

远程光纤水听器系统中传输光纤引入噪声的抑制

王巍 李东明 张自丽 葛辉良 曹云龙

杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 远程传输光纤受环境的影响会在水听器系统中引入噪声,利用迈克耳孙光纤干涉仪模拟光纤水听器,搭建了远程光纤水听器系统,采用参考干涉仪法解调对传输光纤引入的噪声进行抑制。实验结果表明,与常用的相位产生载波技术(PGC)解调相比,参考干涉仪法解调在不影响传感水听器对声信号检测能力的情况下,对传输光纤引入的扰动噪声能进行良好的抑制,频率为500 Hz噪声的抑制量可达到约25 dB,同时该方法使传感水听器系统中100 Hz位置的本底噪声也降低了17 dB。

关键词 光纤光学;远程光纤水听器系统;传输光纤引入噪声;参考干涉仪法解调;相位产生载波技术解调

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.110601

Suppression of Transmission Fiber Induced Noise in Remotely Optical Fiber Hydrophone System

Wang Wei Li Dongming Zhang Zili Ge Huiliang Cao Yunlong

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

Abstract Noise will be caused because of the disturbance to the transmission fiber. The Michelson fiber interferometer is used to simulate the optical fiber hydrophone, and a remote optical fiber hydrophone system is built. The reference interferometer demodulation is used to suppress the noise caused by the transmission fiber. The experimental results show that compared with the phase generated carrier (PGC) demodulation, the ability to detect acoustic signal is not reduced by using the reference interferometer demodulation. A broadband noise caused by disturbing the transmission fiber is suppressed by maximal 25 dB at 500 Hz, and the ground noise is suppressed by 17 dB at 100 Hz.

Key words fiber optics; remote optical fiber hydrophone system; transmission fiber induced noise; reference interferometer demodulation; phase generated carrier demodulation

OCIS codes 060.2370; 060.2380; 060.2340; 060.2300

1 引言

光纤水听器具有高灵敏度、大动态范围、抗电磁干扰、传输距离远等优点,在军用声纳领域和石油天然气检测领域得到了研究人员的广泛重视^[1-3]。光纤水听器阵列为了使光纤水听器探测的目标更多,探测的距离更远,大规模远程布放光纤水听器系统是光纤水听器技术的发展趋势,近些年来国内外学者在该方向进行了很多的研究^[4-9]。大规模远程布放光纤水听器系统中,光电综合系统与光纤水听器之间有数十公里的传输光纤,该传输光纤暴露在环境中,会受环境中振动、弯曲和温度等因素的影响,导致光纤长度和折射率的变化,在水听器系统中引入噪声^[10]。

本文利用迈克耳孙光纤干涉仪模拟光纤水听器,搭建了简易的远程光纤水听器系统,通过外加不同频率的周期信号来模拟外界环境对传输光纤的扰动。采用参考干涉仪法对光纤水听器系统进行信号解调,分析了该方法对传输光纤引入噪声的抑制,实验结果与不采用参考干涉仪法而直接采用相位产生载波技术(PGC)解调^[11-12]的结果进行了比较,同时讨论了该方法是否会对声目标信号的检测造成影响,为该方法的工

收稿日期: 2014-05-09; 收到修改稿日期: 2014-06-01; 网络出版日期: 2014-10-10

基金项目: 声纳科技重点实验室基金(9140C2401080802)

作者简介: 王巍(1986—),男,硕士,工程师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 18857133823@139.com

程化提供依据。

2 原理及实验装置

当应力作用于光纤水听器系统的传输光纤时,传输光的相位被调制,从而产生频率调制噪声,该相位调制在干涉型水听器中引起的相移与直接调制激光器频率引起的相移相似。频率调制噪声引起的相位变化计算式为

$$d\varphi_0 = \frac{2\pi n \Delta L \beta f}{c}, \quad (1)$$

式中 ΔL 、 β 、 f 分别为臂长差,正弦相位调制信号的幅度和频率, n 为光纤纤芯折射率, c 为真空中的光速,相位变化与 ΔL 、 β 、 f 成正比。在实际环境中,传输光纤的受力位置多,噪声频谱较宽,将会在阵列返回的信号中带入噪声。

