

光纤水听器 200 km 无中继传输系统噪声研究

曹春燕 熊水东 胡正良 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 研究了影响干涉型光纤水听器远程无中继传输系统性能的各种噪声,分析了分布式拉曼光纤放大(DFRA)与掺铒光纤放大(EDFA)混合放大方案对光放大相位噪声抑制的效果,并通过实验得到了与仿真分析一致的结果。研究了相位产生载波(PGC)调制解调对相干双重瑞利散射(DRS)噪声的抑制原理,并对不同距离的 DRS 噪声抑制效果进行了讨论。远程实验结果表明,PGC 技术可使相干 DRS 噪声降低 19 dB,混合放大可使光放大噪声降低 7.2 dB。经噪声综合抑制后,100 km 传输系统的相位噪声降至 -113.2 dB(即 $2.2 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$),与短程系统噪声基本相当;200 km 传输后噪声降至 -104 dB(即 $6.3 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$),相比短程系统增加的部分主要为残留的 DRS 噪声。

关键词 光纤光学;相位噪声抑制;分布式光纤拉曼放大器;相位产生载波调制解调;光纤水听器;无中继传输

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0406006

Noise Analysis of Repeaterless Long-Haul Fiber-Optic Hydrophone Systems with the Fiber Length Up to 200 km

Cao Chunyan Xiong Shuidong Hu Zhengliang Hu Yongming

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

Abstract The noises affecting the performance of a repeaterless long-haul fiber hydrophone system are investigated. For the noise due to pre-amplifier, distributed Raman amplifier (DFRA) and erbium-doped fiber amplifier (EDFA) are combined to decrease the noise and the experimental results in noise reduction agree well with the simulated results. The suppression of double-Rayleigh-scattering (DRS) inducing coherent noise by employing the phase generated carrier (PGC) modulation/demodulation technique is demonstrated and the suppression of DRS in systems with different fiber lengths is also discussed. The experimental results show that PGC technique scheme can suppress the DRS noise by 19 dB and the DFRA/EDFA hybrid scheme can decrease the pre-amplifier noise by 7.2 dB. In the end, the phase noise level of a hydrophone system with 100 km long-haul fiber reduces to -113.2 dB (namely $2.2 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$), which is identical to the level of a short-haul system. In the system with 200 km fiber, the noise level decreases to -104 dB (namely $6.3 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$) and the little increase of the noise is mainly due to the DRS which has not been completely suppressed.

Key words fiber optics; suppression of phase noise; distributed fiber Raman amplifier; phase generated carrier modulation/demodulation; fiber-optic hydrophone; repeaterless transmission

OCIS codes 060.2370; 060.2320; 280.4788; 290.5870

1 引言

光纤水听器远程传输阵列在石油勘探和海洋预警中发挥着重要作用^[1,2]。在实际应用中,通常需要实现水下声信号的全光获取及传输,因此建立无

中继系统成为远程阵列发展的重要方向之一。但是随着距离的增加,非线性效应以及相干双重瑞利散射(DRS)等带来的传输噪声逐步增加,经远程无中继传输后,弱光信号的高增益放大也带来大量噪声,

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期**: 2012-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60908004)资助课题。

作者简介: 曹春燕(1979—),女,讲师,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: ccy_nudt@hotmail.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光学设计等方面的研究。

E-mail: sdss@21cn.com

这些都成为限制系统传输距离的重要因素。因此需要对远程无中继系统中的各种噪声进行抑制。

为降低光放大噪声,可利用分布式光纤拉曼放大(DFRA)的低噪声特点,采用 DFRA 和掺铒光纤放大(EDFA)的混合放大。目前对混合放大的研究多集中在光纤通信和分布式光纤光栅传感等领域,讨论其对系统噪声指数(NF)或光信噪比(OSNR)的改善情况^[3,4]。另外对 DRS 的研究也多集中在光纤通信领域,讨论 DRS 对系统 OSNR 的影响^[5,6]。在干涉型光纤传感系统中,OSNR 仅反映系统光强度的变化,相位噪声才是衡量系统性能的关键指标,因此需要对远程传输系统的相位噪声及抑制方案进行讨论。在已有研究中,王科研等^[7]从实验上分析了 DFRA 对光纤水听器 25 km 传输系统强度及相位噪声的抑制情况,但由于距离偏短,未对 DFRA 和 EDFA 混合的高增益放大系统进行研究。Cranch 等^[8]在 25 km 传输光纤上加入了相位调制器抑制了光纤传感系统中的 DRS 噪声。在文献^[9]中使用内调制相位产生载波(PGC)技术抑制了 50 km 传输系统中 DRS 带来的相位噪声。但传输距离大于 100 km 且存在光放大时 DRS 的噪声抑制效果尚未见报道。

