

光纤水听器无电中继远程解调系统噪声优化

汪樟海, 张 红, 王 巍, 李东明, 葛辉良

杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 光纤水听器无电中继远程解调系统的噪声主要来源于放大自发辐射(ASE)噪声和双重瑞利散射(DRS)噪声。为了优化系统噪声并提升系统的性能,通过噪声拟合方法实验分离了 ASE 噪声和 DRS 噪声对系统相位噪声的影响。结果表明 ASE 噪声是实验系统的主要噪声源,但 DRS 噪声也会成为降低系统相位噪声的限制因素。理论分析并实验验证了光源相位调制方案对两种噪声源的抑制效果,通过铌酸锂相位调制器对 100 km 远程解调系统的光源施加幅度为 2.2 rad、频率为 40 MHz 的正弦相位调制,ASE 噪声功率下降了 5.2 dB,DRS 噪声功率下降了 6.2 dB,系统总相位噪声下降了 5.2 dB。

关键词 光纤光学; 噪声优化; 相位调制; 放大自发辐射噪声; 双重瑞利散射噪声

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1106006

Noise Optimization of Repeaterless Remote Demodulation Systems of Fiber-Optic Hydrophone

Wang Zhanghai, Zhang Hong, Wang Wei, Li Dongming, Ge Huiliang

Hangzhou Institute of Applied Acoustics, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract The noise of repeaterless remote demodulation systems of fiber-optic hydrophone primarily comes from amplified spontaneous emission (ASE) noise and double Rayleigh scattering (DRS) noise. To optimize the noise and improve the performance of the system, the effects of ASE noise and DRS noise on phase noise of the system are separated experimentally by noise fitting. The results show that the ASE noise is the main noise source of the experimental system, while DRS noise also is the limiting factor of the phase noise reduction. The noise suppression effects of the illuminant phase modulation scheme on both ASE noise and DRS noise are theoretically analyzed and experimentally confirmed. Experimental results show that the total phase noise of 100 km remote demodulation system is suppressed by 5.2 dB when the sinusoidal phase modulation with amplitude of 2.2 rad and frequency of 40 MHz is applied by lithium niobate phase modulator, while ASE noise power is reduced by 5.2 dB and DRS noise power is reduced by 6.2 dB.

Key words fiber optics; noise optimization; phase modulation; amplified spontaneous emission noise; double Rayleigh scattering noise

OCIS codes 060.2310; 060.2320; 060.2370

1 引 言

光纤水听器通过高灵敏度的光学探头将声压信号转化为光学可探测信息。常见的干涉式光纤水听器主要基于声压对干涉仪两臂的调制将声压信号转换为光学相位信息,并通过光学相干检测方法恢复所探测的声压信号^[1-3]。光纤水听器阵列远程解调系统通过光缆连接光收发解调模块与探测阵列,能解调几十甚至数百千米外的探测阵列并传输返回的光学干涉信号,实现水声信号的远程探测^[4]。通过光学放大手段可以补偿远程传输光纤的本征损耗,当光纤远程传输损耗在可接受的范围内时,应用分布式光纤拉曼放大器可实现无电中继传输,从而简化传输光缆的设计^[5-6]。为了扩大光纤水听器阵列的探测范围,需要尽可能降低光纤

收稿日期: 2017-05-26; 收到修改稿日期: 2017-06-06

基金项目: 声纳科技重点实验室基金(P140C2401080802)

作者简介: 汪樟海(1989—),男,博士,工程师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: wang_zhanghai@163.com

水听器解调相位的噪声功率。在采用分布式光纤拉曼放大器的无电中继远程解调系统中,主要的噪声源是放大自发辐射(ASE)噪声^[7]和双重瑞利散射(DRS)噪声^[8-9]。ASE光与信号光之间的随机拍频在光电探测端表现为光学强度噪声,通过相位解调过程将光学强度噪声转化为解调相位噪声。增加光学放大器的输入光功率能有效减小ASE噪声的影响,但受制于激光在光纤中传输的各种非线性效应,如受激布里渊散射(SBS),传输链路的光功率不能超过各种非线性效应的阈值,这限制了ASE噪声的进一步优化。DRS噪声源于长距离传输光纤中产生的DRS光与信号光之间的随机拍频,在光电探测端也表现为探测光强的随机波动。本文将光纤水听器100 km无电中继远程解调系统的两种噪声源进行分离,通过对光源施加相位调制,降低了ASE噪声和DRS噪声的影响,实现了远程解调系统的噪声优化。本文第2部分对实验系统设置和主要噪声源进行了分析,第3部分通过理论和实验分析了光源相位调制对两种噪声源的抑制作用。

