

# 基于 210 km 实地通信链路的高稳定性光学频率信号传递

臧琦<sup>1,2,3</sup>, 邓雪<sup>1,3</sup>, 曹群<sup>1,2,3</sup>, 高静<sup>1,3</sup>, 焦东东<sup>1,3</sup>, 刘杰<sup>1,3</sup>,  
许冠军<sup>1,3</sup>, 董瑞芳<sup>1,2,3</sup>, 刘涛<sup>1,2,3</sup>, 张首刚<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600

**摘要** 利用西安和咸阳之间的电信省级骨干光纤网构建了 210 km 的光学频率信号传递测试链路, 链路损耗为 0.23 dB/km。实验中采用可搬运、基于光纤干涉仪、线宽约为 200 Hz 的激光器作为光源, 利用两台低噪声双向掺铒光纤放大器(EDFA)补偿光纤链路损耗和增加光信号的传输距离, 放大器平均增益控制在 15 dB 左右, 以防止激励。通过测量和分析不同情况下光纤链路的附加相位噪声, 可观测到铁路震动引起的规律性干扰。当噪声抑制系统在锁定状态时, 链路的相位噪声被抑制了 23 dB, 在剔除铁路干扰时段数据后, 获得的 210 km 实地通信链路的秒级频率稳定度达到了  $1.51 \times 10^{-14}$ , 万秒频率稳定度达到了  $5 \times 10^{-17}$ 。利用 210 km 通信链路进行了光学频率信号的远程传递测试, 分析了限制频率稳定度的主要影响因素, 并针对现行光纤布设方式提出了补充要求。该研究为基于通信链路的高精度光学频率信号的传递与比对提供理论支撑。

**关键词** 光纤光学; 光学频率信号传递; 光纤网络; 实地光纤链路; 光放大; 光钟比对

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0706004

## Ultra-Stable Optical Frequency Signal Transfer in 210 km Urban Communication Link

Zang Qi<sup>1,2,3</sup>, Deng Xue<sup>1,3</sup>, Cao Qun<sup>1,2,3</sup>, Gao Jing<sup>1,3</sup>, Jiao Dongdong<sup>1,3</sup>,  
Liu Jie<sup>1,3</sup>, Xu Guanjun<sup>1,3</sup>, Dong Ruifang<sup>1,2,3</sup>, Liu Tao<sup>1,2,3</sup>, Zhang Shougang<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China

**Abstract** We establish a 210 km optical frequency signal transfer test link along the telecom provincial backbone optical fiber network between Xi'an and Xian Yang, and the loss of the link is 0.23 dB/km. A fiber interferometer based laser with linewidth of 200 Hz is used as the light source, and the laser is conveyable. Two bilateral erbium-doped optical fiber amplifiers (EDFAs) with low noise are used to compensate the fiber link loss and increase the transmission distance of signal. The average gain of amplifier is controlled at about 15 dB to avoid the self-excited oscillation. The additional phase noise of the fiber link under different conditions is measured and analyzed, and the regular disturbance caused by the railway vibration is observed. The phase noise in the link is suppressed by 23 dB

**收稿日期:** 2017-03-03; **收到修改稿日期:** 2017-03-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(91636101)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030800)、国家重点研发计划(2016YFF0200200)、国家自然科学基金青年基金(11403031)、西部青年学者(B类)(XAB2016B74)

**作者简介:** 臧琦(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤时间频率传递方面的研究。E-mail: zangqi@ntsc.ac.cn

**导师简介:** 刘涛(1976—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤时间频率传递和超窄线宽激光器方面的研究。

E-mail: taoliu@ntsc.ac.cn(通信联系人)

when we use the noise suppression system. When the noise data from the railway vibration is eliminated, the second level frequency stability of the 210 km urban communication link can achieve  $1.51 \times 10^{-14}$  and be better than  $5 \times 10^{-17}$  at  $10^4$  s. The remote transfer test for optical frequency signal based on 210 km communication link is completed, and the main influence factors limiting the frequency stability are analyzed. The supplementary requirements are put forward for the current fiber setting way. The study provides theoretical supplement for achieving high accuracy optical frequency signal transmission and comparison based on the communication link.

