

引用格式:刘杰,邓雪,张翔,等. 国家授时中心长距离光纤光学频率传递研究进展[J]. 时间频率学报, 2021, 44(4): 231-243.

# 国家授时中心长距离光纤光学频率传递研究进展

刘杰<sup>1,2</sup>, 邓雪<sup>1,2</sup>, 张翔<sup>1,2,3</sup>, 臧琦<sup>1,2,3</sup>, 王丹<sup>1,2,3</sup>, 焦东东<sup>1,2</sup>,  
高静<sup>1,2,3</sup>, 王东杰<sup>1,2,3</sup>, 周茜<sup>1,2,3</sup>, 刘涛<sup>1,2,3</sup>, 张首刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;  
2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 光纤光学频率传递是新一代时间频率体系和地基授时系统的重要组成部分, 利用光纤实现高精度光学频率传递具有明显的精度优势和应用前景。本文报道了中国科学院国家授时中心在长距离高精度光纤光学频率传递方面的研究进展。112 km 实地光纤上国内首次实现万秒稳定度  $7.5 \times 10^{-20}$  的光频传递; 利用光外差锁相方案实现了光频级联传递技术突破, 在 224 km 实地光纤上光频传递稳定度万秒稳定度  $7.7 \times 10^{-19}$ ; 首次提出并验证了一种基于本地测量的光纤光频双向比对, 50 km 频率比对稳定度秒稳达到  $1.2 \times 10^{-16}$ , 4 万秒稳定度达到  $1.3 \times 10^{-21}$ 。最新进展为在 860 km 实地光纤上实现了稳定度  $2 \times 10^{-19}$  @ 200 s 的光频传递。

**关键词:** 光学频率传递; 时间频率标准; 光纤网络; 光纤授时系统

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0231-13

## Progress of fiber-based optical frequency transfer in NTSC

LIU Jie<sup>1,2</sup>, DENG Xue<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiang<sup>1,2,3</sup>, ZANG Qi<sup>1,2,3</sup>, WANG Dan<sup>1,2,3</sup>, JIAO Dong-dong<sup>1,2</sup>,  
GAO Jing<sup>1,2,3</sup>, WANG Dong-jie<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Qian<sup>1,2,3</sup>, LIU Tao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shou-gang<sup>1,2,3</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Fiber-based optical frequency transfer is an important part of the new generation of Time-Frequency System and the Ground-based Time Service System, and has shown the advantage of high precision and a potential for the future application. In this paper, we reported the new results of the fiber-based optical frequency transfer in NTSC. For the first time in China, the optical frequency transfer over a 110-kilometer-long urban fiber showed an instability of  $7.5 \times 10^{-20}$  at a 10 ks average time. By using the heterodyne optical phase locking as the optical regeneration, we demonstrated an optical frequency transfer of the two-stage cascade link comprising two 112 km-long links, with an instability of  $7.7 \times 10^{-19}$  at 10 ks. We demonstrated an improved local

two-way optical phase comparison method without the requirement of synchronization, and implemented a real-time frequency comparison over a bi-directional 50-km fiber spool, with the relative frequency stability being  $1.2 \times 10^{-16}$  at 1 s and  $1.3 \times 10^{-21}$  at 40 ks. Recently, another optical frequency transfer link was implemented, and the 880 km link showed a transfer instability of  $2 \times 10^{-19}$  at 200 s.

**Key words:** optical frequency transfer; time and frequency standards; optical fiber network; fiber based time and frequency transfer

## 0 引言

光钟可用于构建最精确的频率基准<sup>[1]</sup>, 其中单离子光钟已实现系统不确定度  $10^{-19}$  量级<sup>[2]</sup>, 冷原子光晶格钟的频率稳定度已经达到了  $4.8 \times 10^{-17}$  @ 1 s<sup>[3]</sup>。光钟的复杂性和昂贵价格使它们只可能在少数研究中心研制和运行, 因此有必要建立一个高保真的传输系统, 提供光钟的光频信号给不同地域的多个用户, 同时有助于实现不同地域不同光钟的日常频率比对。光纤光学频率传递是目前主流的方法, 自 2010 年起法国、德国和美国等国的多个研究机构都开展了光纤光频传递相关研究: 2012 年法国小组在 540 km 光纤上实现了光频两级级联传递, 稳定度达到  $5 \times 10^{-20}$  @ 20 h<sup>[4]</sup>; 2013 年德国 MPQ 小组和 PTB 小组将光频直连传递的距离扩展到了 1 840 km, 实现了传递稳定度  $4 \times 10^{-19}$  @ 100 s<sup>[5]</sup>; 2016 年 PTB 小组与法国巴黎十三大学联合演示了 1 415 km 实地光纤光钟远程精密比对<sup>[6]</sup>, 3 ks 光钟比对精度  $3 \times 10^{-17}$ , 比卫星双向比对的比对精度提高了近 10 倍, 达到同等精度的测量时间减小了 4 个量级。国内的光纤光频传递研究起步较晚, 中国科学院国家授时中心、华东师范大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位都开展了相关研究: 2014 年国家授时中心已完成了光纤光频直连传递样机的研制, 率先开展实地光纤光频传递测试, 2016 年在 112 km 实地光纤上获得  $2 \times 10^{-16}$  @ 1 s,  $4 \times 10^{-20}$  @ 10 ks 的传递稳定度<sup>[7-8]</sup>; 2015 年华东师范大学在 82 km 的实地+线绕光纤上利用再生放大中继站实现两级光频级联传递, 稳定度  $4 \times 10^{-19}$  @ 10 ks<sup>[9]</sup>; 2019 年中科院上海光机所采用了基于光学注入锁定技术对传递光进行中继放大, 220 km 两级光频传递稳定度在 20 ks 进入  $7.1 \times 10^{-20}$  量级<sup>[10]</sup>。

中国科学院国家授时中心承担了“十三五”国家重大科技基础设施项目—高精度地基授时系统, 将于 2021 年正式开工建设。为高精度地基授时系统预研, 光纤光频传递课题组在运营商提供的上千 km 光纤网络上开展了光纤光频传递的长距离实地测试。本文报道了自 2016 年以来国家授时中心在光纤光频传递方面的研究进展, 以及运营商光纤网络上的长距离光频传递测试结果。