参考干涉仪法于 20 世纪 90 年由 Kersey 提出,用于光纤传感系统中激光光源相位噪声的抑制^[13-14],该方法通过在光路中增加一个与传感干涉仪臂长差相等的参考干涉仪来达到抑制噪声效果。为了验证该方法对远程光纤水听器系统中传输光纤引入噪声的抑制效果,搭建了简易实验系统,具体实验结构原理如图 1 所示。

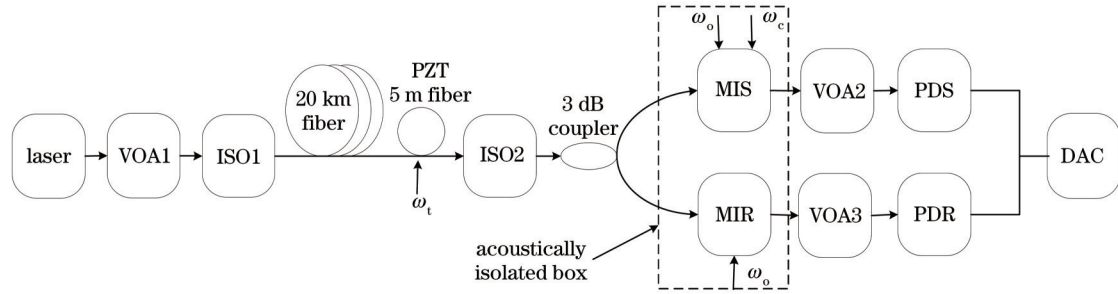


图 1 实验原理框图

Fig.1 Schematic of the experiment

图 1 中光源为波长 1548 nm 的窄线宽半导体激光器,其输出通过 1 号光衰减器(VOA1)将光功率衰减至传输光纤发生受激布里渊散射的阈值之下,1 号隔离器(ISO1)和 2 号隔离器(ISO2)用于保护激光器。传输光纤为 20 km 的单模 G652 光纤,长度为 5 m 的单模光纤缠绕在压电陶瓷环(PZT)上,陶瓷环上可以加载调制信号,用于模拟外界环境对传输光纤的扰动。ISO2 的输出光功率通过 3 dB 耦合器等分成两路,一路通过传感干涉仪(MIS),传感干涉仪起模拟传感水听器的作用;另一路通过另一个干涉仪(MIR),用于模拟参考干涉仪。两个干涉仪都采用非平衡迈克耳孙结构,臂长差都为 ΔL ,两个干涉仪都放置于同一个声隔离盒中,隔离外界信号对它们的影响。MIS 可以同时加载波信号 ω_0 和声信号 ω_s ,MIR 只加载波信号 ω_0 ,两个干涉仪的 π 值电压相等。两个干涉仪的两路干涉信号分别先经过 2 号光衰减器(VOA2)、3 号光衰减器(VOA3)衰减,再经过光电探测器(PDS、PDR)转换,最后通过同一块数据采集卡(DAC)采集数据并进行数据处理。

干涉型光纤传感干涉仪输出光信号经过光电探测器转换为电信号^[15]

$$I = A_s + B_s \cos[C \cos \omega_0 t + (\phi_s + \delta\phi_s)], \quad (2)$$

式中 A_s 和 B_s 为常数,与光信号强度和探测器灵敏度有关, ϕ_s 为外界声信号引起的传感干涉仪相位变化, $\delta\phi_s$ 为传输光纤扰动引入的相位噪声, ω_0 为载波信号。将(2)式进行 Bessel 展开,展开式中包含 ω_0 的基波和二倍频项,进行混频滤波锁相过程,得到

$$S_s(\omega_0) = 2B_s J_1(C) \sin(\phi_s + \delta\phi_s), \quad (3)$$

$$S_s(2\omega_0) = 2B_s J_2(C) \cos(\phi_s + \delta\phi_s). \quad (4)$$

同理,参考干涉仪信号输出经过上述处理得到

$$S_r(\omega_0) = 2B_r J_1(C) \sin(\phi_r + \delta\phi_r), \quad (5)$$

$$S_r(2\omega_0) = 2B_r J_2(C) \cos(\phi_r + \delta\phi_r), \quad (6)$$

式中 B_s, B_r 为常数,分别与传感干涉仪和参考干涉仪中光信号强度和所用探测器灵敏度有关; ϕ_r 为外界声信号引起的参考干涉仪相位变化; $\delta\phi_r$ 为传输光纤扰动引入的相位噪声,根据图 2 所示信号处理原理, $S_s(\omega_0)$ 、

