

文章编号:1004-4213(2011)11-1686-6

20 Hz~10 kHz 光纤水听器相移灵敏度校准

陈毅¹, 张军¹, 张敏², 王利威²

(1 杭州应用声学研究所, 杭州 310012)

(2 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要:利用相位生成载波解调技术精确测量光纤水听器的光相移量,在 20 Hz~10 kHz 频率范围实现了光纤水听器探头相移灵敏度的校准. 20 Hz~1.25 kHz 频段采用驻波管比较法进行校准, 1.25 kHz~10 kHz 频段采用自由场脉冲比较法进行校准. 利用本文建立的校准系统,对 TMD 35 井光纤水听器的相移灵敏度进行校准,校准结果表明,两种方法测得的相移灵敏度具有很好的一致性,在 1.25 kHz 频率点的相移灵敏度值偏差为 0.8 dB. 不确定度分析表明,该校准系统的扩展不确定度($k=2$)为 0.9 dB.

关键词:校准; 相移灵敏度; 光纤水听器; 相位生成载波

中图分类号: TN247; TN95

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20114011.1686

0 引言

光纤水听器是当前工程应用最迫切的新型水声传感器. 与传统的压电水听器相比,光纤水听器具有探测灵敏度高、抗电磁干扰和易于大规模成阵等特点,是现代声纳的一个重要发展方向. 因此,自世界上第一篇有关光纤水听器的论文发表后^[1],各军事强国纷纷投入大量人力、财力和物力进行光纤水听器及其阵列的研究和试验^[2-5],其中以美国的研究工作最具代表性. 由于光纤水听器性能优异,应用前景广阔,国内众多单位也纷纷开展光纤水听器的研究和应用^[6-10].

光纤水听器探头相移灵敏度的校准也一直受到人们的重视,文献^[11-13]开展了干涉条纹计数法和贝塞尔函数比值法的研究. 干涉条纹计数法的优点是直观、形象,但只能人工读数,在信号较小且有干扰时误差较大. 贝塞尔函数比值法利用贝塞尔函数比值求得干涉型光纤水听器的光相移量,在信噪比不高时校准准确度较差. 随着我国光纤水听器实用化进程的加快,迫切需要建立能精确校准和计量光纤水听器探头相移灵敏度的校准方法和测量技术.

当前在干涉型光纤传感器检测技术中应用非常广泛的相位生成载波(Phased Generator Carrier, PGC)解调技术^[14-16]具有检测灵敏度高、动态范围大、线性度好、无源解调等特点,非常适合光纤水听器探头相移灵敏度的精确测量. 但从文献检索来看,利用 PGC 解调技术校准光纤水听器相移灵敏度未

见报道.

本文建立了光纤水听器探头相移灵敏度校准方法和基于反正切计算的 PGC 解调技术,采用驻波管比较法和自由场脉冲比较法实现了 20 Hz~10 kHz 频率范围光纤水听器探头相移灵敏度的准确校准. 驻波管比较法校准的扩展不确定度($k=2$)为 0.8 dB,自由场脉冲比较法校准的扩展不确定度($k=2$)为 0.9 dB.

1 校准方法

光纤水听器工作频率基本都在 10 kHz 频率以下. 低于 1.25 kHz 频率光纤水听器的校准通常在声压场中进行. 常用的方法有振动液柱法^[17]和驻波管比较法. 由于振动液柱法利用液柱的振动进行测量,对被测水听器的形状和结构设计有一定要求. 相比之下,驻波管比较法更适合光纤水听器低频灵敏度的校准.