## 1 光纤光频直连传递研究

激光在光纤中传输时, 受外界环境的影响导致传输光纤的光学路径发生变化, 传输光场的相位发生波动, 等效于附加的激光频率噪声。光纤光频传递的目标是, 尽量减少各种因素对光场相位的影响, 对不能消除的附加频率噪声实时抑制, 使用户可以在光纤远端获得与本地端相近稳定度和准确度的光学频率信号, 即实现光学频率信号的高保真远程传递。

中国科学院国家授时中心自 2010 年起开始光纤光学频率传递研究, 国内率先搭建了光纤光频传递实验室样机, 后续工作中研究了光纤光频直连传递技术, 光纤光频中继传递技术, 多用户光纤光频传递技术等关键技术, 研制了光纤光频传递发送/接收设备、双向掺铒光纤放大器 (EDFA) 设备、基于两级 EDFA 的中继设备等多种光频传递设备的工程样机。

## 1.1 实验原理和装置

基于多普勒噪声抑制的光纤光频传递装置为一发一收型传递系统，其组成结构如图1所示。

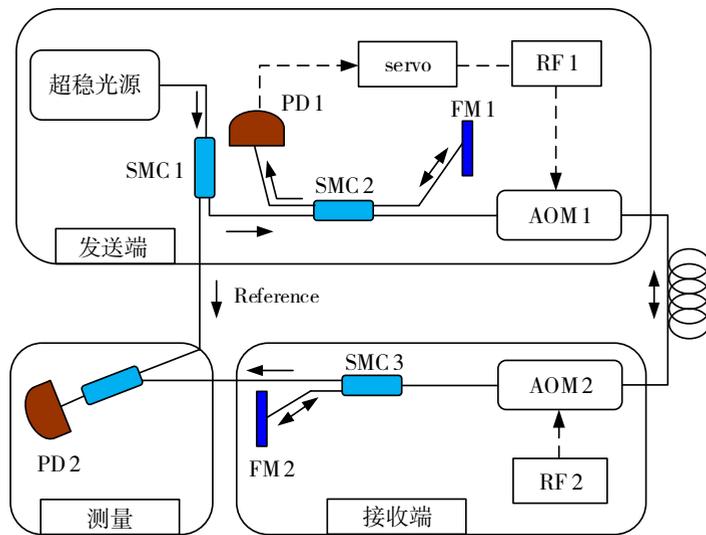


图1 光纤光频直连传递装置组成结构示意图

由超稳窄线宽激光器<sup>[11]</sup>产生的超稳光学频率信号进入本地发送端后，经过光纤分束器和声光调制器 AOM1 后进入传输光纤，在远程接收端，再次经过声光调制器 AOM2 后分束，一部分原路返回，一部分输出给远程端用户。返回的激光在本地发送端与参考激光作光外差拍频探测，从探测到的拍频信号解出光纤链路噪声引起的激光频率噪声，并通过 AOM1 完成噪声抑制。

接收端的 AOM2 用于区分信号光和光纤中节点反射光、瑞利散射光，应用法拉第镜 FM1 和 FM2 可使拍频时信号光与参考光的偏振状态保持一致，较为便捷地规避偏振变化的影响实现拍频信号功率的最大化。伺服电路用于驱动声光调制器，对拍频信号解调，并生成反馈信号通过 AOM1 进行噪声抑制。

## 1.2 112 km 实地光纤光频传递

利用光纤光频直连传递装置在 112 km 实地光纤上开展了光频传递测试。光纤链路由一对从国家授时中心临潼本部到航天城试验场区的 56 km 光纤构成，如图2所示。

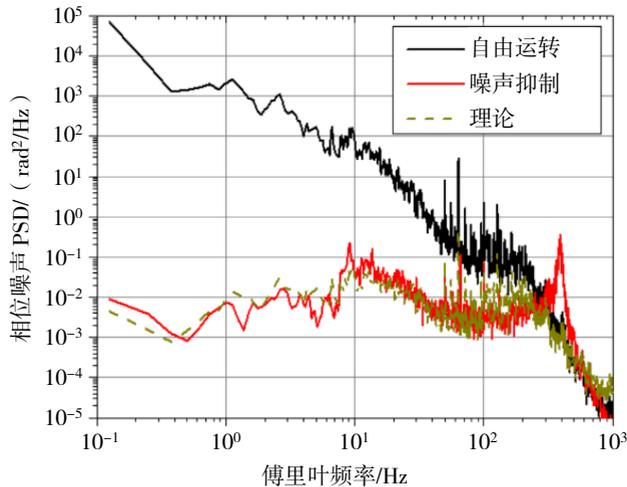


图2 112 km 实地光纤示意图

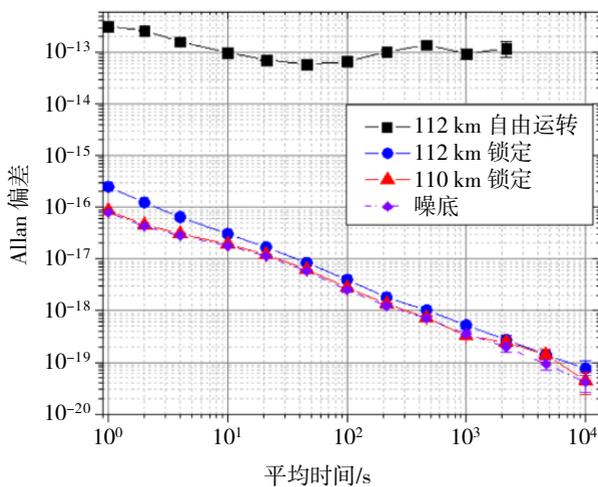
将这一对光纤在航天城试验场区直接跳接，测试时在临潼的实验室将一对光纤分别接入光频传递的发送端和接收端，即可利用环回法测量传递光频信号的质量。

测试时将接收端分出的一部分给用户的传输光，与光源分出的一部分参考光进行光外差拍频探测，通过信号源分析仪（SRS SR785）测量拍频信号的相位噪声谱密度（PSD），通过频率计数器（安捷伦 53230A）测量拍频信号的频率起伏，计算频率传输稳定度，即可获知传递光频信号的质量。

