

文章编号: 0253-2239(2007)04-0654-5

基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法

王泽锋 罗 洪 熊水东 倪 明 胡永明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 提出了一种基于光源频率调节的干涉型光纤水听器主动相位补偿的信号检测方法。详细介绍了该方法的基本检测原理,对信号解调误差进行了理论分析与仿真。为了验证该方法的可行性,搭建了实验系统,并编写了实时的信号采集、处理程序,对某一干涉型光纤水听器的声压灵敏度进行了测试。在频带 20 Hz~1.3 kHz 上,平均声压灵敏度为 -162.2 dB(0 dB= 1 rad/ μ Pa),波动小于 ± 0.8 dB,与采用相位载波调制解调方法测量的结果基本吻合。实验结果证明该方法是有效的。由于传感部分不含有源器件,便于实现全光纤化,且解调算法简单、检测频带宽,该方法能被广泛应用到各种干涉型光纤传感器的信号检测当中。

关键词: 光学测量; 光纤水听器; 检测方法; 外差法; 无源零差; 相位载波调制和解调

中图分类号: TB212.14 文献标识码: A

Phase Compensating Detection Method of Interferometric Fiber-Optic Hydrophones Based on Tuning the Frequency of the Laser

Wang Zefeng Luo Hong Xiong Shuidong Ni Ming Hu Yongming

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract: A novel signal detection method for interferometric fiber optic hydrophones is described. It compensates the phase of the interferometer by tuning the frequency of the laser. The principle of this method is introduced in details. The demodulation error is analyzed and simulated theoretically. A system of data acquisition and processing is programmed, and a fiber hydrophone is tested. The average acoustic pressure sensitivity is -162.2 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa) over the frequency range of 20 Hz to 1.3 kHz, and the fluctuation is smaller than ± 0.8 dB, which accords well with the results obtained with the method of phase generated carrier demodulation. The experimental results prove this method is feasible. This method has the advantages of no electric elements in the sensing head, the simplicity of signal processing and the wide frequency range of detection. It can be applied to all kinds of signal detection of interferometric fiber-optic sensors.

Key words: optical measurement; fiber-optic hydrophone; detection scheme; heterodyne; passive homodyne; phase generated carrier modulation and demodulation

1 引 言

自从 1977 年报道了第一个光纤水听器以来^[1,2],由于其在军事和民用上的巨大应用前景,获得了迅速的发展。与传统的压电水听器相比,光纤水听器具有灵敏度高、动态范围大、检测频带宽、结构设计灵活、抗电磁干扰等诸多优点^[36]。基于各种工作原理的光纤水听器已经被演示验证成功,其中

基于相干检测技术的干涉型光纤水听器被认为最有发展前途^[3]。

当受到声压作用时,干涉仪输出一个相位调制信号,通过检测相位的变化,就可获得外界声场的信息。由于受到温度变化、压力波动、机械抖动等因素的影响,干涉仪两臂的相移会随机漂移,从而引起信号幅度的随机涨落,即所谓的相位衰落现象。伴随

作者简介: 王泽锋(1980—),男,湖南临武人,博士研究生,主要从事光纤信息技术和光纤传感技术方面的研究。

E-mail: hotrosemaths@163.com

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

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

收稿日期: 2006-04-25; 收到修改稿日期: 2006-09-07

着光纤水听器技术的不断发展,出现了许多抗相位衰落的信号检测方法,主要包括各种外差法^[7,8]、主动相位补偿^[4,9]、相位载波调制解调^[10~13]等。早期的外差法和主动相位补偿法操作简单,但传感部分含有源器件,大大降低了系统的可靠性。差分延迟外差和光程匹配外差虽然可以实现传感部分的全光纤化,但光路复杂,不便于操作。相位载波调制解调实现了传感部分的全光纤化和解调的数字化^[12],但算法复杂,而且由于受到光源调制频率的限制,信号检测的频带宽度有限。可见,每种检测方法都有优缺点,应根据实际应用的需要选择合适的方法。

