

文章编号 1004-924X(2025)10-1550-08

用于深海环境的光纤水听器基元设计与测试

孙晓园, 光 东, 邓草原, 俞本立*

(安徽大学 物理与光电工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了提高光纤水听器在深海环境中检测声波的灵敏度, 设计了一种基于推挽式结构的深海光纤水听器基元, 可以实现深海 3 000 m 处 10 Hz~2 kHz 目标水声信号的有效探测。首先, 基于 Michelson 干涉仪介绍推挽式深海光纤水听器的构成与声压灵敏度理论, 接着利用弹性力学理论分析声压转换机理, 通过有限元方法模拟仿真水听器探头的弹性筒结构尺寸参数对声压灵敏度的影响, 并针对水听器在深水环境下工作的稳定性进行了探究。根据计算结果分别制作了 5 组不同结构和制作工艺的光纤水听器基元。最后, 通过高静水压灵敏度系统测试, 模拟 5 组光纤水听器在深海 3 000 m 处的工作性能, 验证水听器弹性筒的结构参数和制作工艺对其在深海环境中声压灵敏度的影响。实验结果显示, 光纤水听器基元的结构和制作工艺可以显著地影响其在深海环境中工作性能和稳定性, 经过结构参数和制作工艺优化后的光纤水听器在深海 3 000 m 处 10 Hz~2 kHz 频带范围内的水声信号的响应, 其平均声压灵敏度可达到 -127 dB re rad/ μ Pa, 相比优化前提高了 7 dB re rad/ μ Pa。综上所述, 优化后的水听器基本满足深海高静水压下声波的高灵敏可靠探测要求。

关键词: 光纤水听器; 推挽式结构; 声波灵敏度; 深水耐压测试

中图分类号: TH766 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253310. 1550

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253310. 1550

Design and test of fiber optic hydrophone element for deep-sea application

SUN Xiaoyuan, GUANG Dong, DENG Caoyuan, YU Benli*

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

* Corresponding author, E-mail: benliyu@ahu. edu. cn

Abstract: In order to improve the acoustic sensitivity of a fiber optic hydrophone in a deep-sea environment, a deep-sea fiber optic hydrophone element based on a push-pull mandrel structure was designed. It could effectively detect target underwater acoustic signals of 10 Hz-2 kHz at 3 000 meters in the deep sea. First, based on the Michelson interferometer, the composition and acoustic sensitivity of the fiber optic hydrophone with a push-pull mandrel structure were introduced. Then, the acoustic pressure conversion mechanism was analyzed using elastic mechanics theory. Afterward, the influence of the elastic tube structural parameters of the hydrophone primitives on acoustic sensitivity was simulated via the finite element method. Meanwhile, the working stability under deep-sea conditions was explored. According to the calculation results, five groups of fiber optic hydrophone elements with different structures and manufacturing processes were fabricated. Finally, the working performance of the five groups of fiber optic hydrophones

收稿日期: 2025-03-20; 修订日期: 2025-04-12.

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划基础领域项目 (No. 2023z04020012)

at 3 000 meters deep-sea was tested using a high hydrostatic pressure acoustic sensitivity system to verify the influence of structural parameters and manufacturing processes on acoustic sensitivity in a deep-sea environment. The experimental results show that the structure parameters and fabrication process of fiber optic hydrophone can significantly affect its working performance and stability in deep-sea environment. After optimization, the fiber optic hydrophone's response of underwater acoustic signal in 10 Hz-2 kHz frequency band at 3 000 meters deep-sea can reach -127 dB re rad/ μ Pa, which is 7 dB re rad/ μ Pa higher than before. It basically meets the requirements of high sensitivity and reliable detection of sound waves for deep-sea application.

