

# 低加速度灵敏度的分布反馈式光纤激光水听器研究

唐波, 黄俊斌, 顾宏灿

海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

**摘要** 针对分布反馈式(DFB)光纤激光水听器的加速度响应影响声压信号探测的问题, 研制了一种聚氨酯端面增敏结构的 DFB 光纤激光水听器。建立了该结构水听器的加速度灵敏度理论模型, 理论分析了套筒结构与水听器的加速度灵敏度的关系, 仿真分析了水听器两端聚氨酯的弹性模量、泊松比以及高度的差异与其加速度灵敏度的关系, 实现了对水听器各结构以及材料参数的优化, 并制作了水听器原型样品与拖曳线列阵样阵, 分别开展了加速度灵敏度测试和湖上动态拖曳实验研究。实验结果表明, 该结构水听器在 20~2000 Hz 频率范围内的加速度灵敏度在各频点均小于 1.2 dB, 与理论分析结果较为吻合, 在动态拖曳过程中的变速运动阶段也能对目标形成较高信噪比的稳定波束指向。水听器的抗加速度性能得到了有效预测以及实验验证。

**关键词** 传感器; DFB 光纤激光; 水听器; 加速度灵敏度; 对称化设计; 拖曳线列阵

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0310001

## Low Acceleration Sensitivity DFB Fiber Laser Hydrophone

Tang Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan

Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

**Abstract** To reduce the influences of acceleration response of distributed feedback (DFB) fiber laser hydrophone on underwater acoustic detection, we design a DFB fiber laser hydrophone with sensitivity-enhanced structure through polyurethane end surface pulling. Firstly, we establish the acceleration sensitivity model of the designed hydrophone. Secondly, we theoretically analyze the relationship between the sleeve structure and the acceleration sensitivity. Thirdly, we simulate the relationship between elastic modulus, Poisson's ratio, and height difference and acceleration sensitivity. Fourthly, we optimize the structure and materials parameters of hydrophone. At last, we fabricate and test the prototype samples of hydrophones and towed line array samples. The experimental results show that the acceleration sensitivity is less than 1.2 dB at each frequency point in the frequency range of 20-2000 Hz, which agrees well with theoretical results. The towed line array can form stable beam pointing with high noise-signal ratio during the variable speed motion phase of dynamic drag. The anti-acceleration performance of the hydrophone is effectively predicted and experimentally verified.

**Key words** sensors; DFB fiber laser; hydrophone; acceleration sensitivity; symmetric design; towed line array

**OCIS codes** 060.2770; 060.2340; 060.3735; 230.1040

## 1 引 言

以分布反馈式(DFB)光纤激光器为敏感元件的光纤水听器凭借其高灵敏度、小体积、抗电磁干扰以及易于大规模复用成阵等优势, 作为一种新型光纤传感技术应用于水声探测领域并快速发展<sup>[1-3]</sup>。在过去的 20 年里, 国内外学者针对 DFB 光纤激光水听器的增敏封装、信号解调以及复用成阵等开展了

大量颇有成效的研究, 极大地推动了光纤激光水听器向工程应用转化的进程<sup>[4-5]</sup>。拖曳线列阵作为 DFB 光纤激光水听器的一个极具潜力的工程化应用, 其在变速拖曳的状态下工作时, 水听器本身产生的加速度严重影响拖曳阵对目标声压信号的探测, 因此有必要开展低加速度灵敏度的 DFB 光纤激光水听器的研究, 以解决加速度效应对于光纤激光水听器走向实用化的制约问题<sup>[6-8]</sup>。

