

文章编号: 0258-7025(2010)08-1990-06

# 分布式光纤拉曼放大对远程光纤水听器系统 噪声特性的影响

王科研 孟 洲

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 分布式光纤拉曼放大器(DFRA)因其特有的在线、宽带、低噪声等特点越来越引起人们的重视。利用其在线以及低噪声的特点,将其用作远程光纤水听器(FOH)系统的在线放大器,并测量引入分布式光纤拉曼放大前后系统噪声的变化情况。实验结果表明,分布式光纤拉曼放大器作为在线放大器应用于远程光纤水听器系统后,系统的强度噪声和相位噪声的增加量均小于2 dB。同时,将分布式光纤拉曼放大器与目前广泛应用的掺铒光纤放大器(EDFA)进行对比,发现前者具有更好的噪声性能。因此,分布式光纤拉曼放大器可用作远程光纤水听器系统的在线光放大器。

**关键词** 传感器;光纤拉曼放大;在线;强度噪声;相位噪声

**中图分类号** TN253;TB565<sup>+</sup>.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.1990

## Effects of Distributed Fiber Raman Amplifier on Noise Characteristics in Long-Distance Fiber Optic Hydrophone

Wang Keyan Meng Zhou

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The distributed fiber Raman amplifier (DFRA) is more and more attractive for its particular virtues such as in-line, wideband and low noise etc. Because of the virtues of in-line and low noise, DFRA is used as the in-line amplifier in long-distance fiber optic hydrophone (FOH) and to measure the change of noise. The experimental results show that the increases of intensity noise and phase noise are below 2 dB. Meanwhile, compared with erbium doped fiber amplifier (EDFA), DFRA has better performances when it is used as the in-line amplifier in the remote FOH system. So DFRA can be used as the in-line amplifier in long-distance FOH.

**Key words** sensors; fiber Raman amplification; in-line; intensity noise; phase noise

### 1 引 言

随着光纤水听器(FOH)阵列关键技术的成熟,超远程大规模光纤水听器阵列成为其主要发展方向。20世纪末美国实施了系列光纤水下探测系统的重大开发计划,并取得较大成功,对其水下信息网的建立和第一、二岛链对我水下封锁体系的建设发挥了重要作用。近年来英国也开始进行500 km, 512基元远程大规模光纤水听器阵列技术的研究。

我国海洋环境监测和海洋防御体系的建立对远程大规模光纤水听器阵列也提出了明确的应用需求。

光放大技术是实现远程大规模光纤水听器阵列的关键技术之一。常用的掺铒光纤在线放大器(EDFA)<sup>[1]</sup>因其远程抽运传输损耗大、放大带宽窄和噪声大等缺陷而使其应用受限。分布式光纤拉曼放大器(DFRA)凭借其在线、增益带宽范围大、噪声小等优点,逐渐成为光纤通信系统中光放大的重要

收稿日期:2009-09-02;收到修改稿日期:2009-12-21

基金项目:新世纪优秀人才(NCET-06-0925)资助课题。

作者简介:王科研(1984—),男,硕士研究生,主要从事光纤放大及光纤传感方面的研究。E-mail:wangkeyan84@126.com

导师简介:孟 洲(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤器件等方面的研究。

E-mail:zhoumeng6806@163.com

手段<sup>[2~7]</sup>。同时,在线、低噪声等特点使得它在光纤传感系统中同样具有广阔的应用前景。

目前,光纤拉曼放大器在光纤传感系统中应用的报道主要集中在分布式温度传感系统和光纤光栅压力传感系统。本文将 DFRA 作为在线放大器应用于远程光纤水听器系统,实验研究了其引入对远程光纤水听器系统噪声性能的影响。

## 2 系统噪声分析及其测试方法

光纤水听器系统的噪声本底通过声压灵敏度转化为等效噪声声压,而等效噪声声压决定了系统对弱信号的探测能力,限制了系统的探测性能。高灵敏度的干涉型光纤水听器系统的噪声包括强度噪声和光学相位噪声,在实际传感中强度噪声将转化为等效的相位噪声,为区分两种噪声及其影响,分别对其进行了测试,首先介绍干涉型光纤水听器系统的强度噪声和相位噪声的测试原理及方法。