**Key words** fiber optics; optical frequency signal transfer; fiber network; urban fiber link; optical amplification; optical clock comparison

**OCIS codes** 060.2410; 140.3510; 060.2310; 060.2320

## 1 引 言

高精度频率信号远程传递在导航定位、远程时钟比对、基础物理、精密测量以及天文观测等领域有着重要应用<sup>[1]</sup>。近年来,研究人员在光钟研究方面取得了很大进展,光钟的频率不稳定度和不确定度都已达到 $10^{-18}$ 量级<sup>[2-7]</sup>,比目前的频率基准铯原子喷泉钟的精度提高了2个量级。卫星双向链路(TWSTFT)、全球定位系统(GPS)和北斗定位授时系统等<sup>[8-9]</sup>传统微波时间频率传递技术虽然比较成熟,但由于大气环境等因素的制约,传递精度已无法满足现有的传输需求。此外,这些技术只能通过长时间的测量平均来得到较好的频率信号,无法得到较好的秒级频率稳定度。因此,利用光纤来传输高精度的光学频率信号展现出了巨大的潜力。

光纤具有传输损耗低、不易受干扰和传输精度高等优点,被广泛应用于通信领域<sup>[10-11]</sup>。近年来,研究人员在利用光纤进行频率和时间信号的传递方面取得了快速的发展。世界上许多国家的科研小组都已经在利用光纤链路实现高精度光学频率信号的远程传递方面取得了突破。在欧洲光学频率传递网络(OFTEN)项目的支持下,德国的 Predehl 等<sup>[12-13]</sup>、法国的 Chiodo 等<sup>[14]</sup>、英国的 Kim 等<sup>[15]</sup>、意大利的 Calonico 等<sup>[16]</sup>都已经在实地光纤链路中实现了高精度光学频率信号的传递,并逐渐构建了泛欧洲的传输网络。Predehl<sup>[12]</sup>在 920 km 实地光纤链路中实现了秒级频率稳定度为  $5 \times 10^{-15}$  的光学频率信号传递;Droste 等<sup>[13]</sup>在 1840 km 实地光纤链路中实现了秒级频率稳定度为  $2 \times 10^{-15}$  的光学频率信号传递;Calonico 等<sup>[16]</sup>在 642 km 实地光纤链路中实现了千秒频率稳定度为  $3 \times 10^{-19}$  的长距离传输<sup>[16]</sup>。此外,美国的 Newbury 等<sup>[17]</sup>、澳大利亚的 Schediwy 等<sup>[18]</sup>也都相继开展了相关研究。

同时,国内的多个研究小组也已经在光纤时间频率传递方面取得了一定的进展。Liu 等<sup>[19]</sup>通过在 430 km 实地光纤链路上将微波频率信号进行调制,实现了秒级频率稳定度为  $1 \times 10^{-13}$  的传输;Ma 等<sup>[20]</sup>在 82 km (50 km 实验室光纤加 32 km 实地光纤)光纤上实现了秒级频率稳定度为  $2 \times 10^{-17}$  的光学频率信号传递;Deng 等<sup>[21]</sup>在临潼区和长安区之间的 112 km 实地光纤链路中实现了秒级频率稳定度为  $2 \times 10^{-16}$  的光学频率信号传递,而且还利用双向掺铒光纤放大器(EDFA)在实验室光纤中实现了 200 km 光学频率链路传递的演示,秒级频率稳定度达到  $3.8 \times 10^{-16}$ <sup>[22]</sup>。此外,该课题组在 50 km 实验室光纤中实现了高精度的双向光学相位比对<sup>[23]</sup>。在光钟比对、其他精密测量以及国防建设等领域都需要构建高精度的时间频率传递网络,以提高相关应用精度和实现大尺度的交叉学科研究。因此,需要利用通信运营商现有的光纤开展实地传递测试,为全国网的建设提供依据。

