

基于光纤的光学频率传递研究

刘杰 高静 许冠军 焦东东 闫露露 董瑞芳 姜海峰 刘涛 张首刚

Study of optical frequency transfer via fiber

Liu Jie Gao Jing Xu Guan-Jun Jiao Dong-Dong Yan Lu-Lu Dong Rui-Fang Jiang Hai-Feng Liu Tao Zhang Shou-Gang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 120602 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.120602

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120602>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锶玻色子的掣□ 网波长光晶格装载实验研究

Experimental research on loading strontium bosons into the optical lattice operating at the "magic" wavelength

物理学报.2015, 64(13): 130601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130601>

振动不敏感球形光学参考腔研究

Study of a spherical vibration-insensitive optical reference cavity

物理学报.2014, 63(9): 090601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.090601>

机器视觉在激光干涉测量 d_{31} 中的应用

Application of machine vision to the measurement of the effective d_{31} coefficient in laser interferometry

物理学报.2013, 62(18): 184207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184207>

双路光谱展宽的钛宝石飞秒光学频率梳系统

Ti:sapphire femtosecond comb with two spectral broadening parts

物理学报.2011, 60(8): 080601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.080601>

锶原子 Doppler 冷却中再抽运光对原子俘获影响的理论和实验研究

The theoretical and experimental investigation of repumping laser impact on cooling and trapping of strontium atoms

物理学报.2011, 60(5): 050601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.050601>

基于光纤的光学频率传递研究*

刘杰¹⁾²⁾³⁾ 高静¹⁾³⁾ 许冠军¹⁾³⁾ 焦东东¹⁾²⁾³⁾ 闫露露¹⁾³⁾ 董瑞芳¹⁾³⁾
姜海峰¹⁾³⁾ 刘涛¹⁾³⁾† 张首刚¹⁾³⁾

1)(中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

2)(中国科学院大学, 北京 100039)

3)(中国科学院时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

(2014年11月6日收到; 2015年1月11日收到修改稿)

随着光钟研究的发展, 光钟的稳定度和不确定度均达到 10^{-18} 量级. 通过光纤可以实现光钟频率信号的高精度传输, 有望用于未来“秒”定义的复现. 演示了百公里级实验室光纤上的光学频率传递. 对于在实验室70 km光纤盘上实现的光频传递, 光纤相位噪声抑制在1—250 Hz傅里叶频率范围内均接近于光纤延时极限, 对应传输稳定度(Allan偏差)为秒级稳定度 1.2×10^{-15} , 10000 s稳定度为 1.4×10^{-18} . 实验室100 km光纤的光频传递秒级稳定度也达到了 5×10^{-15} . 提出了光纤噪声用户端补偿的方案, 可以简化星形传递网络中心站的复杂度. 在25 km光纤上演示了该传递方案, 实现的传输稳定度接近传统前置补偿传递方案.

关键词: 时间频率, 光纤网络, 光学频率传递, 光纤噪声用户端补偿

PACS: 06.30.Ft, 42.81.Uv, 42.62.Eh, 07.60.Vg

DOI: 10.7498/aps.64.120602

1 引言

高精度的原子钟不仅提高了时间频率的测量精度, 还为相关基础物理研究提供了精密测量手段^[1-4], 并促进了大地测量、卫星导航定位和射电天文望远镜等应用技术的发展. 近年来, 工作在光学频段的光钟研究取得了重大突破^[5-10]. 美国JILA实验室和东京大学的镱原子光钟精度都达到了 10^{-18} 量级^[11,12], 远优于目前的基准钟——铯原子喷泉钟精度. 法国巴黎天文台研究小组利用两台镱原子光钟和三台铯原子喷泉钟, 演示了利用光钟实现秒单位的定义. 随着光钟的发展成熟, 未来国际单位制的“秒”定义极有希望通过光钟来复现^[13,14].

但是, 光钟“秒”定义的复现仍存在一个现实的

技术瓶颈, 即如何高精度地对比全球各时频实验室的光钟. 卫星双向时间频率传递(two way satellite time and frequency transfer)是目前精度最高的远程传递手段, 一天内的频率传输稳定度达到 10^{-16} 量级, 秒级稳定度在 10^{-13} 量级^[15], 已不能满足目前光钟远程精密比对的要求. 利用广泛应用的光纤网传递原子钟信号, 已展现出巨大的技术和精度优势. 美、法、德等发达国家开展了相关研究工作并取得了较好的结果^[16-23]. 多个研究小组的光载波频率传递平均时间10000 s的传输稳定度达到了 10^{-19} 量级, 可以满足光钟远程比对的需求. 目前国内也有小组正在开展高精度光纤频率传递研究, 其中清华大学-计量院联合实验小组在80 km光纤上实现了秒级稳定度 7×10^{-15} 的微波频率光纤传递^[24], 华东师范大学等科研单位也开展了光学频率光纤传递研究, 但尚无相关报道.

