

文章编号: 0258-7025(2008)05-0716-06

激光器强度噪声对光纤水听器相位载波解调的影响

梁 迅 熊水东 胡永明 姚 琼 马丽娜

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 相位载波(PGC)调制解调技术作为光纤水听器主要的检测技术之一,已经应用于许多光纤水听器阵列系统之中,该方案对光源提出了窄线宽、可调谐、低噪声等较高的要求。实验中发现,光源弛豫噪声对系统噪声性能产生了较大的影响。在理论分析光源弛豫噪声对相位载波解调影响的基础上,提出了通过调节抽运功率,控制弛豫振荡中心频率为相位载波调制频率的半倍频的奇数倍,来降低系统解调噪声的方法,实验验证了理论结果,解调噪声由最高的 -86.7 dB减小到 -106 dB。实验进一步采用了光电负反馈方法来抑制弛豫噪声,在弛豫振荡峰处抑制噪声约 25 dB,得到了约 -100 dB的较为平坦的激光器噪声谱级,使得相位载波解调噪声达到 -110 dB,基本满足了光纤水听器系统的要求。

关键词 光纤传感器;相对强度噪声;光电负反馈;光纤水听器;相位载波解调

中图分类号 TN 212.14 **文献标识码** A

Impact of Relative Intensity Noise on Fiber Optic Hydrophone's Phase Generated Carrier Scheme

Liang Xun Xiong Shuidong Hu Yongming Yao Qiong Ma Lina

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

Abstract As one of the main detection schemes, phase generated carrier (PGC) technology has been implied in many fiber optic hydrophone array systems. The scheme requires a narrow bandwidth, tunable and low noise laser source. In practice, the relative intensity noise (RIN) of the laser has affected the system performance greatly. By analyzing the impact of RIN on fiber optic hydrophone's PGC scheme theoretically, it has been found that if the RIN peak frequency can be controlled to odd multiple of one-half of PGC modulation frequency by changing the pump power, the impact of RIN on the system can be greatly reduced. Experiment results have proved that this scheme can lower the PGC noise from -86.7 dB to -106 dB. Furthermore, by using optical-electronic feedback, the RIN has been well suppressed and the relaxation oscillation peak is reduced about 25 dB. The laser noise has become -100 dB and the PGC output noise turned out to be -110 dB. This result has met the need of the fiber optic hydrophone systems.

Key words fiber sensor; relative intensity noise; optoelectronic negative feedback; fiber optic hydrophone; phase generated carrier

1 引 言

相位载波(PGC)调制解调技术作为光纤水听器的主要检测技术之一,获得了广泛的应用^[1,2]。随着光纤水听器向大规模阵列的方向发展和时分、波

分复用技术的广泛采用,不论是相位载波调制解调技术,还是各种复用技术,都要求光源具有窄线宽和良好的噪声特性。

采用自行研制的掺铒光纤环形腔激光器作为光

收稿日期:2007-10-11;收到修改稿日期:2007-11-20

作者简介:梁 迅(1980—),男,河北人,博士研究生,主要从事光学工程、信号处理方面的研究。E-mail:liang428@163.com

导师简介:胡永明(1960—),男,福建人,教授,博士生导师,主要从事光纤信息技术、光纤光栅技术方面的研究。

E-mail:huyongming_nudt@hotmail.com

纤水听器阵列的光源,它利用未被抽运掺铒光纤的饱和吸收,形成了瞬态自写入光栅来进行滤波,可以得到稳定的窄线宽的激光输出^[3~6]。但由于其固有弛豫振荡带来了较大的相对强度噪声(RIN),对水听器系统的相位载波解调产生了较为复杂的影响,使不同光纤水听器解调信号产生同相的伪信号,严重影响了系统的探测性能。因此,深入研究该噪声对系统的影响,进而提出有效的抑制解决方案,成为迫切需要解决的问题。

