

Fizeau 干涉型光纤水听器声压灵敏度校准

庞彦东^{1,2}, 周次明¹, 黄俊斌⁴, 顾宏灿⁴, 陈希^{1,2}, 赵晨光^{1,3}, 周卿^{1,2}, 范典^{1*}

¹武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

²武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070;

³武汉理工大学机电工程学院, 湖北 武汉 430070;

⁴海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430032

摘要 根据 Fizeau 干涉型光纤水听器的相位变化量公式, 计算声压场条件下随声压变化的水听器总相位变化量。通过仿真, 定量分析了水听器水平与垂直姿态及深度因素对各个频率下的声压灵敏度的影响。利用振动液柱法进行光纤水听器的实验环境测试。结果表明, 姿态与深度因素均会对最终测量结果造成较大影响, 在 40~2000 Hz 频带内, 与水平姿态时相比, 水听器在垂直姿态时将有 0.9 dB~18.2 dB 的灵敏度差异, 深度读取误差造成的灵敏度误差在 4 dB 内。由于垂直姿态下水听器各部分所感受的声压场不同, 因而测量结果与水平姿态结果存在差异, 在声压场测试环境中, 水平校准结果比垂直校准结果更精确, 且测量深度越深, 校准结果越稳定。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 水下声波; 灵敏度分析; 水听器; 干涉仪

中图分类号 TP212.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1506003

Calibration for Acoustic Pressure Sensitivity of Optical Fiber Hydrophone Based on Fizeau Interference

Pang Yandong^{1,2}, Zhou Ciming¹, Huang Junbin⁴, Gu Hongcan⁴,

Chen Xi^{1,2}, Zhao Chenguang^{1,3}, Zhou Qing^{1,2}, Fan Dian^{1*}

¹National Engineering Laboratory of Fiber Optic Sensor Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

²School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

³School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

⁴Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430032, China

Abstract This study calculates the total phase variation of a hydrophone with a changing acoustic pressure in the sound pressure field according to the phase variation formula of the optical fiber hydrophone based on the Fizeau interference. Then, the effects of the horizontal and vertical postures and the depth of hydrophone on the acoustic sensitivity of each frequency are quantitatively analyzed through simulation. Finally, we use the vibrating liquid column method to test the experimental environment of the optical fiber hydrophone. Results show that the posture and depth factors have great influences on the final measurement results. The vertical posture of hydrophones in the frequency band of 40–2000 Hz produce a sensitivity error of approximately 0.9 dB–18.2 dB, and the sensitivity error caused by depth read deviation is within 4 dB compared those of hydrophones with horizontal posture. Owing to the acoustic pressure field difference in vertical placement conditions of hydrophone, the measured results are different from the horizontal placement results. Horizontal calibration results are more accurate than vertical results in acoustic pressure field test environment, furthermore, the measurement depth is greater, and the calibration results are more stable.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; underwater acoustic wave; sensitivity analysis; hydrophone; interferometer

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 120.3180; 150.1488

收稿日期: 2019-12-19; 修回日期: 2020-03-30; 录用日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61775173)、国家装备预研领域基金(6140243010116QT69001)、国防科技创新特区项目(18H86305ZT00101602)

* E-mail: fandian@whut.edu.cn

1 引 言

与传统压电水听器相比,光纤水听器因具有高灵敏度、抗电磁干扰等优势,在世界范围内受到广泛关注^[1],其关于灵敏度响应相关的校准工作也随之展开。国外,Takahashi等^[2]利用自由声场法来校准光纤光栅水听器,利用声换能器产生水下声波,但该校准方式未考虑水声信号在空间较小的声场中发生反射进而相互干扰造成的校准误差;Campopiano等^[3]提出一种利用体积为 $11\text{ m}\times 5\text{ m}\times 7\text{ m}$ 的消声水池建立自由声场光纤水听器校准实验的系统,该系统校准精度高,但实验系统搭建较为复杂;Kim等^[4]利用超声换能器使其在液柱底部发射声波,进而产生水声信号,实现了短腔型法布里-珀罗水听器水下超声信号的校准,验证了点式法布里-珀罗水听器存在响应差异。国内研究人员也对光纤水听器灵敏度校准及相关方法进行了研究^[5-11]。Niu等^[9]利用金属框架将水听器固定在声压罐中,通过标准水听器对声压灵敏度进行校准,在实验中发现,该条件下框架的夹装方式对信号拾取有较大影响,进而造成声压灵敏度校准结果不稳定;陈红江等^[8]提出一种利用静水压激励产生声压的校准方法,但该方法仅适用于水声频率为 $0.01\sim 1\text{ Hz}$ 的条件,在对甚低频水下声波进行频率测量时有效;陈毅等^[6]利用压电补偿法得到了水听器的灵敏度曲线,但该方法与耦合腔互易法^[10]类似,需要满足腔内最大线性尺寸小于待测频率波长 $1/10$ 的条件,因而待测水听器尺寸要足够小,探头尽量为点式水听器;陈毅等^[10]利用自由声场比较法对光纤光栅水听器的灵敏度进行校准,但为保证同一水平面上声波幅度分布均匀,需在较为开阔的声场中加装消声瓦,以最大限度减小声反射作用,因而该校准方法对水声声场测量环境要求较高;为保证水听器阵列灵敏度的准确测量,郭振等^[11]对水听器阵列进行湖上拖曳测试,获得了灵敏度小于 3 dB 的准确校准结果,但对于水听器单基元测试需求,直接进行开阔水域湖上拖曳测试的步骤极为繁琐。对于实验室条件下的水听器单基元校准需求,基于振动液柱法^[12]的校准液柱均为半开放式,且容器开口半径较大,从而振动液柱法对待测水听器尺寸要求不高。同时基于该方法的装置结构简单,便于在实验室对光纤水听器的灵敏度进行初步校准,因此该方法在尺寸较大、结构较为复杂的光纤水听器校准过程中得到广泛应用。

