $1.9 \times 10^{-17}/\text{d}$ ^[14]。在之前微波相位补偿方案中,一般环回往返传输信号频率是相同的,无法避免寄生反射的影响,产生误补偿的风险。相比于光学相位补偿方案,微波相位补偿方案的结构更加简单,补偿的响应速度更快,成本也更低廉,更适合大范围的工程应用,所以提升微波相位补偿方案的传递稳定度具有重要的意义。

本文采用微波相位补偿方案,通过区别环回往返双向上的微波信号频率来避免寄生反射影响,同时采用减小发射信号补偿增益,设置光纤链路的色散补偿等措施,在56 km光纤卷轴上实现高稳定度传递。实验系统工作稳定可靠,易于工程化应用。

1 理论与实验系统

在实际光纤链路中,当频率信号沿光纤链路传递时,由于受到外界环境温度变化与机械振动的影响,相位会发生随机波动,导致信号传递稳定度恶化。为了实现频率信号的远距离高精度传递,通常使信号光沿光纤链路往返传输,并假定信号往返传输的时延相同,通过比较往返信号的相位,获得光纤链路所引入的相位扰动量,并利用锁相技术对链路引入的相位扰动进行实时补偿。

光纤微波频率传递系统结构如图1所示,包括本地端与远端两个部分,本地端完成链路相位噪声探测与链路相位噪声补偿功能。本地端参考信号为4GHz($-55.58\text{ dBc}/\text{Hz}@1\text{ Hz}$, $-83.95\text{ dBc}/\text{Hz}@10\text{ Hz}$, $-97.81\text{ dBc}/\text{Hz}@100\text{ Hz}$),由商用信号源(Keysight E8257D)产生,表示为 $V_r = \sin(\omega_r t + \varphi_r)$, ω_r 为本地端参考信号频率, φ_r 为参考信号的相位。本地端的发射信号频率为10 GHz,由锁相在100 MHz恒温晶振

