

# 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

臧琦<sup>1,2,3</sup>, 邓雪<sup>1,3</sup>, 刘杰<sup>1,3</sup>, 曹群<sup>1,2,3</sup>, 焦东东<sup>1,3</sup>,  
高静<sup>1,3</sup>, 许冠军<sup>1,3</sup>, 董瑞芳<sup>1,3</sup>, 刘涛<sup>1,3</sup>, 张首刚<sup>1,3</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** 光纤链路中高精度光学频率传递对光钟比对有重要意义,双向掺铒光纤放大器(EDFA)有助于在长距离光学频率传递中对信号进行损耗补偿和高精度传输。基于铒粒子受激放大的基本原理,设计了可用于光纤光学频率传递链路中的低噪声、高增益双向 EDFA,并对其参数进行了仿真优化。实验结果表明,该双向 EDFA 的噪声指数为 3.86 dB,增益为 20.14 dB,引入的相位噪声在频率为 1 Hz 处仅为 0.1 rad<sup>2</sup>/Hz。将该双向 EDFA 作为放大补偿器件应用于 200 km 光纤光学频率传递链路中,获得了  $3.8 \times 10^{-16}$ /s 的秒级频率稳定度及  $2.8 \times 10^{-19}/(10^4 \text{ s})$  的万秒级频率稳定度,在频率信号传递和光钟比对领域有着广阔的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤网络; 双向掺铒光纤放大器; 长距离光学频率传递; 仿真优化; 低噪声; 高增益

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0306006

## Optimization Design for Bidirectional Er-Doped Fiber Amplifier Used in Long Distance Optical Frequency Transfer Link

Zang Qi<sup>1,2,3</sup>, Deng Xue<sup>1,3</sup>, Liu Jie<sup>1,3</sup>, Cao Qun<sup>1,2,3</sup>, Jiao Dongdong<sup>1,3</sup>,  
Gao Jing<sup>1,3</sup>, Xu Guanjun<sup>1,3</sup>, Dong Ruifang<sup>1,3</sup>, Liu Tao<sup>1,3</sup>, Zhang Shougang<sup>1,3</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** High precision optical frequency transfer in fiber link is of great significance to optical clock comparison. Bidirectional Er-doped fiber amplifier (EDFA) contributes to loss compensation and high precision transmission of signal in long distance optical frequency transfer. Based on the basic principle of stimulated amplification for erbium particles, a bidirectional EDFA with low noise and high gain which can be used in fiber optical frequency transfer link is designed, and its parameters are simulated and optimized. Experimental results show that the noise index and the gain of the bidirectional EDFA is 3.86 dB and 20.14 dB, respectively. The phase noise introduced is only 0.1 rad<sup>2</sup>/Hz at the frequency of 1 Hz. The bidirectional EDFA is used as an amplified compensation device in 200 km fiber optical frequency transfer link, and a second frequency stability of  $3.8 \times 10^{-16}$ /s and a ten-thousand second frequency stability of  $2.8 \times 10^{-19}/(10^4 \text{ s})$  are obtained. It has broad application prospects in the field of frequency signal transfer and optical clock comparison.

**收稿日期:** 2016-09-28; **收到修改稿日期:** 2016-10-28

**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)

**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)

**Key words** fiber optics; fiber network; bidirectional Er-doped fiber amplifier; long distance optical frequency transfer; simulation and optimization; low noise; high gain  
**OCIS codes** 060.2410; 230.2285; 060.2330; 060.2320

