

# 基于一体化结构光纤加速度计的 三维光纤矢量水听器\*

陈 毅<sup>1,2</sup> 刘 飞<sup>3</sup> 佟昊阳<sup>2</sup> 李文静<sup>2</sup> 金晓峰<sup>1†</sup> 徐 平<sup>2</sup>

(1 浙江大学 信息与电子工程学院 杭州 310027)

(2 杭州应用声学研究所 杭州 311400)

(3 北京科技大学 计算机与通信工程学院 北京 100083)

2023 年 8 月 7 日收到

2023 年 9 月 23 日定稿

**摘要** 提出了一种基于一体化结构光纤加速度计的同振式三维光纤矢量水听器。利用质量-弹簧系统的一体化结构设计及其工作原理,研制了基于一体化结构的光纤加速度计。在此基础上,采用推挽式结构和 6 只光纤加速度计,设计制作了一只同振式三维光纤矢量水听器。利用驻波管比较法和差分延时外差解调技术进行测试,结果表明,该光纤矢量水听器在 20~500 Hz 频率范围有较平坦的加速度相移灵敏度频率响应。以  $X$  通道为例,其平均灵敏度为 34.7 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>)),与声质点振动理论计算结果 (36.5 dB) 和有限元仿真结果 (35.5 dB) 接近。

**关键词** 矢量水听器, 光纤, 加速度计, 相移灵敏度

PACS: 43.38

DOI: 10.12395/0371-0025.2023161

CSTR: 32049.14.11-2065.2023161

## A three-dimensional optical fiber vector hydrophone based on optical fiber accelerometers with integrated structural design

CHEN Yi<sup>1,2</sup> LIU Fei<sup>3</sup> TONG Haoyang<sup>2</sup> LI Wenjing<sup>2</sup> JIN Xiaofeng<sup>1†</sup> XU Ping<sup>2</sup>

(1 College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University Hangzhou 310027)

(2 Hangzhou Applied Acoustics Research Institute Hangzhou 311400)

(3 School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing Beijing 100083)

Received Aug. 7, 2023

Revised Sept. 23, 2023

**Abstract** A co-vibrating three-dimensional optical fiber vector hydrophone (OFVH) based on the optical fiber accelerometer with integrated structural design is proposed. Utilizing the integrated structural design and its working principle of mass-spring system, the optical fiber accelerometer with integrated structural design is developed. On this basis, a three-dimensional OFVH is designed and fabricated using the push-pull configuration and six optical fiber accelerometers. The OFVH is measured using standing wave tube comparison method and differential delay heterodyne demodulation technique, the results show that the OFVH has a relatively flat frequency response of acceleration phase-shifted sensitivity in the frequency range of 20–500 Hz. For the  $X$  channel, the average sensitivity is about 34.7 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>)), close to the sound particle vibration theoretical calculation result (36.5 dB) and the finite element simulation result (35.5 dB).

**Keywords** Vector hydrophone, Optical fiber, Accelerometer, Phase-shifted sensitivity

\* 国家自然科学基金项目 (61871345) 资助

† 通讯作者: 金晓峰, [jinx00@zju.edu.cn](mailto:jinx00@zju.edu.cn)

## 引言

通过测量水中声波的声压梯度或声质点振速、位移、加速度等矢量信息<sup>[1]</sup>, 矢量水听器能够形成与声波频率无关的指向性图案<sup>[2-4]</sup>。理论上, 只需单个矢量水听器即可获取声源的方向信息, 不需要利用由大量标量水听器构成的阵列。此外, 当矢量水听器与声压(标量)水听器相结合, 构成复合式矢量水听器时, 可以同时共点测量声场中的声压(标量)和声质点振速(矢量)等信息<sup>[3,5]</sup>。这些信息可单独或联合进行信号处理, 获取更多声场信息。因此, 矢量水听器在海洋噪声测量、水下目标探测、海洋生物研究等领域有很好的应用前景<sup>[5-8]</sup>, 得到了快速发展。

但传统的基于压电敏感元件的矢量水听器在信号的远程传输上存在着一定限制, 采用激光干涉技术的光纤水听器具有信号传输距离远、灵敏度高、抗电磁干扰和易于大规模成阵等特点, 光纤矢量水听器则同时具备两者的技术优势。因此, 自 1980 年 Tveten 等<sup>[9]</sup> 提出光纤加速度计概念以来, 光纤矢量水听器技术一直处于快速发展过程中<sup>[10-18]</sup>。根据传感结构的不同, 目前已研制出干涉型、光纤光栅型、光纤激光器型等不同种类的光纤矢量水听器, 其中最早与最成熟的方案是干涉型光纤矢量水听器, 其传感单元为基于顺变柱体的光纤加速度计, 包括: 1982 年 Kersey 等<sup>[10]</sup> 首次提出的基于顺变柱体加速度计结构的光纤矢量水听器; 2003 年 Meng 等<sup>[13]</sup> 研制的基于该结构的三分量干涉型光纤矢量水听器, 其加速度灵敏度为 56.4 dB (re. 1rad/g), 工作频率上限达 500 Hz; 将基于顺变柱体结构的光纤加速度计应用于地震勘探领域, 研制了三维地震检波器<sup>[14-15]</sup>。2017 年, Zhang 等<sup>[16]</sup> 研究了基于分布反馈光纤激光