2 全保偏干涉型光纤水听器相位载波调制解调原理

光纤水听器内调制相位载波调制解调方案已有较多介绍^[1],本文只针对其关键部分进行简要概述。设系统参数 $C = \frac{4\pi nl}{c}\Delta\nu$,其中 n 为纤芯折射率, l 为干涉仪两臂差, c 为真空中光速, $\Delta\nu$ 为最大光源调制时的频移。则干涉仪输出的光信号经光电转换得到电信号为

$$V = A + B\cos[C\cos\omega_0 t + \varphi_s(t) + \varphi_0(t)], \quad (1)$$

式中 A 为直流项, B 为系统参数, φ_s 为信号作用于干涉仪产生的相位差, φ_0 为外界环境影响产生的相位差。设 $\varphi(t) = \varphi_s(t) + \varphi_0(t)$,则

$$V = A + B\cos[C\cos\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (2)$$

将该信号以贝塞耳函数形式展开

$$\begin{aligned} V = & A + B\{[J_0(C) + \\ & 2\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C)\cos 2k\omega_0 t]\cos\varphi(t) - \\ & 2[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C)\cos(2k+1)\omega_0 t]\sin\varphi(t)\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $J_k(C)$ 为第一类 k 阶贝塞耳函数。从(3)式可见,经过调制后的干涉信号包括调制信号频率 ω_0 的零频及 ω_0 和 $2\omega_0$ 的无穷项高次倍频。为减小光强波动对信号检测的影响,一般取 ω_0 和 $2\omega_0$ 项进行检测。将(3)式分别乘以 $G\cos\omega_0 t$ 和 $H\cos 2\omega_0 t$,再经低通滤波后所有含 ω_0 及其倍频项均被滤去,经过微分、交互相乘、相减、积分、高通滤波等操作,最后得到

$$GHB^2 J_1(C)J_2(C)\varphi_s(t), \quad (4)$$

由(4)式除去系统参数 G, H, B, C 的影响,可以得到定标后的声信号 $\varphi_s(t)$ 。

3 强度噪声对相位载波解调的影响

激光器一般存在固有的弛豫振荡,从而带来强

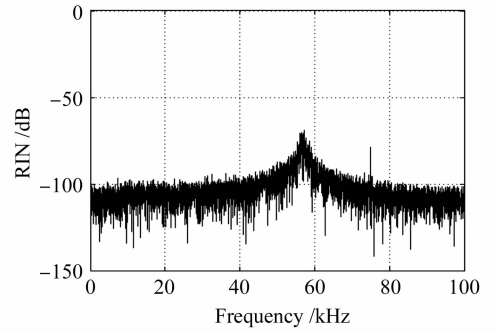


图1 实测光纤激光器强度噪声谱级

度噪声。图1为实测的光纤激光器强度噪声的谱级。如图所示,光纤激光器强度噪声谱级上存在几十千赫兹左右的弛豫噪声峰,并且该噪声峰具有一定的宽度。该噪声直接反映到(1)式中的 B 值上,并会对干涉信号 V 产生比较复杂的影响。为了简化分析,假设 B 值的弛豫峰为单频信号

$$B = B_0(1 + K\cos\omega_r t), \quad (5)$$

其中 B_0 为定值, ω_r 为弛豫振荡的中心频率, $K(K \ll 1)$ 为振荡的幅值参数。一般来说 ω_r 比调制频率 ω_0 要大, ω_r 一般在几十到几百千赫兹,而 ω_0 一般取 10 kHz 左右。影响弛豫振荡频率的因素很多,有抽运功率、腔损、谐振腔有源部分长度、谐振腔总长度等,经过理论仿真及实验,改变上述参数不能从根本上消除弛豫振荡,但会对弛豫振荡的中心频率有一定影响。对于一台固定的光纤激光器,腔损、谐振腔有源部分长度、谐振腔总长度等均为固定值,因此此时其弛豫振荡频率主要受抽运功率的影响。图2为实测光纤环形腔激光器的弛豫噪声中心频率随抽运光强的变化曲线,可以看出该中心频率随着抽运光强的增大而明显增大。

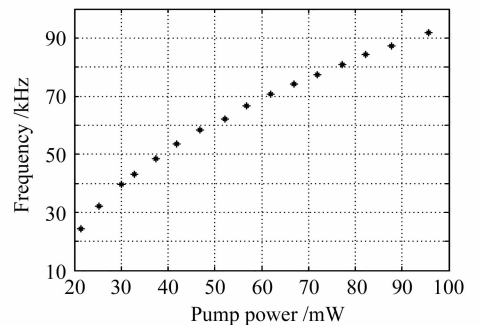


图2 弛豫振荡中心频率随抽运功率的变化

Fig. 2 Relationship between the RIN peak frequency and pump power

这里以(5)式为基础,分析弛豫振荡强度噪声对相位载波解调的影响,根据(3)式,有

$$\begin{aligned}
V = & A + B_0(1 + K \cos \omega_r t) \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \varphi(t) - \\
& 2 [\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t] \sin \varphi(t) \} = \\
& A + B_0 \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \varphi(t) - \\
& 2 [\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t] \sin \varphi(t) \} + \\
& B_0 k \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \omega_r t \cos \varphi(t) - \\
& 2 [\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t] \cos \omega_r t \sin \varphi(t) \}, \tag{6}
\end{aligned}$$