* 国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项(批准号: 61127901)、国家自然科学基金(批准号: 11273024, 61025023)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11403031)、中国科学院科技创新“交叉与合作团队”项目(中科院人教字(2012)119号)和中国科学院重点部署项目(批准号: KJZD-EW-W02)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

本文介绍了国家授时中心利用实验室光纤开展的光学频率传递研究,建立了70 km和100 km光纤的光学频率传递系统,秒级频率传递稳定度(Allan 偏差, ADEV)分别为 1×10^{-15} 和 5×10^{-15} ,且随积分时间呈 $1/\tau$ 下降的趋势,具有较好的长期稳定度潜力. 目前,绝大多数光纤光学频率传递都是在源端进行噪声的测试和抑制,源端设备较复杂. 在星形传递网络结构中,随着用户节点的增多,中心站作为源端的负荷将会随之增加. 本文提出了一种在远程用户端进行光纤噪声测量和抑制的频率传递新方法. 利用该方案,将在很大程度上简化星形传递网络结构中心站的复杂度. 我们在25 km光纤上演示了光频传递用户端补偿方案,实现的秒级传输稳定度在 1.3×10^{-15} .

2 实验装置

2.1 基本原理

激光在光纤中传输时,各种环境因素如温度和振动等,会导致传输光场的相位波动,等效于激光的频率噪声. 上述光纤噪声会造成传输激光的线宽展宽,降低光学频率的传递精度. 为补偿光纤传输路径的相位噪声,1994年马龙生等^[25]提出了多普勒噪声抑制的方法.

传输光纤相位噪声主要是由光学路径长度和折射率变化引起的,与传输方向无关,因此可认为正向传输时引入的相位变化 $\phi_{正向}$ 与反向传输时的 $\phi_{反向}$ 是近似相等的(假定都等于链路噪声 ϕ_1). 这正是多普勒消除方法的主要依据. 如图1所示,源端的激光经过分束后一部分注入传输光纤,经过光

纤传输到达用户端,在用户端一部分光被反射并按原路径返回,在源端与参考激光进行拍频,利用PD探测两束光的拍频信号,则可得激光在光纤上往返传输时引入的总相位变化:

$$\phi_{正向} + \phi_{反向} \approx 2\phi_1. \quad (1)$$

假定激光在光纤上往返传输时引入的相位变化是对称的,即 $\phi_{反向} = \phi_{正向} = \phi_1$,可以得出单次通过光纤引入的噪声. 由伺服控制产生一个对应的 $\phi_c = -\phi_1$,可以通过相位补偿器件进行动态补偿.

激光在进入传输光纤前通过声光调制器(AOM),AOM既可以通过移频方式构成外差探测,又可作为相位补偿器件补偿光纤噪声. 通过外差探测可以将探测信号的噪底降低到量子噪声极限附近,与零差探测相比,信噪比较高.

值得注意的是,并非所有光纤噪声都是往返相等的,例如由于偏振模式色散效应(polarization mode dispersion)引起的光纤噪声,这些噪声成分通过上述补偿方法无法完全消除. 由于该部分噪声影响相对较小,不在本文研究范围内. 此外由于光纤延时线引起的探测延时($\tau = \frac{n \times L}{c}$),同样会导致光纤光频传递的噪声补偿存在着控制带宽极限和噪声补偿极限的双重限制^[22]:

$$S_d(f) \approx \frac{1}{3} (2\pi\tau f)^2 S_{\text{fiber}}(f), \quad f \ll \frac{1}{4\tau}, \quad (2a)$$

$$f_{\text{lim}} = \frac{1}{4\tau}, \quad (2b)$$

其中, n 为光纤折射率, L 为光纤长度, c 为光速, f 为傅里叶频率, τ 为时延, $S_{\text{fiber}}(f)$ 是自由运转光纤噪声谱密度, $S_d(f)$ 是实现最佳补偿后的光纤噪声谱密度, f_{lim} 为控制带宽的极限.

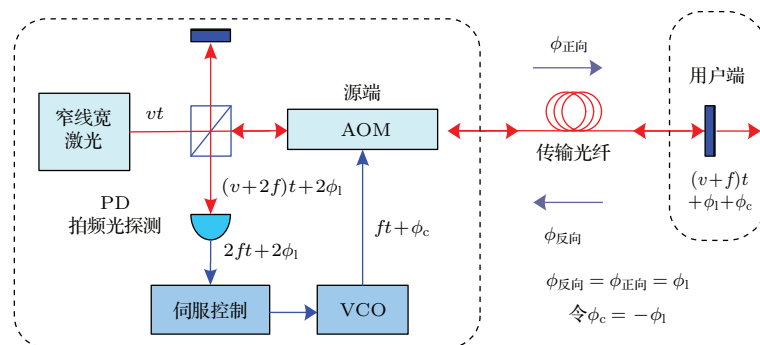


图1 (网刊彩色) 光纤光频传递噪声补偿的原理示意图. PD为光电探测器, AOM为声光调制器, VCO为压控振荡器, v 为激光频率, f 为AOM调制频率, t 为时间

Fig. 1. (color online) Principle of optical frequency transfer via fiber. PD, photo detector; AOM, acousto-optic modulator; VCO, voltage control oscillator; v is optical frequency; f is AOM modulation frequency; t is time.

由 (2a), (2b) 式可知, 通过多普勒消除方法对光纤传输路径噪声进行补偿, 在 $f \ll \frac{1}{4\tau}$ 傅里叶频率内, 噪声补偿比不会低于 $\frac{1}{3}(2\pi\tau f)^2$, 同时环路的控制带宽也应小于带宽极限 $\frac{1}{4\tau}$. 对应于 70 km 光纤, 控制带宽极限约为 700 Hz. 由 (2a) 式可以看出, 随着传输距离的增长, 补偿后的噪声极限也相应增大.

