

文章编号: 0258-7025(2009)08-2064-06

# 基于相位载波解调的声低通滤波光纤水听器抗混叠性能实验研究

王泽锋 胡永明 孟洲 罗洪 倪明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 报道了声低通滤波光纤水听器的抗混叠实验结果。声低通滤波光纤水听器是为了解决高频混叠问题而提出的一种新型光纤水听器。理论分析和实验研究已经表明,该类光纤水听器的声压灵敏度频响具有较好的低通滤波特性,对高频声信号有很强的抑制作用。通过设计对比实验,研究了高频干扰对普通光纤水听器系统信号解调的影响,以及声低通滤波光纤水听器的抗混叠性能。结果表明,当强高频干扰使得普通光纤水听器系统无法进行正确的信号解调时,声低通滤波光纤水听器的信号解调系统仍然能够正常工作,解调得到的声信号与没有干扰时的结果一致性非常好,相关系数在 0.99 以上。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 光纤水听器; 声压相位灵敏度; 声滤波器

中图分类号 TB133; TB565<sup>+</sup>.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2064

## Experimental Investigations on Anti-Aliasing Properties of Acoustic Low-Pass Filtering Fiber-Optic Hydrophones Based on Phase Generate Carrier Demodulation

Wang Zefeng Hu Yongming Meng Zhou Luo Hong Ni Ming

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

**Abstract** Experimental investigations on anti-aliasing properties of acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones are reported. Acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones is a novel kind of fiber-optic sensors, which is proposed to eliminate the aliasing in fiber-optic hydrophone arrays. Theoretical and experimental results show that it has good acoustic low-pass filtering properties, and can restrain the high frequency interference strongly. Effects of high frequency interference on demodulation results of fiber-optic hydrophones without acoustic filter and anti-aliasing properties of fiber-optic hydrophones with acoustic filter are studied experimentally. Results show that fiber-optic hydrophones without filter cannot work normally when the high frequency interference is strong, while the acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones still work well. The demodulation results of acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone are in good agreement with the results without interference, and the correlation coefficient of the demodulation acoustic signals is higher than 0.99. Acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones provide an effective solution to the aliasing existing in modern photoelectric sonar systems.

**Key words** fiber optics; fiber-optic sensor; fiber-optic hydrophone; acoustic pressure phase sensitivity; acoustic filter

收稿日期: 2008-10-06; 收到修改稿日期: 2008-12-04

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)和国防科技大学优秀研究生创新目录(0623)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: hotrosemaths@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术的研究。

E-mail: huyongming\_nudt@hotmail.com

# 1 引言

光纤水听器是通过接收水中声波对目标进行探测、定位与识别的一种新型传感器。自 20 世纪 70 年代末美国海军研究实验室(NRL)的 Bucaro 等和 TRW 公司的 Cole 等几乎同时报道了第一篇关于光纤水听器的论文以来<sup>[1,2]</sup>，由于其在军事和民用上的巨大应用前景，以及具有灵敏度高、动态范围大、检测频带宽、耐高温高压、耐腐蚀、结构设计灵活、抗电磁干扰等诸多优越的特性，被广泛研究并获得了迅速的发展，正在被考虑构成未来的声纳系统<sup>[3~6]</sup>。

一般的声纳系统在有限的工作带宽下，为避免高频混叠的影响，在数字采样之前都要使用电滤波器对原始信号进行抗混叠滤波预处理<sup>[7]</sup>。然而，在基于相位载波(Phase generated carrier, PGC)调制解调的光纤水听器系统中，除采样频率过低带来的采样混叠之外，还存在调制频率过低引起的调制混叠现象<sup>[8,9]</sup>。调制混叠与数字系统的采样混叠不同，它在干涉光信号产生的同时就已发生，无法用常规的电路抗混叠滤波技术来消除，解决该问题的技术途径之一是尽量加大光纤水听器系统自身的工作带宽。但系统的成本将大幅度上升，而且会给信号处理带来极大的困难。尤其对于目前国内外普遍采用的基于光频调制的全数字化 PGC 解调系统而言，这种方案的局限性更大。一方面，由于光纤水听器系统检测的信号通常都是比环境噪声小好几个数量级的微弱信号，因此对数据采样的精度要求非常高；另一方面，加大系统工作带宽要求数据采样频率成倍提高。也就是说系统必须进行高精度和高速率的采样，这样的数据采集系统非常昂贵且十分复杂。同时，随着数据采样频率的提高，信号解调系统会受到电子元器件越来越多的限制，使得解调的难度不断提升。可见，对于未来主要发展的大规模和超大规模光纤水听器阵列而言，提高系统工作带宽不是解决高频混叠问题的一种行之有效的方案<sup>[9]</sup>。