$S_s(2\omega_0)$ 、 $S_r(\omega_0)$ 、 $S_r(2\omega_0)$ 进一步处理可得到

$$S_a = S_s(\omega_0) \cdot S_r(2\omega_0) - S_s(2\omega_0) \cdot S_r(\omega_0) = 4[J_1(C)]^2 B_s B_r \sin(\phi_s - \phi_r + \delta\phi_s - \delta\phi_r), \quad (7)$$

$$S_b = S_s(2\omega_0) \cdot S_r(2\omega_0) - S_s(\omega_0) \cdot S_r(\omega_0) = 4[J_1(C)]^2 B_s B_r \cos(\phi_s - \phi_r + \delta\phi_s - \delta\phi_r). \quad (8)$$

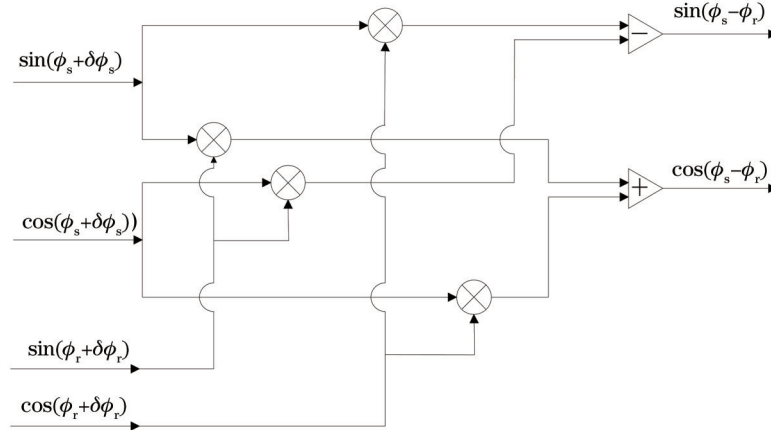


图2 信号处理原理框图

Fig.2 Schematic of signal processing

(7)式和(8)式中,对于处于相同环境中,等臂长差的干涉仪,满足 $\delta\phi_s = \delta\phi_r$, 两式化简成为

$$S_a = 4[J_1(C)]^2 B_s B_r \sin(\phi_s - \phi_r), \quad (9)$$

$$S_b = 4[J_1(C)]^2 B_s B_r \cos(\phi_s - \phi_r). \quad (10)$$

(9)式和(10)式中,不再含有传输光纤扰动引入的相位噪声,之后采用图3所示微分交叉相乘算法提取声信号 $\phi_s - \phi_r$,由于实验时参考干涉仪不加载声信号,所以 ϕ_r 可以忽略不计,从而提取出传感水听器声信号 ϕ_s 。