2.2 实验光路

根据上述原理, 我们在实验室利用盘纤建立了基于多普勒噪声抑制方法的光学频率传递实验系统. 实验系统光学部分原理示意图如图 2 所示.

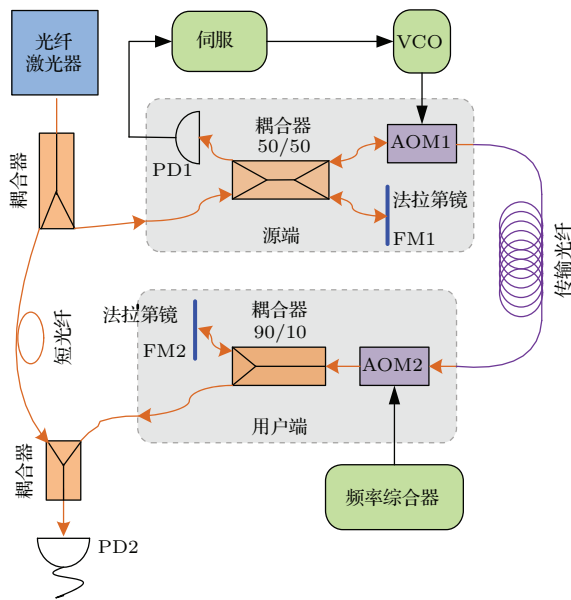


图2 (网刊彩色) 光纤光学频率传递实验光路

Fig. 2. (color online) Optical setups of optical frequency transfer via fiber.

一商用 1.55 μm 窄线宽光纤激光器作为光源, 输出激光线宽约为 1 kHz, 总功率约为 40 mW, 实验中实际使用约 10 mW. 输出光首先经过 90/10 耦合器分为两束, 其中一束注入源端光路, 注入功率约为 9 mW. 此部分激光再由 50/50 光纤耦合器分为两束, 一部分由法拉第镜 FM1 反射后再次经过耦合器到达光电探测器 PD1 处作为光外差拍频的参考光, 另一部分经过 AOM1 移频之后输出至传输光纤. 其中, AOM1 工作频率为 110 MHz, 衍射效率约为 50%. AOM1 输出并注入传输光纤的光功率约为 2 mW. 采用了康宁公司 SMF-28 单模光纤作为传输光纤.

在远程用户端光路部分, 传输光由 AOM2(工作频率为 50 MHz, 效率约为 60%) 再次移频后, 分出一臂光 (10%) 提供给远程用户应用 (本文中用于传输稳定度的监测); 另一臂光 (90%) 经由 FM2 反射后, 再依次通过 AOM2、传输光纤和 AOM1 原路径返回, 最终到达源端 PD1 处和参考光进行光外差拍频.

如上所述, PD1 得到的外差探测信号包含了往返传输路径导致的相位噪声, 为单次传输噪声的两倍, 据此我们对 AOM1 加入相应的补偿以实现激光传输光纤噪声的抑制.

AOM1 的作用是产生参考光与返回光之间的频率差, 进而利用外差探测技术获得较高的信噪比. 同时, AOM1 也用于在源端进行前置噪声补偿, 实现用户端光场相位与源端的一致性. 而 AOM2 的应用是考虑到实际光纤系统中存在一定的节点反射光和瑞利散射光. 在用户端法拉第镜 FM2 前放置 AOM2, 可将有用信号与其他干扰信号在频域上分离, 进而实现光纤相位噪声的精密测量. 法拉第镜 FM1 和 FM2 的应用有助于使 PD1 处的两个拍频激光的偏振状态保持一致, 这样不需要加入复杂的偏振调节器件即可实现拍频信号功率的最大化.

为评估光学频率传输稳定度, 我们将源端激光的一部分作为参考光, 用户端输出作为待测光, 利用光电探测器 PD2 测量参考光与待测光的拍频信号. 这里我们利用了总长度仅为 1 m 的单模光纤跳线, 并置于隔音减振环境以减少该环外光纤引入的额外相位噪声.

2.3 补偿电路和测试装置

实验装置电路部分主要包括噪声补偿电路和测试装置, 如图 3 所示.

光纤光学频率传递补偿电路的主要功能包括: 通过 PD1 探测返回光与参考光的拍频信号, 通过鉴相获得反映光纤噪声的误差信号, 进而通过一定算法产生补偿信号, 通过相位补偿器件——声光调制器 AOM1 对光纤噪声进行前置补偿. 如图 3 所示, 返回光拍频信号 (中心频率为 320 MHz, 功率约 -30 dBm), 该信号依次经过功率放大、功率稳定和窄带滤波的信号预处理. 预处理后的信号 (频率为 320 MHz, 功率为 7 dBm), 经 40 倍分频器后下变频为 8 MHz, 利用由频率综合器产生的 8 MHz 低相噪

参考信号1对预处理后的信号进行鉴相, 鉴相器输出即为误差信号. 误差信号经过环路滤波(比例积分控制电路), 得到补偿信号反馈给 AOM1 的驱动 VCO, 最终通过 AOM1 进行相位补偿.