近年来,随着弱反射型光栅阵列在线刻写工艺

的发展^[13],兼具光纤光栅型水听器易于组网、干涉型水听器高灵敏度优点的 Fizeau 干涉型光纤水听器应运而生,该型水听器以弱反射光栅为反射镜,以成对光栅中间的线性长腔为传感单元,具有高灵敏度、能大规模复用的优点^[13-15]。Fizeau 干涉型光纤水听器属于长腔型的传感结构,展开距离较长。在进行初期声压灵敏度标定时,传统方式是长腔型水听器环心位置视为传感器中心,进而将其简化为点式水听器进行声压灵敏度分析研究。而如何对这种细线长腔型水听器进行灵敏度校准鲜有报道^[16-17]。考虑到 Fizeau 型光纤水听器腔长较长,缠绕为光纤环后可初步利用振动液柱法进行水下测试。在声压场条件下进行测试时,由于普通单模光纤环本身的微弯损耗,因此 Fizeau 型光纤水听器直径不易太小。与点式水听器不同,线型传感器在水中不同声压场感受到的声压也不相同,因此准确测量该线型传感器的灵敏度成为该型水听器进行后续实验的重要步骤。本文对 Fizeau 干涉型光纤水听器的总相位变化量及声压灵敏度进行理论分析,结合声压场测试条件,通过不同的实验,得到长腔型光纤水听器灵敏度低频校准最佳实验方案。

2 Fizeau 干涉型光纤水听器工作原理

图 1 为 Fizeau 干涉型光纤水听器系统结构图。从窄线宽激光器发出的连续光经过声光调制器(AOM)被调制成脉冲光,之后经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后进入环形器 1(CIR1),随后脉冲光进入弱反射光栅阵列;经弱反射光栅反射后的脉冲串从环形器 1 出来后进入环形器 2(CIR2),再经 3×3 耦合器进入到法拉第旋转镜(FRM)中。构成非平衡干涉仪的臂长差与光栅间距相同,因此先、后反射回的相邻光脉冲得以在非平衡干涉仪内部实现光路补偿,进而发生 Fizeau 干涉效应。干涉光经光电探测器(PD)光电转换后进入现场可编程逻辑门阵列(FPGA)模块进行数据采集与处理,最后由上位机显示解调结果。

在基于 Fizeau 干涉的传感器单基元中,弱光栅作用在具有超弱反射率的反射镜上,进而反射入射光,前后相邻的两个光栅反射光与后端非平衡迈克尔孙干涉仪光程匹配后,得到 Fizeau 干涉系统,此时 Fizeau 干涉型光纤水听器的传感部分为成对光栅之间的光纤。在该传感光纤中,假设传感光纤长度为 L ,考虑往返光程,成对光栅反射回的光波光程差为 $4\pi nL/\lambda$,在声压为 P 的声压场条件下,光纤内

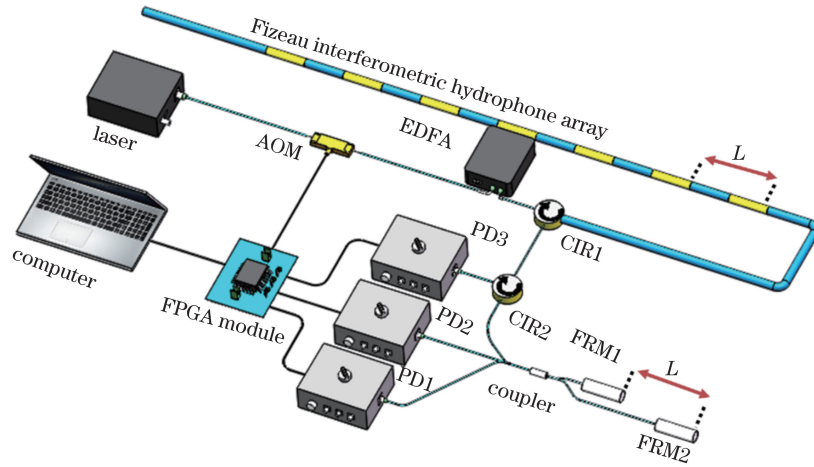


图 1 Fizeau 干涉型光纤水听器系统结构图

Fig. 1 Structure of Fizeau interferometric optical fiber hydrophone system

部产生应变与弹光效应,进而导致折射率 n 与长度 L 发生变化,进而产生相位变化。对应的相位变化量为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta n}{n} \right) = \frac{4\pi nL}{\lambda} \left[\varepsilon_z - \frac{1}{2}n^2(p_{11}\varepsilon_r + p_{12}\varepsilon_\theta + p_{12}\varepsilon_z) \right], \quad (1)$$

式中: ΔL 与 Δn 分别为光纤长度与折射率的变化量; λ 为光波波长; ε_z 为声压导致的光纤轴向应变; ε_r 、 ε_θ 均为光纤径向应变; r 为水听器圆环半径; θ 为光纤环位置相对参考坐标轴的角度; p_{11} 、 p_{12} 均为光纤弹光系数。从(1)式可知,基于 Fizeau 干涉的线型传感器的相位变化量与传感器腔长呈线性关系,增加腔长能直接增加传感器的相位变化量。而光纤水听器的相位变化量与待校准的声压灵敏度呈线性关系,因此基于 Fizeau 干涉的线型传感器的腔长与最终所得的声压灵敏度也存在对应线性关系。

