

光纤水听器灵敏度测试研究*

彭保进^{1,2} 廖 茂² 廖延彪² 赖淑蓉² 张 敏² 王泽涵²

(1 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江金华 321004)

(2 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要 研制了一套简单可行的光纤水听器灵敏度校准装置, 提出了一种简便的测量方法——对比法: 将标准压电水听器探头和光纤水听器探头置于同一声场中, 并将两探头的输出同时接到数字示波器上进行比对测量. 研究表明, 振动系统中的盛水容器具有一定的壁厚(>10 mm 或 1/10 桶的外径)时, 可将振动系统的谐振峰移出工作频段范围(3~1000 Hz)外. 利用此装置结合对比法, 校准系统简单, 校准速度快, 实验的误差小于 0.5 dB, 能满足一般光纤水听器灵敏度的校准需求.

关键词 光纤水听器; 相移灵敏度; 声压灵敏度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

在光纤水听器^[1~3]相移灵敏度的校准^[4]方面, 目前尚无成文的国家标准可供参考, 已见报导的常规方法是利用频谱分析仪等昂贵仪器得到干涉光信号的各次谐波幅度值, 采用比值法去掉其它参数和外界干扰^[5,6], 经相应数据处理, 从标准贝塞尔函数的比值表中得到. 此方法的不足是实验装置比较复杂、成本高. 本文参考国家标准中的“声学水听器低频校准方法”(GB/T4130-2000), 提出了一种较简便的测量方法. 另外, 研究过程中发现国家标准的振动液柱法中未对装置中关键部件(盛水容器)的壁厚作出限制有一定的缺陷, 壁厚的限制对实验结果的准确性至关重要. 本文就以上两方面作了论述, 并给出实验装置的设计方法和相应的测试结果.

1 干涉型光纤水听器的原理

图 1 为 Michelson 相位调制型光纤干涉仪结构示意图. 由激光器发出的相干光经光隔离器和耦合器以后一分为二分别送入二根长度基本相同的单模光纤(即干涉仪的两臂, 其一为信号臂, 另一为参考

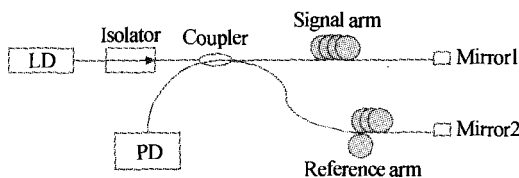


图 1 Michelson 光纤干涉仪的典型结构
Fig. 1 The typical structure figura of Michelson fiber interferometer

臂), 而后被反射镜(mirror1&2)反射, 在耦合器的输出端发生干涉. 显然, 这是一种双光束干涉仪, 干涉光的幅度与信号光及参考光的幅度有关, 其相位为两臂光相位之差. 干涉场光强分布为^[7]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi) = A + B \cos(\Phi) \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{2\pi n l}{\lambda} = S + N \quad (2)$$

式(1)右端是光电转换的信号, I_1, I_2 分别为干涉仪两臂单独存在时的光强, 在检测时通常可以看作直流项对待. $2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi)$ 表示干涉效应, 当 $\Phi = 2m\pi$ 时, 为干涉场的极大值, 式中 m 为干涉级次. 式(2)中的 Φ 为干涉仪两臂光波的相位差, 它可以表示为因为环境波动引起的随机漂移信号 S 和待测信号 N 之和, 由光波波长 λ 、光纤折射率 n 、以及光纤两臂长度之差 L 共同决定. 在波长一定的情况下, 改变 nL (两臂光程差), 就改变了干涉信号的相位差, 从而实现传感功能.

干涉光信号由光电转换器 PD 转换为电信号. 通过检测电信号的变化, 就得到相应的干涉光信号的相位变化.

