

# 采用级联方式实现 430 km 高精度频率传递

刘 琴<sup>1</sup> 韩圣龙<sup>2</sup> 王家亮<sup>1</sup> 冯子桐<sup>3</sup> 陈 炜<sup>3</sup> 程 楠<sup>3</sup> 桂有珍<sup>1\*</sup> 蔡海文<sup>3</sup> 韩申生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所中科院量子光学重点实验室, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学与技术大学量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 安徽 230026

<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800

**摘要** 通过级联方式在京沪光纤骨干网中实现了 430 km 的高精度频率传递。该级联系统包含了 280 km 和 150 km 两级系统, 同时为了补偿光纤损耗, 在两级链路中采用了低噪声高对称的双向掺铒光纤放大器。当每一级传递系统通过光学补偿方式达到稳定后, 整个级联系统引入的频率不稳定性为在 1 s 处  $1.02 \times 10^{-13}$  和在  $10^4$  s 处  $8.24 \times 10^{-17}$ , 实验结果验证了级联系统的实际结果与两级系统计算结果之间符合误差理论。

**关键词** 光纤光学; 频率传递; 级联系统; 光学补偿

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0906001

## High Precise Frequency Transfer over a 430 km Fiber Backbone Network Using Cascaded System

Liu Qin<sup>1</sup> Han Shenglong<sup>2</sup> Wang Jialiang<sup>1</sup> Feng Zitong<sup>3</sup>  
Chen Wei<sup>3</sup> Cheng Nan<sup>3</sup> Gui Youzhen<sup>1</sup> Cai Haiwen<sup>3</sup> Han Shensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics, University of  
Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of  
Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** High precise frequency transfer is realized in partial Beijing-Shanghai optical fiber backbone network of 430 km using the cascaded method. The entire cascaded system is comprised of two stages with fiber links of 280 km and 150 km, respectively. To keep high symmetry and low noise, specific bi-directional Erbium-doped fiber amplifiers are used to compensate the large optical attenuation of each fiber link. When the whole system achieves stable status by optical compensation method, the stabilities of  $1.02 \times 10^{-13}$  at 1 s and  $8.24 \times 10^{-17}$  at  $10^4$  s are obtained. Experimental results verify that the actual results of the cascaded system are in accord with the error theoretical ones calculated from the results of two stages.

**Key words** fiber optics; frequency transfer; cascaded system; optical compensation

**OCIS codes** 060.2360; 060.2340; 120.7000

## 1 引言

高精度频率传递在时钟比对、基础物理<sup>[1]</sup>、天文学等多方面有着重要应用。受大气环境的影响,采用传

收稿日期: 2016-03-18; 收到修改稿日期: 2016-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61405227)

作者简介: 刘 琴(1988—),女,博士研究生,主要从事光纤时频传递方面的研究。E-mail: diuidudashu@163.com

导师简介: 韩申生(1960—),男,博士,研究员,主要从事极高能密度介质中的强非线性过程及其应用、X光相位成像技术、量子成像及光纤时频传递等方面的研究。E-mail: sshan@mail.shnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: yzgui@siom.ac.cn

统的基于卫星的传递手段,例如全球定位系统(GPS)共视、双向卫星比对等,已不能完全满足目前的应用需求<sup>[2]</sup>,并且该方法只能通过长时间平均来获得频率性能,很难在秒级时间尺度上提供良好的短期稳定性。光纤最大的特点是受外界环境的影响较小且损耗低,其传输信号的短期稳定度较自由空间好。近年来基于光纤的频率传递方法得到了迅速的发展,相关研究结果已证明该方法能提供更高的频率稳定度<sup>[3-5]</sup>。国内对高精度光纤频率传递技术的研究主要集中于实验室或者短距离的外场实验<sup>[6-8]</sup>,而为了实现准国土范围内的高精度频率传递,验证超长距离实地链路的光纤频率传递性能具有迫切的需求。当考虑超长链路的光纤频率传递时,需要面对的一个问题就是累积噪声随着链路长度的增加而增加,但是双向环回的补偿方式,补偿带宽和噪声抑制比随着链路长度的增加而下降<sup>[9]</sup>,导致超长链路传递系统中有部分噪声无法通过补偿系统进行反馈抑制。采用级联补偿方法可以解决这个问题。目前国内的级联传递只有实验室结果<sup>[10-11]</sup>,国外的级联传递集中于光频的传输<sup>[9]</sup>。微波传输仍然具有重要的现实意义,为验证上述问题,本文在京沪光纤骨干网江苏段中通过两级系统级联方式实现了总长度为 430 km 的高精度频率传递实验。

