

doi: 10.3788/gzxb20124109.1059

# 一种光纤光栅水听器灵敏度校准技术研究

陈毅<sup>1</sup>, 张军<sup>1</sup>, 金晓峰<sup>2</sup>, 黄晟晔<sup>2</sup>

(1 杭州应用声学研究所, 杭州 310012)

(2 浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘 要:**为了校准光纤光栅水听器的灵敏度,开展了光纤光栅水听器灵敏度校准技术研究.本文首先介绍了光纤光栅水听器的工作原理;其次,采用可调谐激光器和带工作点控制的强度调制法,实现了光纤光栅水听器的信号解调和稳态测量;在此基础上,利用比较法建立了一种光纤光栅水听器校准系统,校准频率范围为 20 Hz~10 kHz;最后,在该频率范围内对采用等效相移布喇格光栅研制的一只光纤光栅水听器的灵敏度进行了校准,对系统的测量不确定度进行了估算.结果表明,该系统可准确校准光纤光栅水听器的灵敏度,扩展不确定度为 0.9 dB( $k=2$ ).

**关键词:**校准;灵敏度;光纤光栅水听器;强度调制法;等效相移布喇格光栅

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)09-1059-6

## 0 引言

光纤光栅水听器主要指光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)水听器,它通过外界参量对布喇格波长的调制来获取传感信息<sup>[1]</sup>.随着光纤光栅技术的发展,光纤光栅水听器已成为光纤传感领域和水声工程领域的研究热点.除具备光纤水听器的特点外,光纤光栅水听器还具有传感探头结构简单、尺寸小、易于构成各种形式的光纤传感网络等优点,因此,世界上不少国家均已投入大量人力、财力开展光纤光栅水听器的研究<sup>[2-4]</sup>.

国内许多单位也非常重视光纤光栅水听器技术的发展<sup>[5-10]</sup>,如武汉理工大学、中科院西安光机所、南开大学等都开展了光纤光栅水听器探头技术和信号解调技术研究,取得了较好的效果,并对光纤光栅水听器声学性能的校准和鉴定提出了需求.

从国内外目前公开发表的文献<sup>[7-8, 10-14]</sup>看,还没有见到有关光纤光栅水听器校准系统的报道.但这样一种系统对准确评价光纤光栅水听器的性能有十分重要的作用和意义.为此,本文开展了光纤光栅水听器灵敏度校准技术研究.

本文介绍了光纤光栅水听器工作原理及其信号解调技术,在此基础上利用自由场比较法和驻波管比较法建立一种光纤光栅水听器校准系统,并对我们研制的一种工作频率范围为 20 Hz~10 kHz 的等效相移布喇格光栅(Equivalent Phase Shift Fiber

Bragg Grating, EPS-FBG)水听器<sup>[15]</sup>进行了实际测量.

## 1 光纤光栅水听器工作原理

光纤光栅的布喇格中心波长由纤芯折射率和栅格周期决定<sup>[7]</sup>.当宽带入射光波在置于水下声场的光纤布喇格光栅上传输时,受水声声压作用,引起光纤光栅发生微小的形变,导致光纤光栅的纤芯折射率分布和栅格周期发生变化,使得携带了水声声压信息的部分光谱被反射回来.图 1 所示的是 FBG 水听器传感的基本原理图.

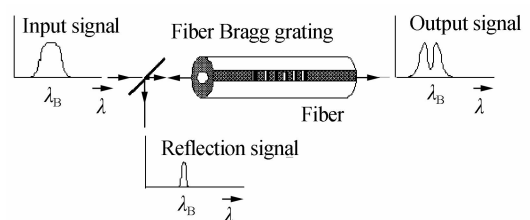


图 1 FBG 水听器传感原理

Fig. 1 Schematic diagram of FBG hydrophone description of the reflection intensity  $I_r$  of the fiber Bragg grating hydrophone

$$I_r = I_{in}R(\lambda_B) \quad (1)$$

式中,  $I_{in}$  为入射进光纤光栅的光强;  $R(\lambda_B)$  为光纤光栅的反射函数;  $\lambda_B$  为反射光中心波长.