3 声压场条件下的理论计算

一般条件下,光纤水听器的工作频率均在 10 kHz 以下^[6],而低于 1.25 kHz 的水声频率校准一般在声压场条件下进行^[7]。振动液柱法^[18]作为一种常用的声压场校准方法,利用液柱振动产生声压场,但工作状态下的声压场在液柱中并不均匀,因此该方法对被测水听器结构提出了一定的要求。利用振动液柱法对 Fizeau 干涉型长腔水听器进行校准时,需考虑传感器形状与结构因素对最终所得灵敏度造成的影响。

在声压场条件下,根据液柱传输的声压与振速

方程,可得水听器悬停于水柱 h 处深度时的声压。声压^[6]可表示为

$$p(h) = p(H) \frac{\sin kh}{\sin kH}, \quad (2)$$

式中: H 为液柱整体深度;波数 $k = 2\pi f/c$, c 为水中声速, f 为声波频率; $p(H)$ 为液柱底部声压。液柱底部声压可通过加速度计测量加速度得到,已知加速度计的电压灵敏度,结合所测加速度值得得 h 处声压为

$$p(h) = \frac{U_a \rho h K}{M_a} = \frac{U_a \rho \sin kh}{M_a k \cos kH}, \quad (3)$$

式中: U_a 为加速度计开路时的电压值; ρ 为水密度; K 为波动修正系数。由于加速度计输出端与电荷放大器相连,加速度计的电压灵敏度经电荷放大器归一化、放大后输出到示波器,因此电荷放大器与加速度计共同得到合成灵敏度 M_a 。

考虑到光纤水听器只受轴向应力作用,则光纤轴向与径向应变为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu \frac{p(h)}{E} \\ \nu \frac{p(h)}{E} \\ -\frac{p(h)}{E} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: ν 为光纤泊松比; E 为光纤弹性模量。将(4)式代入(1)式,由于声压 $p(h)$ 作用,水听器内部相位变化量 $\Delta\varphi$ 可表示为

$$\Delta\varphi = \left\{ -\frac{4\pi n}{\lambda E} + \frac{2\pi n^3}{\lambda E} [-\nu p_{11} + (1-\nu)p_{12}] \right\} L p(h). \quad (5)$$

再将(3)式代入(5)式,可建立声压场条件下水

听器相位变化量 $\Delta\varphi$ 随深度 h 和水听器腔长 L 变化的关系,可表示为

$$\Delta\varphi = \left\{ -\frac{4\pi n}{\lambda E} + \frac{2\pi n^3}{\lambda E} [-\nu p_{11} + (1-\nu)p_{12}] \right\} \times \frac{LU_a\rho\sin kh}{M_a k \cos kH} \quad (6)$$

图 2(a)为 Fizeau 干涉型光纤水听器垂直放置姿态下的声压场测试模型,以环中心为坐标原点建立极坐标系,两光栅对的中间光纤环为传感部分。

仅考虑光纤环部分相位变化情况,假设光纤环心距液面距离为 a ,光纤环半径为 R ,对 $0 \leq \theta \leq \pi$ 的光纤环传感部分进行线积分,可得不同声压下水听器总相位变化量。对应极坐标系,液面深度为 $h = a + R \cos \theta$,则圆环的表达式为

$$(R \sin \theta)^2 + (R \cos \theta)^2 = R^2, \quad 0 \leq \theta \leq \pi. \quad (7)$$

根据线积分公式,水听器距液面深度 $a - R \cos \theta \leq h \leq a + R \cos \theta$ 内的相位变化量 $\Delta\varphi_V$ 为

$$\Delta\varphi_V = \int_{s_1} \left\{ -\frac{4\pi n}{\lambda E} + \frac{2\pi n^3}{\lambda E} [-\nu p_{11} + (1-\nu)p_{12}] \right\} \times \frac{U_a\rho\sin kh}{M_a k \cos kH} ds_1 = \int_0^\pi \left\{ -\frac{4\pi n}{\lambda E} + \frac{2\pi n^3}{\lambda E} [-\nu p_{11} + (1-\nu)p_{12}] \right\} \times \frac{U_a\rho R \sin[k(R \cos \theta + a)]}{M_a k \cos kH} d\theta, \quad (8)$$

式中: s_1 为垂直姿态下水听器光纤环的环路路径。

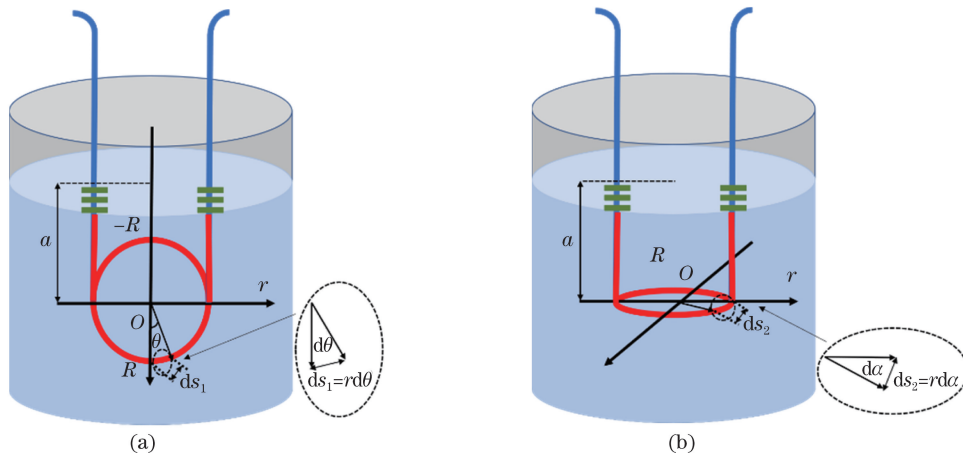


图 2 水听器在不同姿态下的声压场校准模型。(a)垂直姿态;(b)水平姿态

Fig. 2 Acoustic pressure field calibration model of hydrophone with different postures.

