

doi:10.3788/gzxb20154407.0706003

9.2 GHz 频率信号 50 km 光纤传递

孟森^{1,2}, 郭文阁¹, 赵文宇², 闫露露², 张旋¹, 姜海峰², 张首刚²

(1 西安石油大学 理学院, 西安 710065)

(2 中国科学院国家授时中心 时间频率重点实验室, 西安 710600)

摘 要: 基于相位共轭稳相方法研制微波频率传递系统, 简化传递系统光路, 实现光纤微波频率传递链路噪声的实时补偿, 完成 50 km 光纤 9.2 GHz 超稳微波频率传递实验. 该系统采用模块化设计, 由微波参考信号生成模块、相位补偿模块、光纤传递模块组成. 在实验室环境下经过 9 d 的连续测试, 结果表明, 自由运转时频率传递的稳定度(标准阿伦方差)为 $4.2\text{E}-13@1\text{ s}$, $4.3\text{E}-14@1\text{ d}$; 补偿后频率传递系统的稳定度达到 $5.8\text{E}-14@1\text{ s}$, $1.9\text{E}-17@1\text{ d}$. 该系统能够满足百公里范围内的超稳微波原子钟频率传递需求.

关键词: 微波频率; 光纤; 相位共轭; 频率传递

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0706003-5

9.2 GHz Microwave Frequency Transmission via 50 km Optical Fiber

MENG Sen^{1,2}, GUO Wen-ge¹, ZHAO Wen-yu², YAN Lu-lu², ZHANG Xuan¹,
JIANG Hai-feng², ZHANG Shou-gang²

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

(2 Key laboratory of Time and Frequency Standards, National Time Service Center (NTSC),
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: Based on the method of phase conjugation stabilization, a real-time noise cancellation system was proposed. The system which is a modular structure, is composed of microwave reference signal generating, phase compensation and optical fiber transmission module. The experimental results of our ultra-stable 9.2 GHz frequency transfer via a 50 km fiber spool were shown. In 9 days laboratory measurement, the system exhibits frequency transfer stabilities (standard Allan deviation) of $4.2\text{E}-13@1\text{ s}/4.3\text{E}-14@1\text{ day}$ for free-running and $5.8\text{E}-14@1\text{ s}/1.9\text{E}-17@1\text{ day}$ for noise-compensated link. This system matches the requirement of 100 km scale frequency transfer of ultra-stable microwave atomic clocks.

Key words: Microwave frequency; Fiber link; Stabilization by phase conjugation; Frequency transmission

OCIS Codes: 060.5625; 120.7000; 060.2310; 070.5040

0 引言

近年来时间频率技术发展迅速, 时间频率基准(铯原子喷泉钟)的稳定度和准确度均大大提高, 微波原子钟的稳定度已经进入 $\text{E}-16$ 量级^[1-2], 新型的光频原子钟稳定度进入 $\text{E}-18$ 量级^[3-4]. 这些进步推动了基础物理和精密测量等领域的发展^[5-8], 同时也对高精度时间频率传递提出了更高的要求. 传统的基于卫星的

GPS 共视法时频传递系统和卫星双向时间频率传递系统 (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT) 的稳定度只能达到 $1\text{E}-15@1\text{ d}$ 的水平^[9-10], 不能满足当前高性能原子钟的时间频率传递和比对需求. 中科院国家授时中心承担着我国标准时间(北京时间)的保持和发布任务, 而发播台(陕西蒲城)距离时间保持平台(陕西临潼)有约 77 公里的直线距离. 中国科学院时间频率基准重点实验室研制的守时

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 91336101, 61127901)和西部之光重点项目(No. 2013ZD02)资助

第一作者: 孟森(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为长距离光纤超稳微波频率传递. Email: ms142857@sina.com

导师(通讯作者): 郭文阁(1967-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电子学. Email: wguo@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2015-01-15; 录用日期: 2015-03-18

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

型铯原子喷泉钟已研制完成,即将投入使用,将铯原子喷泉钟频率(E-16量级稳定度)传递到发播台需要频率传输链路日稳定度达到E-17量级.这需要采取新型的高准确度频率远程传递手段.