## 1 引 言

随着光钟技术的不断发展,其频率的不稳定性和不确定度均已达到  $10^{-18}$  量级<sup>[1-8]</sup>。由于频率传递精度的限制,基于卫星链路的微波传递等方式已经不能满足高精度频率的远距离传递<sup>[9]</sup>。目前,利用光纤进行信号传递的精度最高,信号传递稳定度可达  $10^{-20}$  量级<sup>[10]</sup>,且光纤在波长为 1550 nm 传递窗口处具有很低的损耗,在光钟信号的传递和比对领域有很大的技术优势。在光纤中,随着传递距离的增加,功率的损耗不断累积,导致信号频率稳定度恶化,因此需要用放大器对信号的功率损耗进行补偿,波长 1550 nm 处常用的放大器为掺铒光纤放大器(EDFA)。波长为 1550 nm 的 EDFA 能直接放大光信号,克服了光-电-光转换的传递瓶颈,具有高增益(G)、宽带宽以及对偏振不敏感等特性,广泛应用于光通信领域<sup>[11-13]</sup>。常用的 EDFA 为单向放大的 EDFA,在光纤光学频率传递系统中,EDFA 将部分信号返回源端,用于探测链路的相位噪声并进行相位噪声抑制。为了保证往返信号引入的噪声相同,信号需在同一根光纤中来回传递,而单向 EDFA 无法满足这一传递需求,需要设计双向 EDFA 来实现信号的双向放大。

目前,国际上多个研究小组已经成功地将双向 EDFA 技术应用于光学频率传递实验中<sup>[14-17]</sup>,如德国联邦物理技术研究院和马克斯普朗克量子光学研究所将 20 个双向 EDFA 作为光放大器,配合 2 个布里渊放大器,在长度为 1840 km 的光纤链路中实现了 420 dB 的损耗补偿,并分析了双向 EDFA 的噪声指数( $I_{NF}$ )和工作过程中引入的相位噪声<sup>[14-15]</sup>;法国的巴黎 13 区大学物理激光实验室小组在链路中利用 12 个双向 EDFA,实现了 1100 km 光纤链路中的信号放大传递<sup>[17]</sup>。国内很多科研单位也在此方面取得了一定的成果,如华东师范大学<sup>[18]</sup>、上海交通大学<sup>[19]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[20]</sup>及中国科学院国家授时中心等,其中中国科学院上海光学精密机械研究所利用一个双向 EDFA 实现了 110 km 链路中对往返信号的损耗补偿为 22 dB 的射频频率和时间同步传递;华东师范大学的研究小组将双向 EDFA 作为光放大器,在 82 km(32 km 实地光纤和 50 km 实验室光纤盘)光纤链路中补偿了实地链路中 15 dB 的损耗。

目前,国内还没有针对光学频率传递链路中双向 EDFA 增益、噪声指数优化及自身引入的相位噪声等方面的报道。本文基于 EDFA 的基本原理,采用双向抽运的方式设计了双向 EDFA,并对其进行了仿真及实验优化。该双向 EDFA 的噪声指数为 3.86 dB,增益为 20.14 dB,工作中引入的相位噪声在 1 Hz 处也仅为  $0.1 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ ,远小于链路的相位噪声。在级联总长度达 200 km 的光纤光学频率传递链路中,该双向 EDFA 的秒级频率稳定度为  $3.8 \times 10^{-16}/\text{s}$ ,万秒级频率稳定度为  $2.8 \times 10^{-19}/(10^4 \text{ s})$ (倒易模式),有望成为光学频率传递链路中的重要放大器件和组成部分,为国土范围内超远距离光学频率传递的实现以及科研、高技术应用提供支撑。

## 2 基本原理

基于铒粒子受激放大的双向 EDFA 实现了信号的放大<sup>[21]</sup>。在光学频率传递链路中,需保证传递信号在链路中来回传递时的放大倍数和引入噪声量相同,因此设计双向 EDFA 时不加入光隔离器,且采用双向同时抽运的方式。如图 1 所示,将 980 nm 抽运光分为功率相同的两束光,将这两束光分别从两边的波分复用器(WDM)注入到掺铒光纤中,以实现双向抽运的 EDFA,这种抽运方式保证了传递链路的对称性,对铒粒子的利用率也较高。此外,为了降低光路损耗和器件引入的相位噪声,双向 EDFA 中的所有器件均采用熔接方式,以避免耦合头引起的反射等影响信号的传递。

双向 EDFA 属于行波放大器,根据光和掺杂物质的互相作用,并利用速率方程和功率传输方程对双向 EDFA 进行描述,精确的双向 EDFA 模型计算复杂程度极高且耗费时间。一般情况下,将双向 EDFA 视为二能级系统,并利用简化的 Giles-Emmanuel 模型对双向 EDFA 进行全光谱描述<sup>[22-24]</sup>。基于等效噪声,带宽为  $\Delta\nu_k$ 、中心波长  $\lambda_k = c/\nu_k$  ( $c$  为光速,  $\nu_k$  为频率)的  $k$  个光束在掺铒光纤中传播时,考虑背景损耗后,