本文通过实地通信光纤实现了 210 km 高精度光学频率信号传递测试。利用西安机房和咸阳机房中的 6 根 35 km 光纤链接构成 210 km 的传输链路,并通过低噪声双向 EDFA 提供功率补偿。该光纤链路穿过多段高速公路和铁路的交汇处,频繁地受到外界交通状况的干扰,因此对光学频率信号的高精度传递带来较大的难度。针对链路中的干扰情况,在实验中通过主动抑制的方式在源端消除相位噪声,从而在远程端获得高稳定度的光学频率信号。实验结果表明传输的频率信号受到明显的交通状况影响,对数据进行去干扰处理后秒级频率稳定度达到  $1.51 \times 10^{-14}$ ,  $10^4$  s 后优于  $5 \times 10^{-17}$ 。同时分析了不同情况下的相位噪声以及限制频率稳定度的因素。

## 2 相位噪声抑制原理及光学频率信号传递系统

### 2.1 相位噪声抑制原理

传输链路相位噪声抑制技术采用多普勒噪声抑制技术,光纤链路相位噪声抑制原理如图 1 所示。在光学频率传递系统中,可将整个传输链路视为一个理想的链路和一个相位噪声为  $\phi_f$  的噪声源。将本地端的光学频率信号  $\nu_{\text{local}}$  视为理想光源在链路中的传输信号,则  $\nu_{\text{local}}$  可表示为<sup>[24]</sup>

$$\nu_{\text{local}} = d\phi_{\text{ref}}(t)/dt, \quad (1)$$

式中  $\phi_{\text{ref}}(t)$  为参考频率信号的相位。远程端接收到的光学频率  $\nu_{\text{remote}}$  可表示为

$$\nu_{\text{remote}} = \frac{d[\phi_{\text{ref}}(t-\tau) + \phi_c(t-\tau) + \phi_{f,\text{forward}}]}{dt} = \nu_{\text{local}} + \frac{d[\phi_c(t-\tau) + \phi_{f,\text{forward}}]}{dt}, \quad (2)$$

式中  $\phi_c(\cdot)$  为补偿相位,  $\tau$  为链路单程传输的时间延迟,  $\phi_{f,\text{forward}}$  为前向传输的相位。在远程端,大部分信号光被反射后到达本地端,并再次经过相位调制。通过拍频比对反射光和参考光的相位,得到往返传输的相位抖动  $\Delta\phi$  为

$$\Delta\phi = \phi_{\text{ref}}(t) - \phi_{\text{ref}}(t-2\tau) - \phi_c(t) - \phi_c(t-2\tau) - \phi_{f,\text{forward}} - \phi_{f,\text{backward}}, \quad (3)$$

式中  $\phi_{f,\text{backward}}$  为信号后向传输的相位。通过调制控制使相位  $\Delta\phi$  为一常量,则有

$$\frac{d\phi_{\text{ref}}(t)}{dt} = \frac{d[\phi_{\text{ref}}(t-2\tau) + \phi_c(t) + \phi_c(t-2\tau) + \phi_{f,\text{forward}} + \phi_{f,\text{backward}}]}{dt}. \quad (4)$$

多普勒噪声抑制技术仅在低频处即  $f \ll 1/(4\tau)$  时有效,此时有

$$\frac{d\phi_{f,\text{forward}}}{dt} \approx \frac{d\phi_{f,\text{backward}}}{dt}, \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_c(t)}{dt} \approx \frac{d\phi_c(t-\tau)}{dt} \approx \frac{d\phi_c(t-2\tau)}{dt}. \quad (6)$$