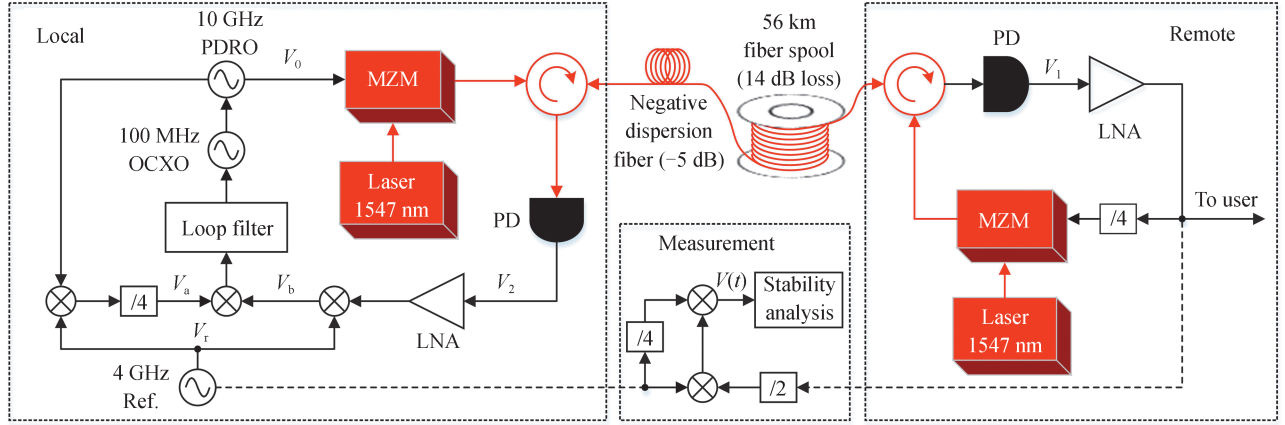


图1 实验装置

Fig.1 Diagram of experimental device

(Oven Controlled Crystal Oscillator, OCXO) ($-100 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ Hz}$; $-130 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ Hz}$) 输出信号的压控介质振荡器 (Dielectric Resonance Oscillator, DRO) 产生: $V_0 = \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, ω_0 与 φ_0 为发射信号频率与相位。利用马赫曾德尔调制器 (Mach-Zehnder Modulator, MZM), 将 V_0 调制到载波激光上, 耦合入光纤发送到远端。在远端高速光电探测器解调得到 10 GHz 接收信号, $V_1 = \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_p)$, 其中 φ_p 为光纤链路引入的相位扰动。 V_1 经四分频后, 同样以强度调制方式回传到本地端, 在本地端利用高速光电探测器解调得到 V_2 , 由于光纤链路所引入的相位起伏与传递频率成正比, V_2 可以表示为 $V_2 = \sin\left(\frac{\omega_0 t}{4} + \frac{\varphi_0}{4} + \frac{\varphi_p}{2}\right)$, V_2 的相位包含了往返链路引起的相位起伏。链路相位噪声探测与补偿在本地端完成, 参考信号 V_r 与发射信号 V_0 混频后再四分频得到 V_a , V_2 与 V_r 混频得到 V_b 。 V_a 与 V_b 混频后得到误差信号 V_e , V_e 不仅包含链路引入的相位差, 还包含 V_0 相对于 V_r 的相位差, 表示为

$$V_e = \sin\left[\left(\frac{2\omega_0 - 5\omega_r}{4}\right)t + \frac{2\varphi_0 + 2\varphi_p - 5\varphi_r}{4}\right] \quad (1)$$

当锁相环路闭环后, 环路滤波器控制发射信号相位, 使 $V_e = 0$, 则有

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{5}{2}\omega_r \\ \varphi_0 = \frac{5}{2}\varphi_r - \varphi_p \end{cases} \quad (2)$$

因此, 远端的接收信号可表示为 $V_1 = \sin\left(\frac{5\omega_r}{2}t + \frac{5\varphi_r}{2}\right)$, 它被锁相到参考信号 V_r 上, 即完成了光纤链路噪声的补偿。

将 DRO 发射信号锁相到 OCXO 产生的 100 MHz 信号上, 一方面可以降低商用 DRO 所产生的发射信号近端相噪, 另一面可以降低发射信号的压控补偿增益 k_c (kHz/V)^[18], 反馈补偿时可以减小电路噪声的影响, 提高传递的短期稳定度。信号光在光纤链路传输中, 会遇到随机出现的光纤熔接点等不确定的情况, 所产生的寄生反射导致一部分信号光在中途反射回本地端, 而本地端光电探测器无法区分远端回传信号光与寄生反射信号。在远端将 V_1 四分频后回传, 以不同调制频率, 区分了往返微波信号频率, 可以利用带通滤波器滤除寄生反射信号, 避免寄生反射的影响。

同时, 光纤链路中存在的色散会使信号光展宽, 使携带的微波信号相位发生改变, 造成在解调信号时引入额外的噪声。为了降低色散的影响, 在光纤链路 (SM-28e) 中接入与 56 km 光纤卷轴色散量 ($56 \text{ km} \times 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$) 对应的负色散补偿光纤, 实现对光纤链路的色散进行补偿, 改善接收信号的相噪, 提高传递的稳定度。

2 结果与讨论

为了评估传递系统的性能,在时域中测量了远端 10 GHz 接收信号相对于本地端 4 GHz 参考信号的稳定度,同时在频域中测量了远端 10 GHz 接收信号相对于本地端 4 GHz 参考信号的剩余相位噪声。