假设水中传播的水声声压  $p(t)$  的表达式为

$$p(t) = p_0 \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

式中,  $p_0$  为声压幅度;  $\omega_0$  为角频率;  $t$  为时间.

第一作者:陈毅(1973-),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为水声计量测试技术. Email: y.chen@163.com

收稿日期:2012-03-29;修回日期:2012-05-22

当式(2)的声压作用于光纤布喇格光栅水听器时,光纤光栅的反射函数会发生相应的变化,则

$$R(\lambda_B) = R(\lambda_B)|_{p=0} + \frac{\partial R(\lambda_B)}{\partial p(t)} p_0 \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

对于 FBG 水听器来说,其输出光强应当是光纤光栅反射光中心波长的函数. 由于光纤布喇格光栅反射中心波长的移动很小,因此,可认为光纤光栅水听器输出的光强变化与反射中心波长的移动呈线性关系. 将式(3)代入式(1),得<sup>[7]</sup>

$$I_r = I_{in} R(\lambda_B)|_{p=0} + I_{in} \frac{\partial R(\lambda_B)}{\partial p(t)} p_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4)$$

若单位声压作用下光纤布喇格光栅反射波长的变化量为  $\xi$ , 则有<sup>[5]</sup>

$$I_r = I_{in} R(\lambda_B)|_{p=0} + I_{in} \frac{\partial R(\lambda_B)}{\partial p(t)} \xi p_0 \sin(\omega_0 t) \quad (5)$$

由式(5)可以看出,反射光强  $I_r$  中的交变分量与 FBG 水听器周围的声压成比例关系. 因此,检测光电二极管输出的交变电流或电压信号,通过解调得到光纤光栅水听器输出的电压值,除上光纤光栅水听器所处声场的声压值,即可得到光纤光栅水听器的灵敏度值.

在本文中,校准用光纤光栅水听器采用 EPS-FBG 制成. EPS-FBG 是一种由采样光栅衍化而来的近似相移光栅,其性能与一般的相移光栅相媲美,但制作方法却简单许多. 图 2(a) 所示为某一 EPS-FBG 的透射光谱曲线,中间有一个相当窄的透射峰(可达到几个皮米). 与图 2(b) 所示的普通切趾 FBG 相比, EPS-FBG 在工作点 A 的斜率大约是普通切趾 FBG 在其工作点 A' 的斜率的 10 倍. 因此, EPS-FBG 水听器的灵敏度也比普通切趾 FBG 水听器要

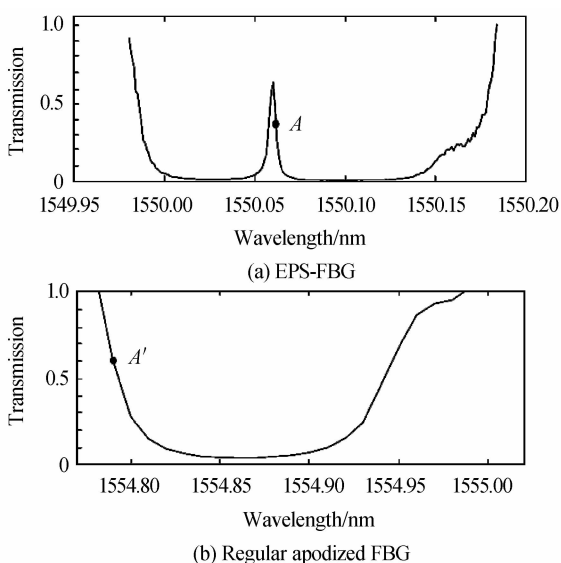


图 2 EPS-FBG 与普通切趾 FBG 透射光谱的比较  
Fig. 2 Comparison of the optical transmission spectrum of an EPS-FBG and a regular apodized FBG

高近 20 dB. 因此,用其代替普通均匀光栅作为光纤光栅传感器的核心部件能大大提高光纤光栅传感器的灵敏度和线性度.