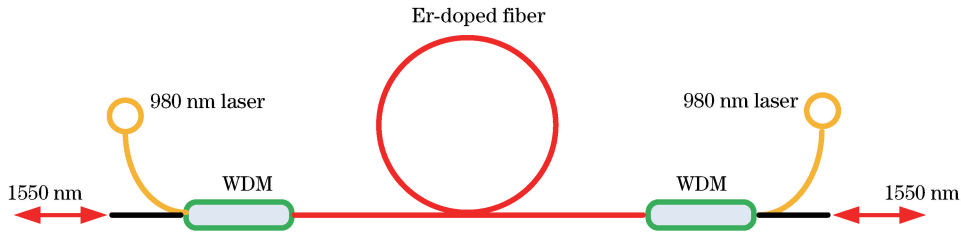


图 1 双向 EDFA 基本结构示意图

Fig. 1 Basic structure diagram of bidirectional EDFA

Giles-Emmanuel模型可表示为<sup>[22]</sup>

$$\frac{dP_k^\pm(z)}{dz} = \pm(\alpha_k + g_k) \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} P_k^\pm(z) \pm g_k \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} m h \nu_k \Delta \nu_k \mp (\alpha_k + l_k) P_k^\pm(z), \quad (1)$$

式中

$$\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} = \frac{\sum_k \frac{[P_k^+(z) + P_k^-(z)] \alpha_k}{h \nu_k \zeta}}{1 + \sum_k \frac{[P_k^+(z) + P_k^-(z)] (\alpha_k + g_k)}{h \nu_k \zeta}}, \quad (2)$$

$P_k^\pm(z)$ 为带宽  $\Delta \nu_k$  内沿前向和后向传递的光功率,  $\bar{n}_1$  为基态和二能级的总平均粒子数,  $\bar{n}_2$  为二能级的粒子数,  $\alpha_k$ 、 $g_k$ 、 $l_k$ 、 $\zeta$  分别为掺铒光纤的吸收系数、发射系数、本征吸收系数及饱和参数,  $m=2$  表示自发辐射的正交偏振态的个数,  $h$  为普朗克常量。利用该模型可以精确地得到全光谱范围内每个波长沿光纤的功率分布, 从而确定增益和噪声指数沿光纤长度的分布情况。

### 3 双向 EDFA 的参数仿真和优化

双向 EDFA 在工作时对链路影响较大的是增益和噪声指数, 因此主要针对双向 EDFA 的这两个参数进行优化。

#### 3.1 双向 EDFA 的增益

一个放大器的增益被定义为输出光功率( $P_{out}$ )与输入光功率( $P_{in}$ )之比<sup>[15]</sup>, 即

$$G = 10 \lg(P_{out}/P_{in}). \quad (3)$$

在输入光功率一定的情况下, 增益主要与掺铒光纤参数和抽运光功率有关, 其中掺铒光纤的参数主要为掺杂浓度和光纤长度, 不同的掺杂浓度和光纤长度对应不同的放大系数。实验中采用高掺杂浓度的 LIEKKI Er-30 型掺铒光纤,  $\text{Er}^{3+}$  的掺杂质量分数为  $2.1 \times 10^{-3}$ 。

#### 3.2 双向 EDFA 的噪声指数

在工作过程中, 放大器本身会引入噪声, 使信号的信噪比( $R_{SN}$ )恶化, 噪声的主要来源为放大自发辐射 (ASE) 噪声, 链路中的 ASE 噪声和信号一起被传递和放大。双向 EDFA 的噪声指数可定义为输入光信噪比  $R_{SNin}$  与输出光信噪比  $R_{SNout}$  的比值<sup>[15]</sup>, 即

$$I_{NF} = 10 \lg(R_{SNin}/R_{SNout}), \quad (4)$$

也可以表示为

$$I_{NF} \approx 2 \eta_{SP} = 2 N_2 / (N_2 - N_1), \quad (5)$$

式中  $\eta_{SP}$  为粒子反转效率,  $N_1$  为基态粒子数,  $N_2$  为亚稳态粒子数。由(5)式可以看出, 噪声指数和掺铒光纤中的铒粒子反转数相关, 抽运越充分, 铒粒子利用率越高, 放大器的噪声指数越小, 引入的噪声越少。理想状态下, 铒粒子全部被抽运利用, 即  $I_{NF} = 3 \text{ dB}$ 。

