

doi:10.3788/gzxb20184708.0806001

泵浦激光器弛豫振荡噪声对光纤激光水听器的影响

郝歌扬¹, 吴国俊^{1,2}, 刘博¹, 吕沛¹, 王皓¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266237)

摘 要:对采用相位生成载波解调的光纤激光水听器系统中 3 kHz 附近频域内固有噪声的产生机理进行了理论推导,并设计实验进行验证.首先测量得到泵浦激光器的弛豫振荡频率峰值,随后以 400 Hz 为间隔逐渐降低相位生成载波信号频率,观察固有噪声峰值的移动方向和大小.实验结果表明,随着载波信号频率的降低,固有噪声峰也向低频方向移动,移动间隔同样为 400 Hz.可知相位生成载波解调算法中高频载波调制信号与泵浦激光器的弛豫振荡频率叠加是形成探测频谱固有噪声的主要原因.通过降低高频载波调制信号频率的方法对弛豫振荡噪声进行抑制,消除了探测频谱中的固有噪声峰,得到了较为平坦的本底噪声谱.

关键词:光纤光学;光纤激光水听器;分布反馈光纤激光器;相位生成载波;弛豫振荡

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0806001-7

Influences of Relaxation Oscillation Noise of Pump Laser on Fiber Laser Hydrophones

HAO Ge-yang¹, WU Guo-jun^{1,2}, LIU Bo¹, LÜ Pei¹, WANG Hao¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266237, China)

Abstract: In phase generation carrier demodulation of fiber laser hydrophone, the physical mechanism of inherent noise near 3 kHz is analyzed theoretically and proved by an experiment. The relaxation oscillation peak of pump laser is measured firstly, and the carrier signal frequency is gradually reduced at an interval of 400 Hz to observe the movement direction and magnitude of the inherent noise peak. The experimental results show that with the decrease of the carrier signal, the inherent noise peak moves to the low frequency direction, and the movement interval is also 400 Hz. Therefore, it is considered that carrier signal superimposed with the relaxation oscillation noise of pump laser is the cause of the inherent noise. Finally, the inherent noise is suppressed and a relatively flat background noise spectrum is obtained through reducing the carrier signal frequency of phase generation carrier demodulation algorithm.

Key words: Fiber optics; Fiber laser hydrophone; Distributed feedback fiber laser; Phase generated carrier; Relaxation oscillation

OCIS Codes: 060.2370; 060.3510; 140.3490; 140.3570

0 引言

分布反馈(Distributed Feedback, DFB)光纤激光水听器是近年来新兴的一种光纤水听器形式,与传统的干涉式光纤水听器相比,灵敏度更高、尺寸更小、复用难度更低,在水下目标探测方面具有广泛的应用前

基金项目:青岛海洋科学与技术国家实验室主任基金(No. SNLM201714),青岛海洋科学与技术国家实验室问海计划(No. 2017WHZZB0603),国家自然科学基金(No. 61405244)资助

第一作者:郝歌扬(1991—),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为水下光学与光纤光学. Email:haogeyang@opt.cn

收稿日期:2018-03-09; **录用日期:**2018-05-15

<http://www.photon.ac.cn>

景^[1-4]. 光纤激光水听器采用 980 nm 的半导体激光器进行泵浦, 以掺杂光纤光栅形成的激光谐振腔作为声敏感元件, 配合非平衡解调干涉仪和相关算法进行信号解算. 由于非平衡解调干涉仪等无源光纤器件本身并不引入噪声, 因此认为光纤激光水听器系统内的光学噪声主要来源于光纤激光器和泵浦激光器的强度噪声^[5-6]和频率噪声^[7-8].