本文从理论和实验上对影响光纤水听器远程无中继传输系统性能的各种噪声进行了研究。计算了注入远程光纤的最佳光功率,以实现非线性噪声的抑制;推导了光放大引入的相位噪声公式,估算了 DFRA 和 EDFA 混合放大对噪声的改善能力;利用弱法布里-珀罗(F-P)干涉模型研究了 PGC 调制解调在消除系统相位衰落的同时对 DRS 噪声进行抑制的基本原理;通过噪声分离实验得到 100~200 km 无中继传输系统中各种噪声的抑制水平,并对仿真分析结果进行了验证。

2 理论分析

高相干光源的干涉型光纤水听器短程系统本底噪声主要包括光源强度、频率噪声、光电探测器噪声和环境噪声等。由远程传输带来的附加噪声则主要包括非线性噪声、相干瑞利散射噪声和光放大噪声等,它们将直接或间接影响系统的相位噪声。本文在光纤水听器 200km 无中继远程传输系统中,采用控制注入远程光纤光功率、DFRA 和 EDFA 的混合光放大以及 PGC 调制解调等方案对以上噪声进行抑制。

2.1 受激布里渊散射

当注入远程传输光纤中的光功率大于受激布里

渊散射(SBS)阈值时,SBS 导致的系统强度及相位噪声将急剧增加^[10]。SBS 阈值计算公式为

$$P_{th} = 21 \frac{KA_{eff}}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\delta\omega}{\Delta\omega_B}\right), \quad (1)$$

式中 K 为偏振因子, g_B 为布里渊增益系数, $\delta\omega$ 为光源线宽, $\Delta\omega_B$ 为自发布里渊散射射线宽, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ 为光纤有效长度, L 为光纤长度, α 为衰减系数, A_{eff} 为光纤截面积。若 $L = 200$ km, $\alpha = 0.19$ dB/km, $A_{eff} = 80 \mu\text{m}^2$, $g_B = 3.5 \times 10^{-11}$ m/W,对于高相干光源, $\delta\omega \leq \Delta\omega_B$ 时, K 取 1,由(1)式计算得到 200 km 传输时 SBS 阈值约为 2 mW。因此将注入 200 km 远程光纤的光功率 P_{in} 控制在 2 mW 以下即可抑制 SBS。由于在光纤的各种非线性效应中,SBS 最容易发生,因此将其抑制后一般不会有其他的非线性噪声产生。

2.2 前置光放大器

由于注入光功率受到 SBS 阈值限制,光纤水听器经远程无中继传输后返回光将非常弱,需要经过低噪声、高增益的前置放大,从而使光功率达到探测器的工作范围。一般来说,光放大器都会有宽带的背景噪声,即放大自发辐射(ASE)。经探测器后 ASE 产生两项新的噪声:信号和 ASE 的差拍噪声(N_{sp})和 ASE 自身的差拍噪声(N_{ss})。若探测器的响应率为 1,则以上噪声可表示为^[11,12]

$$N_{sp} = 2(GP_0)\rho_{ASE}B_e, \quad (2)$$

$$N_{ss} = \rho_{ASE}^2 B_0 B_e, \quad (3)$$

式中 P_0 为放大器输入光功率, G 为增益, ρ_{ASE} 为 ASE 的功率谱密度, B_0 为光滤波器带宽, B_e 为探测器电带宽。在光纤水听器探测频段, N_{sp} 和 N_{ss} 近似为非相干的宽带白噪声,它们将使系统的相对强度噪声(RIN)整体增加并在信号解调后转换为相位噪声^[2]。在单位带宽内 N_{sp} 和 N_{ss} 引入的相位噪声分别为

$$\delta\varphi_{N_{sp}} = \sqrt{\frac{N_{sp}D}{(GP_0)^2}} = \sqrt{\frac{2\rho_{ASE}D}{GP_0}}, \quad (4)$$

$$\delta\varphi_{N_{ss}} = \sqrt{\frac{N_{ss}D}{(GP_0)^2}} = \sqrt{\frac{\rho_{ASE}^2 B_0 D}{(GP_0)^2}}. \quad (5)$$

考虑到宽带白噪声的采样混叠,(4)式和(5)式中加入了带宽混叠因子 $D = 2B_e/f_s$,其中 f_s 为采样率。

在系统中 ASE 噪声占优时,可忽略散粒噪声,则光放大器产生的总噪声为

$$\delta\varphi_{ASE} = \sqrt{\delta\varphi_{N_{sp}}^2 + \delta\varphi_{N_{ss}}^2}. \quad (6)$$

