

引用格式: ZHAO Cui-chen, ZHAO Wen-yu, XUE Wen-xiang, *et al.* Microwave Frequency Dissemination via 50 km Optical Fiber Based on Optical Delay Compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0806002

赵粹臣, 赵文宇, 薛文祥, 等. 基于光学时延补偿的 50 km 光纤微波频率传递[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0806002

基于光学时延补偿的 50 km 光纤微波频率传递

赵粹臣^{1,2}, 赵文宇¹, 薛文祥^{1,2}, 全洪雷^{1,2}, 闫露露¹, 郭文阁¹, 姜海峰^{1,2},
张首刚^{1,2}

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

(2 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘要:报道了利用 50 km 光纤实现 4.38×10^{-15} @1 s 和 2.80×10^{-18} @ 65.5×10^3 s 稳定度的微波频率传递的实验研究. 实验系统采用多普勒噪声消除技术, 通过在本地端探测往返传递的微波信号相位获得链路上的相位变化信息, 并实时控制光延迟调整机构进行补偿. 光延迟控制采用压电陶瓷的快速拉伸和慢速光纤温控联合方式, 可实现 5 ns 和千赫兹带宽的光延迟控制, 能够实现光纤噪声的长期高精度补偿. 与电相位补偿相比, 光延迟补偿受微波泄露的影响相对较小, 而微波泄露影响在类似系统难以避免, 因此这种方式更利于获得高稳定度的频率传递. 此外, 系统采用变频往返传递消除光寄生反射效应, 以及色散补偿光纤减小因色散引起的调制信号衰减等措施, 提高了系统的技术指标.

关键词:微波频率传递; 多普勒噪声消除; 光纤色散补偿; 可变延迟线; 频率稳定度

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20204908.0806002

Microwave Frequency Dissemination via 50 km Optical Fiber Based on Optical Delay Compensation

ZHAO Cui-chen^{1,2}, ZHAO Wen-yu¹, XUE Wen-xiang^{1,2}, QUAN Hong-lei^{1,2}, YAN Lu-lu¹,
GUO Wen-ge¹, JIANG Hai-feng^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

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

(2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An experimentally study on microwave frequency transfer over a 50 km long fiber was reported, which frequency instabilities reach 4.38×10^{-15} @1 s and 2.80×10^{-18} @ 65.5×10^3 s. By using the well-known Doppler noise cancellation method, the fiber noise was measured by comparing the phase of the signal double-passed fiber and the reference one at local site, and compensate the fiber noise with a home-made fiber-based variable delay line, which includes a fiber stretcher driven by a piezo-transducer for fast action with 1 kHz bandwidth and a temperature controlled fiber spool with a delay adjustment range of 5 ns. Compared with electronic phase compensation technique, this approach is insensitive to microwave leakages which is difficult to avoid in such a case, consequently, enables a better instability for long terms. In addition, we synthesized the back and forward transferred signals into two different frequencies to avoid effect introduced by stray optical reflections, and employ dispersion-compensation fiber to reduce the penalty due to the chromatic dispersion.

Key words: Microwave frequency transfer; Doppler noise cancellation; Fiber chromatic dispersion

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No.61825505)

第一作者: 赵粹臣(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤微波频率传递. Email:zhengfuzhe.1988@163.com

导师: 姜海峰(1973—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光纤光学频率梳及其应用. Email:haifeng.jiang@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2020-04-09; 录用日期: 2020-06-15

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

compensation; Variable delay line; Frequency instability

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

0 引言

基础物理实验、粒子加速器、高精度钟比对、天文观测以及物理常数测定等领域^[1-4],需要在相距遥远的实验室之间进行高精度的频率信号传递和时间同步.传统的时间频率传递方法是利用自由空间作为传递介质.目前精度最高的是使用卫星进行传递,常见的方法有卫星双向时间频率传递和GPS共视时间频率传递.然而由于大气和电离层扰动、宇宙射线以及太阳活动等因素的影响,卫星双向频率传递的稳定度在 10^{-15} /天量级^[5-6],已接近理论极限.而现有铯原子喷泉钟的日稳定度已能达到 10^{-16} 量级^[7-8],传统的频率传递方法已不能满足高精度原子钟频率信号的传递需求.