为了有效解决光纤水听器系统的高频混叠问题，本课题组曾提出了声低通滤波方案<sup>[9]</sup>。基于声学滤波器原理，设计了几种简单的声低通滤波光纤水听器。初步的理论分析和实验结果表明，声低通滤波光纤水听器对高频信号具有较强的抑制作用<sup>[10~14]</sup>。本文实验研究了高频干扰对光纤水听器信号解调的影响以及声低通滤波光纤水听器的抗混叠性能。结果表明，当强高频干扰使得普通光纤水听器系统无法进行正确的信号解调时，声低通滤波

光纤水听器系统依然能够正常工作，具有很强的抗混叠功能。

# 2 实验设计

## 2.1 实验所用的光纤水听器

实验中使用了两种光纤水听器，一种不含声滤波器，称之为普通光纤水听器；另一种含声滤波器，称之为声低通滤波光纤水听器，如图 1 所示。除声滤波器外，普通光纤水听器与声低通滤波光纤水听器具有相同的结构参数。光纤传感轴的核心是一个臂差为 15 m 的全保偏 Michelson 光纤干涉仪，使用的光纤为熊猫型保偏光纤，纤芯直径为 8  $\mu\text{m}$ ，包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ，涂覆层直径为 246  $\mu\text{m}$ ， $\lambda = 1550 \text{ nm}$  处的传输损耗为 0.43 dB/km。传感轴的支撑铝骨架外表面紧裹一层厚度约为 2.5 mm 的聚氨酯弹性层，用以提高声压灵敏度，传感光纤(信号臂)均匀地紧绕在弹性增敏层上，光纤表面涂有一层很薄的环氧树脂，起到保护光纤的作用，参考光纤直接绕在铝骨架上。传感轴长 50 mm，总外径(包括弹性层、光纤层以及保护层)为 14 mm。声低通滤波器由一个两端开孔的封闭铝质圆柱筒构成，外径为 26 mm，内径为 20 mm，总长度为 80 mm，两个端面的厚度都为 2 mm，各穿一个直径为 1.5 mm 的小孔。

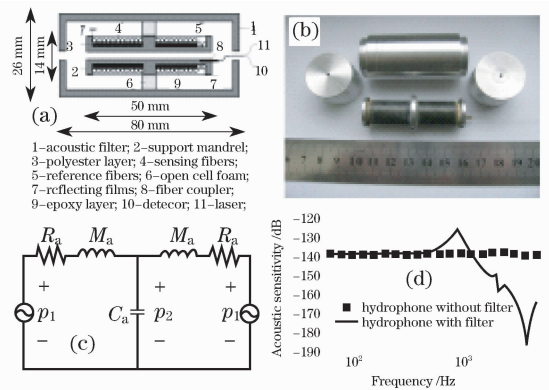


图 1 实验中使用的声低通滤波光纤水听器。(a) 结构示意图；(b) 实物图；(c) 等效电路图；(d) 声压灵敏度频响

Fig. 1 Fiber-optic hydrophones used in experiments. (a) schematic diagram; (b) photograph; (c) acoustic equivalent circuit; (d) sensitivity frequency responses

当频率较低时，声波波长比滤波器线度大得多，可以认为滤波器处于均匀声场中，此时由电-声类比理论可知，系统特性可用一个声学等效电路来描述，如图 1(c)所示。其中， $R_a$  和  $M_a$  分别为小孔的集中