## 2 光纤频率传递级联系统

高精度光纤频率传递级联系统如图 1 所示,包含两级链路系统,一级传递系统将时钟信号传到远端后再再生给二级传递系统,最终送到用户端。图中两级系统的组成结构和实现方式都是相同的,在这里仅对一级系统作详细介绍。将本地端原子钟的 10 MHz 正弦频率信号倍频到 1 GHz 后经过光发射端机调制到波长为  $\lambda_1$  (1548.59 nm) 的光波信号上,采用更高的频率可以提高传递系统的信噪比。本地端的频率信号可以表示为  $V_0 = \cos(\omega t + \varphi_0)$ ,然后经过扰偏器和环形器进入到光纤链路中。扰偏器消除了由偏振模色散导致的链路不对称性而引起的噪声。到达远地端后,经过一个环形器,频率信号经探测器解调并放大,一部分作为最

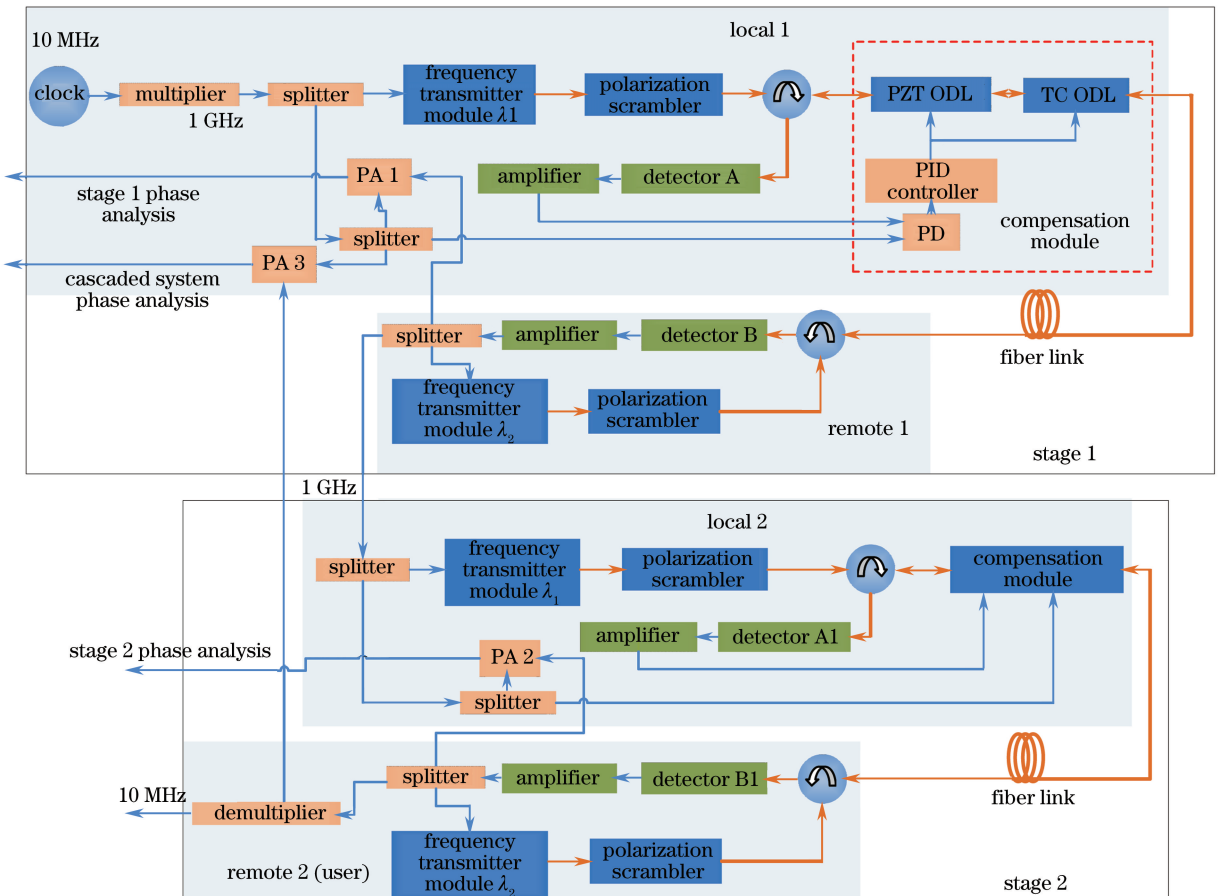


图 1 高精度光纤频率级联传递系统结构

Fig. 1 Structure of high precise fiber frequency transfer using cascaded method

终频率信号输出测试,并传递给下一级链路。此时频率信号变为

$$V_{\text{out}} = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{\text{ODL}} + \varphi_L + \Delta\varphi), \quad (1)$$

