

60 km 实地光纤链路光频传输

方鹏程^{1,2}, 蔡桢荻^{1,2}, 孙焕尧¹, 王艳¹, 徐晏琪¹, 陈群峰^{1*}¹中国科学院精密测量科学与技术创新研究院波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;²中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049

摘要 报道了在中国科学院精密测量科学与技术创新研究院与华中科技大学之间往返 60 km 的光纤链路上进行相干光学频率传输的工作。以波长为 1560 nm 的超稳定激光作为传输光, 通过使用声光调制器主动补偿由光纤引入的相位噪声, 在 1 Hz 傅里叶频率实现了 67 dB 的噪声抑制。系统采用全光纤结构的端到端传递, 并利用追踪振荡器抑制由光纤偏振变化引起的信号幅度起伏, 实现了全天不间断的连续运行。经过 4 d 的数据积累, 测得光纤链路引入的相对频率偏差为 10^{-20} 量级, 1 s 频率稳定度为 2.4×10^{-17} , 1000 s 稳定度为 6.6×10^{-20} , 65000 s 稳定度为 6.5×10^{-21} 。该传输稳定度满足 60 km 的光钟远程比对需求。

关键词 光纤光学; 光纤链路; 光学频率传输; 光钟比对; 光纤噪声; 计量学

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2306006

Optical Frequency Transfer over 60 km Urban Telecom Fiber Link

Fang Pengcheng^{1,2}, Cai Zhendi^{1,2}, Sun Huanyao¹, Wang Yan¹, Xu Yanqi¹, Chen Qunfeng^{1*}¹State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China;²School of Physical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper demonstrates the coherent optical frequency transfer over a 60 km fiber link between Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences and Huazhong University of Science and Technology. A 1560 nm ultra-stable laser is used as the transfer laser, and an acousto-optic modulator is employed to actively compensate for the phase noise introduced by optical fibers to achieve noise suppression of 67 dB at 1 Hz Fourier frequency. The end-to-end transfer of the all-fiber structure is adopted by the system, and tracking oscillators are used to suppress the amplitude fluctuation of the beating signals caused by fiber polarization change. In this way, the system can operate without interruption all day. The optical frequency offset introduced by the link is at the order of magnitude of 10^{-20} in the four-day measurement, and the frequency instability is measured to be 2.4×10^{-17} in 1 s, 6.6×10^{-20} in 1000 s, and 6.5×10^{-21} in 65000 s. This result demonstrates the system is applicable for remote optical clock comparison.

Key words fiber optics; fiber link; optical frequency transfer; optical clock comparison; fiber noise; metrology

1 引言

现今多种光钟的频率稳定度和不确定度已经达到 10^{-18} 量级^[1-2], 有望成为下一代时间频率基准, 并在基础物理研究、计量学、大地测量等领域发挥重要作用^[3-5]。如何对分布在不同地区实验室中的光钟进行比对, 是光钟实际应用面临的重要问题。这需要首先

将光钟频率准确传输分发到远程用户端, 然后进行间接比对。利用光纤通信网络, 可以实现微波频率和光学频率的远距离传输, 且其传输稳定度优于传统的借助卫星的时间频率传输。美国、欧洲国家的研究机构已经广泛开展了基于光纤光频传输的光钟比对实验研究^[6-8]; 欧洲国家的研究人员进行了数百千米到上千千米光纤上的光频传输, 并且在 1415 km 实地光纤实现

收稿日期: 2022-03-18; 修回日期: 2022-04-24; 录用日期: 2022-06-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0304403, 2020YFA0309801)、中国科学院战略性先导科技专项 B 类(XDB21010300, XDB21030100)、国家自然科学基金重大研究计划(91636110, U1738141)