测量结果如图 3 所示。



(a) 相位噪声抑制



(b) 传输稳定度

图 3 112 km 实地光纤相位噪声抑制和传输稳定度

图 3 (a) 为噪声抑制前后光纤相位噪声抑制情况，可以看出噪声抑制在 1 Hz 处超过 50 dB，接近光纤传输引起的噪声抑制极限。图 3 (b) 为噪声抑制前后的传输频率稳定度情况，噪声抑制后频率稳定度为  $2.5 \times 10^{-16}$ @1 s,  $7.5 \times 10^{-20}$ @10 ks。这也是国内首次报道的百 km 级的光纤光学频率传递，稳定度达到  $10^{-20}$  量级。

### 1.3 406 km 实地光纤光频传递

为测试光频直连传递在更长距离上的效果，课题组在运营商提供的临潼—宁陕的 406 km 实地光纤上测试光学频率传递。链路如图 4 所示。

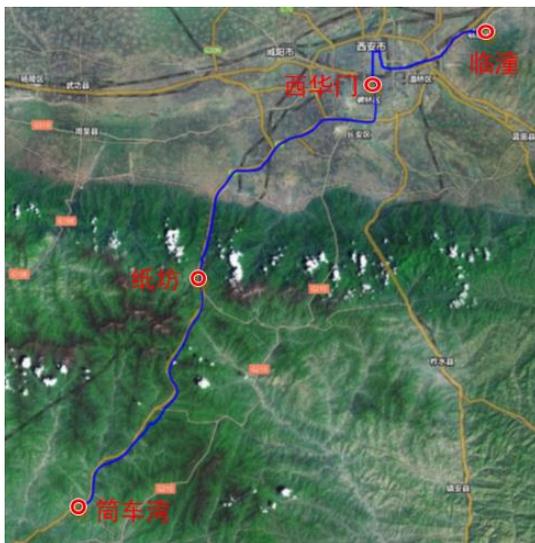


图 4 406 km 光频传递链路

这段光纤单程 203 km，包括 3 段：临潼—西华门 57 km，西华门—纸坊 64 km，纸坊—筒车湾 82 km。同样为完成环回测试，在筒车湾将一对光纤连接起来，发送端和接收端同样放在临潼，这样光纤链路往返达到 406 km，总衰减达到了 120 dB。为了补偿链路衰减，测试中应用了 5 台双向掺铒光纤放大器（Bi-EDFA），分别放置在西华门、纸坊和筒车湾，如图 5 所示。Bi-EDFA 增益控制在 16 dB 以下，避免引起激射影响光纤噪声抑制。