2 光纤水听器相移灵敏度的校准方法

单模光纤中, 光的传导只考虑由光纤长度和折射率引起的光相移, 它的表达式为 $\phi = knL$ (式中, k 为光波波数; n 为纤芯折射率; L 为敏感光纤长度). 在交变声场 P 的作用下, 干涉仪的相位变化为^[8]

$$\Delta\phi = kL \left(\frac{\partial n}{\partial P} + \frac{n}{L} \frac{\partial L}{\partial P} \right) \Delta P \quad (3)$$

设声压变化 $\Delta P = P_0 \cos(\omega_s t)$, 式中 P_0 为声压幅值, ω_s 为声信号的角频率. 则

$$\Delta\phi = kLmP_0 \cos(\omega_s t) = V \cos(\omega_s t) \quad (4)$$

式中 $m = \frac{\partial n}{\partial P} + \frac{n}{L} \frac{\partial L}{\partial P}$; $V = kLmP_0$, 为声信号引起的

*海洋 863 项目(No. 2001AA602011-11)、浙江省科技计划项目(No. 2005C31011)资助
Tel: 0599-2298824 Email: jhpbj@zjnu.cn
收稿日期: 2004-06-10

光纤水听器的光相移的幅值。由此得光纤水听器的相移灵敏度为

$$M_p = \frac{\Delta\phi}{\Delta P} = \frac{V \cos(\omega_s t)}{P_0 \cos(\omega_s t)} = \frac{V}{P_0} \quad (5)$$

对于零差式光纤水听器(参考光和信号光具有相同频率)^[6],由光纤干涉仪的输出光强式有

$$I = A + B \cos(V \cos(\omega_s t) + \theta_0) \quad (6)$$

进行贝塞尔展开后得

$$I = A + B(\cos \theta_0 (J_0(V) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(V) \cdot \cos(2n\omega_s t) - \sin \theta_0 (2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} J_{2n-1}(V) \cdot \cos((2n-1)\omega_s t))) \quad (7)$$

式中, A 为背景光强, B 为干涉光幅度, 都是与两臂光强和偏振态相关的常数; V 被称为贝塞尔宗量, 是声信号引起的光相移的幅值; θ_0 为声信号以外的外界因素引起的光相移, J_0, J_{2n} 和 J_{2n-1} 分别为零阶、2n 阶和 2n-1 阶一类贝塞尔函数。

从式(7)可以清楚地看出与声信号有关的基波信号和各次谐波信号。其中基波信号为 $2B \sin \theta_0 J_1(V) \cdot \cos(\omega_s t)$, 二次谐波信号为 $2B \cos \theta_0 J_2(V) \cdot \cos(2\omega_s t)$, 三次谐波信号为 $2B \sin \theta_0 J_3(V) \cdot \cos(3\omega_s t)$, 其中 $\sin \theta_0, \cos \theta_0$ 因子说明它受外界因素调制, 使基波随干扰成正弦变化。

由上述分析可得测量光纤水听器相移灵敏度的不同方法。由式(5)可知, 只要测出声压幅值和光相移幅值, 就能测出相移灵敏度。其中声压幅值已有标准测量方法, 例如用标准压电水听器置换法或其他声学测试手段可以测量光纤水听器所在处的声压, 困难在于如何通过实验测量相位移动幅值也即贝塞尔宗量。

如果用常规的测定方法, 则由式(7)可知, 干涉光强信号的各次谐波的系数中包含了贝塞尔宗量 V 的信息, 将光电检测器的输出送到频谱分析仪, 就可以得到各次谐波的幅度值。而要从这些幅度值直接得到的 V 值, 还需采用比值法去掉其它参数和外界干扰。考虑到奇次谐波和偶次谐波分别受 $\sin \theta_0, \cos \theta_0$ 因子的调制, 可采用两个不同的奇次谐波或偶次谐波相除, 并把得到的比值送入计算机, 从标准贝塞尔函数的比值表中得到要求的贝塞尔宗量。

上述方法的不足之处是实验装置比较复杂、成本高。本文参考国家标准中的“声学 水听器低频校准方法”, 提出了一种简便的测量方法: 对比法。其原理是将标准压电水听器探头和光纤水听器探头置于同一声场(对声源而言位置靠近或对等)中, 并将两探头的输出同时接到数字示波器上进行比对测量(原理如图 2)。