1.25 kHz 以上频率光纤水听器的校准一般在自由场中进行. 常用的相移灵敏度校准方法,是先校得干涉型光纤水听器的声压灵敏度,再扣除声压-相移灵敏度转换系数,得到光纤水听器探头的相移灵敏度;或者是发射正弦连续波信号,利用标准水听器比较法得到光纤水听器探头的相移灵敏度. 前者不是一种直接测量方法,后者容易受边界反射声的影响. 因此,为了营造更好的自由场测量条件,确保校准的测量准确度,本文采用正弦脉冲声技术校准光纤水听器探头的相移灵敏度,该技术也更接近光纤

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

收稿日期:2011-05-26;修回日期:2011-08-16

水听器的工程实际应用要求。

1.1 驻波管比较法

20 Hz~1.25 kHz 频率范围光纤水听器的校准采用驻波管比较法,见图 1。光纤水听器和标准水听器被同时置于驻波管校准声场中,两水听器参考中心在同一水平面上。

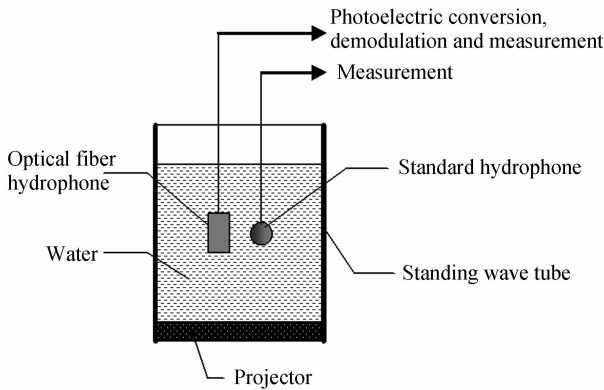


图 1 驻波管比较法校准示意图
Fig. 1 Schematic diagram of calibration using standing wave tube comparison method

校准时,位于驻波管底部的发射换能器发射某一频率的声波,在驻波管内的水体中产生校准所需的测量声场。在声压作用下,光纤水听器和标准水听器分别输出光信号和开路电压信号。光信号经光电转换、解调后进行测量,得到反映光相移量的相移值 $\Delta\phi$,该数值与解调系统的输出电压值 U_ϕ 相对应;对标准水听器输出的开路电压信号进行测量,得到反映此时声压量的电压值 U_0 。由已知的标准水听器灵敏度[级] M_0 ,用式(1)计算,即可得到该频率点光纤水听器探头的相移灵敏度[级] M_ϕ 。

$$M_\phi = 20\lg\Delta\phi - 20\lg U_0 + M_0 \quad (1)$$

式中, M_ϕ 的基准值为 $1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$ 。

1.2 自由场脉冲比较法

1.6 kHz~10 kHz 频率范围光纤水听器的校准采用自由场脉冲比较法,见图 2。光纤水听器和标准水听器被同时置于自由场声场中,发射换能器、标准

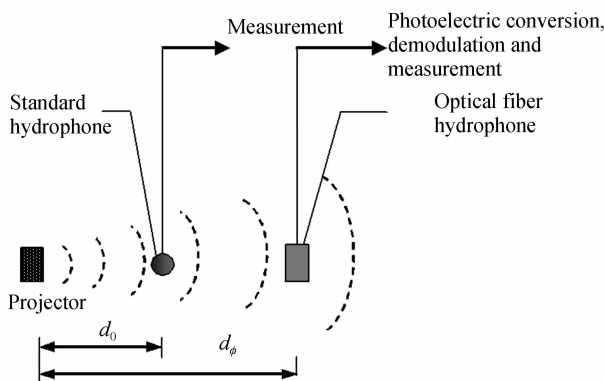


图 2 自由场比较法校准示意图
Fig. 2 Schematic diagram of calibration using free-field comparison method

水听器、光纤水听器的参考中心在同一水平面上成一直线布置,发射换能器与标准水听器、光纤水听器间的参考中心距离分别为 d_0 和 d_ϕ 。

校准时,发射换能器发射某一频率的声波,在测量水池中产生校准所需的声场。在声压作用下,光纤水听器和标准水听器分别输出光信号和开路电压信号。光信号经光电转换、解调后进行测量,得到反映光相移量的相移值 $\Delta\phi$,同样该数值与解调系统的输出电压值 U_ϕ 相对应;对标准水听器输出的开路电压信号进行测量,得到反映此时声压量的电压值 U_0 。由已知的标准水听器灵敏度[级] M_0 ,用式(2)计算,即可得到该频率点光纤水听器探头的相移灵敏度[级] M_ϕ 。

$$M_\phi = 20\lg\Delta\phi - 20\lg U_0 + 20\lg d_\phi - 20\lg d_0 + M_0 \quad (2)$$