收稿日期: 2017-09-12; 收到修改稿日期: 2017-10-24

作者简介: 唐波(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: 942896945@qq.com

导师简介: 黄俊斌(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: Tsjj98@163.com

国内外主要采用对称化设计来实现加速度去敏,理论上可将加速度产生的惯性力作为共模信号被自动抵消,同时将声压作用放大一倍。2010年殷小峰<sup>[9]</sup>研制了一种带加速度补偿薄板的金属薄片增敏结构的光纤光栅水听器。实验发现,当解调系统的光程差为100 m时,该结构水听器的加速度灵敏度为22.3 dB;2013年Chandrika等<sup>[10]</sup>设计了一种双金属膜片结构的DFB光纤激光水听器,其加速度灵敏度为9.5 dB,与2011年Foster等<sup>[11]</sup>研制的弯曲梁结构的DFB光纤水听器的测试结果处于同一数量级。由此可见,对称化设计的DFB光纤激光水听器并没有达到理论上所述的加速度完全自抵消的效果,而是表现出一定数量级的加速度灵敏度,这主要是由于水听器封装结构受加速度激励的长度变化以及两端对称化结构的尺寸、材料参数差异的影响。但国内外对上述因素与水听器的加速度灵敏度之间关系的研究较少,只有对称化设计的宏观原则,缺乏水听器加速度灵敏度的理论模型,以致于研制的水听器的加速度灵敏度性能不可控,难以进一步提高DFB光纤激光水听器的抗加速度性能。

本文基于弹性、材料力学理论推导了聚氨酯端面增敏结构的DFB光纤激光水听器的加速度灵敏度理论模型,仿真分析了水听器两端聚氨酯的弹性

模量、泊松比以及高度的差异与其加速度灵敏度的关系,以降低水听器的加速度灵敏度为目标函数实现了水听器各结构以及材料参数的优化,加工制作了水听器原型样品,对其加速度灵敏度进行了实验研究,并以该结构水听器为阵元构建了拖曳阵,开展了湖上动态拖曳实验研究以检验其抗加速度性能。水听器的实测加速度灵敏度与理论模型的计算值较吻合,构建的拖曳阵在动态拖曳的启动变速阶段也能对目标形成较高信噪比的波束指向,表明理论模型能有效地预测水听器的抗加速度性能,这对推动DFB光纤激光水听器的工程化应用具有重要意义。

## 2 理论分析

聚氨酯端面增敏结构的DFB光纤激光水听器如图1所示。水听器套筒两端的聚氨酯作为增敏元件,DFB光纤激光器张紧后通过聚氨酯固定于套筒的中心轴线,套筒上开有4个长条形通孔,其两端通过螺纹拧入端盖,激光器的尾纤则从端盖中间的小孔穿出。在水声探测时,假设声压载荷只透过通孔作用在聚氨酯端面,使套筒两端的聚氨酯产生弹性形变,由于DFB光纤激光器处于张紧状态,聚氨酯的形变会拉动激光器产生轴向应变,以实现水声信号的探测。

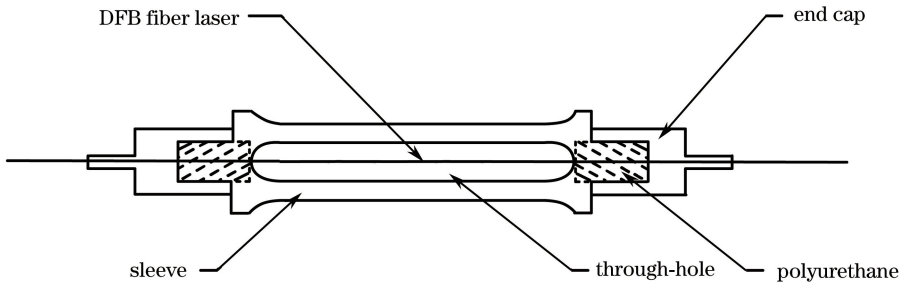


图1 水听器封装结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydrophone encapsulated structure

首先,假设水听器两端的聚氨酯结构可完全实现理论上的加速度自补偿,那么该结构水听器的加速度灵敏度主要来自于整个套筒结构受加速度作用时因长度变化引起的激光器出射激光中心波长的漂移,因此需分析套筒结构对DFB光纤激光水听器加速度灵敏度的影响。

当加速度 $a_0$ 作用在水听器套筒上时,由于该结构水听器的套筒外径略大于两端端盖,实验过程中使用的夹具的固定方式为同时夹持水听器套筒两端的端盖部分,因此水听器在受到加速度载荷作用时,整个套筒部分会产生形变。若水听器的下端固定,

