

doi: 10. 3788/gzxb20174605. 0506003

带加速度补偿的 DFB 光纤激光水听器

唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 毛欣

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘 要: 针对分布反馈式光纤激光水听器在用于水声探测时极易受加速度效应干扰的问题, 设计了一种双膜片对称结构的光纤激光水听器, 对该水听器的抗加速度性能进行了研究. 建立了双膜片结构水听器的加速度灵敏度理论模型, 分析了水听器各部件的尺寸大小、材料参量与水听器加速度灵敏度的关系, 实现了对水听器结构的优化设计; 加工制作了分布反馈式光纤激光水听器原型样品, 并进行了实验研究. 测量结果表明, 在 2.5~10 kHz 的频率范围内, 该结构水听器的平均声压灵敏度为 -132.6 dB, 波动幅度不大于 ± 0.5 dB, 加速度灵敏度小于 -28 dB. 该水听器在保证较高声压灵敏度与平坦的响应曲线的同时, 抗加速度性能也得了有效改善, 可大大提高光纤激光水听器阵列在运动状态下对远距离目标探测的信噪比.

关键词: 分布反馈式光纤激光; 水听器; 加速度灵敏度; 补偿; 声压灵敏度

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0506003-7

DFB Fiber Laser Hydrophone with Acceleration Compensation

TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, MAO Xin

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

Abstract: To reduce the disturbance of acceleration effects on distributed feedback fiber laser hydrophone used in underwater sound detection, one symmetric structure with two diaphragms was designed and its anti-acceleration performance is investigated. The theoretical acceleration sensitivity model of the hydrophone with two diaphragms was established. After the relation between acceleration sensitivity and component size, materials parameters were analyzed, the structure of the hydrophone was optimized. Prototype of the hydrophone was fabricated and tested. The average pressure sensitivity reaches -132.6 dB with the fluctuation less than ± 0.5 dB in the frequency range of 2.5~10 kHz, while the acceleration sensitivity is less than -28 dB. The results show that this structure of hydrophone ensures the high pressure sensitivity and flat response curve, whose anti-acceleration performance is improved at the same time, which will greatly enhance the signal-to-noise ratio of the hydrophone in the moving state.

Key words: DFB fiber laser; Hydrophone; Acceleration sensitivity; Compensation; pressure sensitivity

OCIS Codes: 060.2770; 060.2340; 060.3735; 230.1040

0 引言

基于分布反馈式(Distributed Feedback, DFB)光纤激光器的光纤水听器具有尺寸小、灵敏度高以及便于大规模复用成阵等优点, 成为近年来水声探测研究的热点^[1-3]. 然而, DFB 光纤激光水听器在工作时一般处于运动状态, 水听器本身会产生加速度, 这种加速度效应用于水听器接收有用的水声信号会有干扰作用, 制约了水听器成阵后对微弱信号的远距离探测, 因而有必要对 DFB 光纤激光水听器的抗加速度封装展开研究以提高其抗干扰能力^[4-7].

2012 年, 李东明研制了一种两边对称的弹性膜片结构的 DFB 光纤激光水听器, 通过实验测得, 该结构

基金项目: “十二五”装备预先研究项目和武器装备探索研究重大项目资助

第一作者: 唐波(1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 942896945@qq.com

导师(通讯作者): 黄俊斌(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: tsy98@163.com

收稿日期: 2016-12-01; 录用日期: 2017-02-15

<http://www.photon.ac.cn>

水听器在抗加速度灵敏度上较单端弹性片结构有 10~27 dB 的改善^[8];2015 年,谭波设计了一种夹层式结构的 DFB 光纤激光水听器,仿真结果表明,通过上下两个形变方向相同的承压面,水听器的相对加速度灵敏度可达到-19.6 dB,但并未进行实验验证^[9].然而,在水听器加工与封装的过程中,对称结构的尺寸不能保证完全相同,安装位置也不能保证完全对称,这些都会影响对称化结构的加速度去敏效果,因而水听器封装结构需要进一步的优化设计,以降低其加速度灵敏度.