可见, B 值存在 ω_r 的频率信号后, 干涉信号在原来的基础上增加了 V_{rin} 信号

$$\begin{aligned}
V_{\text{rin}} = & B_0 K \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos \omega_r t \cos \varphi(t) - \\
& 2 [\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t] \cos \omega_r t \sin \varphi(t) \} = \\
& B_0 k \{ J_0(C) \cos \omega_r t \cos \varphi(t) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) [\cos(2k\omega_0 + \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 - \omega_r)t] \cos \varphi(t) - \\
& \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) [\cos(2k\omega_0 + \omega_0 + \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 + \omega_0 - \omega_r)t] \sin \varphi(t) \}, \tag{7}
\end{aligned}$$

由(7)式可知, 强度噪声的存在, 在干涉信号本底上形成了一系列噪声峰, 噪声峰的峰值频率取决于 ω_0 的各个倍频 $(2k\omega_0, (2k+1)\omega_0)$ 与 ω_r 的和差关系。在没有声信号 ($\varphi(t)$ 为定值) 的情况下, 干涉信号 V 的谱级(实测)如图 3 和图 4 所示。

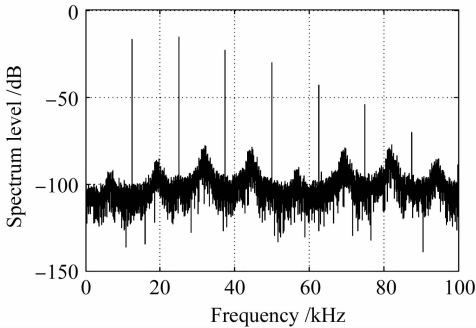


图 3 ω_r 不是 ω_0 倍频时干涉信号谱级

Fig. 3 Interference signal spectrum when ω_r is not multiple of ω_0

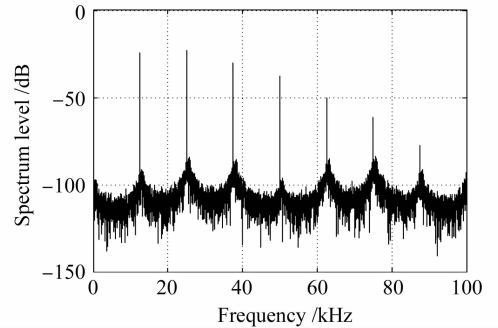


图 4 ω_r 为 ω_0 倍频时干涉信号谱级

Fig. 4 Interference signal spectrum when ω_r is multiple of ω_0

图 3 为 ω_r 不是 ω_0 倍频时的典型情况。图 4 为 ω_r 等于 ω_0 倍频时的情况, 此时一系列的噪声峰与 ω_0 各个倍频重合。根据相位载波下一步的计算, (6) 式将分别乘以 $G \cos \omega_0 t$ 和 $H \cos 2\omega_0 t$, 并进行低通滤波, 则增加的干涉项 V_{rin} 也将进行相同的运算, $V_{\text{rin}} \cdot G \cos \omega_0 t$ 经过积化和差可得

$$\begin{aligned}
V_{\text{rin}} \cdot G \cos \omega_0 t = & GB_0 K \{ J_0(C) \frac{1}{2} \cdot [\cos(\omega_r + \omega_0)t + \cos(\omega_r - \omega_0)t] \cos \varphi(t) + \\
& \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \frac{1}{2} \cdot [\cos(2k\omega_0 + \omega_r + \omega_0)t + \\
& \cos(2k\omega_0 + \omega_r - \omega_0)t + \cos(2k\omega_0 - \omega_r + \omega_0)t +
\end{aligned}$$

$$\cos(2k\omega_0 - \omega_r - \omega_0)t] \cos \varphi(t) - \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \frac{1}{2} \cdot [\cos(2k\omega_0 + 2\omega_0 + \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 + \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 + 2\omega_0 - \omega_r)t + \cos(2k\omega_0 - \omega_r)t] \sin \varphi(t) \}, \quad (8)$$