2 系统设置与噪声源分析

2.1 系统设置

100 km 远程解调实验系统设置如图 1 所示。光源为 RIO 公司生产的超窄线宽激光,线宽小于 3 kHz。采用铌酸锂直波导相位调制器对光源输出进行相位调制,不施加相位调制信号时相位调制器表现为固定损耗的光学衰减器(VOA)。声光调制器(AOM)产生时分复用所需的高消光比脉冲信号光,将脉冲信号光传输至马赫-曾德尔干涉仪。干涉仪的一臂为延迟光纤环,另一臂上的一段光纤缠绕在压电陶瓷(PZT)环上以施加相位生成载波调制解调所需的载波信号。由于延迟光纤环引入的时延大于 AOM 产生的脉冲宽度,故单脉冲信号经过干涉仪后成为双脉冲信号。掺铒光纤放大器 1(EDFA1)补偿各器件的光学损耗,并保证下行 100 km 光纤传输所需的高光功率。下行和上行的 100 km 光纤均为普通的单模光纤。由 VOA2、隔离器(ISO)和迈克耳孙干涉式水听器组成的模拟水听器阵列可模拟具有一定插入损耗的光纤水听器阵列,迈克耳孙干涉仪的臂长差与马赫-曾德尔干涉仪的臂长差一致。EDFA2 为前置放大器,可对光电探测前的光信号进行光学放大。系统采用分布式后向拉曼放大器对阵列返回的微弱光信号进行光学放大,上行 100 km 既可用于传输光信号,也可作为拉曼放大增益介质。解调器接收探测器返回的光电脉冲信号,并从中解调出相位信息。

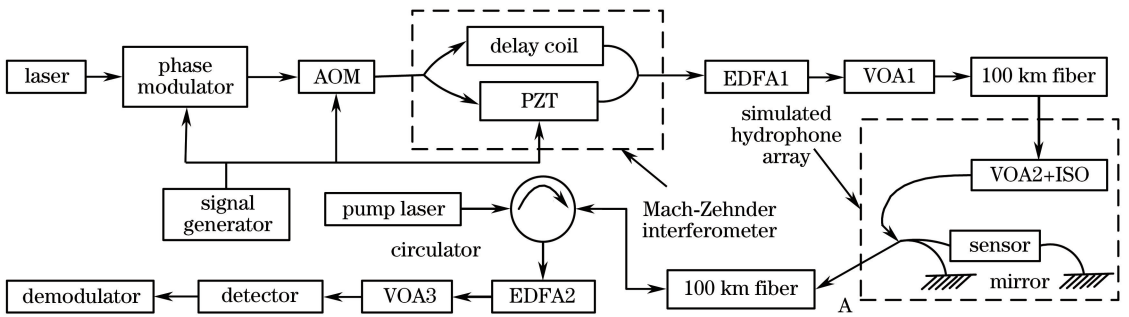


图 1 100 km 远程解调系统示意图

Fig. 1 Schematic of 100 km remote demodulation system

2.2 噪声源分析

EDFA1 输出信号光经过下行、上行 100 km 传输和阵列插入损耗后,若无后向拉曼放大,上行 100 km 光纤的输出光功率将低于 EDFA2 正常工作所需的输入光功率。采用后向拉曼放大器对上行 100 km 光纤传输的微弱光信号进行放大后,光纤放大器自身的 ASE 光导致光学信噪比恶化,ASE 光与信号光之间的拍频使得强度噪声显著增强。ASE 光与信号光拍频导致的相对强度噪声(RIN)功率谱密度为^[10]

$$D_{\text{sig_ASE}} = \frac{2\rho_{\text{ASE}}}{P_s}, \quad (1)$$

式中 ρ_{ASE} 为 ASE 光功率谱密度, P_s 为信号光功率。可见,提高信号光功率是减小 ASE 噪声影响的主要手段,对于图 1 所示的系统而言,需要尽可能提高下行 100 km 光纤的输入光功率,以减小 ASE 噪声的影响。