#### 3.3 双向 EDFA 的仿真

(1)、(2)式是双向 EDFA 的 Giles-Emmanuel 纯数学模型, 利用该数学模型求解时, 无法得到解析解, 只能进行数值计算。为了得到更加准确的解, 基于该模型并采用 OptiSystem 软件 (Giles-Emmanuel 模型算法) 进行仿真计算和参数优化。

实验中,采用线宽为 1.9 Hz、秒级频率稳定度为  $1.7 \times 10^{-14}$ /s、中心波长为 1550 nm 的窄线宽激光作为光源<sup>[25]</sup>,经过链路传递后进入双向 EDFA 的功率约为  $-20$  dBm。基于此结果,将 OptiSystem 光源的输出功率设置为  $-20$  dBm。根据选用的掺铒光纤对程序中掺铒光纤的参数进行设置,仿真不同抽运功率下双向 EDFA 的增益和噪声指数随掺铒光纤长度的变化,结果如图 2(a)、(b)所示。由图 2(a)可知,在同一抽运功率下,增益均随掺铒光纤长度的增加而先增大后变小,说明掺铒光纤存在最佳长度。由图 2(b)可知,在不同抽运功率下,在铒粒子抽运充分到不充分的过程中,噪声指数随掺铒光纤长度的增加而先增大后变小,然后再增大。在噪声指数突然恶化前,噪声指数的变化为 1 dB 左右,在可接受范围内。结合图 2(a)、(b)可知,掺铒光纤的长度范围为 0.5~2 m 时,增益过小;掺铒光纤长度范围为 2~6 m 时,铒粒子抽运率高,易达到高增益,此时的噪声指数为 4 dB 左右;掺铒光纤长度大于 6 m 时,增益变小,且噪声很大。因此,将掺铒光纤的长度锁定在 2~6 m 范围内,取中间值 3.5 m 作为实验中的标准掺铒光纤长度,并对抽运功率进行优化。受抽运激光器的 5 mW 调节步长的限制,仿真中抽运功率的改变也为 5 mW,结果如图 3 所示。

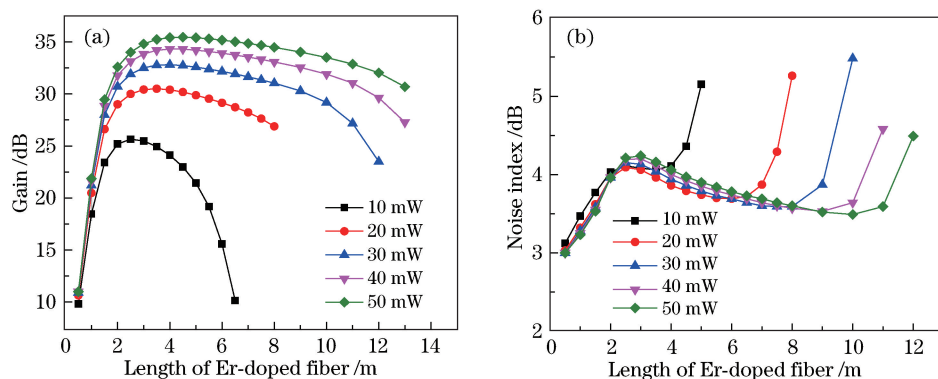


图 2 不同抽运功率下(a)增益和(b)噪声指数随掺铒光纤长度的变化

Fig. 2 Variations in (a) gain and (b) noise index under Er-doped fiber length with different pump powers