光纤作为一种优良的传输介质,具有损耗低和噪声小等特点,广泛应用于通讯信号的传输.得益于通讯产业的发展,目前光纤网络已经连接到世界的各个角落,这给高准确度时间频率传递提供了优良的硬件平台^[11].美^[12-13]、法^[14-16]、德^[17]、英^[18]、中^[19-20]等国科学家先后利用光纤实现了高准确度远程频率传递.光纤频率传递根据传递的信号不同大致可分为三类:微波强度调制频率传递^[14-15,19]、激光载波频率传递^[12,16-17]和飞秒光脉冲传递^[18,20].由于光纤色散效应的限制,只有前两种传递方式适用于远程频率传递.激光载波频率传递的准确度最高,千公里的频率传递日稳定度可达E-19量级,但传递微波频率时需要光梳进行频率转换,因此结构较为复杂,成本较高;微波强度调制频率传递的准确度略差,但结构简单,成本低廉,百公里频率传递的日稳定度可达E-19量级.综合考虑,选取微波强度调制频率传递的方式实现微波钟信号的高准确度传递.

本文介绍了自主研发的9.2 GHz微波强度调制频率传递系统并获得了经50 km室内光纤传递的结果.实验表明系统的日频率传递稳定度可达2E-17,可以满足铯原子喷泉钟频标传递需求.

1 理论

当加载标准微波频率的光信号沿光纤传递时,光纤受到外界环境(如温度、湿度、应力、震动等)变化的影响从而使得光载波传递的时间延迟发生改变,导致标准频率传递稳定度恶化.采用测量往返传递信号的相位变化,并进行实时相位补偿,可以大幅提高传输频率信号的稳定度^[11].这种相位补偿是建立在环境噪声引起的多普勒频移效应对往返信号基本相同的前提下.尽管有些噪声效应不具备这种对称性,如偏振模色散效应(Polarization mode dispersion, PMD)但其影响很小^[15],故不在本文讨论范围.

往返相位补偿的方式按照补偿执行部件的位置不同可分为两种.一种是直接在光纤传递链路上进行时间延迟补偿^[14-15];另一种是只补偿发射信号相位^[19,21].直接在光纤链路上进行补偿时,主要使用光纤延迟线来补偿相位噪声的短期跳动,使用温控光纤卷轴来补偿相位噪声的长期漂移,这就使得光波传递模块更为复杂,同等情况下需要更多的光放大器,成本较高;只补偿发射信号相位时,相位补偿的实现依靠电路系统完成,使得光纤传递模块结构简单,有效降低了成本.本文采用基于相位共轭稳相的发射信号相位补偿方法

来实现链路的噪声补偿^[21],结构如图1.

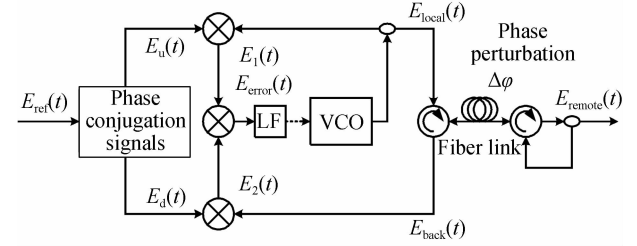


图1 相位共轭稳相方法

Fig. 1 Schematic of phase stabilization by phase conjugation
本地参考信号为

$$E_{\text{ref}}(t) = \sin(\omega_{\text{ref}}t + \varphi_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中 ω_{ref} 是本地参考信号的频率, φ_{ref} 是本地参考信号的初始相位.本地参考信号经共轭信号生成模块生成关于本地参考信号共轭的信号对,高频参考信号为

$$E_u(t) = \sin[(\omega_{\text{ref}} + \omega_0)t + (\varphi_{\text{ref}} + \varphi_0)] \quad (2)$$

低频参考信号为

$$E_d(t) = \sin[(\omega_{\text{ref}} - \omega_0)t + (\varphi_{\text{ref}} - \varphi_0)] \quad (3)$$

式中 ω_0 是共轭信号生成部件中稳定的低频信号源的频率, φ_0 是该低频信号源的初始相位.受控微波源产生的本地发射信号为

$$E_{\text{local}}(t) = \sin(\omega_{\text{local}}t + \varphi_{\text{local}}) \quad (4)$$

