

文章编号: 1002-2082 (2020) 02-0428-07

# 一种耐静压分布反馈式光纤激光水听器探头设计

陆祈祯, 黄俊斌, 顾宏灿, 汪云云

(海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 大深度工作环境下, 静水压会引起分布反馈式光纤激光水听器反射中心波长漂出解调系统的复用窗口, 使水听器无法解调目标声压信号; 不同的静水压也会引起分布反馈式光纤激光水听器灵敏度的变化, 影响光纤激光水听器阵列的一致性。基于电力声类比理论, 提出带静压补偿的分布反馈式光纤激光水听器探头, 建立结构的声压传递函数, 分析各结构参数对传递函数的影响, 为分布反馈式光纤激光水听器探头频率响应平坦化设计提供理论依据。加工制作了耐静压分布反馈式光纤激光水听器样品进行测试, 在 0 kHz~10 kHz 频率范围内声压灵敏度波动范围不大于  $\pm 2.4$  dB, 2.3 MPa 内出射激光中心波长漂移量不大于 0.06 nm, 对深水光纤激光水听器的研究具有指导意义。

**关键词:** 光纤光学; 分布反馈式光纤激光水听器; 耐静压; 波分复用

中图分类号: TN253

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0208002](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0208002)

## Design of resistant static pressure probe for DFB fiber laser hydrophone

LU Qizhen, HUANG Junbin, GU Hongcan, WANG Yunyun

(Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In the deep working environment, the hydrostatic pressure can cause the reflection center wavelength of distributed feedback (DFB) fiber laser hydrophone drifting out of the multiplexing window of demodulation system, and the target sound pressure signal cannot be demodulated by the water receiver; different hydrostatic pressures also cause changes in the sensitivity of the distributed feedback fiber laser hydrophone, which affects the consistency of the fiber laser hydrophone array. Based on the theory of electric sound analogy, a distributed feedback fiber laser hydrophone probe with static pressure compensation was proposed. The sound pressure transfer function of the structure was established, and the influence of various structural parameters on the transfer function was analyzed, which provided a theoretical basis for the flattening design of the frequency response for distributed feedback fiber laser hydrophone probe. The resistant static pressure distributed feedback fiber laser hydrophone sample was processed and tested. The fluctuation range of sound pressure sensitivity was no more than  $\pm 2.4$  dB in the frequency range of 0 kHz~10 kHz, and the wavelength drift of the exiting laser center within 2.3 MPa was no more than 0.06 nm. The results are of guiding significance for the research of deep water fiber laser hydrophone.

**Key words:** fiber optics; distributed feedback fiber laser hydrophone; resistant static pressure; wavelength division multiplexing

## 引言

分布反馈式光纤激光水听器具有灵敏度高, 抗电磁干扰能力强, 传播损耗低和便于大规模复用

的优点, 在水声探测领域具有广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。

目前, 分布反馈式光纤激光水听器已经由单个阵元研究走向多阵元研究, 复用技术的成熟使分布

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (11774432)

作者简介: 陆祈祯 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方向的研究。E-mail: haigongwuyanzu@163.com

反馈式光纤激光水听器能够大规模空间布置, 得到更好的水声探测信号<sup>[6-12]</sup>。由于光纤激光水听器阵列工作时处于不同水深, 因此设计出适应静水压环境下频率响应一致的光纤激光水听器阵元, 是分布反馈式光纤激光水听器工程化急需解决的问题。在抗加速度方面, 分布反馈式光纤激光水听器劣于普通干涉型光纤水听器。