本文设计了一种双膜片对称结构的 DFB 光纤激光水听器,理论分析了水听器加速度灵敏度与其各封装结构尺寸以及材料参量的关系,实现了水听器结构的优化设计,根据分析结果加工制作了 DFB 光纤激光水听器原型样品,并对其抗加速度性能与频响性能进行实验研究,在获得较低加速度灵敏度的同时,保持了较高的声压灵敏度与平坦的频响曲线,对于推动 DFB 光纤激光水听器的工程化具有重要意义.

1 DFB 光纤激光水听器加速度去敏结构优化

双膜片结构 DFB 光纤激光水听器主要由 DFB 光纤激光器、膜片套筒和端盖组成,如图 1.水听器的套筒沿径向均匀分布了四个长条形开孔,膜片下端边缘与套筒两端通过环氧树脂胶粘接固定,DFB 光纤激光器通过膜片固定于套筒的中心轴线上,然后将端盖从套筒两端拧入将膜片上端压紧,激光器的尾纤从端盖中心的孔穿出.其工作原理是声压通过开孔透过水听器的套筒作用在水听器两端的膜片上,使得膜片产生形变,膜片拉动 DFB 光纤激光器产生轴向应变引起激光器出射激光中心波长发生漂移,从而实现了对水声信号的有效探测.

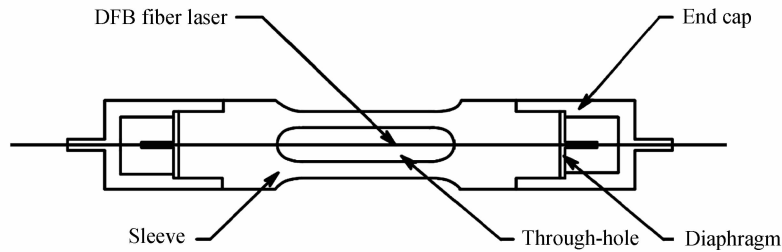


图 1 DFB 光纤激光水听器封装结构
Fig. 1 Scheme of encapsulated structure of DFB fiber laser hydrophone

由于双膜片 DFB 光纤激光水听器的圆柱状结构具有轴对称性,探头本身对加速度的径向分量具有抵消作用,即径向加速度灵敏度很低,因而轴向加速度对水听器的探测起主要干扰作用.采用双膜片结构的对称化设计,理论上可将轴向加速度产生的惯性力作为一共模信号被自动抵消掉,同时可将声压作用放大一倍,即降低 DFB 光纤激光水听器加速度灵敏度的同时,可提高水听器的声压灵敏度.如图 2,当 DFB 光纤激光水听器沿着轴向进行变速运动时,水听器的两个对称化膜片在加速度的作用下将产生相同的位移,使得 DFB

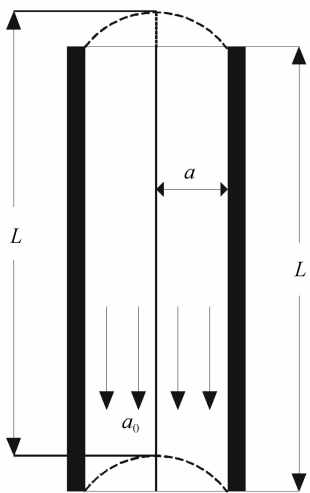


图 2 DFB 光纤激光水听器加速度补偿示意图
Fig. 2 Scheme of acceleration compensated structure of DFB fiber laser hydrophone