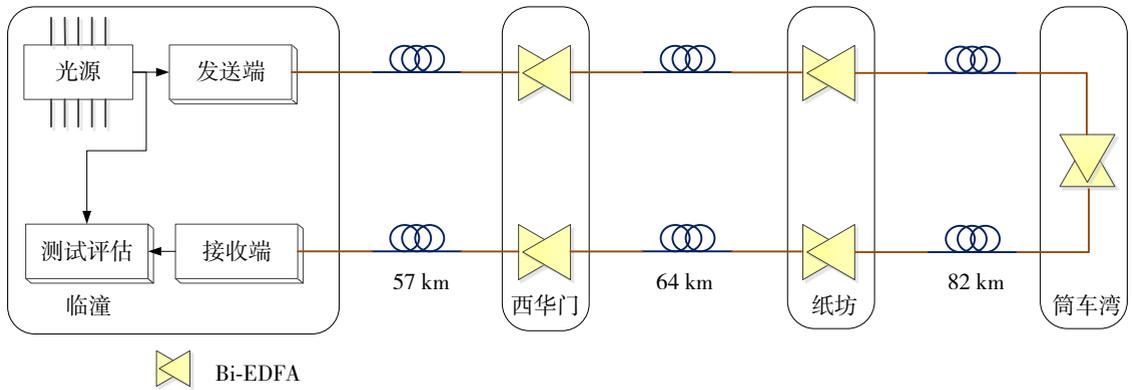


图 5 406 km 光频传递装置

光频传递装置的发送端、接收端和信号质量评估装置与上面类似。获得频率传输稳定度测量结果如图 6 所示。

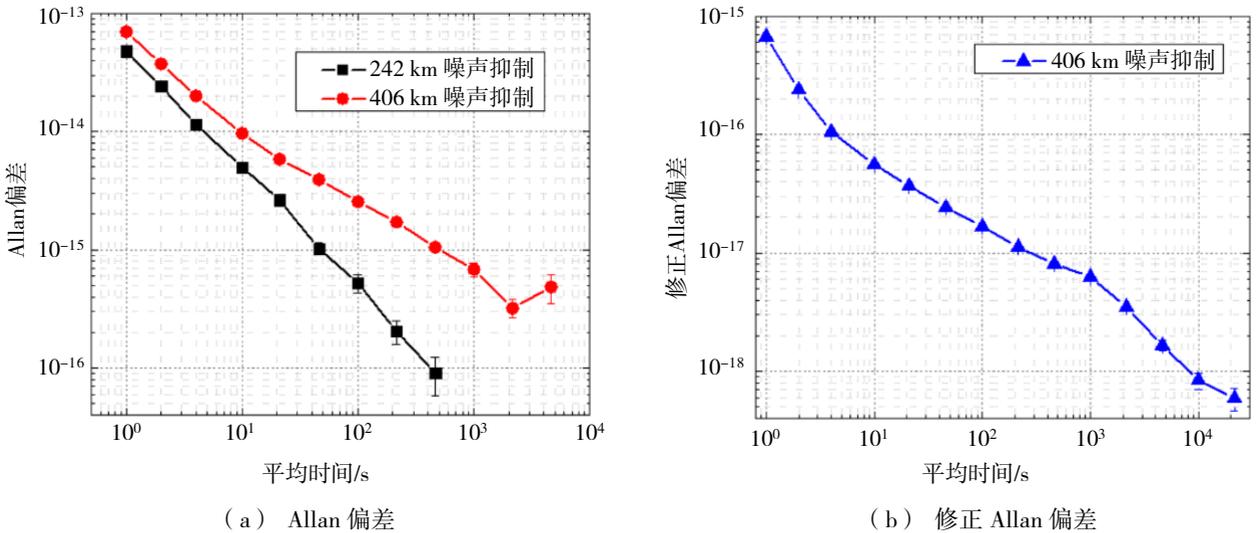


图 6 406 km 光频传递链路频率传输稳定度

图 6 (a) 中方块为 406 km 光纤噪声抑制后频率传输稳定度 Allan 偏差结果，秒稳  $7.0 \times 10^{-14}$ ，1 ks 后下降到了  $6.8 \times 10^{-16}$ ，与圆形所示的 242 km（临潼—纸坊回环）测试结果比较，在平均时间 1~20 s 两条 ADEV（Allan 偏差）曲线下下降趋势基本一致，接近于  $1/\tau$ ，在 20 s 以后，由于光频传递距离加倍、光纤噪声加倍、噪声抑制效果下降等种种原因导致 406 km 曲线斜率逐渐变更为  $1/\sqrt{\tau}$ 。图 6 (b) 中三角代表的 406 km 链路光频传递稳定度的修正阿伦偏差结果，秒稳定度为  $6.7 \times 10^{-16}$ ，10 ks 为  $8.4 \times 10^{-19}$ 。

## 2 光纤光频级联传递方法研究

光纤光频直连传递中，随着传递距离的增长信号传输延时增长，引起系统控制带宽下降的同时噪声

抑制的理论极限也有所降低,限制了频率传递精度。同时,为了避免光纤链路中杂散反射和瑞利散射引起的激光效应,利用多个 Bi-EDFA 构成长距离传递时 EDFA (两级单向)增益必须有所限制。

作为长距离直连传递的一种替代方案,级联传输可以将一个长距离光纤链路分成较短的几段,每段之间均为传输延时较小的直连传递,降低了传输延时的影响从而提高了光纤相位噪声抑制能力,能有效提高光频传输的稳定度<sup>[12-13]</sup>。光频级联传递时,需要中继设备将前级传递而来的微弱光频信号(0.1  $\mu\text{W}$ 左右)高保真放大至~10 mW 作为下一级传递的光源,需要提供超过 50 dB 的高增益光频信号放大。目前可用于光频级联传递的中继放大方案有高增益 EDFA 放大的中继、注入锁定中继、光外差相位锁定的再生光中继。

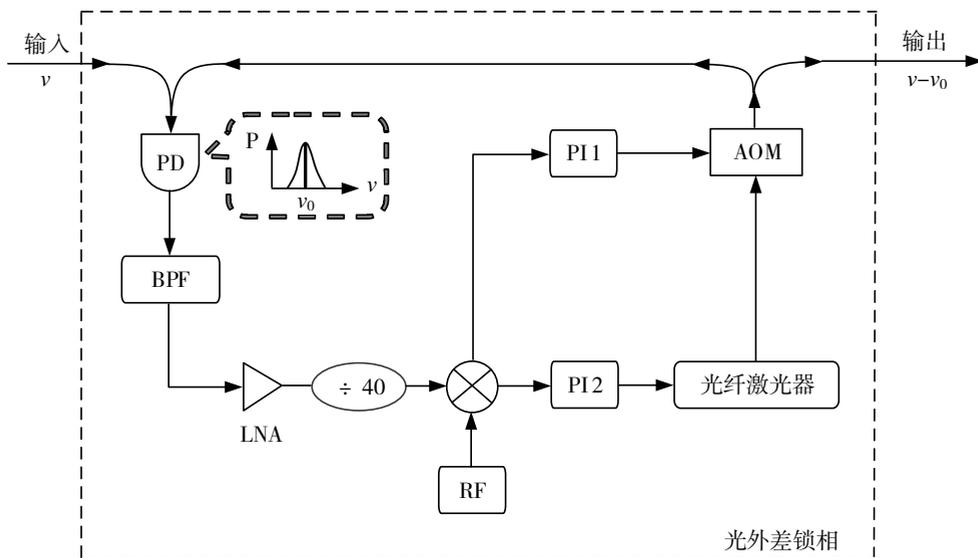
高增益 EDFA 放大的光频中继方案是由国家授时中心自主提出并经过验证的一种光频传递中继方案,其核心思想是利用高增益的 EDFA 实现光频信号高增益放大,同时抑制放大过程中引入的频率噪声。目前该方案已经过 220 km 实验室光纤和实地光纤 224 km 上的验证,具体实验结果正在发表。但基于 EDFA 的放大方案存在噪声大的问题,两个串联的 EDFA 会降低系统的信噪比。

注入锁定中继技术是利用光学环形器将前级传递来的微弱光信号作为种子光注入从激光器,激光器输出光频信号增益可达 70 dB 以上。该方案最早由德国和英国研究小组于 2015 年提出<sup>[14]</sup>,2019 年上海光机所改进了光注入锁定方案,实现了 220 km 实验室光纤上的光频级联传递<sup>[10]</sup>。注入锁定放大带宽约 100 MHz,虽远小于 EDFA 带宽,但仍然大于传递链路控制带宽,会放大链路中的杂散信号,降低信噪比。