本文提出了一种基于光源频率调节的主动相位补偿的信号检测方法,通过数-模转换器输出一个直流信号调节光频,控制干涉仪的工作点,让系统一直工作在最灵敏的检测区域。由于传感部分不含有源器件,且解调算法简单、检测频带宽,该方法具有广泛的应用前景。

2 检测原理及参量获取

2.1 检测原理

如图 1 所示,干涉仪输出的干涉信号经光电探测器转化成电信号后可以写成

$$V = A + B \cos \phi, \quad (1)$$

式中 ϕ 为干涉仪两臂的相位差, A 、 B 为与输入光功率以及探测器的响应度成正比的常量, B 还与干涉仪的相干系数有关。设干涉仪臂差为 l , 纤芯折射率为 n , 光源频率为 ν , 则相位差可以写成

$$\phi = \frac{2\pi n l \nu}{c}, \quad (2)$$

式中 c 为光速。由于受外界环境变化的影响以及声场的作用,臂差 l 和纤芯折射率 n 都会发生变化。另外,实验中需要调节光源频率,因此有 $l = l_0 + \Delta l$, $n = n_0 + \Delta n$, $\nu = \nu_0 + \Delta \nu$ 。其中 l_0 、 n_0 、 ν_0 分别为干涉仪初始臂差、纤芯折射率、光源频率, Δn 为纤芯折

射率的变化,主要受环境温度变化的影响; Δl 为干涉仪臂差的变化,包括外界声场项 Δl_s 和各种噪声引起的变化 Δl_n , 因此有 $\Delta l = \Delta l_s + \Delta l_n$; $\Delta \nu$ 为光源频率的变化。将它们代入(2)式,并略去高阶小量,可以得到

$$\phi = \phi_0 + \phi_n + \phi_s + \phi_m, \quad (3)$$

式中 ϕ_0 为干涉仪初始相位差:

$$\phi_0 = 2\pi n_0 l_0 \nu_0 / c,$$

ϕ_n 为各种环境噪声引起的随机相位变化:

$$\phi_n = 2\pi(l_0 \nu_0 \Delta n + n_0 \nu_0 \Delta l_n) / c,$$

ϕ_s 为声信号引入的相移:

$$\phi_s = 2\pi n_0 \nu_0 \Delta l_s / c,$$

ϕ_m 为光源频率调节引起的相移:

$$\phi_m = 2\pi n_0 l_0 \Delta \nu / c.$$

若定义系统的工作点为

$$\phi_p = \phi_0 + \phi_n + \phi_m, \quad (4)$$

将(4)式和(3)式代入(1)式得到:

$$V = A + B \cos(\phi_s + \phi_p), \quad (5)$$

假设声场为单频正弦信号,则有 $\Delta l_s = K \sin \omega_s t$, 其中 K 为与光纤水听器声压灵敏度有关的系数, ω_s 为声信号的角频率。将 Δl_s 代入 ϕ_s 的表达式中可以得到: $\phi_s = C_s \sin \omega_s t$, 其中 C_s 为声信号引起的相位变化的最大值, $C_s = 2\pi n_0 \nu_0 K / c$ 。将 ϕ_s 代入(5)式,并用第一类贝塞尔函数展开得到

$$V = A + B \left\{ \left[J_0(C_s) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(C_s) \cos 2k\omega_s t \right] \cos \phi_p - 2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(C_s) \sin(2k+1)\omega_s t \right] \sin \phi_p \right\}, \quad (6)$$

式中 $J_k(C)$ 为第一类 k 阶贝塞尔函数。(6)式经低通滤波,去掉所有倍频项得到:

$$V = A + B J_0(C_s) \cos \phi_p - 2 B J_1(C_s) \sin \phi_p \sin \omega_s t, \quad (7)$$

ϕ_n 是一个低频的大幅度随机信号,由(4)式可知, ϕ_p 也是个低频的随机量。若没有 ϕ_m 进行相位补偿,则无法获得稳定的信号输出,而且系统有可能长时间工作在最不灵敏的区域,即 $\phi_p = q\pi$ (q 为整数)。光源调节的目的就是,通过加一个直流电压改变光频,从而在非平衡干涉仪中产生一个相移 ϕ_m , 对 ϕ_n 的变化进行补偿,让系统一直工作在最灵敏的区域,即 $\phi_p = q\pi + \pi/2$ (q 为整数),实际控制过程中一般取 $q = 0$ 。