静水压对光纤光栅水听器主要产生 2 个方面的影响: 1) 影响水听器阵列大规模复用, 静水压作用下, 光纤光栅水听器的出射激光中心波长会漂出解调系统波分复用窗口, 导致光纤水听器无法解调出目标信号; 2) 影响水听器阵元一致性, 在不同静压作用下, 水听器阵元的灵敏度也会发生变化。目前国内外对光纤光栅水听器耐静水压结构已进行了相应研究, 2008 年 Steven Goodman 设计了一种压力补偿结构, 通过柔性气囊与水听器相连的方式, 使得水听器的增敏薄板两侧压力平衡, 经试验证明该水听器能在 50 m 水深下正常工作<sup>[13]</sup>。2014 年新加坡 Kuttan Chandrika Unnikrishnan 将压力补偿结构以滑块室的形式集成到水听器内部, 通过滑块调节滑块室的压力, 从而达到静压平衡, 该结构能满足 40 m 水深要求<sup>[14]</sup>。2012 年李东明设计了一种弹性膜片增敏探头, 该结构的耐压性能取决于弹性膜片的刚度, 通过优化结构该探头的耐压性能达 2 MPa<sup>[15]</sup>。2013 年 Zhang 提出了一种静压补偿结构, 通过筒壁上的圆孔来实现静压平衡, 该结构的声压灵敏度频响曲线在 2 kHz 以下的波动范围不大于  $\pm 2$  dB<sup>[16]</sup>。

本文主要研究能在不同水深下保持正常工作的分布反馈式光纤激光水听器探头。通过优化结构的尺寸参数, 获得在工作频段内理想的频响曲线, 拓宽分布反馈式光纤激光水听器的应用范围。

## 1 理论分析

耐静水压的 DFB 光纤激光水听器的结构如图 1 所示。该结构采用双膜片端面增敏方式, 共分为端盖、套筒和膜片 3 个部分。膜片通过端盖压紧在套筒端面, 确保振膜周界固定。给 DFB 激光器施加一定的预应力, 使其处于张紧状态, 并用环氧树脂胶固定在膜片中心, 端盖和套筒上分别开有通孔, 使得膜片两侧的腔室都能与外界连通。当光纤激光水听器处于深水时, 由于振膜两侧的腔室都与外界环境连通, 膜片两侧的压强相同, 不

会产生变形, 从而达到平衡静水压的目的。当光纤激光水听器处于声场时, 声压分别通过通孔和长腔通孔在膜片两侧产生压强差, 膜片在压强作用下产生变形, 从而带动固定在膜片上的 DFB 激光器产生轴向形变, 达到水声探测的目的。

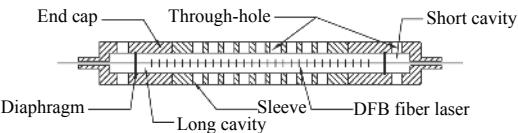


图 1 耐静水压结构的 DFB 光纤激光水听器结构图

Fig. 1 Structural diagram of DFB fiber laser hydrophone with resistant static pressure

图 2 是耐静压 DFB 光纤激光水听器结构对应的阻抗型类比声学线路图。图 3 是简化后的声学线路图。该结构的声阻抗分为端盖通孔、套筒通孔、长腔、短腔和膜片 5 个部分, 各部分有其对应的等效声阻抗。 $P_1$  为水听器端盖处的激励声压,  $P_2$  为水听器套筒处的激励声压,  $R_{h1}$ 、 $M_{h1}$  分别为端盖通孔的声阻和声质量,  $R_{h2}$ 、 $M_{h2}$  分别为套筒通孔的声阻和声质量,  $C_{en}$ 、 $M_{en}$ 、 $R_{rEn}$ 、 $M_{rEn}$  分别为端盖的等效声容、等效声阻、等效辐射声阻和同振声质量,  $C_{a1}$ 、 $C_{a2}$  分别为短腔声容和长腔声容,  $C_{en}$ 、 $M_{en}$ 、 $R_{lEn}$ 、 $M_{lEn}$  分别为膜片的等效声容、等效声阻、等效辐射声阻和同振声质量。根据声学基础和弹性力学的知识可以求得各元件的声阻抗表达式<sup>[17-18]</sup>。

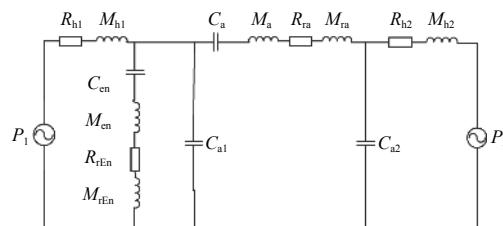


图 2 耐静水压结构的 DFB 光纤激光水听器声学等效电路

Fig. 2 Acoustic equivalent circuit of DFB fiber laser hydrophone with resistant static pressure