## 2 带工作点控制的信号解调

### 2.1 强度调制法工作原理

光纤光栅水听器常用的信号解调方法有强度调制法和非平衡干涉仪法等. 非平衡干涉仪法的优点是灵敏度高,但由于光纤光栅反射谱线的带宽有限,限制了检测准确度的提高,且目前的解调频率上限还无法达到 10 kHz,因此,本文采用强度调制法进行信号解调. 由可调谐激光器发射波长变化的扫频信号,找到光纤光栅水听器的工作点;然后,将激光器输出光信号的波长设置为该工作点波长  $\lambda_B$ ;再对光纤光栅水听器输出的光信号进行解调和测量. 强度调制法的基本原理<sup>[9]</sup>如图 3 所示.

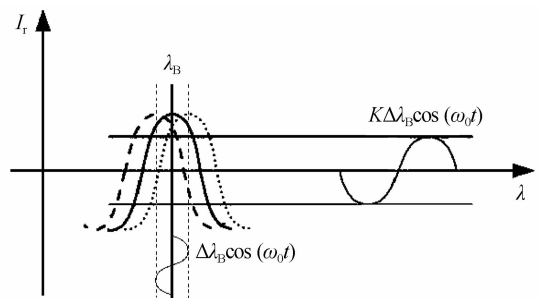


图 3 强度调制法工作原理

Fig. 3 Schematic diagram of intensity modulation method

设工作点光强随波长变化的斜率为  $K$ . 如果光纤光栅的中心波长不发生移位,则此时光电二极管输出的光强值为系统工作点处的光强值  $V_0$ , 为常量;当外界信号所引起的光纤光栅中心波长移动为  $\Delta\lambda_B \cos(\omega_0 t)$  时,此时光电二极管输出的信号变为  $V_0 + K\Delta\lambda_B \cos(\omega_0 t)$ . 可见实现了外界信号的检测.

### 2.2 工作点控制方法

由于光纤光栅的中心波长容易受外界温度等因素影响而发生漂移,因此,除了在光纤光栅水听器制作时采用适当的方法进行温度补偿<sup>[15]</sup>外,还需要在测量中对工作点进行控制<sup>[10]</sup>,以确保测量结果能真实反映光纤光栅水听器的实际性能.

在本文中,采用如下的方法对光纤光栅水听器的工作点进行控制:

1) 控制可调谐激光器进行光频扫描,并读取光栅水听器一段波长上的反射光信号强度,找到光栅水听器的反射光谱,确定系统理想的工作点;

2) 可调谐激光器输出该工作点波长的激光通过光纤直接进入光栅水听器,在水声声压信号作用下,光纤光栅的中心波长发生改变,从而对光功率进行强度调制;

3) 经水声信号调制后的激光被传感光栅反射回来, 经过环形器和耦合器后分为两路, 其中, 功率大的一路接到解调仪进行解调处理, 转化为电信号后送示波器进行观察, 功率小的一路则接到光功率计进行测量和信号采集;

4) 对采集到的信号进行数据分析, 计算实际工作点与理想工作点的偏差, 再根据偏差进行修正控制, 确保系统一直工作在理想工作点位置。

### 3 光纤光栅水听器灵敏度计算

#### 3.1 自由场条件下的灵敏度校准

自由场测量时, 发射换能器、标准水听器、光纤光栅水听器被同时置于自由场声场中, 其参考中心在同一水平面上成一直线布置(见图 4(a)). 其中, 发射换能器与光纤光栅水听器、标准水听器的参考中心距离分别为  $d_1$  和  $d_0$ . 在自由声场作用下, 分别对光纤光栅水听器和标准水听器输出的信号进行测量. 光纤光栅水听器的自由场灵敏度[级](基准值为  $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ )为<sup>[16]</sup>

$$M = 20\lg U_1 - 20\lg U_0 + 20\lg d_1 - 20\lg d_0 + M_0 \quad (6)$$

式中,  $U_1$  为光纤光栅水听器经光电转换、解调后得到的电压值;  $U_0$  为标准水听器输出的开路电压值;  $M_0$  为已知的标准水听器灵敏度级。