通常水声检测中遇到的都是微弱信号,即满足 $J_0(C_s) \approx 1$ 和 $J_1(C_s) \approx C_s/2$, 则(7)式可以写成

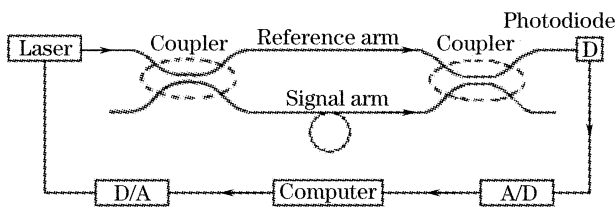


图 1 基于光频调节的信号检测方法示意图

Fig. 1 Sketch map of signal detection based on tuning the frequency of the laser. D/A: digital-analogue converter; A/D: analogue-digital converter; D: detector

$$V = A + B\cos\phi_p - BC_s\sin\phi_p\sin\omega_s t, \quad (8)$$

由于 ϕ_p 变化非常缓慢,因此在时间较短的一段数据上可以认为它是个常量,则(8)式近似为一个含直流量的正弦信号,它的直流量和交流量分别记为 V_D, V_A :

$$V_D = A + B\cos\phi_p, \quad V_A = BC_s\sin\phi_p. \quad (9)$$

由(7)式可以求得系统的工作点 ϕ_p , 计算偏移量 $\Delta\phi_p = \pi/2 - \phi_p$ 。若它大于某一阈值 $\Delta\phi_{pmax}$, 则调整模-数输出的电压使之变化 ΔV , 产生相应的相位变化 $\Delta\phi_p$, 将工作点拉回到 $\pi/2$ 附近。然后采集下一段数据, 同样得到工作点偏移量, 若它大于 $\Delta\phi_{pmax}$, 则再次进行调整。通过这样不断循环, 工作点被一直控制在 $\pi/2$ 附近, 可以获得稳定可靠的输出。

由(9)式可得到信号的幅度 C_s :

$$C_s = V_A / \sqrt{B^2 - (V_D - A)^2}, \quad (10)$$

信号的频率 ω_s 可直接由(1)式的傅里叶变换获得。至此, 实现了声信号的解调。

2.2 参量获取

由上分析可知, 要对工作点进行控制, 必须知道参量 A, B 的值以及 ΔV 与 $\Delta\phi_p$ 之间的关系。一般 ΔV 不大, 工作在电光调制器的线性区, 即所加电压与产生的光频变化成线性关系:

$$\Delta\nu = C\Delta V, \quad (11)$$

式中 C 为电光调制系数。将(11)式代入相位变化与光频变化之间的关系, 得到

$$\Delta\phi_p = \frac{2\pi n_0 l_0 C}{c} \Delta V = k_{\phi/V} \Delta V, \quad (12)$$

式中 $k_{\phi/V}$ 为相位调制系数, 实际测量中, 通常 $k_{\phi/V} = \pi/V_\pi$, V_π 为半波电压, 即相位变化 π 所需的电压。

用一个高频的大幅度线性信号对光源进行调制, 即有 $\phi_m = kt$ 。由于 ϕ_n 变化缓慢, 若此时不加声信号, 即 $\phi_s = 0$, 则(1)式可写成

$$V = A + B\cos(kt + \phi_c), \quad (13)$$

式中 $\phi_c = \phi_0 + \phi_s + \phi_n$ 近似为常量。不难看出, (13)式此时输出为一个含直流分量、初始相位不为零的余弦信号。采集足够长的一段数据, 找到一组相邻的极大极小值, 分别记为 V_{max}, V_{min} , 它们对应的电压值也很容易获得。而余弦信号相邻的极大极小值之间的相位变化为 π , 代入(13)式即可求得 $k_{\phi/V}$ 。 A, B 的值可分别由(14)式、(15)式给出:

$$A = (V_{max} + V_{min})/2, \quad (14)$$

$$B = (V_{max} - V_{min})/2, \quad (15)$$

至此, 得到了工作点控制所需的三个基本参量 $A, B, k_{\phi/V}$ 。

3 实验与结果

为了验证基于光频调节的检测方法的可行性, 搭建了图2所示的测试系统。光纤水听器声压灵敏度通过与标准压电水听器比较的方法获得。为了保证测量结果的准确可靠, 两个水听器探头的声中心必须位于同一深度。信号源输出的信号经功率放大后驱动声压罐, 产生准平面声波。压电水听器和光纤水听器输出的信号, 分别进行放大滤波和光电转换, 然后同时经模-数转换器采集到计算机进行处理。计算得到干涉仪的工作点, 若偏离 $\pi/2$ 的值大于设置的域值, 则经数-模转换器输出一个直流电压调节光频, 将工作点拉回到 $\pi/2$ 附近, 让系统一直工作在最灵敏的检测区域。

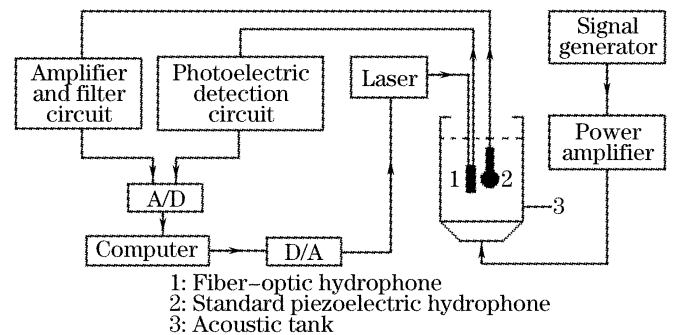


图2 光纤水听器灵敏度测试的实验结构框图

Fig. 2 Experimental diagram of test for sensitivity of fiber-optic hydrophone

编写了实时的数据采集、处理程序, 在频带 20 Hz~6 kHz 上对一给定干涉型光纤水听器进行了测试。干涉仪的初始臂差为 15 m, 光源波长为 1550 nm。经测试, 半波电压为 14.5 V, 可以求得相位调制系数 $k_{\phi/V} \approx 0.22$ rad/V。图3(a)是一组典型的未进行工作点控制时光纤水听器输出的信号, 可以看到信号幅度不稳定, 与分析的一致。图3(b)是工作点被控制在 $\pi/2$ 附近时的稳定输出信号。光纤水听器声压灵敏度频响如图4所示。由于相位载波调制解调系统的光源调制频率为 6.25 kHz, 根据相位载波解调原理可知, 它的有效检测频带约为几十赫兹到 1.3 kHz^[13]。从图4可以看到, 在频带 20 Hz~1.3 kHz 上, 三条曲线基本吻合, 平均声压灵敏度约为 -162.2 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa), 频响波动小于 ± 0.8 dB, 与同类型探头在国防水声一级计量站标定的结果基本一致。受声压罐高频发声质量的影响, 高频对应的频响波动变大。图中峰值对应的频率约为 5.3 kHz, 是该水听器探头结构的共振频率, 与有限元仿真的结果 5.36 kHz 非常吻合^[14]。

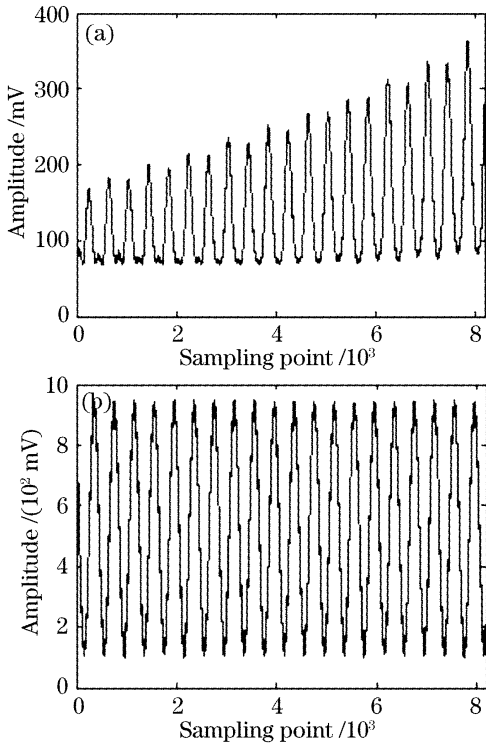


图3 光纤水听器输出信号。(a) 工作点随机漂移，
(b) 工作点控制在 $\pi/2$ 附近

Fig. 3 Output signal of fiber-optic hydrophones.
(a) Without controlling, (b) with controlling $\pi/2$