然而,对于下行 100 km 光纤而言,窄线宽激光的传输功率受到 SBS 非线性效应的限制,传输光纤的最大输入光功率总是被限制在 SBS 阈值以内。

实验测量了受 SBS 阈值限制时远程解调系统的相位噪声,如图 2(a)中红色实线所示。此时下行 100 km 光纤的输入平均光功率约为 5.5 dBm,经过下行 100 km 光纤和模拟阵列的插入损耗后,上行 100 km 光纤输入即拉曼放大器输入(图 1 中 A 点)的光功率 $P_A = -35.6$ dBm。铌酸锂相位调制器未对输入信号施加调制信号。噪声测试结果的低频部分受实验室环境的影响较大,为了客观评价系统自身的噪声水平,以 1 kHz 频率附近 ± 100 Hz 范围内(即 900~1100 Hz 之间)的噪声功率谱密度均值评价系统噪声,此时的噪声功率谱密度为 -90.3 dB/Hz。由于拉曼放大器 ASE 导致的相位噪声功率与放大器输入光功率 P_A 成反比,而 DRS 噪声导致的相位噪声功率不随 P_A 变化,当系统的主要噪声源为 ASE 噪声和 DRS 噪声时,系统相位噪声功率谱密度 D_{phase} 可以表示为 P_A 的函数,即 $D_{\text{phase}} = D_{\text{phase_ASE}} + D_{\text{phase_DRS}} = k_{\text{ASE}}/P_A + k_{\text{DRS}}$,其中 $D_{\text{phase_ASE}}$ 和 $D_{\text{phase_DRS}}$ 分别为 ASE 噪声和 DRS 噪声的功率谱密度, k_{ASE} 和 k_{DRS} 为常系数。测量一组不同 P_A 对应的系统相位噪声功率 D_{phase} ,通过最小二乘拟合得到系数 k_{ASE} 和 k_{DRS} ,即可计算得到不同输入光功率 P_A 对应的 $D_{\text{phase_ASE}}$ 和 $D_{\text{phase_DRS}}$ 。由于 P_A 受到下行 100 km 光纤 SBS 阈值的限制,当 P_A 大于 -35.6 dBm 时,去除下行 100 km 光纤并用相同损耗的光纤衰减器替代。噪声测试和拟合结果如图 2(b)所示,此时可以计算得到不同 P_A 输入时两种噪声源对系统总相位噪声的贡献,并实现两种噪声源的分离。根据拟合结果计算得到的 $D_{\text{phase_ASE}}$ 和 $D_{\text{phase_DRS}}$ 如表 1 所示。

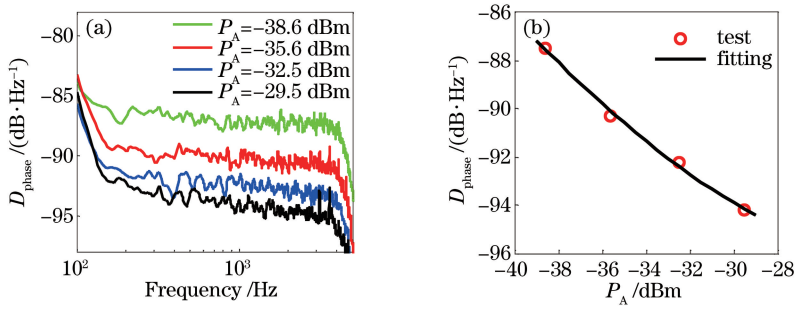


图 2 不同拉曼放大器的输入光功率对应的相位噪声功率谱密度。(a)测试结果;(b)噪声拟合
Fig. 2 Phase noise power spectral density at different input optical powers of Raman amplifier.