由(4)~(6)式可知,随着传输距离的增加, P_0 减弱同时 G 增加, N_{sp} 和 N_{ss} 引入的相位噪声将逐步加

强。在 P_0 和 G 等参数一定时, 只能通过降低 ρ_{ASE} 来减小光放大噪声。由于 DFRA 有低的等效噪声指数, 但是增益不高, 因此可采用反向 DFRA 和 EDFA 的混合放大对远程返回光进行放大, 则混合放大器总的噪声功率谱密度 $\rho_{\text{ASE(R+E)}}$ 为两放大器噪声的级联:

$$\rho_{\text{ASE(R+E)}} = \rho_{\text{ASER}}(G_E - 1) + \rho'_{\text{ASEE}} = 10^{R_{\text{NEF}}/10}(G_R - 1)(G'_E - 1)h\nu + 10^{R_{\text{NFE}}/10}(G'_E - 1)h\nu, \quad (7)$$

式中 ρ_{ASER} 和 ρ'_{ASEE} 分别为 DFRA 的等效噪声功率谱密度和 EDFA 的噪声功率谱密度, R_{NEF} 和 R_{NFE} 分别为 DFRA 的等效噪声指数和 EDFA 的噪声指数, h 为普朗克常数, ν 为光频, G_R 和 G'_E 为增益, 系统的总增益 $G = G_R G'_E$ 。

若 EDFA 单独放大时增益 $G = G_E$, 则噪声功率谱密度为

$$\rho_{\text{ASEE}} = 10^{R_{\text{NFE}}/10}(G - 1)h\nu. \quad (8)$$

利用关系 $G = G_R G'_E$, $R_{\text{NEF}} < R_{\text{NFE}}$, $1/G_R \ll 1$ 和 (7), (8) 式估计混合放大和单独放大的噪声功率谱

密度比值为

$$\frac{\rho_{\text{ASE(R+E)}}}{\rho_{\text{ASEE}}} = \frac{10^{R_{\text{NEF}}/10}}{10^{R_{\text{NFE}}/10}} + \frac{1}{G_R} < 1. \quad (9)$$

由(9)式可知, 混合放大对 ρ_{ASE} 有一定改善, 由此可减小前置放大器引入的相位噪声 $\delta\varphi_{N_{\text{sp}}}$ 和 $\delta\varphi_{N_{\text{ss}}}$ 。噪声的具体改善情况将在第3节结合实验参数进行计算, 并通过实验进行验证。

2.3 相干双重瑞利散射

在采用窄线宽光源的光纤水听器系统中, 远程传输的 DRS 光通过多光束干涉带来噪声。若将该干涉等效为一个长度为 $L_{\text{eff}}/2$, 反射率 $R \ll 1$ 的弱 F-P 干涉仪 (FPI)^[8], 则远程传输光 P_{out} 改变为

$$P_{\text{out}} \approx P_{\text{in}} \exp(-\alpha L)(1 - 2R + 2RV_1 \cos \varphi_1), \quad (10)$$

式中 φ_1 和 V_1 分别是 FPI 的等效相位噪声和可见度, 它们与 α, L 等光纤参数有关, 并随外界扰动导致的光纤双折射变化而随机波动。

P_{out} 注入光纤水听器后, 输出干涉光强为

$$P'_{\text{out}} \approx 0.5P_{\text{in}} \exp(-\alpha L)(1 - 2R + 2RV_1 \cos \varphi_1)(1 + V_2 \cos \varphi_2) = 0.5P_{\text{in}} \exp(-\alpha L)[1 - 2R + 2RV_1 \cos \varphi_1 + (1 - 2R)V_2 \cos \varphi_2 + 2RV_1 V_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2], \quad (11)$$

式中 V_2 和 φ_2 分别是迈克耳孙干涉仪 (MI) 的可见度和相位信息。(11)式展开后第3项为 MI 的正常干涉信号项, 第2、4项为 FPI (DRS) 引入的相位噪声项, 则第3项和2、4项的比值分别由 $(1 - 2R)V_2, \varphi_2$ 和 $2RV_1, \varphi_1$ 决定。由于 DRS 光也具有干涉性, 在采用内调制光源的 PGC 技术对光源进行光频调制时, FPI 和 MI 将同时受到调制, 且相应的相位项变为

$$\begin{cases} \varphi_1 = C_{\text{FPI}} \cos \omega_0 t + \varphi_1 \\ \varphi_2 = C_{\text{MI}} \cos \omega_0 t + \varphi_2 \end{cases}, \quad (12)$$

式中 $C_{\text{FPI}} = 2\pi\delta_1 \Delta\nu/c$ 和 $C_{\text{MI}} = 2\pi\delta_2 \Delta\nu/c$ 分别为 FPI 和 MI 的相位调制深度, δ_1 和 δ_2 分别 FPI 和 MI 的光程差 (OPD), ω_0 和 $\Delta\nu$ 分别为光频调制的频率和幅度, c 为真空中光速。