式中  $\varphi_{\text{ODL}}$  和  $\varphi_L$  分别为光纤延迟线和光纤链路引入的固定相移,  $\Delta\varphi$  为链路受到温度和振动引起的相位波动。为了得到光纤链路中积累的噪声  $\Delta\varphi$ , 需要采用单纤双向环回的方式<sup>[12-13]</sup>, 即将另一部分在远地端解调出来的频率信号重新调制到波长为  $\lambda_2$  (1547.70 nm) 的光发射机上, 经过环形器反向进入链路, 此时返回到本地端的频率信号为

$$V_{\text{ret}} = \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\varphi_{\text{ODL}} + 2\varphi_L + 2\Delta\varphi), \quad (2)$$

这里往返信号采用不同波长, 以避免背向散射信号对传递系统的影响。回到本地的频率信号与本地端的参考信号经鉴相器(PD)比相得到  $2\varphi_{\text{ODL}} + 2\varphi_L + 2\Delta\varphi$ , 通过一个比例积分微分(PID)电路运算后得到误差信号  $-\Delta\varphi$ , 反馈到光纤延迟线(ODL), 使其产生相移  $\varphi_{\text{ODL}} - \Delta\varphi$ , 于是, 远地端解调出来的频率信号为

$$V'_{\text{out}} = \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi_{\text{ODL}} + \varphi_L). \quad (3)$$

在可见光纤链路中由于温度变化和机械振动等所引起的时延抖动已经得到了抑制, 从而实现远地端对本地端频率信号的复制<sup>[14]</sup>。这里光纤延迟线包含两部分: 1) 压电陶瓷(PZT)延迟线, 通过快速拉伸改变光纤长度来补偿链路中变化速度快但幅度比较小的相位抖动, 其响应速度约为 2.2 kHz, 补偿范围约为 17 ps。2) 自研的温控延迟线, 利用温度改变光纤盘的延时量来补偿由环境温度变化引起的大范围的相位波动, 其响应速度为 10 Hz, 补偿范围(10 km 光纤盘)为 19 ns。最终的频率性能是通过测量本地端 1 GHz 参考信号和远地端频率信号的相位差来表征的。

对于二级系统, 频率信号传递方法和一级系统一致。二级 1 GHz 输出经过一个降频器降为 10 MHz 进入用户端。整个级联系统的性能是在两级链路都稳定之后通过比较一级本地端的参考信号和二级远地端输出信号得到。实验中使用的相位分析仪(PA)的带宽为 5 Hz。

### 3 级联实验在京沪光纤骨干网实地应用与验证

高精度光纤频率级联传递实地链路如图 2 所示。一级系统光纤链路(黄色线)是常州-无锡-苏州-无锡-常州, 二级系统光纤链路(蓝色线)是常州-无锡-常州, 使用的光纤除了三个节点处几十米的架机线, 其余都是埋地光纤。两级链路都是常州既作为本地端也作为远地端。一级链路 280 km, 采用 3 台高对称性低噪声的自研双向掺铒光纤放大器<sup>[15]</sup>(图中用红色星星表示)来补偿链路损耗, 分别放置在无锡、苏州节点。二级链路 150 km, 在无锡设置一台双向光放大器。传输链路总长为 430 km。

频率稳定度测量是通过对相位分析仪采集的相位差数据进行统计分析得到, 用阿伦方差(ADEV)表征。经过 9 h 测试, 430 km 级联系统的最终频率信号的稳定度如图 3 所示。在链路自由运转状态下, 由于实地埋地光纤会受到地表振动(车辆行驶等)的影响, 短期稳定度在 1 s 处只有  $4.19 \times 10^{-13}$ , 同时外界环境的温度波动导致频率长期稳定度在  $10^4$  s 处劣化到  $7.58 \times 10^{-14}$ 。利用开环测试的频率信号的相对相位漂移以及光纤相位与温度的相互关系, 反推出在测试时间内, 埋地光纤链路的温度波动约为  $0.63^\circ\text{C}$ 。对于 280 km 和