DFB光纤激光水听器受轴向加速度作用的弯曲形变如图2所示,设水听器套筒半径为 $R$ ,高度为 $L$ ,弹性模量为 $E_1$ ,泊松比为 $\nu_1$ ,密度为 $\rho_1$ ,封装的DFB光纤激光器的长度也为 $L$ ,受加速度作用后长度变为 $L_1$ ,套筒受均布载荷 $P$ 作用时的长度变化为 $\Delta S$ 。

由于DFB光纤激光器的质量相对于整个结构的质量太小,可以忽略不计,那么此时相当于一个惯性力 $F$ 作用在水听器套筒上,且其大小可以表示为

$$F = m_1 a_0 = \rho_1 A_1 L a_0, \quad (1)$$

式中, $m_1$ 为水听器套筒的质量, $A_1$ 为套筒的横截空

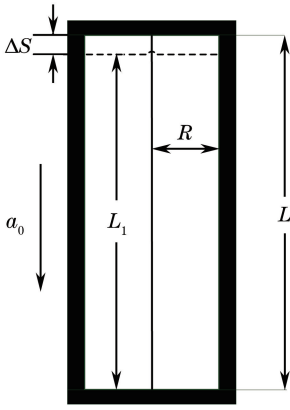


图 2 水听器受加速度作用弯曲形变示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bending deformation of hydrophone under acceleration

心面积。

同时,惯性力  $F$  可等效为均布载荷  $P$  作用在水听器套筒的端面上,受力面积为套筒的横截实心面积  $A$ ,即  $F=PA$ ,那么套筒受均布载荷  $P$  作用时的长度变化  $\Delta S$  为

$$\Delta S = FL/E_1A = PA_1L/E_1A = \rho A_1L^2a_0/E_1A. \quad (2)$$

由于 DFB 光纤激光器通过两端的聚氨酯与套筒固连,那么套筒的长度变化即对应激光器的长度变化,因此激光器受加速度作用产生的轴向应变  $\epsilon_{az}$  为

$$\epsilon_{az} = \Delta S/L = \rho A_1La_0/E_1A. \quad (3)$$

由(3)式可知,激光器的轴向应变随套筒长度的缩短而降低,但其长度的缩短在以 DFB 光纤激光器有源部分长度为下限的同时,需要预留一定的长度,以防止封装过程中聚氨酯粘接在激光器的有源部分而影响其出射激光质量,因而选定套筒的长度为 59 mm。又由于水听器的套筒采用的是殷钢加工而成,故将其尺寸以及材料参数代入(3)式,可得套筒结构为 DFB 光纤激光水听器带来的加速度灵敏度为

$$M_a = 20\lg\left(\frac{\epsilon_{az}}{a_0}\right) = 20\lg\left(\frac{\rho_1A_1L}{E_1A}\right) + G_{\text{int}} + 20\lg d = 1.3 \text{ dB}, \quad (4)$$

式中,  $G_{\text{int}}$  为一个与 DFB 光纤激光器初始出射激光中心波长有关的常量,若波长为 1540 nm,则可计算出  $G_{\text{int}}=133.26 \text{ dB}$ ;  $d$  为解调系统的光程差,取值为  $100 \text{ m}^{[2]}$ 。

然而,水听器在实际封装的过程中,套筒两端聚氨酯施加的高度难以保证完全一致,并且该结构水听器的封装步骤决定了其两端的聚氨酯必须分先后两次进行配制,故两端聚氨酯的材料参数存在细微

的差异,这些差异大大降低了对称化结构设计的加速度自抵消效果,最终使水听器的抗加速度性能达不到预期目标。因此,需进一步分析两端聚氨酯的尺寸、材料参数的差异为 DFB 光纤激光水听器引入的加速度灵敏度。

设圆柱形聚氨酯的弹性模量为  $E$ ,泊松比为  $\nu$ ,高度为  $l$ ,当该结构水听器受到均布载荷  $P$  作用时,DFB 光纤激光器的轴向应变表达式为<sup>[6]</sup>

$$\epsilon_z = \frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \cdot \frac{2Pl}{EL}. \quad (5)$$

当水听器受到加速度  $a_0$  作用时,水听器两端的聚氨酯会产生同向形变,此时水听器受轴向加速度作用的弯曲形变如图 3 所示,设聚氨酯的作用半径为  $R$ ,密度为  $\rho$ ,封装的 DFB 光纤激光器的初始长度为  $L$ ,受加速度作用后长度变为  $L_1$ 。