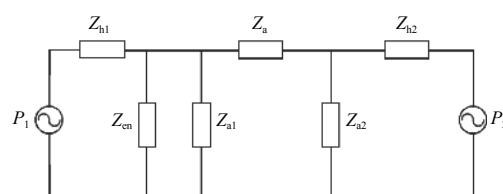


图 3 耐静水压结构的 DFB 光纤激光水听器简化声学等效电路

Fig. 3 Simplified acoustic equivalent circuit of DFB fiber laser hydrophone with resistant static pressure

端盖通孔的声阻抗为

$$Z_{h1} = R_{h1} + j\omega M_{h1} \quad (1)$$

套筒通孔的声阻抗为

$$Z_{h2} = R_{h2} + j\omega M_{h2} \quad (2)$$

近似为圆柱壳的端盖总等效声阻抗为

$$Z_{En} = 1/(j\omega C_{En}) + j\omega M_{En} + R_{rEn} + j\omega M_{rEn} \quad (3)$$

$$P_a = \frac{P_1(Z_{a1}Z_{a2}Z_1 + Z_{a2}Z_1Z_2) - P_2(Z_{a1}Z_{a2}Z_1 + Z_{a1}Z_{a2}Z_3 + Z_{a1}Z_1Z_3)}{Z_{a1}Z_{a2}(Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3 + Z_1Z_a + Z_3Z_a) + Z_1Z_2Z_3(Z_{a1} + Z_{a2} + Z_a) + Z_1Z_a(Z_{a1}Z_3 + Z_{a2}Z_2) + Z_{a2}Z_2Z_3Z_a} \quad (5)$$

由于该光纤激光水听器的尺寸结构很小, 声压频率较低时, 声波的波长比水听器大得多, 端盖处的激励声压幅值和套筒开孔处的激励声压幅值近

$$T(\omega) = \frac{Z_{a1}Z_{a2}Z_1 + Z_{a2}Z_1Z_2 - Z_{a1}Z_{a2}Z_1 + Z_{a1}Z_{a2}Z_3 + Z_{a1}Z_1Z_3}{Z_{a1}Z_{a2}(Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3 + Z_1Z_a + Z_3Z_a) + Z_1Z_2Z_3(Z_{a1} + Z_{a2} + Z_a) + Z_1Z_a(Z_{a1}Z_3 + Z_{a2}Z_2) + Z_{a2}Z_2Z_3Z_a} \quad (6)$$

## 2 仿真分析

直接由声压传递函数表达式难以确定各尺寸参数对声压传递函数幅值的影响。为了能确定分布反馈式光纤激光水听器端盖孔半径  $a_1$ 、套筒孔半径  $a_2$ 、膜片厚度  $t$ 、短腔长度  $L_1$ 、长腔长度  $L_2$  和腔体半径  $R_2$ , 通过计算机软件对结构各参数与声压传递函数幅值的关系进行分析。端盖和套筒使用的材料为殷钢, 弹性模量  $E_1=1.42\times 10^{11}$  Pa, 泊松比  $\nu_1=0.28$ , 密度  $\rho_1=8\ 100\text{ kg/m}^3$ ; 膜片使用的材料为不锈钢, 弹性模量  $E_2=1.93\times 10^{11}$  Pa, 泊松比  $\nu_2=0.31$ , 密度  $\rho_2=7\ 750\text{ kg/m}^3$ ; 切边粘滞系数  $\mu=0.001\ 14$ , 水中声速  $c_0=1\ 500\text{ m/s}$ ; 光纤激光水听器壳体厚度  $l_1=2\text{ mm}$ , 端盖孔数量  $n_1=2$ , 套筒孔数量  $n_2=40$ 。