等效声阻和声质量,  $C_a$  为空腔总的等效声容,  $p_1$  和  $p_2$  分别为腔外小孔处和腔内的声压。由电路分析方法可得系统的声压传递函数为<sup>[10,14]</sup>

$$T(\omega) = \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_a C - \omega^2 M_a C}, \quad (1)$$

其中  $C = C_a/2$ 。若令  $j\omega = s$ , 则(1)式可以写为

$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}, \quad (2)$$

式中

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_a C}}, \quad Q = \frac{1}{R_a} \sqrt{\frac{M_a}{C}}. \quad (3)$$

(2)式是一个典型的二阶低通滤波电路传递函数表达式, 其中  $\omega_0$  和  $Q$  分别为等效声学电路的谐振频率和声学品质因数, 因此图 1 所示的水听器也称为二阶声低通滤波光纤水听器。若光纤传感轴的声压响应函数为  $H(\omega)$ , 则声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响  $R(\omega)$  可以写成

$$R(\omega) = H(\omega) \cdot T(\omega). \quad (4)$$

图 1(d) 是实际测得的实验用光纤水听器的声压灵敏度频响曲线, 其中正方形和曲线分别对应普通光纤水听器(不含声滤波器)和声低通滤波光纤水听器(含声滤波器)。由图 1(d) 可见, 实验中使用普通光纤水听器具有非常平坦的响应, 在测试频带 50 ~ 5000 Hz 上平均声压灵敏度约为 -140 dB (0 dB = 1 rad/ $\mu$ Pa), 波动小于 3 dB; 声低通滤波光纤水听器的低频响应与普通光纤水听器的非常吻合, 在 920 Hz 处出现了一个共振峰, 这由滤波器的结构尺寸决定, 对高频声信号有很强的抑制作用, 衰减速率大于 23 dB/倍频程。

## 2.2 驻波罐测试系统

实验在一个充水驻波罐中进行, 如图 2 所示。光源为自行研制的环形腔光纤激光器, 内置光隔离器, 中心波长为 1550 nm, 线宽约为 1.5 kHz<sup>[15]</sup>。激光经 3 dB 耦合器分成两束, 分别进入声低通滤波光纤水听器和普通光纤水听器, 两个光纤水听器输出的信号分别经光电探测器 1 和 2 转换成电信号, 并同时送到数字化 PGC 解调器中进行信号解调。实验中, 为了更清楚地看到声场的频谱信息, 还使用了一个标准压电水听器(型号为 CS-3, 中国科学院声学所生产)作为参考。压电水听器输出的信号经数字滤波器进行放大滤波, 然后与 PGC 解调器输出的信号同时经数据采集系统转换成离散的数字信号, 输送到计算机进行后续的快速傅里叶变换、低通滤

波等相关处理。信号发生器 AFG3022 输出一个频率为  $\omega_m$  的正弦信号到光源, 对光频进行调制。同时, 它还输出两路正弦信号(分别模拟被测的声信号和干扰)经功率放大器后驱动扬声器发声, 从而在驻波罐中产生测量用的准平面声波。

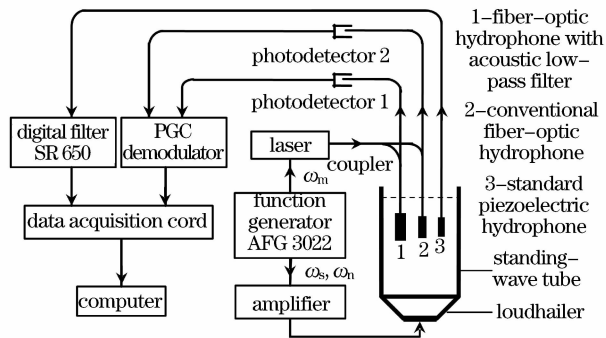


图 2 实验系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

## 3 实验结果与分析

实验中, 光纤水听器采用基于光频调制的 PGC 调制解调信号检测方案, 参数设置为: 调制频率  $f_m = 6250$  Hz, 调制幅度  $C_m = 2.4$  rad, 采样率取 50 kHz。