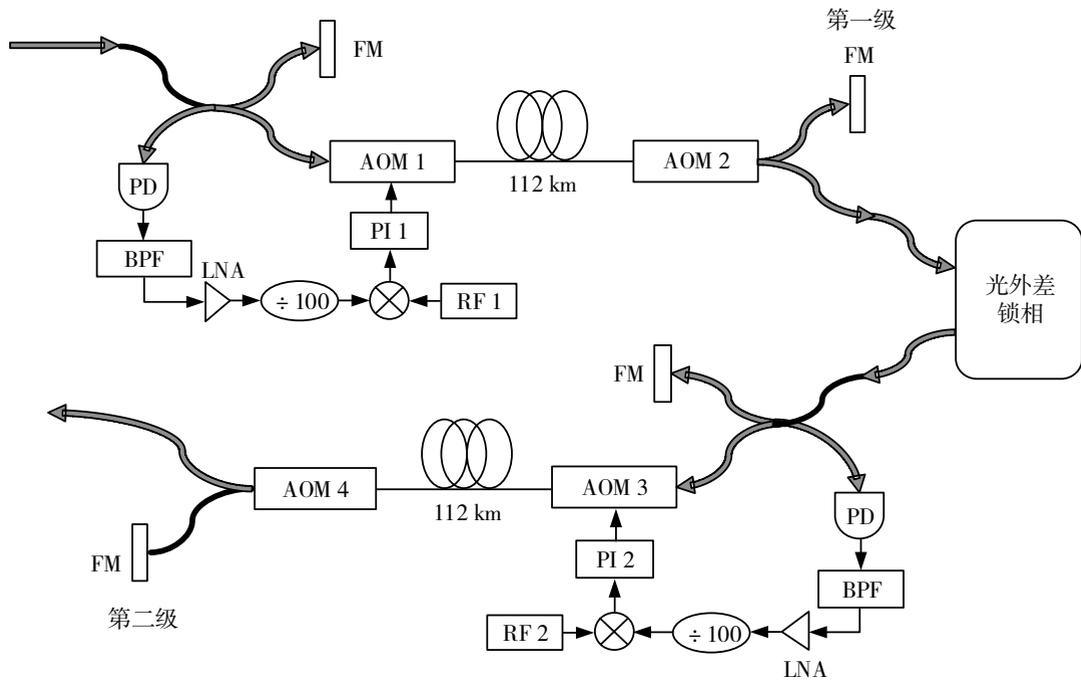
光外差相位锁定的再生光中继传递方案是另外一种将本地激光器相位锁定在上一级光频传递输出的微弱光信号上的中继方案,最早由法国提出<sup>[4]</sup>。国家授时中心利用光外差相位锁定方案搭建了光频传递再生光中继模块,2018 年在 224 km 实地光纤上演示了光频两级级联传递<sup>[15]</sup>。再生中继方案带宽仅为几十 kHz,放大增益可达 60 dB,适用于传递链路中的中继放大。本章节主要介绍国家授时中心光外差锁定再生光中继的光频级联传递实验结果。

## 2.1 光外差相位锁定再生光中继原理和实验装置

光外差锁相的中继放大装置原理如图 7 (a) 所示,基于这种中继放大方案的两级级联传递装置示意图如图 7 (b) 所示。



(a) 基于光外差锁相的中继



(b) 224 km 两级级联装置

图7 基于光外差锁相的中继和224 km 两级级联装置示意图

如图7(a)所示,光外差相位锁定模块通过两个反馈器件压电陶瓷(PZT)和声光调制器(AOM)将光纤激光器(线宽约1 kHz)相位锁定到光学参考腔超稳激光器的相位(线宽约2 Hz)<sup>[13]</sup>。光纤激光器输出光经AOM移频75 MHz后,利用光纤分束器分出10%通过光纤耦合器与入射的超稳激光进行拍频,拍频信号由光电探测器探测后鉴相获得误差信号,再分别经过PI1和PI2反馈给AOM和PZT。以PZT抑制带宽几kHz以内的慢速频率噪声,而AOM抑制较高傅里叶频率的噪声。鉴相器前应用的40倍模拟分频器,能够提高锁相的动态范围。

通过计算拍频信号的Allan偏差(ADEV),研究了光外差锁相中继模块的长期性能,1 ks时频率稳定度达到 $6 \times 10^{-20}$ ,表明光外差锁相中继模块能够作为稳定的、可靠的光频传递中继放大器。

## 2.2 224 km 实验室光纤两级级联传递

为了研究光外差相位锁定模块在级联传递中的效果,演示了一个112 km + 112 km的光纤光频两级级联传递链路。光频传递实验用的光纤仍是连接国家授时中心临潼本部和航天城试验场区的光纤链路,长度为56 km。串联了该光缆中4根光纤,总长达到224 km,链路衰减0.28 dB/km,总衰减达到63 dB。

两级级联传输装置如图7(b)所示,上面框中是第一级传输,下面框中是第二级传输,两级传输装置的结构与图1所示直连传递装置基本一致。在级联传递中第一级传输接收装置的输出光注入到光外差锁相模块中作为参考激光,通过PZT补偿和AOM补偿将其中光纤激光器的输出激光相位锁定到参考激光上,实现从0.08  $\mu$ W到16 mW的信号再生放大,增益达到53 dB。放大后的光频信号注入第二级的发送装置,完成第二级光频传递。通过调整光外差锁相模块的频点,使再生放大输出激光与输入激光频差为-160 MHz,即可补偿第一级传递AOM1和AOM2引入的频移,避免随着级联级数增加引起频率偏移量的累积。

用快速傅里叶变换(FFT)分析仪测量了224 km光频级联传递的各级相位噪声抑制情况,各级控制带宽如表1所示。

表 1 224 km 两级级联传递各级控制带宽

测试项目	距离/km	理论控制带宽极限 $1/4\tau$	实际控制带宽
第一级传递	112	446.4 Hz	~400 Hz
光外差锁相模块	-	-	~4.2 kHz
第二级传递	112	446.4 Hz	~400 Hz
两级级联	224	-	~400 Hz
224 km 直连传递	224	223.2 Hz	~200 Hz

从表 1 可以看出两级传输延时均对应 112 km 传输延时, 控制带宽约为 400 Hz, 比较符合理论极限 446.4 Hz, 比 224 km 直接传递的实际控制带宽 200 Hz 大了一倍, 噪声抑制效果两级 112 km 级联也明显优于 224 km 直接传递。

此外还发现光外差锁相的控制带宽约为 4.2 kHz, 在该频率以外光外差锁相模块输出光的相位与内部光纤激光器保持一致, 而不受信号激光的影响。可以推论, 当光外差锁相模块控制带宽以外本地激光器相位噪声低于前级光纤链路引起的相位噪声时, 光外差锁相模块将作为传输链路中的光学滤波器, 对光频信号传递有净化的作用。

用频率计数器测量各级环外拍频信号频率, 计算 ADEV 结果如图 8 所示。第一级传递的秒稳  $2.6 \times 10^{-15}$ , 第二级传递的秒稳  $6.7 \times 10^{-15}$ , 根据公式  $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$  预估两级传递的稳定度秒稳应为  $8 \times 10^{-15}$ , 而实测值  $7.4 \times 10^{-15}$  接近于预估值, 万秒后达到  $7.7 \times 10^{-19}$ 。