(a) Vertical posture; (b) horizontal posture

图 2(b)为 Fizeau 干涉型光纤水听器水平放置姿态下的声压场测试模型,与上述分析类似,此时深度为定值,即 $h = a$,可得水平放置姿态下 Fizeau 光纤水听器的总体相位变化量为

$$\Delta\varphi_H = \int_{s_2} \left\{ -\frac{4\pi n}{\lambda E} + \frac{2\pi n^3}{\lambda E} [-\nu p_{11} + (1-\nu)p_{12}] \right\} \times \frac{U_a\rho\sin ka}{M_a k \cos kH} ds_2 = \int_0^\pi \left\{ -\frac{4\pi n}{\lambda E} + \frac{2\pi n^3}{\lambda E} [-\nu p_{11} + (1-\nu)p_{12}] \right\} \times \frac{U_a\rho R \sin ka}{M_a k \cos kH} d\alpha, \quad (9)$$

式中: α 为水听器光纤环以环心为圆心的角度; s_2 为水平姿态下水听器光纤环的环路路径。

光纤水听器的相位变化量可由解调仪表直接测量获得。如图 1 所示,三路光电探测器输出的干涉信号 $I_{k'}$ ^[16]表示为

$$I_{k'} = D_{k'} + E_{k'} \cos[\varphi(t) + (k-1)2\pi/3], \quad k' = 1, 2, 3, \quad (10)$$

式中: $D_{k'}$ 为直流分量; $E_{k'}$ 为干涉条纹峰值强度;

$\varphi(t)$ 为光纤水听器相位变化量; t 为光波在系统中的传播时间。利用 3×3 解调算法可求得光纤水听器的相位变化量,算法流程如图 3 所示,首先对三路信号求和,去直流后进行加减归一化,通过反正切处理及补偿算法输出解调的相位变化量。其中,HPF 为高通滤波器, I_1 、 I_2 及 I_3 为干涉光经三个光电探测器光电转换后得到的三路电信号。

解调结果的具体表达式为

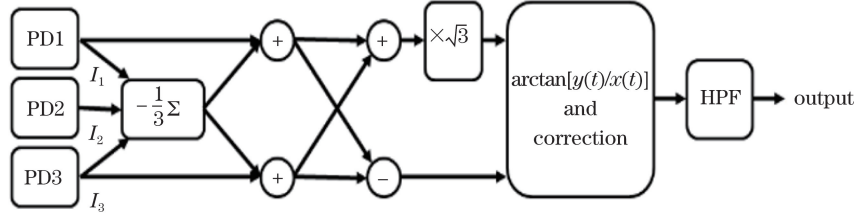


图 3 光纤水听器相位变化量解调算法流程图

Fig. 3 Flow chart of optical fiber hydrophone phase change demodulation algorithm

$$\varphi(t) = \arctan[y(t)/x(t)] - \pi/6 + 2q\pi, \quad q = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

式中： $y(\cdot)$ 为两路去直流信号相加经归一化后得到的值； $x(\cdot)$ 为两路去直流信号相减得到的值。

在声压场下，声压随液柱深度 h 变化，但液柱底部声压可由加速度计所测的液柱底部振动幅值间接获取，待测水听器所处深度的声压由液柱底部声压间接计算获得。因此被测水听器的声压灵敏度^[7]可表示为

$$M = \frac{\Delta\varphi M_a k \cos kh}{U_a \rho \sin kh}. \quad (12)$$

当光纤水听器置于垂直姿态时， $\Delta\varphi = \Delta\varphi_v$ ；当光纤水听器置于水平姿态时 $\Delta\varphi = \Delta\varphi_H$ 。由(8)、(9)式可以看出，水听器在不同姿态下的相位变化量与各传感部分的相位变化量相关，而各传感部分相位变化量又与该部分相对环心角度有较大关系，即水听器姿态对相位变化量有较大影响，进而直接影响声压灵敏度，与此同时，水听器的声压灵敏度计算与水听器置于液柱内部的深度 h 直接相关。

4 Fizeau 干涉型光纤水听器灵敏度误差影响因素仿真分析

光纤水听器灵敏度校准误差与多种因素有关，如加速度计读取的电压幅度 U_a 、电荷放大器的合成灵敏度 M_a 、整体液面深度 H 、水听器深度 h 、水听器位置处的声压 $p(h)$ 。在这些因素中，要对 U_a 进行正确读数，需保证功率放大器在稳定状态下工作；要对 M_a 进行正确选取，需对电荷放大器进行适当带通滤波，使加速度计的输出波形正常；整体液面深度 H 需大于被测光纤水听器直径 1 倍以上；与此同时，需对悬挂机构进行优化设计，以保证不影响光纤水听器声场。由于被校光纤水听器是长腔型结构，在水听器灵敏度校准过程中对声压的计算较为复杂，利用传统方式进行校准会存在计算误差，因此对影响声压的水听器姿态与深度素进行具体分析。