#### 3.2 声压场条件下的灵敏度校准

由于发射换能器和测量声场的限制, 低频段的测量通常在声压场中进行. 实际测量时, 光纤光栅水听器和标准水听器被同时置于驻波声场中, 两水听器的参考中心在同一水平面上(见图 3(b)). 在驻波声场作用下, 分别对光纤光栅水听器和标准水听器输出的信号进行测量. 光纤光栅水听器的声压灵敏度[级]为<sup>[17]</sup>

$$M = 20\lg U_3 - 20\lg U_2 + M_0 \quad (7)$$

式中,  $U_3$  为光纤光栅水听器经光电转换、解调后得到的电压值;  $U_2$  为标准水听器输出的开路电压值。

### 4 校准系统构成及测量过程

#### 4.1 系统构成

图 4 给出了光纤光栅水听器校准系统框图. 其中, 计算机及其外设组成控制和管理分系统, 通过通用接口总线控制和管理信号源、采集卡等仪器工作; 信号源、功率放大器和发射换能器等组成声信号发射分系统, 用于产生校准所需的测量声场; 可调谐激光器、光功率计、环形器、解调仪等组成光信号发射解调分系统, 用于产生、接收和解调光信号; 滤波器、采集卡等组成电信号测量分系统, 用于电信号的接收和测量。

#### 4.2 声场条件

20 Hz~1 kHz 频段的测量在驻波管中进行. 该驻波管是一圆柱形充水金属圆管, 底部安装一电动发射换能器, 在功率放大器驱动下向管中液柱发射声波, 产生测量所需的校准声场. 为避免管壁振动影响管中稳定平面波的传播, 采用刚性厚壁管设计, 使管壁厚度和液柱半径相等。

对 1.25 kHz 以上频段, 由于驻波效应的存在, 管中同一水平面上声波幅度分布的不均匀性加大. 因此, 为保证校准的准确度, 较高频率的测量通常在自由场中进行, 测量水池采用长 50 m、宽 15 m、深 10 m 的全消声水池. 该水池吸声效果良好, 由于采用有效的减隔振处理, 噪音较低, 在 1 kHz 时低于零级海况。

#### 4.3 测量过程

灵敏度测量时, 计算机控制信号源输出一电压信号, 通过功率放大器放大后激励发射换能器工作, 产生测量所需的声场条件. 光纤光栅水听器和标准水听器分别置于声场中接收声信号. 可调谐激光器

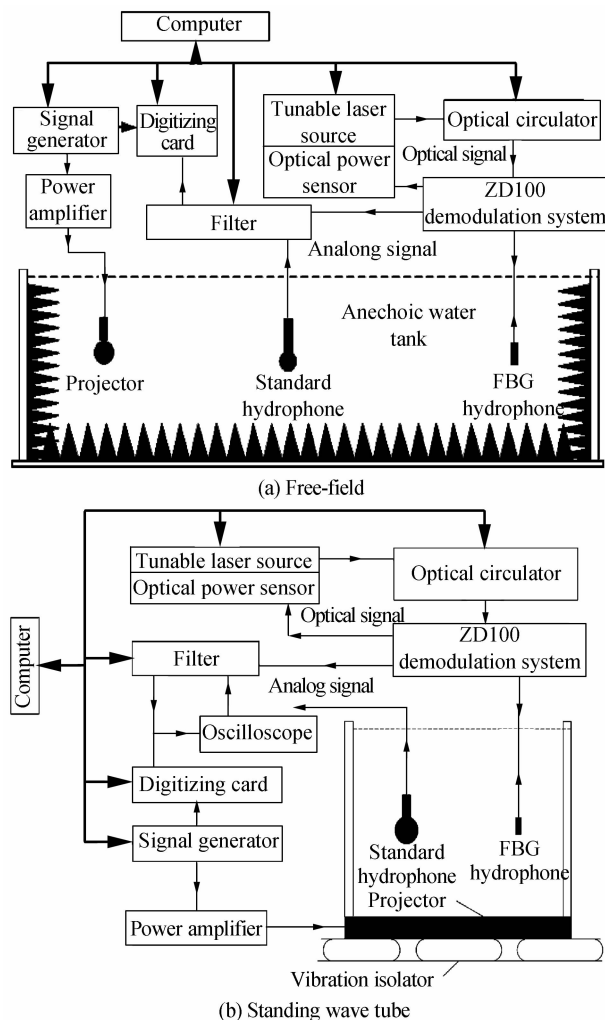


图 4 光纤光栅水听器校准系统框图  
Fig. 4 Diagram of calibration system of FBG hydrophone

输出光信号经过环行器后输入光纤光栅水听器, 受声压信号调制后的光信号由光纤光栅水听器输出, 分别由 ZD100 解调仪进行接收和解调, 解调仪直接输出经光电转换后的电压信号, 经滤波器滤波后由采集卡进行数据采集. 同时, 标准水听器的输出开路电压信号也由滤波器滤波后输入采集卡进行数据采集, 再由计算机进行处理, 得到光纤光栅水听器的灵敏度.