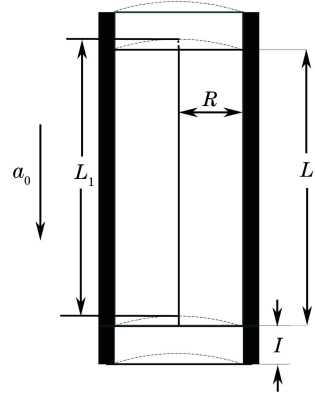


图 3 聚氨酯端面水听器受加速度作用弯曲形变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bending deformation of hydrophone with polyurethane end surface under acceleration

水听器受到的加速度  $a_0$  的作用,在聚氨酯上可等效为均布载荷  $P$  的作用,且其大小可以表示为

$$P = \rho la_0. \quad (6)$$

由加速度  $a_0$  引起的 DFB 光纤激光器的长度变化  $\Delta L$  为水听器两端聚氨酯造成的激光器长度变化之差,则激光器受加速度作用的轴向应变表达式为

$$\epsilon_{az} = \left| \frac{l^2(1-\nu-2\nu^2)}{E(1-\nu)} - \frac{l_2^2(1-\nu_2-2\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_2)} \right| \cdot \frac{2Pa_0}{L}, \quad (7)$$

式中,  $E, \nu, l$  分别为目标端聚氨酯的弹性模量、泊松比以及高度,  $E_2, \nu_2, l_2$  分别为差异端聚氨酯的弹性模量、泊松比以及高度。

由(7)式可得,水听器两端聚氨酯尺寸、材料的参数的差异为 DFB 光纤激光水听器引入的加速度

灵敏度理论计算公式为

$$M_a = 20\lg \left[ \frac{l^2(1-\nu-2\nu^2)}{E(1-\nu)} - \frac{l^2(1-\nu_2-2\nu_2^2)}{E_2(1-\nu_2)} \right] \cdot \frac{2P}{L} + G_{int} + 20\lg d, \quad (8)$$

### 3 仿真分析

由(8)式可知,当不考虑水听器套筒结构的影响时,水听器的加速度灵敏度主要与聚氨酯的弹性模量、泊松比、高度以及水听器两端上述3个参数之间的差异有关,且差异越大,水听器的加速度灵敏度越大。由于本文选取的聚氨酯配制工艺较为成熟,其弹性模量误差可控制在 $1 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 以内,泊松比可控制在0.015以内,而封装过程中聚氨酯的高度误差则可控制在1 mm以内。为了更直观地分析各参数对水听器加速度灵敏度的影响,采用仿真分析的方法,在仿真过程中通过选取聚氨酯材料及尺寸

的最大误差值来分析水听器的加速度灵敏度。

图4为聚氨酯的弹性模量 $E$ 与水听器加速度灵敏度的关系。仿真中参数选取如下:聚氨酯材料的泊松比 $\nu=0.47$ ,高度 $l=8 \text{ mm}$ ;激光器的封装长度 $L=59 \text{ mm}$ 。分析水听器的加速度灵敏度的3个来源,即两端聚氨酯的弹性模量差异、泊松比差异以及高度差异。由图4可知,3个来源引起的水听器的加速度灵敏度与聚氨酯的弹性模量的变化趋势基本相同,并且当聚氨酯的弹性模量小于 $3.5 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,水听器的加速度灵敏度随聚氨酯的弹性模量的增加而急剧降低,而当其大于 $3.5 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,水听器的加速度灵敏度随聚氨酯的弹性模量的增加而缓慢降低,因而聚氨酯的弹性模量的增加有利于水听器的加速度灵敏度的降低,但水听器的声压灵敏度也会随之降低,因此,通过增大聚氨酯的弹性模量来降低水听器加速度灵敏度的同时,还要保证水听器的声压灵敏度维持在较高的水平。