(a) Test results; (b) noise fitting

表 1 不同拉曼放大器输入光功率对应的相位噪声功率谱密度测试和拟合结果

Table 1 Test and fitting results of phase noise power spectral density at different input optical powers of Raman amplifier

P_A /dBm	Test $D_{\text{phase}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$	Fitting $D_{\text{phase}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$	$D_{\text{phase_ASE}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$	$D_{\text{phase_DRS}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$
-38.6	-87.5	-87.5	-88.0	-97.2
-35.6	-90.3	-90.1	-91.0	-97.2
-32.5	-92.2	-92.4	-94.1	-97.2
-29.5	-94.2	-94.2	-97.1	-97.2

从表 1 中的数据可见,当下行光功率受限于 SBS 阈值($P_A = -35.6$ dBm)时, $D_{\text{phase_ASE}}$ 和 $D_{\text{phase_DRS}}$ 的拟合结果分别为 -91.0 dB/Hz 和 -97.2 dB/Hz,此时 ASE 噪声是系统的主要噪声源。通过提高 P_A 可减小 ASE 噪声的影响,从而可有效降低系统整体的噪声水平。但当 P_A 增大至 -29.5 dBm 时, $D_{\text{phase_ASE}}$ 和 $D_{\text{phase_DRS}}$ 分别为 -97.1 dB/Hz 和 -97.2 dB/Hz,两者对系统噪声的贡献相当,此时需对 DRS 噪声进行优化,才能进一步降低系统整体的噪声水平。

3 光源相位调制与系统噪声优化

3.1 光源相位调制与 SBS 阈值提高

对振幅为 E_0 、频率为 ω_0 的激光光源[电场强度 $E = E_0 \exp(j\omega_0 t)$]施加 $\phi(t)$ [$\phi(t) = A_m \cos(\omega_m t)$] 的相位调制后,相位调制输出为

$$E_{out} = E_0 \exp\{j[\omega_0 t + A_m \cos(\omega_m t)]\} = E_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(A_m) \exp\{j(\omega_0 + 2k\omega_m)t\} + E_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(A_m) \exp\{j[\omega_0 t + (2k+1)\omega_m t + \pi/2]\}, \quad (2)$$

式中 A_m 为相位调制幅度, ω_m 为相位调制频率, $J_k(A_m)$ 为自变量 A_m 的 k 阶贝塞尔函数(k 为整数)。由(2)式可以看出,原输入光谱出现光谱分裂现象,各个光谱分量的中心频率为 $\omega_0 + k\omega_m$, 对应的光功率为 $|E_0|^2 J_k^2(A_m)$ 。当输入光源的线宽远小于 ω_m 时,调制输出光谱表现为多波长激光光源的叠加,如图 3(a)所示。图 3(a)中 $A_m = 2.2$ rad,横坐标 k 表示频率为 $\omega_0 + k\omega_m$ 的激光光谱分量,纵坐标 $J_k^2(A_m)$ 表示输出光谱分量相对于输入光的归一化光功率。SBS 阈值提升比例由最大功率子光谱的归一化功率决定,子光谱 SBS 增益带宽不重合时的阈值提升比例为

$$R = 1/\max[J_k^2(A_m)]. \quad (3)$$

按文献[11]的方法通过实验测量了不同相位调制幅度对应的 SBS 阈值提升比例,如图 3(b)所示,此时相位调制频率为 40 MHz。图中曲线为按(3)式计算得到的理论值,可见实际测得的阈值提升比例与理论值相符。当相位调制幅度为 2.2 rad 时,SBS 阈值提升了约 5.2 dB。较高的 SBS 阈值对应较高的光纤传输光功率和拉曼放大器输入光功率,从而减小 ASE 噪声的影响。

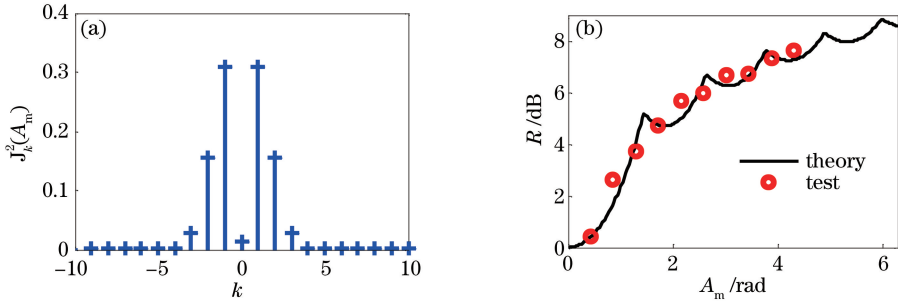


图 3 (a) 相位调制输出光谱;(b)SBS 阈值提升比例

Fig. 3 (a) Output spectrum with phase modulation; (b) SBS threshold promotion ratio