### 3.1 高频干扰对信号解调的影响

图 3 是高频干扰对普通光纤水听器系统信号解调影响的实验结果。被测声信号频率  $f_s = 200$  Hz, 干扰信号频率  $f_n = 4500$  Hz。用于激发被测声信号和干扰信号的电压信号由同一个信号发生器 (AFG3022) 产生, 其中被测声信号对应的输出电压幅度  $U_s$  为 400 mV, 干扰信号对应的输出电压幅度  $U_n$  取 0, 100, 500, 1000, 2000 mV 5 种情况, 分别对应图 3(a)~(e)。其中, 图(i)和(ii)分别为普通光纤水听器和压电水听器信号的频谱图, 图(iii)和(iv)分别为 PGC 解调得到的声信号时域图和频谱图。

从图 3(a) 可见, 此时由于信号频率远远小于系统的工作频率上限, 而且信号幅度远远小于系统的动态范围上限, 因此解调结果非常好。PGC 解调得到的声信号与标准压电水听器测得的声信号的相关系数为 0.998。而图 3(b)~(e) 中, 由于干扰信号的频率超出了系统的带宽, 出现了混叠现象, 产生的主要假信号的频率为 1750 Hz, 即为调制频率与干扰信号频率的差, 与理论分析和仿真的结果一致<sup>[9]</sup>。