将(12)式代入(11)式, 并取其中第2、3项分别用贝塞尔函数展开为

$$P_2 = P_{\text{in}} \exp(-\alpha L)RV_1 \left\{ \left[J_0(C_{\text{FPI}}) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C_{\text{FPI}}) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos \varphi_1 - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C_{\text{FPI}}) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi_1 \right\}, \quad (13)$$

$$P_3 = P_{\text{in}} \exp(-\alpha L)(0.5 - R)V_2 \left\{ \left[J_0(C_{\text{MI}}) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C_{\text{MI}}) \cos 2k\omega_0 t \right] \cos \varphi_2 - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C_{\text{MI}}) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi_2 \right\}. \quad (14)$$

由(13), (14)式可知, φ_1 和 φ_2 分散到了 ω_0 及其谐波的边频上, 其分散幅度分别由 $J_k(C_{\text{MI}})$ 和 $J_k(C_{\text{FPI}})$ 决定。根据 PGC 解调原理^[13], 当提取 ω_0 和 $2\omega_0$ 的边带进行相位解调时, 与(13), (14)式相关的信噪比与调制前

相比分别变化 $J_1(C_{\text{MI}})/J_1(C_{\text{FPI}})$ 和 $J_2(C_{\text{MI}})/J_2(C_{\text{FPI}})$ 。对于一般的水听器系统, $\delta_2 < 100$ m, $C_{\text{MI}} \sim 2.4$ rad, 因此 $J_1(C_{\text{MI}}) \approx 0.52$, $J_2(C_{\text{MI}}) \approx 0.43$ 。而由于 DSR 具有分布干涉特性, 经 100~200 km 传输后 $\delta_1 \gg 1$,

$C_{FPI} \gg 1$, $|J_1(C_{FPI})|$ 和 $|J_2(C_{FPI})|$ 急剧地振荡衰减至 0.01 以下, 因此可实现信噪比的大幅度提高。同理, 对于(11)式中的第 4 项, PGC 技术也可进行有效抑制。

由以上分析可知, PGC 技术可以分散 DRS 并对其抑制。但是经远程光纤传输且加入高增益前置放大器后, 系统噪声整体提升, PGC 对 DRS 的分散能力需进一步证实。由于 DRS 噪声受外界环境影响存在一定的波动, 同时还与系统中光源线宽、光纤参数、前置光放大器增益及噪声、PGC 解调参数等多种因素有关, 因此 PGC 对 DRS 的抑制效果将在第 3 节通过实验进行验证和评估。

综上, 通过合理设计光纤水听器远程无中继传输系统, 可以有效地抑制非线性噪声, 并大大降低 ASE 及 DRS 噪声。此时系统总的相位噪声可近似表示为

$$\delta\varphi_{\text{total}} = \sqrt{\delta\varphi_{\text{short}}^2 + \delta\varphi_{N_{sp}}^2 + \delta\varphi_{N_{ss}}^2 + \delta\varphi_{\text{DRS}}^2}, \quad (15)$$

式中 $\delta\varphi_{\text{short}}$ 为短程系统的本底噪声, 后 3 项为远程传输系统引入的附加噪声。

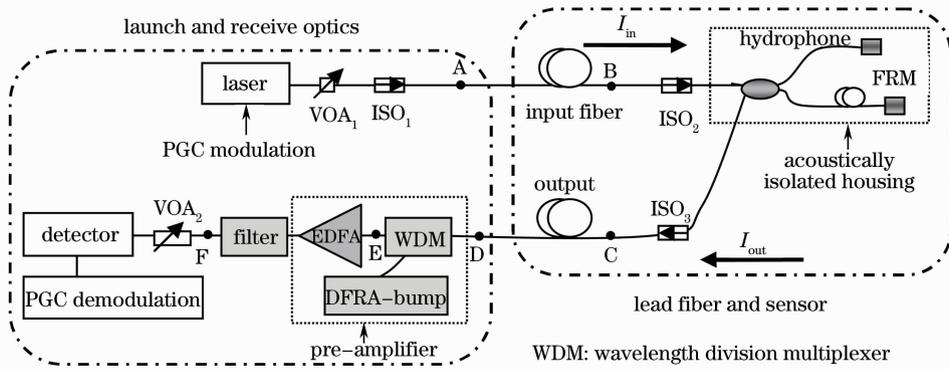


图 1 光纤水听器远程无中继传输系统相位噪声测试原理图

Fig. 1 Setup for testing phase noises in a repeaterless long-haul fiber hydrophone system