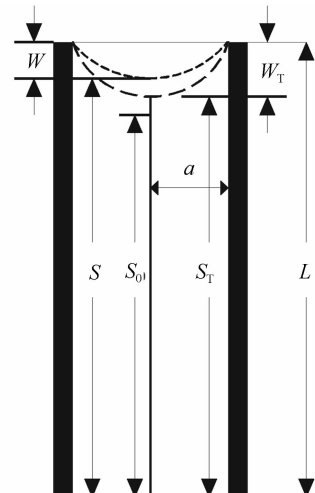


图 3 DFB 光纤激光水听器弯曲形变图
Fig. 3 Scheme of bending deformation of DFB of DFB fiber laser hydrophone

光纤激光器本身不会因为加速度的作用而产生位移,因而激光器出射激光的中心波长不会发生变化,从而实现轴向加速度去敏的功能.为了减小加工与封装过程中产生的误差对此去敏方法效果的影响,有必要对DFB光纤激光水听器的结构进行进一步的优化.

为了研究水听器轴向加速度灵敏度与其各结构尺寸以及材料参量的关系,先不考虑双膜片结构的补偿作用,即加速度只作用于单个膜片上,此时DFB光纤激光水听器受轴向加速度作用的弯曲形变如图3.设膜片的有效作用半径为 a ,厚度为 t ,弹性模量为 E_p ,泊松比为 ν_p ,密度为 ρ_t , w 为膜片中心的挠度,则膜片的弯曲刚度 $D=E_p t^3/[12(1-\nu_p^2)]$,DFB光纤激光器的弹性模量为 E_f ,泊松比为 ν_f ,横截面积为 A_f ,长度为 S_0 的光纤激光器为拉长至 L 后固定于膜片上,张紧的光纤激光器自身收缩并拉动膜片弯曲达到平衡状态,此时激光器的长度为 S_T ,对应膜片中心的挠度为

$$w_T = E_f A_f \epsilon_T \cdot \frac{a^2}{16\pi D} = \frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} (S_T - S_0) \quad (1)$$

式中 ϵ_T 为DFB光纤激光器长度为 S_T 时的轴向应变.

当水听器受到轴向加速度 a_0 作用时,在膜片上可等效为均布载荷 q_t 的作用,其大小可表示为

$$q_t = \rho_t t a_0 \quad (2)$$

而与膜片一体化固连的毛细不锈钢套管在受到加速度 a_0 作用时,可等效为作用在膜片中心的一集中力 T ,其大小表示为

$$T = m a_0 \quad (3)$$

式中 m 为不锈钢套管的质量,由于 T 值很小,相对于 q_t 的作用引起的激光器长度的变化可以忽略不计,为了将加速度对膜片以及毛细不锈钢管的作用统一起来,可将集中力等效为作用在膜片上的均布载荷 q_m ,其大小为

$$q_m = \frac{4T}{\pi a^2} = \frac{4m}{\pi a^2} a_0 \quad (4)$$

因而水听器受到轴向加速度 a_0 作用时可等效于均布载荷 q_t 与 q_m 的共同作用,此时激光器的长度为 S ,膜片中心点的挠度为

$$w = w_T - w_q = \frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} (S - S_0) - \frac{(q_t + q_m) a^4}{64D} \quad (5)$$

根据几何关系可得

$$w_T + S_T = w + S \quad (6)$$

因而DFB光纤激光水听器在受到加速度 a_0 作用后,其长度变化为

$$\Delta S = S - S_T = w_T - w = \frac{(q_t + q_m) a^4}{64D} - \frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} (S - S_T) \quad (7)$$

由上式可以得到

$$\Delta S = \frac{(q_t + q_m) a^4}{64D} \left(\frac{E_f A_f a^2}{16\pi D S_0} + 1 \right)^{-1} = \frac{(q_t + q_m) \pi a^4 S_0}{4(E_f A_f a^2 + 16\pi D S_0)} \quad (8)$$

则DFB光纤激光水听器的加速度灵敏度理论计算公式为

$$M_a = 20 \lg \left(\frac{\Delta \varphi}{a_0} \right) = 20 \lg \left(\frac{\Delta S}{a_0 S_0} \right) + G_{\text{int}} + 20 \lg d = 20 \lg \left[\frac{\pi a^4 \rho_t t + 4 m a^2}{4(E_f A_f a^2 + 16\pi D S_0)} \right] + G_{\text{int}} + 20 \lg d \quad (9)$$

式中 G_{int} 是一个常量,为单位长度非平衡干涉仪对激光器单位应变的相位增益,与激光器的初始波长有关,如果波长取1540 nm,可 $G_{\text{int}} = 133.26$ dB; d 为干涉仪的非平衡路径的长度100 m^[10-11].

