

封装对超细型 DFB 光纤激光水听器性能的影响(特邀)

张海岩^{1,2}, 李 振^{1,2}, 赵 晨^{1,2}, 王学锋^{1,2}

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100094;
2. 北京市光纤传感系统工程技术研究中心, 北京 100094)

摘 要: 对超细型 DFB 光纤激光水听器探头封装进行了研究。通过有限元方法建立了封装结构理论模型, 探讨了影响超细型光纤激光水听器频率响应与灵敏度起伏之间的因素, 在灵敏度、频响一致性等指标间找到了平衡点。最后, 制作了光纤激光水听器, 直径 6 mm, 长度 55 mm, 灵敏度-130 dB, 100 Hz~2 kHz 灵敏度响应起伏 4 dB, 通过测试验证了理论分析和仿真的符合性。

关键词: 光纤激光水听器; DFB; 仿真; 封装

中图分类号: TB565 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0903002

Effect of encapsulation on the performance of ultrafine DFB fiber laser hydrophone(*invited*)

Zhang Haiyan^{1,2}, Li Zhen^{1,2}, Zhao Chen^{1,2}, Wang Xuefeng^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China;
2. Beijing Optical Fiber Sensing System Engineering Technology Research Center, Beijing 100094, China)

Abstract: The encapsulation of ultrafine DFB fiber laser hydrophone probe was studied. A theoretical model of encapsulation structure was built by finite element method. The factors affecting the frequency response and sensitivity fluctuation of ultrafine fiber laser hydrophone were discussed. A balance was found upon sensitivity, frequency response consistency and other indexes. Finally, a fiber laser hydrophone was made. Its diameter was 6 mm, length was 55 mm, sensitivity was -130 dB and sensitivity response fluctuation between 100 Hz -2 kHz was 4 dB. The conformity of theoretical analysis and simulation was verified by experimental test.

Key words: fiber laser hydrophone; DFB; simulation; encapsulation

收稿日期: 2018-06-07; 修订日期: 2018-08-12

基金项目: 青岛海洋科学与技术国家实验室“问海计划”(2017WHZZB0602)

作者简介: 张海岩(1979-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光纤传感器方面的研究。Email: naikaincepu@163.com

0 引言

基于分布式反馈(DFB)光纤光栅激光器的水听器将 $\lambda/4$ 相移“有源”光纤光栅作为敏感元件,通过检测外界声压作用于该光纤光栅谐振腔后引起的相移变化获得水声信号^[1-3]。由于“有源”光纤光栅是在掺铒或掺镱共掺光纤上直接刻写具有一定相移的光纤布拉格光栅,其直径就是光纤的直径,对其封装后得到的光纤激光水听器不仅具有干涉型光纤水听器低频高灵敏度、抗电磁干扰等优点,其直径、重量等也远小于普通压电水听器和干涉式光纤水听器,特别适合应用在小 UUV、鱼雷、水雷等水下小型运动平台的声呐系统,已成为国内外水声传感器领域的一个研究热点^[4]。但是,受封装结构以及“有源”光纤光栅本身弦振动的影响,光纤激光水听器低频响应平坦性低,并且封装直径越细,低频响应平坦性起伏越大,限制了光纤激光水听器的应用^[3]。

文中针对直径不大于 6 mm 的光纤激光水听器进行封装研究,分析了封装与超微型光纤激光水听器低频频率响应之间的关系,并进行了试验验证。

1 光纤激光水听器敏感机理

$\lambda/4$ 相移“有源”光纤光栅的结构示意图如图 1 所示,该结构是在掺铒或掺镱共掺光纤上刻蚀具有 $\lambda/4$ 相移的光纤布拉格光栅,形成 DFB 光纤光栅激光器。DFB 光纤光栅激光器的输出波长为:

$$\lambda = 2n_e \Lambda \quad (1)$$

式中: n_e 为光纤的有效折射率; Λ 为光栅周期。

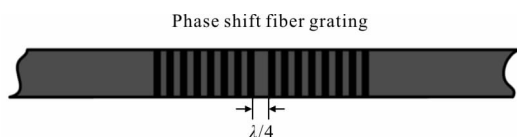


图 1 $\lambda/4$ 相移“有源”光纤光栅的结构示意图

Fig.1 Diagram of $\lambda/4$ phase shift active fiber grating structure

当有声压作用在光栅上时,压力或拉力产生的应变将改变光纤的有效折射率和光栅的周期,从公式(1)可以看出 DFB 光纤光栅激光器的输出波长随之发生变化,通过波长变化的测量即可以得到声压信号,DFB 光纤光栅激光器的波长变化率可以由下式确定:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (1 - P_e) \varepsilon \quad (2)$$

式中: P_e 为有效光弹系数; ε 为光纤光栅轴向应变。 ε 与光纤光栅泊松比、弹性模量的关系如下:

$$\varepsilon = \frac{(1 - 2\mu_f) P}{E} \quad (3)$$

式中: μ_f 为泊松比; E 为弹性模量。

DFB 光纤光栅激光器接收声波后的声压灵敏度和光纤应变、干涉解调仪臂长的关系如公式(4)所示^[5]。

$$M_P = \frac{\Delta \varphi}{P} = 0.78 \frac{2\pi n \Delta l v}{c} \frac{(1 - 2\mu_f)}{E} \quad (4)$$

式中: n 为折射率; Δl 为臂长差; v 为光频。

在公式(2)中,有效光弹系数近似为常数,所以影响 DFB 光纤光栅激光器波长变化率的因素主要是光纤光栅轴向应变,由于裸光纤光栅承受声压产生的应变有限,通常需要对 DFB 光纤光栅激光器进行增敏封装,形成 DFB 光纤激光水听器,实现对声信号的有效探测。目前主要的封装形式是将 DFB 光纤光栅激光器封装在一个长圆管中^[6-8],如图 2 所示,将该结构简化成细棒进行分析,当该细棒受到脉



图 2 DFB 光纤激光水听器示意图

Fig.2 Diagram of DFB fiber laser hydrophone

动声压作用时,主要在棒的轴向引起压缩或伸长,所以这里利用棒的纵振动理论进行分析。对于细棒,其纵振动方程为^[9]:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (5)$$

式中: ξ 为位移; $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 为棒的纵振动速度, E 为等效弹性模量, ρ 为棒的密度。

对公式(5)求解得到 t 时刻位移量为:

$$\xi(t, x) = (A \cos kx + B \sin kx) \cos(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

式中: $k = \omega/c$ 为波数; A 、 B 为常数; ω 为棒的圆频率。

DFB 光纤激光水听器在成阵使用时,通常是两端通过传输缆连接或一端通过传输缆连接,另一端自由。下面分别分析棒模型在两端固定、两端自由或一端固定一段自由的情况下的谐振频率。

对于两端固定的棒,其边界条件为:

$$\begin{cases} \xi_{(x=0)}=0 \\ \xi_{(x=l)}=0 \end{cases} \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(6)可以得到细棒两端固定时的谐振频率为:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{nc}{2l} (n=1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

对于两端自由的棒,其边界条件为:

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{(x=0)}=0 \\ \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{(x=l)}=0 \end{cases} \quad (9)$$

同样将公式(9)代入公式(6)可以得到细棒两端自由时的谐振频率为:

$$f_n = \frac{nc}{2l} (n=1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

综合公式(8)、(10)可以看到两端自由和两端固定的细棒的固有频率是相同的。

对于一端自由一端固定的棒,其边界条件为:

$$\begin{cases} \xi_{(x=0)}=0 \\ \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{(x=l)}=0 \end{cases} \quad (11)$$

将公式(11)代入公式(6)得到此时棒的谐振频率为:

$$f_n = (2n-1) \frac{c}{4l} (n=1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