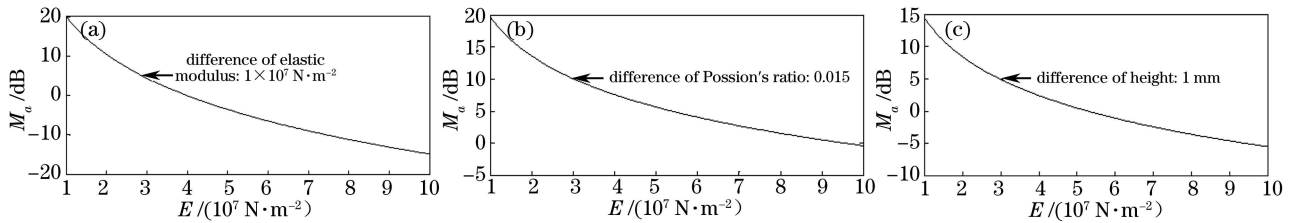


图4 水听器的加速度灵敏度与聚氨酯的弹性模量 $E$ 的关系。(a)弹性模量差异;(b)泊松比差异;(c)高度差异

Fig. 4 Relationship between acceleration sensitivity of hydrophone and elastic modulus  $E$ .

(a) Difference of elastic modulus; (b) difference of Poisson's ratio; (c) difference of height

图5为聚氨酯的泊松比 $\nu$ 与水听器的加速度灵敏度的关系。仿真过程中对应的参数分别为聚氨酯材料的弹性模量 $E=3.5 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ,高度 $l=8 \text{ mm}$ ,激光器的封装长度 $L=59 \text{ mm}$ 。同样对水听器的加速度灵敏度的3个来源分别进行分析。由图5(a)、图5(c)可知,由弹性模量差异以及高低差异引起的水听器的加速度灵敏度与泊松比的关系趋势相同,而由5(b)可知,泊松比差异引起的水听器的加速度灵敏度与泊松比的关系趋势相反。当泊松比

大于0.47时,随着泊松比的增大,由弹性模量差异以及高低差异引起的水听器的加速度灵敏度急剧降低,虽然由泊松比差异引起的加速度灵敏度会增大,但是增大趋势相对较为缓慢,因而综合考虑,水听器的加速度灵敏度随聚氨酯泊松比的增大而降低,但水听器的声压灵敏度也会随之降低。因此,通过增大聚氨酯的泊松比来降低水听器加速度灵敏度的同时,还要保证水听器的声压灵敏度维持在较高的水平。

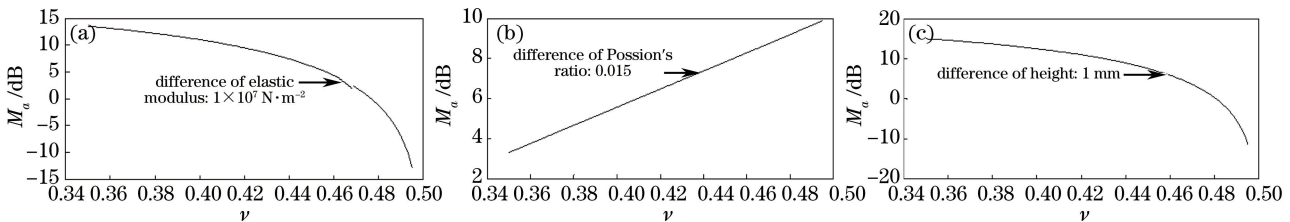


图5 水听器的加速度灵敏度与聚氨酯泊松比 $\nu$ 的关系。(a)弹性模量差异;(b)泊松比差异;(c)高度差异

Fig. 5 Relationship between acceleration sensitivity of hydrophone and the Poisson's ratio  $\nu$ .

(a) Difference of elastic modulus; (b) difference of Poisson's ratio; (c) difference of height

图6为聚氨酯的高度 $l$ 与水听器的加速度灵敏度的关系。在仿真过程中对应的参数分别为聚氨酯材料的弹性模量 $E = 3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比 $\nu = 0.47$ ,激光器的封装长度 $L = 59 \text{ mm}$ 。再对水听器的加速度灵敏度的3个来源分别进行分析。由图6可

知,3种来源引起的水听器的加速度灵敏度都随聚氨酯高度的减小而降低,这与水听器的小型化设计的方向一致,但声压灵敏度会有所降低。因此,对于聚氨酯高度的选择需在水听器的加速度灵敏度与声压灵敏度之间作出权衡。