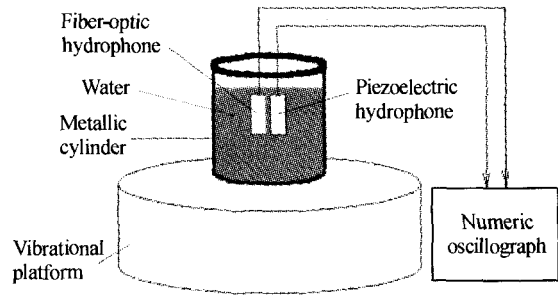


图 2 光纤水听器灵敏度校准系统的装置
Fig. 2 The figure of sensitivity calibration system for fiber-optic hydrophone

考虑到桶内和振动台面的振动情况相差较大, 故未采用在国家标准中建议的用放在振动台面上的加速度计, 改用标准压电水听器(型号 RAS-2, 七一五研究所制造。频响在 3 Hz~1 kHz 范围内平坦, 约为 -178.5 dB, 灵敏度起伏 < 0.6 dB), 并将其与被测光纤水听器探头同时置于校准容器(见图 1 的金属圆桶)中。实验中所用振动台型号为 2101A(中国航天科技集团第 702 研究所制造)。

图 3 为通过实验得到的几个典型 V 值所对应的时域波形, 上方的曲线为与光纤水听器处于同一测量位置(或对等位置)的标准压电水听器的输出(直接反映声压信号的强弱), 下方的曲线为光纤水听器输出经光电转换头直接接入示波器所得波形。

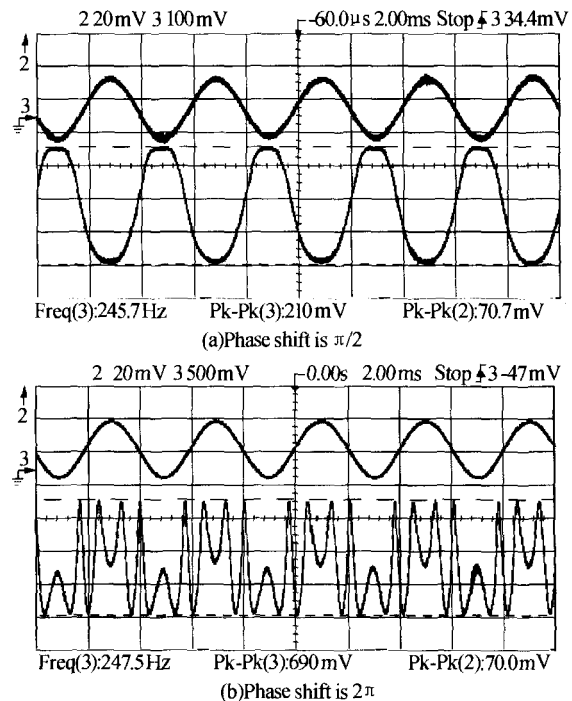


图 3 实验中对几个典型相移值的输出波形
Fig. 3 Several typical output waveforms of phase shift

实验时(以测量某一频率下的相移灵敏度为例), 先调节声发射器的发射频率在某一指定值, 从零开始缓缓增大声发射器的发射功率。随着声发射功率的增大可明显见到水听器输出波形相移的改变。

借助示波器的垂直指示线及各通道信号显示的水平位置灵活可调的功能,可以方便地调节至合适的输出声压使光纤水听器的输出波形与图 3 中相移为 2π 时的时域波形吻合,则根据标准压电水听器的声接收电压灵敏度和示波器的输出可得到此时水听器处的声压幅值 P_0 ,从而得到该频率下的相移灵敏度为 $2\pi/P_0$.