4.1 垂直姿态下 Fizeau 水听器声压灵敏度响应

在声压场测试时，需将长腔型传感器盘成环状进行测试，而测量的整体液面深度用环心所在位置表示。设水听器在垂直状态与水平状态下的声压灵敏度差异为

$$\Delta M = M_H - M_V, \quad (13)$$

式中： M_H 为水平姿态下校准所得的声压灵敏度； M_V 为垂直姿态下校准所得的声压灵敏度。保证两种姿态下水听器环心深度一致。

对于待测频率上限为 2 kHz 的校准需求，设置液柱总体深度为 18.75 cm，水听器环心距液面深度为 10 cm，水听器圆环半径 r 为 2, 4, 6 cm。计算单个光纤环在垂直姿态下声压灵敏度差异随频率变化的关系，结果如图 4 所示。可以看出，随着水声频率增加，Fizeau 水听器在垂直姿态下的测量灵敏度差异逐渐变大，因此水听器垂直姿态会对声压灵敏度产生误差；随着水听器圆环半径变大，垂直姿态下校准所得的灵敏度差异逐渐变大，因此水听器圆环半径设置越小，校准所得的的声压灵敏度就越稳定。

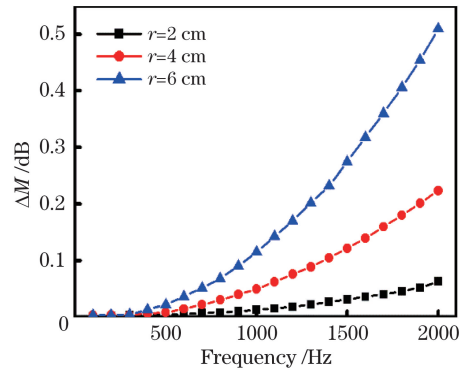


图 4 不同半径下的声压灵敏度响应

Fig. 4 Acoustic pressure sensitivity response under different radiuses

4.2 不同深度下 Fizeau 水听器声压灵敏度响应

当长腔 Fizeau 干涉型水听器盘成圆环进行测试时，环心位置所处深度易对最终的声压灵敏度产生影响，因此当水听器在不同姿态时对声压灵敏度进行测试的结果如图 5 所示。

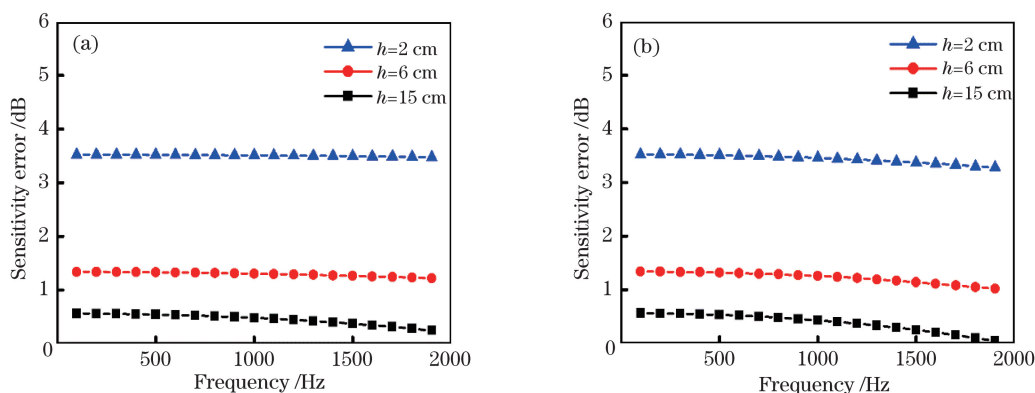


图 5 不同水听器姿态下的声压灵敏度误差。(a)水平姿态;(b)垂直姿态

Fig. 5 Acoustic pressure sensitivity errors under different postures of hydrophone.

(a) Horizontal posture; (b) vertical posture

在声压场条件下,振动台垂直运动,以模拟纵波的传播方式,因而水听器处于与运动方向垂直的水平姿态时,可以保证水平面上的声压均匀一致,控制该因素相同,对比深度读取差异对灵敏度校准误差的影响。令水听器圆环半径为 4 cm,当水平放置时,环心位置与实际位置偏差为 1 cm,分别选取水听器深度为 2,6,15 cm 时的灵敏度误差结果。由图 5 可以看出,灵敏度误差随频率变化较为稳定。当深度 h 为 2 cm 时,测量的灵敏度误差约 3.5 dB,但当深度增加到 15 cm 时,环心位置偏差造成的灵敏度误差逐渐减小到 0.5 dB 以内,说明光纤水听器在液柱的深度越大,声压灵敏度校准结果越稳定。同时还可以发现,水听器在水平姿态与垂直姿态下的灵敏度误差较为一致,深度越大,声压灵敏度校准结果越稳定,但是在垂直姿态下,声压灵敏度校准误差随频率的变化会稍微小一些。

5 实验分析

Fizeau 干涉型光纤水听器系统的实验原理如图 6 所示。其中,窄线宽激光器的线宽为 3 kHz、中心波长为 1550 nm;光电探测器(北京康冠世纪光电科技有限公司)采用 200 MHz 带宽;为保证足够的采样率,数据采集卡(美国国家仪器公司)的采样率为 250×10^6 sample/s;液柱声压场产生装置为具有线性功率放大器的激振台(杭州英迈克测控技术有限公司);加速度计(杭州英迈克测控技术有限公司)的电压灵敏度为 $5.76 \text{ pC/m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

水声频率最高为 2 kHz,在声压场测试条件下,开口圆管内径为 7.50 cm,液柱高度 H 为 18.75 cm。实验系统中,光纤水听器“湿端”部分采用中心波长为 1550 nm 的啁啾光栅,其反射率为 $-40 \text{ dB} \sim -50 \text{ dB}$,光栅对间距为 50 m,即传感器腔长为 50 m。