2 PGC 解调技术

准确获取光纤水听器光相移量是相移灵敏度校准能否成功的关键。本文采用 PGC 解调技术测量干涉型光纤水听器受声压信号调制后输出的光相移量^[18]。该技术有微分交叉相乘法 and 反正切法两种。相比于传统的基于微分交叉相乘计算的 PGC 解调技术,基于反正切计算的 PGC 解调技术不仅具有灵敏度高、动态范围大等优势,而且其光相移量测量结果也不易受偏振和光源强度调制等因素导致的干涉信号幅度低频漂移的影响^[19]。本文采用基于反正切计算的 PGC 解调技术测量光纤水听器光相移量,解调过程如图 3。

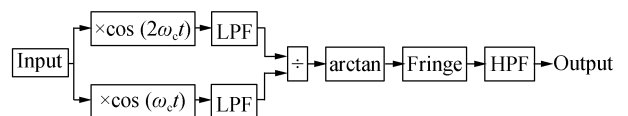


图 3 基于反正切计算的 PGC 解调算法流程
Fig. 3 Flow chart of PGC demodulation method based on arctangent calculation

Input 表示经光电转换后的光强信号,经模数转换后以数字量输入解调系统; $\times \cos(\omega_c t)$ 和 $\times \cos(2\omega_c t)$ 分别表示与一次载波和二次载波相乘; LPF 表示低通滤波器,用于滤除所有含 ω_c 及其倍频项; \div 表示除法器,对低通滤波后得到的两路信号进行相除运算; arctan 表示反正切计算,对除法器输出值进行求反正切计算; Fringe 表示解调周期扩展,确保反正切计算结果不失真; HPF 表示高通滤波器,滤除环境干扰造成的噪音项,得到反映声信号大小的光相移量。

输入光强信号 Input 的干涉项表达式为

$$I = A + B \cos [C \cos \omega_c t + \phi(t)] = A + B \{ [J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_c t] \cos \phi(t) -$$

$$2 \left[\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_c t \right] \cdot \sin \phi(t) \quad (3)$$

式中, A 为输入光强幅度; B 为干涉幅度; C 是调制深度, 通常采用 PZT 直接调制其中一路干涉臂或者在非平衡干涉仪系统中通过调制光源频率实现; J_k 为 k 阶 Bessel 函数; ω_c 为载波频率, 一般根据待测目标信号的频带范围来设定; $\phi(t)$ 是干涉信号(待测信号), 由目标以及环境等作用在光纤上产生的相位变化。

式(3)分别与一次载波项 $\cos(\omega_c t)$ 和二次载波项 $\cos(2\omega_c t)$ 相乘, 再通过低通滤波, 得到信号的正弦项和余弦项

$$\begin{aligned} & -BJ_1(C) \sin \phi(t) \\ & -BJ_2(C) \cos \phi(t) \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)的正弦项和余弦项相除, 进行反正切法计算, 得到

$$\arctan \left[\frac{J_1(C)}{J_2(C)} \tan \phi(t) \right] \quad (5)$$

可见, 反正切法不用微分求导, 避免了后续的分过程. 这意味着干涉信号的初相位对解调结果没有影响. 当 $J_1(C) = J_2(C)$, $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ 时, 正切函数是单调的, 由式(5)即可得到待测信号 $\phi(t)$ 的值. 但超出这个范围时, 需要进行解调周期扩展, 确保对大目标信号和大范围漂移信号的无失真解调。

3 系统构成及测量过程

3.1 校准系统构成

光纤水听器校准系统框图如图 4. 由图 4 可知:

1) 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等仪器工作。

2) 信号源、功率放大器、发射换能器等组成声信号发射分系统, 用于在驻波管或自由场测量水池中得到校准所需的声场. 驻波管是一直径 120 mm、壁厚 60 mm 的充水圆柱型金属管, 底部安装一电动换能器作为发射换能器. 自由场测量水池长 50 m、宽 15 m、深 10 m, 采用球型压电换能器作为发射换能器。

3) 激光器、光相位外调制器、光相位解调仪等组成光信号发射解调分系统, 用于向光纤水听器输出高稳定性窄线宽调制光信号和对光信号进行解调。

4) 滤波器、数据采集卡和示波器等组成电信号测量分系统, 用于对光纤水听器和标准水听器输出的信号进行测量。

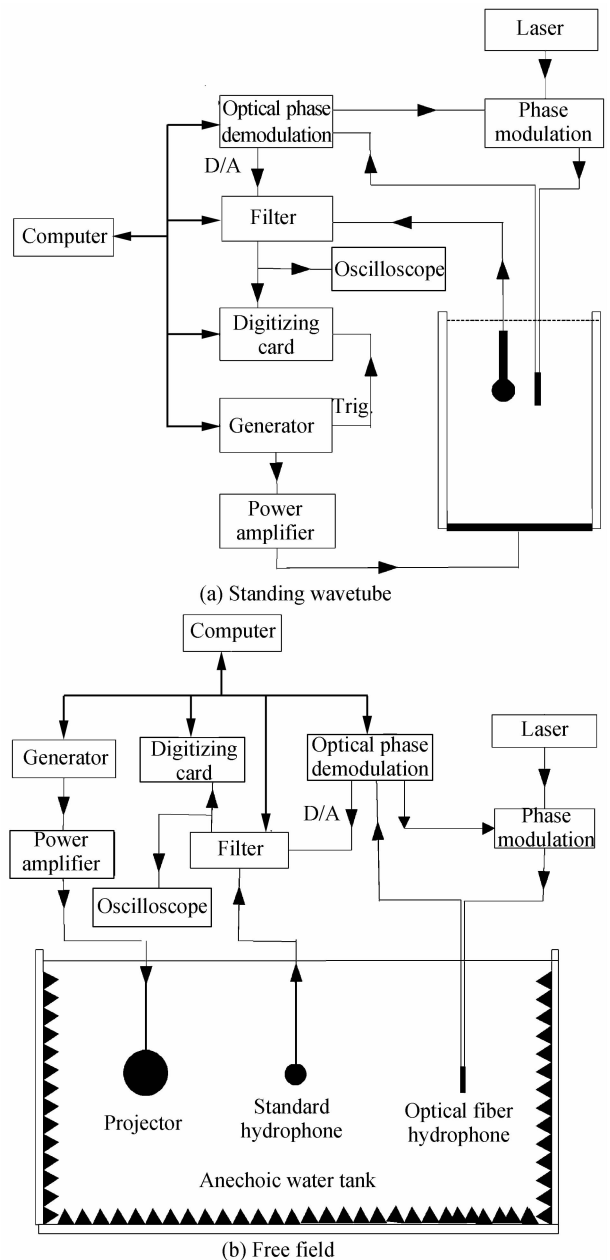


图 4 光纤水听器校准系统框图

Fig. 4 Diagram of calibration system of optical fiber hydrophone

3.2 测量过程

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, 产生校准所需的测量声场. 光纤水听器和标准压电水听器被同时置于声场中接收声信号. 激光器输出窄线宽激光经光相位外调制器后输入光纤水听器, 光纤水听器输出受声压信号调制后的光信号, 由光相位解调仪进行接收和解调, 得到光相移量. 为了与标准水听器同步采集对比, 该信号经数模转换后转变为电压信号输出, 经滤波器滤波后再由数据采集卡进行采集. 同时, 标准水听器输出的开路电压信号经滤波

器滤波后也输入数据采集卡进行采集,最后由计算机进行处理得到光纤水听器探头的相移灵敏度.测量结果扣除了光纤水听器解调结果的数模转换比例系数与数据采集卡的模数转换比例系数的影响.