比较公式(8)、(10)和公式(12)可以看出在同样长度下,两端固定或自由的棒的一阶谐振频率要比一端自由一端固定的一阶谐振频率高一倍。

当 DFB 光纤激光水听器的直径较大,质量大于线缆质量时,即重棒-轻负载的情形,此时 DFB 光纤激光水听器近似为两端自由状态,其谐振频率只和自身的材料特性和尺寸有关,但是随着 DFB 光纤激光水听器直径的减小,特别是当直径与线缆直径接近时,DFB 光纤激光水听器上的节点会发生漂移,DFB 光纤激光水听器的谐振频率也将随之发生变化。为确定 DFB 光纤激光水听器谐振频率与材料参数、尺寸、固定方式等的关系,下文采用有限元软件 ANSYS 软件对超细型 DFB 光纤激光水听器进行仿真分析。

2 仿真分析

文中设计的光纤激光水听器如图 3 所示,从外到内包括聚氨酯橡胶、金属框架和有源光栅。首先利用 ANSYS 建立 DFB 光纤激光水听器的有限元模型,然后从金属框架的材料属性、DFB 光纤激光水听器的长度、直径、胶层厚度和固定方式等方面进行频率响应分析,有限模型如图 4 所示。文中分别选取钢材料、铝材料和铜材料作为金属框架的材料属性分别进行仿真分析,各材料参数如表 1 所示。

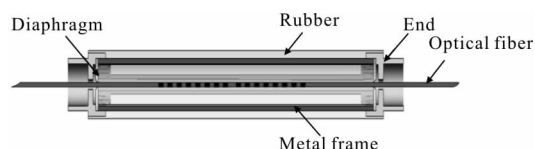


图 3 DFB 光纤激光水听器结构示意图

Fig.3 Diagram of DFB fiber laser hydrophone structure

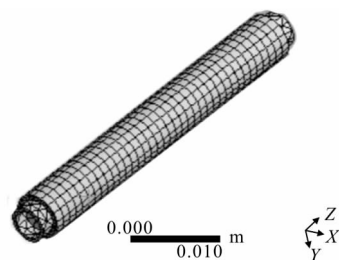


图 4 DFB 光纤激光水听器有限元模型

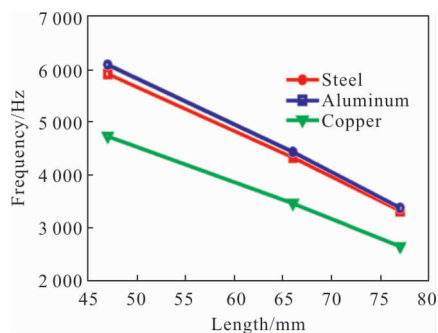
Fig.4 Finite element model of DFB fiber laser hydrophone

表 1 材料属性

Tab.1 Material properties

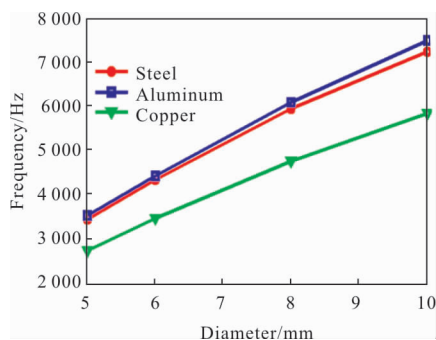
| Material type | Elastic modulus E/Pa | Poisson ratio P | Density D/ kg · m ⁻³ | E/D |
|---------------|----------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------|
| Steel | 2×10 ¹¹ | 0.3 | 7850 | 2.55×10 ⁷ |
| Aluminum | 7.1×10 ¹⁰ | 0.33 | 2770 | 2.56×10 ⁷ |
| Copper | 1.1×10 ¹¹ | 0.34 | 8300 | 1.33×10 ⁷ |