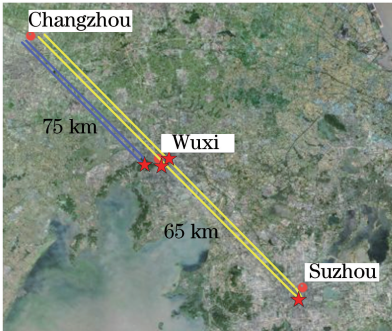


图 2 高精度光纤频率级联传递实地链路

Fig. 2 Field link of high precise fiber frequency transfer using cascaded method

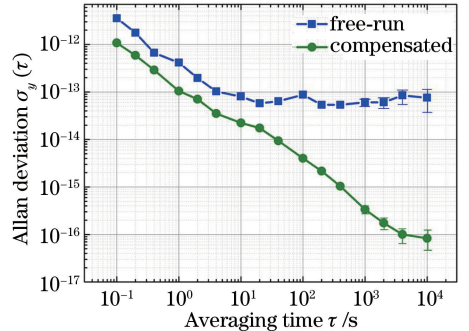


图 3 430 km 级联系统自由运转与补偿下频率稳定度比较

Fig. 3 Frequency stabilities of 430 km cascaded system under free-run and compensation

150 km 两段光纤链路,其引入的时延抖动分别达到 6.1 ns 和 3.3 ns。所以实验中采用的两个 10 km 光纤延迟线的补偿范围足够补偿每段链路的时延抖动。当两级系统通过光学补偿手段,使得传递系统进入稳定状态后,频率稳定度分别达到在 1 s 处  $1.02 \times 10^{-13}$  和在  $10^4$  s 处  $8.24 \times 10^{-17}$ ,可以看出,链路噪声经过补偿后得到了明显的抑制。补偿系统的反馈带宽受到传递系统单向传输时延  $\tau$  的限制<sup>[9]</sup>,当链路增长时,累积噪声会增加,但是补偿的带宽变小,则有部分噪声无法通过反馈系统进行实时噪声抑制,导致频率稳定度受限。对比相同链路长度下采用直接级联双向光放大器的方式,级联系统将长链路分割为几段短链路,更好地保证了每级系统的噪声都在补偿带宽内,这就是级联系统在长距离链路传输中具有重要意义的原因。

根据阿伦方差平方的定义

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2 = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \Delta y_i^2, \quad (4)$$

式中  $\Delta y_i$  是平均时间为  $\tau$  的相邻采样值的相位差值。由于实际实验中两段链路采用的是不同光缆中的光纤,可以认为级联再生系统其每段传输系统之间是相互独立的,根据误差理论,级联系统的阿伦方差平方可以表示为

$$\sigma_{\tau}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \frac{1}{(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \Delta y_i^I \Delta y_i^{II}, \quad (5)$$

式中  $\sigma_1$  和  $\sigma_{\parallel}$  分别为两个独立系统的阿伦方差。如果样本数  $M$  很大或者每段系统的相位波动是相互独立的,则(5)式中的相关项可以去掉<sup>[11,16]</sup>。所以理论上 430 km 级联系统的稳定度应该是 280 km 一级系统和 150 km 二级系统两者稳定度的均方根值。图 4(a)是一级和二级系统补偿后的稳定度。需要注意的是,两级系统在短期稳定度非常相似,这是因为两级系统采用相同的端机设备,链路噪声受到抑制后,系统短期稳定度的残余噪声取决于本远地端机的本底噪声性能水平。但是长期稳定度一级系统就比二级系统要差,这是因为存在链路不对称性,链路长度越长不对称性影响越严重,导致长稳性能不同。图 4(b)是根据一级和二级系统的频率稳定度结果计算出的理论值与实际测量的级联系统频率稳定度的比较。可以看出,实际值与理论值基本符合。

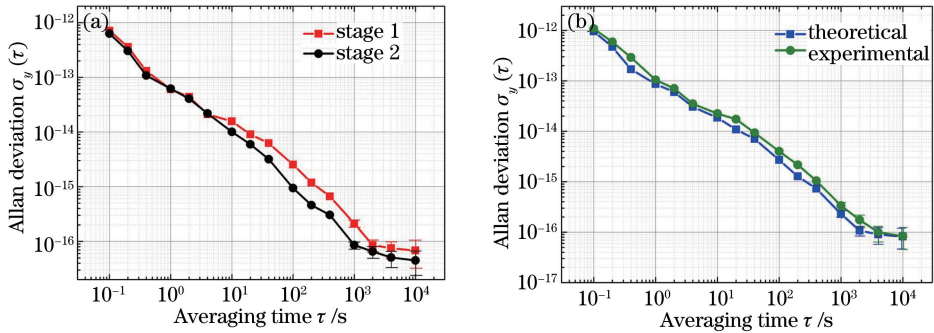


图 4 补偿下频率稳定度结果。(a)一级和二级系统;(b)级联系统的理论值与实验值  
Fig. 4 Frequency stabilities under compensated status. (a) Stage 1 and stage 2;  
(b) theoretical and experimental results of cascaded system