图 4 为端盖孔半径  $a_1$  对耐静水压水听器声压传递函数的影响。水听器其他部分尺寸参数为:  $L_1=5\text{ mm}$ ,  $a_2=1.5\text{ mm}$ ,  $R_2=2\text{ mm}$ ,  $t=0.1\text{ mm}$ ,  $L_2=48\text{ mm}$ 。如图 4 所示, 静压补偿双膜片增敏封装结构的声压传递曲线有 2 个共振峰。随着水听器端盖通孔的半径减小, 2 个共振峰频率间隔逐渐变大, 当端盖通孔半径  $a_1$  小于  $1\text{ mm}$ , 水听器传递函数的共振幅值随端盖通孔半径减小而减小; 当端盖通孔半径  $a_1$  小于  $0.5\text{ mm}$ , 传递函数的共振幅值变化很小, 在较宽的频带范围内有更好的平坦性; 当端盖通孔半径  $a_1$  达到  $0.01\text{ mm}$ , 低频时的传递函数响应具有良好的平坦性。因此, 在设计端盖通孔半径时, 应考虑到较小的孔径可以使光纤激光水听器有较平坦的工作频带, 同时也会使光纤激光水听器短腔内水的流入变得困难, 从而产生气泡, 影响频响特性。

圆膜片可视为固定边界的圆板, 圆膜片的总等效声阻抗为

$$Z_a = 1/(j\omega C_a) + j\omega M_a + R_{ra} + j\omega M_{ra} \quad (4)$$

短腔声阻  $Z_{a1}=1/(j\omega C_{a1})$ , 长腔声阻  $Z_{a2}=1/(j\omega C_{a2})$ 。

对于图 3 的声学等效电路, 根据电路中线性叠加原理, 可以得到膜片两侧的声压差:

似相同, 即  $P_1=P_2$ 。该光纤激光水听器结构的声压传递函数为

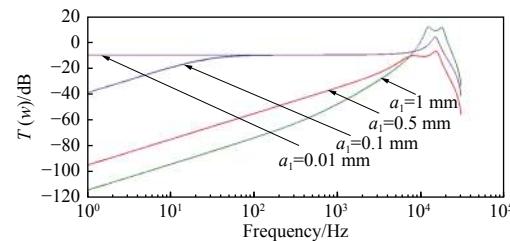


图 4 端盖通孔半径对水听器声压传递函数的影响

Fig. 4 Influence of end cap through-hole radius on sound pressure transfer function of hydrophone

图 5 为套筒通孔半径对耐静水压光纤激光水听器声压传递函数的影响。光纤激光水听器其他部分尺寸参数为:  $L_1=5\text{ mm}$ ,  $a_1=0.1\text{ mm}$ ,  $R_2=2\text{ mm}$ ,  $t=0.1\text{ mm}$ ,  $L_2=48\text{ mm}$ 。从图 5 可以看出, 随着光纤激光水听器套筒通孔半径的增大, 声压传递函数的共振频率随之升高, 当套筒通孔半径  $a_2$  大于  $0.15\text{ mm}$ , 共振频率所对应的幅值随之降低, 低频的传递函数则没有明显变化。

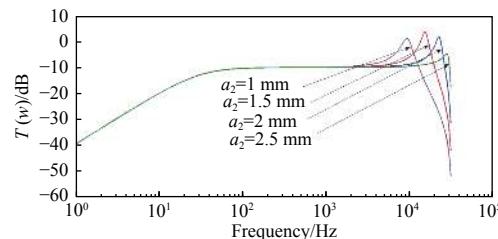


图 5 套筒通孔半径对水听器声压传递函数的影响

Fig. 5 Influence of sleeve through-hole radius on sound pressure transfer function of hydrophone

图 6 为膜片厚度对耐静水压光纤激光水听器声压传递函数的影响。光纤激光水听器其他部分

尺寸参数为:  $L_1=5 \text{ mm}$ ,  $a_2=1.5 \text{ mm}$ ,  $a_1=0.1 \text{ mm}$ ,  $R_2=2 \text{ mm}$ ,  $L_2=58 \text{ mm}$ 。从图中可以看出, 膜片厚度增加, 光纤激光水听器共振频率随之升高, 其共振频率幅值随之增大; 但当膜片厚度  $t$  大于  $0.15 \text{ mm}$ , 幅值增加较小, 趋于稳定。光纤激光水听器的低通截止频率受膜片厚度变化不明显。但是膜片厚度增加, 光纤激光水听器的灵敏度会降低, 设计时需要综合考虑。