器的光纤矢量水听器, 在 5~300 Hz 频率范围获得 33 dB (re. 1 pm/g) 的平坦加速度响应; 2018 年 Jin 等<sup>[17]</sup> 报道了一种基于光纤布拉格光栅 (FBG) 的加速度计, 在 20~200 Hz 频率范围获得 42 dB (re. 1 rad/g) 的加速度灵敏度; 2021 年, Liu 等<sup>[18]</sup> 采用 FBG 阵列作为反射单元, 设计并制作了一款共模噪声自抑制的光纤矢量水听器, 其灵敏度约 40 rad/g (20~630 Hz), 对共模噪声抑制效果提高了 4.5 dB。

综上所述, 目前在光纤矢量水听器的研究中, 仍然以基于顺变柱体加速度计传感单元为主。然而该结构包含芯轴、弹性桶、底座等多个部件, 在实际应用中存在加工、装配过程繁琐等难题。本文提出了一种基于一体化结构光纤加速度计的同振式三维光纤矢量水听器, 在 20~500 Hz 频率范围有较为平坦的加速度相移灵敏度频率响应。不同于传统的采用弹性模量较小的顺变柱体光纤加速度计结构, 它采用质量与弹簧系统的一体化设计, 使结构更为简化。

## 1 光纤加速度计工作原理及结构设计

为便于分析加速度计的振动模态, 图 1 给出了一体化结构光纤加速度计的结构示意图。加速度计主体为椭圆柱体结构(即骨架), 椭圆柱体侧面(即高度方向)切削出凹槽, 以便于光纤缠绕, 使光纤不会从骨架上脱落。椭圆柱体的两个底面上分别开有两条深浅槽, 用于减少应力集中。在椭圆柱体中间以贯穿式切割出两条细缝, 形成一个横梁。切割缝下方开有两个贯穿孔, 借助于螺栓可将光纤加速度计固定在支架上。

在低频微小形变前提下, 当椭圆柱体在  $x$  轴方向上产生加速度时, 两条细缝和同侧的光纤可以看作两个弹簧-阻尼系统, 分别连接双缝上方质量块、横梁和双缝下方质量块。其中,  $m_1$  为双缝上方质量

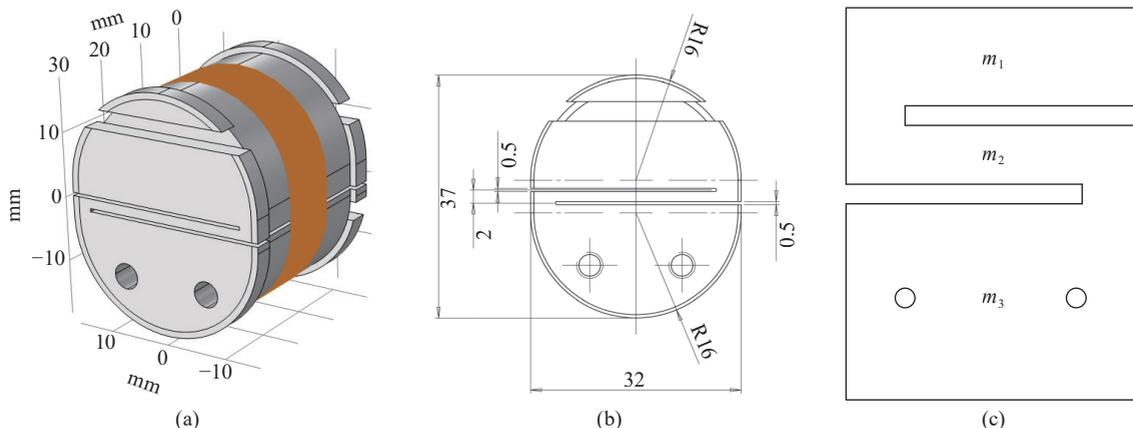


图 1 一体化结构光纤加速度计的结构示意图 (a) 构造图; (b) 构造简图; (c) 结构简图

块的质量;  $m_2$  为双缝之间横梁的质量;  $m_3$  为双缝下方质量块的质量。此时, 根据声质点振动理论, 可将一体化结构光纤加速度计进一步简化为一个三阶的质量-弹簧系统, 如图 2 所示。其中,  $c_1$  为上方缝隙和同侧光纤的阻尼,  $k_1$  为上方缝隙和同侧光纤的弹性系数,  $c_2$  为下方缝隙和同侧光纤的阻尼,  $k_2$  为下方缝隙和同侧光纤的弹性系数。由于下方质量块与支架为刚性连接, 所以  $m_3$  可视为无穷大。

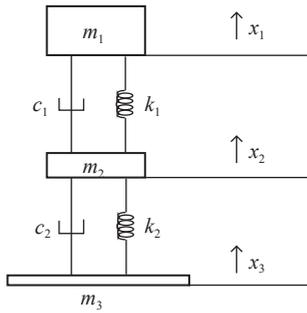


图 2 一体化结构光纤加速度计的振动模型简化图

在实际过程中, 光纤缠绕在椭圆柱体的侧面, 即图 1(a) 中的黄色区域。当有外界加速度信号作用在下方质量块  $m_3$  上时, 最上方的质量块  $m_1$  会发生相对位移, 从而在表面缠绕的光纤中引入应变, 进而通过弹光效应引起光纤中光波传播的相位变化。在光纤缠绕过程中, 需要在光纤上施加一定的预紧力, 这样当质量块  $m_1$  有相对向上的运动时, 光纤可以被拉伸; 当  $m_1$  相对向下运动时, 光纤可以被收缩。与传统的顺变柱体方案相比, 该方案不需要芯轴、弹性桶、底座等多个部件, 简化了设计。