由式(9)可知,DFB光纤激光水听器的加速度灵敏度与膜片的密度、半径、厚度、不锈钢套管的质量以及光纤激光器的封装长度有关,其中不锈钢套管的质量主要表现在其外部半径 R 与长度 h .首先设定膜片的半径为3 mm,厚度为0.2 mm,光纤激光器的封装长度为48 mm,不锈钢套管半径为0.5 mm,长度为3 mm,将不同的膜片材料密度代入式(9)中得到水听器的加速度灵敏度曲线,结果如图4.水听器的加速度灵敏度与膜片材料的密度成正比关系,但是影响比较小,因而对于膜片材料的选择应更趋向与增敏效果与响应平坦上的要求.

由于膜片的半径与厚度是两个密切相关的参量,因而不将两者分开进行分析.设膜片材料的密度为

7 800 kg/m³, 光纤激光器的封装长度为 48 mm, 不锈钢套管半径为 0.5 mm, 长度为 3 mm, 将不同的膜片半径与厚度同时代入式(9)中得到水听器的加速度灵敏度三维网格曲线, 结果如图 5。水听器的加速度灵敏度与膜片半径的大小成正比关系, 与膜片的厚度成反比关系, 且膜片的半径越小, 厚度越大, 水听器的加速度灵敏度减小的趋势越快。然而对于膜片增敏方式的水听器来说, 其声压灵敏度与膜片半径的大小成正比关系, 与膜片厚度成反比关系, 因而水听器声压灵敏度与加速度灵敏度对膜片尺寸的要求是两个相互矛盾的方向, 因此在膜片半径与厚度的选择需要在两者之间做出权衡, 在保证水听器较高声压灵敏度的前提下, 尽量降低其加速度灵敏度。

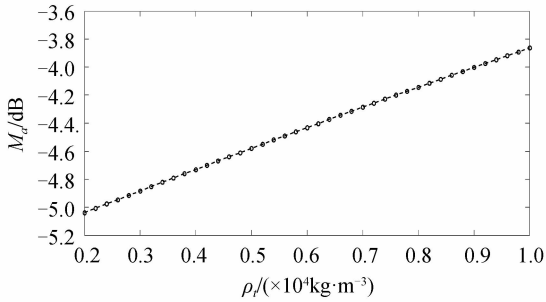


图 4 加速度灵敏度与膜片材料密度的关系

Fig. 4 The relation of acceleration sensitivity of hydrophone with the density of diaphragms

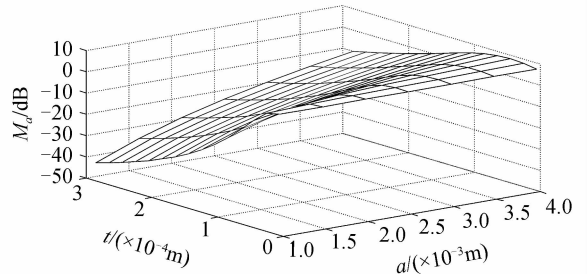


图 5 水听器加速度灵敏度与膜片的半径与厚度大小的关系

Fig. 5 The relation of acceleration sensitivity of hydrophone with the radius and thickness of diaphragms