通常测量信号的时域稳定度有两种方法,一种是利用频率计数器、5125A 相噪仪等仪器,直接测量频率稳定度,另一种是通过对比被测信号与参考信号的相位,间接获得频率稳定度,该方法也称相位比较频率稳定度测量法。第一种方法受限于仪器的频率测量范围(通常小于 1 GHz)和仪器的测量噪声底,无法直接测量带宽外的高频信号和低于仪器噪声底的信号。为此本文采用相位比较频率稳定度测量法,并设计了如图 2 所示的测试模块,模块中选用低噪声四频分(HMC365)与低噪声二分频(HMC361),使测试模块具有良好的噪声底(图 3d 曲线),以满足测量要求。在测试模块中,将远端解调的 10 GHz 信号 V_1 二分频后与本地端 4 GHz 参考信号 V_r 混频获得

1 GHz 信号,该 1 GHz 信号与本地端 4 GHz 参考信号的 4 分频进行模拟鉴相,得到近似直流的电压信号 $V(t)$ 。 $V(t)$ 代表被测信号与参考信号间的相位差,从该相位差的变化可以解算出链路的时延的抖动。具体采用万用表(Keysight 3458A)测量 $V(t)$,并以 1 s 的采样间隔记录数据。通过换算,将 $V(t)$ 转换为时延差

$$\Delta t = \frac{1}{\omega_0/2} \arcsin \frac{V(t)}{A/2}$$

, A 为当被测信号 V_1 的相位在 2π 的范围内变化时 $V(t)$ 的峰峰值, ω_0 为 10 GHz 传递信号的角频率,计算 Δt 的 Allan 方差表征传递的稳定度。

在自由链路传递时延差的测量中,以本地端 10 GHz 发射信号为参考,对远端 10 GHz 接收信号的相位时延变化进行测量。测量中远端的 10 GHz 信号的相位并没有锁相在本地端,受到自由链路噪声的影响比较大。利用大系数分频器进行分频所引入的分频噪声要小于链路噪声。所以本文利用 50 分频器直接将发射端与远端的 10 GHz 信号变频到 200 MHz,采用仪器测量法,利用相噪仪 5125A(频率测量范围 ≤ 400 MHz)即可实现 200 MHz 信号间的时延测量,并以 1 s 的采样间隔记录数据。

为了评估系统对链路噪声的快速补偿能力,利用快速傅里叶变换分析仪(Fast Fourier Transform Analyzer SR785)测量测试模块的输出电压 $V(t)$,获得了远端接收的 10 GHz 信号相对于本地 4 GHz 参考信号的剩余相位噪声 $S_{\phi}(f)$ ($\text{dB}\cdot\text{rad}^2/\text{Hz}$),测量结果如图 3 所示。

利用图 2 所示测试方案,首先对测试模块的底噪进行评估,测试中以商用信号源 keysight E8257D 产生 10 GHz (-47.63 $\text{dBc}/\text{Hz}@1$ Hz, -122.05 $\text{dBc}/\text{Hz}@100$ Hz)信号为参考,并功分为两路,其中一路直接输入到测试模块,将另一路经 10 分频并利用 4 GHz 带通滤波器取其 4 次谐波(4 GHz),同时输入到测试模块,并将测试模块的输出电压 $V(t)$ 输入到 FFT 快速傅里叶变换分析仪,测量结果如图 3 曲线 d 所示。

图 3 中,曲线 a 给出了 56 km 自由链路的附加相位噪声,反应光纤链路的噪声情况,该测量结果是用本地端 10 GHz 发射信号与远端 10 GHz 接收信号直接混频后,利用 FFT 分析仪测量混频电压 $V(t)$ 得