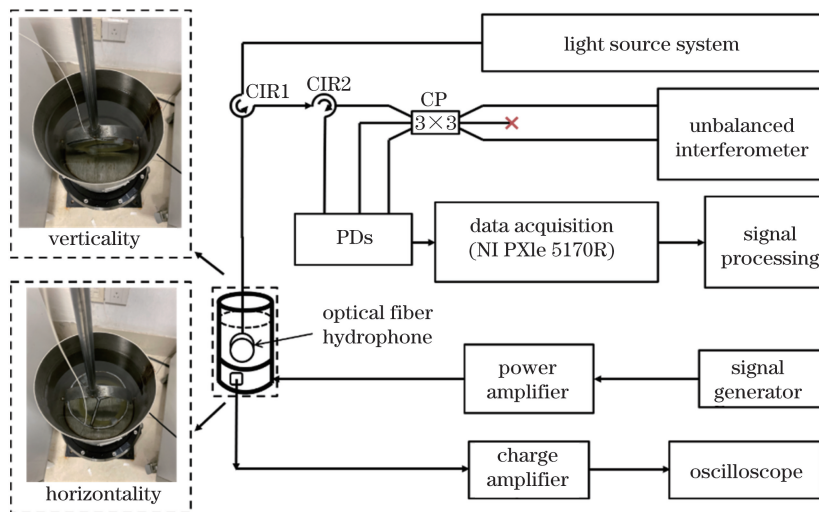


图 6 Fizeau 干涉型光纤水听器实验原理图

Fig. 6 Experimental schematic of Fizeau interferometric optical fiber hydrophone

为保证实验结果的准确性,水听器尽量不靠近管壁,实验中使用的金属罐直径为 16 cm,因此设计的水听器光纤环缠绕半径为 5 cm,缠绕圈数约 160 匝。此外,参考长腔型光纤水听器的声波测试实验设计^[19],光纤水听器校准时的具体固定方式如图 7 所示,水听器光纤环的半径小于旋转支架半径,并将水

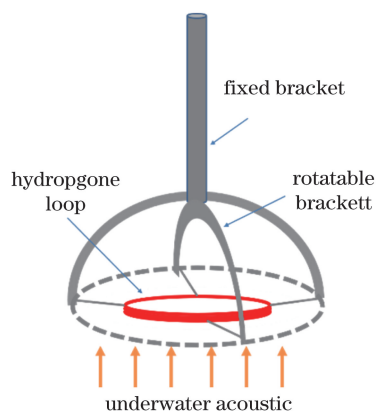


图 7 光纤水听器固定方式设计

Fig. 7 Fixed design of optical fiber hydrophone

听器固定于旋转支架中间。由于固定支架的直径普遍大于水听器直径,且与水听器间隔了一定距离,这缓解了由声波在支架周围形成的反射对水听器周围声场的影响,因此该支架结构对水听器周围声场影响较小。

5.1 垂直与水平姿态下的时域波形

为验证水听器垂直与水平姿态对实验结果的影响,在其他条件相同的情况下,仅调整水听器姿态来对水听器的响应进行测试,在测试深度为 12 cm 下的输出时域波形如图 8 所示。可以看出,在 100, 1000, 2000 Hz 水声频率下,水平姿态下的传感器解调信号幅度均高于垂直姿态下的解调信号,说明水平姿态下水听器内部相位变化量大;随频率增加,垂直与水平姿态下水听器解调幅度差异增加,由于液柱垂直运动以模拟水声纵波声场,因此液柱中相同水平面的声压场一致。水平姿态下传感器所处声场与垂直姿态下的相比更均匀,因此水平姿态下的校准结果更加精确。

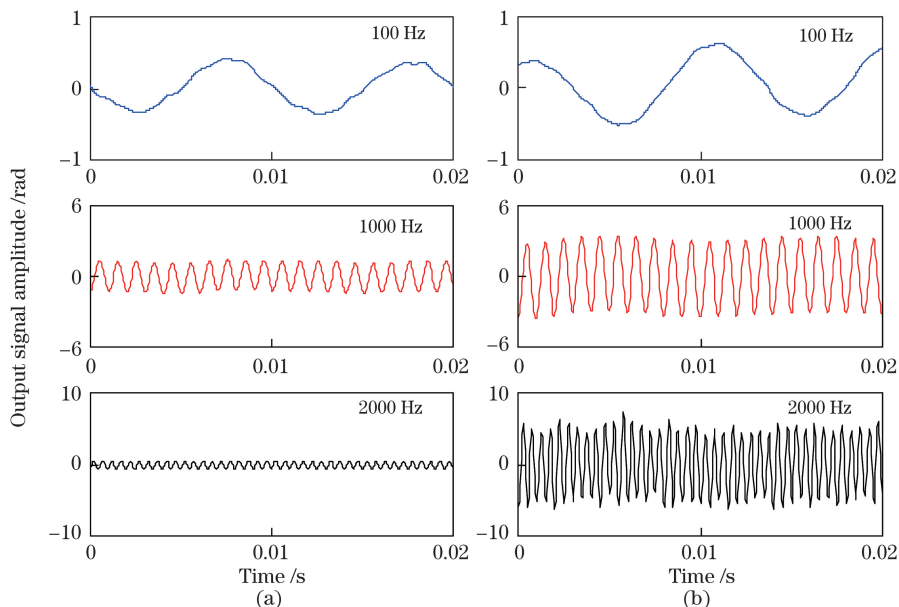


图 8 不同姿态下的输出时域波形。(a)垂直姿态;(b)水平姿态

Fig. 8 Output time-domain waveforms under different postures. (a) Vertical posture; (b) horizontal posture