设膜片半径为 2 mm, 厚度为 0.1 mm, 膜片材料的密度为 7 800 kg/m³, 光纤激光器的封装长度为 48 mm, 将不同不锈钢套管外部半径与长度分别代入式(9)中得到水听器的加速度灵敏度曲线, 结果如图 6 和 7。水听器的加速度灵敏度与不锈钢套管的半径成正比关系, 在保持与其内部半径一定距离的前提下减小其外部半径有利于加速度灵敏度的减小; 加速度灵敏度与不锈钢套管的长度成正比关系, 但考虑到套管是膜片与光纤激光器粘接的部位, 应具有一定的长度才能保证张紧的激光器与膜片的牢固粘接, 因而套管长度的选择要兼顾两者的需求。

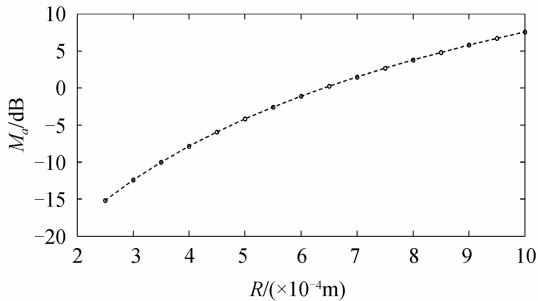


图 6 水听器加速度灵敏度与不锈钢套管半径的关系

Fig. 6 The relation of acceleration sensitivity of hydrophone with the radius of steel casing

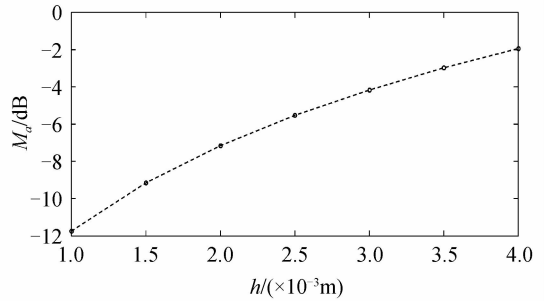


图 7 水听器加速度灵敏度与不锈钢套管长度的关系

Fig. 7 The relation of acceleration sensitivity of hydrophone with the length of steel casing

设膜片半径为 2 mm, 厚度为 0.1 mm, 膜片材料的密度为 7 800 kg/m³, 不锈钢套管半径为 0.5 mm, 长度为 3 mm, 将不同的光纤激光器封装长度代入式(9)中得到水听器的加速度灵敏度曲线, 结果如图 8。水听器的加速度灵敏度随激光器封装长度的增加而略微有所减小, 但是水听器的增敏难度随激光器长度的增大而急剧增大, 因而后者成为封装长度选择的优先考虑因素。

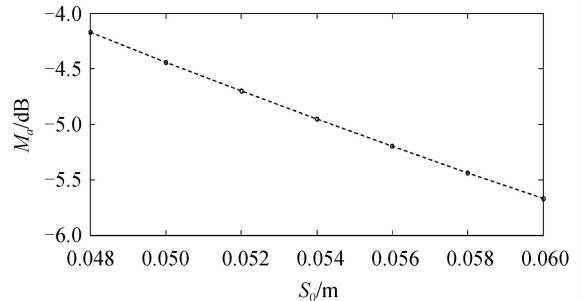


图 8 水听器加速度灵敏度与 DFB 光纤激光器封装长度的关系

Fig. 8 The relation of acceleration sensitivity of hydrophone with the length of DFB fiber laser

综上所述, 要得到加速度灵敏度低的 DFB 光纤激光水听器, 需要膜片半径小、厚度大, 密度小以及激光器封装长度长的结构设计, 但又考虑到声压灵

灵敏度高低、声压响应平坦度、加工与封装难度的要求最终选定不锈钢作为膜片材料,且半径为 2 mm,厚度为 0.1 mm,密度为 $7\ 800\text{ kg/m}^3$,DFB 光纤激光器的封装长度为 48 mm,不锈钢套管半径为 0.5 mm,长度为 3 mm,将上述参量带入式(9)中可得到单膜片结构的 DFB 光纤激光水听器在 1 m/s^2 加速度激励作用下的加速度灵敏度理论计算值为

$$M_a = 20\lg\left(\frac{\Delta\varphi}{a_0}\right) = 20\lg\left[\frac{\pi a^4 \rho_s t + 4ma^2}{4(E_f A_f a^2 + 16\pi DS_0)}\right] + G_{\text{int}} + 20\lg d = -24\text{ dB} (0\text{ dB} = 1\text{ rad/g}) \quad (10)$$