### 2.1 强度噪声

在干涉型光纤水听器实际应用中,系统强度噪声将转化为等效的相位噪声来影响系统性能,因此常用系统相对强度噪声(RIN)来描述系统的强度噪声  $N_r$ ,  $N_r$  定义为<sup>[8]</sup>

$$N_r = 10 \lg \left[ \frac{\overline{\delta p^2}}{\overline{p^2}} \right], \quad (1)$$

式中  $\overline{\delta p^2}$  为系统输出光功率起伏均方谱密度,  $\overline{p^2}$  为系统平均输出光功率。干涉型光纤水听器检测的是声压引起的干涉仪相位变化,由相对强度噪声产生的等效相位噪声  $\delta\phi$  为

$$\delta\phi = \sqrt{N_r(f)}, \quad (2)$$

式中  $f$  为信号频率值。相对强度噪声  $N_r$  和等效相位噪声  $\delta\phi$  都是与信号频率  $f$  相关的量。依据此定义,通过光电探测器分别测量探测器输出电压的均值和方差,即可计算出系统的相对强度噪声。

### 2.2 相位噪声

系统相位噪声主要来自激光器自身的相位噪声以及由于外界环境干扰引起的激光器中心频率抖动和谱线展宽带来的相位噪声,相位噪声的存在限制了系统测量的最小相位,即光纤水听器可探测的最小声压。

下面从干涉型光纤水听器的探测原理出发阐述系统相位噪声的测试方法。

图 1 所示为基于迈克耳孙光纤干涉仪的基本结构图,采用外调制相位调制载波(PGC)<sup>[9]</sup>方法对相

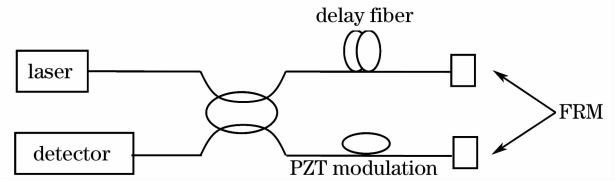


图 1 迈克耳孙光纤干涉仪基本结构  
Fig. 1 Basic configuration of Michelson fiber interferometer

位进行解调,通过改变压电陶瓷(PZT)相位调制器的外加电压实现对两臂光程差的调制;法拉第旋光镜(FRM)主要作用是反射两臂末端的信号光和参考光,同时可以抵消系统的偏振衰落;延迟光纤(delay fiber)的作用是使两臂之间产生光程差,从而在输出端产生相位差。设干涉仪两臂相位差为  $\theta(t)$ ,则干涉仪输出的光信号为

$$I = A + B \cos[\theta(t)], \quad (3)$$

式中  $A$  为与干涉仪输入光强、偏振器和耦合器插入损耗有关的直流项,  $B$  与光纤干涉仪输入光强、光纤耦合器的分束比、干涉仪的消光比等有关。相位差  $\theta(t)$  由信号和外界环境噪声、调制产生的相位差以及初始相位组成,可以写成

$$\theta(t) = \phi(t) + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \phi_0, \quad (4)$$

(4)式等号右端的 4 项分别表示由调制产生的相位差、信号作用产生的相位差、外界环境影响产生的相位差和系统初始相位差。

在迈克耳孙干涉仪中,信号臂和参考臂出来的光场的相位差为

$$\phi(t) = \frac{2\pi \cdot 2nl}{c} \cdot \nu, \quad (5)$$

式中  $n$  为光纤纤芯的折射率,  $c$  为真空中光速,  $\nu$  为信号光光频,  $l$  为两臂臂差。

利用此原理,通过单频正弦信号调制干涉仪某一臂的长度变化,从而导致两臂臂长差的变化时,系统输出的相位差为

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{4\pi n\nu}{c} [l_0 + \Delta l \cdot \cos(\omega_0 t)] = \\ &= \frac{4\pi n\nu l_0}{c} + C \cos(\omega_0 t), \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式第 2 个等号右端的第一式为常数,  $\omega_0$  为正弦信号的调制频率,  $C = \frac{4\pi n\nu}{c} \Delta l$  为相位调制幅度,将(4),(6)式代入(3)式,干涉仪输出端光强表达式为

$$I = A + B \cos[C \cos(\omega_0 t) + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \phi_0]. \quad (7)$$