激光在光纤中传输时, 由于温度、振动等外部因素, 光场偏振态在应力作用下随时间发生变化. 此外, 由于光纤接头及散射等因素影响, 激光功率也发生随机变化. 以上两个因素共同作用会使返回光拍频信号的功率存在较大的起伏. 为降低拍频信号功率起伏的影响, 我们采用了基于指数放大器的

功率稳定技术. 拍频信号典型功率起伏约为 12 dB, 稳定后功率起伏仅为 1 dB. 此外, 光纤传输路径上的瑞利散射光和连接器端面反射光同样会与本地参考光发生拍频, 对光纤噪声的探测造成干扰. 通过合理设计用户端移频器 AOM2 的工作频率, 能够使得这些干扰信号的频率不同于我们关心的信号频率, 进一步可以采用窄带跟踪滤波器有效滤除这些干扰信号. 鉴相器前加入的 40 分频器可以提高鉴相器的相位探测范围, 增大整个补偿电路的动态范围和控制能力.

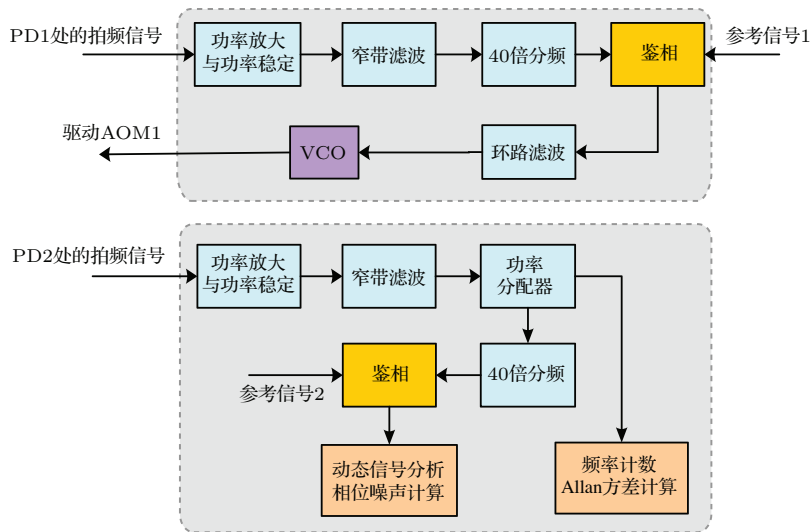


图3 (网刊彩色) 光纤光学频率传递补偿电路及测试装置

Fig. 3. (color online) Compensation circuit and measurement setup of optical frequency transfer via fiber.

为评估光纤光学频率传递的相位噪声抑制和传输稳定度, 我们使用光电探测器 PD2 探测传输光与参考光的拍频信号(中心频率为 160 MHz, 功率约为 -5 dBm), 再利用频率计数器和动态信号分析仪分别进行数据测量和记录, 计算出该拍频信号的相位起伏谱密度和 ADEV, 即可分析出光纤传递噪声补偿系统的光纤相位噪声抑制和传输稳定度. 测试装置的信号流如图 3 所示, 该拍频信号同样依次经过功率放大、功率稳定和窄带滤波进行信号预处理, 再经过功率分配器分为两部分, 一部分直接用频率计数器(CNT-91 和 53230 A)记录信号频率值并计算 Allan 方差; 另一部分经过 40 倍分频(增大鉴相范围)后通过鉴相器与参考信号 2 进行鉴相, 将相位起伏转换为电压噪声后再利用动态信号分析仪(SR785)测量并计算为相位起伏谱密度.

补偿电路和测试装置中所有的频率综合器与测试设备均用 10 MHz 氢钟信号进行同步, 以消除

各个设备内部时钟差异对补偿和测试的影响.

3 实验测量结果

用上述实验装置, 我们在实验室线绕光纤上进行光频传递实验, 传输距离可达 100 km. 下面分别给出了用 70 km 和 100 km 线绕光纤进行光频传递时的测量结果.

3.1 70 km 光纤光频传递

70 km 线绕光纤上光频传递的相位噪声测量结果如图 4 (a) 所示, 其中红色虚线为自由运转情况下传输光拍频信号的相位起伏谱密度, 黑色实线为噪声补偿后的相位起伏谱密度. 在 1 Hz 频偏处, 补偿后的相位噪声比自由运转时降低约 60 dB. 1—200 Hz 范围内的光纤噪声均有所抑制, 控制带宽约为 250 Hz. 而受光纤延时导致的控制带宽约

为 $1/4\tau \approx 700$ Hz.

图 4 (b) 中黑色实线为实际的相位噪声抑制比, 而红色虚线所示为光纤传输延时引起的相位噪声抑制极限. 可以看出在 $f < 250$ Hz 范围内, 实际噪声抑制接近于该抑制极限.