式中 ω_{local} 是本地发射信号的频率,且有 $\omega_{\text{ref}} = \omega_{\text{local}} + \omega_\delta$ (ω_δ 为很小的误差频率,当环路锁定时 $\omega_\delta = 0$),其中 φ_{local} 是本地发射信号的初始相位.远端信号为

$$E_{\text{remote}}(t) = \sin(\omega_{\text{local}}t + \varphi_{\text{local}} + \Delta\varphi) \quad (5)$$

式中 $\Delta\varphi$ 是微波频率信号沿光纤单程传递引入的相位扰动.返回信号引入同样的相位扰动为 $\Delta\varphi$,故可表示为

$$E_{\text{back}}(t) = \sin(\omega_{\text{local}}t + \varphi_{\text{local}} + 2\Delta\varphi) \quad (6)$$

本地发射信号与高频参考信号混频获得低频误差信号

$$E_1(t) = \cos[(\omega_0 + \omega_\delta)t + (\varphi_{\text{ref}} + \varphi_0 - \varphi_{\text{local}})] \quad (7)$$

返回信号与低频参考信号混频获得低频误差信号

$$E_2(t) = \cos[(\omega_0 - \omega_\delta)t + (\varphi_{\text{local}} + 2\Delta\varphi - \varphi_{\text{ref}} + \varphi_0)] \quad (8)$$

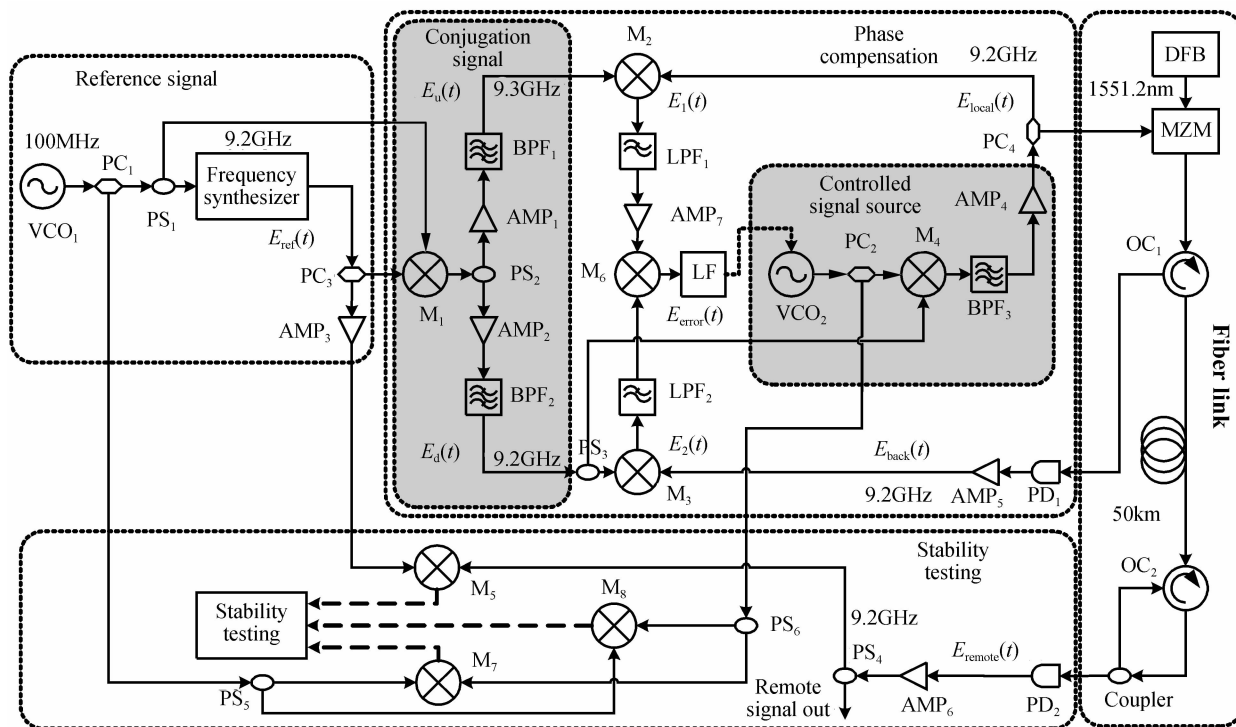
误差信号 $E_1(t)$ 与 $E_2(t)$ 再次混频得到环路误差信号

$$E_{\text{error}}(t) = \sin[2\omega_\delta t + 2(\varphi_{\text{ref}} - \varphi_{\text{local}} - \Delta\varphi)] \quad (9)$$