弛豫振荡噪声属于强度噪声的一种, 该噪声会通过非平衡解调干涉仪转化为相位噪声, 使光纤激光水听器的本底噪声升高, 探测能力降低. 在采用 3×3 耦合器解调算法的光纤激光水听器系统中, 通过在求导运算之前增加一次开方运算便可消除弛豫振荡噪声的影响^[9]. 相比于 3×3 耦合器解调算法, 相位生成载波 (Phase Generated Carrier, PGC) 解调算法的工程实现难度更低, 特别是在大规模光纤水听器阵列中, 其所需的光电转换和 A/D 采样通道数更少, 能够大幅度节省硬件资源和系统功耗. 但在 PGC 解调算法中, 非平衡干涉仪所施加的调制信号与泵浦激光器的弛豫振荡频率属于同一频段^[10-11], 这两个频率分量会发生叠加并产生新的噪声分量, 对该噪声的抑制更加困难. 本文从 PGC 解调算法的原理入手, 详细分析频率叠加对水听器系统探测频带的影响, 并通过调整高频载波信号频率的方法对该噪声进行了抑制.

1 基本原理

光纤激光水听器与传统的干涉式光纤水听器的最大差别在于, 其声敏元件为 DFB 光纤激光器, 声压作用直接引起激光器输出波长的变化^[12]. 随后通过解调系统中设置的解调干涉仪, 将激光器波长的变化转化为相位的变化, 进而利用相关解调算法等方法完成对声信号的解调.

PGC 解调算法的基本思想是在干涉信号中加入一个高频载波, 并将经过高频载波调制后的干涉信号分解为两路, 使用一定的信号处理方法获得相位信息, 其算法原理如图 1.

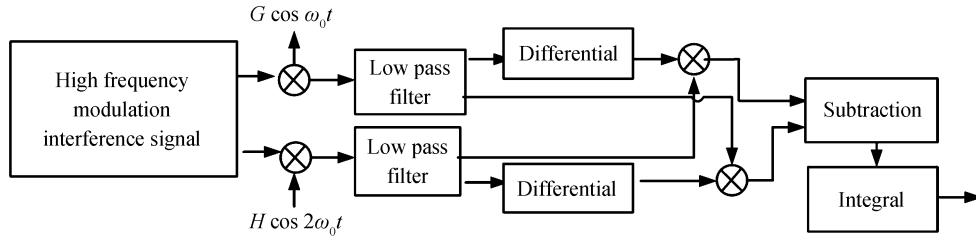


图 1 PGC 解调算法原理

Fig.1 Principle of PGC demodulation algorithm

理想情况下, 经过高频载波信号调制的干涉信号可以表示为

$$I = A + B \cos(C \cos \omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi) \quad (1)$$

式中, A 、 B 为与输入光功率和探测器的响应成正比的常量, C 为调制度, ω_0 表示载波信号的频率, φ_0 表示初始相位, $\Delta\varphi$ 表示带有声波信息的相位变化.

当考虑激光器弛豫振荡的影响时, B 值则不能被认为是一个常数, 而是一个受到弛豫振荡频率和幅值影响的复杂函数. 若假设弛豫振荡是一个中心频率为 ω_r 、幅值为 K_B 的单频余弦信号, 则 B 可以表示为激光器强度噪声对光纤水听器相位载波解调的影响^[13], 即

$$B = B_0 (1 + K_B \cos \omega_r t) \quad (2)$$

则此时光纤干涉仪输出的信号可以表示为

$$I(t) = A + B_0 (1 + K_B \cos \omega_r t) \cos(C \cos \omega_0 t + \varphi) \quad (3)$$

将式(3)用 Bessel 函数展开, 即

$$I = A + B_0 (1 + K_B \cos \omega_r t) \left\{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \varphi - 2 \left[\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos \cdot (2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi \right\} + B_0 K_B \left\{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \varphi - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos \cdot (2k+1)\omega_0 t \right] \sin \varphi \right\} + B_0 K_B \left\{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \omega_r t \cos \varphi - \right.$$

$$2\left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t\right] \cos\omega_r t \sin\varphi \} \quad (4)$$