根据(2)、(4)~(6)式可得

$$\frac{d[\phi_c(t-\tau) + \phi_{f,\text{forward}}]}{dt} \approx 0, \quad (7)$$

$$\nu_{\text{remote}} \approx \nu_{\text{local}}, \quad (8)$$

因此传输链路的相位噪声可以得到抑制。

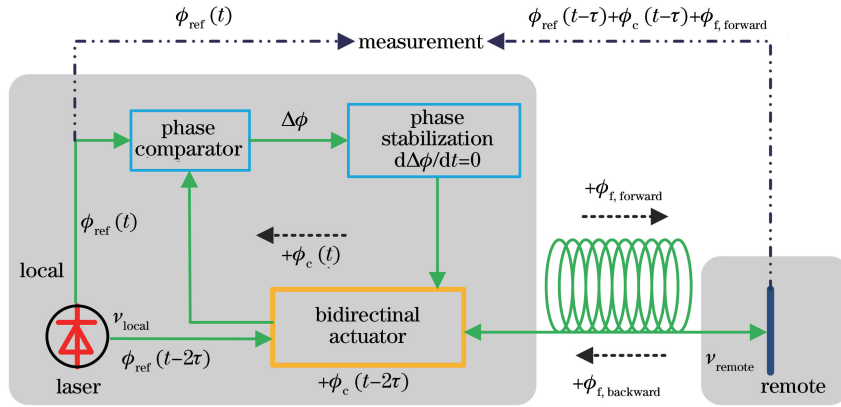


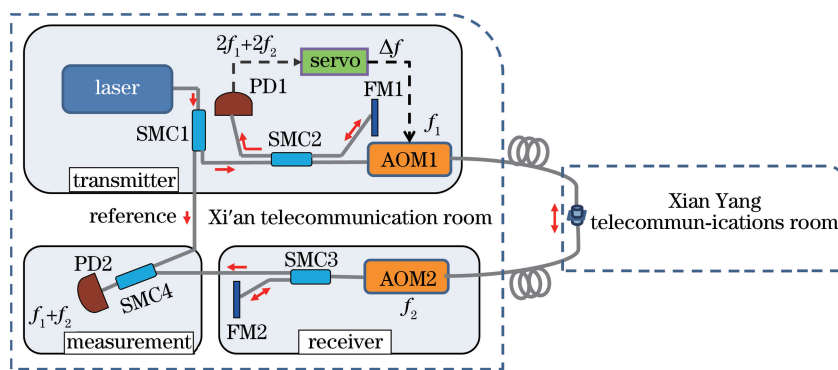
图 1 光纤链路相位噪声抑制原理图

Fig. 1 Principle of phase noise suppression for fiber link

### 2.2 光学频率信号传递系统

基于第 2.1 节的相位噪声抑制原理,设计了如图 2 所示的光学频率信号传递系统,包括光源、发送端、传输链路、中继放大装置和远程接收端。发送端将光源产生的高精度光学频率信号注入到传输链路中,信号经放大器补偿功率损耗后最终传输到远程端。实验中采用基于光纤干涉仪的窄线宽激光器作为光源,激光波长为 1550.42 nm,线宽约为 200 Hz。光源产生的窄线宽激光先经过一个  $1 \times 2$  的 90/10 分束器 SMC1 分为两束:10%的光作为参考光,用于最终的拍频测量;90%的光向后传输到分束器 SMC2。SMC2 为一个  $2 \times 2$

的 90/10 分束器,10%的信号光经 SMC2 后被法拉第旋转镜 FM1 沿原路反射,90%的信号光经 SMC2 后继续向后传输,再经声光调制器 AOM1 移频  $f_1$  ( $f_1=110$  MHz),移频后的信号光经光纤链路传输到远程端。信号光进入远程端后,先经过声光调制器 AOM2 移频  $f_2$  ( $f_2=50$  MHz),再经一个  $1\times 2$  的 90/10 分束器 SMC3,90%的光经法拉第旋转镜 FM2 后沿原路返回至本地端,并与 FM1 反射的光经 SMC2 合束拍频得到  $2f_1+2f_2$ 。拍频信号由探测器 PD1 采集,经伺服系统解调得到误差信号  $\Delta f$ ,该误差信号用于实时调制 AOM1 以消除链路中引入的相位噪声。此外,10%的信号光经过 SMC3 后与经过 SMC1 的参考光在 SMC4 处进行合束拍频,利用频率计数器测量由 PD2 采集的拍频信号  $f_1+f_2$ ,通过计算测量数据的阿伦方差来评估传输系统的稳定度。



PD: photodetector; SMC: single mode coupler; AOM: acoustic optic modulator; FM: Faraday mirror