#### 4.4 系统说明

除测量声场、发射换能器和功率放大器不同外, 自由场比较法和驻波管比较法采用的其他设备都相同. 光纤光栅水听器校准系统的自由场比较法校准按照文献[16]中给出的水声换能器自由场比较法进行操作, 驻波管比较法校准结合文献[17]中给出的振动液柱法和密闭腔比较法进行操作, 测量均符合国家计量标准的要求.

### 5 校准用光纤光栅水听器

目前, 各单位研制的光纤光栅水听器大多工作在 3 kHz 以下频率. 因此, 为使光纤光栅水听器校准系统具有更好的适应性, 要求校准频率上限达到 10 kHz. 为此, 利用 EPS-FBG 专门研制了工作频率范围在 20 Hz~10 kHz 的校准用光纤光栅水听器<sup>[15]</sup>. EPS-FBG 水听器的结构示意图见图 5.

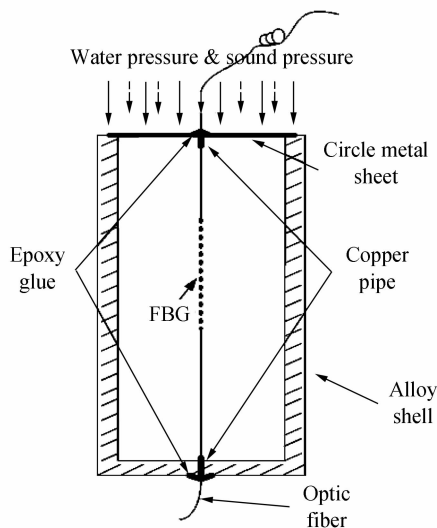


图 5 EPS-FBG 水听器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structure of EPS-FBG hydrophone

可见, 其传感探头的敏感部件是一片很薄的圆形金属薄片. 当水声信号作用在上面时会产生微小的弹性形变, 将水声信号以应力的方式传递给 EPS-FBG, 使它的中心波长随声信号强弱而变化, 对通过 FBG 的激光进行强度调制, 以有效增强 EPS-FBG 对声信号的灵敏度. 水听器外壳采用温度敏感性不

大的合金材料制成, 与两端的小铜管一起对 EPS-FBG 起到了温度补偿的作用. 各金属部件通过激光点焊焊接, 光纤与小铜管之间用紫外胶粘合, 防止水听器漏水. 该水听器体积较小, 能承受较高静水压.

### 6 校准结果与分析

利用本文建立的光纤光栅水听器校准系统, 分别在自由场和驻波管中对 203 # EPS-FBG 水听器进行了多次校准, 表 1 和表 2 分别给出了其中一组灵敏度校准结果.

表 1 驻波管中光栅水听器灵敏度校准结果  
Table 1 Calibration results of sensitivity of FBG hydrophone in standing wave tube

$f$ / Hz	$M$ / dB	$f$ / Hz	$M$ / dB
20	-167.5	200	-168.2
25	-168.0	250	-169.4
31.5	-168.0	315	-166.9
40	-167.4	400	-167.4
63	-167.8	500	-167.3
80	-168.4	630	-167.4
100	-167.9	800	-167.4
125	-168.0	1 000	-167.2
160	-167.9	1 250	-165.6

表 2 自由场中光栅水听器灵敏度校准结果  
Table 2 Calibration results of sensitivity of FBG hydrophone in free-field

$f$ / kHz	$M$ / dB	$f$ / kHz	$M$ / dB
1	-167.8	4	-160.1
1.25	-167.5	5	-170.5
1.6	-167.6	6.3	-176.6
2	-165.3	8	-182.9
2.5	-163.5	10	-186.5
3.15	-154.5	---	---

由表 1 和表 2 的数据可以发现, 在 1.25 kHz 频率点, 两种声场条件下得到的校准结果相差较大, 为 1.9 dB. 在 1 kHz 频率点, 两者相差较小, 为 0.6 dB. 此时, 不同频段、不同声场条件下得到的校准结果呈现出较好的一致性和衔接性. 在这两种不同声场中, 对 EPS-FBG 水听器进行了 6 次重复测量, 其中, 驻波场中两次测量间的最大偏差为 0.4 dB, 自由场中两次测量间的最大偏差为 0.3 dB, 说明校准系统具有很好的重复性.