在直径 6 mm 时,不同固定方式、不同长度、不同金属材料框架的 DFB 光纤激光水听器谐振频率分析结果如图 5 所示,从图 5(a)~(c)可以看出:(1) 同一种金属材料的情况下,单端固定的 DFB 光纤激光水听器谐振频率远小于两端自由和两端固定的谐振频率;(2) 同一种固定方式下,DFB 光纤激光水听器的长度越长,其谐振频率越低。



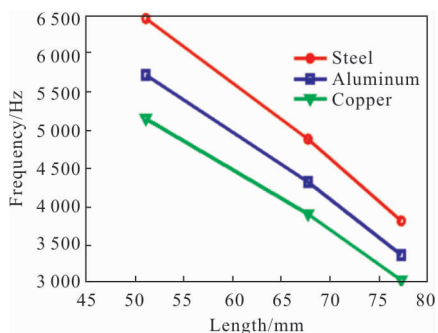
(a) 两端自由

(a) Both ends free



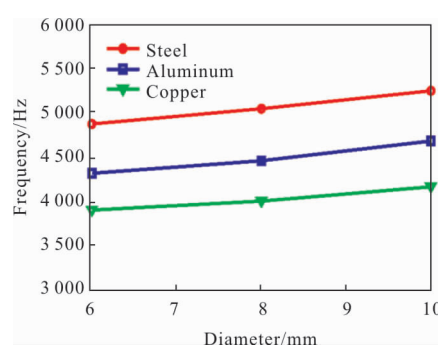
(a) 两端自由

(a) Both ends free



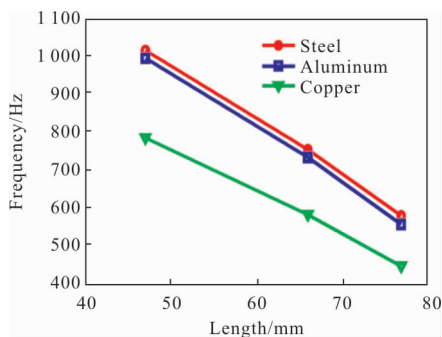
(b) 两端固定

(b) Both ends fixed



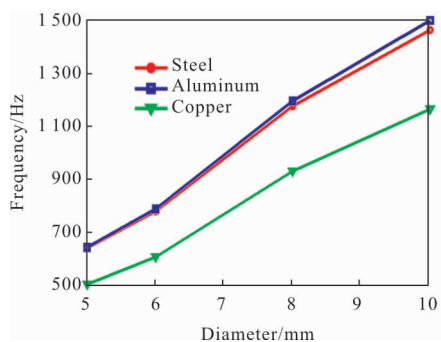
(b) 两端固定

(b) Both ends fixed



(c) 一端自由一端固定

(c) One end free, one end fixed



(c) 一端自由一端固定

(c) One end free, one end fixed

图 5 不同长度不同固定方式不同材料仿真结果

Fig.5 Simulation results of different length, fixed mode and material

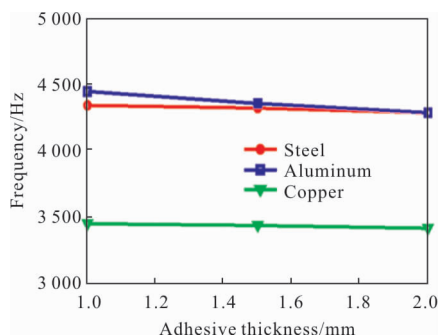
图 6 不同直径不同固定方式不同材料仿真结果

Fig.6 Simulation results of different diameter, fixed mode and material

在长度为 60 mm 时,不同固定方式、不同直径、不同金属材料框架的 DFB 激光水听器谐振频率分析结果如图 6 所示,从图 6(a)~(c)可以看出:(1) 同一种金属材料的情况下,单端固定的 DFB 激光水听器谐振频率远小于两端自由和两端固定的谐振频率;(2) 同一种固定方式下,DFB 激光水听器的直径越大,其谐振频率越高。