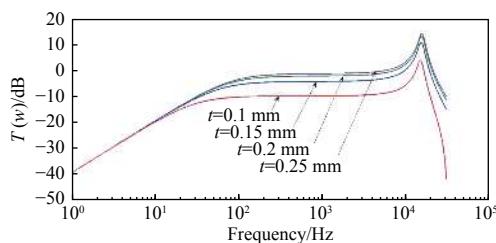


图 6 膜片厚度对水听器声压传递函数的影响

Fig. 6 Influence of diaphragm thickness on sound pressure transfer function of hydrophone

图 7 为短腔长度对耐静水压光纤激光水听器声压传递函数的影响。光纤激光水听器其他部分尺寸参数为:  $a_2=1.5 \text{ mm}$ ,  $a_1=0.1 \text{ mm}$ ,  $R_2=2 \text{ mm}$ ,  $L_2=48 \text{ mm}$ ,  $t=0.1 \text{ mm}$ 。从图中可以看到, 随着水听器短腔长度的增加, 其共振频率逐渐降低, 但是变化很小, 光纤激光水听器膜片两侧的声压差随之逐渐变大。

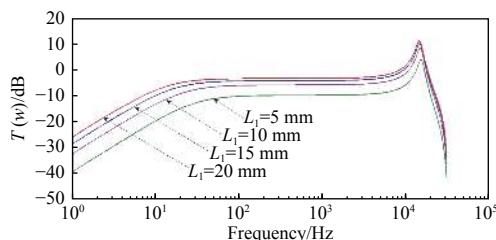


图 7 短腔长度对水听器声压传递函数的影响

Fig. 7 Influence of length of short cavity on sound pressure transfer function of hydrophone

图 8 为长腔长度对耐静水压光纤激光水听器声压传递函数的影响。光纤激光水听器其他部分尺寸参数为:  $a_2=1.5 \text{ mm}$ ,  $a_1=0.1 \text{ mm}$ ,  $R_2=2 \text{ mm}$ ,  $t=0.1 \text{ mm}$ ,  $L_1=5 \text{ mm}$ 。从图中可以看到, 随着光纤激光水听器长腔长度的减小, 其声压传递函数的共振频率往高频移动, 共振幅值也随之减小, 但变化幅度不大。

图 9 为腔体半径对耐静水压光纤激光水听器

声压传递函数的影响。光纤激光水听器其他部分尺寸参数为:  $L_2=48 \text{ mm}$ ,  $a_2=1.5 \text{ mm}$ ,  $a_1=0.1 \text{ mm}$ ,  $t=0.1 \text{ mm}$ ,  $L_1=5 \text{ mm}$ 。如图 9 所示, 随着光纤激光水听器腔体半径的增大, 膜片两侧的声压差逐渐变小, 其声压传递函数共振频率随之降低; 同时腔体的半径也决定膜片的半径, 膜片半径越大, 光纤激光水听器的声压灵敏度也越高。

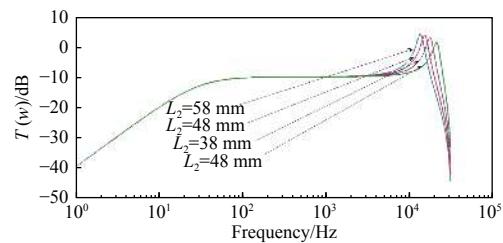


图 8 长腔长度对水听器声压传递函数的影响

Fig. 8 Influence of long cavity length on sound pressure transfer function of hydrophone