5.2 垂直姿态下的声压灵敏度响应偏差

为测量垂直姿态下环形水听器的输出声压灵敏度响应,测试了深度为 12 cm、频率为 40~2000 Hz 下的 Fizeau 干涉型光纤水听器的声压灵敏度响应。以光纤水听器水平姿态为角度坐标原点,分别将旋转支架旋转 0°, 45°, 90°, 完成水平到垂直姿态的测试,灵敏度校准结果如图 9 所示。图 10 中, M_1 为将水听器旋转 45°、90° 时得到的声压灵敏度差异,

M_2 为水听器在水平姿态下得到的声压灵敏度差异。进一步分析,在不同测试角度下的声压灵敏度并不一致,且随着旋转角度增加,结合图 10,全频带声压灵敏度差异随角度增加而逐渐增大,且频率越大声压灵敏度差异越大。

从图 9、10 可以看出,声压灵敏度差异 M_1 、 M_2 均值分别为 3.57 dB、7.94 dB,且 90° 垂直姿态下的声压灵敏度差异均大于 45° 下的结果,说明垂直姿

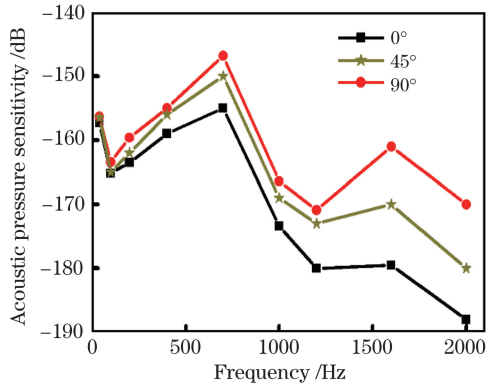


图 9 不同姿态下水听器的声压灵敏度
Fig. 9 Acoustic pressure sensitivity of hydrophone under different postures

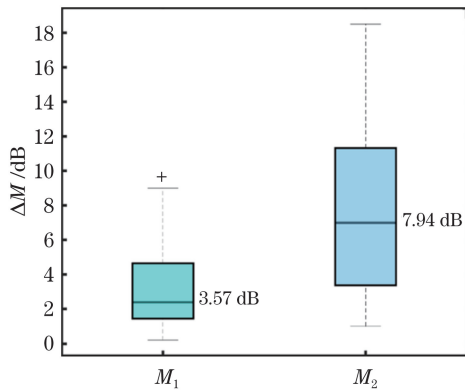


图 10 不同姿态下的灵敏度差异
Fig. 10 Sensitivity difference at different postures

态下的声压灵敏度差异更大;在水听器姿态从 0° 调整至 90° 过程中,声压灵敏度差异逐渐增加,垂直姿态下的声压灵敏度响应与水平姿态下的存在较大差异;随着测试频率的增加,声压灵敏度差异 ΔM 也逐渐增加,这与仿真结果相吻合,在 $40 \sim 2000$ Hz 频带内,声压灵敏度差异逐渐从 0.9 dB 增加到 18.2 dB,说明测试频率较低时,环状光纤水听器姿态对声压灵敏度响应影响较小,反之,随着测试频率的增加,误差差异逐渐增加;水听器旋转 45° 后,声压灵敏度差异随频率增加变得不稳定,这可能是由于水听器旋转后环心位置发生稍微变化,从而水

表 1 不同深度导致的声压灵敏度误差

Table 1 Acoustic pressure sensitivity errors caused by difference depths

Frequency /Hz	$h=2$ cm			$h=6$ cm			$h=15$ cm		
	Actual sensitivity	Measured sensitivity	Error	Actual sensitivity	Measured sensitivity	Error	Actual sensitivity	Measured sensitivity	Error
100	-144.138	-147.902	3.764	-160.215	-161.624	1.409	-164.029	-164.49	0.461
1000	-138.433	-142.253	3.820	-143.361	-144.519	1.158	-164.724	-165.217	0.493
2000	-160.541	-163.866	3.325	-174.309	-175.437	1.128	-174.716	-174.757	0.041

听器对声波的理论计算位置与实际响应位置发生偏差。

从图 8 可以进一步看出,灵敏度响应整体趋势并不平坦,这可能由两方面原因构成的。首先,由于水听器腔长较长、光纤环匝数较多,通过手工缠绕的光纤环本身在结构上并不均匀;其次,由于该环形水听器没有任何结构封装,在自由状态下声压灵敏度响应容易存在较大起伏。参考已有结构体支撑的水听器^[20-21],刚性较大的结构中产生的谐振频率使得水听器能在较低频率下输出平坦的响应,这也为后续研究 Fizeau 干涉型光纤水听器结构提供了参考。

5.3 不同深度下的声压灵敏度响应偏差

对于长腔型光纤水听器而言,在实验室条件下进行声压场校准时,无论有无结构体封装,传感器均需绕成环状进行测试,当水听器的腔长较长时,不同环之间难免存在深度读取差异。如图 11 所示,水平姿态下 160 匝光纤环中间位置深度为 h ,而上、下边缘光纤环深度与之相比存在 Δh 的深度读取差异。

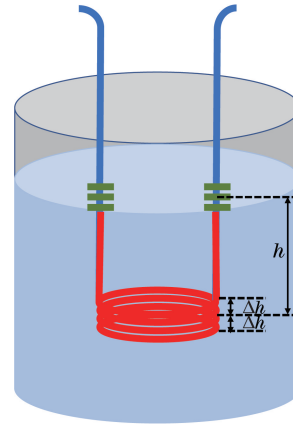


图 11 深度读取差异下的灵敏度校准模型
Fig. 11 Sensitivity calibration model with depth reading difference