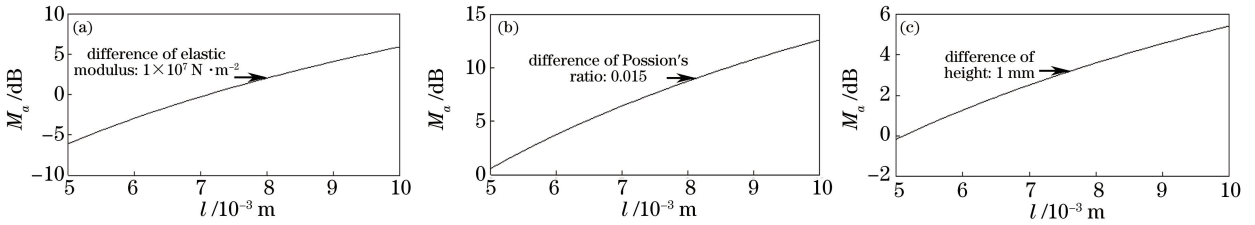


图6 水听器的加速度灵敏度与聚氨酯高度 $l$ 的关系。(a)弹性模量差异;(b)泊松比差异;(c)高度差异

Fig. 6 Relationship between acceleration sensitivity of hydrophone and the height  $l$ .

(a) difference of elastic modulus; (b) difference of Poisson's ratio; (c) difference of height

聚氨酯材料由于在制备过程中泊松比降低,其弹性模量通常会增加,二者对水听器的加速度灵敏度影响相反,这为聚氨酯材料的选择引入了新的限制条件;同时水听器的封装工艺以及工作环境对聚氨酯材料的黏度和耐水性能提出了较高的要求;综合考虑水听器的加速度灵敏度与声压灵敏度的矛盾关系,最终选定聚环氧丙烷二醇(PPG)与甲苯二异氰酸酯(TDI)、3,3'-二氯-4,4'-二氨基二苯甲烷(MOCA)共聚制备的常温固化的高弹性聚氨酯作为水听器的增敏材料,其弹性模量为 $3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比为0.49,高度为8 mm。将上述参数代入(8)式中,可得到聚氨酯结构的DFB光纤激光水听器在 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 加速度激励作用下,由聚氨酯的尺寸、材料参数的差异引入的加速度灵敏度理论计算值:

$$M_a = 20 \lg(5.09 \times 10^{-9}) + 133.26 + 40 = 7.4 \text{ dB}. \quad (9)$$

由(9)式可知,DFB光纤激光水听器聚氨酯的尺寸、材料参数经过优化后,其加速度灵敏度理论值为7.4 dB,由于(9)式是选取聚氨酯的弹性模量、泊松比以及高度的最大差异值同时作用时得到的结果,因此水听器实际的加速度灵敏度应低于7.4 dB,并且在水听器封装过程中,对聚氨酯的材料参数以及高度控制越来越精确,其加速度灵敏度会进一步降低。

## 4 实验分析

基于上述分析结果,加工制作了聚氨酯端面增敏结构的DFB光纤激光水听器原型样品,编号为H821,出射激光中心波长为1546.835 nm。采用比较法对水听器在20~2000 Hz频率范围内的加速度

频响性能进行测试,测试系统如图7所示。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,夹具同时夹持水听器套筒两端的端盖部分,激振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激振台上,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抽运光源以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,再接入计算机,通过解调后得到水听器的相位漂移信息,再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20~2000 Hz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该结构DFB光纤激光水听器在20~2000 Hz频率范围内的加速度灵敏度频响曲线(图8),由实测数据可知,DFB光纤激光水听器在各频点的加速度灵敏度均小于1.2 dB,与套筒结构给水听器带来的加速度灵敏度理论计算值3.8 dB很接近,且低于由聚氨酯的尺寸、材料参数的差异带来的水听器加速度灵敏度理论计算值7.4 dB。这表明建立的加速度灵敏度理论模型能有效降低水听器加速度灵敏度,并可较为准确地预测其抗加速度性能,最大限度地发挥对称化设计的加速度去敏效果,为该结构的DFB光纤激光水听器应用于拖曳线列阵奠定了坚实的基础。