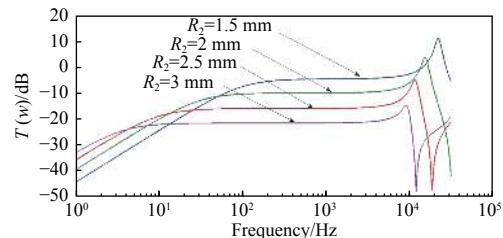


图 9 腔体半径对水听器声压传递函数的影响

Fig. 9 Influence of cavity radius on sound pressure transfer function of hydrophone

声压灵敏度高, 灵敏度频率响应平坦是分布反馈式光纤激光水听器结构设计的目标。综合以上分析, 膜片厚度、短腔长度和腔体半径主要影响分布反馈式光纤激光水听器声压传递函数的幅值, 即水听器结构对声压的放大倍数, 膜片越薄, 腔体半径越大, 短腔越长, 则光纤激光水听器灵敏度越高。但在实际应用中, 考虑到分布反馈式光纤激光水听器的优点是体积小, 因此主要通过减小膜片厚度来提高水听器灵敏度, 而不是增大腔体半径或短腔长度。端盖通孔、套筒通孔和长腔长度主要影响分布反馈式光纤激光水听器声压传递函数的平坦度。端盖通孔半径越小, 套筒通孔半径越大, 长腔越短, 则光纤激光水听器的响应越平坦。考虑到水听器结构稳定性, 由于套筒通孔数量较多, 因此套筒通孔半径的增大应保证光纤水

听器的结构稳定;同时长腔长度不能无限减小,应以分布反馈式光纤激光器的长度为下限,因此主要通过减小端盖通孔半径来提高传递函数的平坦度。

### 3 实验分析

根据理论分析,设计加工了耐静压分布反馈式光纤激光水听器样品 N002。该光纤激光水听器出射激光的中心波长为 1 530.798 nm, 膜片厚度  $t=0.1$  mm, 端盖通孔的半径  $a_1=1$  mm, 套筒通孔的半径  $a_2=1$  mm, 腔体半径  $R_2=2$  mm。在 10 Hz~10 kHz 频率范围内,对耐静压光纤激光水听器的声压灵敏度进行测量,声压灵敏度按照参考文献 [19] 中定义计算。通过解调系统得到分布反馈式光纤激光水听器相位变化信息,再通过示波器读取电压值得到声压信息,最后经计算得到水听器声压灵敏度。低频段用振动液柱法进行光纤激光水听器校准实验,实验装置如图 10 所示。实验步骤按国家标准中《声学 水听器低频校准方法》进行。高频段在消声水池使用标准水听器比较法进行光纤激光水听器校准实验,实验系统如图 11 所示,BK8105 型标准水听器与 Reson VP-2000 型电荷放大器相连,与发射换能器相连的功率放大器的型号为 KH7500。为减小声反射对实验结果的影响,发射换能器发出脉冲声信号,脉冲周期为 50 ms。为消除偶然因素引起的误差,对耐静压光纤激光水听器进行两次测试。



图 10 振动液柱法实验装置图

Fig. 10 Experimental device diagram of vibration liquid column method

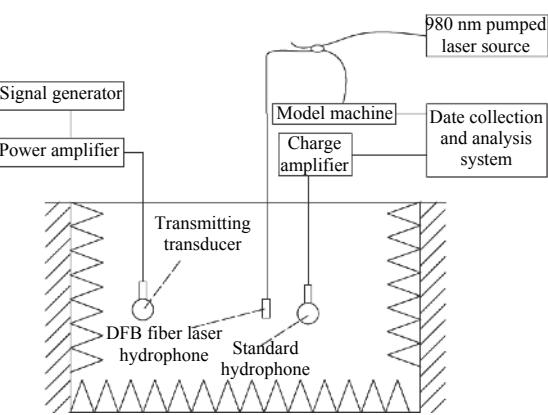


图 11 为消声水池实验系统示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sound-absorbing pool experimental system