由此可见, $V_{\text{rin}} \cdot G \cos \omega_0 t$ 由一系列的 ω_0 的倍频 ($(2k+1)\omega_0, (2k-1)\omega_0, (2k+2)\omega_0, 2k\omega_0$) 与 ω_r 的和、差频所组成。同理可得 $V_{\text{rin}} \cdot H \cos 2\omega_0 t$ 也由 ω_0 的倍频与 ω_r 的和、差频所组成。不失一般性, 设 ω_r 在 $4\omega_0$ 到 $5\omega_0$ 之间, 则 $V_{\text{rin}} \cdot G \cos \omega_0 t$ 的较低频项有

$$\frac{1}{2} \cdot GB_0 K \{ [J_4(C) - J_6(C)] \cos(5\omega_0 - \omega_r)t + [J_3(C) - J_5(C)] \cos(\omega_r - 4\omega_0)t \}, \quad (9)$$

而 $V_{\text{rin}} \cdot G \cos 2\omega_0 t$ 的较低频项有

$$\frac{1}{2} \cdot GB_0 K \{ [J_3(C) + J_7(C)] \cos(5\omega_0 - \omega_r)t - [J_2(C) + J_6(C)] \cos(\omega_r - 4\omega_0)t \}, \quad (10)$$

$V_{\text{rin}} \cdot G \cos \omega_0 t$ 和 $V_{\text{rin}} \cdot H \cos 2\omega_0 t$ 的低频部分的频率主要取决于 ω_r 与 $4\omega_0$ 和 $5\omega_0$ 之差。如 ω_r 与 $4\omega_0$ 接近, 则 $\omega_r - 4\omega_0$ 为低频项, 而 $5\omega_0 - \omega_r$ 则为相对高频。经过低通滤波, $5\omega_0 - \omega_r$ 将被大部滤除, 而 $\omega_r - 4\omega_0$ 则仍然存在。相位载波解调中进一步的微分、相乘、相加、积分等操作, 只是起到了提取信号的作用, 对混叠于信号的该噪声并没有消除效果, 因此最终解调的信号中夹杂了 $\omega_r - 4\omega_0$ 频率的噪声。同理, ω_r 接近 $5\omega_0$ 时, 则有 $5\omega_0 - \omega_r$ 频率噪声始终存在。只有当 ω_r 在 4.5 倍左右 ω_0 的情况下, 即 ω_r 等于 ω_0 半倍频的奇数倍左右时, $\omega_r - 4\omega_0$ 和 $5\omega_0 - \omega_r$ 均为 $\frac{1}{2}\omega_0$ 左右, 为较高频率, 滤波效果较好。此时虽然仍存在未被滤除部分, 但主要为高频, 对信号低频部分影响较小。

光纤水听器作为水下声传感器, 起到拾取水下声信息的作用。在海洋环境下, 低频信号相干性好且传播损失小, 因此, 光纤水听器主要工作在低频段, 其噪声性能也主要以低频段的性能来衡量。因此, 在调制频率较高的情况下, 通过调节抽运功率来调节光源弛豫噪声的峰值频率位置, 使得 ω_r 等于 ω_0 半倍频的奇数倍, 可以有效地降低解调信号的低频噪声。

根据以上分析, 找到了一种减小弛豫噪声对系统影响的方法, 实验结果表明, 当弛豫噪声中心频率 ω_r 为调制频率 ω_0 的整数倍时 (图 4 情况), 相位载波解调后的 1 kHz 处本底噪声约为 -86.7 dB , 如图 5 所示; 而改变抽运功率, 使 ω_r 为 ω_0 半频的奇数倍时 (图 3 情况), 相位载波解调后的噪声谱级得到明显