Key words: fiber optic hydrophone; push-pull mandrel structure; pressure acoustic sensitivity; hydrostatic pressure test

1 引 言

伴随着“海洋强国”战略的提出,国内的深海探测得到了极大的发展。人类感知环境的方法同样在深海领域的应用也越来越广泛。其中,水听器是声呐系统中获取水声信号的关键设备。水下声学探测设备主要以压电水听器声呐和光纤水听器声呐为主,压电水听器发展较早,目前产品产业化已成熟,我国中船重工研制的电学水听器可在深海 3 000 m 下工作,但声压灵敏度普遍在 -194.5 dB/re 1V/ μ Pa^[1]。

相比传统的电学水听器,光纤水听器具有更高的灵敏度,是水下声传感技术中理想的声信号接收仪器之一。近年来,光纤水听器在水下目标探测、国土领海安全、海洋资源勘探、海底监测等行业领域的应用越来越广泛^[2-3]。随着深海资源开采活动的日益增加,深海空间站和海洋安全防御工作不断地向远距离深海领域发展,光纤水听器正在面临应用到深远海方向发展的挑战^[4]。目前,国内外的研究学者针对深海光纤水听器的研究已经取得了一系列的成就。美国海军实验室研究的芯轴型低噪声光纤声传感器在 50 Hz~16 kHz 频段取得 -133.7 dB re 1rad/ μ Pa 声波灵敏度^[5]。海军工程大学的黄俊斌等设计了一种耐静压 DFB 光纤激光水听器,在 10 Hz~10 kHz 可实现 -146.4 dB 声波灵敏度^[6]。中国电子科技集团公司第二十三研究所设计制作的深海实心弹性芯轴光纤水听器在 20~800 Hz 平均声压灵敏度达到 -140 dB re rad/ μ Pa^[7]。

当光纤水听器在深海水区工作时,需要承受

巨大的静水压力,水听器既要保证耐压又要确保其声压灵敏度。近年来,各国水下载具的静音技术发展迅速,潜艇、鱼雷等水下载具辐射噪声在中高频段大幅降低^[8]。深海环境中不确定因素如海底开采活动等导致光纤水听器的噪声较大。因此,光纤水听器在深海环境中的工作频带和灵敏度有待进一步提升,从而满足深海领域应用需求。

本文设计了一种基于推挽式结构的深海光纤水听器基元,可以实现深海 3 000 m 处 10 Hz~2 kHz 频段目标水声信号的有效探测。首先,本文利用弹性力学理论分析声压转换机理,通过有限元方法模拟仿真弹性筒结构尺寸参数对声压灵敏度的影响,并针对水听器在深水环境下工作的稳定性进行了探究。根据计算结果,分别制作了 5 组不同结构参数和制作工艺的水听器,然后将光纤水听器探头放入高静压水声声压耦合腔装置中,测试光纤水听器在 30 MPa 静水压下的声压接收灵敏度。实验结果显示,经过结构和制作工艺优化后的水听器,在 30 MPa 水压 10 Hz~2 kHz 频率范围下的水声信号平均声波灵敏度最终达到了 -127 dB re rad/ μ Pa,相比优化前提高了 7 dB,验证了本文方法的有效性。

2 干涉型光纤水听器原理

干涉型光纤水听器基于相位调制原理,利用光学相干技术测量水下载具发出的声波。深海中的被测水声信号作用于光纤水听器,引起光纤内相位的改变,利用解调电路和算法程序将其转换为水下目标的声压信号。

水听器采用 Michelson 干涉仪结构,具体的光路结构如图 1 所示。由单频窄线宽激光器发出的光束经 3×3 耦合器分为三路,分别通过干涉仪的传感臂 1 和 2,入射至法拉第旋转镜 1 和 2,经反射后,两路光在耦合器内进行干涉,并通过光电探测器 1 和 2 将干涉光信号转化为可解调的电信号。

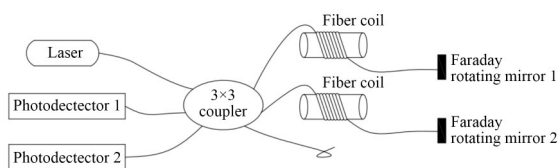


图 1 光纤水听器干涉光路图

Fig. 1 Schematic diagram of a fiber optic interference system

被测的水声信号主要作用于干涉仪的传感臂 1 和 2 上,引起两者光纤的长度发生变化,从而改变干涉仪的两臂之间的相位差,使得接收端的光电探测器的光功率产生变化,其关系式如式(1):

$$I_p(t) = \frac{I_0}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi n}{\lambda} (l_0 + \Delta l) \right) \right], \quad (1)$$

其中: I_0 为激光器出射光光强、 n 是光纤的纤芯折射率 1.456、 λ 是激光器的波长、 l_0 为传感臂 1 和 2 的初始长度之差、 Δl 为外界声压作用于水听器上所引起的两臂之间的长度之差。通过椭圆拟合算法^[9]得到一对正交干涉信号 I_1 和 I_2 。