值得一提的是,水听器输出波形还会随光功率大小和光电转换电路的放大倍数的变化而不同,但这些因素仅引起水听器输出波形幅度的变化,不会影响其相移值的检测.另外,因干涉仪可能会有随机相位漂移,使两臂相位差并不总等于 $\pi/2$,故时域波形中一周期内的两个半峰并不总在中部相接,相接点可能会上下移动.由于这种情况不引起相接点的水平移动,所以并不影响对图 3 中“ 2π ”的确定(实际操作时可将示波器的垂直指示线调节至相接点位置).

实验结果与式(4)的理论计算是吻合的.实验的误差 < 0.5 dB,可以满足一般光纤水听器相移灵敏度的校准需求.此校准法最大的优点在于:校准系统简单,校准速度快,无需频谱分析仪等专用仪器即可进行,适用范围广.

3 振动台盛水容器研究

用图 2 所示系统检测光纤水听器声压灵敏度的实验中发现,测试所用的盛水容器对实验的结果有很大影响.

3.1 利用 3 mm 的薄铁桶作盛水容器

当图 2 中的圆筒是用外径 142 mm,内径 139 mm,高度 350 mm,底厚 3 mm 的薄铁桶时,测试过程中保持电磁振动台的驱动电流不变,对整个频率范围扫描.可以看出,在振动台上固定薄铁桶后,系统的振动频响特性很不平坦,有多个峰值(如图 4. 在水柱深 294 mm,水听器声中心入水 200 mm 时测得).分析其原因,在于桶壁太薄,桶的低阶固有频率和固有振型都在工作频段内,且随着桶内液柱的升高,振动模型的固有频率还将下降,使得桶内水的振动也出现多个峰值.振动台工作特性的不平坦,必然导致同一驱动电流情况下桶内声压频响特性的不平坦,使水听器探头测量所得的电压响应曲线不平坦.在振动台出现谐振峰的地方,用振动台面上的加速度计来校准水听器的结果必然是不准确的.因为在谐振状态下,台面和桶内的振动情况会相差很大,即使是桶内同一高度处各点的振动情况,也因各阶振型的影响而相差较大,这时,即使用置换法或同时比较法校准^[9],也不能将这种影响完全归一.

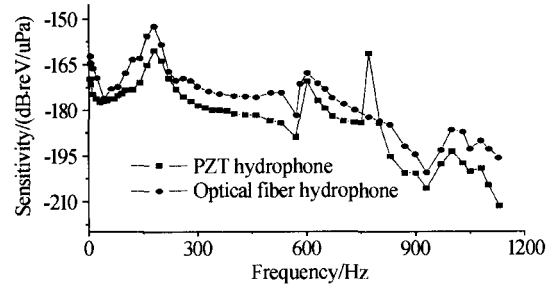


图 4 水听器探头和压电水听器探头在薄铝桶中的灵敏度频响曲线

Fig. 4 The sensitivity frequency response curve of fiber hydrophone probes and piezoelectric hydrophone probes in flimsy aluminium barrel

由图 4 可以看出,光纤水听器和压电水听器的频响曲线的趋势是大体一致的,但并不完全一致,尤其是在 770 Hz 附近,与光纤水听器相比,压电水听器的响应曲线多了一个峰,这可能与光纤水听器和压电水听器的结构尺寸等相差较大有关.采用置换法时,压电水听器入水中后使测试系统在 770 Hz 处产生了一个谐振峰,而光纤水听器入水时没有这个峰.不考虑这个谷,在 3 Hz~1000 Hz 范围内,光纤水听器的灵敏度起伏 < 10 dB.

为了改善系统性能,提高测试的精度,必须改善桶的振动特性,使测试系统在 3~1000 Hz 范围内尽可能少出现或不出现谐振峰.基于此目的,实验中重新设计了桶的结构和尺寸.