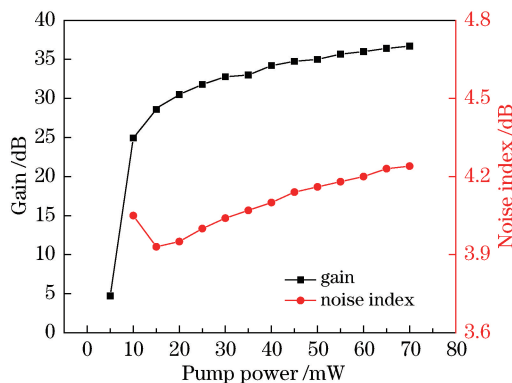


图 3 掺铒光纤长度为 3.5 m 时,增益和噪声指数随抽运功率的变化

Fig. 3 Variations in gain and noise index with pump power when Er-doped fiber length is 3.5 m

由图 3 可见,当抽运功率从 5 mW 增大至 10 mW 时,铒粒子的抽运率、增益均迅速增大;当抽运功率大于 10 mW 时,铒粒子的抽运率增速放缓,增益缓慢增加;当抽运功率为 15 mW,铒粒子得到充分利用,ASE 噪声较小,噪声指数也较小;当抽运功率大于 15 mW 时,ASE 噪声随着增益的增大而增大,噪声指数开始上升,因此取 15 mW 作为标准抽运功率。抽运功率取 15 mW 可以避免因增益过大而导致输出功率太大,从而避免了影响频率稳定度的光纤非线性效应的产生<sup>[15]</sup>。

## 4 实验结果

根据仿真优化的设计参数和 OptiSystem 提供的参数,结合设计光路搭建了可用于光学频率传递链路中的双向 EDFA,实验中分别从两端给双向 EDFA 提供一个  $-20$  dBm 的信号,放大后的输出功率均为 0.14 dBm。根据(3)式,计算得到增益为 20.14 dB。

为了评估双向 EDFA 的噪声特性,利用光纤马赫-曾德尔干涉仪进行拍频,得到双向 EDFA 的信噪比,光路如图 4 所示。将 1550 nm 的信号分为两束,这两束信号分别通过声光调制器(AOM)和双向 EDFA。其中一束信号在进入双向 EDFA 前,先经过可调节衰减器(VA)将输入信号调至所需功率,信号经过双向 EDFA 后被放大;另一束信号通过 AOM 后移频 80 MHz,将该信号与被 EDFA 放大后的信号进行拍频。分别对加入双向 EDFA、不加入双向 EDFA 及无光时进行拍频测量,无光时得到的测量结果为探测器(PD)的本底噪声,拍频结果如图 5 所示。

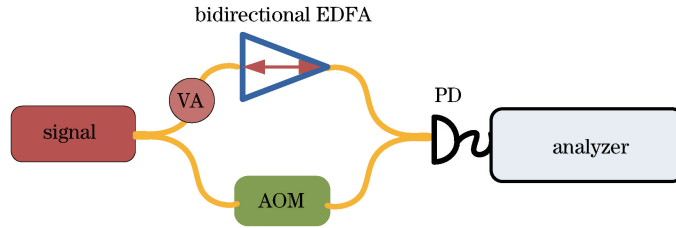


图 4 光纤马赫-曾德尔干涉仪光路示意图

Fig. 4 Optical path diagram of fiber Mach-Zehnder interferometer

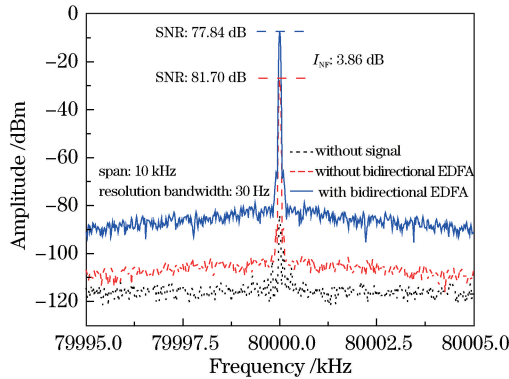


图 5 双向 EDFA 的拍频结果

Fig. 5 Beat frequency result of bidirectional EDFA

图 5 中红色虚线、蓝色实线分别为不经过、经过双向 EDFA 的拍频结果,信号的信噪比分别为 81.70, 77.84 dB。根据(4)式得到双向 EDFA 的噪声指数为 3.86 dB,接近理论极限(3 dB)。两个拍频结果的本底噪声都高于探测器的本底噪声(黑色点线),说明探测器的本底噪声没有影响拍频结果。随着抽运功率的增加,双向 EDFA 的增益和噪声指数变化如图 6 所示。实验中必须考虑双向 EDFA 在输入端和输出端功率损耗的影响,功率损耗会导致实际增益值小于理论值,实际噪声指数大于理论值。抽运功率为 10 mW 时测量的噪声指数与理论值相差较大,如图 6 所示,这可能是由抽运不充分以及 ASE 噪声的影响导致的,但实验所得结果和理论仿真结果的趋势基本一致。