通信作者: *qfchen@apm.ac.cn

了不确定度为 5×10^{-17} 的光钟比对^[9], 最远在 2220 km 光纤上实现了稳定度为 7×10^{-17} 的光频比对^[10]。国内的科研单位也逐步开展了光频传输的研究工作: 2015 年, 华东师范大学在 50 km 长的盘绕光纤上实现了 1 s 稳定度为 2×10^{-17} 的光频传输, 并在总长 82 km 的实地-盘绕级联光纤链路上实现了 4×10^{-20} 的 10000 s 传输稳定度^[11-12]; 2016 年中国科学院国家授时中心的研究人员在 112 km 实地光纤实现了 1 s 稳定度为 2×10^{-16} 、10000 s 稳定度为 4×10^{-20} 的光频传输^[13], 2017 年在 210 km 通信光纤链路实现了 10000 s 稳定度为 5×10^{-17} 的光频传输^[14]。

位于武汉的中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(以下简称“精测院”)和华中科技大学引力中心(以下简称“引力中心”)目前在进行基于不同原子体系的光钟研究工作^[15-19]。为了对两个实验室之间的光钟进行比对, 需要借助光纤链路在两个实验室之间建立相干光学频率连接。本文介绍了精测院进行的光纤链路光频传输研究进展。依托连接两个实验室的商用通信光纤链路, 在 60 km 长的实地光纤上实现了端到端的光学频率传输。针对光纤偏振不稳定的问题, 通过引入追踪振荡器稳定信号幅度, 使系统实现了运行率为 100% 的长期不间断运行。经测试, 1 s 光频传输稳定度达到 2.4×10^{-17} , 1000 s 光频传输稳定度为 6.6×10^{-20} , 65000 s 光频传输稳定度为 6.5×10^{-21} , 传输后引入的相对频率偏差为 $-4 \times 10^{-21} \pm 3.4 \times 10^{-20}$, 满足当前光钟比对的需求。

2 实验方案与装置

2.1 实验原理

激光在光纤中传输时, 光纤受到振动、温度波动等环境因素的影响, 折射率和光程长度会有变化, 导致相位产生随机抖动。附加的相位噪声导致激光线宽展宽, 从而降低了激光频率的准确性和稳定性。利用光纤链路进行远程光学比对时, 需要对光纤链路引入的

噪声进行反馈补偿。

光纤链路的噪声补偿方案主要有两种: 一种是 1994 年 Ma 等^[20]提出的基于源端反馈补偿的光纤噪声抑制方案; 另一种是 2014 年意大利 Calosso 等^[21]提出的双向传输光学相位噪声共模抵消方案。国内外的相关研究已经证明, 这两种方案都能在 10^{-20} 精度水平实现光频比对。对于当前精测院和引力中心之间的光钟比对, 选取源端反馈补偿方案, 将本地光钟的频率高保真地传输到远端实验室进行比对。

由于光纤路径变化引起的噪声与激光的传播方向无关, 因此激光在整个链路中正向与反向传播引入的相位噪声近似相等^[21]。相位噪声反馈补偿的基本原理是: 本地端激光(频率为 ν)经过声光调制器(AOM)后频率被移动 f_1 ; 经光纤链路传输到远端后, 光纤引入的相位噪声所导致的频率抖动为 Δf , 输出激光的频率为 $\nu + f_1 + \Delta f$; 远端的部分传输光经反射后原路返回, 到达本地时包含两倍的链路频率噪声和两次 AOM 移频, 激光频率为 $\nu + 2f_1 + 2\Delta f$ 。返回光与本地激光拍频, 得到往返的频率差为 $2f_1 + 2\Delta f$; 与参考信号 f_{ref} 鉴相得到噪声信息, 经过伺服反馈到 AOM, 调制 f_1 并将拍频的相位锁定到 f_{ref} 上, 实现 $2f_1 + 2\Delta f - f_{\text{ref}} = 0$ 。这时远端的输出激光频率为 $\nu + f_1 + \Delta f = \nu + f_{\text{ref}}/2$ 。由于微波参考频率的抖动远小于光频, 可以忽略参考频率引入的频率不稳定性, 从而实现将超稳激光的光频传输到远端。