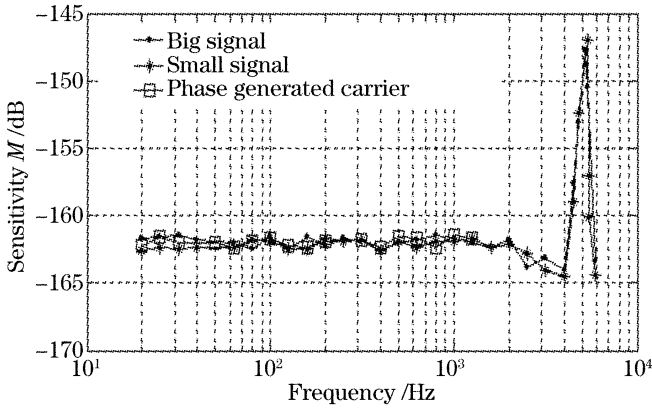


图4 光纤水听器声压灵敏度 M 频响图

Fig. 4 Frequency response of acoustic pressure
sensitivity M of fiber-optic hydrophone

4 误差分析

光纤水听器相位灵敏度定义为声场引起的干涉仪两臂的相位差 $\Delta\phi$ 与光纤水听器声中心处的声压 P 的比值^[15]：

$$M_p = \Delta\phi/P, \quad (\text{rad/Pa}) \quad (16)$$

光纤水听器相位灵敏度级的定义为相位灵敏度与其基准值 M_r 的比值：取以 10 为底的对数乘以 20：

$$M = 20\lg(M_p/M_r), \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

其中基准值 $M_r = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ 。由于用相位灵敏度级来表示更明了，因此通常提到的光纤水听器相位灵

敏度时均指相位灵敏度级。

实验中，利用与标准压电水听器比较的方法得到光纤水听器的声压灵敏度。经简单推导，可以得到光纤水听器相位灵敏度级为

$$M = K_0 + M' + 20\lg(C_s/S), \quad (18)$$

式中 K_0 为压电水听器信号的增益，单位为分贝， M' 为压电水听器的电压灵敏度级，单位分贝， C_s 为声信号引起的相移幅度，单位为弧度， S 为放大滤波后的压电信号幅度，单位为伏。

如果 K_0 、 M' 、 S 波动很小，可以认为其不变，只考虑 C_s 解调算法带来的误差。由于实验所用的光源功率很稳定，而且测试过程中对 A 、 B 的变化进行了实时补偿，因此可认为 A 、 B 不变， C_s 的求解误差主要是小信号近似，即 $J_0(C_s) \approx 1$ 和取 $J_1(C_s) \approx C_s/2$ 带来的。

假设真实的信号幅度和工作点分别为 C_{s0} 、 ϕ_{p0} ，那么由(5)式可以得到真实的信号直流分量和交流分量：

$$V_D = A + B_{J_0}(C_{s0}) \cos \phi_{p0}, \quad (19)$$

$$V_A = 2B_{J_1}(C_{s0}) \sin \phi_{p0},$$

将(19)式代入(8)式即可得到信号幅度的测量值与真实值和工作点之间的关系：

$$C_s = \frac{2J_1(C_{s0}) \sin \phi_{p0}}{\sqrt{1 - [J_0(C_{s0}) \cos \phi_{p0}]^2}}, \quad (20)$$

由(18)式可推得灵敏度误差 ΔM ：

$$\Delta M = |20\lg(C_s/C_{s0})|. \quad (21)$$

由(20)式、(21)式可得 ΔM 与 C_s 、 ϕ_p 之间的关系，仿真结果如图 5 所示。从图中可以看到，灵敏度解调误差随着信号幅度的变大迅速增加；当信号幅度一定时，工作点偏离 $\pi/2$ 越远， ΔM 就越大；信号幅度越小，工作点控制的域值可以越大。测量过程中，信号