图 2 光学频率信号传递系统示意图

Fig. 2 Diagram of optical frequency signal transfer system

### 3 实地光纤通信链路测试

#### 3.1 实地光纤链路概况

根据上述的原理和实验装置在西安机房和咸阳机房之间的实地光纤链路中进行测试。光纤链路起于西安市区的机房,止于咸阳机房,全段光纤以地理方式为主,链路单程长度为 35 km,总计 6 根光纤。210 km 光纤链路结构如图 3 所示,在咸阳机房用光纤跳线将 6 根光纤两两相连,构成 3 段长度分别为 70 km 的光纤,然后利用两台双向 EDFA(Bi-EDFA)将链路连接并构成 210 km 的传输链路,传输系统本地端和远程端都位于西安机房。光纤链路的平均损耗为 0.23 dB/km。光纤连接法兰均为金属连接器/紧密接触(FC/PC)型接头。

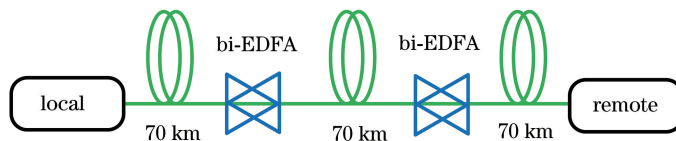


图 3 210 km 光纤链路结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of 210 km fiber link

机房内环境温度较为稳定,但声学噪声较大,而且链路多处沿铁路铺设并经过铁路交汇点,尤其当西安高铁站和咸阳站附近的光缆直接从铁路下方经过,因此受交通状况影响较大。测量结果表明当列车经过光纤与铁路交叉点时信号有明显干扰,在光纤与铁道平行的路段没有出现明显干扰。列车带来的干扰信号如图 4 所示,干扰幅度大,干扰信号周期性,持续时间约为 1~3 min。根据记录的链路干扰信号的时间并结合部分干扰时间和列车时间表,基本可以确定这种干扰来自列车经过及交汇时的震动。为避免此类干扰,为穿过铁路的光缆增加防护加固层和减震防护等措施,条件允许时可全程地理光缆。

#### 3.2 实地光纤链路传递测试结果

为了评估光学频率信号在 210 km 实地通信链路中的传输情况,实验中将光源、本地端和远程端都放置在西安机房,光学频率信号经本地端进入链路,经过实地通信链路传输后回到西安机房,再进行拍频测量。

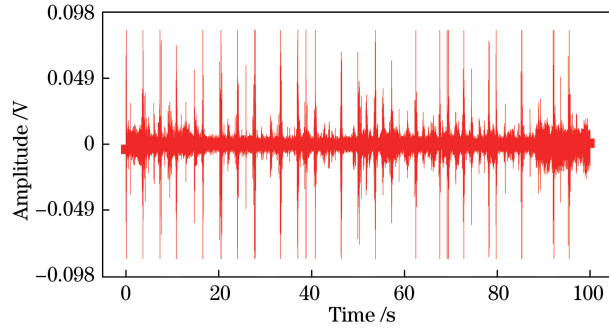


图 4 干扰信号

Fig. 4 Interference signal

实验中利用快速傅里叶变换分析仪(型号 SR785, 斯坦福公司, 美国)分别测量了噪声抑制系统锁定时和系统自由运转时的相位噪声。通过将反射回的传输信号相位和本地端参考信号的电压抖动转换成相位的抖动并进行相位噪声的测量, 得到相位的变化和电压的变化满足<sup>[12]</sup>

$$V_{PD} = K_{PD} [\varphi(t) - \varphi_{ref}(t)], \quad (9)$$

式中  $K_{PD}$  为弧度电压的转换系数,  $\varphi(t)$  为待测信号,  $\varphi_{ref}(t)$  为参考信号。测量时为了得到更精确的结果, 对输入的信号进行分频(分频系数为  $K_{PS}$ ), 并考虑测量带宽  $B$ , 得到相位噪声为

$$S_{\varphi}(f) = \frac{\{\text{FFT}[V_{PD}/(K_{PD}K_{PS})]\}^2}{B}, \quad (10)$$