前置放大器可采用 EDFA 单独放大及反向 DFRA 和 EDFA 混合放大两种方式。其中 EDFA 采用 980 nm 半导体激光器抽运, 调节抽运激光器功率可使光放大的增益发生变化, R_{NFE} 的典型值为 5 dB; DFRA 采用 1450 nm 半导体激光器抽运, 抽运功率为 1.2 W, 反向传输的抽运光进入返回光纤后, 通过返回光纤的受激拉曼效应对返回光进行分布放大。 G_R 和 R_{NFR} 的典型值为分别为 10 dB 和 -1 dB。由于不同光放大的增益不同, 输出功率也会存在差异, 因此调节 VOA_2 可使不同测试过程进入探测器的光功率一致, 保证不同放大器在同一信号功率水平上进行比较。探测器带宽 B_c 约 300 kHz, 模/数(A/D)采样率 f_s 为 256 kHz, 则噪声混叠因

3 实验及结果分析

搭建图 1 所示光纤水听器无中继传输系统, 对系统的相位噪声抑制效果进行测试。实验采用中心波长为 1550 nm、线宽为 5 kHz 的分布反馈(DFB)激光器^[14], 调节光衰减器(VOA_1)可使注入远程光纤的光功率在 2 mW 以下。激光器加 32 kHz 频率调制, 在水听器中引入 2.4 rad 的相位差。 VOA_1 输出接隔离器(ISO_1)以防止远程光纤中瑞利散射光返回激光器影响其稳定性。传输光纤往返最长各 100 km, 均为 G. 652 单模光纤, 损耗为 0.19 dB/km。水听器由 OPD 为 1 m 的 MI 构成, 两臂接法拉第旋镜(FRM)以消除偏振衰落^[2]。水听器输入、输出端分别接 ISO_2 和 ISO_3 , 防止往返光纤中反向传输的单次瑞利散射通过 FRM 端面反射入正向传输的信号光中, 隔离器及水听器总损耗为 5 dB。水听器置于水声屏蔽罐中以屏蔽外界声信号。远程传输的返回光经前置光放大后由 100 GHz 的窄带滤波器滤除大量的 ASE 光。

子 $D \approx 2$ 。另外如未特殊说明, 系统的相位解调方案均采用 PGC 调制解调。

为得到水听器远程系统中各种噪声随传输距离变化的规律, 将光纤总长分别设置为 100、150、200 km, 即保持输入光纤 100 km 不变, 改变图 1 中 C、D 间光纤长度依次为 0、50、100 km, 测得返回 D 点的光功率依次为 -21.1、-30.9、-40.5 dBm, 经增益依次为 10、19、28 dB 的光放大后, F 点的功率均可达到约 60 μ W 的探测器最佳工作范围。针对这 3 种长度及相应的返回功率, 进行不同光放大及解调方案下 $\delta\varphi_{ASE}$ 和 $\delta\varphi_{DRS}$ 的分离及对比测试, 结果如图 2~4 所示。同时图 2~4 中还给出了未加光放大时短程传输系统的本底噪声 $\delta\varphi_{\text{short}}$ 以进行对比。为

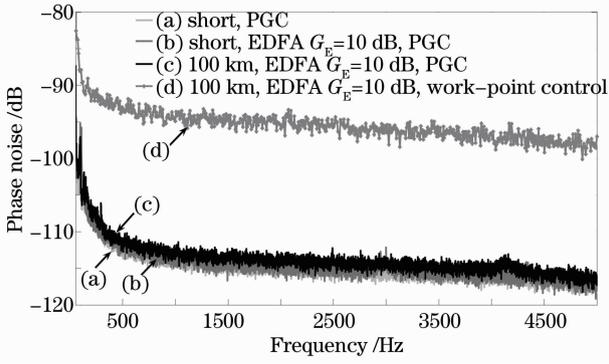


图 2 100 km 传输 EDFA 单独放大的光纤水听器系统相位噪声

Fig. 2 Phase noise results in a fiber hydrophone system with 100 km lead fiber and EDFA

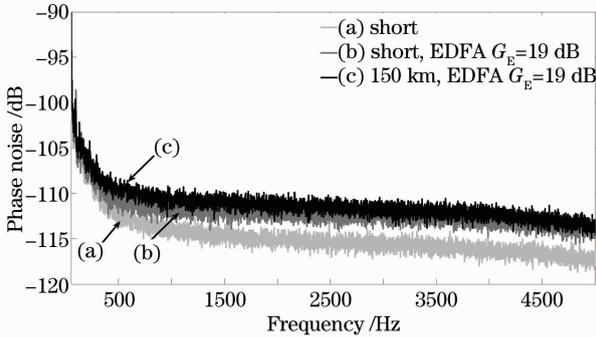


图 3 150 km 传输 EDFA 单独放大的光纤水听器系统相位噪声

Fig. 3 Phase noise results in a fiber hydrophone system with 150 km lead fiber and EDFA

消除环境扰动对噪声测试的影响,每组测试取 40 次平均作为测试结果。

图 2 为 100 km 传输系统的噪声对比测试结果,纵坐标单位 $0 \text{ dB}=1 \text{ rad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。其中图 2(a)为短程系统本底噪声,在 1 kHz 处约为 -114 dB ,300 Hz 以下噪声的增大主要由光源及外界环境噪声产生。图 2(b)为短程传输加衰减模拟 100 km 传输损耗(D 点返回功率为 -21.1 dBm),EDFA 单独放大且 $G_E=10 \text{ dB}$ 时系