多年来,国内外开展了一系列利用光纤进行时间频率传递的研究^[9-18],利用光纤抗干扰能力强、可靠性高、资源丰富等优点,以克服自由空间介质的限制.光纤频率传递方式大致可分为三类:1)光载波频率传递^[9,13,15],这种方式可以达到很高的稳定度指标,在1 000 km链路上进行传递的日稳定度可达 10^{-19} 量级,但是在传递过程中难免发生信号中断续传跳周现象,所产生的误差无法消除,同时光频段信号无法被电子学设备直接解调使用,所以使用很困难;2)光强度微波调制频率传递^[10,14,17],其频率传递稳定度虽然略逊于光载波频率传递方式,但精度可以满足光钟以外的所有微波原子频标的传递需求,且易于工程化应用;3)光脉冲频率传递^[16,18],在实验室中实现了较高指标,但由于窄脉冲受光纤中色散效应的影响,光脉冲会被展宽,导致远距离传输信噪比严重恶化,在实际应用中有很大困难.所以只有光载波频率传递和光强度微波调制频率传递这两种方式适合远距离频率传递.本文的实验系统采用光强度微波调制频率传递方式.

在实际光纤链路中,受环境温度变化、机械应力等作用的影响,光信号在链路中的传输时延会产生起伏,从而导致远端恢复的信号相位也随之变化.为了消除这一影响,通常利用信号在同一光纤链路上往返传输的高度对称性,采用往返传递比对的方式来消除由外界环境带来的传输信号相位抖动^[19-20],该方法也被称为“多普勒噪声消除法”,即本地信号传至远端后,远端返回一个信号,本地端信号与远端传回的信号拍频,获得表征链路相位抖动的误差信号,再使用补偿机构对链路相位变化施加预补偿.通常有两种补偿方式,一种是电学相位补偿,即补偿机构直接作用于本地端微波信号的相位^[17];另一种是光学时延补偿,即补偿机构所包含的延迟环节直接位于光纤链路上,通过主动改变延迟环节的时延量以保持链路上的总传输时延不变^[14,21].相比电学相位补偿方法,由于时间延迟补偿的物理量相同,不会导致因为补偿而引起的信号相对相位变化,因此对于空间泄露的耦合等因素不敏感,可以期望获得更好的长期传递稳定度.

本文报道了自主研发的9.6 GHz微波频率传递系统,本系统采用光学时延补偿的方法,实现了室内50 km光纤卷轴的传递实验.

1 实验设置

实验系统结构如图1所示.系统利用50 km光纤卷轴模拟现实光纤传递链路,在链路的两端分别微波调制激光信号,并将两束已调激光信号在同一根光纤中相向传递,而后在两端分别用一个光电探测器探测解调来自另一端的微波信号.通过比对本地的微波信号与从远端返回的微波信号相位,解算出光纤链路上引入的附加噪声,以此校正补偿装置的预补偿时延量.组成补偿装置的两个组件直接作用于光纤链路,两者具有不同的响应速度,温控光纤以ns量级的大动态范围进行慢速补偿,光纤拉伸器则施加ps量级的小动态范围的快速补偿.

光纤频率传递补偿精度很大程度上受限于探测信号的对比度以及相位探测精度,光纤传递中的光纤色散是限制信号对比度的主要因素,系统中的色散补偿光纤可以抵消大部分色散,而系统的微波频率选在10 GHz附近,大幅超过一般情况下的10/100 MHz基准频率,其目的是提高相位探测精度.