4 校准结果和分析

利用该校准系统,在 20 Hz~10 kHz 频率范围对清华大学研制的 TDM35 # 光纤水听器探头的相移灵敏度进行校准.该光纤水听器为芯轴型,采用非平衡型 Michelson 干涉仪结构,工作波长 1 550 nm,直径 20 mm,长度不超过 60 mm.

驻波管中相移灵敏度校准结果见表 1.为验证 PGC 解调技术的准确性,与条纹计数法测得的相移灵敏度进行了比较.条纹计数法是通过直接观察光纤水听器输出的干涉条纹在 2π 的整数倍周期时标准水听器的输出电压值,然后通过已知的标准水听器灵敏度值换算出光纤水听器探头的相移灵敏度.这种方法在干涉信号可见度比较高的情况下,测量准确度很高,因此可以作为理想的比较基准.

表 1 利用驻波管比较法得到的 TDM35 # 光纤水听器相移灵敏度校准结果

Table 1 Calibration results of phase-shifted sensitivity of No. 35 TDM optical fiber hydrophone using standing wave tube comparison method

| f/Hz | PGC $M_{\phi 1}/\text{dB}$ | Fringe $M_{\phi 2}/\text{dB}$ | $M_{\phi 2} - M_{\phi 1}/\text{dB}$ |
|---------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 20 | -146.2 | -- | -- |
| 25 | -146.0 | -- | -- |
| 31.5 | -146.4 | -- | -- |
| 40 | -146.4 | -145.7 | 0.7 |
| 63 | -146.5 | -145.8 | 0.7 |
| 80 | -146.5 | -145.9 | 0.6 |
| 100 | -146.2 | -145.8 | 0.4 |
| 125 | -146.3 | -145.6 | 0.7 |
| 160 | -146.4 | -145.9 | 0.5 |
| 200 | -146.4 | -146.0 | 0.4 |
| 250 | -146.4 | -146.2 | 0.2 |
| 315 | -146.4 | -146.0 | 0.4 |
| 400 | -146.3 | -146.1 | 0.2 |
| 500 | -146.4 | -146.1 | 0.3 |
| 630 | -146.5 | -146.1 | 0.4 |
| 800 | -146.8 | -146.3 | 0.5 |
| 1000 | -147.2 | -147.0 | 0.2 |
| 1250 | -147.4 | -147.2 | 0.2 |

分析表明,两种方法在 40 Hz~1.25 kHz 频率范围内得到的校准结果比较接近,说明 PGC 解调技术的测量结果是准确的.其中,在 20 Hz~40 Hz 频段,对于高灵敏度的光纤水听器,其干涉信号受环境影响较大,条纹计数比较困难,采用 PGC 解调技术更容易获得准确的测量结果;在 40 Hz~125 Hz 频段,同样由于声压信噪比不高,条纹计数法读数误差

增大,两者最大相差为 0.7 dB,提高条纹计数法测量准确度的方法之一是增大声源的发射声信号,这在驻波管中实现的难度较大.条纹计数法的另一个缺点是难以实现自动测量.因此在实际校准中,可以选用条纹计数法测量若干典型频率点作为参考,再用 PGC 调制解调技术对光纤水听器探头的相移灵敏度进行全频段校准.

测量频率更高时,由于驻波效应影响,驻波管中同一水平面上的声波幅度分布不均匀性加大.因此,1.25 kHz~10 kHz 频率范围相移灵敏度的校准在自由场中进行.表 2 给出了自由场中 TDM35 # 光纤水听器探头的相移灵敏度校准结果.