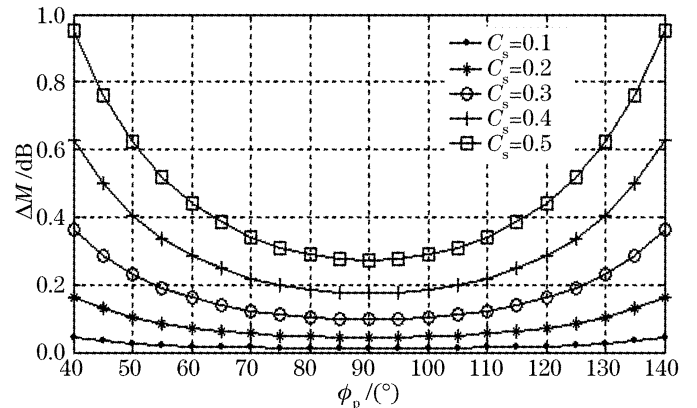


图5 灵敏度误差 ΔM 与工作点 ϕ_p 的关系

Fig. 5 Relation of working point ϕ_p and sensitivity
error ΔM

幅度可以小些,这样精度更高,控制起来更方便。

5 结 论

提出了一种基于光源调节的干涉型光纤水听器的闭环工作点控制检测方法。该方法通过一个直流电信号调节光频,对随机相位噪声进行补偿,将系统的工作点一直控制在 $\pi/2$ 附近,从而可以获得稳定的输出信号。搭建了实验系统,并编写了实时的数据采集、处理、控制程序,对某一干涉型光纤水听器的声压灵敏度进行了测量,实验结果证明了该方法的可行性。通过对灵敏度解调误差的详细分析,可知信号幅度越小,工作点可以变化的范围就越大,这对于实验操作有重要的指导意义。由于传感部分不含有源器件,而且检测频带宽、信号解调算法简单,该方法具有广泛的应用前景。

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. Am.*, 1977, **62**(5): 1302~1304
- 3 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology [J]. *IEE Proc. Radar. Sonar Navig.*, 1996, **143**(3): 204~208
- 4 T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology [J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1982, **MTT-30**(4): 472~511
- 5 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 J.*, 2003, **3**(1): 19~30
- 6 Zhang Xueliang, Zhou Xiaojun, Hu Yongming. All polarization maintaining fiber earth magnetic field sensor [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1516~1519 (in Chinese)
张学亮,周晓军,胡永明.全保偏光纤地磁传感器[J].中国激光,2005, **32**(11): 1516~1519
- 7 J. H. Cole, B. A. Danver, J. A. Bucaro. Synthetic-heterodyne interferometric demodulation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4): 694~697
- 8 T. K. Lim, Y. Zhou, Y. Lin *et al.*. Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **159**(5): 301~308
- 9 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 415~417 (in Chinese)
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, **A29**(5): 415~417
- 10 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1647~1653
- 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 (in Chinese)
曹家年,张立昆,李绪友等.干涉型光纤传感器相位载波调制及解决方案研究[J].光学学报,1999, **19**(11): 1536~1540
- 12 Bo Linhou, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. The improvement on PGC demodulation method based on optical fiber interferometer sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1324~1327 (in Chinese)
柏林厚,廖延彪,张敏等.干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J].光子学报,2005, **34**(9): 1324~1327
- 13 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 (in Chinese)
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
- 14 Li Qiushi, Luo Hong, Meng Zhou *et al.*. Research on the pressure sensitivity of the interferometric fiber-optic hydrophone with a concentric mandrel [J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2005, **19**(4): 402~407 (in Chinese)
李秋实,罗红,孟洲等.同轴干涉型光纤水听器声压灵敏度特性分析[J].测量技术学报,2005, **19**(4): 402~407
- 15 Peng Baojin, Liao mao, Liao Yanbiao *et al.*. Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1633~1638 (in Chinese)
彭保进,廖茂,廖延彪等.光纤水听器灵敏度测试研究[J].光子学报,2005, **34**(11): 1633~1638