因为一体化结构光纤加速度计的结构近似于中心对称, 所以, 可以对阻尼系数和弹性系数进行化简, 令  $k = k_1 = k_2$ ,  $c = c_1 = c_2$ 。由一体化结构光纤加速度计振动模型, 可以写出质量-弹簧系统的运动方程:

$$m_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} = -k(x_1 - x_2) - c \frac{\partial(x_1 - x_2)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$m_2 \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} = k(x_1 - x_2) + c \frac{\partial(x_1 - x_2)}{\partial t} - k(x_2 - x_3) - c \frac{\partial(x_2 - x_3)}{\partial t}, \quad (2)$$

式中,  $x_1, x_2, x_3$  分别代表质量块  $m_1, m_2, m_3$  在  $x$  轴方向的位移。

在简谐振动条件下, 将式 (1) 代入式 (2) 进行化简, 可得  $x_1$  与  $x_3$  之间的关系式为

$$x_3 = \alpha x_1, \quad (3)$$

式中

$$\alpha = \frac{(k + j\omega c - \omega^2 m_1)(2k + 2j\omega c - \omega^2 m_2)}{(k + j\omega c)^2} - 1,$$

其中,  $\omega$  为系统振动的角频率,  $j$  为虚数单位。

干涉光相移量正比于光纤的拉伸量, 光纤的拉伸量正比于  $m_1$  和  $m_3$  之间的相对位移。令  $\Delta x = |x_1 - x_3|$ , 则一体化结构光纤加速度计的加速度相移灵敏度正比于  $\Delta x$  与作用到光纤加速度计上  $x$  方向的加速度  $a_3$  之间的比值, 即

$$M_a \propto \frac{\Delta x}{a_3} = \frac{|x_1 - x_3|}{a_3} = \frac{|1 - \alpha|}{\omega^2 \alpha}. \quad (4)$$

光纤加速度计的干涉仪结构采用 Michelson 型干涉仪。设一体化结构光纤加速度计上缠绕的光纤圈数为  $N$ , 则骨架振动引起敏感光纤的长度变化为  $\Delta l = 2N \cdot \Delta x$  (系数 2 代表缠绕在弹簧两侧产生形变效果之和)。故光纤加速度计中干涉仪的相位变化为

$$\Delta \phi = 2 \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \Delta l = \frac{8\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \xi N \Delta x, \quad (5)$$

式中,  $n_{\text{eff}}$  为光纤纤芯的折射率,  $\lambda$  为光波长,  $\xi$  为综合考虑光纤的应变效应和弹光效应引起的光相移系数, 对于目前常用的普通单模光纤, 其取值约为 0.7~0.8, 在本文中取为 0.75。

将式 (4) 代入式 (5), 即可得到一体化结构光纤加速度计的加速度相移灵敏度为

$$M_a = \frac{\Delta \phi}{a_3} = \frac{|1 - \alpha|}{\omega^2 \alpha} \frac{6\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}. \quad (6)$$

## 2 光纤加速度计性能仿真分析与测试

### 2.1 光纤加速度计的仿真分析

在水声探测中, 水听器的工作频率越来越向低频方向发展, 同时要求其等效噪声压尽可能低于零级海况。如果光纤矢量水听器工作在深海, 取深海零级海况约 40 dB (re. 1  $\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), 解调系统的噪声按 -100 dB (re. 1 rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) 计算, 则声压相移灵敏度级不得低于 -140 dB (re. 1 rad/ $\mu\text{Pa}$ ), 即 0.1 rad/Pa。光纤矢量水听器的加速度相移灵敏度  $M_a$  与声压相移灵敏度  $M_p$  有如下关系<sup>[19]</sup>:

$$M_p = \frac{\omega}{\rho c_w} M_a, \quad (7)$$

式中,  $\omega$  为声信号角频率,  $\rho$  为水的密度,  $c_w$  为水中声速。

因此,  $M_a$  应不小于 28 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>))。经综合考虑, 一体化结构光纤加速度计的相关参数设计如下: 椭圆柱体结构采用黄铜制作, 高 30 mm, 椭圆长轴 37 mm, 短轴 32 mm。侧面切削出的凹槽高

28 mm, 两个底面分别开有两条 3 mm 深浅槽, 宽 5 mm。椭圆柱体中间的两条细缝宽 0.5 mm, 两缝间间距为 2 mm。

利用 COMSOL 软件对一体化结构光纤加速度计的加速度相移灵敏度频率响应进行有限元仿真计算。为了提升计算效率, 建模时用薄膜代替缠绕在椭圆柱体上的敏感光纤。记敏感光纤的弹性模量为  $E_1$ , 其缠绕在骨架上的总面积为  $S_1$ , 薄膜的弹性模量为  $E_2$ , 面积为  $S_2$ , 则有  $E_1S_1 = E_2S_2$ 。

图 3 给出了一体化结构光纤加速度计经归一化处理后的形变模态仿真结果。图 3(a)(c)(e) 分别对应一体化结构光纤加速度计振动的 0 阶模态、I 阶模态和 II 阶模态; 为了更加直观的表现加速度计的振动模态, 图 3(b)(d)(f) 为振动幅值放大约 500 倍后的效果图。