由理论分析结果可知,经过对 DFB 光纤激光水听器封装部件材料参量、尺寸的优化,其单膜片结构水听器的加速度灵敏度理论值就已经低于 2012 年李东明报道的单膜片结构光纤激光水听器 -10 dB 的水平,甚至接近其具有加速度补偿功能的双膜片结构的水平^[8],为低加速度灵敏度的 DFB 光纤激光水听器样品的研制奠定了基础。

2 实验分析

基于上述分析加工制作了双膜片对称结构的 DFB 光纤激光水听器原型样品,编号为 H521,出射激光的中心波长为 $1\ 540.040\text{ nm}$. 首先利用消声水池实验系统对水听器在其工作频带 $2.5\sim 10\text{ kHz}$ 的频响性能进行测试,实验系统如图 9. 消声水池尺寸为 $10\text{ m}\times 6\text{ m}\times 5\text{ m}$,发射换能器入水 2.5 m ,与一台功率放大器连接,信号发生器为其提供脉冲信号,BK8105 标准水听器与电荷放大器相连,输出信号幅度通过示波器读取,标准水听器靠近 DFB 光纤激光水听器放置且入水 1.7 m . 测量的 DFB 光纤激光水听器引出端与解调样机相连,干涉仪的非平衡长度为 100 m ,通过解调后得到 DFB 光纤激光水听器的相位漂移信息,再读取示波器的电压信号,即可计算出水听器的声压灵敏度. 在测量频率范围内选择 $1/3$ 倍频程频点进行测量后,即可得到该频率范围内水听器的声压灵敏度频响曲线。