3.2 光源相位调制与 DRS 噪声抑制

由于系统采用相干性极好的超窄线宽激光源,远程传输光纤中的 DRS 光会与信号光发生干涉,将光源相位噪声转化为强度噪声,使得 DRS 噪声成为远程光纤传输系统的一种基本噪声源。在分布式光纤拉曼放大过程中,DRS 光经历了往返两次放大,其影响较无源远程传输过程更为显著^[12]。根据前人的研究,DRS 光与信号光干涉导致的相对强度噪声^[13]为

$$D_{DRS}(f) \propto \mathcal{F}[\langle R_{edir}(\tau)R_{edir}^*(\tau) \rangle], \quad (4)$$

式中 R_{edir} 为直接传输光的归一化自相关函数, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。若直接传输光的归一化光谱为 $S(\nu)$,根据 Wiener-Khinchin 定理, $\mathcal{F}[\langle R_{edir}(\tau) \rangle] = S(\nu)$,则由傅里叶变换的基本性质可得

$$D_{DRS}(f) \propto \mathcal{F}[\langle R_{edir}(\tau)R_{edir}^*(\tau) \rangle] = \int_0^{\infty} S(\nu)S(\nu+f)d\nu. \quad (5)$$

根据(2)式,利用铌酸锂相位调制器对光源施加高频 ω_m ,得到归一化光谱 $S(\nu) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k^2(A_m)S(\nu + k\omega_m)$ 。将 $S(\nu)$ 代入(5)式,若 ω_m 远大于激光器线宽,则在远低于 ω_m 的频域区间,调制后 DRS 导致的 RIN 功率与调制前相比,其抑制比为

$$R_{DRS} = D'_{DRS}/D_{DRS} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k^4(A_m), \quad (6)$$

其大小仅与 A_m 有关。绘制 DRS 所致 RIN 功率抑制比随 A_m 的变化曲线如图 4(a)所示,噪声抑制效果随着 A_m 的增大逐渐增强,当 A_m 为 2.2 rad 时,RIN 功率抑制比约为 -6.2 dB。在图 1 所示的系统中去除下行 100 km 光纤以消除 SBS 效应的影响,调节 VOA1 使 P_A 为 -29.5 dBm,同时给铌酸锂相位调制器施加幅度

为 2.2 rad、频率为 40 MHz 的正弦相位调制信号,测量此时光电探测器输出的 RIN,并与无相位调制的情形进行对比,结果如图 4(b)所示。低频区间的主要噪声源为 DRS 噪声,施加相位调制后 RIN 明显下降。高频区间受 ASE 噪声等其他噪声源的影响,两条曲线之间的差值逐渐减小,在 100 kHz 以上区间则基本重合。两条曲线在 10 kHz 附近±1 kHz 频率范围内差值的均值为 6.1 dB,与理论分析结果(6.2 dB)基本一致,即通过铌酸锂相位调制器施加相位调制后,DRS 导致 RIN 减小,其通过解调过程导致的相位噪声同比例下降。

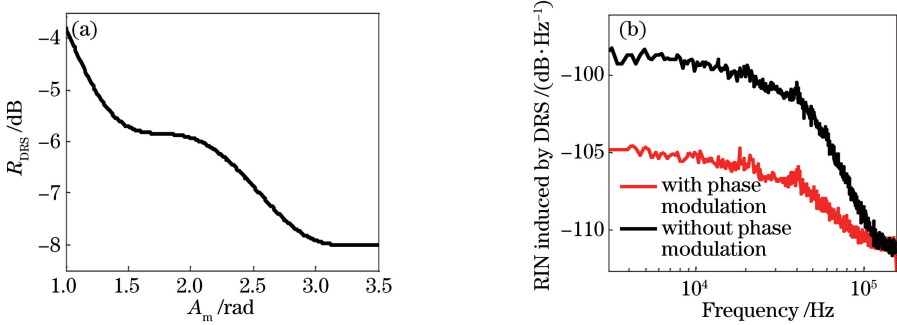


图 4 相位调制与 DRS 所致 RIN 功率抑制。(a)理论值;(b)实验结果

Fig. 4 RIN power suppression induced by DRS and phase modulation. (a) Theoretical result; (b) test results