干涉仪之间的相位差可由式(2)得到:

$$\phi(t) = \arctan \left(\frac{I_1(t)}{I_2(t)} \right). \quad (2)$$

因此,声压灵敏度 M 可以表示为:

$$M = 20 \lg \frac{\phi(t)}{p}, \quad (3)$$

其中: I_1 和 I_2 分别为图 1 中光电探测器 1 和 2 接收的光功率,ATAN 转化为水听器的相位变化 $\phi(t)$, p 为作用在水听器的水声声压。

从式(1)和式(2)分析出,声波引起干涉仪两臂之间的光纤长度变化 Δl 越大,所引起的相位 $\phi(t)$ 越大,越容易实现深海环境中声波的探测,因此设计出高灵敏、宽频的光纤水听器单元更有利于水下载具的探测。

3 深海光纤水听器设计分析

3.1 基于推挽式结构的深海光纤水听器传感探头

传统的推挽式结构水听器主要由缠绕光纤线圈的内外弹性筒和置于内壁上的干涉光学器件组成^[10],该种结构的水听器无法保证在高静水压海水中工作性能。为了实现深海领域声波的高灵敏探测,一种低成本的推挽式结构的水听器探头被设计出来,如图 2 所示,内外弹性筒上分别缠绕光纤线圈构成干涉仪的传感臂 1 和传感臂 2。上下端面密封后,内外弹性筒的中间空隙形成空气腔, 3×3 耦合器和法拉第旋转镜 1 和 2 均放置于空气腔内。这种大空气腔的设计可以避免光学器件受到海水的压力,减少水听器制作成本。

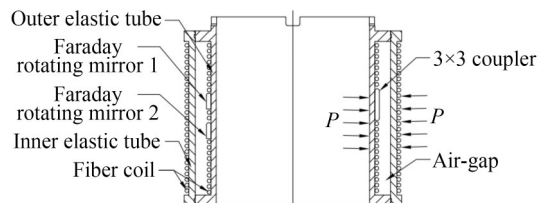


图 2 推挽式结构光纤水听器结构示意图^[11-12]

Fig. 2 Schematic diagram of fiber optic hydrophone based on push-pull mandrel structure^[11-12]

3.2 推挽式结构光纤水听器灵敏度分析

当外界声波作用于水听器传感探头时,外侧的弹性筒受压,带动缠绕其上的光纤线圈向内压缩。内侧的弹性筒受拉,带动缠绕其上的光纤线圈向外拉伸,通过内外压差不同形成推挽结构。

推挽式结构水听器的灵敏度 M 可以用式(4)来表示^[13]:

$$\left\{ \begin{aligned} M &= 20 \lg \frac{\Delta \phi}{p} = 20 \lg \frac{\Delta \phi_1 - \Delta \phi_2}{p} \\ \Delta \phi_1 &= \frac{4\pi n N_1}{\lambda} \cdot 2\pi \mu_1|_{r=a_2} \\ &\cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 [(1 - \nu_f) P_{12} - \nu_f P_{11}] \right\}, \\ \Delta \phi_2 &= \frac{4\pi n N_2}{\lambda} \cdot 2\pi \mu_2|_{r=b_2} \\ &\cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 [(1 - \nu_f) P_{12} - \nu_f P_{11}] \right\} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

其中: $\Delta\varphi$ 为外界声压引起光纤水听器相位的变化、 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 分别为传感臂 1 和传感臂 2 的相位变化、 n 是光纤的纤芯折射率 1.456、 λ 是激光器的波长、 N_1 和 N_2 内外弹性筒上光纤线圈的缠绕圈数、 μ_1 和 μ_2 分别为内外弹性筒的形变、 a_2 和 b_2 分别为内外弹性筒的外径、 ν_f 是光纤的泊松比 0.17、光纤的弹光系数 P_{11} 和 P_{12} 分别为 0.116 和 0.255。

从式(4)可以得知,内外弹性筒由于受到相反方向的作用力,导致内外弹性筒产生了相反方向的形变,因此这种结构可以使探头灵敏度增加一倍,而由温度漂移^[14]和环境噪声^[15]对传感器的影响变成共模信号,通过干涉仪相位比较而消除,提高探头的抗干扰能力。高灵敏性和低噪声从另一方面保证了推挽式结构探头对低频信号的响应。