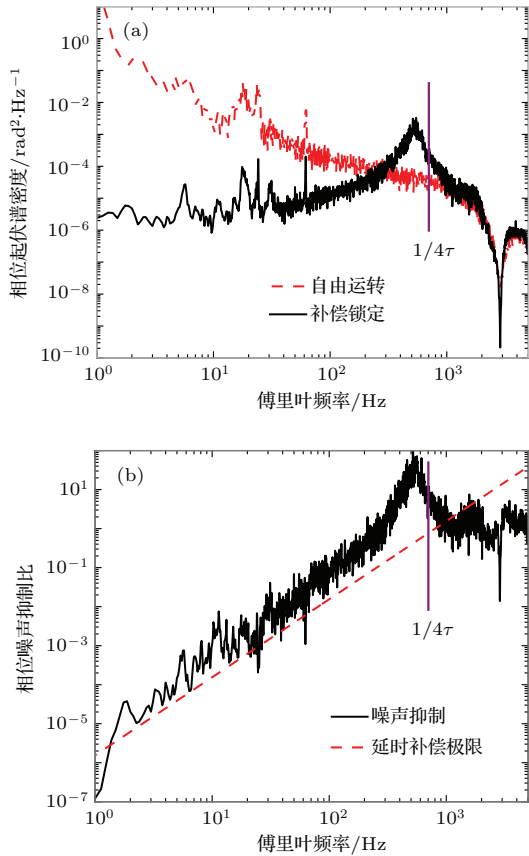


图 4 (网刊彩色) 70 km 光纤光频传递时的 (a) 相位起伏谱密度和 (b) 相位噪声抑制比
Fig. 4. (color online) (a) Power spectrum density of phase fluctuation and (b) phase noise compensation for optical frequency transfer via 70 km fiber.

图 5 是 70 km 光纤光频传递测得的传输稳定度. 由于我们使用的计数器是 II 型计数器, 且测试时设置为无静寂时间 (dead-time free) 测量模式, 计算得到的稳定度对应于 ADEV. 经过光纤噪声补偿, 70 km 光纤盘上光频传递的秒级稳定性和万秒稳定度 (ADEV) 从 3.9×10^{-14} 和 2.9×10^{-15} 分别降低至 5.3×10^{-15} 和 5.8×10^{-18} , 且在 400 s 之前均是呈 $1/\tau$ 下降的趋势, 在 400 s 后下降斜率发生变化, 这是由于环境温度的影响. 使用 100 Hz 窄带跟踪滤波器滤除高频链路噪声后, 传输稳定度 (ADEV) 可达秒级稳定度 1.2×10^{-15} , 万秒稳定度 1.4×10^{-18} . 从图 5 可以发现, 积分时间为 20—3000 s 时窄带测量的结果反而差于未经过窄带滤波的结果, 这可能是窄带跟踪滤波器的参数不

匹配引起的. 上述稳定度测量结果略低于国际先进水平, 主要原因在于光纤环境差异和测试方法有所不同.

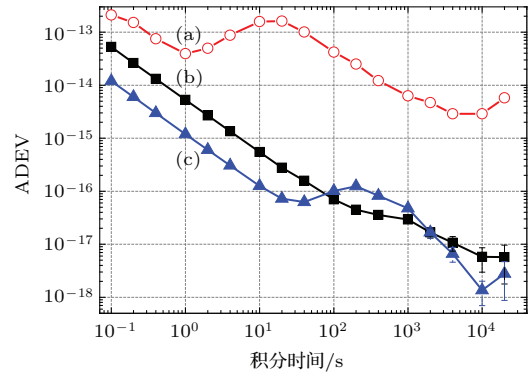


图 5 (网刊彩色) 70 km 光纤光频传输稳定度 (ADEV) (a) 自由运转未加补偿; (b) 噪声补偿全带宽测试; (c) 噪声补偿 100 Hz 窄带测试
Fig. 5. (color online) Transfer stability (ADEV) of optical frequency transfer via 70 km fiber spool for (a) free running links, (b) stabilized link with full measurement bandwidth, and (c) stabilized link with 100 Hz bandwidth.

3.2 100 km 光纤光频传递

下面用 100 km 光纤盘进行光频传递, 传输稳定度测量结果 (ADEV) 如图 6 所示.

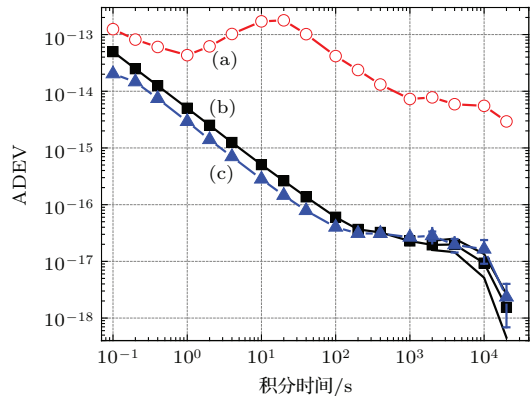


图 6 (网刊彩色) 100 km 光纤光频传输稳定度 (ADEV) (a) 自由运转未加补偿; (b) 噪声补偿全带宽测试; (c) 噪声补偿 100 Hz 窄带测试
Fig. 6. (color online) Transfer stability (ADEV) of optical frequency transfer via 100 km fiber spool for (a) free running links, (b) stabilized link with full measurement bandwidth, and (c) stabilized link with 100 Hz bandwidth.