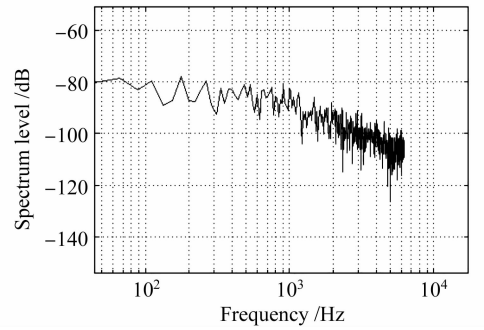


图 5 ω_r 为 ω_0 倍频时解调信号谱级

Fig. 5 PGC demodulated signal spectrum when ω_r is multiple of ω_0

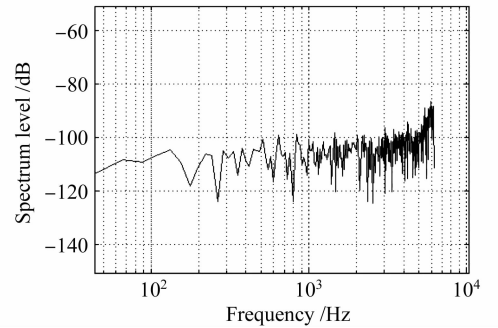


图 6 ω_r 是 ω_0 半倍频奇数倍时解调信号谱级

Fig. 6 PGC demodulated signal spectrum when ω_r is odd multiple of one-half of ω_0

改善, 1 kHz 处达到 -106 dB 左右, 如图 6 所示。

需要说明的是, 相位载波解调对强度噪声也有一定的抑制作用。假设信号 $\varphi(t)$ 的主频为 ω_s , 设 $\varphi(t) = \varphi_s \cos \omega_s t$, 由 (3) 式得

$$V = A + B \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos(\varphi_s \cos \omega_s t) - 2 [\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t] \sin(\varphi_s \cos \omega_s t) \}, \quad (11)$$

式中 $\cos(\varphi_s \cos \omega_s t)$ 和 $\sin(\varphi_s \cos \omega_s t)$ 均可以展开成为由 ω_s 各个倍频所组成, (11) 式经过展开相乘、积化和差, 可以得出声信号是左右对称的附着于 ω_0 的各个倍频项附近的边带上, 而相位载波解调即通过提取 ω_0 倍频边带信号来求出 $\varphi_s(t)$ 。而强度噪声本身对称性并不明显(在图 4 的极端情况下, 对称性较为明显, 对系统性能影响极大), 因此, 相位载波解调后的噪声谱级往往好于激光器强度噪声的本底。

4 光电负反馈抑制激光器强度噪声

在没有抑制激光器强度噪声之前, 为了提高系统性能, 需要通过调节抽运功率来改变弛豫峰的频率, 使其位于 ω_0 各个倍频中央, 这样不仅每次实验很不方便, 实验的效果也并不总是很理想。因此, 参考了文献[5~12]中使用的光电负反馈的方法, 从激光器端来抑制强度噪声, 峰值处抑制约 25 dB, 得到了较为平坦的噪声谱级, 整体性能优于文献中的同类激光器的结果。

图 7 为使用光电负反馈抑制光纤激光器强度噪声的原理图。激光器输出光经过分束器, 大部分作为最终输出, 小部分由光电探测器接收, 通过比例微分(PD)反馈控制电路, 产生反馈控制信号接入到抽运驱动电路中, 实时改变 980 nm 抽运激光器的驱动

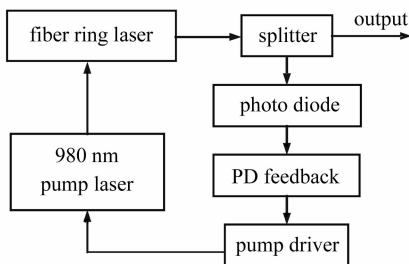


图 7 光电负反馈抑制强度噪声

Fig. 7 RIN suppression using optoelectronic feedback

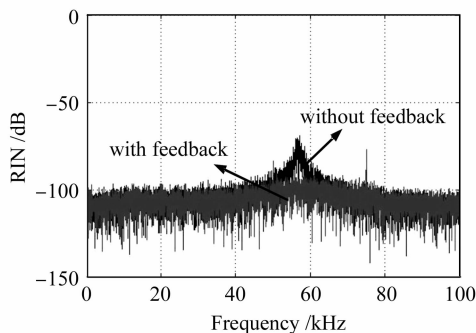


图 8 使用反馈后强度噪声抑制效果

Fig. 8 Experimental results of RIN suppression using optoelectronic feedback

电流, 从而达到消除弛豫振荡, 降低噪声的目的。图 8 为使用反馈后的激光器强度噪声谱级, 图 9 为反馈抑制后干涉信号的强度谱级(无声信号情况下)。可以看出, 此时干涉信号本底噪声较为平坦, 约 -100 dB 左右, 而相位载波解调后噪声则达到 -110 dB(图 10), 优于通过调节抽运功率改变强度噪声峰值频率的结果, 基本满足目前光纤水听器探测的要求。