当系统环路锁定时,应满足稳态条件 $E_{\text{error}}(t) = 0$,此时 $\omega_\delta = 0$,即 $\omega_{\text{ref}} = \omega_{\text{local}}$.本地发射信号的相位为 $\varphi_{\text{local}} = \varphi_{\text{ref}} - \Delta\varphi$,远端信号的相位为 $\varphi_{\text{remote}} = \varphi_{\text{ref}}$,返回信号的相位为 $\varphi_{\text{back}} = \varphi_{\text{ref}} + \Delta\varphi$,故有 $E_{\text{remote}}(t) = E_{\text{ref}}(t)$,实现了微波频率信号的稳定传递.

2 实验系统

本文实验系统包括微波参考信号生成模块、相位补偿模块、光纤传递模块,其中相位补偿模块又包含有共轭信号生成、受控微波源生成两个子模块.为了评估频率传递稳定度的稳定度测试模块,如图2.



注: VCO: 晶体振荡器; PC: 耦合器; PS: 功分器; M: 混频器; AMP: 放大器; BPF: 带通滤波器; LPF: 低通滤波器; LF: 环路滤波器; DFB: 分布反馈式激光器; MZM: 马赫曾德调制器; OC: 光环形器; PD: 光电探测器; Coupler: 光耦合器。

图 2 基于相位共轭稳相方法的微波频率传递示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microwave frequency transmission system based on the method of stabilization by phase conjugation

微波参考信号生成模块的功能是生成一个锁定在 100 MHz 铯原子喷泉钟信号上的 9.2 GHz 本地参考信号, 主要由 Hittite 公司的 HMC767LP6CE 型 8.45 GHz~9.85 GHz 超低相噪频率综合器实现, 使用 100 MHz 超低相噪晶体振荡器 (VCO₁, 相位噪声为 -100 dBc/Hz@10 Hz; -130 dBc/Hz@100 Hz) 代替铯原子喷泉钟信号来作为频率综合器的参考信号. VCO₁ 的输出信号, 依次经耦合器 (PC₁)、功分器 (PS₁) 共分成三路, 其中 PC₁ 耦合端信号用于频率稳定度测量; PS₁ 两路输出信号分别用作频率综合器的参考信号和共轭信号生成模块的低频信号源. 频率综合器输出信号经耦合器 (PC₃) 分成两路: 耦合端信号用作频率稳定度测量; 输出端输出信号作为相位补偿模块的本地参考信号输入.

相位补偿模块的功能是补偿光纤引入的相位扰动, 包含有共轭信号生成、受控微波源两个子模块. 共轭信号生成模块由混频器 M₁ 混合频率综合器的 9.2 GHz 信号与 VCO₁ 的 100 MHz 信号产生两个共轭的参考信号: 高频参考信号 $E_0(t)$ (9.3 GHz)、低频参考信号 $E_d(t)$ (9.1 GHz). 受控微波源模块由混频器 M₄ 混合受控的 100 MHz 超低相噪晶体振荡器 (VCO₂) 输出信号与 9.1 GHz 低频参考信号生成本地发射信号. 本地发射信号经耦合器 (PC₄) 分成两路: 输出端信号 (14.2 dBm) 作为微波调制信号; 耦合端信号

与高频参考信号混频获得低频误差信号 $E_1(t)$. 混频器 M₆ 混合两个低频误差信号 $E_1(t)$ 与 $E_2(t)$ 获得环路的误差信号 $E_{error}(t)$. 环路误差信号经环路滤波器 (LF) 比例积分运算后作为 VCO₂ 的电压控制端控制信号. 锁定后, $E_{error}(t) = -0.06$ mV, 满足相位共轭稳相法的条件, 有 $E_{remote}(t) = E_{ref}(t)$, 可以有效地补偿光纤频率传递中引入的相位扰动.