2.2 实验装置

精测院-引力中心两个实验室间的直线距离约为 6.7 km, 由 4 条独立的商用通信光纤链路连接, 每条链路的长度约为 30 km。为了准确评估光频在光纤中传输前后的指标, 对发射端和接收端的激光信号进行拍频测量, 以评估光纤链路传输的剩余频率不稳定性。实验中将其中两条链路在引力中心一端对接, 构成一条全长为 60 km、起点与终点均位于精测院实验室的光纤链路。实验装置如图 1 所示。

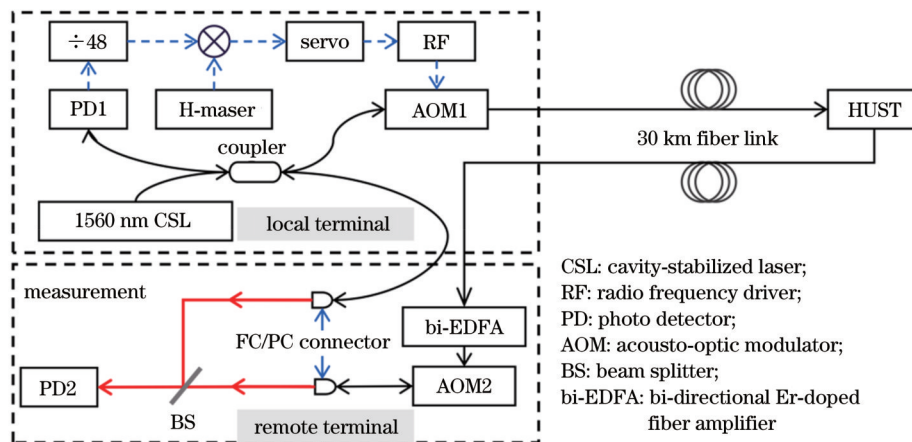


图 1 60 km 光纤链路光频传输实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup for optical frequency transfer over 60 km fiber link

实验使用波长为 1560 nm 的商用光纤激光器作为光源,通过 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频方法将频率锁定在一套长为 10 cm 的法布里-珀罗腔上,产生窄线宽、高稳定度的传输光。传输链路使用全光纤结构,不同光纤器件之间由 FC/APC (angled physical contact) 光纤接头连接,以减少端面反射。窄线宽激光经过一个 2×2 光纤分束器被分为两束,其中一束激光连接到一根 FC/APC 转 FC/PC (physical contact) 接头的光纤跳线,FC/PC 的平面光纤端面会将部分激光原路返回,作为光纤噪声补偿的参考,其余部分激光输出到自由空间使用;另一束激光输出经过 AOM1 移频(工作频率 $f_1 = 40$ MHz)后,进入 60 km 光纤链路。激光到达远端后,通过 AOM2 进行二次移频(工作频率 $f_2 = 200$ MHz)。AOM2 的输出也通过 FC/PC 光纤接头端面将部分激光反射后返回。为了产生足够高的反射光功率来抵御链路中的衰减,对远端的光纤输出端面进行镀膜,反射率为 50%。AOM2 可以通过移频将远端参考面的反射信号与光纤背向反射及链路节点的反射区别开。光纤链路中有较多中间节点,传输中功率损耗较大,60 km 单程损失约为 30 dB。为了保证返回到本地的激光有足够高的功率且远端有充足的激光功率输出,在 AOM2 前插入一个双向掺铒光纤放大器 (bi-EDFA)。本地端和远端两个 FC/PC 端面的反射光在本地光纤分束器上合束后,在分束器的另一个输入端由光电探测器 PD1 进行拍频探测。远端反射光到达 PD1 时,两次经过 AOM 移频,PD1 获得的拍频信号频率为 $2(f_1 + f_2 + \Delta f)$, 约为 480 MHz, 在 300 kHz 分辨率、100 MHz 展宽范围下信噪比约为 35 dB。PD1 的拍频信号中包含了链路往返的相位噪声,经过滤波放大并与微波参考信号鉴相即可获得相位噪声信息。