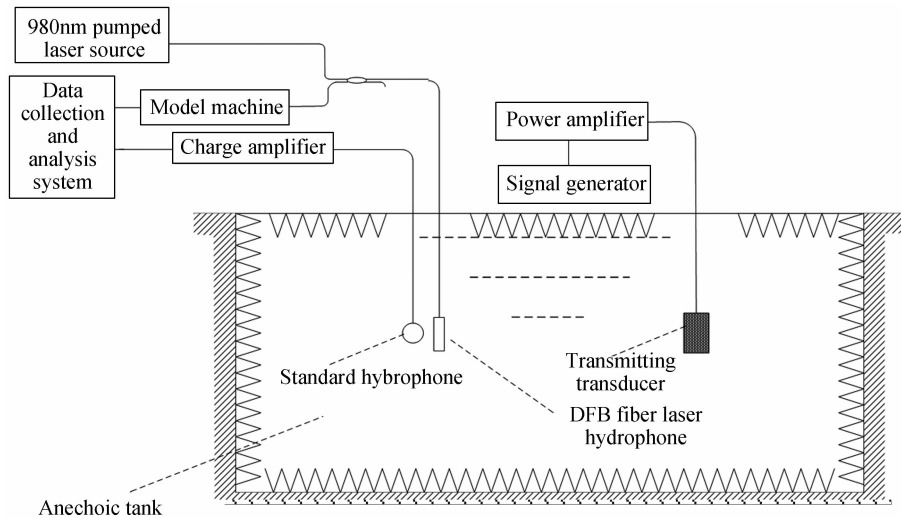


图 9 消声水池实验系统

Fig. 9 Schematic of testing system in anechoic tank

水听器加速度灵敏度测试系统如图 10,首先在振动台上安装夹具,再将待测 DFB 光纤激光水听器固定在夹具上,振动台与功率放大器连接,信号发生器为其提供正弦波信号,将标准加速度计靠近夹具固定于振动台上,加速度计与电荷放大器相连,输出信号幅度通过示波器读取. 待测水听器引出端与泵浦源光源及非平衡干涉仪解调系统相连,干涉仪输出的相位信息通过光电探测输出后接入数据采集卡,联入计算机,通过解调后得到水听器的相位漂移信息,再通过读取示波器显示的电压值后,即可计算出水听器的加速度灵敏度. 在 $2.5\sim 10\text{ kHz}$ 频率范围内选择 $1/3$ 倍频程频点进行测量后,即可得到该频率范围内 DFB 光纤激光水听器的加速度灵敏度频响曲线。

根据实验测得的数据绘制出 DFB 光纤激光水听器在 $2.5\sim 10\text{ kHz}$ 频率范围内的声压灵敏度与加速度灵敏度的频响曲线,如图 11 和 12. 图中 H521 与 H521-2 为同一支水听器的两组测试数据,以保证实验结果的重复性. 由实测数据可以得到,在 $2.5\sim 10\text{ kHz}$ 的频率范围内,双膜片对称结构的 DFB 光纤激光水听器的

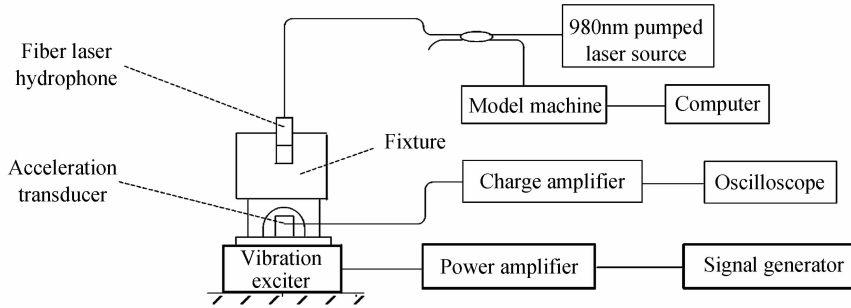


图 10 加速度灵敏度实验测试系统示意图

Fig. 10 Schematic of testing system for acceleration sensitivity

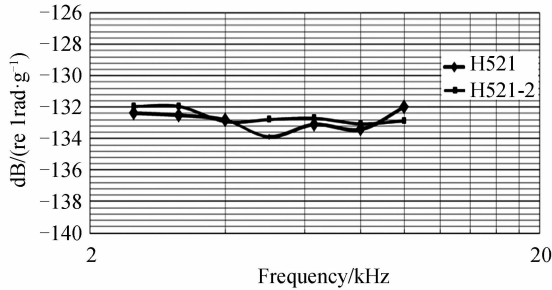


图 11 DFB 光纤激光水听器声压灵敏度频响曲线

Fig. 11 Experimental pressure sensitivity frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone

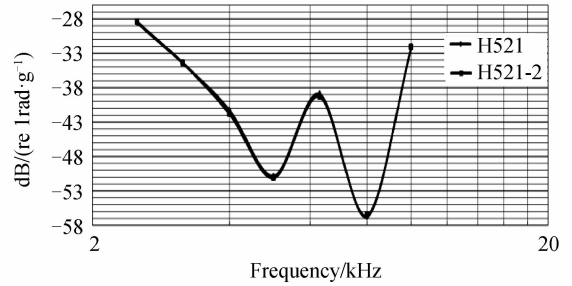


图 12 DFB 光纤激光水听器加速度灵敏度频响曲线

Fig. 12 Experimental acceleration sensitivity frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone