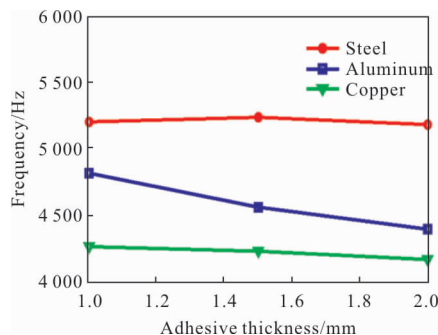
在外径 6 mm、金属框厚度 0.5 mm 时,不同固定方式、不同金属材料框架,不同胶层厚度的 DFB 激光水听器谐振频率分析结果如图 7 所示,从图 7(a)~(c)可以看出:同一种金属材料,同一固定方式下,胶层的厚度对 DFB 激光水听器的谐振频率影响非常小,远小于长度变化和直径变化的影响。

在外径 6 mm 时,不同固定方式、不同金属材料



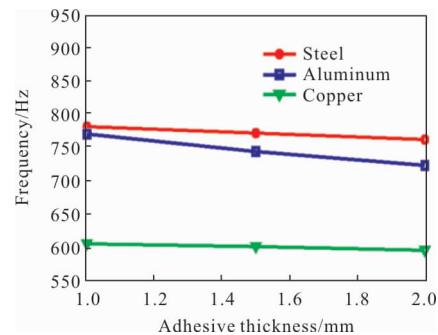
(a) 两端自由

(a) Both ends free



(b) 两端固定

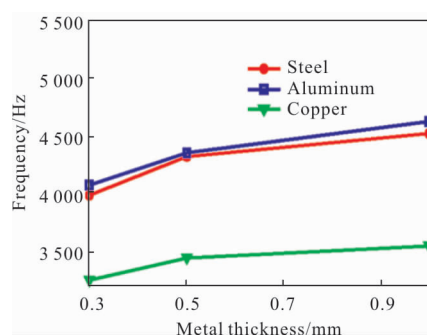
(b) Both ends fixed



(c) 一端自由一端固定

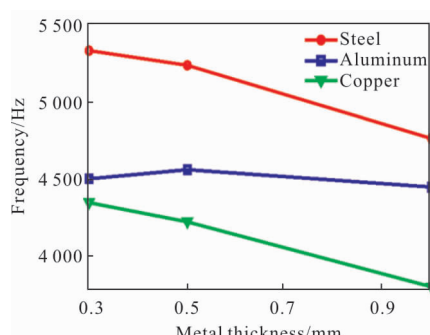
(c) One end free, one end fixed

图 7 不同胶层厚度不同固定方式不同材料仿真结果
Fig.7 Simulation results of different adhesive thickness, fixed mode and material



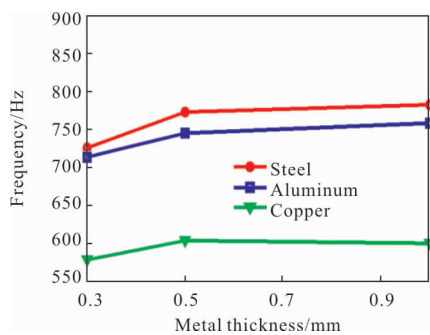
(a) 两端自由

(a) Both ends free



(b) 两端固定

(b) Both ends fixed



(c) 一端自由一端固定

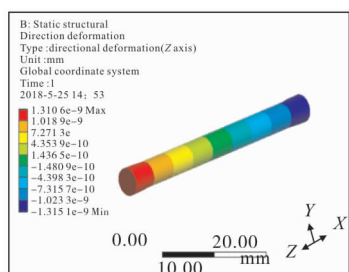
(c) One end free, one end fixed

图 8 不同金属层厚度不同固定方式不同材料仿真结果
Fig.8 Simulation results of different metal thickness, fixed mode and material

框架厚度的 DFB 激光水听器谐振频率分析结果如图 8 所示,从图 8(a)~(c)可以看出:同一种金属材料,同一固定方式下,框架的厚度对 DFB 激光水听器的谐振频率影响也非常小,并且远小于长度变化和直径变化的影响。