根据仿真结果可知, I 阶模态的谐振频率为 1381 Hz, II 阶模态的谐振频率为 1532 Hz。图 4 给出了一体化结构光纤加速度计的加速度相移灵敏度频率响应的声质点振动理论计算结果和有限元仿真计算结果。为了与后面的加速度相移灵敏度测量结果相比较, 图中的频率点按 1/3 oct 选取。

可见, 在加速度作用下, 一体化结构光纤加速度计的振动幅值理论计算最大值出现在 1250 Hz, 有限元仿真计算最大值在 1600 Hz。两者在 1250 Hz 以下频率有较好的一致性, 说明理论计算在加速度计 0 阶振动模态计算上有较好的效果。随着频率升高, 加速度计的振动开始出现不同模态, 上方质量块开始出现旋转运动, 此时理论公式不再适用于高阶模态的振动描述, 在 1250 Hz 及以上频率, 声质点振动理论计算结果和有限元仿真计算结果开始出现较大偏差。因此, 实际应用时工作频率应低于 I 阶谐振频率, 对高于谐振频率的计算本文不再讨论。

### 2.2 光纤加速度计的振动台测试

在本文中, 采用光纤光栅串制作光纤加速度计的传感光纤。采用双脉冲外差法对光纤加速度计拾

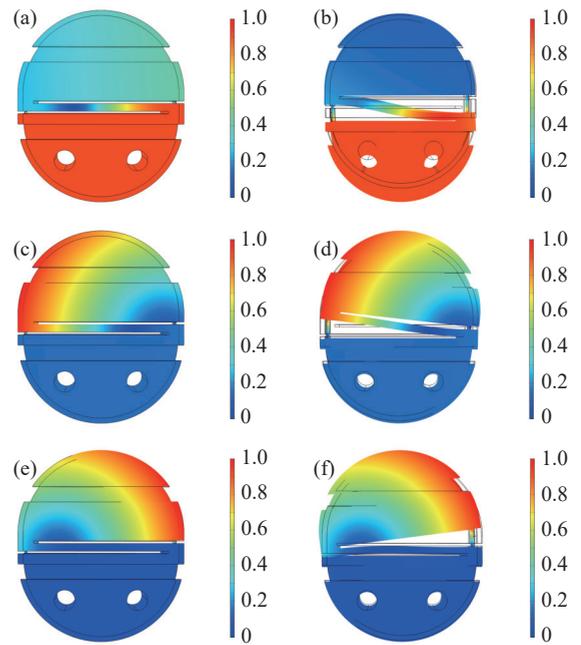


图 3 一体化结构光纤加速度计形变模态 (a) 0 阶模态-微小形变; (b) 0 阶模态-放大; (c) I 阶模态-微小形变; (d) I 阶模态-放大; (e) II 阶模态-微小形变; (f) II 阶模态-放大

取到的相位变化进行解调, 其光路结构如图 5 所示。激光器输出中心频率为  $f_0$  的低噪声、窄线宽连续光波, 被声光调制器 (AOM) 调制为一个重复的差分脉冲对, 其中前后两个脉冲分别移频到  $f_0 + f_1$  和  $f_0 + f_2$  (其频率差称为外差频率  $\Delta f$ ), 两个脉冲之间的间隔为  $\tau$ , 重复频率为  $f_{rep}$  (重复周期  $T_{rep} = 1/f_{rep}$ )。AOM 由自研的 AOM 驱动器驱动, 以产生差分脉冲对。

此差分脉冲对通过环形器后, 被一个分光比为 50:50 的光耦合器分为两部分, 一部分进入传感单元 X1, 该单元主要为一段缠绕在上述椭圆柱体上的传感光纤 (其长度为  $L$ ), 两端分别刻有一段低反射率 ( $<3\%$ ) 的光纤光栅, 用于反射光脉冲信号。两个光栅的间隔  $L$  和双脉冲时间间隔  $\tau$  满足:  $L = \tau c_0 / (2n_{eff})$ , 其中  $c_0$  为光速。当双脉冲从光纤加速度计中返回时, 会产生一个如图 5 中橙色矩形所示的脉冲干涉信号。同样, 另一部分进入到传感单元 X2 的差分脉