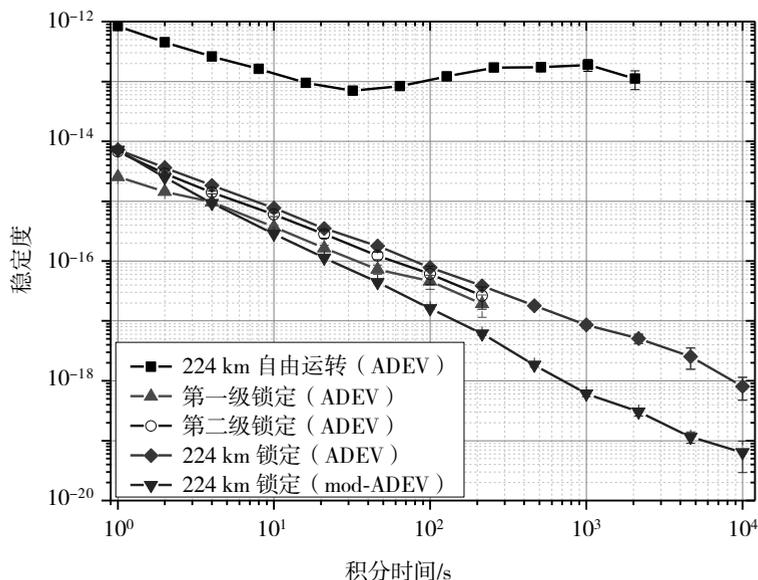


图 8 224 km 两级光频级联传递传输稳定度

### 3 基于本地测量的光纤光频双向比对

原子钟之间的高精度频率比对在许多研究领域有重要应用, 包括计量学、基础物理研究、大地测量等。基于光纤的双向光学频率比对研究已被多次报道, 但大多是通过光纤链路两端本地激光与远程

激光之间的拍频来测量频差。光纤双向光学频率比对假设两个方向的光纤噪声相同,通过对数据进行同步和事后处理,可以有效地抑制额外噪声,但在同步精度不高的情况下,短期的激光噪声会降低频率比对精度。

提出了一种改进的不需要时钟同步的光纤光学频率双向比对方法:光纤链路一端的远程信号被发送回来,在光纤链路的另一端用单台光电探测器和多通道相位记录仪同时测量了本地激光器与远程激光器之间的拍频以及本地激光器与往返传输后激光的拍频。由于可以直接减去单次传输噪声,不需要进行后处理,可以实现实时频率比对。此外,由于拍频信号探测是基于相同的探测器,具有更好的共模噪声抑制效果。

### 3.1 原理和装置

基于本地测量的光纤光频双向比对原理和装置如图9所示。

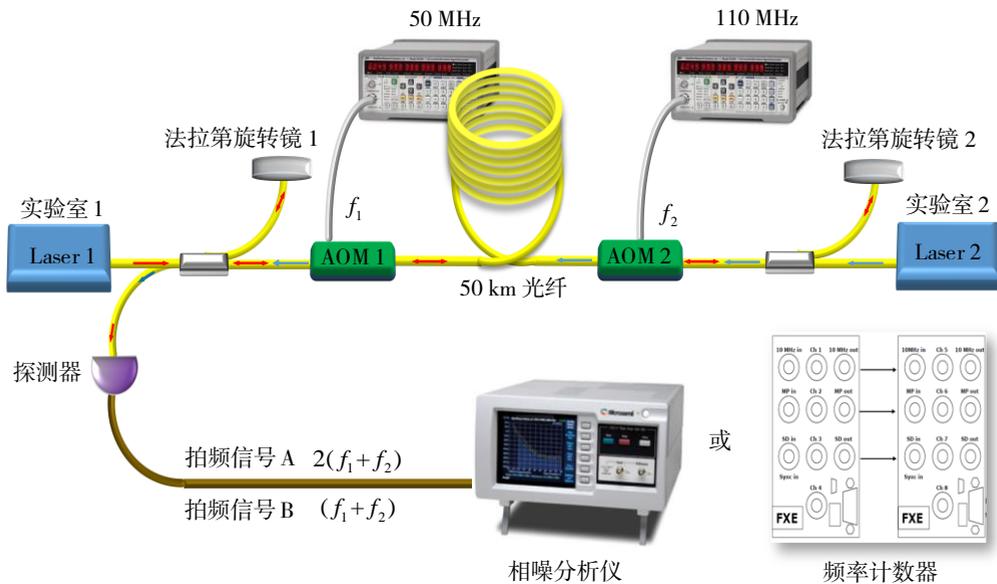


图9 本地测量的光频双向比对原理和装置示意图

在 Lab1 一端,激光器 1 的部分光被 FM1 反射到 PD 中,另一部分光经 AOM1 (驱动频率  $f_1$ ) 移频后,注入传输光纤到达 Lab2 一端,经 AOM2 (驱动频率  $f_2$ ) 再次移频后,被 FM2 反射并返回到 Lab1 一端 PD 处。同时,Lab2 一端的激光器 2 发出的光从另一端注入中,依次经过 AOM2、传输光纤和 AOM1 后也到达 PD 处。PD 处检测到两个拍频信号,其中频率为  $2(f_1+f_2)$  的拍频信号 A 对应激光器 1 的两次经过光纤的返回光和参考光之间的拍频,频率为  $f_1+f_2$  的拍频信号 B 对应激光 1 和从 Lab2 传输到 Lab1 的激光 2 之间的拍频。通过仔细选择两个声光调制器的驱动频率,可以便捷地对拍频信号 A 和 B 进行滤波和分离。利用无死区的相位噪声分析仪或频率计数器同时对拍频信号 A 和 B 进行比较,计算其 Allan 方差即可评估频率比对的稳定度。

### 3.2 实验结果

图 10 显示了 50 km 线绕光纤双向光频比对相对频率稳定度,用频率计数器测量拍频信号频率值,计算 ADEV 表示了无噪声抑制的单向光频传输(圆点)和双向光频比对(方块)的相对稳定度。双向光频比对的稳定度在 1 s 时为  $1.2 \times 10^{-16}$ , 40 ks 时为  $1.3 \times 10^{-21}$ 。频率比对的性能已经远远超出了最先进的全球定位系统和双向载波相位等频率比对手段。