将弛豫振荡所引入的噪声项记为 I_{RIN} , 即

$$I_{\text{RIN}} = B_0 K_B \{ J_0(C) \cos\omega_r t \cos\varphi + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) [\cos(2k\omega_0 + \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 - \omega_r)t] \cdot \cos\varphi - \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) [\cos(2k\omega_0 + \omega_0 + \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 + \omega_0 - \omega_r)t] \sin\varphi \} \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 当存在弛豫振荡噪声时, 干涉信号中不仅含有频率为调制频率 ω_0 的信号, 还含有频率为 $2k\omega_0 \pm \omega_r$ 和频率为 $(2k+1)\omega_0 \pm \omega_r$ 的噪声信号. 这些噪声信号也会与一倍载波和二倍载波信号相乘, 然后经过低通滤波器进行滤波处理. 当这些噪声信号的频率在低通滤波器的通带范围之内时, 将无法被滤波器滤除. 而 PGC 解调中后续的微分、交叉相乘等步骤只是起提取信号的作用, 对信号中混杂的噪声并没有消除作用, 因此这些噪声频率最终将混杂在解调后的信号中, 在水听器可探测的频谱范围内形成固有的噪声峰, 使真实信号的波形发生畸变, 频率变得难以区分.

2 实验验证

2.1 泵浦激光器弛豫振荡频率的测量

为了确定泵浦激光器弛豫振荡噪声对光纤激光水听器系统的影响, 首先需要对系统所选用的泵浦激光器的弛豫振荡频率进行精确测量, 系统所选用的泵浦激光器为深圳伽蓝特公司的 980 nm 半导体激光器. 弛豫振荡噪声属于强度噪声的一种, 对于激光强度噪声的测量方法主要有直接测量法、互谱测量法和基于 PC 机的数字测量法^[14-15]. 结合实验室现有条件, 选择采用基于 PC 机的数字测量法进行弛豫振荡频率的测量.

测量系统中, 数据采集卡采用美国 NI 公司的 USB-6356, 单通道最高采样率为 1 MHz, 分辨率为 16 bits, 输出电压范围为 $\pm 10\text{V}$; 光电转换器选用北京敏光科技有限公司的 LSIPD-LD50 钢镓砷 PIN 光电探测器, 暗电流为 5 pA, 响应频率为 3 GHz, 转换效率为 0.9 mA/mW@1550 nm.

测试中, 设置数据采集卡的采样率为 1 MHz, 采样时间为 2 s, 根据奈奎斯特采样定律, 该系统能够对频率范围为 0~500 kHz 以内的信号频率进行分析, 频谱分辨率为 0.5 Hz, 满足泵浦激光器弛豫振荡频率为几 kHz 至几十 kHz 的测量要求. 在测试前, 首先在信号放大电路和光电二极管通电的情况下, 使用数据采集卡对系统的本底噪声进行测量. 根据多次重复测量结果取均值, 系统的本底噪声约为 -107.2 dB, 整个频谱范围内无明显噪声峰, 测量结果如图 2.

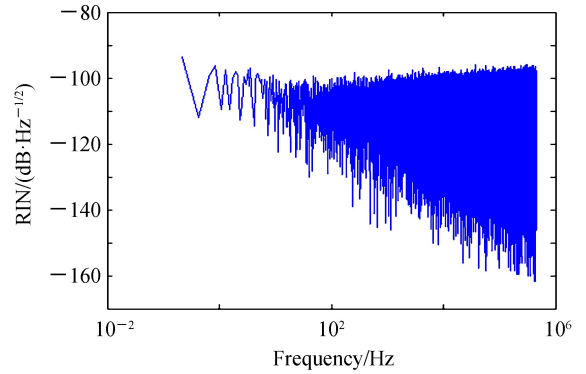


图2 光电二极管及信号放大电路本底噪声频谱
Fig.2 Background noise spectrum of photodiode and amplifying circuit

随后, 以 50 mW 为间隔, 分别对泵浦功率在 0~300 mW 范围内变化时泵浦激光器自身的强度噪声和采用该激光器对 DFB 光纤激光器进行泵浦时的强度噪声进行测试, 测试结果如图 3.