不确定度分析和估算<sup>[18]</sup>表明, 驻波管中光纤光栅水听器灵敏度校准的扩展不确定度为 0.8 dB ( $k=2$ ), 自由场中灵敏度校准的扩展不确定度为 0.9 dB ( $k=2$ ). 因此, 校准系统的扩展不确定度为 0.9 dB ( $k=2$ ).

### 7 结论

通过以上研究, 本文探索性地建立了一种基于

可调谐激光器和强度调制解调法的光纤光栅水听器校准系统, 可用于 20 Hz~10 kHz 频率范围内光纤光栅水听器灵敏度的校准。

校准得到的灵敏度是相对于电压的, 该值容易受激光器光功率、光电二极管放大倍数等影响。为此, 文献[19]提出了波长漂移率的概念, 即单位声压作用下光纤光栅水听器波长漂移大小, 它扣除了光电二极管放大倍数和工作点光强随波长变化斜率  $K$  的影响, 更能反映光纤光栅水听器的真实性能。

但光纤光栅水听器是一种新型的光纤水听器, 与干涉型光纤水听器相比, 光纤光栅水听器的技术没有完全固化, 还处于不断探索和发展之中。一些新的概念和定义还没有完全被水声界所理解与接受, 即使在研究和制作光纤光栅水听器的单位中, 有的单位和定义(如波长漂移率<sup>[10,19]</sup>)还没有完全取得一致, 另外还需建立精确测量  $K$  系数的方法, 使校准系统保持较高的测量准确度。