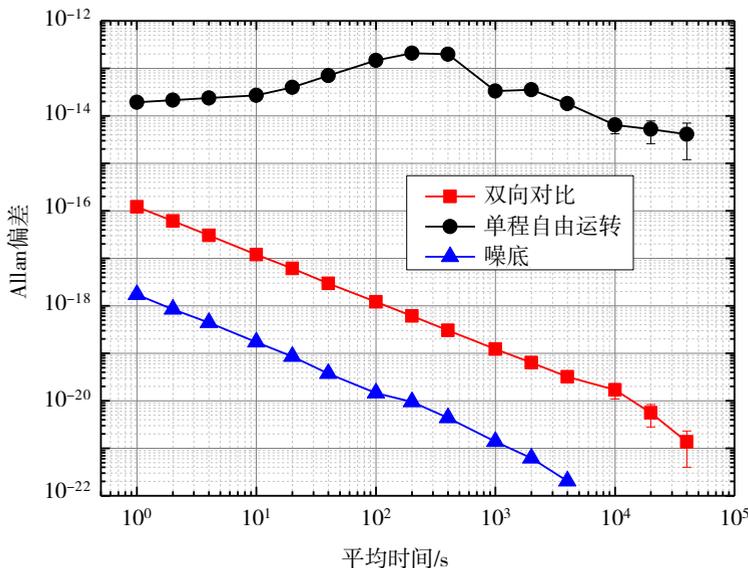


图 10 50 km 线绕光纤双向光频比对相对频率稳定度

在不使用有源光纤噪声抑制的情况下, 光纤双向光频比对链路具有很好的鲁棒性。基于本地测量的光纤光频双向比对方法相比传统方法还具有在单一站点完成实时比对而无需通过数据通信进行远程事后比对的优点。有望替代传统方法完成光钟及其他先进的原子钟的高精度远程比对。

## 4 高精度地基授时系统千 km 级光频传递预研

在高精度地基授时系统中, 光纤授时系统的建设目标依托我国光纤网络资源, 构建我国独立自主的高精度地基光纤时间频率传递骨干网络, 为用户提供高精度的光学频率、微波频率、时间信号服务。其中光频传递的指标要求是频率传输稳定度日稳  $10^{-19}$  量级。为高精度地基授时系统预研, 课题组多次在运营商提供的实地光纤网络上开展光频传递测试, 近期在 880 km 实地光纤上开展了国内首次近千 km 实地光纤上的光频传递, 200 多秒传输稳定度达到  $2.0 \times 10^{-19}$ 。

### 4.1 880 km 光纤线路和实验装置

880 km 实地光纤线路由临潼—涝峪往返 260 km 和临潼—山阳往返 620 km 两部分组成。光纤线路如图 11 所示。

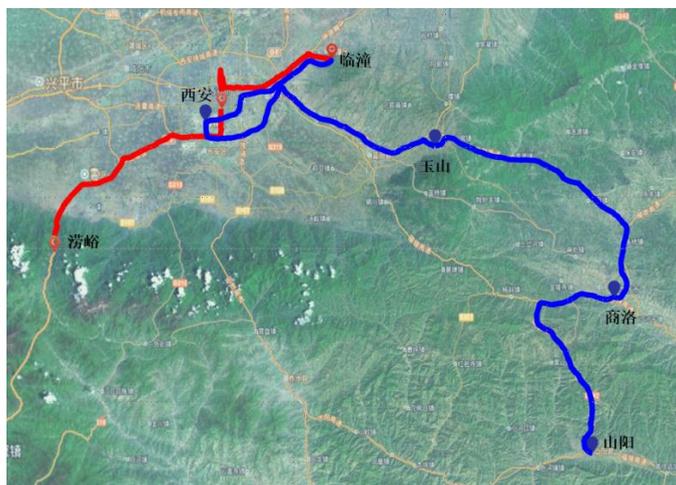


图 11 880 km 实地光纤线路示意图

两条线路中各段光纤的距离和光纤损耗如表 2 所示。单程距离合计 440 km，损耗~120 dB，往返距离达到 880 km，光纤总损耗达到~240 dB。

表 2 880 km 光纤距离和损耗统计

光纤段	单程距离/km	光纤损耗/dB
临潼—西安	66	19
西安—涝峪	64	18
临潼—西安	65	16
西安—蓝田	85	21
蓝田—商洛	90	26
商洛—山阳	70	20
单程合计	440	120
往返合计	880	240

光纤损耗导致传输光频信号功率太小无法正常探测，为补偿光纤链路损耗，同样在光纤中间站点引入了 11 个 Bi-EDFA，每个放大器增益设置在~16 dB 左右避免引起激射影响光纤噪声抑制，如图 12 所示。