采用有限元方法对推挽式结构光纤水听器的灵敏度进行分析,可以有效模拟该结构在水下环境中的工作性能,有助于水听器结构的优化。

利用 Comsol 软件对图 2 所示水听器探头进行建模。出于经济因素考虑,内外弹性筒的材料均选用航空铝 7075,杨氏模量 $E=70$ GPa,泊松比 $\mu=0.37$,内弹性筒的外径 a_2 为 40 mm,壁厚为 1.4 mm,外弹性筒的外径 b_2 为 55 mm,壁厚为 1.6 mm,总高度为 50 mm。设置声压为 1 Pa。

通过图 3 可以看出,当光纤水听器受到 1 Pa 声压振动时,内外弹性筒的最大变形处均集中在圆筒长度的中间位置。把内外圆筒的模拟变形量分别代入到算式(4)中,可以得到干涉仪传感臂 1 和传感臂 2 的相位变化 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$,进而求得

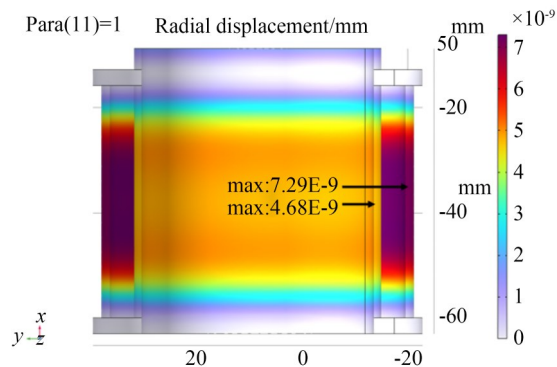


图 3 内外弹性筒在 1 Pa 声压下变形模拟

Fig. 3 Deformation simulation of inner and outer elastic tube under 1 Pa acoustic pressure

光纤水听器的声压灵敏度为:

$$M = 20 \lg \frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{p} = -132.53 \text{ dB}. \quad (5)$$

3.3 推挽式结构光纤水听器传感探头耐压性能分析

当光纤水听器在深海中工作时会受到海水的压力,因此水听器探头的内外弹性筒在进行耐压性能分析时可以被看成外压力容器。外压圆筒的厚度与其承受的外压的关系公式为^[16],

$$[p_h] = \frac{B}{D_0/\delta_e}, \quad (6)$$

其中: p_h 为内外弹性圆承受的海水压力、 B 是弹性筒材料的屈服强度系数、 D_0 为弹性筒的外径、 δ_e 为圆筒的有效厚度。

从式(6)分析得到,壁厚越大,薄壁圆筒的承压能力越强,但壁厚的增加同样可以引起水听器灵敏度性能的下降。根据 GB/T 150.3-2024 的规定^[17],外压容器的承压能力不仅与圆筒壁厚相关,还与其计算长度有关,标准推荐通过设置加强圈来缩短圆筒的计算长度,从而增加圆筒的耐压性能。

利用 Comsol 软件对内外弹性筒的耐压性能进行分析,设定光纤水听器的工作水深为 3 000 m,即工作压力为 30 MPa,内外弹性筒的材料参数不变,在外弹性筒的中间设置加强圈增加耐压性能,变形云图如图 4 所示。

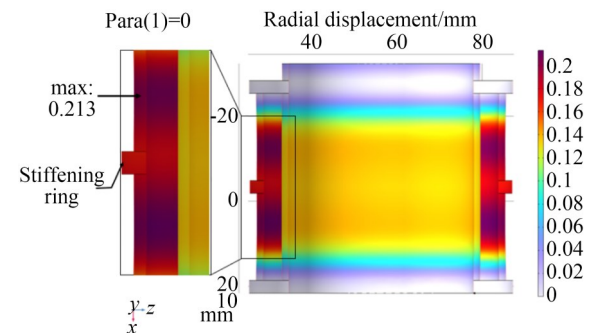


图 4 内外弹性筒在 30 MPa 水压下变形模拟

Fig. 4 Deformation simulation of inner and outer elastic tube under 30 MPa hydrostatic pressure