在图 3(a) 和 (b) 中, 10 kHz 附近总会会出现一个较为明显的噪声峰值, 通过多次测量发现, 在泵浦功率相同的情况下, 该峰值频率不变. 当泵浦功率增加时, 该频率峰值向高频方向移动, 该噪声峰即为泵浦激光器的弛豫振荡频率. 不同泵浦功率与泵浦激光器弛豫振荡频率之间的关系见表 1. 其中, 图 3(b) 中低频强度噪声的升高是由于光纤激光器的 1/f 噪声引起的^[16], 而 100 kHz 附近出现的噪声峰值则是由于 DFB 光纤激光器的弛豫振荡所引起, 这两个噪声不在本文的讨论范畴内, 因此不做过多分析.

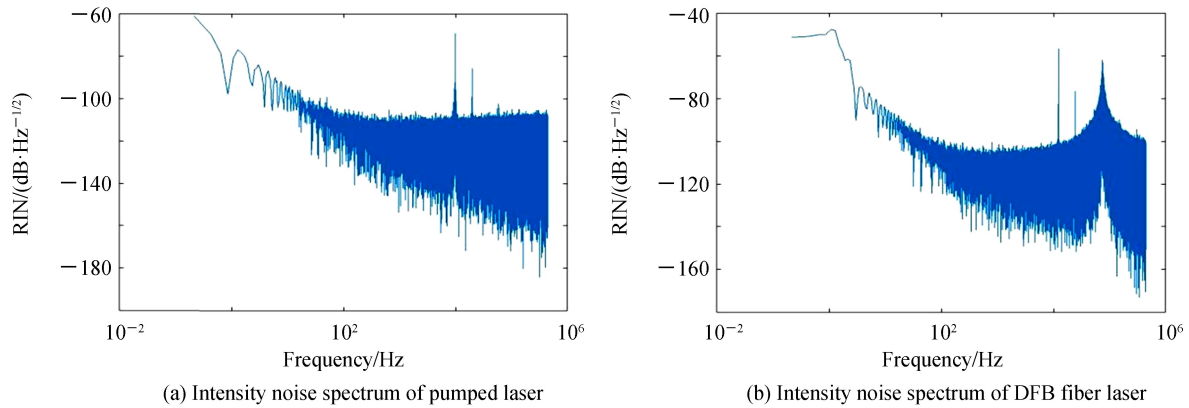


图3 泵浦激光器与DFB光纤激光器强度噪声测试结果
Fig.3 Intensity noise spectrums of pumped laser and DFB fiber laser

表1 泵浦功率与弛豫振荡峰频率之间的关系

Table 1 The relationship between pump power and frequency of relaxation oscillation peaks

Output power of pump laser/mW	Relaxation oscillation peak frequency of pump laser when use pump laser alone/kHz	Relaxation oscillation peak frequency of pump laser when use pump laser and DFB fiber laser together/kHz
50	8.9	9.0
100	9.1	9.3
150	9.4	9.5
200	9.6	9.5
250	9.6	9.6
300	9.7	9.7

2.2 弛豫振荡噪声对光纤激光水听器系统的影响

为了验证泵浦激光器弛豫振荡噪声对光纤激光水听器系统的影响,采用该激光器作为泵浦光源对DFB光纤激光器进行泵浦,通过PGC解调算法进行信号解调.测试过程中使用吸音棉将DFB光纤激光器进行包裹,避免环境噪声对测试结果的影响.实验中设置泵浦激光器的输出功率为200 mW,PGC解调中高频载波信号频率 $\omega_0 = 12.9$ kHz,低通滤波器的阻带截止频率为5 kHz,采样频率为100 kHz,采集时间为2 s,解调结果如图4.