为了验证深度读取差异导致的灵敏度校准误差,选取 $h=2, 6, 15$ cm 三个不同深度,当光纤环上、下边缘位置 Δh 为 1 cm 时,对比较准所得的声压灵敏度,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,不同频率下虽然声压灵敏度不尽相同,但深度测量偏差导致的灵敏度校准误差较为一致。在深度 $h = 2$ cm 时,校准误差在 3.0 dB~4.0 dB 之间;在深度 $h = 6$ cm 时,校准误差在 1.0 dB~1.5 dB 之间;在深度 $h = 15$ cm 时,校准误差在 0 dB~0.5 dB 之间,这与仿真结果吻合。

通过上述实验可以得出:在不同频率下,随着测量深度的增加,深度读取差异 Δh 造成的灵敏度校准误差逐渐减小,因此在实际情况下,适当增加水听器深度更有利于减小校准误差。

6 结 论

利用基于 Fizeau 干涉的长腔型光纤水听器进行声压灵敏度低频校准实验研究。在环形测试状态下,水听器垂直姿态与水平姿态会对声压灵敏度校准结果产生较大影响,在 40~2000 Hz 频率下,声压灵敏度误差为 0.9 dB~18.2 dB,水听器在水平姿态下的声压场一致,因此校准结果更精确。深度读取差异会使校准所得的灵敏度产生 4 dB 以内的校准误差,且误差会随着测量深度增加而减小。不同姿态与深度读取差异会对水听器灵敏度校准结果产生影响,因此在声压场条件下,对于振动液柱法与标准水听器比较法两种测试手段而言,非水平姿态以及深度测量偏差均容易增加校准误差。长腔型光纤水听器由于没有结构体支撑,声压灵敏度随频率变化会有较大起伏,后期会从结构封装角度对声压灵敏度进行研究,有望提高水听器响应的平坦度。

通过分析声压场测试条件下的不同参数对校准结果的影响程度,完善了长腔型光纤水听器初期灵敏度校准方法,为后续研究提供了理论与实验支持。在实验过程中,存在声压灵敏度不平坦等问题,进而对实验校准结果产生影响,后续将改进水听器结构体,利用光纤绕环机均匀绕环,使得灵敏度校准结果更加精确。

参 考 文 献

- [1] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Fiber-optic hydrophone[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 62(5): 1302-1304.
- [2] Takahashi N, Yoshimura K, Takahashi S, et al. Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating[J]. Ultrasonics, 2000, 38: 581-585.
- [3] Campopiano S, Cutolo A, Cusano A, et al. Underwater acoustic sensors based on fiber Bragg gratings[J]. Sensors, 2009, 9(6): 4446-4454.
- [4] Kim K S, Mizuno Y, Nakamura K. Fiber-optic ultrasonic hydrophone using short Fabry-Perot cavity with multilayer reflectors deposited on small stub[J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1047-1051.
- [5] Xue Y Q, Zhao H. Investigation on the method of calibrating sensitivity of interference type optical fiber hydrophone[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1999, 19(4): 3-6, 16.
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, 16.
- [6] Chen Y, Zhang J, Zhang M, 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.
- [7] General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the People's Republic of China. Acoustics: low frequency calibration methods of hydrophones: GB/T 4130—2017 [S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 声学水听器低频校准方法: GB/T 4130—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [8] Chen H J, He L B. Low frequency microphone calibration based on the related microphones method [J]. Acta Metrologica Sinica, 2013, 34(4): 383-386.
陈红江, 何龙标. 基于相关传声器比较法的传声器低频校准[J]. 计量学报, 2013, 34(4): 383-386.
- [9] Niu S L, Ma L N, Xiong S D, et al. Spectral-mismatch-induced resolution limit of interferometric fiber Fabry-Perot sensor system[J]. Optics Communications, 2011, 284(24): 5645-5649.
- [10] Chen Y, Zhang J, Jin X F, et al. A calibration technique of sensitivity of fiber grating hydrophone [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1059-1064.
陈毅, 张军, 金晓峰, 等. 一种光纤光栅水听器灵敏度校准技术研究[J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1059-1064.
- [11] Guo Z, Gao K, Yang H, et al. 20-mm-diameter interferometric hydrophone towed array based on fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106003.
郭振, 高侃, 杨辉, 等. 外径 20 mm 的光纤光栅干涉型拖曳水听器阵列[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106003.
- [12] Zhou C M, Pang Y D, Qian L, et al. Demodulation of a hydroacoustic sensor array of fiber interferometers based

- on ultra-weak fiber Bragg grating reflectors using a self-referencing signal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2568-2576.
- [13] Guo H Y, Tang J G, Li X F, et al. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 030602.
- [14] Li Y, Qian L, Zhou C M, et al. Multiple-octave-spanning vibration sensing based on simultaneous vector demodulation of 499 Fizeau interference signals from identical ultra-weak fiber Bragg gratings over 2.5 km[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 210.
- [15] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [16] Pang Y D, Zhou C M, Fan D, et al. Research of very low-frequency(VLF) hydroacoustic detection based on Fizeau interferometry[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington: OSA, 2018: TuE37.
- [17] Peng B J, Liao M, Liao Y B, 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] Liu B, Cao Y, Luo J H, et al. Researching on the experiment of fiber Bragg grating hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(5): 686-689. 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): 686-689.
- [19] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Optical fiber acoustic sensor [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(7): 1761-1762.
- [20] Yin K, Zhang M, Wang L W, et al. Frequency characters of the air-backed mandrel fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(11): 2180-2185. 殷锴, 张敏, 王立威, 等. 芯轴型光纤水听器频率特性研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(11): 2180-2185.
- [21] Moccia M, Consales M, Iadicco A, et al. Resonant hydrophones based on coated fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(15): 2472-2481.