4 测量实验与结果

4.1 光纤水听器高静水压灵敏度测试方案

根据 GB/T 4130-2017 中密闭腔标准水听器

比较法^[18], 光纤水听器测量方案如图 5 所示。

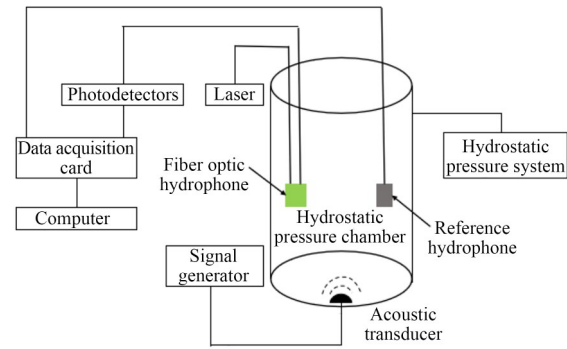


图 5 光纤水听器测量方案示意图

Fig. 5 Experimental setup for fiber optic hydrophone measurement

密闭腔标准水听器比较法测试装置由高压腔、参考水听器、激光器、信号源、换能器、光电转换器、数据采集卡和计算机组成。高压腔如图 6 所示, 采用高强度金属制成, 通过压杆机构可将水箱中的水注入腔内模拟高静水压环境。在高压腔中对光纤水听器进行测试时, 声场由发射换能器产生。通过逐点调整信号频率, 数据采集卡



图 6 光纤水听器测试高压腔

Fig. 6 High hydrostatic pressure chamber for fiber optic hydrophone measurement

同时得到光纤水听器和参考水听器信号, 并发送至计算机。在计算机上完成信号的解调与处理后得到光纤水听器的相位信号 φ 与参考水听器声压 p , 进而绘制出光纤水听器在 10 Hz~2 kHz 频率范围内灵敏度响应曲线。

4.2 光纤水听器高静压灵敏度测试

为了评估以上模型模拟计算, 分别制作了 5 组光纤水听器, 具体参数见表 1。其中 1, 2 水听器的弹性筒厚度不同, 但均未设置加强圈, 探头 3、探头 4 和探头 5 的外弹性筒中间设有加强圈。在制作工艺方面, 1, 2 和 3 弹性筒上均从上到下均匀缠绕光纤, 而探头 4 的光纤被缠绕至弹性筒的中间位置处, 缠绕匝数为 2 层。探头 5 的光纤缠绕位置为两端, 缠绕匝数为 1 层。5 组光纤水听器均采用高精度张量自动控制绕线机进行绕纤, 保证光纤恒定应力、定长光纤绕制, 同时每组探头均采用同等厚度的聚氨酯透声胶进行封装, 确保光纤水听器探头的一致。

由于前 3 组水听器的内外弹性筒均被缠绕了单层光纤, 但其壁厚和加强圈的设置不同, 以此测试弹性筒的结构参数在高静水压环境中, 对声压灵敏度响应的影响。后两组水听器的光纤线圈缠绕位置与层数不同, 用来测试制作工艺对灵敏度的影响。

表 1 中的水听器 1, 2, 3, 4 和 5 被依次放置到声学高压腔中进行测试。首先, 测试常压下 5 组探头在 10 Hz~2 kHz 的声波下的灵敏度接收情况。再通过手动加压, 将高压腔的压力缓慢加压到 30 MPa 时, 记录下 5 组探头在 10 Hz~2 kHz 的声波下的灵敏度测试结果。不同水压下 5 组水听器的声压灵敏度的结果见图 7。

从图 7 常压下声压灵敏度测试结果可以看出, 水听器 1 灵敏度的测试结果与基于弹性力学

表 1 不同结构参数的光纤水听器探头

Tab. 1 Structural parameters of fiber optic hydrophones

No.	Outer tube thickness/mm	Inner tube thickness/mm	Stiffening ring	Fiber coil position	Number of fiber layer
1	1.6	1.4	Without	Evenly	1
2	1.85	1.5	Without	Evenly	1
3	1.6	1.4	With	Evenly	1
4	1.6	1.4	With	Center	2
5	1.6	1.4	With	Two ends	1