式中 FFT 代表傅里叶变换。根据(10)式, 可以得到 210 km 实地通信链路的相位噪声, 实验测量结果如图 5 所示。

210 km 的光学频率信号传递实验利用两个双向 EDFA 将 3 段 70 km 的光纤链路连接起来, 双向 EDFA 用来补偿链路衰减引起的功率损耗。噪声抑制系统锁定时(图 5 中红色实线)与自由运转时(图 5 中黑色实线)相比, 链路的相位噪声在 1 Hz 处被抑制了至少 23 dB。由于链路中的双向 EDFA 和通信光纤链接采用 FC/PC 型接头, 光纤端面存在光反射, 反射光经过双向 EDFA 的放大后会形成类似于谐振腔的激射, 造成附加相位噪声变大, 影响噪声抑制效果, 这种影响在后期测试中可以通过更换光纤接头或者采用熔接的方式消除。

此外, 每次测量相位噪声时受到的干扰信号会有变化, 尤其是当有列车带来干扰时测量结果的差别会变大, 因此, 采用取平均值并测量多组数据的方法来观察相位噪声的变化。不同时间段测量的 210 km 实地通信链路的相位噪声如图 6 所示, 图中曲线分别为不同时间段噪声抑制系统锁定后 5 次测量的平均相位噪声。图 6 中绿色实线代表受干扰最大时的相位噪声, 紫色实线代表受干扰最小时的相位噪声, 两种情况的相位噪声在 1 Hz 处相差约 3 dB, 在 100 Hz 处相差约 10 dB, 因此可以看出链路所受到的干扰十分复杂, 影响了光学频率信号的稳定传递。

实验中为了评估光学频率信号在实地链路传递中的稳定度, 采用频率计数器(型号 Agilent 53230A, 安捷伦公司, 美国)对相位噪声抑制后的传输频率进行计数(倒数模式), 时间间隔为 1 s, 通过计算阿伦方差(ADEV)得到传输稳定度。实地通信链路光学频率信号的传输稳定度如图 7 所示, 分别评估了系统锁定后 70 km(红色圆点线)、140 km(蓝色三角线)和 210 km(黑色方块线)传输链路的频率稳定度。对于 70 km 和 140 km 的传输链路, 由于测量时间较短, 只得到 100 s 左右的频率稳定度  $\sigma$ , 该频率稳定度  $\sigma$  与传输距离  $L$  之间的关系满足  $\sigma \propto L^{3/2}$ <sup>[25]</sup>。当传输距离增加到 210 km 时, 列车经过时的干扰、双向 EDFA 之间的激射、激光器本身的噪声和漂移以及光纤接头之间的影响等, 都会干扰频率信号的稳定传输, 从而弱化频率稳定度与传输距离之间的关系。长时间测量时会出现第 3.1 节中所述的列车干扰, 测量的频率值会偶尔出现无法抑制的干扰点, 因此处理数据时应先剔除这些干扰点后再计算系统的频率稳定度。此时, 根据测量结果计算得到, 210 km 实地通信链路秒级频率稳定度为  $1.51 \times 10^{-14}$ ,  $10^4$  s 后达到  $5 \times 10^{-17}$ 。但由于链路中的噪声较大, 而且激光器线宽和 210 km 链路的相干线宽接近, 因此实测的频率稳定度线型与  $1/\tau$  线型有差别。