表 2 利用自由场比较法得到的 TDM35 # 光纤水听器相移灵敏度校准结果

Table 2 Calibration results of phased-shifted sensitivity of No. 35 TDM optical fiber hydrophone using free-field comparison method

| f/kHz | M_{ϕ}/dB | f/kHz | M_{ϕ}/dB |
|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 1.25 | -146.6 | 4 | -145.7 |
| 1.6 | -146.1 | 5 | -146.2 |
| 2 | -145.7 | 6.3 | -146.0 |
| 2.5 | -145.9 | 8 | -147.7 |
| 3.15 | -145.7 | 10 | -148.0 |

与表 1 中的数据相比,同样在 1.25 kHz 频率点,驻波管比较法的测量结果为 -147.4 dB,自由场比较法的测量结果为 -146.6 dB,两者相差仅为 0.8 dB.可见,采用不同校准方法得到的测量结果呈现出较好的一致性和衔接性.

5 不确定度分析和估算

由于测量过程中的随机效应和系统效应以及数据处理中的修约均会导致不确定度,因此,需对光纤水听器相移灵敏度校准的测量不确定度进行分析和估算^[20].为便于理解和讨论,测量不确定度通常分 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度. A 类标准不确定度主要来源于测量的重复性; B 类标准不确定度则根据有关信息进行评定.

5.1 不确定度的 A 类评定

在相同测量条件下对 TDM 35 # 光纤水听器探头的相移灵敏度进行 6 次重复测量.驻波管比较法和自由场比较法测量的最大实验偏差均为 0.20 dB.因此,相移灵敏度测量平均值的标准偏差为 0.08 dB,测量重复性引起的不确定度分量 $u_A = 0.08$ dB.

5.2 不确定度的 B 类评定

1) 驻波管比较法相移灵敏度校准的 B 类不确定度主要来源于: a) 驻波管中同一测量平面上声场不均匀引入的不确定度分量: $u_{B_1} = 0.05$ dB; b) 标准

水听器灵敏度校准误差引入的不确定度分量: $u_{B_2} = 0.30$ dB;c)标准水听器和光纤水听器悬挂导致的参考中心偏差引入的不确定度分量: $u_{B_3} = 0.10$ dB;d)光源不稳定导致信号起伏引入的不确定度分量: $u_{B_4} = 0.05$ dB;e)光相位解调仪解调及其D/A输出误差引入的不确定度分量: $u_{B_5} = 0.06$ dB;f)数字采集器对电压信号量化误差引入的不确定度分量: $u_{B_6} = 0.03$ dB;g)无规噪声干扰导致电压信号测量误差引入的不确定度分量: $u_{B_7} = -0.06$ dB;h)电磁干扰导致电压信号测量误差引入的不确定度分量: $u_{B_8} = -0.05$ dB.

由于测量中各不确定度分量间独立无关,由此合成的B类标准不确定度为

$$u_B = (u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2 + u_{B_3}^2 + u_{B_4}^2 + u_{B_5}^2 + 2u_{B_6}^2 + u_{B_7}^2 + 2u_{B_8}^2)^{1/2} = 0.35 \text{ dB}$$

2)自由场比较法相移灵敏度校准的B类不确定度主要来源于:a)自由场声场起伏引入的不确定度分量: $u_{B_1} = 0.05$ dB;b)标准水听器灵敏度校准误差引入的不确定度分量: $u_{B_2} = 0.35$ dB;c)标准水听器和光纤水听器悬挂导致的参考中心偏差引入的不确定度分量: $u_{B_3} = 0.10$ dB;d)光源不稳定导致信号起伏引入的不确定度分量: $u_{B_4} = 0.05$ dB;e)标准水听器和光纤水听器、发射换能器参考中心间距离的测量误差引入的不确定度分量: $u_{B_5} = 0.05$ dB;f)光相位解调仪解调及其D/A输出误差引入的不确定度分量: $u_{B_6} = 0.06$ dB;g)数字采集器对电压信号量化误差引入的不确定度分量: $u_{B_7} = 0.03$ dB;h)无规噪声干扰导致电压信号测量误差引入的不确定度分量: $u_{B_8} = -0.06$ dB;i)电磁干扰导致电压信号测量误差引入的不确定度分量: $u_{B_9} = -0.05$ dB;j)脉冲信号稳态不充分导致的电压信号测量误差引入的不确定度分量: $u_{B_{10}} = -0.12$ dB.