本系统主要包括频率综合模块、光纤传递链路、相位噪声补偿模块以及稳定度测试模块.在本地端(NODE A)频率综合模块中,以一个100 MHz压控晶体振荡器(Voltage Controlled Crystal Oscillator, VCXO)的输出信号作为参考信号.使用一个96分频器将一个9.6 GHz介质振荡器(Dielectric Resonance

Oscillator, DRO)的信号分频,所得 100 MHz 信号与参考信号比相,再通过反馈调节,将 9.6 GHz DRO 锁相于参考信号.而在远端(NODE B)频率综合模块中,光电探测器探测到的 9.6 GHz 信号与一个 10 GHz 的介质振荡器(DRO)信号混频,所得 400 MHz 信号再经 4 分频,得到 100 MHz 信号.而后经比相和反馈调节,将另一个 100 MHz VCXO 锁相于该 100 MHz 信号.将这个 100 MHz VCXO 信号经 2 倍频,而后输入一个梳状谱发生器(comb generator)中,通过滤波得到一个 10 GHz 信号.而后把一个 10 GHz 的 DRO 锁相于该 10 GHz 信号.其中,采用差别不大的前向信号(9.6 GHz)和后向信号(10 GHz),是因为若采用相同频率的前后向信号,那么由于寄生反射的存在,在光电探测器中接收的后向信号与反射信号将无法区分,二者互相干扰,所得后向信号的信噪比将因此降低,影响补偿效果,限制传递的短期稳定性.

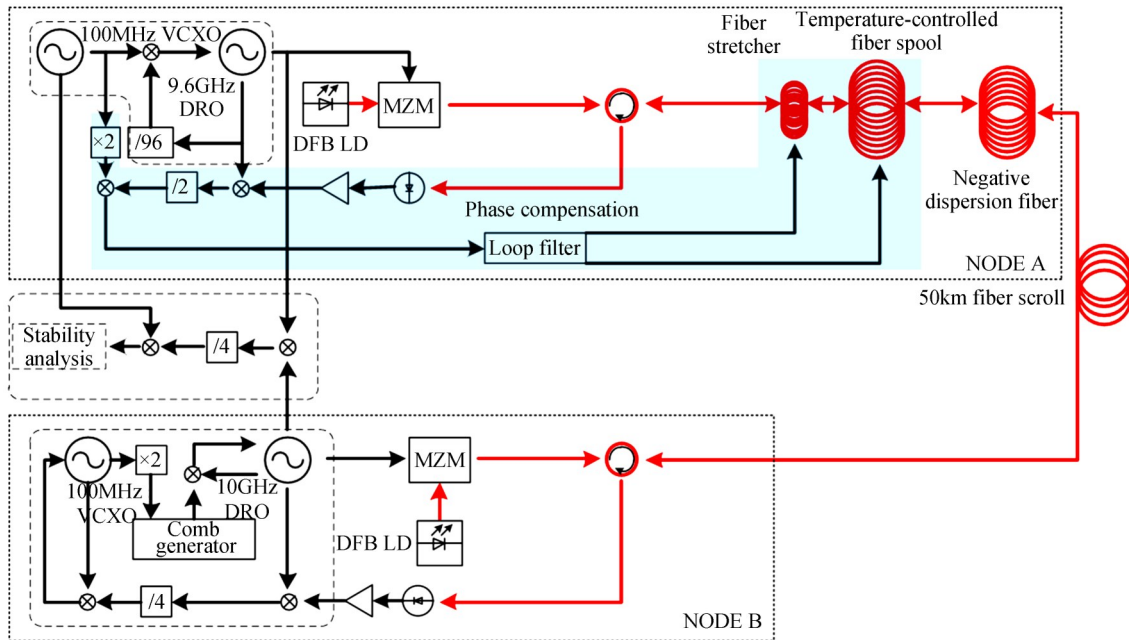


图 1 频率传递系统结构

Fig.1 Scheme of the microwave frequency dissemination system

装置中通过使用马赫-曾德尔调制器(Mach Zehnder Modulator, MZM),直接调制激光二极管(DFB LD)输出光信号($1.55 \mu\text{m}$,线宽约 1 MHz)的强度.MZM工作在偏置状态,保障其运行在最佳工作点上.调制后的 $1.55 \mu\text{m}$ 激光信号通过环形器进入光纤链路,在同一个光纤链路上相向传播,之后经由链路另一端的环形器进入光电探测器.由于两激光信号在传递过程中所经历的时延抖动相同,因此可认为两者在链路中被引入的相位噪声成比例.