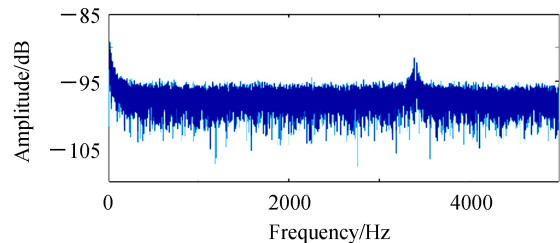


图4 吸音棉包裹后DFB光纤激光器解调频谱
Fig.4 Demodulation spectrum of DFB fiber laser hydrophone with sound deadening coating

由图4可以看出,当DFB光纤激光器被吸音棉包裹隔绝外部干扰后,在3.4 kHz附近仍然出现了峰值.此时,泵浦激光器的弛豫振荡频率 $\omega_r = 9.5$ kHz,满足 $2k\omega_0 \pm \omega_r < 5$ kHz和 $(2k+1)\omega_0 \pm \omega_r < 5$ kHz的频谱分量只有 $\omega_0 - \omega_r = 3.4$ kHz.由此可以看出,泵浦激光器弛豫振荡频率与PGC解调算法中高频载波信号频率的差频形成了新的频率分量,使光纤激光水听器的本底噪声中产生了固有噪声峰,影响真实信号频率的判别.

为了进一步验证泵浦激光器弛豫振荡噪声对系统本底噪声的影响,以400 Hz为步长,逐渐降低高频载波信号的频率,分析系统本底噪声的变化,实验结果如图5.

由图5可以看出,当以400 Hz为间隔逐渐减小高频载波信号的频率时,光纤激光水听器的本底噪声频谱中,泵浦激光器的弛豫振荡频率与PGC解调算法中高频载波信号频率的差频分量 $\omega_0 - \omega_r$ 同样以400 Hz为间隔向低频方向运动.值得注意的是,当高频载波信号频率 $\omega_r < 11.9$ kHz时,本底噪声中出现了多个噪声峰值.这是由于此时 $\omega_0 - \omega_r$ 的差值较小, $\omega_0 - \omega_r$ 的倍频信号频率也进入了低通滤波器的通带以内,形成了更多的固有噪声峰.

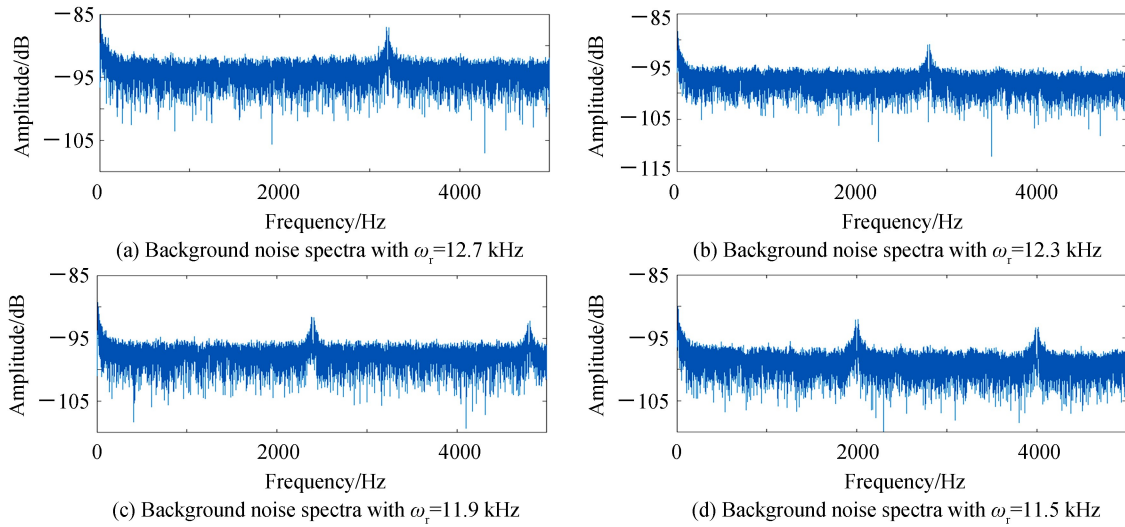


图5 改变高频载波信号频率后的DFB光纤激光水听器系统本底噪声
Fig.5 Background noise spectrums of DFB fiber laser hydrophone with different carrier signals