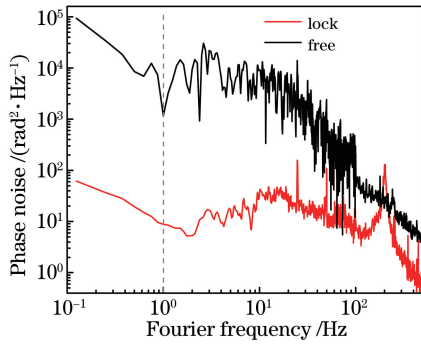


图 5 210 km 实地通信链路的相位噪声  
Fig. 5 Phase noise of 210 km urban communication link

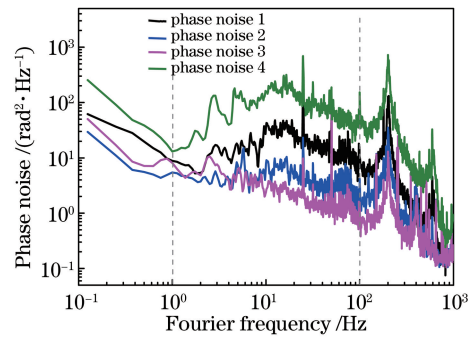


图 6 不同时间段测量的 210 km 实地通信链路相位噪声  
Fig. 6 Measured phase noise of 210 km urban communication link at different time intervals

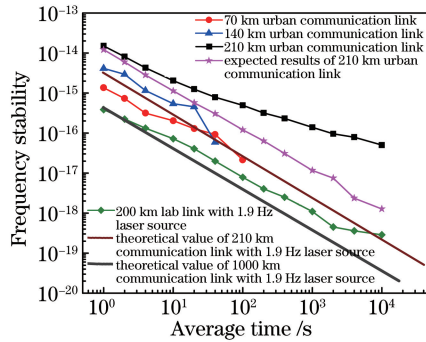


图 7 实地通信链路光学频率信号的频率稳定度  
Fig. 7 Frequency stability of optical frequency signal in urban communication link

### 3.3 传输测试结果讨论

为了较好地评估无干扰时 210 km 链路的预期频率稳定度,实验中通过挑选干扰不频繁的时间段进行短期测量,得到 100 s 的频率稳定度,然后重复测量得到原始频率数据,以模拟较长时间的数据测量。通过这种数据处理方式得到预期的秒级频率稳定度(图 7 中粉色五星线)为  $1.21 \times 10^{-14}$ ,  $10^4$  s 后优于  $1.26 \times 10^{-18}$ ,呈  $1/\tau$  线性下降。采用线宽约为 200 Hz 且基于光纤干涉仪的可搬运激光器作为光源时,在传输相干度和频率稳定度方面都有很大的局限性,因此光学频率信号的频率稳定度较差。如果使用参考文献[26]中的窄线宽激光器作为光源,可得到实验室 200 km 链路的秒级频率稳定度为  $3.86 \times 10^{-16}$ (图 7 中绿色菱形方块线)。理论上,210 km 传输链路的秒级频率稳定度(图 7 中深灰色实线)也可以达到  $10^{-16}$  量级,若不考虑激光器频率漂移等影响,以  $1/\tau$  线性下降到  $10^4$  s 后的频率稳定度可以达到  $10^{-20}$  量级,远优于现有的基于卫星的传输方式的频率稳定度。根据频率稳定度与传输距离的关系,当传输距离达到  $10^6$  m 时,秒级频率稳定度为  $10^{-15}$  量级,  $2 \times 10^4$  s 后达到  $10^{-20}$  量级(图 7 中深棕色实线),满足国土范围内的光学频率信号传输需求。

目前,由于客观因素和实验条件的限制,光纤链路中的噪声较大,210 km 实地通信链路的频率稳定度还有较大的提升空间。后续将与光纤运营商协商,争取改善实地链路的铺设条件,同时改进光学频率信号传递系统,为实现更高频率稳定度和更远距离的频率信号传递打下基础。

## 4 结 论

利用西安到咸阳 6 段单程为 35 km(共计 210 km)的实地通信链路进行了高精度光学频率信号传递的测试。基于多普勒相位噪声抑制技术,将窄线宽激光通过本地端注入到光纤内进行传输,在链路末端利用系统中的远程端将部分光学频率信号反射回链路,以进行相位噪声的抑制。同时,利用两个低噪声双向 EDFA 来实现对链路损耗的功率补偿。实验中分别分析了 210 km 实地链路的相位噪声抑制情况以及在不同环境影响下的相位噪声变化。实验结果表明链路的秒级频率稳定度为  $1.51 \times 10^{-14}$ ,  $10^4$  s 后可达到  $5 \times 10^{-17}$ 。