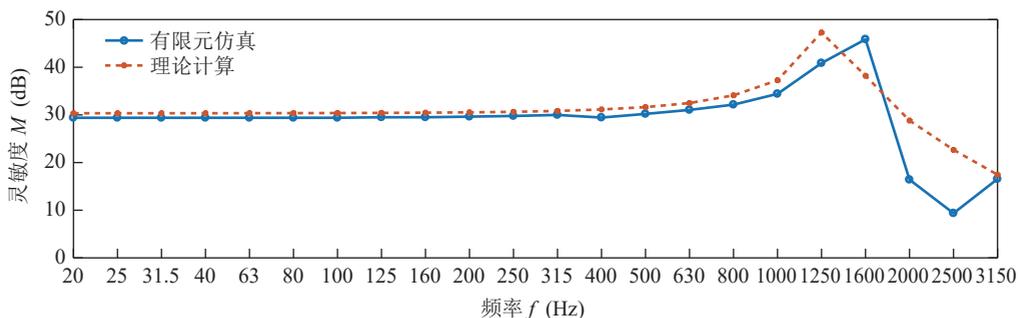


图 4 声质点振动理论和有限元仿真计算结果对比

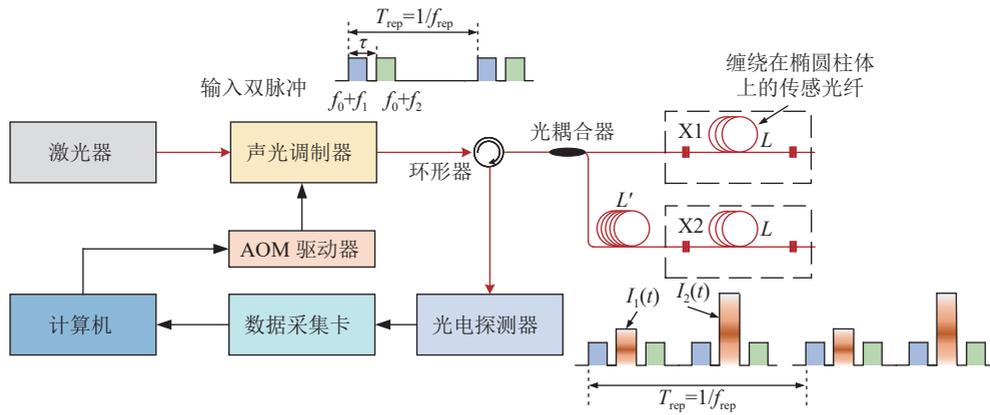


图5 双脉冲外差法解调光路结构示意图

冲对也会返回相同的脉冲干涉信号。为了防止 X1 和 X2 返回的干涉信号在时域上相互重叠, 在光耦合器和 X2 之间增加一段长度为  $L'$  (满足  $L' > 2L$ ) 的延时光纤。返回的干涉信号经光电探测器转换为电信号, 由数据采集卡采集后转为数字信号, 再通过解时分算法计算, 可以恢复出 X1 和 X2 对应的干涉信号:

$$I_{X1}(t) = A_1 [1 + v_1 \cos(2\pi\Delta f t + \phi_s(t) + \phi_n(t) + \phi_{01})], \quad (8)$$

$$I_{X2}(t) = A_2 [1 + v_2 \cos(2\pi\Delta f t - \phi_s(t) + \phi_n(t) + \phi_{02})], \quad (9)$$

式中,  $A_1$  和  $A_2$  分别为两路干涉信号的强度;  $v_1$  和  $v_2$  分别为其对比度;  $\phi_s(t)$  为外界声波振动信号作用在传感单元上引起的相位变化,  $\phi_n(t)$  为解调系统引入的噪声,  $\phi_{01}$  和  $\phi_{02}$  分别为两个通道的直流相位点。利用外差解调方案<sup>[18]</sup>, 可以从式 (8) 和式 (9) 中恢复出相位信号, 再经过相减、去直流等运算后, 得到被测通道的相位变化值为  $2\phi_s$ 。对于本论文关注的 20~500 Hz 频段, 双脉冲外差法解调系统的噪声水平平均约为  $-100$  dB (re. 1 rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )<sup>[18]</sup>, 动态范围大于 120 dB<sup>[20]</sup>。

如图 6 所示, 在空气中利用振动台对该光纤加速度计的加速度相移灵敏度频响曲线进行测试, 测量结果见图 7。

可见, 振动台测得的 6 只光纤加速度计的加速度相移灵敏度在 1250 Hz 有最大值, 在 1250 Hz 以下频段, 1#与 2#光纤加速度计、3#与 4#光纤加速度计、5#与 6#光纤加速度计的加速度相移灵敏度频率响应曲线十分接近。它们在 20~500 Hz 频率范围有较为平坦的加速度相移灵敏度频响曲线, 平均加速度相移灵敏度约为 30.0 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>))。