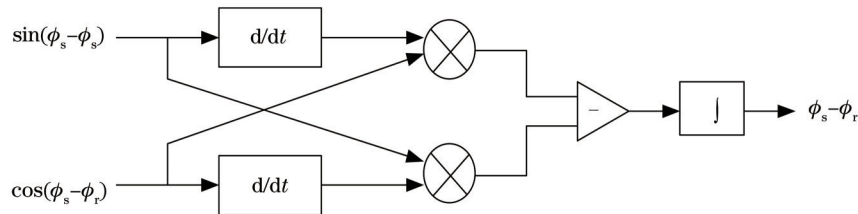


图3 微分交叉相乘算法框图

Fig.3 Algorithm of the differentiation and cross multiplication

3 实验结果及分析

为了得到参考干涉仪法解调对传输光纤引入噪声的抑制效果,在缠绕5 m单模光纤的压电陶瓷环上加

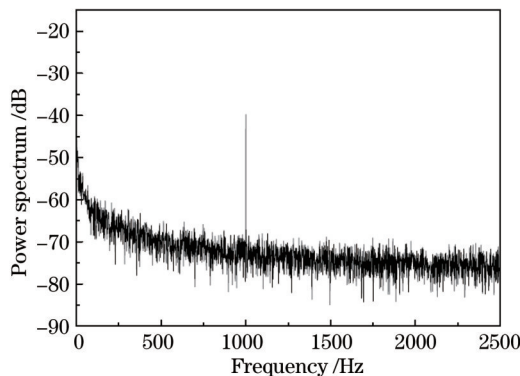


图4 传感干涉仪PGC解调的频谱

Fig.4 Frequency spectrum of sensor interferometer after PGC demodulation

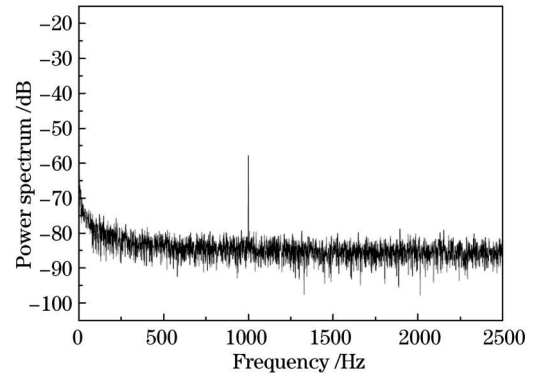


图5 传感干涉仪参考干涉仪法解调的频谱

Fig.5 Frequency spectrum of sensor interferometer after the reference interferometer demodulation

载周期调制信号,频率为 1 kHz,电压幅度为 10 V,传感干涉仪不加载声信号。首先不采用参考干涉仪法直接用 PGC 算法解调传感干涉仪,图 4 为解调得到的噪声频谱。

从图 4 可以看出,传输光纤受 1 kHz 周期信号扰动时,传感干涉仪中出现了明显的 1 kHz 噪声,噪声幅度约为 -40 dB。采用参考干涉仪法解调该传感干涉仪,干涉仪的噪声频谱如图 5 所示,频谱中 1 kHz 噪声幅度约为 -58 dB。

比较图 4 和图 5,采用参考干涉仪法解调相较于采用 PGC 直接解调,传输光纤扰动引入的噪声幅度降低了 18 dB。表 1 为传输光纤加载不同频率、相同幅度周期信号扰动时,两种方法解调得到的扰动噪声信号频谱幅度。

表 1 不同频率扰动下两种解调方法比较

Table 1 Comparison of the two demodulations under different frequency disturbances

Frequency /Hz	Reference interferometer demodulation /dB	PGC demodulation /dB	Suppression of the noise caused by transmission fiber /dB
100	< -77.08	-54.35	> 22.73
200	< -76.03	-53.11	> 22.92
250	-68.49	-51.86	16.63
315	-71.35	-49.52	21.83
400	-70.01	-47.07	22.94
500	-70.79	-45.83	24.96
630	-62.37	-43.47	18.90
800	-64.29	-41.34	22.95
1000	-57.81	-39.75	18.06

通过表 1 中两者的比对发现,参考干涉仪法解调对 100~1000 kHz 的扰动噪声都有良好的抑制效果,最大的抑制量在 500 Hz 频点,可达到约 25 dB。相较于 PGC 直接解调,参考干涉仪法解调不但能降低传输光纤带来的扰动噪声,同时还能有效地降低传感干涉仪系统的本底噪声,系统中的本底噪声主要来源于激光光源的频率波动在非平衡干涉仪中引起的相位噪声。

图 6 中, line 2 和 line 3 分别为传感干涉仪和参考干涉仪直接 PGC 解调得到的干涉仪本底噪声,两个干涉仪只加载了载波信号,并且处于同一个环境中,所以两者的本底噪声频谱基本一致。line 1 是采用参考干涉仪法解调得到的传感干涉仪本底噪声频谱,与 line 2 相比,传感干涉仪的本底噪声得以降低,1 kHz 位置噪声降低了约 13 dB,500 Hz 位置噪声降低了约 12 dB,低频 100 Hz 位置噪声降低了约 17 dB。