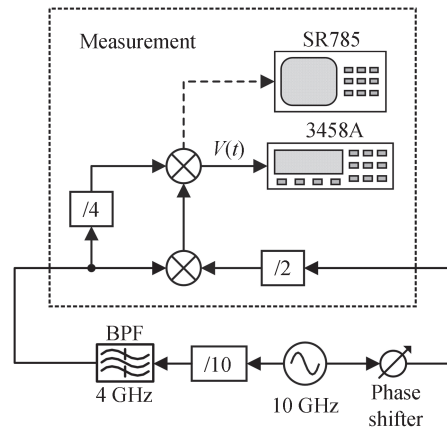


图 2 相位时延及剩余相位噪声测试模块

Fig. 2 Test module for phase delay and residual phase noise

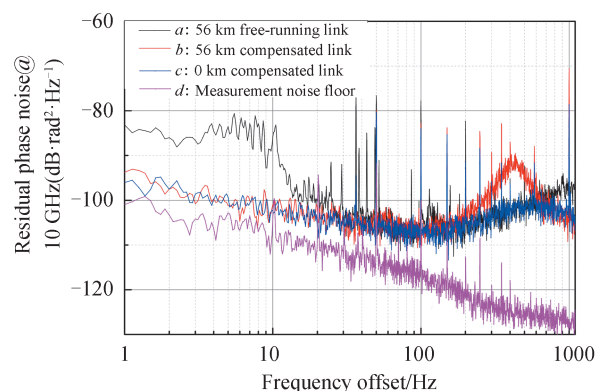


图 3 系统相噪图

Fig. 3 Phase noise performances of signals in experimental setup

出。曲线 *b* 为 56 km 补偿链路的剩余相位噪声测试结果,曲线 *c* 为有补偿的 0 km 光纤传递剩余相位噪声测试结果。具体 0 km 测试方案中,利用 10 dB 光纤衰减器代替 56 km 光纤卷轴,并闭环测量,该测试中没有光纤链路噪声,所以反映了传递系统所能补偿的极限,即传递系统噪底。对比曲线 *a* 和 *b*,可以看出补偿后在低频处产生了 10~15 dB 的噪声抑制效果,并与系统噪底重合;在 1~200 Hz 内 *b* 和 *c* 曲线相合,按照噪声抑制传递函数,低频处噪声抑制比应服从 $1/f^2$,然而受限于低噪声放大器的噪声水平,低频处相位噪声在 $-100 \sim -110$ dB rad^2/Hz 水平。在低频段,曲线 *b* 与曲线 *c* 重合,说明传递系统在补偿带宽范围内,系统可以非常好的补偿光纤链路所引入的相位噪声。

在光纤微波频率传递中,由于光纤的传输延迟导致噪声测量和补偿失配。理论研究表明,传递系统的噪声抑制带宽需小于 $1/4\tau$ ^[19],其中 τ 为光纤传输时延,即系统中的锁相带宽主要受限于光纤传输时延,而曲线 *b* 在约 420 Hz 频偏处的峰是由反馈环路带宽引起^[19]。

图 4 为微波信号在 56 km 光纤卷轴上的传输时延起伏,其中曲线 *a* 为自由链路的时延测试数据,曲线 *b* 为补偿链路的时延测试结果。对于 56 km 自由链路,在不到一天的时间,传输时延波动已经大于 3 ns。经过系统闭环补偿后,传输时延抖动的峰峰值小于 0.15 ps,补偿抑制比大于 20 000,说明远端 10 GHz 接收信号相位很好的同步在本地参考源上,光纤链路所引入的相位时延扰动被很好地补偿。