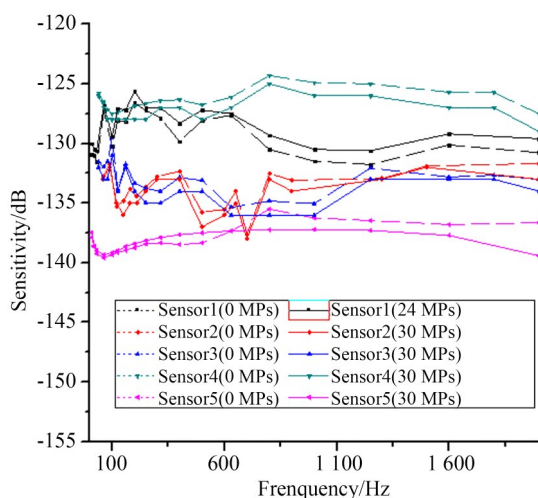


图7 声压灵敏度测试结果

Fig. 7 Acoustic sensitivity test result

的计算结果相接近,在 600 Hz~2 kHz 的灵敏度波动较小,但在低频声波下,探测的灵敏度波动在 ± 3 dB 左右,主要是由于参考水听器在低频区域工作时,电源能量不足,导致其信噪比较低,从而造成水听器接收灵敏度的波动^[19]。水听器 2 和水听器 3 的平均声压灵敏度探测结果较为接近,平均达到 -135 dB,两者相比水听器 1 具有更高的结构强度,弹性筒在声波的作用下所引起的变形也较小,因此光纤线圈的长度变化也较小,导致探测灵敏度相比水听器 1 下降了大约 3 dB。水听器 4 的接收灵敏度可达到 -125 dB 左右,该水听器的光纤线圈位于内外弹性筒的最大变形处,弹性筒带动光纤线圈的长度产生较大的变化。水听器 5 由于光纤线圈缠绕于弹性筒的两端,两端的支撑结构避免了一定的形变,因此光纤的长度变化也较小,其接收灵敏度只有 -138 dB 左右。水听器 4 和水听器 5 的测试结果验证了光纤线圈的缠绕位置影响水听器的灵敏度。

从图 7 得到的 5 组水听器在高静水压环境下的接收灵敏度分析,随着水压的增加,每组水听器的声波灵敏度均出现了大约 2 dB 的下降,主要是由于内外弹性筒在水压的作用下产生了不同

尺寸的变形,导致灵敏度相比常压下均有所降低。从单组测试数据来看,水听器 1 在加压到 24 MPa 后无法正常工作,停止加压取出后发现,外弹性筒在高静水压下发生了失稳的现象,说明较薄的弹性筒虽然能增加声压灵敏度,但其结构无法承受高静水压。在 30 MPa 的水压下,只有水听器 2,水听器 3,水听器 4 和水听器 5 依然能够正常响应声波,因此增加弹性筒的厚度,在外表面设置加强圈可以有效提高水听器探头的耐静水压能力。结合几组探头在常压下测试的结果对比,水听器 4 在 30 MPa 水压下,10 Hz~2 kHz 频段的声波下的接收灵敏度最高,可达到 -127 dB re rad/ μ Pa,说明水听器 4 的结构和制作工艺更适合用于深海环境中声波的探测。

5 结 论

基于推挽式结构的深海光纤水听器基元,经过结构参数和制作工艺优化后,可以实现深海 3 000 m 处 10 Hz~2 kHz 的目标水声信号的有效探测,发展了适用于深海环境光纤水听器设计制作及性能模拟测试的关键技术。测试结果显示光纤水听器的结构和制作工艺可以显著地影响其在深海环境中工作性能和稳定性。研制的推挽式结构的光纤水听器在 30 MPa 静水压环境下能够正常响应 10 Hz~2 kHz 频带范围下的水声信号,其平均声压灵敏度可达到 -127 dB re rad/ μ Pa,相比优化前提高了 7 dB re rad/ μ Pa。优化后的宽频带、高灵敏水听器在探测水下微弱声波信号具有一定潜力。同时,本文发展的光纤水听器的设计制作技术也为深远海领域光纤水听器应用提供一定的参考意义。

作者贡献声明:

孙晓园:论文构思和撰写;
光东:实验的设计及数据整理和分析;
邓草原:实验数据分析;
俞本立:论文审核。

参考文献:

- [1] 何涛. 圆柱形超高静水压水听器设计与测试[J]. 应用声学, 2019, 38(6): 1033-1036.