2.3 噪声抑制方法

泵浦激光器的弛豫振荡噪声与高频载波信号会发生相互叠加,形成一系列差频或和频信号,这些频谱分量落入低通滤波器的通带以内,是造成光纤激光水听器本底噪声谱中固有噪声峰的主要原因.因此,当泵浦激光器的弛豫振荡频率与高频载波信号频率叠加产生的频谱分量位于低通滤波器的通带以外时,这些频谱分量将被滤除,不会对光纤激光水听器的本底噪声产生影响,即应满足

$$\begin{cases} |k\omega_0 \pm \omega_r| > f_{\text{stop}} \\ |(2k+1)\omega_0 \pm \omega_r| > f_{\text{stop}} \end{cases} \quad (k=1,2,3\cdots) \quad (6)$$

式中, f_{stop} 表示 PGC 算法中低通滤波器的阻带截止频率.

根据分析,将调制频率降低至 6.1 kHz,并设置低通滤波器的阻带截止频率 $f_{\text{stop}} = 2.3$ kHz,采样频率和采集时间不变,系统本底噪声和光纤激光水听器对不同频率水声信号的解调结果如图 6.

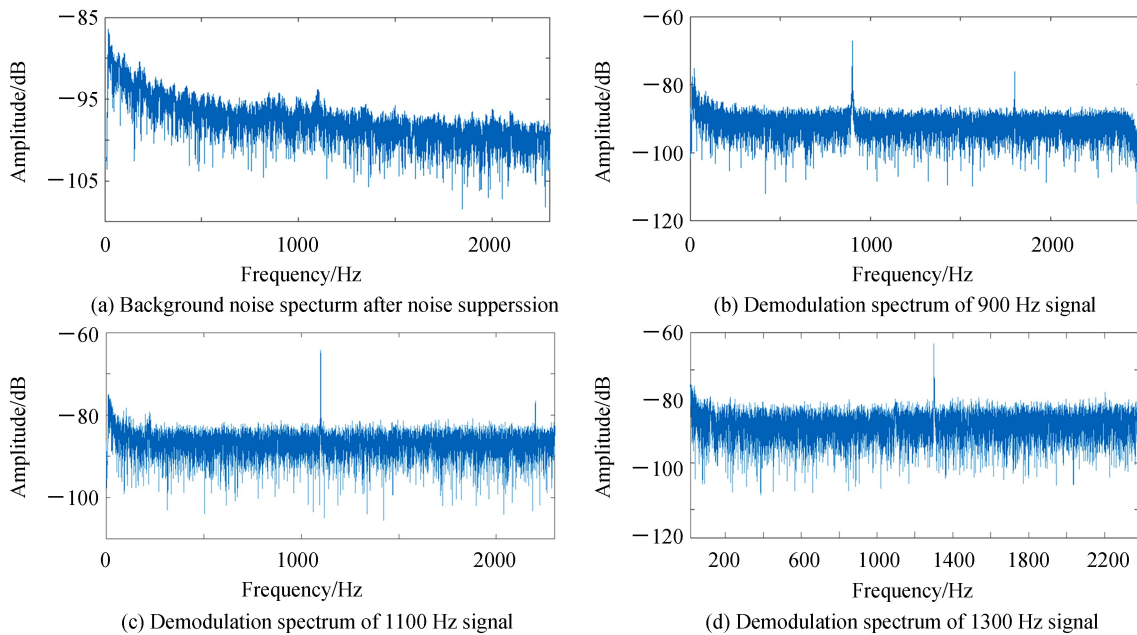


图6 经噪声抑制后的本底噪声及对不同频率信号的解调频谱
Fig.6 Background noise spectrum after noise suppression and demodulation spectrums of different signals