为了补偿已调激光信号在传递过程中引入的相位噪声,在本地端,光电探测器探测到的 10 GHz 信号与本地端 9.6 GHz 的 DRO 信号混频,所得 400 MHz 信号再经 2 分频,得到 200 MHz 的信号.同时本地端的 100 MHz 信号经过 2 倍频,也得到 200 MHz 信号,两者混频即得到直流误差信号.由于探测到的 10 GHz 信号携带链路往返过程中所积累的相位变化,所以该直流误差信号能够表征链路上引入的相位噪声,误差信号中的较高频率成分对应快速相位抖动,而其中的低频成分则是对应缓慢的相位漂移.利用环路滤波器对误差信号进行处理,得到两路输出信号,分别用于控制两个不同的可变光纤延迟线.其中一个延迟线是商品光纤拉伸器,它的内部有一段约 60 m 的单模光纤缠绕在一个管状压电陶瓷(Tubular piezoelectric ceramics, PZT)上.当电压作用于其上时,PZT 会沿着径向伸缩,从而拉动光纤,改变其长度,由此产生的光程变化幅度约 10 ps.将光纤拉伸器置于链路中,对其施加不同频率的正弦电压信号,而后通过比对链路两端 DRO 信号的相位,可以测算出链路上的延迟变化量,从而得出其调制频率特性,即不同频率的输入电压作用下,单位电压所能产生的延迟增量随频率变化的情况,如图 2 所示.受限于链路时延,补偿系统仅能补偿频率不高于 $1/4\tau$ (1 kHz)的噪声信号,因此光纤拉伸器的谐振频率只要明显大于 1 kHz 即可.从图 2 中容易看出,在测试频率为 6 kHz 处,拉伸器响应并未达到谐振峰值,由此可知光纤拉伸器的谐振频率明显大于 1 kHz,满足实

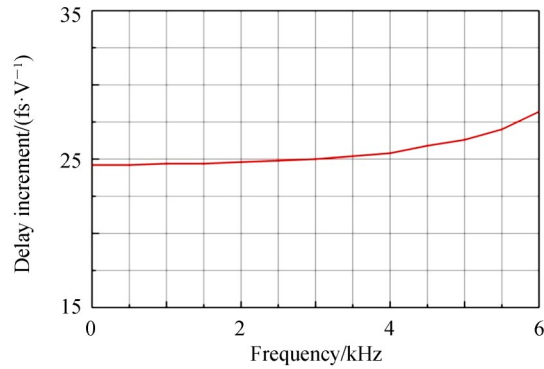


图2 光纤拉伸器的调制频率特性

Fig 2 Modulation characteristic of the fiber-stretcher over frequency

际补偿需要,其补偿精度为 24.6 fs/V.这一延迟线用于补偿光纤链路上快速且小幅度的相位抖动.第二个光纤延迟线是一个自制的温控光纤卷轴,其结构截面如图3所示.使用整块的航空铝材,用机床加工成圆柱状,并从圆柱的一端铣出一个杯状空腔,以容纳一段长约 6 km 的单模光纤.整个铝件都被隔热效果较好的橡塑海绵包裹起来,只在底部留出用于放置温控元件的窗口.温控元件下连一个大的散热片,而整个铝件都是由尼龙螺丝安装在这一散热片上的,且铝件与散热片之间用尼龙板隔开.本装置选用半导体制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)作为温控元件,可以使内部产生约 50°C 的温度变化.卷轴温度变化会造成光纤材料折射率变化以及材料热胀冷缩效应,这两种效应都会使得经过光纤的激光信号光程发生改变,从而带来延迟的增减.不过需要指出的是,相比之下,折射率变化造成的光程改变远大于材料热胀冷缩效应造成的光程变化,后者可以忽略不计.改变温控光纤内部的温度,使其在一个较小的范围(21°C~34°C)内变动,而后测试不同温度下的时延量,每 10 s 采样一次,共约 1 750 个点,即可得温控光纤卷轴所产生的时延增量随其内部温度变化的情况,如图4所示.设温度为 X ,时延为 Y ,则可以由这些数据算出二者的协方差 $\text{Cov}(X, Y)$,温度的标准差 σ_1 及时延的标准差 σ_2 ,由此可得温度与时延之间的线性相关系数 $(\text{Cov}(X, Y)/(\sigma_1\sigma_2))$ 即线性度为 0.999 76,故而可知二者具有良好的线性关系,时延随温度的变化率,即其补偿精度约为 208.62 ps/°C.这一延