100 km 光纤上光频传递时部分频段的相位噪声抑制同样接近于由于光纤相位延时引起的噪声抑制极限, 但补偿后噪声测量结果与 70 km 光纤上的噪声强度相比明显增加, 这与 (2a) 式相位噪

声随长度迅速增大的规律相符; 相应的传输稳定度相比于 70 km 传递也有所下降. 从图 6 可以看出, 噪声补偿后的传输稳定度 (ADEV) (黑色实心方块) 相比于自由运转 (红色空心圆), 秒级稳定度从 4.3×10^{-14} 降低到了 5.0×10^{-15} , 10000 s 稳定度也从 5.5×10^{-15} 降低至 9.3×10^{-18} , 也同样在 400 s 之前呈现 $1/\tau$ 下降的趋势. 而经过窄带跟踪滤波器滤除控制带宽外的高频链路噪声, 传输稳定度秒级稳定度可达 2.9×10^{-15} .

4 光纤光频传递用户端补偿方案

4.1 源端补偿的问题

如前所述, 基于光纤的光学频率传递研究大都采用源端噪声补偿方案, 需要在源端探测光纤位相噪声, 并通过源端 AOM 进行噪声补偿, 源设备比较复杂. 通常在超远距离传递时一般采用菊花链形式组网. 在城区或园区内, 一般采用星形组网结构. 利用传统源端补偿方案, 各个传输子路径上的源端光、电设备不能共用, 需要复制多套本地装置, 这不仅提高了组网成本, 而且随着用户数的增多, 源端设备复杂度和负荷不可避免地增加, 不利于大规模组网.

4.2 用户端补偿方案

为简化源端设备, 我们提出了在用户端进行光纤位相噪声探测及补偿的新方法. 其基本思想如图 7 所示. 光学频率信号通过光纤 A 传递到用户端

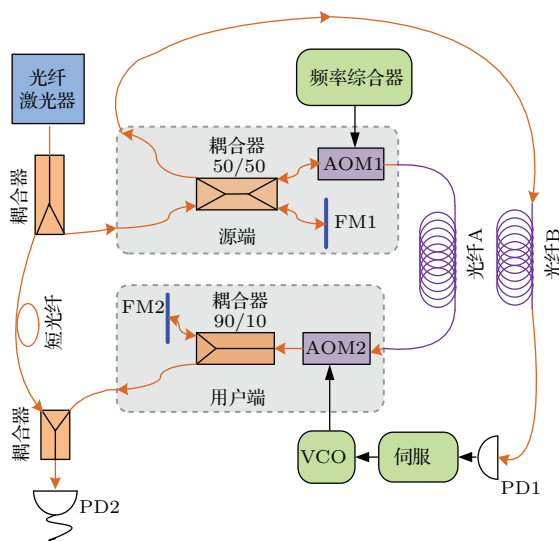


图 7 (网刊彩色) 光纤光学频率传递用户端补偿方案实验光路
Fig. 7. (color online) Remote compensation scheme of optical frequency transfer via fibers.

后的返回光与参考光在源端耦合器的另一端口处合束拍频, 该光场再由另一个光纤 B 传到用户端. 由于在光纤 B 中传输时, 两光场的传输噪声基本是共模成分, 对拍频信号噪声的贡献在一定程度上可以忽略. 远端用户通过测量光纤 B 末端的拍频信号可以精确测得光纤 A 的光纤噪声, 进而利用 AOM2 实现光纤 A 的光纤噪声抑制. 与传统方法相比, 光纤噪声的测量和抑制都是在用户端进行, 极大地简化了源端复杂度.

4.3 用户端补偿实验结果

25 km 光纤上用户端补偿的光频传输稳定度测量结果 (ADEV) 如图 8 所示.

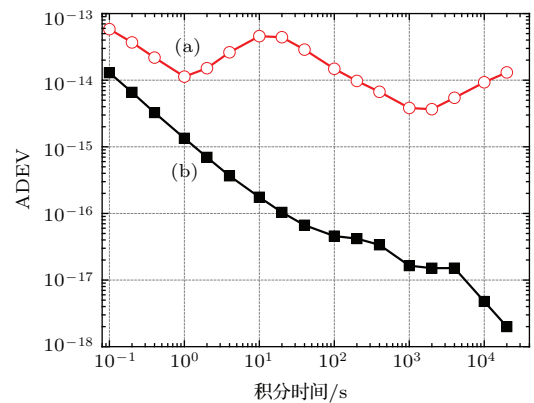


图 8 (网刊彩色) 25 km 光纤上用户端补偿的光频传输稳定度 (ADEV) (a) 自由运转未加补偿; (b) 噪声补偿全带宽测试

Fig. 8. (color online) Transfer stability (ADEV) of remote compensation method via 25 km fiber spools for (a) free running links and (b) stabilized link with full measurement bandwidth.

我们利用两根 25 km 的光纤搭建了实验光路, 其中一根光纤 A 作为光学频率信号的传递光纤, 另一根光纤 B 作为噪声信号传递光纤. 如图 7 所示, 利用了光纤远端的光电探测器 PD1 测量光纤噪声, 利用 AOM2 抑制光纤 A 的相位噪声. 利用光电探测器 PD2 测量传递光和本地参考光的拍频信号, 得到的秒级传输稳定度从锁定前的 1.1×10^{-14} 提高到 1.3×10^{-15} , 万秒稳定度从 9.3×10^{-15} 提高到 4.8×10^{-18} . 而且, 锁定后 ADEV 在 400 s 时间段内呈现 $1/\tau$ 下降的趋势. 与源端补偿方案相比, 秒级稳定度和万秒稳定度均低于上述 70 km 光频传输稳定度中全带宽测量结果, 基本符合传输质量随传输距离增加而下降的规律. 因此, 新方案的传递稳定度与源端补偿方案传输稳定度基本相当.