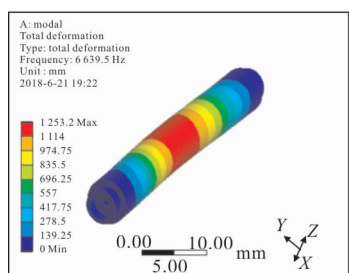
DFB 光纤激光水听器的低频响应平坦性与封装结构的谐振频率密切相关,谐振频率越低,低频响应平坦性越差,通过仿真发现封装结构的谐振频率主

要受直径和长度影响,直径越细,长度越长,封装结构的谐振频率越低,对光纤激光水听器的低频响应平坦性越不利。综合考虑光纤激光水听器封装谐振频率、灵敏度以及当前 DFB 光纤光栅激光器的技术水平,文中制作了一款直径 6 mm,长度 55 mm 的 DFB 光纤激光水听器,对该水听器封装结构进行建模仿真,分析在 1 Pa 声压下水听器的纵向变形量、模态和谐响应,分析结果如图 9 所示。



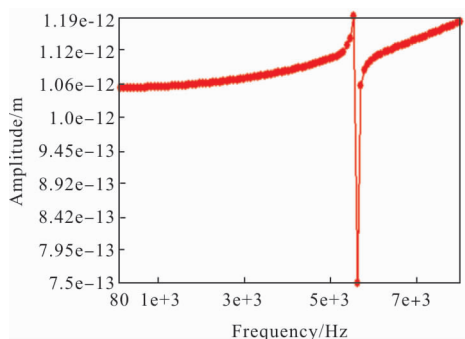
(a) 1 Pa 声压 Z 向变形云

(a) Deformation in Z direction of 1 Pa sound pressure



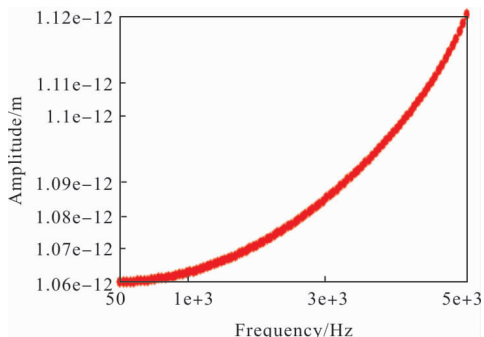
(b) 模态云图

(b) Modal graph



(c) 谐响应曲线

(c) Harmonic response curve



(d) 谐响应曲线局部放大图

(d) Partial enlarged view of harmonic response curve

图 9 仿真结果

Fig.9 Simulation results

仿真结果显示该结构的谐振频率为 6 639 Hz, 在外部施加 1 Pa 声压作用时, 光纤光栅在膜片带动下

的变形量为 $1.31 \text{ e-}9 \text{ m}$, 设非平衡干涉仪的臂长差为 50 m, 将变形量代入公式(4)得到灵敏度为 -132.2 dB 。图 9(c)和图 9(d)显示该结构在 2 000 Hz 以下没有明显的谐振峰, 频响起伏程度为 1.4%, 具有较好的频响特性。

3 试验

根据仿真设计结果制作了直径 6 mm, 长度 55 mm 的水听器探头试样, 如图 10 所示。



图 10 光纤激光水听器探头

Fig.10 Fiber laser hydrophone probe

利用振动液柱法对光纤激光水听器探头进行频响测试, 如图 11 所示。

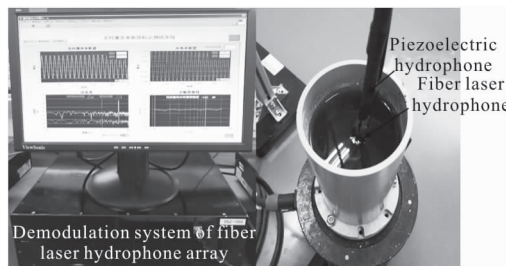
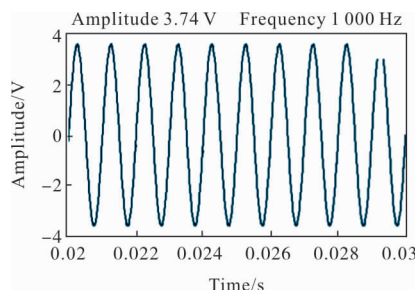