为了进一步验证研制的DFB光纤激光水听器的抗加速度性能,以该结构水听器为阵元构建了32元光纤激光拖曳线列阵,并开展了湖上动态拖曳实验研究,水听器样品和拖曳线列阵的实物图分别

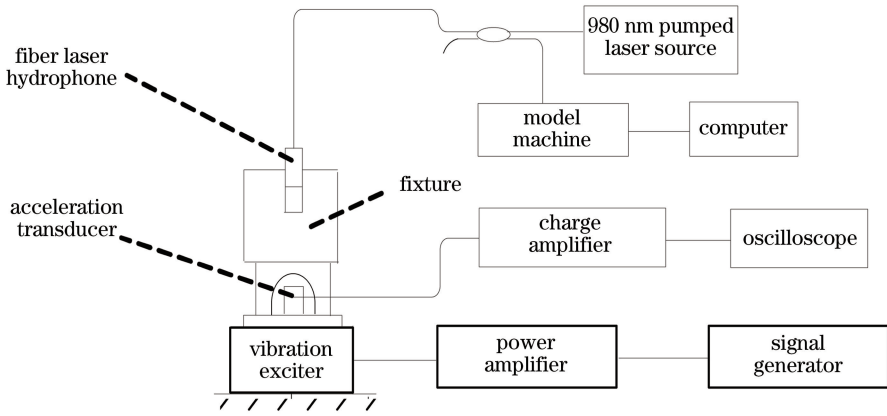


图 7 加速度灵敏度实验测试系统示意图

Fig. 7 Schematic of testing system for acceleration sensitivity

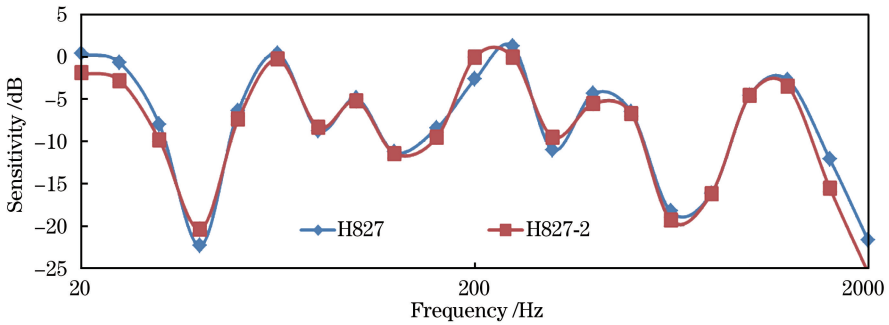


图 8 DFB 光纤激光水听器加速度灵敏度实测频响曲线

Fig. 8 Experimental acceleration sensitivity frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone

如图 9 和图 10 所示。



图 9 DFB 光纤激光水听器原型样品

Fig. 9 Prototype sample of DFB fiber laser hydrophone



图 10 DFB 光纤激光水听器拖曳阵

Fig. 10 DFB fiber laser hydrophone array

DFB 光纤激光水听器拖曳阵的动态拖曳实验系统如图 11 所示。实验母船上的卷扬机通过 Kevlar 绳与工作小船的船艏相连,拖曳母船通过尼龙绳拖动工作小船到达就位点,而两者之间的拖曳阵在此过程中不受力,交通艇发射 600~1000 Hz 的宽带噪声信号,工作小船松开尼龙绳后,卷扬机将工作小船以一定的速度拖回,同时将拖曳阵拉直并以特定速度来回运动,整个拖曳过程除了匀速的稳定段以外,还包括启动和停止两个变速运动的阶段。