光纤传递模块的功能是将 9.2 GHz 微波信号加载到激光上并通过光纤完成本地与远端的信号传递, 主要由带宽 1 MHz、波长 1551.2 nm 的分布反馈式激光器 (DFB)、马赫曾德强度调制器 (MZM)、光纤环形器 (OC₁、OC₂)、50 km 光纤、50:50 的光纤耦合器 (Coupler) 组成. 9.2 GHz 本地发射信号经 MZM 对 DFB 输出激光进行强度调制, 注入光纤环形器 (OC₁), 并经 50 km 光纤、光纤环形器 (OC₂) 传递到远端. 在远端经光纤耦合器 (Coupler) 分成两路, 一路接入光纤环形器 (OC₂), 经过 50 km 光纤卷轴、光纤环形器 (OC₁) 回到本地, 经光电探测器 (PD₁) 得到返回信号 $E_{back}(t)$, 并将 $E_{back}(t)$ 接入相位补偿系统, 整个传递系统实现闭环; 另一路经光电探测器 (PD₂) 得到远端信号 $E_{remote}(t)$. 远端信号经功分器 (PS₄) 分成两路, 一路用作系统输出; 另一路用作频率稳定度测量.

3 实验结果

频率稳定度测试的方法有两种: 一种是采用频率

计数器直接测得频率稳定度;另一种是采用相位对比的方法间接获得频率稳定度.前一种方法测试结构简单,但受限于频率计数器的工作方式与性能,频率计数器的自身缓存可以存储 10 万组数据,这无法满足微波频率传递系统频率稳定度测试几十万组数据的需求,若采用 LabVIEW 等采集软件进行数据采集会导致采集时间间隔由 1s 延迟至 1.3s,对数据的分析造成困扰.而后一种方法结构较为复杂需要使用混频器或鉴相器获得代表信号相位差的电压信号,使用万用表对电压信号进行采集,这一方法很好地解决了采集时间间隔延迟的问题.综合考虑,本文采用相位对比的方法来获得频率稳定度.

系统补偿后稳定度通过混频器 M_5 测量本地参考信号 $E_{ref}(t)$ (PC_3 耦合端信号)与远端信号 $E_{remote}(t)$ (PS_1 一路输出信号)之间的相位差计算得到.系统自由运转稳定度通过混频器 (M_7 、 M_8) 测量参考信号源 VCO_1 的 (PC_1 耦合端) 输出信号与受控信号源 VCO_2 的 (PC_2 输出端) 输出信号的相位差计算得到.系统噪声底的测试是使用 10 dB 光纤衰减器取代 50 km 光纤,并保持其他参量不变,经由混频器 M_5 测试获得的,连续测试时间为 4 d.

本文实验使用三台 Keithley 2010 型七位半低噪声数字万用表分别测量自由运转时相位差(混频器 M_7 、 M_8 输出电压)与系统补偿后的相位差(混频器 M_5 输出电压).实验连续进行了 9 d 的数据测试采集,得到系统自由运转状态下与补偿后的光纤频率传递的时间延迟变化,如图 3 所示.

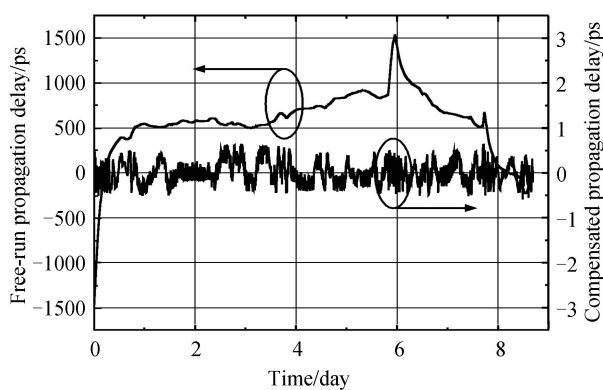


图 3 50 km 光纤频率传递时间延迟

Fig. 3 The propagation delay of Microwave frequency transmission via 50 km fiber

系统自由运转时光纤频率传递的时间延迟变化范围为 3 ns,系统补偿后的光纤频率传递的时间延迟变化范围缩小至 1.2 ps.对图 3 的数据进行频率稳定度计算,得到图 4.