3.3 光源相位调制与远程解调系统噪声优化

根据上述分析,光源相位调制方案对远程解调系统的两种主要噪声源(ASE 噪声和 DRS 噪声)均具有良好的抑制效果。施加相位调制可提高传输光纤的 SBS 阈值和远程传输的光功率,从而减小 ASE 噪声的影响。当 ASE 噪声被抑制、DRS 成为系统的主要噪声源时,光源相位调制方案对 DRS 噪声的抑制作用将进一步优化远程解调系统的相位噪声。

对于图 1 所示的实验系统,保留下行 100 km 光纤,以模拟实际的 100 km 远程解调系统。通过铌酸锂相位调制器施加幅度为 2.2 rad、频率为 40 MHz 的正弦相位调制信号。此时由于 SBS 阈值的提高,拉曼放大器的输入光功率 P_A 可达 -30.4 dBm,较无光源相位调制时(-35.6 dBm)提高了 5.2 dBm。对比在有无光源相位调制条件下解调器解调得到系统的信号输出或相位噪声测试结果如图 5 和表 2 所示。由图 5(a)可见,铌酸锂相位调制器对传输信号施加相位调制信号后,1 kHz 频率附近的相位噪声功率谱密度从 -90.3 dB/Hz 下降至 -95.5 dB/Hz,下降了 5.2 dB/Hz。结合表 2 和第 2.2 节的噪声拟合结果,对相位调制对 ASE 噪声和 DRS 噪声的影响进行分析,分析结果表明:拉曼放大器的输入光功率提高了 5.2 dB,ASE 噪声功率谱密度从 -91.0 dB/Hz 降至 -96.2 dB/Hz,下降了 5.2 dB/Hz;相位调制幅度为 2.2 rad 时 DRS 噪声的抑制比为 6.2 dB,DRS 噪声功率谱密度从 -97.2 dB/Hz 降至 -103.8 dB/Hz。两种噪声功率叠加后,系统的相位噪声功率谱密度为 -95.4 dB/Hz,与实际测量结果(-95.5 dB/Hz)基本一致。光源相位调制对两种噪声源的抑制共同优化了系统相位噪声,若 DRS 噪声未能得到有效抑制,DRS 噪声功率谱密度(-97.2 dB/Hz)接近 SBS 阈值提升后的 ASE 噪声功率谱密度(-96.2 dB/Hz),限制了系统总相位噪声的

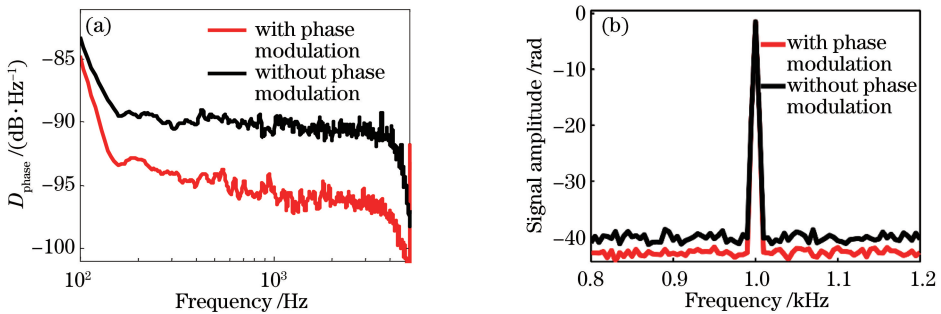


图 5 铌酸锂相位调制器施加相位调制前后的测试结果。(a)相位噪声功率谱密度;(b)信号幅度

Fig. 5 Test results when lithium niobate phase modulator is with and without phase modulation.