设  $\phi'(t) = \phi_s(t) + \phi_n(t) + \phi_0$ , 则

$$I = A + B\cos[C\cos(\omega_0 t) + \phi'(t)], \quad (8)$$

上述光信号经过光电探头转换为电信号

$$V = A + B\cos[C\cos(\omega_0 t) + \phi'(t)]. \quad (9)$$

通过外调制 PGC 方法<sup>[10,11]</sup>可以解调出该电信号的  $C\cos(\omega_0 t) + \phi'(t)$  项。该实验采取了消声减振措施以屏蔽所有的外界声信息的影响,因此可以认为解调出来的就是系统的相位噪声本底。

### 3 实验装置

与 EDFA 一样,DFRA 也有 3 种抽运方式:反向抽运、同向抽运和双向抽运。比较这 3 种不同的抽运方式,选取反向抽运作为本实验的抽运方式,这样可以保证系统受到最小程度的非线性效应影响和偏振相关性影响。同时结合远程光纤水听器的实际

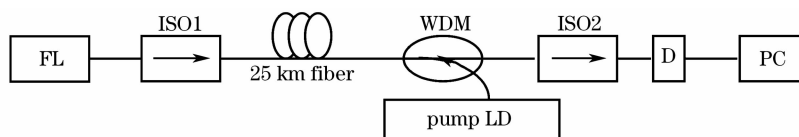


图 2 测量相对强度噪声的实验装置

Fig. 2 Experimental setup for measuring RIN

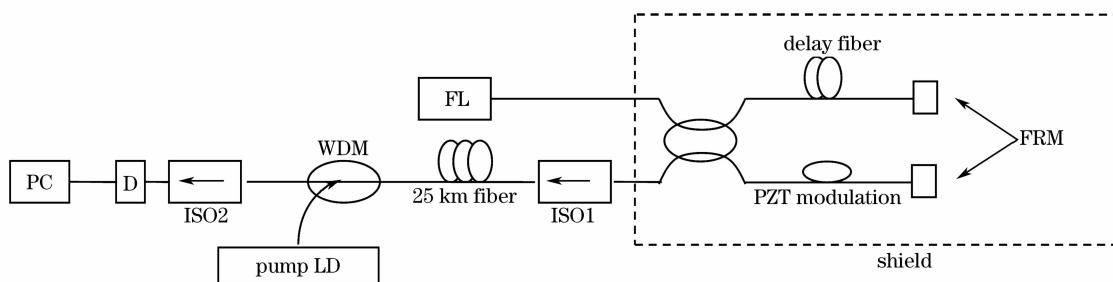


图 3 相位噪声的测试装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for measuring phase noise

实验中所用光源是光纤激光器 (FL), 中心波长为 1553 nm, 最大输出功率为 20 mW, 其本身相对强度噪声为 -109 dB, 相位噪声为 -108 dB。根据受激布里渊的阈值理论<sup>[13]</sup>, 本实验条件下的阈值约为 4 mW, 实验过程中严格控制输入光纤的光功率值小于该阈值, 以抑制受激布里渊散射对噪声的影响。隔离器 ISO 的作用是隔离后向反射光对系统性能的影响。光波分复用器 WDM 将不同中心波长的信号光和抽运光耦合到光纤中。抽运源是半导体激光器 (LD), 中心波长为 1449 nm, 最大输出功率为 270 mW。实验中传输光纤种类是普通单模光纤, 在 1450 nm 和 1550 nm 处的损耗系数分别为 0.23 dB/km 和 0.19 dB/km。

干涉仪两臂的光程差为 1 m。PZT 的调制频率为 12.5 kHz, 调整调制电压, 使系统工作在相位载

应用环境<sup>[12]</sup>, 采用反向抽运方式也是工程应用的首选。

根据光纤拉曼放大理论, 抽运光和信号光只在一定长度范围内发生受激作用, 这个实际作用的光纤长度称为有效光纤长度, 其定义为

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)] / \alpha_p, \quad (10)$$

式中  $L$  为增益光纤的总长度,  $\alpha_p$  为抽运光在增益光纤中的损耗系数。从 (10) 式可以看出, 当  $\alpha_p L \gg 1$  时,  $L_{\text{eff}}$  近似为  $1/\alpha_p$ 。对于中心波长为 1449 nm 的抽运源, 在普通单模光纤中传输的实测损耗为 0.23 dB/km。因此, 该条件下的有效光纤长度约为 19 km, 本实验选取传输光纤长度为 25 km。

测量相对强度噪声和相位噪声的装置分别如图 2, 3 所示。

波 (PGC) 解调所需的最佳调制深度处, 即使相位调制幅度  $C = 2.4$ <sup>[9]</sup>。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 引入 DFRA 前的系统噪声