由于测量中各不确定度分量间独立无关,由此合成的B类标准不确定度为

$$u_B = (u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2 + u_{B_3}^2 + u_{B_4}^2 + u_{B_5}^2 + u_{B_6}^2 + 2u_{B_7}^2 + u_{B_8}^2 + 2u_{B_9}^2 + 2u_{B_{10}}^2)^{1/2} = 0.43 \text{ dB}$$

5.3 合成标准不确定度和扩展不确定度

对A类和B类标准不确定度分量进行合成,得到相移灵敏度校准合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.36 \text{ dB (20 Hz(1.25 kHz 频段))}$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.44 \text{ dB (1.25 kHz(10 kHz 频段))}$$

取包含因子 $k=2$,则相移灵敏度校准的扩展不确定度为

$$U = ku_c = 0.8 \text{ dB (20 Hz(1.25 kHz 频段))}$$

$$U = ku_c = 0.9 \text{ dB (1.25 kHz(10 kHz 频段))}$$

6 结论

本文通过光纤水听器校准方法和PGC解调技术研究,建立了基于驻波管和自由场声场条件的光纤水听器校准系统,可以对20 Hz~10 kHz频率范围光纤水听器探头的相移灵敏度进行准确校准,该校准系统的扩展不确定度($k=2$)为0.9 dB.

但PGC解调技术也有不足之处:1)需要载波调制,如测量10 kHz频率信号时,载波频率需要达到80 kHz或100 kHz以上,实现起来有一定的困难;2)解调性能与载波调制性能密切相关,载波调制的幅度稳定性、频率稳定性等都会影响解调性能;3)PGC算法的滤波器对解调性能也有很大影响,滤波器阶数比较低时,解调性能偏差;当滤波器性能较高时,解调性能也较好,但消耗资源较多,尤其是解调高频信号时,对硬件的要求较高.但本文通过应用合适的解调仪器和设备,较好地解决了这些问题.

在计算机控制下,校准系统实现了相移灵敏度校准的自动测量.校准结果和不确定度分析表明,该校准系统具有测量准确度高、工作稳定可靠等特点.因此,该系统的建立,为我国光纤水听器探头相移灵敏度的精确校准和性能鉴定奠定了测量基础,有利于推动我国光纤水听器的实用化进程.