为了验证参考干涉仪法解调是否会对传感干涉仪的目标信号检测造成影响,在传感干涉仪上加载频率为 1 kHz,幅度为 0.5 V 的目标声信号。图 7 为直接 PGC 解调传感干涉仪的噪声频谱,解调得到的声信号频谱幅度为 -7.58 dB。

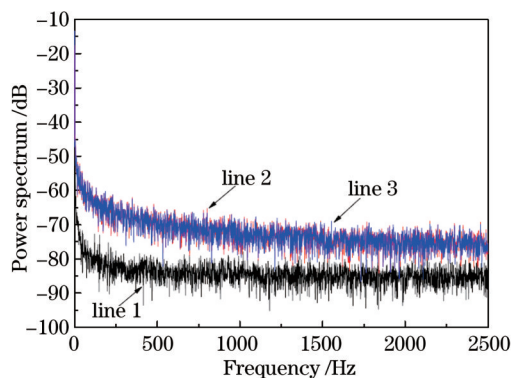


图 6 两种解调方法得到的干涉仪本底噪声频谱
Fig.6 Frequency spectra of ground noise of the interferometer obtained by the two demodulations

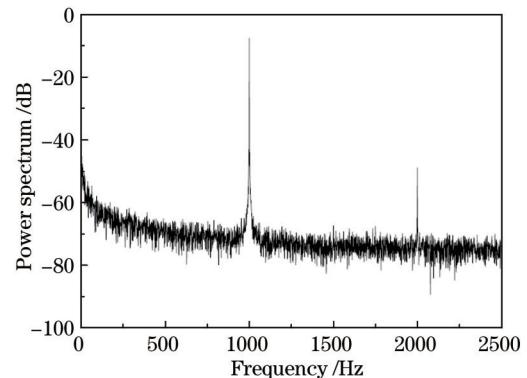


图 7 加载声信号情况下传感干涉仪 PGC 解调的频谱
Fig.7 Frequency spectrum of the sensor interferometer with acoustic signal using PGC demodulation

图8为采用参考干涉仪法解调传感干涉仪得到的噪声频谱,解调得到的声信号频谱幅度也为-7.58 dB。

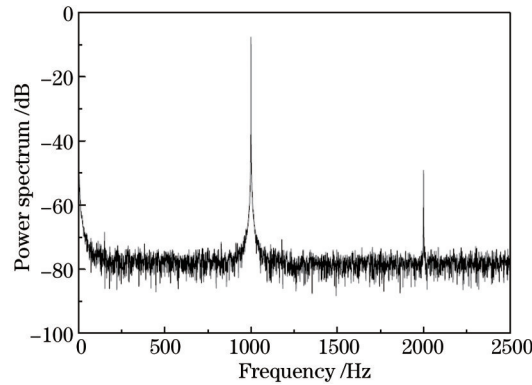


图8 加载声信号情况下传感干涉仪采用参考干涉仪法解调的频谱

Fig.8 Frequency spectrum of the sensor interferometer with acoustic signal using reference interferometer demodulation

比较图7和图8可知,采用参考干涉仪法解调相较于直接PGC解调,传感干涉仪对1 kHz目标信号检测性能没有发生变化。表2为加载不同频率、相同幅度(0.5 V)的周期声目标信号时,两种方法解调传感干涉仪得到的目标信号频谱幅度。

表2 不同频率声目标信号下两种解调方法得到的频谱幅度对比

Table 2 Comparison of the two demodulations with acoustic signal of different frequencies

Frequency /Hz	Reference interferometer demodulation /dB	PGC demodulation /dB
100	-7.52	-7.52
200	-7.28	-7.28
250	-7.65	-7.65
315	-7.94	-7.94
400	-7.89	-7.89
500	-7.54	-7.54
630	-7.72	-7.72
800	-7.57	-7.57
1000	-7.58	-7.58

通过表2中两者的比对发现,参考干涉仪法解调相较于直接PGC解调,100~1000 kHz的声目标信号解调没有受到影响,证明了参考干涉仪法解调用于光纤水听器信号解调是可行的。针对该方法的工程化实现,可以在传感水听器阵列首端加入一个对声压和振动不敏感的参考水听器,简单示意如图9所示。