3.2 10 mm 厚铝桶铁桶作盛水容器

为提高振动系统的性能,尽可能将谐振峰移出工作频段范围(3~1000 Hz)外,将桶壁的厚度增加为 10 mm;为改善与振动平台固定的结构,将桶的底沿改成圆面,厚度也增加到 16 mm,在底面的外沿上均匀的用螺钉将桶与振动台固紧.桶的外径 145 mm,空心部分高 340 mm.因为 2101A 振动平台的最大载重为 16 kg,为减轻桶的重量,桶使用合金铝材.

此时同一水听器探头的声压灵敏度和标准压电水听器的声压灵敏度的响应曲线分别如图 5:可以

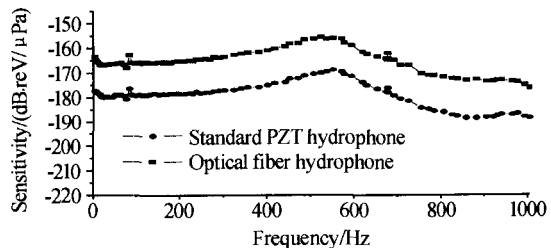


图 5 水听器探头和压电水听器探头在厚铝桶中的灵敏度频响曲线

Fig. 5 The sensitivity frequency response curve of fiber hydrophone probes and piezoelectric hydrophone probes in thick aluminium barrel

看出,与图4相比,固定厚铝桶后系统的振动特性确实有了较大质量的提高. 压电水听器 and 光纤水听器的曲线的趋势几乎完全一样.

可以看到,对于同一个探头,新桶测试的结果比薄铁桶时好了很多.

从两个厚度相差较大的圆筒状测试容器的结果可以看出:测试容器应具有一定的壁厚(>10 mm 或 1/10 桶的外径),并能使其与振动平台固定后的系统振动特性平坦,尽可能将谐振峰移出工作频段外. 这套实验方法是在压电水听器低频校准的国家标准所规定的方法的基础上发展而来,可用于对振动液柱法的现行国家标准进行修补.

4 利用方案二测试光纤水听器探头的特性

相移灵敏度的检测在上面已作介绍,这里给出利用方案二测试我们自制的光纤水听器声压灵敏度的一些实验结果.

图3是在对光纤水听器做相移灵敏度校准时的典型实验波形. 图6给出对光纤探头进行声接收电压灵敏度校准时的典型实验波形,此时光纤水听器采用PZT相位调制解调方案^[9],光纤水听器在示波器上的响应图不再反映相位信号,而是与声压大小成正比的电压输出. 上方的曲线为光纤水听器探头响应输出,下方的曲线为用标准压电水听器测得的振动台振动信号.

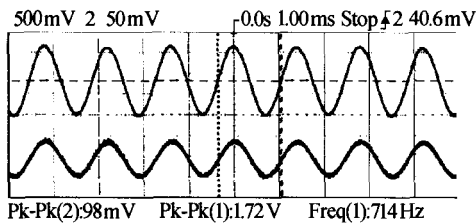


图6 测试光纤水听器的声接收电压灵敏度时的典型波形
Fig. 6 The typical waveforms for testing the acoustomotive pressure sensitivity of fiber-optic hydrophone

4.1 频率特性

在同幅度(选用了180 mV)下,不同频率(3~1000 Hz)对应声压灵敏度的情况如图7. 从图中可

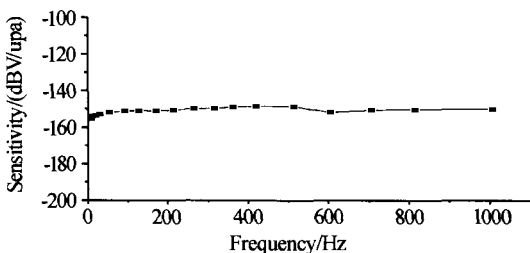


图7 频率特性测试结果图
Fig. 7 The curve of frequency characteristics tested

以看到,水听器 3 Hz~12 Hz 之间的低频响应稍差,但在整个频段范围内总体上比较平坦,能满足实验设计要求.

4.2 幅度特性

在同频率下(选用了500 Hz),不同振动幅度(100 mV~200 mV)对应的声压灵敏度的情况如图8. 可以看到,振动台的振动幅度对声压灵敏度几乎没有影响.