HE T. Design and test of cylindrical high hydrostatic pressure hydrophone [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(6): 1033-1036. (in Chinese)

- [2] DANDRIDGE A, COGDELL G B. Fiber optic sensors for navy applications[J]. *IEEE Lcs*, 1991, 2(1): 81-89.
- [3] DAI S, ZHANG H, WEI C, *et al.* Preliminary application of single-receiver fiber-optic hydrophone array in marine gas hydrate seismic exploration [J]. *Equipment for Geophysical Prospecting*, 2018, 28(3):145-151.
- [4] 曹春燕. 光纤水听器阵列超远程光传输低噪声光放大链关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
CAO C Y. *Study on Key Techniques of High Performance Fiber-Optics Hydrophone Array Based on Ultra-Remotely Optical Transmission and Cascaded Amplifiers* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] BOUFFARON R, LAUNAY F X, MOLIN S, *et al.* All-optical Acoustic Array for Underwater Surveillance[C]. *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors. Krakow, Poland*. SPIE, 2013.
- [6] LU Q Z, HUANG J B, *et al.* Design of resistant static pressure probe for DFB fiber laser hydrophone [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(2): 428-434.
- [7] WANG J, CHEN K, TANG J, *et al.* Development of deep-sea detector of the mandrel interferometric optical fiber hydrophone [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2019, 04: 14-17.
- [8] 孟洲, 陈伟, 王建飞, 等. 光纤水听器技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306009.
MENG Z, CHEN W, WANG J F, *et al.* Research progress of fiber optic hydrophone technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306009. (in Chinese)
- [9] SHI J H, GUANG D, LI S L, *et al.* Phase-shifted demodulation technique with additional modulation based on a 3×3 coupler and EFA for the interrogation of fiber-optic interferometric sensors[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2900-2903.
- [10] 杨悦. 超低频光纤水听器的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
YANG Y. *Research and Development of Ultra-Low-Frequency Fiber Optic hydrophone* [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [11] 王付印. 新型组合式光纤矢量水听器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
WANG F Y. *Study on A Novel Combined Fiber Optic Vector Hydrophone* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] YANG Y, CHANG T Y, YU M, *et al.* Physics-based performance optimization of fiber-optic interferometric hydrophone with push - pull mandrel structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(20): 19346-19356.
- [13] GUANG D, SUN X Y, SHI J H, *et al.* Sensitivity improvement of fiber optic interferometric hydrophone based on composite structure[J]. *Optics Express*, 2024, 32(27): 47721-47734.
- [14] 冯玉祥, 刘志凯, 黄闽南, 等. 单光路拉曼分布式光纤测温系统[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2645-2653.
FENG Y X, LIU Z K, HUANG M N, *et al.* Single optical channel based Raman distributed optical fiber temperature measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2645-2653. (in Chinese)
- [15] 刘付武兴, 梁贻智, 曹君杰, 等. 光纤超声传感器的射频域自相干解调技术[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2708-2717.
LIU F, LIANG Y Z, CAO J J, *et al.* Radio-frequency heterodyne detection of fiber-optic ultrasonic sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2708-2717. (in Chinese)
- [16] 李世玉. 压力容器设计工程师培训教程[M]. 北京: 新华出版社, 2019
LI S Y. *Pressure vessel Design Engineer Training Tutorial* [M]. Beijing: Xinhua Press, 2019. (in Chinese)
- [17] 压力容器[S]. GB/T 150--2011.
Pressure vessel [S]. GB/T 150--2011. (in Chinese)
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学 水听器: GB/T 4130—2017[S]. 北京: 中国标准出版社.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Acoustics-Low fre-*

quency calibration methods of hydrophones: GB/T 4130-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China,. (in Chinese)

[19] YANG Y, LUO Z C, WANG Z M, *et al.* High-

performance fiber optic interferometric hydrophone based on push-pull structure [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 9511313.

作者简介:



孙晓园(1985—),女,河北石家庄人,硕士,实验师,2017年于柏林工业大学获得硕士学位,现为安徽大学物理与光电工程学院实验师,主要从事光学传感系统集成设计的研究。E-mail: 17226@ahu.edu.cn

通讯作者:



俞本立(1963—),男,安徽五河县人,教授,博士生导师,2001年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事光子器件、激光与光纤传感系统研究工作。E-mail: benliyu@ahu.edu.cn