同时,结合实验室光纤的传输结果对  $10^6$  m 实地光纤的传输进行了理论分析。后续工作将针对实际测试中遇到的问题,继续优化系统对噪声的抑制能力,提高实地链路中的频率稳定度,为实现国土范围内超远距离的光学频率传递及其在大尺度科研、高技术应用等领域的应用提供支撑。

## 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]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(2): 021101.
- [2] Sherman J A, Lemke N D, Hinkley N, *et al.* High-accuracy measurement of atomic polarizability in an optical lattice clock[J]. Physical Review Letters, 2012, 108(15): 153002.
- [3] Huntemann N, Okhapkin M, Lipphardt B, *et al.* High-accuracy optical clock based on the octupole transition in  $^{171}\text{Yb}^+$  [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(9): 090801.
- [4] Swallows M D, Bishof M, Lin Y G, *et al.* Suppression of collisional shifts in a strongly interacting lattice clock[J]. Science, 2011, 331(6020): 1043-1046.
- [5] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, *et al.* An atomic clock with  $10^{-18}$  instability[J]. Science, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [6] 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.
- [7] Ushijima I, Takamoto M, Das M, *et al.* Cryogenic optical lattice clocks[J]. Nature Photonics, 2015, 9(3): 185-189.
- [8] Fujieda M, Gotoh T, Nakagawa F, *et al.* Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2012, 59(12): 2625-2630.
- [9] Tseng W, Lin S Y, Feng K M, *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.
- [10] Desurvier E, Zervas M N. Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications[M]. New York: Wiley-Interscience, 1994: 3-26.
- [11] Becker P C, Olsson N A, Simpson J R. Erbium-doped fiber amplifiers: Fundamentals and technology[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 258-259.
- [12] Predehl K. A 920 km optical fiber link for frequency metrology at the 19<sup>th</sup> decimal place[D]. München: Ludwig-Maximilians-Universität, 2012.
- [13] 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.
- [14] Chiodo N, Quintin N, Stefani F, *et al.* Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33927-33937.
- [15] Kim J, Schnatz H, Wu D S, *et al.* Optical injection locking-based amplification in phase-coherent transfer of optical frequencies[J]. Optics Letters, 2015, 40(18): 4198-4201.
- [16] 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.
- [17] Newbury N R, Williams P A, Swann W C. Coherent transfer of an optical carrier over 251 km[J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3056-3058.
- [18] Schediwy S W, Gozzard D, Baldwin K G H, *et al.* High-precision optical-frequency dissemination on branching optical-fiber networks[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2893-2896.
- [19] Liu Q, Han S L, Wang J L, *et al.* Simultaneous frequency transfer and time synchronization over a 430 km fiber backbone network using a cascaded system[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 070602.
- [20] Ma C Q, Wu L F, Jiang Y Y, *et al.* Coherence transfer of sub hertz-linewidth laser light via an 82 km fiber link[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(26): 261109.
- [21] 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.
- [22] Zang Qi, Deng Xue, Liu Jie, *et al.* Optimization design for bidirectional erbium-doped fiber amplifier used in long distance optical frequency transfer link[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306006.  
臧 琦, 邓 雪, 刘 杰, 等. 用于长距离光学频率传递链路的双向掺铒光纤放大器的优化设计[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0306006.

- [23] Cao Qun, Deng Xue, Zang Qi, *et al.* Two-way optical phase comparison method based on local measurement[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(5): 0504004.  
曹 群, 邓 雪, 臧 琦, 等. 基于本地测量的双向光学相位比对方法[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0504004.
- [24] Jiang H F. Development of ultra-stable laser sources and long-distance optical link via telecommunication networks[D]. Paris: Université Pierre et Marie Curie, 2010.
- [25] 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.
- [26] Jiao Dongdong, Gao Jing, Liu Jie, *et al.* Development and application of communication band narrow linewidth lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(19): 190601.  
焦东东, 高 静, 刘 杰, 等. 用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用[J]. 物理学报, 2015, 64(19): 190601.