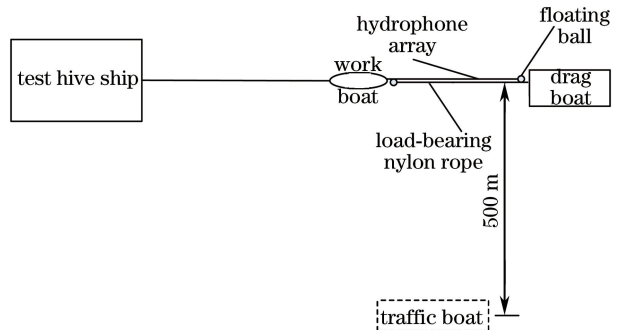


图 11 DFB 光纤激光水听器拖曳阵动态拖曳实验系统

Fig. 11 DFB fiber laser hydrophone towed line array dynamic towed test system

通过分析工作小船上的解调系统存储的这两个阶段阵列接收的目标信号,可验证DFB光纤激光水听器的抗加速度性能。

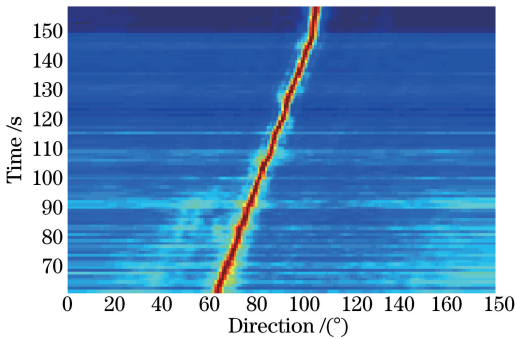


图12 DFB光纤激光水听器拖曳线列阵动态拖曳方位估计  
Fig. 12 DFB fiber laser hydrophone towed line array dynamic towed direction estimation

当卷扬机以6 n mile/h(1 n mile=1.852 km)的速度将工作小船拖回时,DFB光纤激光水听器拖曳阵对目标的波束成形结果如图12所示。由实验结果可知,研制的32元光纤激光水听器拖曳阵在8 n mile/h的动态拖曳状态下,能对目标形成与GPS轨迹记录完全一致的稳定波束指向,并且在动态拖曳过程中的启动和停止阶段,拖曳阵的输出信噪比与中间的匀速稳定段相当,这表明在启动和停止阶段的加速度效应为拖曳阵引入的噪声较小,研制的聚氨酯端面增敏结构的DFB光纤激光水听器的加速度灵敏度较低,具有良好的抗加速度性能,加快了DFB光纤激光水听器拖曳线列阵的工程化发展进度。

## 5 结 论

建立了聚氨酯端面增敏结构的DFB光纤激光水听器的加速度灵敏度理论模型,理论分析了套筒结构与水听器的加速度灵敏度的关系,仿真分析了水听器两端聚氨酯的弹性模量、泊松比以及高度的差异与其加速度灵敏度的关系,实现了对水听器各结构以及材料参数的优化,并制作了水听器原型样品与拖曳线列阵,分别开展了加速度灵敏度测试与湖上动态拖曳实验研究。实验测得,该结构的DFB光纤激光水听器在20~2000 Hz频率范围内的加速度灵敏度在各频点均小于1.2 dB,与理论模型的计算结果较为吻合,在动态拖曳过程中的变速运动阶段也能对目标形成较高信噪比的波束指向。这表明理论模型能有效地预测水听器的抗加速度性能,对于指导研制低加速度灵敏度的DFB光纤激光水听器具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Yun C Q, Luo H, Hu Z L, *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.
- [2] Tang B, Huang J B, Gu H C, *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.
- [3] Tan B, Huang J B. 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] Zhang W T, Li F. Recent progresses in fiber laser hydrophone[J]. *Journal of Integration Technology*, 2015, 4(6): 1-14.  
张文涛, 李芳. 光纤激光水听器研究进展[J]. *集成技术*, 2015, 4(6): 1-14.
- [5] Zhang F, Zhang W, Li F, *et al.* DFB fiber laser hydrophone with band-pass response[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4320-4322.
- [6] Tang B, Huang J B, Gu H C, *et al.* Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0505005.  
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505005.
- [7] Li D M, Chen J, Ge H L, *et al.* Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber grating hydrophone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0305005.  
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): 0305005.
- [8] Wang J J, Jiang D S, Xie G M, *et al.* Research of the planar optical fiber Bragg grating hydrophone probe with acceleration compensation methods[J]. *Acta Acustica*, 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.
- [9] Yin X F. Passive fiber grating hydrophone unit technique based on elastic sheet sensitization package

- structure [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- 殷小峰. 金属弹片增敏封装无源光纤光栅水听器基元技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [10] Chandrika U K, 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.
- [11] Foster S, Tikhomirov A, van Velzen J. Towards a high performance fiber laser hydrophone[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1335-1342.