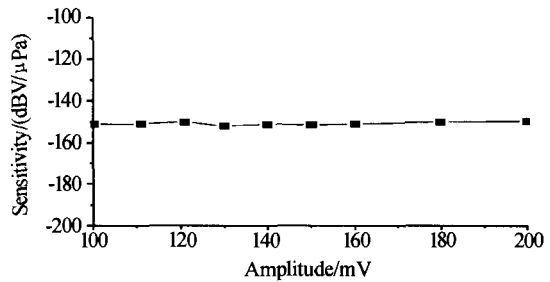


图8 幅度特性测试结果图
Fig. 8 The curve of amplitude characteristics tested

4.3 温度特性

将探头在液体温度从5到100℃间进行测试,实验结果如图9. 可以看出,探头声压灵敏度随测试环境温度的升高而稍有升高,特别在低温段比较明显. 分析原因,可能是由于内衬筒(材料为聚四氟乙烯,一种声敏材料)的热胀冷缩引起的. 因为水听器的感应臂光纤是绕在内衬筒上的,这样探头感知声波的灵敏度由两方面决定:1)感应臂光纤的声敏作用;2)内衬筒的声敏作用. 因为聚四氟乙烯的热胀冷缩直接影响着感应臂光纤的绕紧度,从而影响了探头声压灵敏度.(一种极端的情况:当内衬筒的缩小到使感应臂光纤处完全松弛状态时,聚四氟乙烯的声敏作用对水听器探头的声压灵敏度没有贡献.)

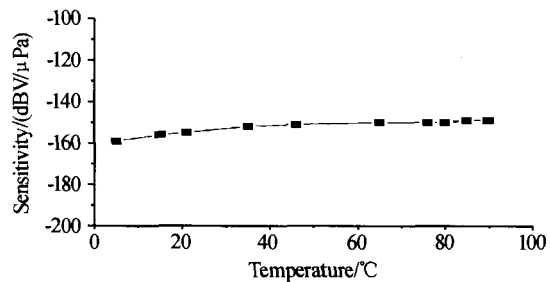


图9 温度特性测试结果图
Fig. 9 The curve of temperature characteristics tested

4.4 稳定性

分别在间隔0.5 h和间隔1.5 h测量了一自制探头的情况. 实验结果如图10,可以看到随时间变化波动极小,稳定性较好,但随时间的增加灵敏度稍有上升趋势,可能是由于振动台引起盛水容器内水温略有上升的原因(见温度特性的分析).

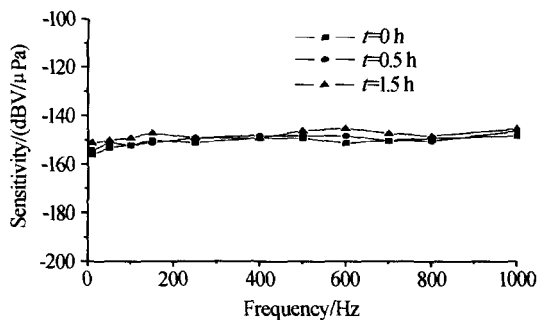


图 10 稳定性测试结果图
Fig. 10 The curve of stabilization characteristics tested

5 结论

本文通过理论分析和实验验证,给出了一套可用于光纤水听器灵敏度校准的简易可行的声检测装置. 该检测装置系统简单,校准速度快. 用于测试相移灵敏度时,实验的误差 <0.5 dB,可以满足一般光纤水听器相移灵敏度的校准需求. 用于测试声压灵敏度校准时,测量精度比用现行国家标准中的振动液柱法高,原因是进行了两点改进:1)未用直接放在振动台面上的加速度计,采用同时比较法(待校光纤水听器和标准压电水听器同时置于校准容器中,且位置靠近或对等)来标定待校水听器,这比放在采用加速度计校准更为可靠;2)圆筒状容器对筒的厚度给出了限制条件(>10 mm 或 $1/10$ 桶的外径),将振动台的谐振峰移出了工作频段(3~1000 Hz)之外. 建立的这套校准装置及实验方法在光纤水听器灵敏度的规范检测方面具有重要的意义,在某些方面可用于对振动液柱法的现行国家标准的修补.