加速度灵敏度小于 -28 dB, 小于单膜片结构水听器的加速度灵敏度理论计算值, 说明对称化膜片的设计进一步降低了水听器的加速度灵敏度, 同时其平均声压灵敏度为 -132.6 dB, 波动幅度不大于 ± 0.5 dB, 该结构水听器在其工作频带内还保持着较高的声压灵敏度与平坦的声压频响性能, 表明在对称化设计的基础上, 对该结构水听器采取的优化设计方案在保持其良好的声压频响性能的同时, 达到了降低其加速度灵敏度的效果。

3 结论

设计了一种双膜片对称结构的 DFB 光纤激光水听器, 理论分析了水听器加速度灵敏度与水听器各封装部件的材料参量、尺寸大小的关系, 同时权衡了声压灵敏度、响应平坦度以及加工与装配难度等要求, 完成了对提高 DFB 光纤激光水听器抗加速性能的优化设计, 加工制作了原型样品并开展了实验研究。实验测得, 在 $2.5 \sim 10$ kHz 的频率范围内, 该结构水听器的平均声压灵敏度为 -132.6 dB, 波动幅度不大于 ± 0.5 dB, 加速度灵敏度小于 -28 dB。测量结果表明, 所设计的双膜片对称结构 DFB 光纤激光水听器在其工作频带具有较高的声压灵敏度与平坦的声压频响曲线, 且加速度灵敏度较低, 因而以该结构水听器为基元构建的阵列会具有良好的抗干扰能力, 特别是对于提高 DFB 光纤激光水听器阵列在运动状态下的探测距离具有重要意义。

参考文献

- [1] TAN Bo, HUANG Jun-bin, HE Lin, *et al.* A study on the dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1832-1838.
谭波, 黄俊斌, 何琳, 等. 分布反馈式光纤激光器的动态特性 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1832-1838.
- [2] FOSTER S, TIKHOMIROV A, VELZEN J V. Towards a high performance fiber laser hydrophone [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(9): 1335-1341.
- [3] TAN Bo, HUANG Jun-bin. Design of encapsulated structure of distributed feedback fiber laser hydrophone [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(8): 1691-1695.
谭波, 黄俊斌. 分布反馈光纤激光水听器封装结构的设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(8): 1691-1695.
- [4] WANG Jun-jie, JIANG De-sheng, XIE Guan-mo, *et al.* Research of the planar optical fiber Bragg grating hydrophone probe with acceleration compensation methods [J]. *Acta Acoustica*, 2009, **34**(4): 311-317.
王俊杰, 姜德生, 谢官模, 等. 带加速度补偿平面型光纤光栅水听器探头技术的研究 [J]. *声学学报*, 2009, **34**(4): 311-

- 317.
- [5] LI Dong-ming. Research on key technology interferometric hydrophone of fiber Bragg grating[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
李东明. 干涉型光纤光栅水听器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [6] YUN Chao-qing, LUO Hong, HUANG Zheng-liang, *et al.* Fiber optic hydrophone used for thin line towed array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1206004.
运朝青, 罗洪, 胡正良, 等. 应用于拖曳线列阵的光纤水听器研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(12): 1206004.
- [7] TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *et al.* Prestressing force in DFB fiber laser hydrophone: theory and experiment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(3): 0305005.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. DFB 光纤激光水听器预应力理论与实验研究[J]. 中国激光. 2016, **43**(3): 0305005.
- [8] LI Dong-ming, CHEN Jun, GE Hui-liang, *et al.* Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber Grating hydrophone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(3): 1-6.
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光栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 1-6.
- [9] TAN Bo, YAN Ping, HUANG Jun-bin. Optimization design of sandwich-type probe of fiber laser hydrophones[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(2): 024120.
谭波, 严平, 黄俊斌. 夹层式光纤激光水听器探头优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(2): 024120.
- [10] LIU Meng-ran, JIAN Ze-ming, ZHANG Guo-jun, *et al.* Fluid-structure interaction of MEMS vector hydrophone in packing processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1387-1393.
刘梦然, 简泽明, 张国军, 等. MEMS 矢量水听器封装的流体-结构相互作用[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(5): 1387-1393.
- [11] TAN Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *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.