因此, 本文建立的校准系统适合于光纤光栅水听器灵敏度的校准, 但在给出校准结果时, 应指明激光器输出的光功率和所选取工作点的位置, 确保测量的重复性和可信性。

#### 参考文献

- [1] ZHANG Ren-he, NI Ming. Principle and applications of the fiber optic hydrophone[J]. *Physics*, 2004, **33**(7): 503-507.  
张仁和, 倪明. 光纤水听器的原理与应用[J]. *物理*, 2004, **33**(7): 503-507.
- [2] KERSEY A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology[J]. *Optic Fiber Technology*, 1996, **2**(3): 291-317.
- [3] TAKAHASHI N, YOSHIMURA K, TAKAHASHI S, *et al.* Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating[J]. *Ultrasonics*, 2000, **38**(1-8): 581-585.
- [4] LI Lan, DONG Xin-yong, ZHAO Chun-liu, *et al.* Research and development of intensity-modulated fiber Bragg grating sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 090603-1-9.  
李岚, 董新永, 赵春柳, 等. 强度解调型光纤布喇格光栅传感器的研究及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 090603-1-9.
- [5] ZHAO Shen, LUO Pei, LIANG Lei, *et al.* Experiment and research of fiber Bragg grating hydrophone[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2004, **23**(6): 12-13.  
赵申, 罗裴, 梁磊, 等. 光纤 Bragg 光栅水听器的实验研究[J]. *传感器技术*, 2004, **23**(6): 12-13.
- [6] ZHENG Li, ZHENG Cheng-dong, HE Jun-hua, *et al.* Bragg grating hydrophone based on dense wave division multiplexing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1348-1350.  
郑黎, 郑成栋, 何俊华, 等. 基于密集波分复用技术的 Bragg 光栅水听器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1348-1350.
- [7] LIU Bo, CAO Ye, LUO Jian-hua, *et al.* Researching on the experiment of fiber Bragg grating hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 711-715.  
刘波, 曹晔, 罗建花, 等. 光纤光栅水听器技术实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 711-715.
- [8] ZHENG Cheng-dong, ZHENG Li, HE Jun-hua, *et al.* Study on characters and experiment of FBG hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1934-1940.  
郑成栋, 郑黎, 何俊华, 等. 光纤 Bragg 光栅水听器特性及实验研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1934-1940.
- [9] TAN Bo, HUANG Jun-bin, WANG Jian-hua, *et al.* A study on a sensitization configuration of FBG hydrophone unit[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2007, **20**(11): 2417-2420.  
谭波, 黄俊斌, 王建华, 等. 一种 FBG 水听器探头增敏结构的研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(11): 2417-2420.
- [10] LI Zhi-zhong, CHENG Yu-sheng, HU Yong-ming, *et al.* Research on a passive fiber grating hydrophone based on polymer side-hole package structure [J]. *Acta Acoustica*, 2008, **33**(5): 469-474.  
李智忠, 程玉胜, 胡永明, 等. 聚合物边孔封装无源光纤光栅水听器[J]. *声学学报*, 2008, **33**(5): 469-474.
- [11] PENG Bao-jin, LIAO Mao, LIAO Yan-biao, *et al.* Study on measuring sensitivity of fiber optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1633-1638.  
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.
- [12] ZHANG Wen-tao, LIU Yu-liang, LI Fang. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **6**(9): 631-633.  
张文涛, 刘育梁, 李芳. 高灵敏度 FGB 水听器[J]. *中国光学快报*, 2008, **6**(9): 631-633.
- [13] LI Dong-ming, CHEN Jun, GE Hui-liang, *et al.* Passive interferometric hydrophone of fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(Sup. 2): 83-86.  
李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 无源干涉型光纤光栅水听器实验研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(Sup. 2): 83-86.
- [14] 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.
- [15] HUANG Sheng-ye, JIN Xiao-feng, ZHANG Jun, *et al.* An optical fiber hydrophone using equivalent phase shift fiber Bragg grating for underwater acoustic measurement [J]. *Photonic Sensors*, 2011, **1**(3): 289-294.
- [16] GB/T 3223-1994. Acoustics Free-field calibration method of underwater transducer [S]. Beijing: China Standard Press, 1994.  
GB/T 3223-1994, 声学 水声换能器自由场校准方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [17] GB/T 4130-2000. Low frequency calibration method of hydrophone[S]. Beijing: China Standard Press, 2000.  
GB/T 4130-2000, 声学 水听器低频校准方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [18] JJF 1059-1999. Assessment and expression of measurement uncertainty[S]. Beijing: China Metrology Press, 1999.  
JJF 1059-1999, 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社, 1999.
- [19] TAN Bo, HUANG Jun-bin, LI Ri-zhong, *et al.* Discussion on the sensitivities of two kinds of hydrophone based on fiber grating[J]. *Applied Acoustics*, 2008, **27**(3): 227-233.  
谭波, 黄俊斌, 李日忠, 等. 对基于光纤光栅的两种水听器灵敏度的讨论[J]. *应用声学*, 2008, **27**(3): 227-233.

## A Calibration Technique of Sensitivity of Fiber Grating Hydrophone

CHEN Yi<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, JIN Xiao-feng<sup>2</sup>, HUANG Sheng-ye<sup>2</sup>

(1 *Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310012, China*)

(*Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

**Abstract:** In order to calibrate the sensitivity of fiber grating hydrophone, a calibration technique of fiber grating hydrophone was studied. In this paper, the working principle of fiber grating hydrophone was introduced firstly. Secondly, using tunable laser and intensity modulation method with work-point controlling, the signal demodulation and stably measurement of fiber grating hydrophone was realized. Based on these methods, a calibration system of fiber grating hydrophone was established using comparison methods, and its calibration frequency range was 20 Hz to 10 kHz. Finally, using this calibration system, the sensitivity of a fiber grating hydrophone made of equivalent phase shift fiber Bragg grating was calibrated in the frequency range 20 Hz to 10 kHz, and measurement uncertainty of the system was estimated. The results proved that this system can correctly calibrate the sensitivity of fiber grating hydrophone, with its expand uncertainty (at  $k=2$ ) of 0.9 dB.

**Key words:** Calibration; Sensitivity; Fiber grating hydrophone; Intensity modulation method; Equivalent phase shift fiber Bragg grating