为了比较 DFRA 的引入对水听器系统噪声性能的影响, 先关闭抽运源, 使系统工作在无放大状态。为了减小随机性给测试结果带来的误差, 测试过程中均采用多组测试取平均值的方法。测量该状态下, 光纤激光器发出的信号光经过传输光纤后系统的相对强度噪声和相位噪声, 结果如图 4 所示。

从图 4(a) 中可以看出, 经过光纤传输后系统的 RIN 在高频 (大于 4 kHz) 处与光纤激光器本身的 RIN 相当, 没有发生明显的变化。但是在低频处,

RIN 明显提高,其中在 0.5 kHz 频点处 RIN 仅为 -95 dB,2 kHz 频点处的 RIN 为 -103 dB,均远高于光纤激光器本身的 -109 dB。

从图 4(b)中可以看出系统的相位噪声变化趋

势与相对强度噪声变化趋势相符,高频(大于 1 kHz)基本不变,低频噪声变化明显,其中在 0.2 kHz 处,相位噪声提高了 8 dB,0.5 kHz 处提高了 6 dB。

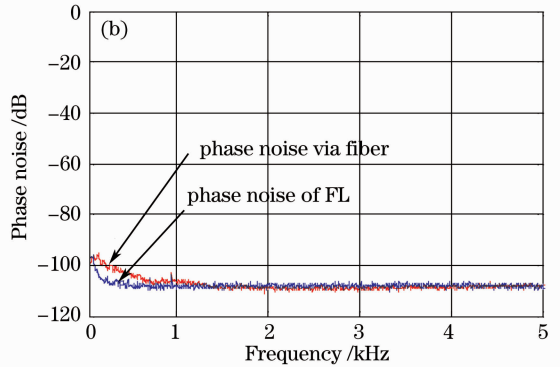
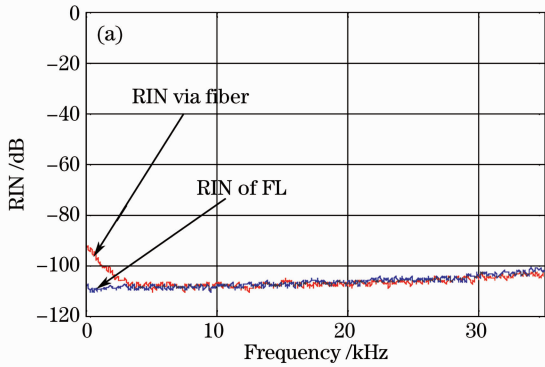


图 4 引入 DFRA 前系统的相对强度噪声(a)和相位噪声(b)

Fig. 4 RIN (a) and phase noise (b) without DFRA

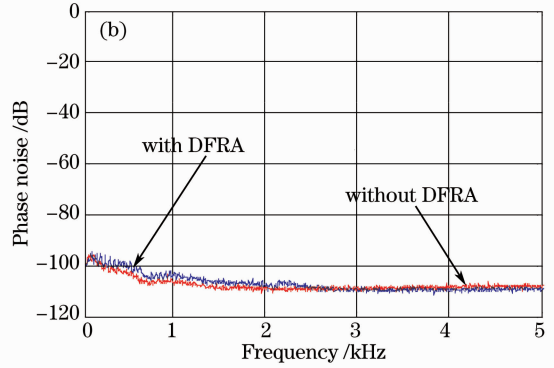
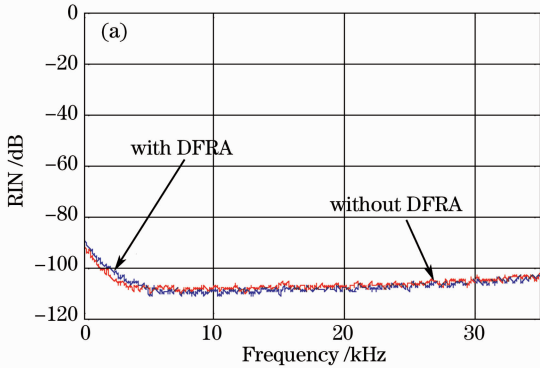


图 5 引入 DFRA 前后系统的相对强度噪声(a)和相位噪声(b)