表 1 在 1 kHz 处不同衰减及 EDFA 增益时水听器相位噪声仿真与测试值

Table 1 Simulated and test results of phase noises in hydrophone systems with different G_E and system attenuations at 1 kHz

System	P_0/dBm	G_E/dB	R_{NFE}/dB	$\delta\varphi_{N_{sp}}/\text{dB}$	$\delta\varphi_{N_{ss}}/\text{dB}$	$\delta\varphi_{ASE}/\text{dB}$	$\delta\varphi_{total}/\text{dB}$	$\delta\varphi_{test-B}/\text{dB}$
Fig. 2(b)	-21.1	10	5	-127.2	-153.5	-127.2	-113.8	-113.9
Fig. 3(b)	-30.9	19	5	-117.0	-133.0	-116.9	-112.2	-112.0
Fig. 4(b)	-40.5	28	6	-106.4	-110.9	-105.1	-104.8	-104.5

表 1 所示的 3 种情况中,仿真值 $\delta\varphi_{total}$ 与实验测试值 $\delta\varphi_{test-B}$ 基本一致,由此验证了理论分析的可行性。在 $G_E=28 \text{ dB}$ 时,由于 P_0 低于 EDFA 的最佳工作范围, $R_{NFE}=6 \text{ dB}$ 为估计值,可能由此导致了

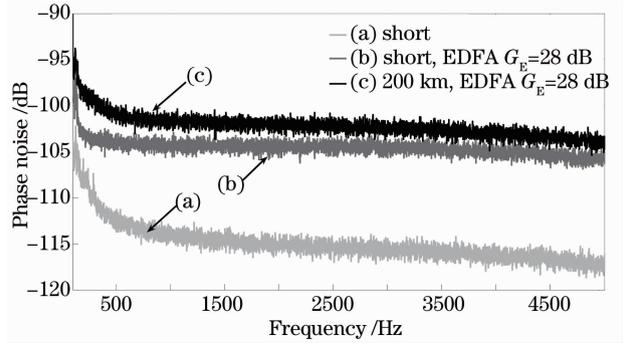


图 4 200 km 传输 EDFA 单独放大的光纤水听器系统相位噪声

Fig. 4 Phase noise results in a fiber hydrophone system with 200 km lead fiber and EDFA

统的相位噪声。由图可知,此时 EDFA 并未带来明显噪声。图 2(c)、(d)分别为加入了 100 km 光纤传输且 $G_E=10 \text{ dB}$ 时,使用 PGC 和工作点控制^[15]方法分别获得的系统噪声。由于工作点控制得到的是未加 DRS 抑制时系统的噪声水平,比较图 2(c)、(d)可得,PGC 方案实现了近 19 dB 的 DRS 噪声抑制。同时经噪声抑制后,100 km 传输系统的相位噪声已降至约 -113.2 dB (即 $2.2 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$),与短程系统噪声基本相当。

图 3(b)、4(b)分别为短程传输加衰减模拟 150 km 和 200 km 传输损耗(D 点返回功率为 -30.9 dBm 及 -40.5 dBm), G_E 为 19 dB 和 28 dB 时系统的相位噪声,此时相对短程系统[图 3(a)]增加的噪声主要由 EDFA 引入。综合比较图 2(b)、图 3(b)、图 4(b)可知,随着 G_E 的增大,1 kHz 处噪声的测试值 $\delta\varphi_{test-B}$ 依次增至 -113.9 dB 、 -112.0 dB 、 -104.5 dB 。将图 2(b)、图 3(b)、图 4(b)的实验参数代入(4)式和(5)式,计算在 1 kHz 处不同系统的 $\delta\varphi_{N_{sp}}$ 及 $\delta\varphi_{N_{ss}}$,并令(15)式中 $\delta\varphi_{DRS}=0$, $\delta\varphi_{short}=-114 \text{ dB}$,可以得到系统噪声的仿真值 $\delta\varphi_{total}$ 。将 $\delta\varphi_{total}$ 与测试值 $\delta\varphi_{test-B}$ 进行比较的结果如表 1 所示。

$\delta\varphi_{total}$ 与 $\delta\varphi_{test-B}$ 之间 0.3 dB 的偏差。另外,在 $G_E=10 \text{ dB}$ 和 19 dB 时, $\delta\varphi_{ASE}$ 均较低,EDFA 单独放大基本可以满足系统低噪声要求。而 $G_E=28 \text{ dB}$ 时 $\delta\varphi_{ASE}$ 已经成为系统的主要噪声。