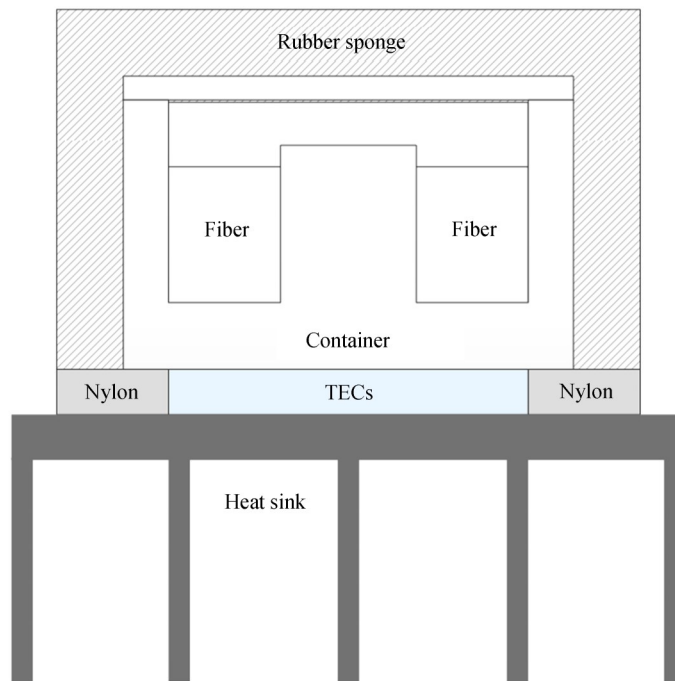


图3 温控光纤卷轴日的截面图

Fig.3 Sectional view of the temperature-controlled fiber spool

迟线用来补偿光纤链路上由于环境温度变化而产生的缓慢且大幅度的相位漂移.链路运转时,将误差信号进行比例积分处理,所得信号分为两路,一路直接控制光纤拉伸器,另一路经模/数转换后,被PID控制程序处理后,再经数/模转换而用于温控光纤延迟线的控制.

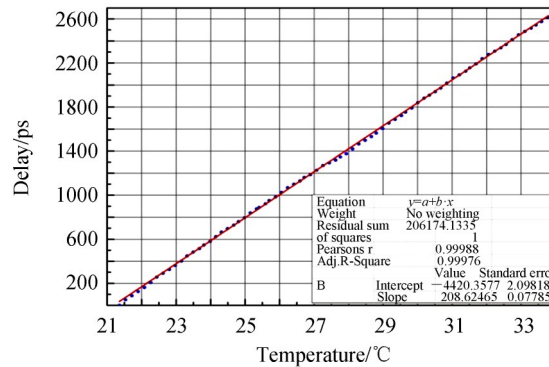


图4 温控光纤卷轴时延随温度的变化

Fig.4 Variation of the delay of the temperature-controlled fiber spool with temperature

光纤色散是导致传递信号产生附加衰减,并影响补偿性能的重要因素^[21].选取色散参数 $D = (-2\pi c\beta_2)/\lambda^2$ (单位 ps/(nm·km), 其中 β_2 为群速度色散) 来表征激光信号在光纤中的色散,那么对于本实验中使用的普通单模光纤(SMF-28),其色散约为 17 ps/(nm·km).为了尽量减少色散的影响,已报道的多个传递实验均采用了负色散光纤来补偿链路中的色散,因此本系统亦采用负色散光纤(色散约 -150 ps/(nm·km)),基本补偿了链路中的色散量.

2 实验结果

本实验采用相位比对的方法来获得频率传递稳定度.将本地端的 9.6 GHz DRO 信号与远端的 10 GHz DRO 信号混频,所得 400 MHz 信号经 4 分频后再与本地端的 100 MHz 晶振信号混频,得到反映两信号相位差的直流信号.而从这两信号的相位差变化量就能计算出链路的时延变化量,从而算出频率传递稳定度.