Fig. 5 RIN (a) and phase noise (b) with and without DFRA

产生这种现象的主要原因是实验中所用的光纤激光器是高相干光源,线宽小于 1 kHz,推算其相干长度可达上百千米。而信号光在长距离光纤传输过程中会产生背向瑞利散射,由于光的高相干性将在系统光路中引起多路干涉,致使系统的噪声提高。

#### 4.2 引入 DFRA 后的系统噪声

打开抽运源,使系统工作在 DFRA 放大状态,系统噪声测试结果如图 5 所示。

图 5 中未引入 DFRA 的系统噪声就是图 4 中经 25 km 传输后的系统噪声。

光纤水听器作为水下声传感器,而在海洋中,低频信号传播损失小,且安静型潜艇等目标低频噪声强度难以降低,因此光纤水听器的噪声性能也主要以低频段的性能来衡量。因此分别将图 5 的低频部分进行放大得到图 6。

从图 6 可以看出,引入 DFRA 对高频段(大于 5 kHz)的系统相对强度噪声和

高频段(大于 5 kHz)的相位噪声没有影响;低频段的系统相对强度噪声和相位噪声增加量在 2 dB 以内,因此 DFRA 的引入对系统噪声的影响非常小。

原因在于在 DFRA 中,噪声功率和信号功率都会产生增益,但是由于信号频率和抽运频率之差处于受激拉曼散射的峰值位置,因此信号功率的增益速度要远远高于噪声功率的增益速度。同时在 DFRA 中,噪声功率会随着长距离的传输而逐渐衰减,这也使得系统的噪声指数(NF)可以为负值<sup>[14]</sup>,具有较好的噪声性能。在光纤水听器中表现为 DFRA 的引入对系统的相对强度噪声和相位噪声均没有产生较大影响,进而不会影响光纤水听器的探测灵敏度等系统参数。

#### 5 DFRA 和 EDFA 对比测试

为了验证 DFRA 作为远程光纤水听器系统的光在线放大器时相比于 EDFA 的优越性,在实验室

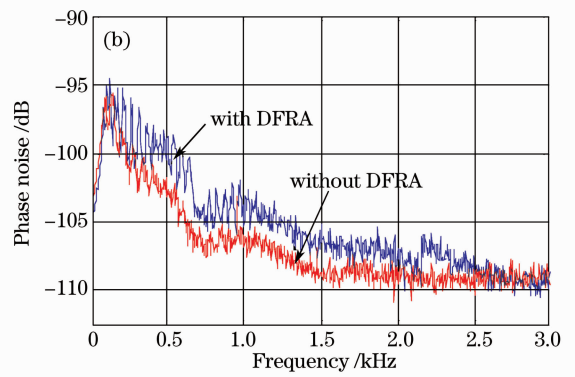
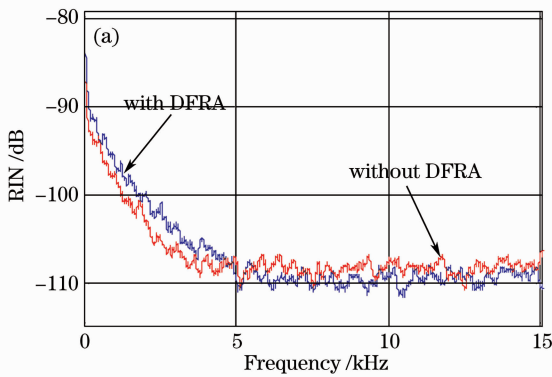