之前报道的光纤噪声补偿实验采用光纤分束器加上法拉第旋光镜的方法获得反射光,它可以将单程通过的激光偏振态选择 45° , 反射后旋转 90° , 以在 PD1 获得更强、更稳定的拍频信号。但是,光纤分束器会增加激光功率的损耗,且作为噪声补偿参考点的法拉第旋光镜端面与实际使用的输出分别位于分束器的两臂,两臂之间的非共模噪声会影响用户端的频率稳定度。本实验中,直接使用 FC/PC 光纤端面产生反射光可以简化光路结构,降低功率损耗,而且 FC/PC 光纤端面既是噪声补偿的参考点,又是光纤链路的终点、输出到自由空间的用户端,实现了端到端的频率传输。

由于部分光纤链路铺设在公路沿线,部分在室外架空铺设,链路噪声对交通、天气等的影响较为敏感,直接鉴频无法实现可靠的相位锁定。为了解决这一问题,使用数字分频器将拍频信号 48 分频到 10 MHz 后,与 10 MHz 参考信号(实验中使用的参考为氢钟)鉴相获得误差信号,再伺服反馈到 AOM1 的驱动频率,实现相位噪声补偿。分频扩大了相位噪声的探测范围,增加了对光纤链路的扰动,如强烈振动的抵抗能力,提高了锁相系统工作的稳定性。同时,直接与 10 MHz

参考频率鉴相,避免引入额外的射频信号源,减小了环路误差,并简化了系统装置。

由于光纤链路是普通单模光纤,传输光的偏振态不稳定,PD1 探测到的拍频信号幅度会有缓慢变化,变化幅度约 15 dB。为了获得稳定的信号幅度来进行相位噪声补偿,拍频信号经过初级滤波放大后,由追踪振荡器进行处理^[22]。追踪振荡器的原理是将压控振荡器 (VCO) 相位锁定到输入信号上,以此来提供一个频率与输入信号一致且幅度稳定的信号。追踪振荡器的锁定带宽大于 1 MHz,可以很好地追踪由光纤扰动引起的激光频率抖动。

通过对本地端和远端的 FC/PC 光纤端面的输出光进行拍频,评估光纤链路噪声消除的效果,该拍频信号由 PD2 探测(频率为 $f_1 + f_2 + \Delta f = 240$ MHz)。拍频光路采用自由空间结构。PD1 和 PD2 的拍频信号经过滤波放大后,由多通道频率计数器同步测量并计算稳定度 (Allan 标准偏差),并使用相位噪声分析仪测量其相位噪声。实验中使用的锁相和测量设备的频率参考均为同一个 10 MHz 信号。

3 实验结果分析

光纤链路的相位噪声测量结果如图 2 所示。在 1 Hz 傅里叶频率处,60 km 光纤的未补偿相位噪声达到 $147 \text{ rad}^2/\text{Hz}$; 补偿后相位噪声降低到 $3 \times 10^{-5} \text{ rad}^2/\text{Hz}$, 相对于未补偿噪声的抑制比为 67 dB。图 2 所示的背景噪声为不接入 60 km 光纤时噪声补偿锁定的结果。光纤噪声主动补偿的带宽受到链路时延的限制。60 km 光纤的单程时延 $\tau = nL/c$, 单模光纤在 1550 nm 的折射率 $n = 1.468$, $L = 60$ km, c 为真空中的光速,因此时延为 0.29 ms。环路伺服带宽被时延限制在 $f = 1/4\tau = 850$ Hz 以内^[6], 实际相位噪声补偿的伺服带宽为 550 Hz。