2 次测量得到的实验数据如图 12 所示。实验表明本文所设计的耐静压光纤激光水听器的平均声压灵敏度达到  $-146.4$  dB, 在 10 Hz~10 kHz 频率范围内声压灵敏度起伏不大于  $\pm 2.4$  dB。实验过程存在一定误差,影响结果的精确度,第 1 部分误差来源于振动液柱法测量时光纤水听器放置位置的误差,若光纤水听器未放置于液柱罐中心,测量得到的声压值与实际声压存在偏差;第 2 部分来源于消声水池实验时紧挨光纤水听器的标准水听器,标准水听器在接受声压作用时本身也会激发声场,使光纤水听器接受的实际声压与测量值产生偏差。经统计,第 1 次测量数据的均方差为 1.523,第 2 次测量数据的均方差为 1.223,2 次测量波动较小,因此可认为实验误差较小。在工作频段内无谐振峰出现,满足响应平坦的要求。

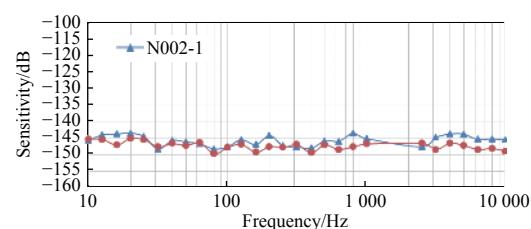


图 12 耐静压光纤激光水听器实测频率响应曲线

Fig. 12 Response curve of measured frequency for resistant static pressure fiber laser hydrophone

为验证耐静压光纤激光水听器的耐压性能,搭建耐静压实验平台,实验系统如图 13 所示。该系统分为 2 个部分:一部分为压力系统,通过高压氮气为放置于耐压罐中的耐静压光纤激光水听器提供 0 MPa~3 MPa 的静压环境,氮气罐上的压力表能实时显示耐压罐内的静压力大小;另一部分为

光路系统,通过光谱仪实时观察耐静压光纤激光水听器出射激光的中心波长变化。光纤激光水听器通过耐压罐的小孔与光路系统相连,小孔用AB胶进行密封。

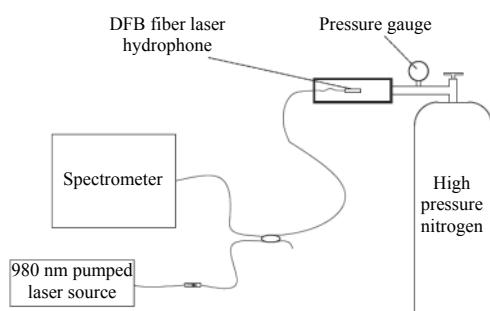


图 13 为耐静压实验系统示意图

Fig. 13 Schematic diagram of resistant static pressure experimental system

实验数据如图 14 所示。实验表明当静压力从 0 MPa 增大至 2.3 MPa, 耐静压分布反馈式光纤激光水听器出射激光的中心波长最大变化量约为 0.016 nm。由于压力系统可能存在轻微泄漏, 耐压罐内有气流扰动, 所以造成出射激光的中心波长变化。但其变化范围远小于波分复用窗口的波长范围, 因此可认为该结构满足大静压环境下的工作要求。

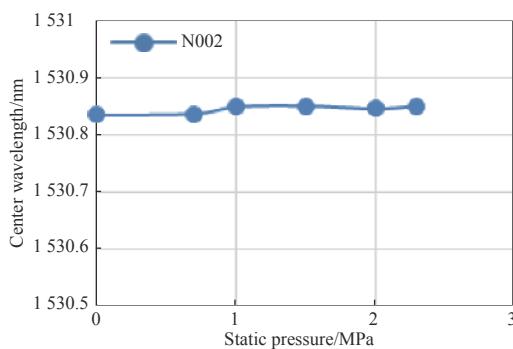


图 14 为耐静压光纤激光水听器静压测试

Fig. 14 Static pressure test of resistant static pressure fiber laser hydrophone

## 4 总结

本文针对光纤激光水听器阵列在实际应用中面临的耐静水压问题, 提出一种静压补偿结构。该结构能解决分布反馈式光纤激光水听器在静压环境下的大规模复用问题及水听器成阵的阵元灵敏度一致性问题。基于电-力-声类比理论, 建立了耐静压分布反馈式光纤激光水听器探头模型。并