## 4 结 论

通过级联方式在部分京沪光纤骨干网 430 km 链路中实现了频率传递。该级联系统包含了常州-无锡-苏州-无锡-常州的 280 km 和常州-无锡-常州的 150 km 两级链路系统。通过光学补偿方式,当每一级传递系统达到稳定后,整个级联系统最终获得的频率稳定度分别为在 1 s 处  $1.02 \times 10^{-13}$  和在  $10^4$  s 处  $8.24 \times 10^{-17}$ 。对比由两级系统通过误差理论计算出来的理论值,该级联系统最后的实验值与理论值基本符合。可以预见通过更多级系统,频率传递距离可以达到几千千米量级,这也为未来构建准国土范围内的光纤频率传递网络奠定了一定的基础。

## 参 考 文 献

- 1 Foreman S M, Holman K W, Hudson D D, *et al.* Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks [J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, 78(2): 021101.
- 2 Tseng W, Lin S, Feng K, *et al.* Improving TWSTFT short-term stability by network time transfer [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(1): 161-167.
- 3 Lopez O, Amy-Klein A, Daussy C, *et al.* 86 km optical link with a resolution of  $2 \times 10^{-18}$  for RF frequency transfer [J]. *The European Physical Journal D*, 2008, 48(1): 35-41.
- 4 Lopez O, Haboucha A, Chanteau B, *et al.* Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the internet fiber network [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23518-23526.
- 5 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.
- 6 Li Xiaoya, Zhu Yong, Lu Lin, *et al.* Study on high precision disciplined time-frequency transferring experiments through optical fiber link [J]. *Acta Optica Sinica*. 2014, 34(35): 0506004.  
李晓亚, 朱 勇, 卢 麟, 等. 高精度光纤时频伺服传递实验研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(35): 0506004.
- 7 Chang Le, Dong Yi, Sun Dongning, *et al.* Influence and suppression of coherent Rayleigh noise in fiber-optic-based phase-stabilized microwave-frequency transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*. 2012, 32(5): 0506004.  
常 乐, 董 毅, 孙东宁, 等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506004.
- 8 Cheng N, Chen W, Liu Q, *et al.* Joint transfer of time and frequency signals and multi-point synchronization via fiber network project supported by the national natural science foundation of China (Grant No. 61405227) [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 25(1): 014206.
- 9 Lopez O, Haboucha A, Kéfélian F, *et al.* Cascaded multiplexed optical link on a telecommunication network for frequency dissemination [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16849-16857.
- 10 Liu Qin, Chen Wei, Xu Dan, *et al.* Frequency transfer and time synchronization simultaneously over a cascaded fiber link of 230 km [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0305006.  
刘 琴, 陈 炜, 徐 丹, 等. 采用级联方式在 230 km 光纤链路中同时实现频率传递和时间同步 [J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0305006.
- 11 Gao C, Wang B, Zhu X, *et al.* Dissemination stability and phase noise characteristics in a cascaded, fiber-based long-haul radio frequency dissemination network [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(9): 093111.
- 12 Li Delong, Cheng Qingming, Zhang Baofu, *et al.* Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stabilities [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 010602.  
李得龙, 程清明, 张宝富, 等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响 [J]. *激光与光电子进展*, 2014, 51(1): 010602.
- 13 Chen W, Liu Q, Cheng N, *et al.* Joint time and frequency dissemination network over delay-stabilized fiber optic links [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-9.
- 14 Cheng Nan, Chen Wei, Liu Qin, *et al.* Time synchronization technique for joint time and frequency transfer via optical fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0705003.  
程 楠, 陈 炜, 刘 琴, 等. 光纤时间频率同时传递系统中时间同步方法的研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0705003.
- 15 Liu Q, Chen W, Xu D, *et al.* Bi-directional erbium-doped fiber amplifiers used in joint frequency and time transfer based on WDM technology [J]. *Chin Opt Lett*, 2015, 13(11): 110601.
- 16 Fujieda M, Kumagai M, Nagano S. Coherent microwave transfer over a 204 km telecom fiber link by a cascaded system [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(1): 168-174.