双向 EDFA 可用于光学频率传递链路中,其工作过程中引入的相位噪声对链路产生影响。相位噪声的测量是通过把电压抖动转换为相位抖动。对输入信号、参考信号进行相位比对,可得到相位变化,相位、电压  $U_{PD}$  的变化关系可表示为<sup>[15]</sup>

$$U_{PD} = K_{PD} [\varphi(t) - \varphi_{ref}(t)], \quad (6)$$

式中  $K_{PD}$  为弧度电压的转换系数,  $\varphi(t)$  为待测信号的相位,  $\varphi_{ref}(t)$  为参考信号的相位。为了得到更精确的结果,对输入信号进行分频,分频系数为  $K_{PS}$ , 设测量带宽为  $W_{BW}$ , 则相位噪声可表示为

$$S_{\varphi}(f) = \frac{\{\text{FFT}[U_{PD}/(K_{PD}K_{PS})]\}^2}{W_{BW}}, \quad (7)$$

式中 FFT 表示快速傅里叶变换。

采用图 4 中的拍频方式,利用 FFT 测量相位噪声的变化。双向 EDFA 工作时,掺铒光纤中的 ASE 噪声被放大,干扰信号的相位,并引入了相位噪声。如图 7 所示,红色圈线为加入双向 EDFA 时拍频得到的相位噪声,黑色实线为不加入双向 EDFA 时系统的本底噪声。为提高测量结果的准确性,对信号进行了分频(分

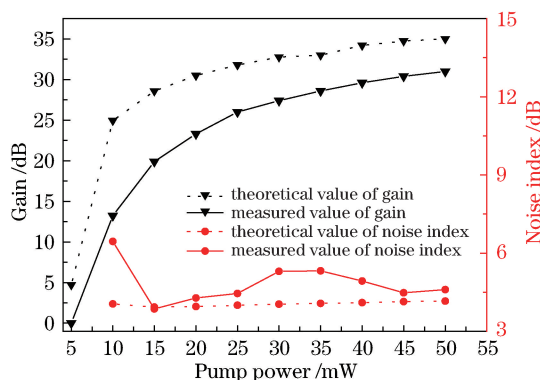


图 6 增益和噪声指数随抽运功率的变化

Fig. 6 Variations in gain and noise index with pump power

频系数为 100), 并根据(7)式计算得到双向 EDFA 的相位噪声。分析测量结果可得, 在低频处 ( $f < 40$  Hz), 双向 EDFA 引入一部分相位噪声; 在  $f = 1$  Hz 处, 双向 EDFA 引入的相位噪声仅为  $0.1 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ ; 在  $f > 40$  Hz 的频率范围内, 双向 EDFA 引入的相位噪声几乎和相位本底噪声重合,  $f = 50$  Hz 处的尖峰为市电带来的影响。光纤链路在  $f = 1$  Hz 处引入的相位噪声远大于  $0.1 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ , 因此该双向 EDFA 所引入的相位噪声对链路系统几乎没有影响。