通过 25 km 光纤上的用户端补偿光频传递实验, 我们得到了与源端补偿相当的传输稳定度. 与前面的源端补偿方案相比, 噪声测量和噪声补偿都移植到了光纤的用户端, 本地端发送装置大大简化, 在传输网络中需要单点对多点传输时, 只需要将源端发送装置公用, 而克隆多个用户端装置即可. 与文献 [26] 中西澳大利亚大学提出的方案相比, 虽然都是在用户端补偿光纤噪声, 本方案避免了信号光在同一根光纤中多次往返引起更多的杂散光干扰, 有利于获得较高的信噪比, 但需要增加一根光纤.

5 结 论

本文介绍了中国科学院国家授时中心开展光纤光学频率传递研究的进展情况. 我们用线绕光纤进行光纤光频传递实验, 实现了百公里级的光学频率传递, 在国内尚属首次. 在 70 km 光纤光频传递中, 传输稳定度 (ADEV) 可以达到秒级稳定度 1.2×10^{-15} , 万秒稳定度也在 1×10^{-18} 量级. 在 100 km 光纤光频传递中, 传输稳定度 (ADEV) 秒级稳定度可达 2.9×10^{-15} . 传输稳定度随传输距离有所下降也基本符合相位噪声极限与传输距离的关系. 此外, 本文还提出了光频传递用户端补偿的新方案, 简化了本地端设备, 有利于星形网络等传递拓扑网络的组建. 并利用两根 25 km 光纤演示了用户端补偿光学频率传递, 稳定度达到秒级稳定度 1.3×10^{-15} , 万秒稳定度 4.8×10^{-18} , 实现的传递稳定度接近传统源端补偿传递方案.

参考文献

- [1] Chou C W, Hume D B, Rosenband T, Wineland D J 2010 *Science* **329** 1630
- [2] Parthey C G, Matveev A, Alnis J, Bernhardt B, Beyer A, Holzwarth R, Maistrou A, Pohl R, Predehl K, Udem T, Wilken T, Kolachevsky N, Abgrall M, Rovera D, Salomon C, Laurent P, Hänsch T W 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 203001
- [3] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, Chou C W, Brusch A, Lorini L, Oskay W H, Drullinger R E, Fortier T M, Stalnaker J E, Diddams S A, Swann W C, Newbury N R, Itano W M, Wineland D J, Bergquist J C 2008 *Science* **319** 1808
- [4] Shelkovnikov A, Butcher R J, Chardonnet C, Amy-Klein A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 150801
- [5] Schiller S, Tino G M, Gill P, Salomon C, Sterr U, Peik E, Nevsky A, Görlitz A, Svehla D, Ferrari G, Poli N, Lusanna L, Klein H, Margolis H, Lemonde P, Laurent P, Santarelli G, Clairon A, Ertmer W, Rasel E, Müller J, Iorio L, Lämmerzahl C, Dittus H, Gill E, Rothacher M, Flechner F, Schreiber U, Flambaum V, Ni W, Liu L, Chen X, Chen J, Gao K, Cacciapiuoti L, Holzwarth R, He M P, Schäfer W 2009 *Exp. Astron.* **23** 573
- [6] Huntemann N, Okhapkin M, Lipphardt B, Weyers S, Tamm C, Peik E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 090801
- [7] Katori H 2011 *Nat. Photon.* **5** 203
- [8] Sherman J A, Lemke N D, Hinkley N, Pizzocaro M, Fox R W, Ludlow A D, Oates C W 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 153002
- [9] Swallows M D, Bishof M, Lin Y, Blatt S, Martin M J, Rey A M, Ye J 2011 *Science* **331** 1043
- [10] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, Schioppo M, Lemke N D, Beloy K, Pizzocaro M, Oates C W, Ludlow A D 2013 *Science* **341** 1215
- [11] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, Campbell S L, Bishof M, Zhang X, Zhang W, Bromley S L, Ye J 2014 *Nature* **506** 71
- [12] Ushijima I, Takamoto M, Das M, Ohkubo T, Katori H 2015 *Nat. Photon.* **9** 185
- [13] Gill P, Riehle F 2006 *Proceedings of the 20th European Frequency and Time Forum Braunschweig, Germany, March 27–30, 2006* p282
- [14] Le Targat R, Lorini L, Le Coq Y, Zawada M, Guéna J, Abgrall M, Gurov M, Rosenbusch P, Rovera D G, Nagórny B, Gartman R, Westergaard P G, Tobar M E, Lours M, Santarelli G, Clairon A, Bize S, Laurent P, Lemonde P, Lodewyck J 2013 *Nat. Commun.* **4** 2782
- [15] Fujieda M, Gotoh T, Nakagawa F, Tabuchi R, Aida M, Amagai J 2012 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **59** 2625
- [16] Fujieda M, Kumagai M, Nagano S 2010 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **57** 168
- [17] Marra G, Margolis H S, Lea S N, Gill P 2010 *Opt. Lett.* **35** 1025
- [18] Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, Chardonnet C, Narbonne F 2008 *Eur. Phys. J. D* **48** 35
- [19] Grosche G, Terra O, Predehl K, Holzwarth R, Lipphardt B, Vogt F, Sterr U, Schnatz H 2009 *Opt. Lett.* **34** 2270
- [20] Jiang H, Kéfélian F, Crane S, Lopez O, Lours M, Millo J, Holleville D, Lemonde P, Chardonnet C, Amy-Klein A, Santarelli G 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 2029
- [21] Lopez O, Haboucha A, Chanteau B, Chardonnet C, Amy-Klein A, Santarelli G 2012 *Opt. Express* **20** 23518
- [22] Williams P A, Swann W C, Newbury N R 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 1284
- [23] Droste S, Ozimek F, Udem T, Predehl K, Hänsch T W, Schnatz H, Grosche G, Holzwarth R 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 110801
- [24] Wang B, Gao C, Chen W L, Miao J, Zhu X, Bai Y, Zhang J W, Feng Y Y, Li T C, Wang L J 2012 *Sci. Rep.* **2** 556
- [25] Ma L S, Jungner P, Ye J, Hall J L 1994 *Opt. Lett.* **19** 1777
- [26] Schediwy S W, Gozzard D, Baldwin K G H, Orr B J, Warrington R B, Aben G, Luiten A N 2013 *Opt. Lett.* **38** 2893