### 3 三维同振式光纤矢量水听器研制

#### 3.1 光纤加速度计配对组合及灵敏度计算分析

将 1#与 2#、3#与 4#、5#与 6#光纤加速度计, 两

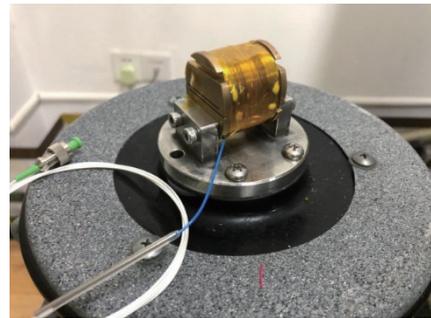


图6 光纤加速度计的振动台测试图

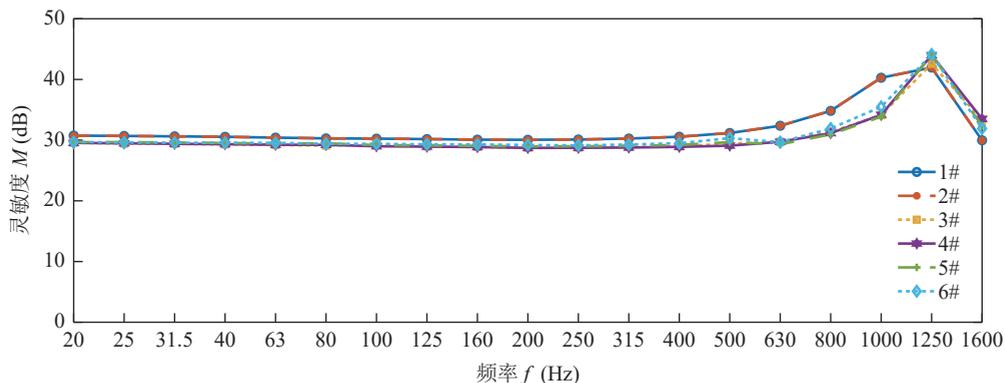


图7 光纤加速度计加速度相移灵敏度频响曲线

两配对构成 A、B、C 三组推挽式光纤加速度计结构。根据式 (6), 可得到单组推挽式光纤加速度计的加速度相移灵敏度计算式为

$$M_a = 2 \times \frac{\Delta\phi}{a_3} = \frac{|1-\alpha|}{\omega^2\alpha} \frac{12\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}. \quad (10)$$

在空气中利用振动台测试三组推挽式光纤加速度计的频率响应, 结果见表 1。在 20~500 Hz 频率范围内, A、B、C 三组推挽式光纤加速度计的灵敏度较为接近, 平均加速度相移灵敏度约为 36.0 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>)), 比单只一体化结构光纤加速度计的加速度相移灵敏度提升约 6.0 dB。

图 8 给出了 A、B、C 三组推挽式光纤加速度计加速度相移灵敏度的振动台测试结果曲线, 它们与声质点振动理论计算和有限元仿真分析得到的加速度相移灵敏度频响曲线较为一致。

### 3.2 三维光纤矢量水听器的制作

将三组推挽式光纤加速度计, 安装在光纤矢量水听器结构上, 组成光纤矢量水听器的 X、Y、Z 三个正交通道, 由此制作一个基于推挽式结构的同振式三维光纤矢量水听器, 如图 9 所示, 用于测量 X、Y 和 Z 通道上的声质点加速度。安装时, 将 A、B、C 三组推挽式光纤加速度计分别装到框架结构的 X、Y 和 Z 通道上, 使两只一体化结构光纤加速度计的参考中心与中心点的距离严格对称, 最终使三个通道的参考声中心及光纤矢量水听器的中心、几何中心都位于正交中心点上。

光纤矢量水听器壳体材料采用一种以双酚 A 环氧树脂为基材的复合材料, 配方中添加一定比例的玻璃微珠以调节复合材料的密度。制作时, 先灌注加工两个内部镂空的半球形, 在一个半球形结构内部安装固定三维光纤加速度计, 盖上另一个半球形结构, 再进行密封处理, 使之能在水中长时间工作。

表 1 三组推挽式加速度计的加速度相移灵敏度测试结果

$f$ (Hz)	$M_A$ (dB)	$M_B$ (dB)	$M_C$ (dB)
20	37.0	36.0	35.9
25	36.9	36.0	35.9
31.5	36.8	35.9	35.8
40	36.7	35.8	35.6
63	36.6	35.9	35.5
80	36.4	35.5	35.3
100	36.4	35.4	35.3
125	36.3	35.3	35.2
160	36.2	35.3	35.1
200	36.3	35.3	35.1
250	36.4	35.4	35.2
315	36.6	35.7	35.3
400	37.1	36.0	35.7
500	37.8	36.7	36.2
630	39.7	37.9	37.7
800	45.3	43.0	43.0
1000	52.3	48.0	44.9
1250	46.7	53.4	53.3
1600	41.5	43.1	42.6

## 4 光纤矢量水听器性能测试与讨论

光纤矢量水听器的加速度相移灵敏度采用驻波管标准水听器比较法<sup>[21-23]</sup>测量, 由测得的声压计算得到光纤矢量水听器参考中心所在深度处的声质点加速度  $a$ , 再利用下式计算被测通道的加速度相移灵敏度:

$$M_a = \frac{\phi_s}{a}, \quad (11)$$

式中,  $\phi_s$  为光纤矢量水听器被测通道输出的光相移量, 经光电探测器转换后输出电信号, 由差分延时外差解调系统<sup>[20, 24]</sup>进行解调得到。