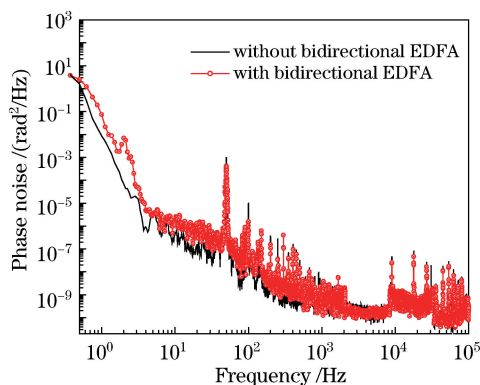


图 7 加入和不加入双向 EDFA 的相位噪声变化

Fig. 7 Phase noise variations with and without bidirectional EDFA

## 5 双向 EDFA 在 200 km 光纤光学频率传递链路中的应用

200 km 光纤光学频率传递链路系统示意图如图 8 所示, 双向 EDFA 放置在链路中 100 km 位置处, 为往返信号提供 20 dB 的增益。将 1550 nm 超稳窄线宽激光器作为本地端光源, 激光经过单模分束器 (SMC1) 后分为两路信号: 一路信号被法拉第镜 (FM1) 反射, 反射后的信号作为本地参考光; 另一路信号作为传递信号经过声光调制器 (AOM1) 后被移频 110 MHz, 移频后的信号注入到 200 km 的传输链路中。传输的信号经过 100 km 光纤后衰减约 22 dB, 再经双向 EDFA 后被放大, 并继续传输 100 km 后到达远程端。在远程端, 信号被另一个分束器 (SMC2) 分为两路信号: 一路信号提供给用户; 另一路信号经另一个法拉第镜 (FM2) 反射回链路, 再次经双向 EDFA, 该过程中信号功率损耗得到补偿, 最后该路信号经链路传回源端。携带相位噪声信息的返回信号经过 50 MHz 的 AOM2 的两次移频后与本地参考信号产生频率差, 测量链路的相位噪声。通过伺服系统对 AOM1 进行调制, 以消除链路噪声。

实验中, 为了测量 200 km 传输链路的频率稳定度, 采用频率计数器 (Agilent 53230A) 对抑制噪声以后的传递频率进行计数 (倒易模式), 间隔时间为 1 s, 计算阿伦方差, 得到秒级频率稳定度为  $3.8 \times 10^{-16}/\text{s}$ , 万秒级频率稳定度达到  $2.8 \times 10^{-19}/(10^4 \text{ s})$ 。如图 9 所示, 黑色三角线为自由运转时的频率稳定度, 红色圆点线为抑制噪声后的频率稳定度, 秒级频率稳定度在相位噪声抑制系统工作情况下比自由运转时提高了两个量级以上。