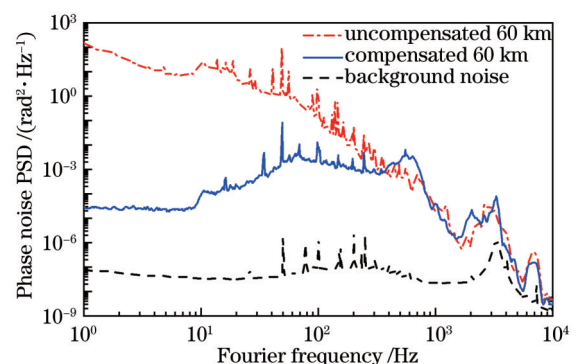


图 2 光纤链路传输的相位噪声功率谱密度

Fig. 2 Phase noise power spectral density (PSD) of fiber link

噪声补偿锁定后,利用多通道频率计测量 PD1、PD2 的拍频频率。实验中使用的频率计数器为 K+K FXE 型号的无死时间 II 型计数器^[23], 报告时间间隔为 1 s。实验中实现了长期连续锁定,选取连续 4 d 的测量数据进行分析(采样点数为 336600), 噪声消除后的环外(out of loop, 由 PD2 测量)和环内(in loop, 由 PD1

测量)拍频信号如图 3 所示。环外和环内频率抖动大致保持一致,但环外出现个别环内没有的频率抖动。由环外频率数据计算得到光纤传递系统引入的频率偏差相对于 240 MHz 为 $(-0.67 \pm 6.5) \mu\text{Hz}$, 相对于激光载波频率的偏差为 $-4 \times 10^{-21} \pm 3.4 \times 10^{-20}$ 。相应的频率稳定度如图 4 所示,不接入 60 km 光纤时,系统的本底环外频率稳定度在 1 s 处为 3.6×10^{-18} 。环外拍频信号体现的是传输后光频的真实稳定度,该稳定度在 1 s 时为 2.4×10^{-17} ,在 1000 s 时降为 6.6×10^{-20} ,在 20000 s 积分时间有凸起,最终在 65000 s 下降到 6.5×10^{-21} 。作为对照的环内拍频信号稳定度在 1 s 时为 2.3×10^{-17} ,在 1000 s 时下降到 3.7×10^{-20} ,全积分时间内保持相对一致的接近 $1/\tau$ 的下降趋势,并在 65000 s 达到 1.2×10^{-21} 。环外测量的长期稳定度主要受到环境温度变化的影响,包括自由空间拍频光路中的未补偿噪声,以及光纤偏振变化导致拍频信号幅度起伏、电路温度波动影响锁相的精度。

图 4 中标出了当前报道的最前沿 Sr 光晶格钟,频率稳定度达到了 $4.7 \times 10^{-17}/\sqrt{\tau}$ [2],表明所提频率传输系统可以满足当前光钟远程传输与比对的需求。

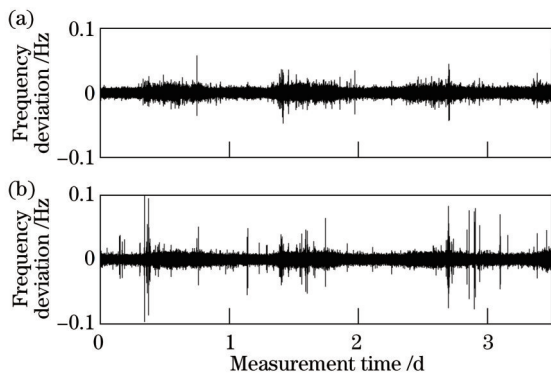


图 3 60 km 实地光纤传输后的环内、环外拍频频率。(a) 环内; (b) 环外

Fig. 3 Measurement frequency of beat signals after 60 km fiber transfer. (a) In loop; (b) out of loop

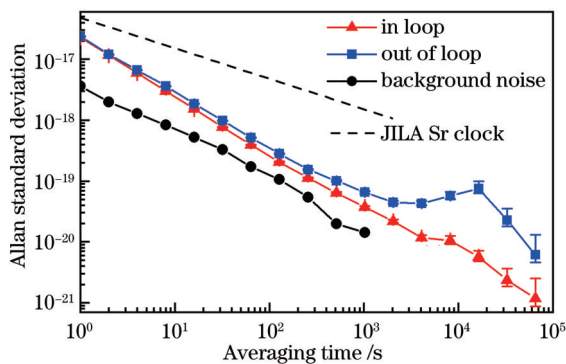


图 4 60 km 实地光纤链路光频传输的相对稳定度 (Allan 标准偏差)