图 10 为利用驻波管标准水听器比较法测得的 X、Y、Z 三个通道的加速度相移灵敏度结果。在 20~500 Hz 频率范围内, 光纤矢量水听器的 X、Y、

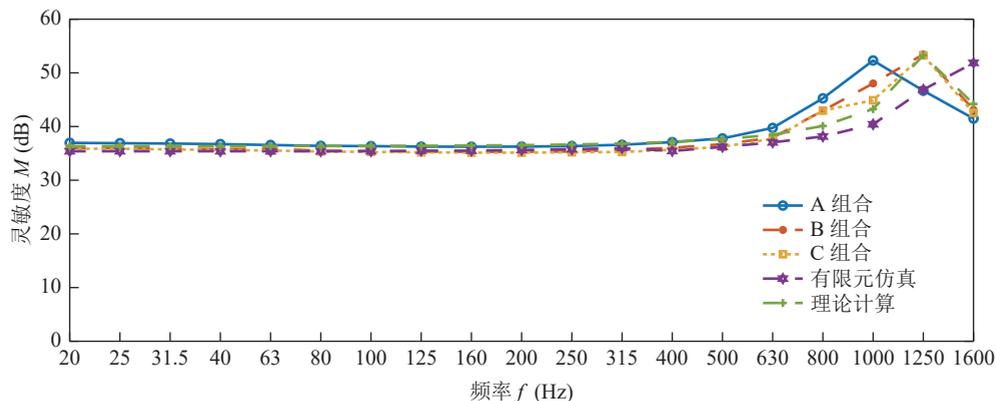


图 8 振动台测试与声质点振动理论计算及有限元仿真结果对比

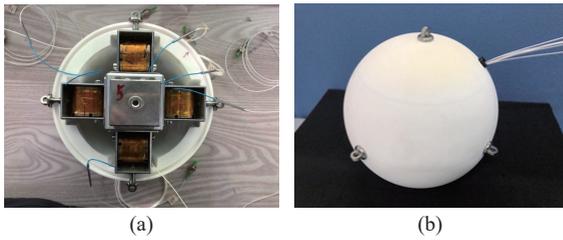


图9 基于一体化结构光纤加速度计的同振式三维光纤矢量水听器 (a) 内部结构; (b) 外观照片

Z 三个通道都有较为平坦的频率响应。其中, X 与 Y 通道的值十分接近。以 X 通道为例, 其平均加速度相移灵敏度约 34.7 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>)), 与理论计算结果 (36.5 dB) 和有限元仿真计算结果 (35.5 dB) 较为一致; 固定方式和测量介质的变化, 导致其灵敏度略有下降。Z 通道的平均加速度相移灵敏度约 29.1 dB, 这是因为硫化过程中一体化结构光纤加速度计的光路受到了损坏, 未能形成推挽式结构。

由于结构与解调方案相同, 光纤矢量水听器的 X、Y、Z 通道指向性类似。图 11 为光纤矢量水听器 X 通道在 20 Hz 和 500 Hz 时的指向性图, 按 5° 间隔进行测试。500 Hz 时, X 通道具有良好的“8”字形指向性图案, 其横向抑制比为 23.6 dB, 轴向灵敏度不对称性为 0.02 dB, 对称性很好。频率较低 (20 Hz) 时,

受低频振动耦合的影响, 横向抑制效果变差, 导致 X 通道的指向性图案变差。

光纤矢量水听器测试的测量不确定度<sup>[25]</sup> 约为 1.5 dB ( $k=2$ ), 主要由测量重复性、标准水听器灵敏度校准误差、数字示波器量化误差、光纤矢量水听器和标准水听器深度定位偏差、驻波管声场分布不均匀、差分延时外差解调系统测量误差、光纤矢量水听器指向性偏差、测量夹具的声散射、驻波管水中声速计量误差、水密度值引用误差、无规噪声和电磁干扰等因素引起。

### 5 结论

对光纤加速度计进行了一体化结构的优化设计, 采用推挽式结构和 6 只一体化结构光纤加速度计, 研制了同振式三维光纤矢量水听器。不同于传统的采用弹性模量较小的顺变柱体作为振动-应变转换单元 (即质量-弹簧系统) 的光纤矢量水听器, 本文研制的光纤矢量水听器, 由于采用质量-弹簧系统一体化结构设计的光纤加速度计, 结构简单, 安装方便。驻波管比较法测试结果表明, 该光纤矢量水听器加速度相移灵敏度的最大值出现在 1000 Hz, 并在 20~500 Hz 频率范围有较为平坦的灵敏度频率响应,