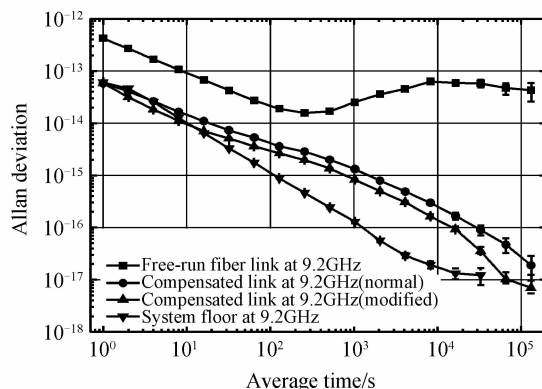


图 4 9.2 GHz 微波频率经 50 km 光纤传递的频率稳定度
Fig. 4 The frequency stability of 9.2 GHz Microwave frequency transmission via 50 km fiber

系统自由运转时经 50 km 光纤传递的频率稳定度(方块曲线)为 $4.2E-13@1\text{ s}$, $4.3E-14@1\text{ d}$;系统补偿后的经 50 km 光纤传递的频率稳定度(圆点曲线)为 $5.8E-14@10000\text{ s}$, $1.9E-17@1\text{ d}$;系统补偿后的经 50 km 光纤传递的频率修正阿伦方差(上三角曲线)为 $5.8E-14@1\text{ s}$, $7.1E-18@1\text{ d}$;系统噪声底为 $5.8E-14@1\text{ s}$, $1.3E-17@1\text{ s}$.可以看到系统有效地补偿了由光纤环路引入的相位扰动提高了频率传递的稳定度.此外,频率传输的短期稳定度受限于系统内部的微波泄漏导致的串扰.通过屏蔽手段可以大幅抑制这一效应,实验表明,系统的噪声底可以降低至 $E-15/\text{s}$.

4 结论

本文介绍了基于相位共轭稳相方法的光纤远程微波频率传递系统结构和实验结果,实现了 9.2 GHz 微波频率信号 50 km 的光纤稳定传递,传输稳定度达到: $5.8E-14@1\text{ s}$ 和 $1.9E-17@1\text{ d}$,有效地补偿了由光纤环路引入的相位扰动,提高了频率传递的稳定度,可直接传递铯原子喷泉钟输出的超稳 9.2 GHz 微波频率.研究表明,采用相位共轭稳相方法和往返相位补偿技术,可以有效地补偿光纤环路噪声,是一种可行的实现光纤远程微波频率传递的技术.

参考文献

- [1] GUENA 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): 391-410.
- [2] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, *et al.* First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. *Metrologia*, 2014, **51** (3): 174-182.
- [3] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, *et al.* An atomic clock with $10(-18)$ instability[J]. *Science*, 2013, **341** (6151): 1215-1218.

- [4] 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.
- [5] CHOU C W, HUME D B, ROSEN BAND T, *et al.* Optical clocks and relativity[J]. *Science*, 2010, **329**(5999): 1630-1633.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] LUTES G F. 12th Ann. Precise time and time interval appl. and planning meeting [C]. Pasadena: In NASA. Goddard Space Flight Center Proc. , 1981, 663-680.
- [10] 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.
- [11] LIANG Shuang-you, LI Li-zhong, ZHANG Jian-kang, Time-frequency transfer via optic fiber and phase compensation [J]. *Journal of time-frequency*, 2008, **31**(02): 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, **31**(02): 147-156.
- [12] MA L S, JUNGNER P, YE J, *et al.* 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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-Lasers and Optics*, 2010, **98**(4): 723-727.
- [16] JIANG H, KEFELIAN 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] PRIMAS L, LUTES G, SYDNOR R. Proceedings of the 42nd annual frequency control symposium [C]. New York: IEEE, 1988, 478-484.