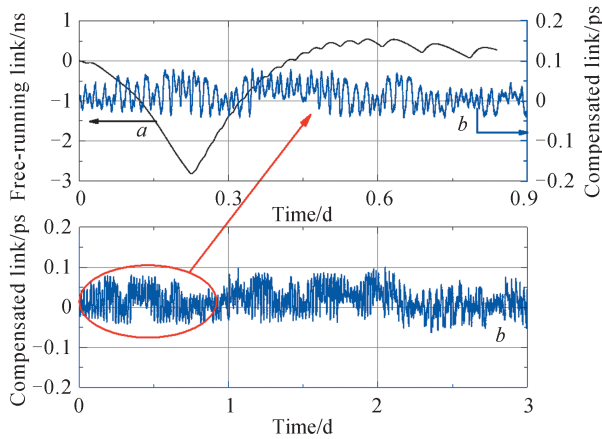


图 4 系统开环与闭环传递时延对比图

Fig. 4 Propagation delay of experimental setup

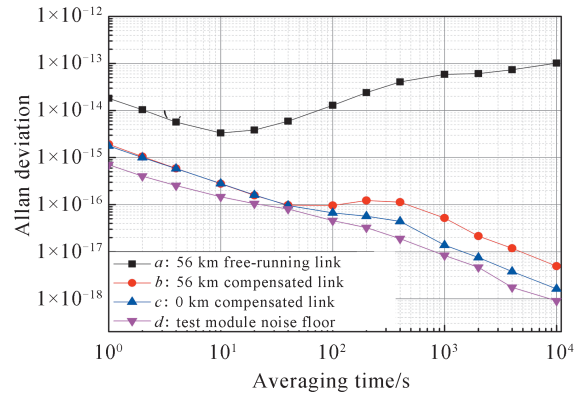


图 5 频率传递稳定度实验结果

Fig. 5 Experiment results of frequency dissemination stability

图 5 为系统的传递稳定度,其中曲线 *a* 为自由链路的传递稳定度,是利用图 4 中曲线 *a* 的时延数据计算 Allan 方差所得。曲线 *b* 为实验系统闭环后,56 km 补偿链路频率传递稳定度,是利用图 4 中曲线 *b* 的时延数据计算 Allan 方差所得,结果为 $1.8 \times 10^{-15}/\text{s}$ 和 $4 \times 10^{-18}/10^4\text{s}$ 。曲线 *c* 是 0 km 光纤闭环后测试所得,代表系统的背景噪声,或者称之为底噪。可以看出 56 km 补偿链路的传递短期稳定度与系统的底噪重合,而 100 s 之后 56 km 补偿链路的传递稳定度出现了明显恶化。这主要有两个产生原因:1)对 56 km 传输链路进行补偿时,本地端发射信号与远端接收信号为频率相同但相位不同的 10 GHz 信号;而在测试中,本地端设备与远端设备地处同一间实验室,同频设备之间存在电磁干扰,本地 10 GHz 发射信号在负反馈补偿过程中,相位在实时变化和调整,通过空间耦合路径泄漏到远端,干扰远端 10 GHz 接收信号相位,出现系统设计模型以外的波动和噪声,导致稳定度恶化,而且链路噪声越大,这种恶化越明显。而在 0 km 测试中,链路噪声可以忽略,收发两端信号相位几乎相同,微波信号泄漏的影响极小;2)设备的长期稳定性与环境温度密切相关,百秒之后的稳定度指标可以通过精密控制设备模块温度实现提升。实验还利用如图 2 所示方法,对测试模块的稳定度进行了测量,结果如曲线 *d* 所示,测试模块的稳定度优于系统的传递底噪与 56 km 补偿链路的传递稳定度。

该实验系统的短期传递稳定度与 2010 年法国 LNE-SYRTE 的基于光学相位补偿方案的实验结果相近,但由于微波泄露和未作精密控温的原因,长期稳定度略差。本实验系统的结构更为简单,无需结构复杂的补偿装置,便于应用。LNE-SYRTE 实验室的高精度传递结果,也得益于其所用的 86 km 实地光纤均为

地理光纤,可以很好地屏蔽温度、振动等对光纤频率传递的影响,且在开环情况下,其86 km实地光纤一周的传输时延起伏能够小于本实验中56 km光纤卷轴一天的传输时延起伏。如果该系统利用实地通信光纤进行微波频率传递实验,其传递稳定度将与实地光纤链路条件相关,链路环境中的温度变化是较为缓慢的过程,该系统可以给予有效的补偿;而机械振动、应力等对传递稳定度的影响较为明显。如果光纤链路未与外界环境进行良好的隔绝,传递稳定度会明显恶化。如果实地光纤在铺设时对外界的温度变化与机械振动采取了隔绝措施,比如采用深地理的方式,其传递稳定度与实验室光纤卷轴的结果应该相当,甚至会更好。