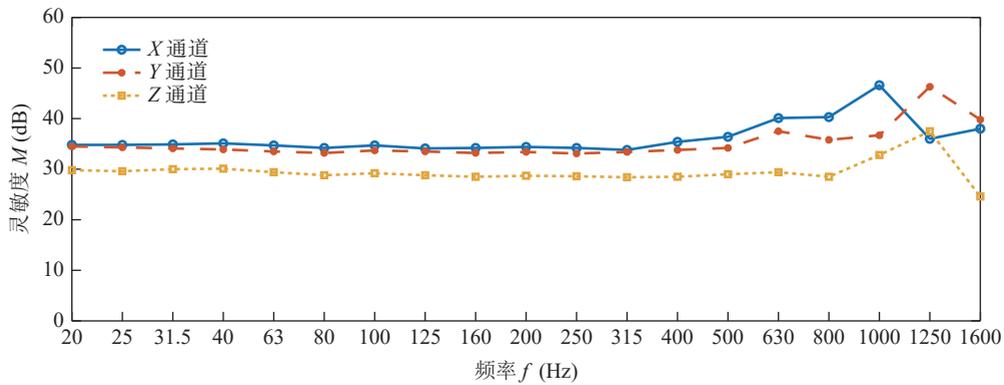


图 10 光纤矢量水听器 X、Y、Z 通道加速度相移灵敏度频率响应

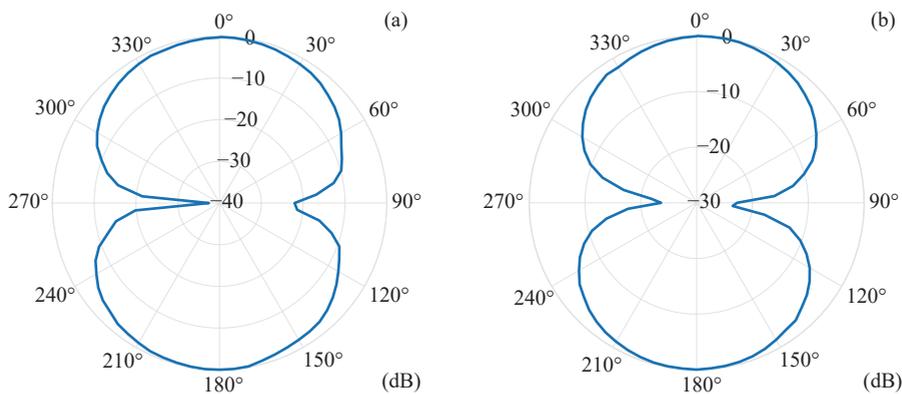


图 11 光纤矢量水听器 X 通道指向性图 (a) 20 Hz; (b) 500 Hz

平均加速度相移灵敏度为 34.7 dB (re. 1 rad/(m·s<sup>-2</sup>))。本文采用差分延时外差法对光纤矢量水听器输出的光相移信号进行解调,这也为将来光纤矢量水听器阵列复用提供了一定的研究基础。该工作还可进一步改进,如利用光纤水听器构成声压水听器,与三维光纤矢量水听器复合,形成复合式光纤矢量水听器,以获取更多的水下声场信息。

**致谢** 感谢中国电子科技集团公司第二十三研究所杨辉、中国地质大学张洪和杭州应用声学研究所朱学文、贾广慧、杨柳青、杨帅、刘博在光纤矢量水听器研制与试验过程中提供的帮助。

### 参 考 文 献

- Leslie C B, Kendall J M, Jones J L. Hydrophone for measuring particle velocity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1956; **28**(4): 711–716
- 贾志富. 三维同振球型矢量水听器的特性及其结构设计. *应用声学*, 2001; **20**(4): 15–20
- 杨德森, 洪连进. 矢量水听器原理及应用引论. 北京: 科学出版社, 2009
- IEC 63305: 2024. Underwater acoustics – Calibration of acoustic wave vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2024
- Gordienko V A. 声矢量—相位技术. 贾志富, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014
- 柳艾飞, 杨德森, 时胜国, 等. 各向同性噪声场中单矢量传感器虚源消除 MUSIC 测向方法. *声学学报*, 2019; **44**(4): 698–706
- 王超, 笄良龙, 韩梅, 等. 单矢量水听器稀疏近似最小方差方位估计算法. *声学学报*, 2021; **46**(6): 1050–1058
- Nedelec S L, Ainslie M A, Andersson M, *et al.* Best practice guide for underwater particle motion measurement for biological applications. Technical Report by the University of Exeter for the IOGP Marine Sound and Life Joint Industry Programme, 2021
- Tveten A B, Dandridge A, Davis C M, *et al.* Fibre optic accelerometer. *Electron. Lett.*, 1980; **16**(22): 854–856
- Kersey A D, Jackson D A, Corke M. High-sensitivity fibre-optic accelerometer. *Electron. Lett.*, 1982; **18**(13): 559–561
- Pechstedt R D, Jackson D A. Performance analysis of a fiber optic accelerometer based on a compliant cylinder design. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995; **66**(1): 207–214
- Ames G H, Maguire J M. Erbium fiber laser accelerometer. *IEEE Sens. J.*, 2007; **7**(4): 557–561
- Meng Z, Chen W, Wang J, *et al.* Recent progress in fiber-optic hydrophones. *Photonic Sens.*, 2021; **11**: 109–122
- Chen J D, Chang T Y, Fu Q J, *et al.* A fiber-optic interferometric tri-component geophone for ocean floor seismic monitoring. *Sensors*, 2016; **47**(17): 1–12
- Cranch G A, Nash P J. High-responsivity fiber-optic flexural disk accelerometers. *J. Lightwave Technol.*, 2000; **18**(9): 1233–1243
- Zhang X L, Zhang F X, Jiang S D, *et al.* Short cavity DFB fiber laser based vector hydrophone for low frequency signal detection. *Photonic Sens.*, 2017; **7**(4): 325–328
- Jin M Q, Ge H L, Li D M, *et al.* Three-component homovibrational vector hydrophone based on fiber Bragg grating F-P interferometry. *Appl. Opt.*, 2018; **57**(30): 9195–9202
- Liu F, Yi D, Chen Y, *et al.* Common-mode noise self-suppressed 3-component fiber optic accelerometer based on low-reflectivity bragg gratings. *Opt. Lett.*, 2021; **46**(7): 1596–1599
- 陈毅, 赵涵, 袁文俊. 水下电声参数测量. 北京: 兵器工业出版社, 2017
- Liu F, Zhang M, Yi D, *et al.* Analysis and improvement of dynamic range in a time-division-multiplexing interferometric fiber-optic sensor array. *Opt. Lett.*, 2023; **48**(4): 988–991
- Chen Y, Isaev A E, Jia G, *et al.* Calibration methods of vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz and their comparison verifications. The 5th International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Crete, Greece, 2019
- 陈毅, 贾广慧, 费腾, 等. 5 Hz~10 kHz 频率范围矢量水听器校准国际主导比对. *计量学报*, 2020; **41**(10): 1279–1283
- Chen Y, Jia G, Wu B, *et al.* Discussion on some key measurement issues in calibration of an inertial vector receiver. OCEANS 2022, Hampton Roads, VA, USA, 2022
- GB/T 42559—2023. 声学干涉型光纤水听器相移灵敏度测量. 北京: 中国标准出版社, 2023
- ISO/IEC Guide 98-3. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995). International Organization for standardization, Switzerland, 2008