(a) Phase noise power spectral density; (b) signal amplitude

优化效果。为了观察铌酸锂相位调制器施加的相位调制信号对信号解调的影响,将信号发生器产生的峰峰值为 1 V 的正弦电压信号加载至马赫-曾德尔干涉仪中的 PZT 环上,相当于在干涉系统中引入了一定幅度的正弦相位变化,可用于模拟声信号输入。实验测量了光源相位调制前后对此相位信号的解调结果,如图 5(b)所示,可见光源相位调制方案对信号解调结果并无明显影响。

表 2 施加相位调制前后的相位噪声功率谱密度测试结果和噪声源分析

Table 2 Test results of phase noise power spectral density with and without phase modulation and analysis of noise sources

Condition	P_A/dBm	Test $D_{\text{phase}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$	Fitting $D_{\text{phase}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$	$D_{\text{phase_ASE}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$	$D_{\text{phase_DRS}}/(\text{dB}\cdot\text{Hz}^{-1})$
Without phase modulation	-35.6	-90.3	-90.1	-91.0	-97.2
With phase modulation	-30.4	-95.5	-95.4	-96.2	-103.4

4 结 论

对光纤水听器无电中继 100 km 远程解调系统的噪声进行了分析,结果表明:由于下行 100 km 光纤的传输功率受限于 SBS 效应,光纤链路传输功率较低,系统的主要噪声源为拉曼放大器的 ASE 噪声;当拉曼放大器的输入光功率逐渐升高时,DRS 噪声对系统总相位噪声的贡献逐渐增大,可能成为系统的另一主要噪声源。通过在光源输出端增加铌酸锂相位调制器,进行光学相位调制,可有效提高远程传输光纤的 SBS 阈值、增大传输光功率,从而可抑制 ASE 噪声。同时,光源相位调制能有效减小拉曼放大器中传输信号的 DRS 噪声,使其不会成为限制远程解调系统的主要相位噪声源。通过对 100 km 远程解调系统的光源施加幅度为 2.2 rad、频率为 40 MHz 的正弦相位调制信号,实验获得了 5.2 dB 的相位噪声优化效果,有效地增大了光纤水听器阵列的探测范围。

参 考 文 献

- [1] Zhang Renhe, Ni Ming. Principle and applications of the fiber optic hydrophone[J]. Physics, 2004, 33(7): 503-507. 张仁和,倪明. 光纤水听器的原理与应用[J]. 物理, 2004, 33(7): 503-507.
- [2] Tang Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan, *et al.* Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line arrays[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0505005. 唐波,黄俊斌,顾宏灿,等. 应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505005.
- [3] Gao Kan, Wu Bingyan, Zhang Guilin, *et al.* An optical fiber hydrophone used to detect noise in transformer[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1210003. 高侃,吴晷炎,张桂林,等. 一种用于变压器内部噪声测量的光纤水听器[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1210003.
- [4] Austin E, Zhang Q, Alam S, *et al.* 500 km remote interrogation of optical sensor arrays[C]. SPIE, 2011, 7753: 77532M.
- [5] Cao Chunyan, Xiong Shuidong, Hu Zhengliang, *et al.* Noise analysis of repeaterless long-haul fiber optic hydrophone systems with the fiber length up to 200 km[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406006. 曹春燕,熊水东,胡正良,等. 光纤水听器 200 km 无中继传输系统噪声研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406006.
- [6] 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.
- [7] Baney D M, Gallion P, Tucker R S. Theory and measurement techniques for the noise figure of optical amplifiers[J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(2): 122-154.
- [8] Gysel P, Staubi R K. Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(4): 561-567.
- [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] Olsson N A. Lightwave systems with optical amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(7): 1071-1082.
- [11] Chen Wei. Influences and suppression techniques of nonlinear effects on long-haul interferometric fiber sensing systems

[D]. Changsha, National University of Defense Technology, 2013.

陈伟. 远程干涉型光纤传感系统非线性效应影响及其抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

- [12] Lewis S A E, Chernikov S V, Taylor J R. Characterization of double Rayleigh scatter noise in Raman amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(5): 528-530.
- [13] Wan P, Conradi J. Impact of double Rayleigh backscatter noise on digital and analog fiber systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(3): 288-297.