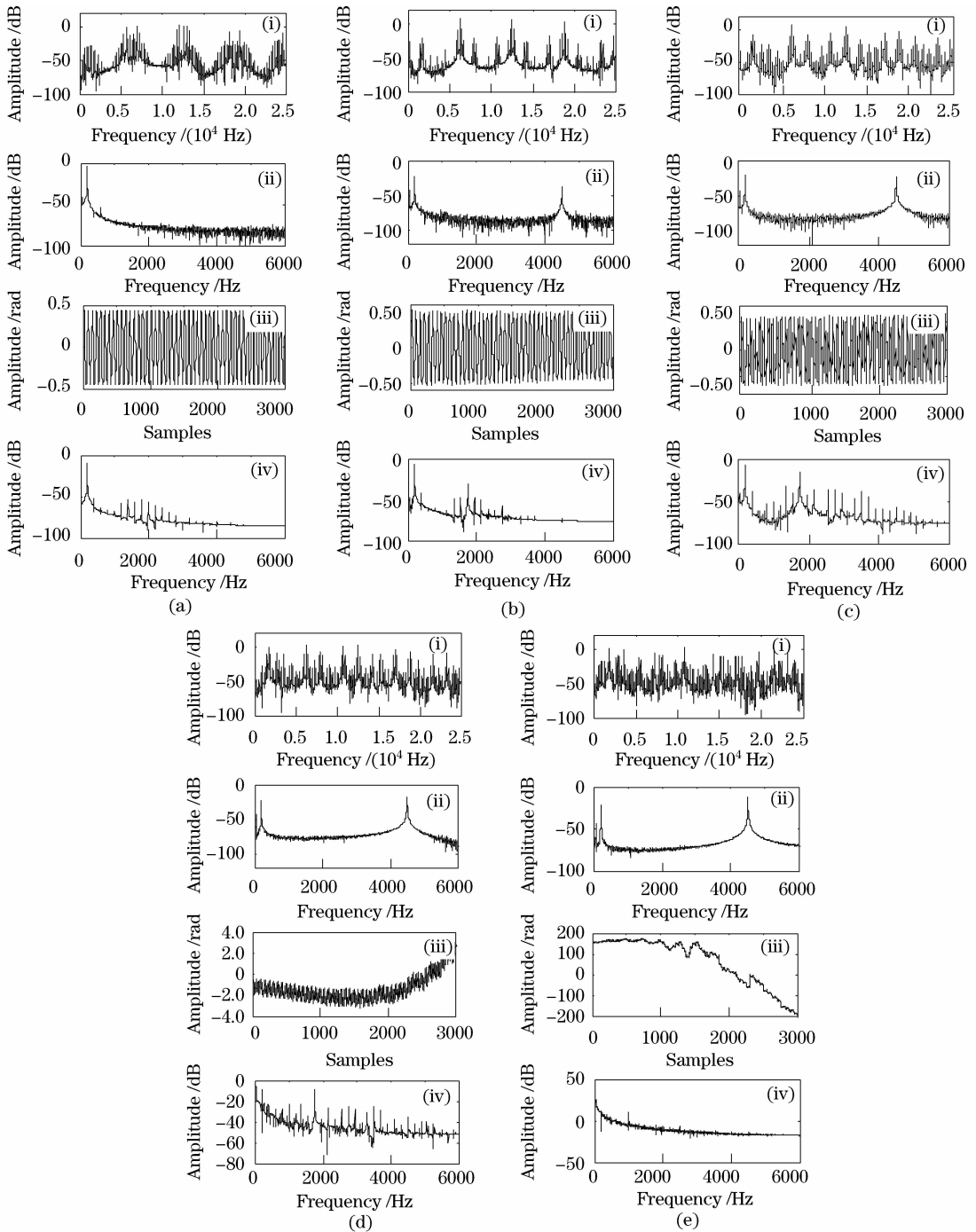


图 3 高频干扰对普通光纤水听器信号解调结果的影响。(a)  $U_n=0$  mV; (b)  $U_n=100$  mV; (c)  $U_n=500$  mV; (d)  $U_n=1000$  mV; (e)  $U_n=2000$  mV

Fig. 3 Effects of high frequency interference on demodulation results of common fiber-optic hydrophone. (a)  $U_n=0$  mV; (b)  $U_n=100$  mV; (c)  $U_n=500$  mV; (d)  $U_n=1000$  mV; (e)  $U_n=2000$  mV

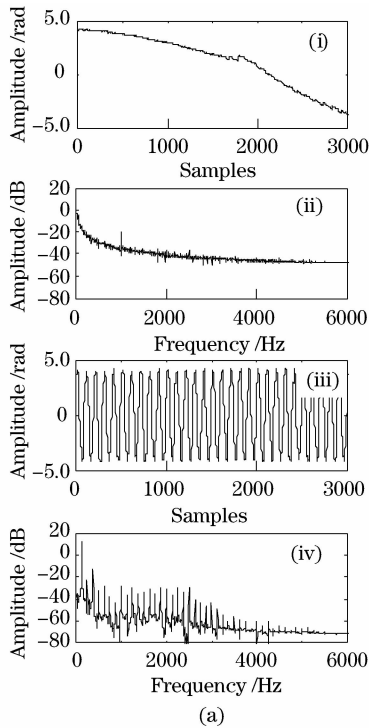
当干扰信号强度较弱时,由于它产生的相移幅度很小,对解调结果影响不大,解调信号的波形较好,如图 3(b)所示。随着干扰信号强度的增加,混叠对解调结果的影响逐渐增强,解调信号的波形失真度越来越高,在频谱上识别信号的难度逐渐增大,如图 3(b)和(c)所示。随着干扰信号的继续增强并

超出系统解调的极限时,PGC 解调系统将无法正常工作,解调出错误的结果,频谱上看不到任何有用信息,如图 3(d)所示。

### 3.2 对比实验结果与分析

图 4 是存在强高频干扰时普通光纤水听器和声低通滤波光纤水听器信号解调结果的比较,图(a)和

(b)分别对应信号频率  $f_s$  为 125 Hz 和 200 Hz 的两种情况。其中,图(i)和(ii)分别为普通光纤水听器解调信号的时域图和频谱图,图(iii)和(iv)分别