此时, $|\omega_0 - \omega_r| = 3.4 \text{ kHz} > 2.3 \text{ kHz}$ 、 $|2\omega_0 - \omega_r| = 2.7 \text{ kHz} > 2.3 \text{ kHz}$ 、 $|3\omega_0 - \omega_r| = 8.8 \text{ kHz} > 2.3 \text{ kHz}$, 泵浦激光器的弛豫振荡频率与高频载波信号频率叠加产生的频谱分量均位于低通滤波器的通带以外, 因此得到了较为平坦的本底噪声, 消除了固有噪声峰. 此时, 光纤激光水听器对不同频率水声信号的解调频谱中只含有水声信号及其倍频的频率, 无其他明显的噪声峰值, 能够清晰地分辨水声信号频率的大小和幅值.

值得注意的是, 泵浦激光器的弛豫振荡频率与 PGC 解调系统中高频载波信号相互叠加会产生新的频谱分量, 这些频谱分量进入低通滤波器的通带, 是造成弛豫振荡噪声的主要原因. 通过适当降低或升高调制频率, 扩大泵浦激光器弛豫振荡频率与高频载波信号频率之间的差值, 均能完成对噪声的抑制作用. 降低调制频率虽然能够抑制泵浦激光器的弛豫振荡噪声, 但也意味着系统的有效探测频带和动态范围将会被压缩, 系统对大幅值信号的探测能力下降. 以本系统为例, 光纤激光水听器的声压灵敏度约为 $-1 \times 10^{-7} \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ ($-140 \text{ dB re rad}/\mu\text{Pa}$), 等效噪声压(动态范围下限)约为 $1.55 \times 10^{-5} \text{ rad re Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$. 当调制频率为 12.9 kHz 时, 系统的动态范围上限为 5.45 rad , 动态范围为 110.9 dB ; 当调制频率降至 6.1 kHz 时, 动态范围上限降低至 2.05 rad , 则此时的动态范围为 102.4 dB , 即动态范围降低了约 8.5 dB .

升高调制频率虽然在抑制噪声的同时能够提高系统的探测频带和动态范围, 但也需要相应提高数据采集系统的采样频率, 增加了硬件成本和实现难度. 因此, 在对泵浦激光器的弛豫振荡噪声进行抑制时, 需要根据实际系统的探测频带、动态范围等具体指标要求, 以及可实现的最大采样频率、系统功耗和成本等实际情况进行综合考虑, 确定最佳的高频载波调制频率.

3 结论

本文从 PGC 解调的原理入手, 对光纤激光水听器系统弛豫振荡噪声的产生机理进行了详细的理论推导, 并通过实验进行了验证. 实验结果表明, 高频载波信号频率会与泵浦激光器的弛豫振荡频率相互叠加产生新的频谱分量, 在光纤激光水听器的本底噪声谱中形成固有噪声峰值, 严重影响真实信号的判别. 通过降低高频载波调制信号频率的方法对弛豫振荡噪声进行了抑制, 消除了探测频谱中的固有噪声峰, 得到了较为平坦的本底噪声谱.