Fig. 4 Relative stability (Allan standard deviation) of optical frequency transfer via 60 km fiber link after phase noise compensated

4 结 论

介绍了在精测院到引力中心的实地光纤链路上开展的光频传输实验。系统采用全光纤结构的端到端传递,利用追踪振荡器抑制由光纤偏振变化引起的信号幅度起伏,并采用分频鉴相直接锁相到 10 MHz 参考信号。在由两根光纤组成的共 60 km 长的光纤环路上,1 s 光学频率传输稳定度达到 2.4×10^{-17} ,并在 65000 s 积分时间下光频传输稳定度降到 6.5×10^{-21} 。光纤链路引入的相对频率偏差为 $-4 \times 10^{-21} \pm 3.4 \times 10^{-20}$ 。在实际使用的 30 km 单程链路上,由于延时更小、信号更稳定,其传输稳定度将更高。传输系统在实验中证明可以保持连续稳定运行数天。这一稳定度可以满足高精度的远程光钟比对需求。

参 考 文 献

- [1] Brewer S M, Chen J S, Hankin A M, et al. $^{27}\text{Al}^+$ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10^{-18} [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 033201.
- [2] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, et al. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(10): 714-719.
- [3] Riehle F. Optical clock networks[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 25-31.
- [4] Lange R, Huntemann N, Rahm J M, et al. Improved limits for violations of local position invariance from atomic clock comparisons[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(1): 011102.
- [5] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. *Nature*, 2018, 564(7734): 87-90.
- [6] 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.
- [7] Droste S, Ozimek F, Udem T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 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] Lisdat C, Grosche G, Quintin N, et al. A clock network for geodesy and fundamental science[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12443.
- [10] Schioppo M, Kronjäger J, Silva A, et al. Comparing ultrastable lasers at 7×10^{-17} fractional frequency instability through a 2220 km optical fibre network[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 212.
- [11] Ma C Q, Wu L F, Jiang Y Y, et al. Optical coherence transfer over 50-km spooled fiber with frequency instability of 2×10^{-17} at 1 s[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(8): 084209.
- [12] Ma C Q, Wu L F, Jiang Y Y, et al. Coherence transfer

- of subhertz-linewidth laser light via an 82-km fiber link[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(26): 261109.
- [13] Deng X, Liu J, Jiao D D, et al. Coherent transfer of optical frequency over 112 km with instability at the 10^{-20} level[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(11): 114202.
- [14] 臧琦, 邓雪, 曹群, 等. 基于 210 km 实地通信链路的高稳定性光学频率信号传递[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0706004.
- Zang Q, Deng X, Cao Q, et al. Ultra-stable optical frequency signal transfer in 210 km urban communication link[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0706004.
- [15] Chao S J, Cui K F, Wang S M, et al. Observation of $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ transition of a $^{40}\text{Ca}^+ - ^{27}\text{Al}^+$ quantum logic clock [J]. *Chinese Physics Letters*, 2019, 36(12): 120601.
- [16] Gao K L. The $^{40}\text{Ca}^+$ ion optical clock[J]. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1799-1801.
- [17] Huang Y, Zhang B L, Zeng M Y, et al. Liquid-nitrogen-cooled Ca^+ optical clock with systematic uncertainty of 3×10^{-18} [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(3): 034041.
- [18] Liu H, Zhang X, Jiang K L, et al. Realization of closed-loop operation of optical lattice clock based on ^{171}Yb [J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(2): 020601.
- [19] Zhang J, Deng K, Luo J, et al. Direct laser cooling Al^+ ion optical clocks[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(5): 050601.
- [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] Calosso C E, Bertacco E, Calonico D, et al. Frequency transfer via a two-way optical phase comparison on a multiplexed fiber network[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1177-1180.
- [22] 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.
- [23] Dawkins S T, McFerran J J, Luiten A N. Considerations on the measurement of the stability of oscillators with frequency counters[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(5): 918-925.