3 结论

系统通过对发射微波信号相位的控制,实现对光纤链路噪声的实时补偿,在56 km光纤上实现了 $1.8 \times 10^{-15}/\text{s}$ 和 $4 \times 10^{-18}/10^4\text{s}$ 的传递稳定度,系统传递时延抖动的峰峰值小于0.15 ps。实验中利用结构简单的实验系统,实现了高指标的微波频率传递,系统可靠性高,具有极高的工程化应用潜力。虽然传递指标受限于微波泄漏等因素的影响,但仍然满足目前冷原子微波钟的频率传递需求。由于信号的信噪比与补偿带宽随着传递距离的增加而减小,该系统最远只能实现百公里左右的高精度传递,为了实现超长距离的传递,需要将多套设备级联起来,实现远距离传递,这也是下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] HUANG Shouhua, TJOELKER R L. All-photon link for high-performance antenna arraying IPN progress report [P]. 2006;142-167.
- [2] KARSHENBOIM, SAVELY G. Some possibilities for laboratory searches for variations of fundamental constants [J]. Canadian Journal of Physics, 2012, 78(7):639-678.
- [3] YE Jun, PENG Jinlong, JASON J R, et al. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network[J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2003, 20 (7):1459-1467.
- [4] FUJIEDA M, GOTOH T, NAKAGAWA F, et al. Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2012, 59(12):2625-2630.
- [5] FUJIEDA M, GOTOH T, AMAGAI J. Advanced two-way satellite frequency transfer by carrier-phase and carrier-frequency measurements[J]. Journal of Physics Conference Series, 2016, 723(1):012036.
- [6] YAO Kong, YANG Xuhai, QIN Weijin, et al. Method of precise common-view frequency transfer based on BeiDou GEO satellite[C]. 2014 IEEE International Frequency Control Symposium (FCS), IEEE, 2014.
- [7] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link.[J]. Physical Review Letters, 2014, 111 (11):110801.
- [8] CALONICO D, BERTACCO E K, CALOSSO C E, et al. High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642-km fiber link[J]. Applied Physics B, 2014, 117(3):979-986.
- [9] CANTIN E, QUINTIN N, WIOTTE F, et al. Progress on the REFIMEVE+ project for optical frequency standard dissemination[C]. 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium ((EFTF/IFC)):378-380.
- [10] RAUPACH S M F, KOCWARA A, GROSCHE G. Brillouin amplification supports 1×10^{-20} uncertainty in optical frequency transfer over 1400 km of underground fiber[J]. Physical Review A, 2015;0218011-0218015.
- [11] 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, 2010, 35(7):1025-1027.
- [12] MARRA, GIUSEPPE, SLAVIK, 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.
- [13] LIU Qin, HAN Sheng-long, WANG Jialiang, et al. High precise frequency transfer over a 430km fiber backbone network using cascaded system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9) 0906001.
刘琴, 韩圣龙, 王家亮, 等. 采用级联方式实现430km高精度频率传递[J]. 中国激光, 2016, 43(9) 0906001.
- [14] MENG Sen, GUO Wenge, ZHAO Wenyu, et al. 9.2 GHz microwave frequency transmission via 50 km optical fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0706003.
孟森, 郭文阁, 赵文宇, 等. 9.2GHz频率信号50km传递[J] 光子学报, 2015, 44(7): 0706003.
- [15] WANG Bo, GAO Cao, 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] XUE Wen-xiang, ZHAO Wenyu, QUAN Honglei, et al. Microwave frequency transfer over a 112-km urban fiber link based on electronic phase compensation[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(6):064209.
- [17] 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.
- [18] WANG S, SUN D, DONG Y, et al. Distribution of high-stability 10 GHz local oscillator over 100 km optical fiber with accurate phase-correction system[J]. *Optics Letters*, 2012, 39(4):888-891.
- [19] JIANG Hai-feng. Development of ultra-stable laser sources and long-distance optical link via telecommunication networks [D]. Université Paris-Nord-Paris XIII, 2010.