图 5 给出了连续四天实验系统自由运转和补偿控制下的时延变化数据.这两个时延变化是同时测量的,通过记录温控光纤卷轴内部的温度变化,再利用图 3 中温控光纤卷轴时延随温度变化的曲线,将温度变化量换算成时延变化量,从而可得自由运转时的链路时延变化量.图中可见自由运转时的链路时延变化总量约 3.7 ns,这个时间延迟变化量超过了法国 SYRTE 实验室 2010 年报道的 86 km 实地光纤的两倍,而补偿系统闭环时的链路时延变化量约 0.54 ps.实际运转时温控光纤延迟线的温度变化范围约 17.7°C,光纤拉伸器产生的延迟变化量小于 0.5 ps,均明显小于其最大工作范围.这些数据显示补偿系统能够有效地抑制链路时延变化.我们认为 1 日附近曲线有跳变现象和 3 日后时延量呈振荡趋势主要与实验室温度变化相关.本实验系统

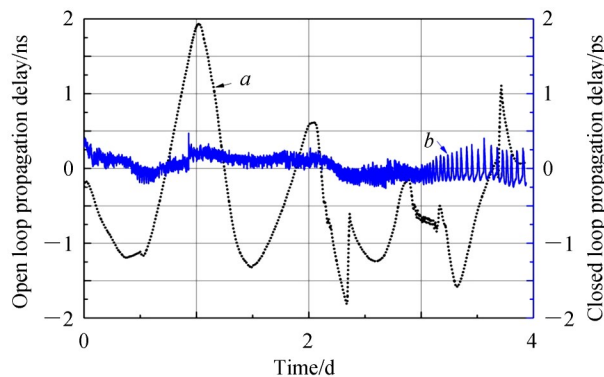


图5 光纤链路时延随时间的变化

Fig.5 Temporal behavior of the propagation delay

处在一个开放的实验室中,人员往来频繁,且由于实验室温度控制系统的性能有限,在实验室门频繁开关以致室内外空气加速对流的情况下,室内温度振荡幅度加大,从而造成了所测时延量的振荡或者快速变动。

图6是由系统信号传递延时数据得到的Allan方差即频率传递稳定度.用光衰减器代替光纤链路,得到系统噪底为 $2 \times 10^{-15}/s$, $2.8 \times 10^{-18}/32768s$.系统补偿后的频率传递稳定度为 $4.38 \times 10^{-15}@1s$, $2.80 \times 10^{-18}@65.5 \times 10^3s$.系统自由运转时的频率传递稳定度为 $5.40 \times 10^{-14}@1s$.

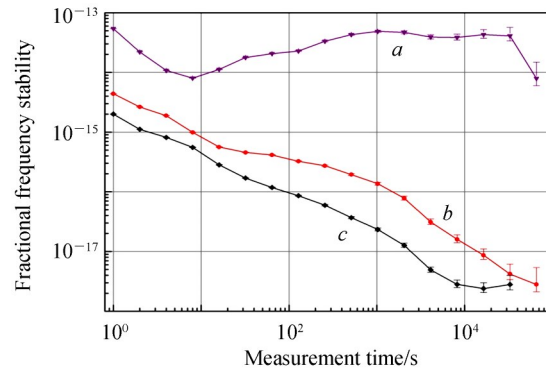


图6 传递系统频率稳定度

Fig.6 Fractional frequency stability of the frequency dissemination system

得益于前向信号与后向信号采用不同的频率,避免了两信号之间的干扰,有效提升了短期稳定度的指标,使得本实验的秒级传递稳定度,优于2012年清华大学的80 km 光纤微波频率传递实验和2014年解放军理工大学25.2 km 传递结果^[17,22].清华大学实验系统中的前后向信号频率一致,两信号之间容易形成串扰,可能是制约其短期稳定度的主要因素.解放军理工大学的实验采用的反馈补偿方法响应速度较慢,不能及时有效地补偿快速变化的相位噪声,因此其秒级稳定度指标不高.本实验的长期稳定度,并没有保持 $1/\tau$ 的斜率下降,主要原因是实验工程化设计不够,光纤器件尾纤过长,光路对称性不够好,以及实验系统体积大,不够紧凑,从而导致环外温度系数较大.原则上,如果可以通过降低环外温度系数和温度控制等手段,可以在日稳定度范围内保持 $1/\tau$ 斜率^[14],对应约为 6×10^{-20} .