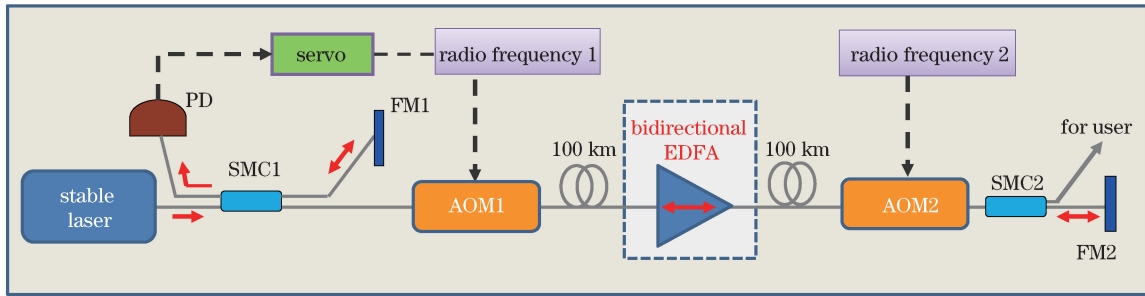


图 8 200 km 光纤光学频率传递链路示意图

Fig. 8 Diagram of 200 km fiber optical frequency transfer link

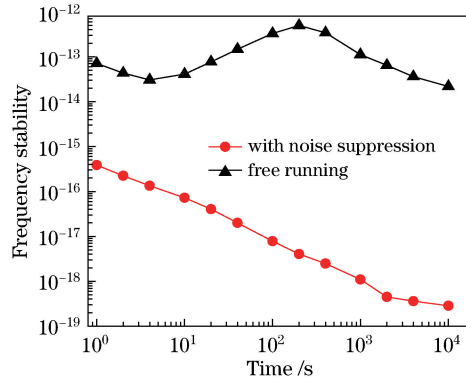


图 9 200 km 光纤光学频率传递链路的频率稳定度

Fig. 9 Frequency stability in 200 km fiber optical frequency transfer link

## 6 结 论

详细介绍了自主研制的可用于光学频率传递链路的高增益、低噪声双向 EDFA,通过对参数的仿真计算及优化,实际测量得到的双向 EDFA 噪声系数为 3.86 dB,增益为 20.14 dB,引入的相位噪声在  $f=1$  Hz 处仅为  $0.1 \text{ rad}^2/\text{Hz}$ 。在光学频率传递链路中,双向 EDFA 作为放大器件补偿了光学频率传递链路中 22 dB 的衰减,实现了距离为 200 km 的传输,大幅延长了光纤中的光学频率传递距离。秒级频率稳定度达到  $3.8 \times 10^{-16}/\text{s}$ ,万秒级频率稳定度达到  $2.8 \times 10^{-19}/(10^4 \text{ s})$ 。下一步拟将此双向 EDFA 应用于更远距离的实地光纤光学频率传递链路中,并进行远程自动控制,为将来实现国土范围内超远距离光学频率传递以及科研、高技术应用提供支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Schiller S, Tino G M, Gill P, *et al.* Einstein gravity explorer-a medium-class fundamental physics mission[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 23(2): 573-610.
- [2] Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 203-210.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Swallows M D, Bishof M, Lin Y, *et al.* Suppression of collisional shifts in a strongly interacting lattice clock[J]. *Science*, 2011, 331(6020): 1043-1046.
- [6] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, *et al.* An atomic clock with  $10^{-18}$  instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [7] 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.

- [8] Ushijima I, Takamoto M, Das M, *et al.* Cryogenic optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 185-189.
- [9] 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.
- [10] Olivier L, Nicola C, Fabio S, *et al.* Cascaded optical link on a telecommunication fiber network for ultra-stable frequency dissemination[C]. *SPIE*, 2015, 9378: 937823.
- [11] Desurvier E. Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications[M]. New York: Wiley-Interscience, 1994: 3-26.
- [12] Becker P C, Olsson N A, Simpson J R. Erbium-doped fiber amplifiers: Fundamentals and technology[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 258-259.
- [13] Ismail M M, Othman M A, Zakaria Z, *et al.* EDFA-WDM optical network design system[J]. *Procedia Engineering*, 2003, 53: 294-302.
- [14] 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.
- [15] Predehl K. A 920 km optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place[D]. München: Ludwig-Maximilians-Universität, 2012.
- [16] Nicola C, Nicolas Q, Fabio S, *et al.* Cascaded optical fiber link using the internet network for remote clocks comparison[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33927-33937.
- [17] 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: 979-986.
- [18] 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: 261109.
- [19] Wang Lingdong, Wu Guiling, Shen Jianguo, *et al.* Simultaneous transfer of time and frequency over 100 km fiber link[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406004.  
王灵东, 吴龟灵, 沈建国, 等. 基于 100 km 光纤链路的时间和频率同时传递[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406004.
- [20] Liu Q, Chen W, Xu D, *et al.* Bidirectional erbium-doped fiber amplifiers used in joint frequency and time transfer based on wavelength-division multiplexing technology[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(11): 110601.
- [21] Song Hongbin. Theoretical and experimental study on ASE light source, EDFA and fiber laser[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005: 9-25.  
宋红彬. ASE 光源、EDFA 和光纤激光器的理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005: 9-25.
- [22] Qiang Zexuan. Experimental studies, analysis and design for erbium doped fiber amplifiers with low noise figure, high and flat gain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 12-31.  
强则焯. 低噪声、高增益、高平坦度掺铒光纤放大器的分析与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 12-31.
- [23] Tong Zhi, Wei Huai, Li Tangjun, *et al.* Study on optimization of high quality EDFAs[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2001, 12(9): 879-882.  
童 治, 魏 淮, 李唐军, 等. 高性能掺铒光纤放大器的优化研究[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(9): 879-882.
- [24] Yu Qian, Cui Jingcui, Wang Sihai, *et al.* A new method for the numerical simulation of erbium doped fiber amplifiers[J]. *Chinese J Lasers*, 1999, A26(7): 585-588.  
俞 谦, 崔景翠, 王四海, 等. 数值模拟掺铒光纤放大器的新方法[J]. *中国激光*, 1999, A26(7): 585-588.
- [25] 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.