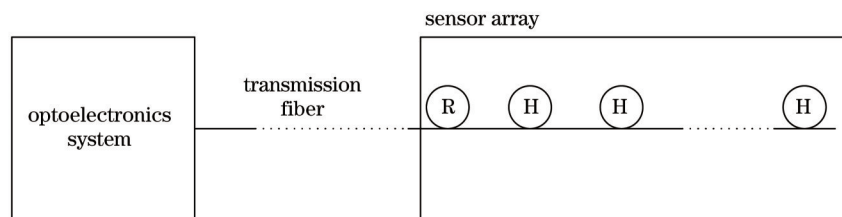


图9 带有参考水听器的光纤水听器系统简图

Fig.9 Schematic of fiber hydrophone system with reference hydrophone

图中R为参考光纤水听器,H为传感光纤水听器。对声压和振动不敏感的参考水听器即上述实验中的参考干涉仪,传感水听器即实验中的传感干涉仪。将传感光纤水听器得到的信号和参考光纤水听器得到的信号一起进行参考干涉仪法解调可以对系统传输光纤引入的噪声进行有效的抑制。

4 结 论

采用参考干涉仪法对远程传输水听器系统进行信号解调,实验结果表明,相较于常用的直接PGC解调法,参考干涉仪法对传输光纤引入的100~1000 Hz扰动噪声都有良好的抑制效果,500 Hz噪声的抑制量可达

到约 25 dB,同时参考干涉仪法在不影响传感水听器检测性能的情况下,能够有效地降低传感水听器系统的本底噪声,低频 100 Hz 位置噪声降低了约 17 dB。设计了一种带有光纤参考水听器的光纤水听器阵列系统简图,对于未来该方法的工程化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Chen Yi, Zhang Jun, Zhang Min, *et al.*. Calibration of phase-shifted sensitivity of optical fiber hydrophone in the frequency range 20 Hz to 10 kHz [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1686-1691.
陈毅,张军,张敏,等. 20 Hz~10 kHz 光纤水听器相移灵敏度校准[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1686-1691.
- 2 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong, *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(5): 415-417.
孟洲,胡永明,熊水东,等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, 29(5): 415-417.
- 3 Yun Zhaoqing, Luo Hong, Hu Zhengliang, *et al.*. A fiber optic hydrophone used for thin line towed array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1206004.
运朝青,罗洪,胡正良,等. 应用于拖曳细线阵的光纤水听器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1206004.
- 4 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.
- 5 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 Sensors Journal*, 2003, 3(1): 19-30.
- 6 G A Cranch, P J Nash. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM [J]. *J Lightwave Technol*, 2001, 19(5): 687-699.
- 7 Yi Liao, Ed Austin, P J Nash, *et al.*. Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(6): 882-888.
- 8 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.
- 9 Cao Chunyan, Hu Zhengliang, Xiong Shuidong, *et al.*. Suppression of Rayleigh scattering induced coherent noise in remotely interrogated fiber-optic hydrophone [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 C K Kirkendall, A Dandridge. Overview of high performance fibre-optic sensing [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2004, 37: R197-R216.
- 11 Cao Jianian, Zhang Likun, Li Xuyou, *et al.*. Phase modulation and demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone using phase-generated-carrier techniques [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(11): 1536-1540.
曹家年,张立昆,李绪友,等. 干涉型光纤水听器相位载波调制及解调方案研究[J]. *光学学报*, 1999, 19(11): 1536-1540.
- 12 Ni Ming, Hu Yongming, Meng Zhou, *et al.*. Dynamic range of fiber optic hydrophone using digitized phase generated carrier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(2): 33-37.
倪明,胡永明,孟洲,等. 数字化 PGC 解调光纤水听器的动态范围[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(2): 33-37.
- 13 A D Kersey, T A Berkoff. Passive laser phase noise suppression technique for fiber interferometers [C]. *SPIE*, 1990, 1367: 310-316.
- 14 A D Kersey, T A Berkoff. Novel passive phase noise cancelling technique for interferometric fibre optic sensors [J]. *Electronics Lett*, 1990, 26(10): 640-641.
- 15 陆旻,张自丽. 基于参考干涉仪的光纤水听器解调技术研究[J]. *声学及电子工程*, 2013, (2): 14-17.