图 6 低频段相对强度噪声(a)和相位噪声(b)的比较

Fig. 6 Comparison of RIN (a) and phase noise (b) in low frequency

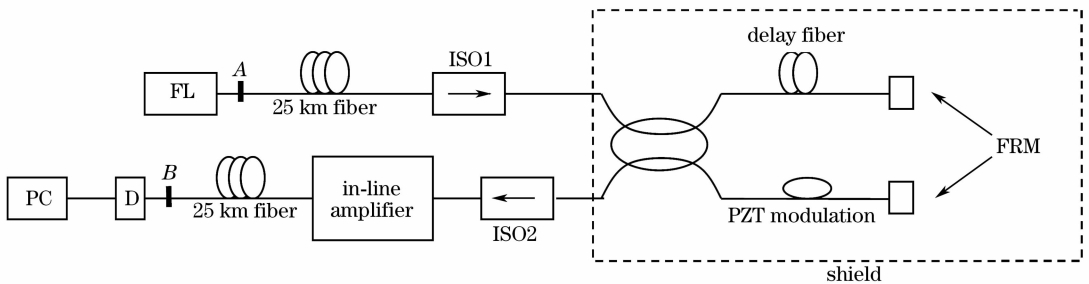


图 7 DFRA 与 EDFA 在线放大时相位噪声对比测试系统

Fig. 7 Experimental setup for comparing DFRA with EDFA

中模拟一个远程光纤水听器系统,其结构示意图如图 7 所示。

与图 3 相比,图 7 在干涉仪前端加入 25 km 传输光纤,以便更贴近远程光纤水听器实际应用系统。为了模拟实用,在没有在线放大器时,调整光纤激光器的输出功率,使图 7 中 B 点功率值为  $10 \mu\text{W}$ ,此时光纤激光器输出功率(即图 7 中 A 点)为  $0.95 \text{ mW}$ 。系统探测电路中,当输入功率大于  $10 \mu\text{W}$  时,探测器噪声本底对系统噪声的影响可以忽略。

实验中分别将 DFRA 和 EDFA 作为在线放大器,测试各自对系统相位噪声的影响,结果如图 8 和

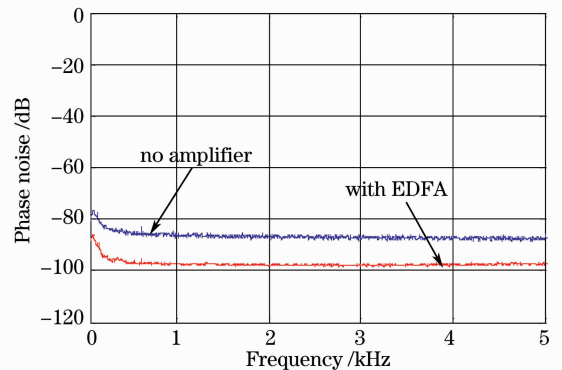


图 9 以 EDFA 为在线放大器的系统相位噪声测试结果

Fig. 9 Phase noise of EDFA as in-line amplifier

图 9 所示。

这里需要说明的是,受光纤拉曼放大器抽运源功率限制,DFRA 增益为 7 dB,此时到达 B 点的功率值约为  $50 \mu\text{W}$ ,EDFA 增益约为 23 dB,大于 DFRA。为了保证比较结果的可靠性,以经过 DFRA 放大后 B 点的功率值为参考值,即当在线放大器为 EDFA 时,对进入探测器的功率值进行衰减,使之同样为  $50 \mu\text{W}$ 。这样保证两种在线放大器是在同一个信号功率水平上进行比较。