在得到不同系统的 EDFA 噪声后,加入 150 km ($G_E=19$ dB 系统)和 200 km($G_E=28$ dB 系统)远程传输光纤进行噪声测试,此时的附加噪声由 $\delta\varphi_{N_{sp}}$ 、 $\delta\varphi_{N_{ss}}$ 和 $\delta\varphi_{DRS}$ 共同产生,结果如图 3(c)和图 4(c)所示。综合比较图 2~4 中的曲线(b)、(c)可得,随着传输距离的增加,1 kHz 处噪声的测试值 $\delta\varphi_{test-C}$ 依次增至 -113.2 dB、 -110.6 dB、 -101.8 dB,并且 $\delta\varphi_{test-C}$ 与 $\delta\varphi_{test-B}$ 的差异逐渐加大。由于 $\delta\varphi_{test-C}$ 相比 $\delta\varphi_{test-B}$ 增加的噪声主要由远程光纤的 $\delta\varphi_{DRS}$ 带来,由此可得 PGC 对 $\delta\varphi_{DRS}$ 的抑制略有下降。令 $\delta\varphi_{test-C} \approx \delta\varphi_{total}$,由(15)式和表 1 的 $\delta\varphi_{N_{sp}}$ 和 $\delta\varphi_{N_{ss}}$ 结果,可计算出 100、150、200 km 传输时,1 kHz 处残留的 $\delta\varphi_{DRS}$ 分别为 -122.1 dB、 -115.7 dB、 -105.1 dB。将 $\delta\varphi_{DRS}$ 与 $\delta\varphi_{short}$ (-114 dB)比较可知,在 100 km 和 150 km 系统中 $\delta\varphi_{DRS}$ 并不明显;当距离增至 200 km 时,残留的 $\delta\varphi_{DRS}$ 已高于本底噪声,它和 $\delta\varphi_{ASE}$ 一起成为了系统主要的噪声源。其原因为随着传输距离增加,DRS 和 EDFA 噪声都有明显提高,系统信噪比变差,PGC 通过分散 DRS 噪声对其进行抑制的效果逐渐减弱。

另外,在 200 km 传输返回光极弱的情况下,EDFA 单独放大($G_E=28$ dB)时 $\delta\varphi_{ASE}$ 已经成为系统的主要噪声,因此加入 DFRA 和 EDFA 的混合放大对前置放大器噪声进行抑制。其中 $G_R=10$ dB、 $G'_E=18$ dB,系统总增益 28 dB 不变。则系统噪声相

比 200 km 传输 EDFA 单独放大时的变化情况如图 5 所示。

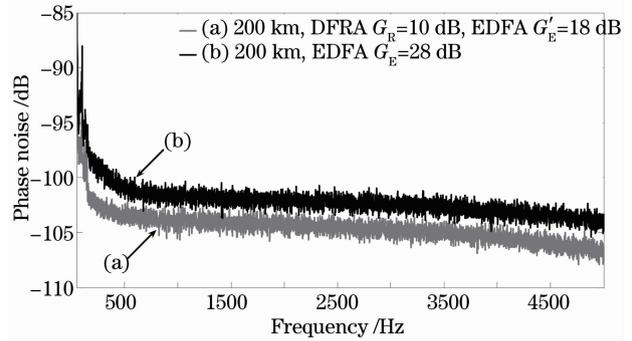


图 5 200 km 传输不同前置光放大的光纤水听器系统相位噪声

Fig. 5 Phase noise results in fiber hydrophone systems with 200 km lead fiber and different pre-amplifiers

图 5(a)为 200 km 传输 DFRA 和 EDFA 混合放大的相位噪声,相比 EDFA 单独放大时[图 5(b)]的噪声有明显改善,在 1 kHz 处噪声降低约 2.2 dB。同样地将图 5(a)参数代入(4)、(5)式可以计算出混合放大引入的相位噪声 $\delta\varphi_{N_{sp}}$ 、 $\delta\varphi_{N_{ss}}$ 。由于传输光纤超长且 DFRA 增益较小,忽略 DFRA 导致的 DRS 变化,令混合放大系统的 $\delta\varphi_{DRS}$ 与 EDFA 单独放大时一致,即 $\delta\varphi_{DRS}=-105.1$ dB,则通过(15)式可得到混合放大系统的总噪声理论值 $\delta\varphi_{total}$,它与图 5(a)在 1 kHz 处的测试值 $\delta\varphi_{test-A}$ 对比如表 2 所示。

表 2 在 1 kHz 处 200 km 传输混合放大的水听器系统相位噪声仿真与测试值

Table 2 Simulated and test results of phase noises in a hydrophone system with 200 km lead fiber and DFRA/EDFA hybrid-amplifier at 1 kHz