参考文献

- [1] BUCARO J A, DARDY H D, CAROME E. Fiber-optic hydrophone[J]. *J Acoust Soc Am*, 1977, **62**(5): 1302-1304.
- [2] GAO Xue-min. Evolution of fiber optic hydrophones and hydrophone arrays[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 1996, (1): 48-53.
高学民. 光纤水听器及阵列的发展概况[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 1996, (1): 48-53.
- [3] NASH P. Review of interferometric optical fiber hydrophone technique[J]. *IEEE Proc-Radar, Sonar Navig*, 1996, **143**(3): 204-209.
- [4] CAO Jia-nian, BAO Jian-xin, LI Xu-you, et al. Optical fiber hydrophone[J]. *The Technology of Optical Communications*, 1997, **21**(2): 90-94.
曹家年, 包建新, 李绪友, 等. 光纤水听器[J]. 光通信技术, 1997, **21**(2): 90-94.
- [5] CLAY K K, ANTHONY D. Overview of high performance fiber-optic sensing[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2004, **37**(18): 197-216.
- [6] CUI San-lie, ZHOU Fu-hong, XU Yan-de. Investigation on the acoustomotive pressure sensitivity of a single mode fiber hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(1): 72-77.
崔三烈, 周福洪, 徐彦德. 单模光纤水听器声压灵敏度的研究[J]. 光子学报, 1995, **24**(1): 72-77.
- [7] 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.
郑承栋, 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.
- [8] 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.
- [9] YIN Kai, ZHANG Min, DING Tian-huai, *et al.* Analysis of the pressure phase sensitivity response of the air-backed mandrel fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1641-1646.
- 殷锴,张敏,丁天怀,等. 芯轴型光纤水听器声压相移灵敏度响应分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1641-1646.
- [10] 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.
- [11] TAKAHASHI S, KIKUCHI T, OHKURA K. Measurement of acoustic sensitivity of fibers used for optical fiber hydrophones[J]. *Acoustica*, 1986, **60**: 75-77.
- [12] XUE Yao-quan, ZHANG Han. Investigation on the method of calibrating sensitivity of interference type optical fiber hydrophone [J]. *Journal of Aeronautic Metrology and Measurement*. 1999, **19**(4):3-6.
- 薛耀泉,赵涵. 干涉型光纤水听器灵敏度校准方法研究[J]. 航空计测技术, 1999, **19**(4):3-6.
- [13] CHEN Yi. Simulation experiment and precision analysis of evaluation of phased-shifted amplitude of interometric optical fiber hydrophone using Bessel function method[J]. *Acoustics and Electronic Engineering*, 2004, **76**(4): 6-9.
- 陈毅. 贝塞尔函数比值法求定干涉型光纤水听器相移幅值的模拟试验和准确度分析[J]. 声学与电子工程, 2004, **76**(4): 6-9.
- [14] JIANG Yi, LIU Li. Fiber optical Fabry-Perot vibration sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1059-1062.
- 江毅,刘莉. 光纤 Fabry-Perot 腔振动传感器[J]. 光子学报, 2003, **32**(9): 1059-1062.
- [15] ZHAO Hong-xia, YU You-long, LIU Sheng-chun. A fiber Bragg grating sensor demodulation scheme based on a parasitic interference configuration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 669-671.
- 赵洪霞,余有龙,刘盛春. 基于寄生干涉谐振的光纤光栅传感解调装置[J]. 光子学报, 2004, **33**(6): 669-671.
- [16] WANG Li-wei, LIU Yang, ZHANG Min, *et al.* Analysis and improvement of the phase generator carrier method in fiber interferometer sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4):766-769.
- 王利威,刘阳,张敏,等. 干涉型光纤水听器相位生成载波技术研究及改进[J]. 光子学报, 2009, **38**(4):766-769.
- [17] 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.
- [18] 廖延彪,黎敏,张敏,等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [19] JING Zhen-guo, YIN Kai, ZHANG Min, *et al.* Polarization induced fading eliminating technique for interferometric optical fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2024-2027.
- 荆振国,殷锴,张敏等. 干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 2024-2027.
- [20] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement[M]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1995.

Calibration of Phase-shifted Sensitivity of Optical Fiber Hydrophone in the Frequency Range 20 Hz to 10 kHz

CHEN Yi¹, ZHANG Jun¹, ZHANG Min², WANG Li-wei²

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

(2 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Through accurately measuring the phase-shifted sensitivity of the head of optical fiber hydrophone using phased generated carrier demodulation technique, calibration of phase-shifted sensitivity of optical fiber hydrophone in the frequency range 20 Hz to 10 kHz was realized. At the frequencies from 20 Hz to 1.25 kHz, the calibration method was standing wave tube comparison method. And at the frequencies from 1.25 kHz to 10 kHz, the calibration method was free-field tone-burst comparison method. The No. 35 TMD optical fiber hydrophone was calibrated by the calibration system. The calibration results show that the phased-shifted sensitivities measured by two methods are very close, and the deviation value of sensitivity at the frequency 1.25 kHz is only 0.8 dB. Analysis of measurement uncertainties prove that the expand uncertainty (at $k=2$) of this calibration system is 0.9 dB.

Key words: Calibration; Phase-shifted sensitivity; Optical fiber hydrophone; Phased Generated Carrier (PGC)