图 10(a)所示的是二者对系统相位噪声影响的比较测试,将图 10(a)低频部分(0.05~1.5 kHz)进行局部放大,得到图 10(b)。

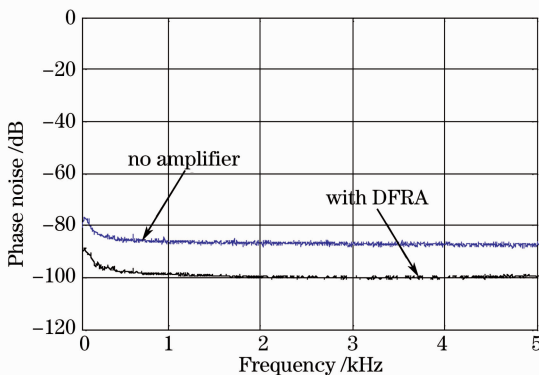


图 8 以 DFRA 为在线放大器的系统相位噪声测试结果

Fig. 8 Phase noise of DFRA as in-line amplifier

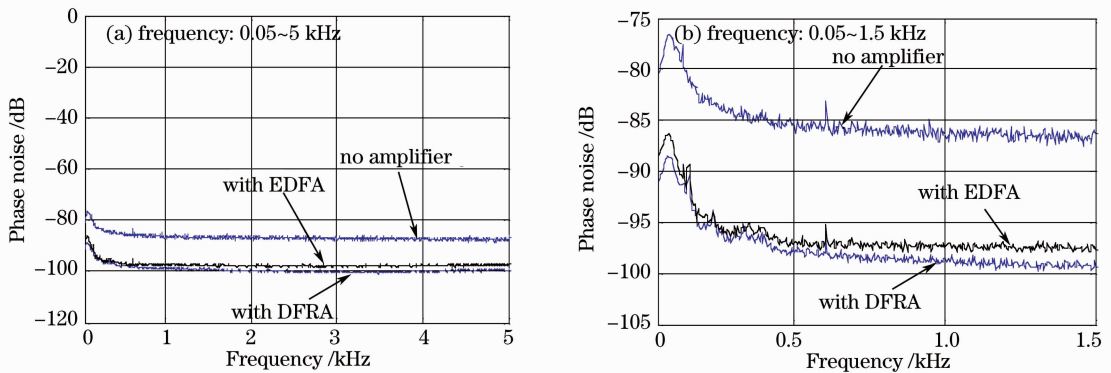


图 10 DFRA 和 EDFA 作为在线放大器时系统噪声的比较

Fig. 10 Comparison of phase noise of DFRA and EDFA

从图 10(b)可以看出,引入光在线放大器后,无论是 DFRA 还是 EDFA,系统的噪声都得到明显改善,这也是光在线放大器存在的意义。从两种放大器的噪声性能测试结果比较可见,在 1 kHz 频率处,DFRA 噪声要优于 EDFA 2 dB。因此,作为远程光纤水听器系统光在线放大器时,DFRA 的相位噪声性能优于 EDFA。

## 6 结 论

基于迈克耳孙干涉仪的干涉型光纤水听器系统,采用 25 km 的传输光纤,测量分布式光纤拉曼放大对系统噪声的影响。实验结果表明,无论相对强度噪声还是相位噪声,在系统引入 DFRA 后增加量均小于 2 dB,并且从 DFRA 的工作机理方面对原因进行解释。同时将 DFRA 与 EDFA 进行对比,从两种放大器的噪声性能测试结果比较来看,在 1 kHz 频率处,DFRA 噪声要优于 EDFA 2 dB。从噪声性能方面验证了分布式光纤拉曼放大器应用于远程光纤水听器系统的可行性。

## 参 考 文 献

- G. A. Cranch, C. K. Kirkendall, K. Daley *et al.*. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11):1579~1581
- Haisheng Rong, Yinghao Kuo, Shengbo Xu *et al.*. Recent development on silicon-based Raman lasers and amplifiers [C]. *SPIE*, 2006, **6389**:638904
- Zhaohui Li, Ampalavanapillai Nirmalathas, Linghao Cheng *et al.*. Application of distributed Raman amplifier to improve link gain and noise characteristic of WDM radio over fiber network [C]. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2005, 245~248
- J. Bromage. Raman amplification for fiber communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1):79~93

- Hiroji Masuda. Recent progress on optical fiber amplifiers and their applications [C]. *SPIE*, 2006, **6389**:638902
- Xiaohong Jiang, Jiang Chun, Xiaoming Zhang. Design of Raman-parametric fiber amplifier for wavelength division multiplex transmission system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5):327~330
- Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying *et al.*. Study on the polarization dependent gain of fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):600~602  
张敏明,刘德明,王 英等. 光纤拉曼放大器中增益的偏振相关特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):600~602
- Liang Xun. Study on the Analysis and Suppression of the Noise in Fiber Optic Hydrophone System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008  
梁 迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008
- Ni Ming, Xiong Shuidong, Meng Zhou *et al.*. Realization of digital demodulation of the phase generated-carrier technique in fiber optic hydrophone systems [J]. *Applied Acoustics*, 2004, **23**(6):5~11  
倪 明,熊水东,孟 洲等. 数字化相位载波解调方案在光纤水听器系统中的实现[J]. *应用声学*, 2004, **23**(6):5~11
- Liang Xun, Xiong Shuidong, Hu Yongming *et al.*. Impact of relative intensity noise on fiber optic hydrophone's phase generated carrier scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):716~721  
梁 迅,熊水东,胡永明等. 激光器强度噪声对光纤水听器相位载波解调的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):716~721
- Zhou Meng, Yongming Hu, Shuidong Xiong *et al.*. Phase noise characteristics of a diode-pumped Nd:YAG laser in an unbalanced fiber-optic interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(17):3425~3428
- G. A. Cranch, P. J. Nash, C. K. Kirkendall *et al.*. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. *IEEE Sens. J.*, 2003, **3**(1):19~30
- Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):497~500  
沈一春,宋牟平,章献民等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):497~500
- P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stenz *et al.*. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1):159~161