为声低通滤波光纤水听器解调信号的时域图和频谱图。实验中,被测信号的发射电压幅度为 1 V,干扰信号的发射电压幅度为 2 V。

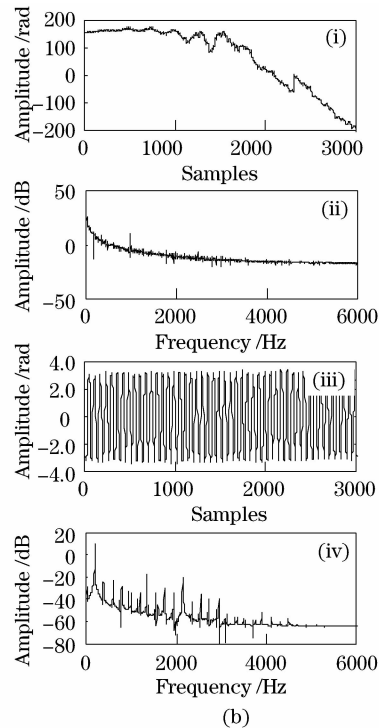


图 4 存在强干扰时普通光纤水听器和声低通滤波光纤水听器解调结果的对比。(a)  $f_s=125$  Hz; (b)  $f_s=200$  Hz

Fig. 4 Demodulation results comparison of fiber-optic hydrophone with and without acoustic filter with strong interference.

(a)  $f_s=125$  Hz; (b)  $f_s=200$  Hz

从图 4 可见,当强高频干扰使得普通光纤水听器的信号解调系统无法正常工作时,声低通滤波光纤水听器的信号解调系统仍然可以正常工作,解调结果非常好,信号波形失真小,此时解调得到的声信号与没有高频干扰时得到的声信号的相关系数大于 0.99。可见,声低通滤波光纤水听器能有效地解决高频干扰引起的信号混叠问题。

## 4 结 论

实验研究了高频干扰对普通光纤水听器系统信号解调的影响,以及声低通滤波光纤水听器的抗高频混叠性能。结果表明,高频干扰对光纤水听器 PGC 解调结果的影响非常大,随着干扰信号不断增强,解调得到的声信号波形失真度逐渐增大,甚至使得解调系统无法正常工作,得到错误的解调结果。而声低通滤波光纤水听器由于对高频声信号具有很强的衰减功能,使得光纤传感轴感受到的声信号非常弱,从而从根本上避免了混叠的产生。因此,当存在很强的高频干扰时,声低通滤波光纤水听器的信号解调系统依然能够正常工作,解调得到的声

信号与没有干扰时的结果一致性非常好,相关系数大于 0.99。

## 参 考 文 献

- 1 J. H. Cole, R. L. Johnson, P. G. Bhuta. Fiber-optic detection of sound[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, **62**(5):1136~1138
- 2 J. A. Bucaro, H. D. Dardy, E. F. Carome. Fiber optic hydrophone [J]. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1977, **62**(5):1302~1304
- 3 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology [J]. *IEEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 1996, **143**(3):204~208
- 4 G. A. Cranch, P. J. Nash, C. K. Kirkendall. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(1):19~30
- 5 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
- 6 Song Zhangqi, Wang Xin, Cao Chunyan *et al.*. Fiber optic hydrophone based on Sagnac interferometer with saw-tooth wave phase biasing technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):957~961  
宋章启,王鑫,曹春艳等. Sagnac 光纤水听器锯齿波相位偏置技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):957~961
- 7 J. B. Carroll, D. R. Huber. A fiber-optic hydrophone with a mechanical anti-aliasing filter [J]. *J. Lightwave Technol.*,

- 1986, **LT-4**(1):83~86
- 8 A. Dandridge, A. Tveten, T. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653
- 9 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):92~98  
王泽锋,胡永明,孟洲等. 干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):92~98
- 10 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Fiber-optic hydrophone using a cylindrical Helmholtz resonator as a mechanical anti-aliasing filter [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1):37~39
- 11 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Novel mechanical anti-aliasing fiber-optic hydrophone with a fourth-order acoustic low-pass filter [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1267~1269
- 12 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Experimental investigation on a fiber-optic hydrophone with a cylindrical Helmholtz resonator [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(5):1606~1608
- 13 Wang Zefeng, Hu Yongming. A novel passive homodyne fiber-optic hydrophone of acoustic low-pass filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):783~786  
王泽锋,胡永明. 一种具有声低通滤波特性的无源零差光纤水听器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4):783~786
- 14 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Frequency response of two-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10):1883~1887  
王泽锋,胡永明,孟洲等. 二阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10):1883~1887
- 15 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**:2179~2183