参考文献

- [1] FOSTER S, TIKHOMIROV A, HARRISON J, *et al.* Field demonstration of an 8-element fibre laser hydrophone array [C]. SPIE, 2014, **9157**: 91570H.
- [2] FOSTER S, TIKHOMIROV A, HARRISON J, *et al.* Demonstration of an advanced fibre laser hydrophone array in Gulf St Vincent [C]. SPIE, 2015, **9634**: 96342F.
- [3] LAUNAY F X, BOUFFARON R, LARDAT R, *et al.* Acoustic antenna based on Fiber laser hydrophones [C]. SPIE, 2014, **9157**: 91570Y.
- [4] GU Hong-can, HUANG Jun-bin, YU Hua-bing, *et al.* A 4-element fiber laser hydrophone towed linear array [C]. SPIE, 2014, **9297**: 92972Y.
- [5] CRANCH G A, ENGLUND M A, KIRKENDALL C K. Intensity noise characteristics of erbium-doped distributed-feedback fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(12):1579-1586.
- [6] FOSTER S, TIKHOMIROVA, MILNES M. Fundamental thermal noise in distributed feedback fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **46**(5):378-384.
- [7] FOSTER S, TIKHOMIROV A. Pump-noise contribution to frequency noise and linewidth of distributed-feedback fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **43**(5):734-741.
- [8] HORAK P, VOO N Y, IBSEN M, *et al.* Pump-noise-induced linewidth contributions in distributed feedback fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**(9):998-1000.
- [9] MAO Xin, HUANG Jun-bin, GU Hong-can. Effect of relaxation oscillation on digital demodulation of 3×3 couplers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(10):1010001.
毛欣, 黄俊斌, 顾红灿. 弛豫振荡对 3×3 耦合器数字解调的影响 [J]. 中国激光, 2017, **44**(10):1010001.
- [10] LIU Hai-tao, CHEN Jian-ping, CHEN Xiang-fei, *et al.* Fabrication of distributed feedback bragg fiber laser on regular Er-doped fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(7):873-876.
刘海涛, 陈建平, 陈向飞, 等. 低掺杂铒纤上分布反馈布拉格光纤激光器的制作 [J]. 中国激光, 2006, **33**(7):873-876.
- [11] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理 [M]. 第 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2012:175-176.
- [12] GU Hong-can, HUANG Jun-bin, YUAN Bing-cheng, *et al.* An experimental study on the fiber optic hydrophone array [J]. *Jouranal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(5):612-615.
顾宏灿, 黄俊斌, 苑秉成, 等. 光纤激光水听器阵列实验研究 [J]. 光电子·激光, 2009, **20**(5):612-615.
- [13] LIANG Xun, XIONG Shui-dong, HU Yong-ming, *et al.* Impact of relative intensity noise on fiber optic hydrophone's

- phase generated carrier scheme[J]. *Chinese Journal of 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.
- [14] HU Gui-jun, GUO Yu-bin, LI Xiao-bin, *et al.* Noise measuring methods of semiconductor lasers[J]. *Supporting Technology*, 2001, **26**(1):53-56.
- 胡贵军, 郭玉彬, 李晓滨. 半导体激光器噪声的测量[J]. *支撑技术*, 2001, **26**(1):53-56.
- [15] CAO Jun-sheng, ZHANG Jun, GAO Feng-li, *et al.* Low-frequency noise measurement and parameters extraction for semiconductor lasers[J]. *Applied Laser*, 2014, **34**(4):355-358.
- 曹军胜, 张俊, 郜峰利, 等. 半导体激光器低频噪声测试及参数提取[J]. *应用激光*, 2014, **34**(4):355-358.
- [16] VAN DER ZIEL A. Noise in solid-state devices and lasers[C]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, **58**(8): 1178-1206.

Foundation item: Chairman Foundation of Qingdao National Laboratory Marine Science and Technology (No. QNLM201714), Wenhai Programme of Qingdao National Laboratory Marine Science and Technology (No. 2017WHZZB0603), the National Natural Science Foundation of China (No. 61405244)

引用格式: HAO Ge-yang, WU Guo-jun, LIU Bo, *et al.* Influences of Relaxation Oscillation Noise of Pump Laser on Fiber Laser Hydrophones[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0806001

郝歌扬, 吴国俊, 刘博, 等. 泵浦激光器弛豫振荡噪声对光纤激光水听器的影响[J]. *光子学报*, 2018, **47**(8):0806001