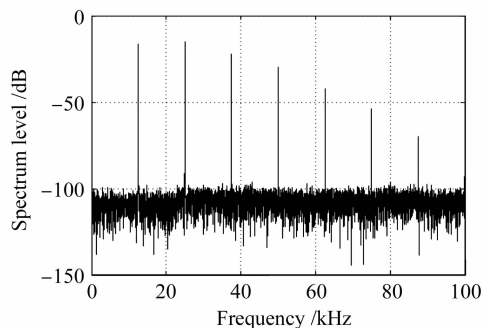


图 9 反馈后干涉信号本底噪声

Fig. 9 Interference signal spectrum with optoelectronic feedback

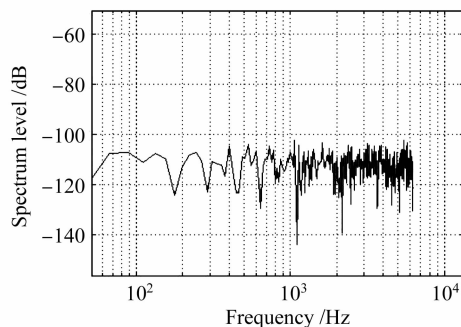


图 10 反馈后相位载波解调后本底噪声

Fig. 10 PGC demodulated signal spectrum with optoelectronic feedback

5 结 论

从理论上深入分析了光源强度噪声对相位载波解调的影响, 找到了有效降低噪声对系统影响的方法, 通过实验验证, 得到解调后噪声由 -86.7 dB 降低到 -106 dB。通过进一步的研究和实验, 使用光电负反馈, 有效地抑制了噪声, 在弛豫峰处抑制噪声 25 dB, 得到了光源输出优于 -100 dB, 相位载波解调后本底达到 -110 dB 的结果。同时经过实验发现, 通过优化反馈参数等方法, 仍然存在进一步降低噪声的可能, 这将是下一步的研究工作。

参 考 文 献

- 1 Ni Ming. Investigation of the key technologies of the fiber optic

- hydrophone [D]. Ph. D. dissertation of Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 61~65
- 倪 明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 中国科学院声学研究所博士学位论文, 2003. 61~65
- 2 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A J_0 - J_1 method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):103~106
王泽锋, 罗 洪, 熊水东 等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):103~106
 - 3 Jing Yang, Yonghui Qu, Guoyong Sun *et al.*. Suppression of mode competition in fiber lasers by using a saturable absorber and a fiber ring [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7):410~412
 - 4 Zhou Meng, George Stewart, Gillian Whitenett. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5):2179~2183
 - 5 Yu Benli, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Experimental study on low-noise fiber laser [J]. *Acta Optic Sinica*, 2006, **26**(2):217~220
俞本立, 甄胜来, 朱 军 等. 低噪声光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):217~220
 - 6 Mao Hongmin, Zhen Shenglai, Zhu Jun *et al.*. Fiber laser with low noise and narrow line width [J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2005, **29**(5):33~35
毛红敏, 甄胜来, 朱 军 等. 一种低噪声窄线宽光纤激光器[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2005, **29**(5):33~35
 - 7 Mark Csornyei, Tibor Berceci, Tamas Banky *et al.*. A new approach for RIN peak and phase noise suppression in microchip lasers [C]. *Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE MTT-S International* 2002, **2**:1377~1380
 - 8 Mark Csornyei, Tibor Berceci, Tamas Marozsak. All-optical intensity noise suppression of solid-state lasers for optical generation of microwaves [C]. *Microwaves, Radar and Wireless Communications*, 2004, **3**:781~784
 - 9 Mark Csornyei, Tamas Banky, Tibor Berceci. RIN peak suppression for solid state lasers [C]. *Microwaves, Radar and Wireless Communications*, 2002, **1**:183~186
 - 10 C. C. Harb, M. B. Gary, H. - A. Bachor *et al.*. Suppression of the intensity noise in a diode-pumped neodymium YAG nonplanar ring laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(12):2907~2913
 - 11 C. Svelto, S. Taccheo, M. Marano *et al.*. Optoelectronic feedback loop for relaxation oscillation intensity noise suppression in Tm-Ho YAG laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(19):1623~1624
 - 12 M. Marano, S. Longhi, P. Laporta. Optoelectronic feedback loop for intensity noise suppression in a high bit rate FM-operated Er-Yb laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(21):1877~1878