Study of optical frequency transfer via fiber*

Liu Jie¹⁾²⁾³⁾ Gao Jing¹⁾³⁾ Xu Guan-Jun¹⁾³⁾ Jiao Dong-Dong¹⁾²⁾³⁾ Yan Lu-Lu¹⁾³⁾
 Dong Rui-Fang¹⁾³⁾ Jiang Hai-Feng¹⁾³⁾ Liu Tao¹⁾³⁾† Zhang Shou-Gang¹⁾³⁾

1) (National Time Service Centre, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China)

2) (University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

3) (Key Laboratory of Time and Frequency Standards, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China)

(Received 6 November 2014; revised manuscript received 11 January 2015)

Abstract

Optical clocks are considered as promising candidates for redefining the second in the International System of Units. Compared with microwave clocks, optical clocks are powerful tools for the fundamental research such as the constancy of the fundamental constants, the validity of Einstein's theory of general relativity, and the predictions of quantum electrodynamics. Recently two research groups have demonstrated the optical clocks with an unprecedented precision level of 10^{-18} , which is two orders better than the present primary frequency standard. Using two Sr optical clocks and three Cs fountain clocks, SYRTE group has demonstrated the definition of second with optical clocks.

For redefining the second with optical clocks in the future, the optical clocks from the remote laboratories should have a high precision and the frequency of the optical clocks need to be transferred over a long distance, with extremely high precision. Unfortunately the conventional means of frequency transfer such as two-way satellite time and frequency transfer can reach a 10^{-16} level in one day which is far below the requirement for an optical clocks. Various methods have been developed to transfer optical frequency signal via optical fibers. Especially a research group from Germany has achieved a frequency transfer stability of 10^{-19} level in hundreds of seconds with a fiber length of 1840 km.

We demonstrate the recent development of optical frequency transfer over a 70-km fiber spool at National Time Service Center. The measurement shows that the compensation for the fiber noise is close to the limitation induced by the fiber delay for the Fourier frequency from 1 Hz to 250 Hz. The transfer stability (Allan deviation) of the fiber link is 1.2×10^{-15} in 1 s averaging time, and 1.4×10^{-18} in 10000 s. A preliminary test of the optical frequency transfer over a 100-km spooled fiber is achieved with a stability of roughly one order worse than the 71 km result, 5×10^{-15} in 1 s.

We demonstrate a new scheme of remote compensation for optical frequency transfer via fibers against conventional local compensation method. This new scheme has the advantage of great simplification of the local site, which can find applications in massive extension of star network. The key feature is that we transfer the mixture of the round-trip signal and local reference to the remote user's end via an auxiliary fiber. At remote site, the fiber noise is measured and compensated by AOM2 accordingly.

Transfer stabilities of 13×10^{-15} in 1 s averaging time and 4.8×10^{-18} in 10000 s are achieved with the remote fiber noise compensation via a 25 km fiber spool. The demonstrated transfer stability is comparable to that obtained by the

* Project supported by the Special Fund for Major Scientific Equipment and Instrument Development of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61127901), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11273024, 61025023), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11403031), the "Cross and Cooperative" Science and Technology Innovation Team Project of the Chinese Academy of Science, China, and the Key Deployment Project of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. KJZD-EW-W02).

† Corresponding author. E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn

local fiber noise compensation method.

The future star fiber network of optical frequency transfer can benefit from this method, because the simpler local setup is required and even can be shared in the central site for multitudinous remote users.

Keywords: time and frequency, fiber networks, optical frequency transfer, remote fiber noise compensation method

PACS: 06.30.Ft, 42.81.Uv, 42.62.Eh, 07.60.Vg

DOI: [10.7498/aps.64.120602](https://doi.org/10.7498/aps.64.120602)