Pre-amplifier	$\delta\varphi_{N_{sp}}/dB$	$\delta\varphi_{N_{ss}}/dB$	$\delta\varphi_{ASE}/dB$	$\delta\varphi_{DRS}/dB$	$\delta\varphi_{short}/dB$	$\delta\varphi_{total}/dB$	$\delta\varphi_{test-A}/dB$
DFRA+EDFA	-112.6	-124.3	-112.3	-105.1	-114	-103.9	-104.0

表 2 中,混合放大系统噪声的计算值 $\delta\varphi_{total}$ 与测试值 $\delta\varphi_{test-A}$ 基本一致。同时比较表 2 与表 1[图 4(b)]结果可知,相比 EDFA 单独放大,混合放大的 $\delta\varphi_{N_{sp}}$ 降低了 6.2 dB, $\delta\varphi_{N_{ss}}$ 降低了 13.4 dB,总的 $\delta\varphi_{ASE}$ 降低了 7.2 dB,此时的系统噪声主要由 PGC 解调未能完全抑制的 DRS 产生。因此理论和实验结果均证明,在弱光放大的高增益情况下,加入 DFRA 可有效抑制光放大噪声。

4 结 论

研究了对于干涉型光纤水听器远程无中继传输系统的相位噪声,采用控制注入光功率以抑制 SBS、DFRA 和 EDFA 混合放大降低前置放大器噪声以

及 PGC 调制解调分散 DRS 噪声等方案对噪声进行了综合抑制。最终使 100 km 传输系统的噪声水平与短程系统基本相当,200 km 传输系统的噪声降至 -104 dB(即 $6.3 \mu rad/Hz^{1/2}$)。论文的研究结果为光纤水听器远程无中继传输系统的方案设计提供了理论及实验依据。

参 考 文 献

- G. A. Cranch, P. J. Nash. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 19~30
- C. K. Kirdendall, A. Dandridge. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, 37(18): R197~R216
- S. H. Wang, C. C. Fan. Noise performance analysis of bi-directionally pumped distributed fiber Raman amplifiers with

- consideration of fiber nonlinearity and its impact on EDFA output OSNR [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**(3-6): 355~360
- 4 J. H. Huh, Y. M. Chang, L. S. Yan *et al.*. Performance comparison of Raman/erbium-doped-fiber hybrid-amplification-based long-distance fiber Bragg grating sensor systems [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(3): 348~355
- 5 P. Wan, J. Conrad. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(3): 288~297
- 6 Cui Sheng, Ma Xiaoming, Liu Jinsong. Impact of double Rayleigh scattering induced multiple-path interference on noise figure of fiber Raman amplifiers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 835~838
崔 晟, 马晓明, 刘劲松. 双重瑞利散射导致的多路干涉噪声对光纤喇曼放大器噪声系数的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 835~838
- 7 Wang Keyan, Meng Zhou. Effects of distributed fiber Raman amplifier on noise characteristics in long-distance fiber optic hydrophone [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1990~1995
王科研, 孟 洲. 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[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1990~1995
- 8 G. A. Cranch, A. Dandridge, C. K. Kirkendall. Suppression of double Rayleigh scattering-induced excess noise in remotely interrogated fiber-optic interferometric sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11): 1582~1584
- 9 Cao Chunyan, Hu Zhengliang, Xiong Shuidong *et al.*. Suppression of Rayleigh scattering induced coherent noise in remotely interrogated fiber-optic hydrophones [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1005005
曹春燕, 胡正良, 熊水东等. 光纤水听器远程传输中相干瑞利噪声的抑制[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1005005
- 10 W. Chen, Z. Meng, H. J. Zhou *et al.*. Stimulated Brillouin scattering-induced phase noise in an interferometric fiber sensing system [J]. *Chin. Phys. B*, 2012, **21**(3): 034212
- 11 D. M. Baney, P. Gallion, R. S. Tucker. Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, **6**(2): 122~154
- 12 S. Yamashita, T. Okoshi. Suppression of beat noise from optical amplifiers using coherent receivers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(6): 1029~1035
- 13 N. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1982, **30**(10): 1635~1641
- 14 Cao Chunyan, Yao Qiong, Rao Wei *et al.*. Linewidth measurement using unbalanced fiber-optic interferometer for narrow linewidth lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508005
曹春燕, 姚 琼, 饶 伟等. 窄线宽激光器线宽的非平衡光纤干涉仪测量法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508005
- 15 Ni Ming, Zhang Renhe, Hu Yongming *et al.*. Implement of controlling the working point of an interferometric fiber-optic hydrophone by closed loop and pick-up of the signal [J]. *Applied Acoustics*, 2001, **20**(6): 13~18
倪 明, 张仁和, 胡永明等. 干涉型光纤水听器闭环工作点控制的实现与信号的获取[J]. *应用声学*, 2001, **20**(6): 13~18

栏目编辑: 王晓琰