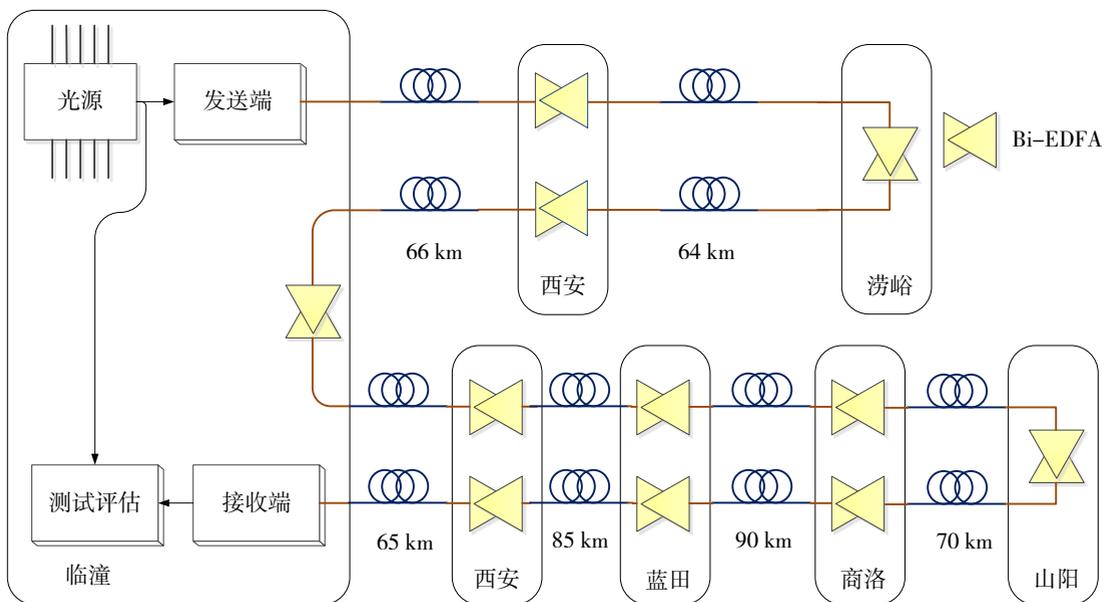


图 12 880 km 实地光纤光频传递装置连接图

## 4.2 结果

测量评估时同样用频率计数器测量了环外拍频信号，计算了 880 km 实地光纤光频传递频率稳定度。其结果如图 13 所示。

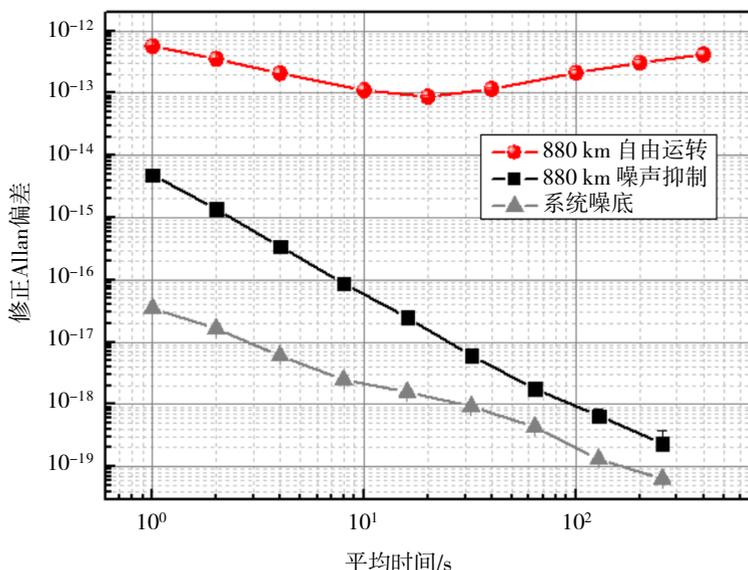


图 13 880 km 实地光纤光频传递频率稳定度

如图所示,系统自由运转时测定传输稳定度为  $5.6 \times 10^{-13}$  @ 1 s。光纤噪声抑制启动后测得频率传输稳定度  $4.9 \times 10^{-15}$  @ 1 s,比自由运转提高了大约两个量级。由于频率测量时使用了无死区的  $\Lambda$  型计数器计算 Mod-ADEV (修正 Allan 偏差),测量结果接近于  $\tau^{-2}$  下降,积分时间 200 多秒后频率传递稳定度已下降到  $2.0 \times 10^{-19}$ 。图 13 中方块所示的 Mod-ADEV 测试时与德国 2013 年 1 840 km 测试<sup>[5]</sup>采用了同样的测算方法,同样获得了  $\tau^{-2}$  的线型,分析原因是单幅传输距离增长到 880 km,传输延时增大控制带宽下降到  $\sim 57$  Hz,光纤噪声抑制后相位噪声谱密度曲线傅里叶频率范围 57 Hz 以内主要类型为  $f^1$  噪声而非较短距离时的  $f^0$  噪声,其对应 Mod-ADEV 结果变为  $\tau^{-2}$  而非较短距离时的  $\tau^{-3/2}$ 。在按照这个下降趋势,预计万秒时频率传递稳定度可到  $10^{-21}$  量级,基本能够满足地基授时系统的设计指标要求。这是国内首次报道接近千 km 的高精度光纤光频传递链路。

## 5 结语

高精度地基授时系统是对现有天基授时系统的有效补充和增强,其中高精度光纤授时系统是目前授时精度最高的授时手段,主要用于科学实验和重要的工程系统。本文介绍了中国科学院国家授时中心在光纤光学频率传递方面的研究情况:突破并掌握了光纤光频直连传递技术,通过链路中间插入双向掺铒光纤放大器可将单幅传递距离扩展至近千 km;研究了基于两级 EDFA 放大中继和光学锁相再生光中继两种级联传递技术,打破了直连传递固有传输延时限制,有望应用于高精度地基授时系统实现全国范围内万 km 以上的光频传递网络;探索新方法,研究基于本地测量的光纤光频双向比对,可在光纤光频传递网的基础上实现更实时的比对精度  $10^{-21}$  量级光频比对。最后还报道了为地基授时项目预研在千 km 级实地光纤上的光纤光频传递实验结果。在 880 km 实地光纤上频率传递的稳定度  $2 \times 10^{-19}$  (平均时间 200 多秒),基本满足地基授时系统光频传递网的设计指标需求。

## 参考文献:

- [1] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. Reviews of Modern Physics, 2015, 87(2): 637-701.
- [2] BREWER S M, CHEN J S, HANKIN A M, et al. An  $^{27}\text{Al}^+$  quantum-logic clock with a systematic uncertainty below  $10^{-18}$ [J].

Physical Review Letters, 2019, 123(3): 033201.

- [3] OELKER E, HUTSON R B, KENNEDY C J, et al. Demonstration of  $4.8 \times 10^{-17}$  stability at 1 s for two independent optical clocks[J]. Nature Photonics, 2019, 13(10): 714-719.
- [4] LOPEZ O, HABOUCCHA A, CHANTEAU B, et al. Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 23518.
- [5] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1 840 km fiber link[J]. Physics Review Letters, 2013, 111(11): 110801.
- [6] LISDAT C, GROSCHE G, QUINTIN N, et al. A clock network for geodesy and fundamental science[J]. Optics Communications, 2016, 7: 12443.
- [7] 刘杰, 高静, 许冠军, 等. 基于光纤的光学频率传递研究[J]. 物理学报, 2015, 64(12): 106-114.
- [8] 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.
- [9] MA C, WU L, 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 .
- [10] FENG Z T, ZHANG X, WU R, et al. High-gain optical injection locking amplifier in phase-coherent optical frequency transmission[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 7200909.
- [11] JIAN D D, GAO J, LIU J, et al. Development and application of communication band narrow linewidth lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(19): 190601.
- [12] FUJIEDA M, KUMAGAI M, NAGANO S. Coherent microwave transfer over a 204-km telecom fiber link by a cascaded system[J]. IEEE Transaction Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control, 2010, 57(1): 168-174.
- [13] LOPEZ O, HABOUCCHA 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.
- [14] 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.
- [15] 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.