参考文献

1 曹家年,包建新,李绪友,等. 光纤水听器. 光通信技术, 1997, **21**(2):90~94
Cao J N, Bao J X, Li X Y, et al. *The Technology of Optical Communications*, 1997, **21**(2):90~94

2 郑黎,洪新华,何俊华,等. 采用密集波分复用技术的光纤水听器阵列研究. 光子学报, 2003, **32**(2):137~139
Zheng L, Hong X H, He J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):137~139

3 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. 光子学报, 2004, **33**(11):1348~1350
Zheng L, Zheng C D, He J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11):1348~1350

4 崔三烈,周福洪,徐彦德. 单模光纤水听器声压灵敏度的研究. 光子学报, 1995, **24**(1): 72~77
Cui S L, Zhou F H, Xu Y D. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(1): 72~77

5 薛耀泉,马永其. 光纤水听器灵敏度测量. 声学与电子工程, 1995, **40**(4):40~42
Xue Y Q, Ma Y Q. *Acoustics and Electronic Engineering*, 1995, **40**(4):40~42

6 薛耀泉,赵涵. 干涉型光纤水听器灵敏度校准方法研究. 航空计测技术, 1999, **19**(4): 3~6
Xue Y Q, Zhao H. *Measure Technology about Avigation*, 1999, **19**(4):3~6

7 廖延彪. 物理光学. 北京:清华大学出版社, 2000. 57~63
Liao Y B. *Optic Fiber*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 57~63

8 靳伟,廖延彪,张志鹏,等. 导波光学传感器:原理与技术. 北京:科学出版社, 1998. 289~307
Jin W, Liao Y B, Zhang Z P, et al. *Guided-wave Optics Sensor: Principle and Technology*. Beijing: Science Press, 1998. 289~307

9 廖茂. 相位干涉型光纤水声传感系统研究[硕士学位论文]. 北京:清华大学电子工程系, 2003. 19~51
Liao M. *Research on the System of Phase Interferometric Optic Fiber Hydrophone*[Master's degree dissertation]. Beijing: Tsinghua University, Department of Electronic Engineering, 2003. 19~51

Study on Measuring Sensitivity of Fiber-optic Hydrophone

Peng Baojin^{1,2}, Liao Mao², Liao Yanbiao², Lai Shurong², Zhang Min², Wang Zehan²

¹ Zhejiang Normal University, Institute of Information Optics, Jinhua 321004

² Tsinghua University, Department of Electronic Engineering, Beijing 100084

Received date: 2004-06-10

Abstract A set of easy-used calibrating apparatus for fiber-optic hydrophone's sensitivity was invented, and a convenient measuring method of comparison was proposed. The probes of standard piezoelectric hydrophone and fiber-optic hydrophone were placed in the same sound field, then the outputs of the two probes were linked to the digital oscilloscope for comparison measure. The research shows that the resonant peak can be removed from the working frequency range which is from 3 ~ 1000 Hz when the wall thickness of the metallic cylinder in the vibrating system is more than 10 mm or 1/10 of the cylinder's outer diameter. Applying this setting as well as comparison method, the calibration system is simple and the process of calibration is quick, then the error is less than 0.5 dB, which is in the demand of the calibration for fiber-optic hydrophone's sensitivity.

Keywords Fiber-optic hydrophone; Absolute phase sensitivity; Acoustomotive pressure sensitivity



Peng Baojin was born in 1967, in Zhejiang Province. He works as an associate professor in College of Mathematics, Physics and Information Science, Zhejiang Normal University. His current research focuses on the development of photo-electronic technology and computer technology. Now he is a visiting fellow in Department of Electronic Engineering, Tsinghua University.