图 11 测试过程

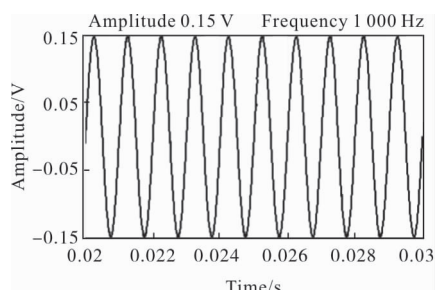
Fig.11 Test process

如图 12 所示为光纤激光水听器和压电水听器



(a) 光纤激光水听器 1 kHz 波形

(a) 1 kHz waveform of fiber laser hydrophone



(b) 压电水听器 1 kHz 波形

(b) 1 kHz waveform of piezoelectric hydrophone

图 12 输出波形

Fig.12 Output waveform

在 1 kHz 激励下的输出波形，从输出结果看光纤激光水听器的输出波形与压电水听器波形一致，输出波形正常。

如图 13 所示为光纤激光水听器的频响曲线测试结果，该测试结果是在干涉解调仪臂长差 50 m 的条件下得到的，从图中看出目前光纤激光水听器探头在 100 Hz~2 kHz 频段内的灵敏度为 -132 dB，频响起伏约 4 dB，与仿真分析结果基本一致。

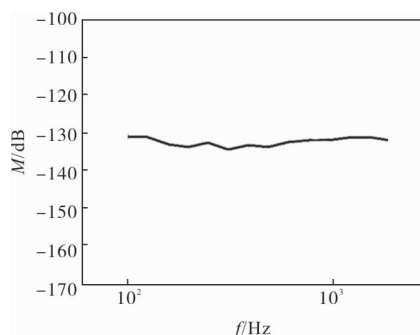


图 13 频响曲线

Fig.13 Frequency response curve

4 结论

文中分析了封装对超小型 DFB 光纤激光水听器低频响应平坦性能的影响因素，得到了光纤激光水听器的频响特性与探头的直径、长度、封装结构厚

度的关系，最后通过制作光纤激光水听器探头对分析结果进行了验证。

参考文献：

- [1] Zhang Wentao, Li Fang, Liu Yuliang. Field test of an eight-element fiber laser hydrophone array [C]//SPIE, 2012, 8421: 8421AX.
- [2] Steven Goodman, Scott Foster, John Van Velzen, et al. Field demonstration of a DFB fibre laser hydrophone seabed array in Jervis bay [C]//SPIE, 2009, 7503: 75034L.
- [3] Zhang Wentao, Li Fang. Recent progress in fiber laser hydrophone [J]. *Journal of Integration Technology*, 2015, 4(6): 1-13. (in Chinese)
- [4] Xu Hanfeng, Li Dongming, Wu Guojun. Research progress of fiber grating hydrophone [J]. *Acoustics and Electronics Engineering*, 2014, 113(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] Ma Lina. Fiber laser hydrophone [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] Zhang Wentao, Liu Yuliang, Li Fang, et al. Fiber laser hydrophone based on double diaphragms: theory and experiment[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1349-1352.
- [7] Tan Bo, Huang Junbin. Design of encapsulated structure of distributed feedback fiber laser hydrophone [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1691-1695. (in Chinese)
- [8] Tang Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan, et al. Prestressing force in DFB fiber laser hydrophone: theory and experiment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0305005. (in Chinese)
- [9] Du Gonghuan, Zhu Zhemin, Gong Xiufen. Acoustic Foundation [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012. (in Chinese)