分析了结构参数对传递函数的影响, 为耐静压分布反馈式光纤激光水听器探头响应平坦化设计提供理论依据。根据分析结果, 制作了耐静压光纤激光水听器样品, 实验结果表明: 该光纤激光水听器平均声压灵敏度达到  $-146.4 \text{ dB}$ , 在  $0 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$  工作频率范围内起伏不大于  $\pm 2.4 \text{ dB}$ , 在  $0 \text{ MPa} \sim 2.3 \text{ MPa}$  静压环境下出射激光的中心波长漂移量不大于  $0.06 \text{ nm}$ , 满足光纤激光水听器阵列波分复用的要求, 对深水分布反馈式光纤激光水听器工程化具有重要的指导意义。

## 参考文献:

- [1] TAN Bo, HUANG Junbin. Design of encapsulated structure of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1691-1695.
- [2] ZHANG Jinsong, LI Tangjun, ZHAO Yucheng, et al. Study on DFB fibre laser[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(11): 1477-1480.
- [3] YAO Gaofei, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. Coupling coefficient control of phase-shifted fiber grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 159-166.
- [4] TANG Bo, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. DFB fiber laser hydrophone based on fluid-structure interaction[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(2): 65-72.
- [5] ZHOU Huijuan, CHEN Mo, YAO Qiong, et al. Characteristics of distributed feedback semiconductor laser injection locking and applications to optical fiber sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 157-161.
- [6] Hill D J, Nash P J, Jackson D A, et al. Fiber laser hydrophone array[C]//Fiber Optic Sensor Technology and Applications. International Society for Optics and Photonics, USA:SPIE, 1999.
- [7] HILL D. Fiber-optic hydrophone array for acoustic sur-

- veillance in the littoral[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5780: 1-10.
- [ 8 ] TANG Bo, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. Experimental research on DFB fiber laser hydrophone towed line array[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 150-157.  
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器拖曳线列阵实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 150-157.
- [ 9 ] MAO Xin, HUANG Junbin, GU Hongcan. Effect of relaxation oscillation on digital demodulation of  $3 \times 3$  couplers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 227-234.  
毛欣, 黄俊斌, 顾宏灿. 弛豫振荡对 $3 \times 3$ 耦合器数字解调的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 227-234.
- [ 10 ] GU Hongcan, HUANG Junbin, YUAN Bingcheng, et al. An experimental study on the fiber optic hydrophone array[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2009, 20(5): 612-615.  
顾宏灿, 黄俊斌, 苑秉成, 等. 光纤激光水听器阵列实验研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(5): 612-615.
- [ 11 ] LIU Wen. Research on the key issues in distributed-feedback fiber laser array[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.  
刘文. 分布反馈光纤激光器传感阵列关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [ 12 ] XU T W, LI F, WU Y F, et al. Stability of a distributed feedback fiber laser sensor array with unequal wavelength spacing[C]//International Society for Optics and Photonics, USA:SPIE, 2009.
- [ 13 ] GOODMAN S, TIKHOMIROV A, FOSTER S. Pressure compensated distributed feedback fibre laser hydrop-
- hone[C]//International Conference for Optical Engineering, USA: SPIE, 2008.
- [ 14 ] KUTTAN CHANDRIKA U, PALLAYIL V, LIM K M, et al. Pressure compensated fiber laser hydrophone: Modeling and experimentation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(4): 2710-2718.
- [ 15 ] LI Dongming, CHEN Jun, GE Huiliang, et al. Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 133-139.  
李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 133-139.
- [ 16 ] ZHANG W T, ZHANG F X, LI F, et al. Pressure-gradient fiber laser hydrophone[J]. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 2009, 7503(9): 126-129.
- [ 17 ] MA Dayou. Theoretical basis of modern acoustics[M]. Beijing: Science Press, 2004.  
马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [ 18 ] XU ZHIGUAN. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.  
徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [ 19 ] TAN Bo, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. A bending-tension style DFB fiber laser hydrophone unit[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(4): 91-96.  
谭波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 一种曲伸式 DFB 光纤激光水听器探头的研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(4): 91-96.