3 结论

利用光学时延补偿法,进行了光纤噪声的实时补偿;50 km 光纤链路频率传递实验的传递稳定度达到了 $4.38 \times 10^{-15}/s$, $2.80 \times 10^{-18}/65.5 \times 10^3s$;这一结果明显优于目前的基准量子频标性能,能够满足目前,乃至将来一段时间的时间频率传递需求.实验结果明显体现了色散补偿、往返变频设计等措施对短期稳定度指标的提升效果,目前短期稳定度指标主要受限于不对称光纤传递部分的温度漂移影响.

参考文献

- [1] CHOU C W, HUME D B, ROSENBERG T, *et al.* Optical clocks and relativity [J]. *Science*, 2010, **329**(5999): 1630-1633.
- [2] YCAS G G, QUINLAN F, DIDDAMS S A, *et al.* Demonstration of on-sky calibration of astronomical spectra using a 25 GHz near-IR laser frequency comb[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6): 6631-6643.
- [3] DIDDAMS S A, HOLLBERG L, MBELE V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. *Nature*, 2007, **445**(7128): 627-630.
- [4] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, *et al.* Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(6): 351-356.
- [5] BAUCH A, ACHKAR J, BIZE S, *et al.* Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10^{-15} uncertainty level [J]. *Metrologia*, 2005, **43**(1): 109.
- [6] PIESTER D, BAUCH A, BREAKIRON L, *et al.* Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of international atomic time [J]. *Metrologia*, 2008, **45**(2): 185-198.
- [7] GUÉNA J, ABGRALL M, ROVERA D, *et al.* Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, **59**(3): 391-409.
- [8] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, *et al.* First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. *Metrologia*, 2014, **51**(3):

- 174-182.
- [9] MA L S J P, YE J. Delivering the same optical frequency at 2 places—accurate cancellation of phase noise introduced by an optical-fiber or other time-varying path[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(21): 1777-1779.
- [10] DAUSSY C, LOPEZ O, AMY-KLEIN A, *et al.* Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} [J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(20): 203904.
- [11] FOREMAN S M, HOLMAN K W, HUDSON D D, *et al.* Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**(2): 021101.
- [12] LIANG Shuang-you, ZHANG Jian-kang, LI Li-zhong, Time-frequency transfer via optical fiber and phase compensation [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2008, (2): 147-156.
梁双有, 张健康, 李立中. 光纤时间传输及相位补偿[J]. 时间频率学报, 2008, (2): 147-156.
- [13] 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—Optical Physics*, 2008, **25**(12): 2029-2035.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] MARRA G, MARGOLIS H S, RICHARDSON D J. Dissemination of an optical frequency comb over fiber with 3×10^{-18} fractional accuracy[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2): 1775-1782.
- [17] WANG B, GAO C, CHEN W L, *et al.* Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 556.
- [18] NING B, ZHANG S Y, HOU D, *et al.* High-precision distribution of highly stable optical pulse trains with 8.8×10^{-19} instability[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5109.
- [19] VESSOT R F C, LEVINE M W, MATTISON E M, *et al.* Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser[J]. *Physical Review Letters*, 1980, **45**(26): 2081-2084.
- [20] MA L S, JUNGNER P, YE J, *et al.* Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path[J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(21): 1777-1779.
- [21] 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]. *The European Physical Journal D*, 2008, **48**(1): 35-41.
- [22] LI De-long, LU Lin, ZHANG Bao-fu, *et al.* New microwave frequency dissemination method over optical fiber based on the phase fluctuation compensated at remote sites [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(7): 28-32.
李得龙, 卢麟, 张宝富, 等. 基于相位波动远端补偿的微波频率光纤传递新方法[J]. 光学学报, 2014, **34**(7): 28-32.