

DFB 光纤激光器声致弯曲振动研究

谭 波^{1,2}, 黄俊斌¹, 顾宏灿¹, 李日忠¹, 何 琳²

(1. 海军工程大学兵器工程系新概念武器研究室, 武汉 430033; 2. 海军工程大学振动与噪声研究所, 武汉 430033)

摘要: 对利用 DFB(分布反馈式)光纤激光器进行水声探测时的弯曲振动问题进行了分析与实验研究。总结了采用非平衡干涉仪解调系统解调的 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度计算公式;基于梁的弯曲理论,通过数值方法计算了两端固定的 DFB 光纤激光器在 50Hz~2000Hz 频率范围内的声压灵敏度,绘制了该频率范围内的频响曲线;采用振动液柱法对一支 DFB 光纤激光器在该频率范围内进行了实验研究,实验数据具有良好的可重复性,实验结果与理论分析吻合。表明了细长型结构的 DFB 光纤激光器在水声场中很容易由于弯曲振动而引入较大的非声压振动的干扰信号,影响其水声探测性能,有必要在 DFB 光纤激光水听器探头的设计中考虑这一因素。

关键词: DFB(分布反馈式)光纤激光器;非平衡干涉仪;水听器;声压灵敏度;振动液柱法

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-05-0775-04

A study of acoustically induced bending vibration of DFB fiber laser

TAN Bo^{1,2}, HUANG Jun-bin¹, GU Hong-can¹, LI Ri-zhong¹, HE Lin²

(1. *New Weapons Research Office, Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033*; 2. *Research Institute of Vibration & Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

Abstract: Theoretical analysis and experimental study of the bending vibration of DFB (Distributed Feedback) fiber laser in the underwater sound field are carried out. The calculating expression of the acoustic pressure sensitivity of the DFB fiber laser hydrophone, whose signal is demodulated by an unbalanced interferometer system, is concluded. And based on the theory of beam, the sensitivity in the frequency range of 50 to 2000 Hz of the DFB fiber laser, both ends of which are fixed, is calculated out by numerical method. And accordingly, the frequency-response curve is figured out. A DFB fiber laser hydrophone is experimentally studied in the frequency range, the experimental data is repeatable and in good agreement with the theoretical results. It is indicated that the DFB fiber laser is ready to be induced with bending vibration by ambient disturbance in underwater sound field, due to its thin and lengthy configuration. And along with that, vibration noise will be led into the signal output of acoustic pressure, and as a result, the acoustic characteristics of the DFB fiber laser will be influenced, and in the design of DFB fiber laser hydrophone unit, the influence should be taken into account.

Key words: DFB fiber laser; unbalance interferometer; hydrophone; acoustic pressure sensitivity; vibrating column of liquid

1 引 言

DFB 光纤激光水听器技术近年来在水声探测领域得到了迅速发展。在应用上它具有两个重要的优点:一是传感信息直接由波长编码,不会受到总的光

强变化、光纤连接和耦合的损失以及光源功率变化的影响,因而传输信号不易受到干扰;另外由于光纤光栅传感具有波长编码的特性,因此能方便地利用 WDM(波分复用)技术在同一根光纤中串接多个水听器进行分布式测量,从而实现全光纤探测和传输,使得水听器阵列的重量和尺寸大大减少。因此,DFB 光纤激光水听器的出现,为光纤水听器的研究提供了另一个可供选择的方案^[1,2]。

DFB 光纤激光水听器的灵敏度需要达到探测

收稿日期:2008-01-11;修回日期:2008-03-17

作者简介:谭波(1979-),男,湖南双峰人,博士研究生,研究方向为减振降噪、光纤光栅传感。

通讯作者:谭波,E-mail:whbtwjsw@163.com

10^{-4} Pa 量级水声压力的能力, 目前所采用的干涉型解调技术^[1]能够达到这一要求。DFB 光纤激光器与非平衡干涉仪相结合, 使得水听器的灵敏度得到了大大提高。但在大幅提高水听器灵敏度的同时, DFB 光纤激光器对于外界非声压振动信号的干扰也变得更加敏感, 由于现有的 DFB 光纤激光器长度通常为 50mm, 而直径通常只有 $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$, 这样一种细长型结构具有较高的轴向刚度, 而抗弯曲能力非常差, 极小的横向作用力就可能引起激光器较大的弯曲^[3]。

1998 年 S. W. Lovseth 等人指出, 利用 DFB 光纤激光器作为空气中的声传感器时, 声波中的压力梯度将引起对光纤的横向力, 而使光纤产生了轴向的应变^[4]; 1999 年 D.J.Hill 等人发现将 DFB 光纤激光器作为水声传感器时, 其频率响应曲线在测量频带内的变化幅度超过 $\pm 10\text{dB}$ ^[2], 而有关的原因尚有待于进一步的研究; 2003 年 A.Tikhomirov 等人第一次提出由于入射声波引起的光纤弯曲是 DFB 光纤激光器引入干扰的主要的响应机制, 并利用空气中的实验对其理论进行了验证^[5]。可见光纤的弯曲振动将引起水听器对于非声压振动的高灵敏度, 在声纳应用中是不希望出现这种现象的。

作为 DFB 光纤激光水听器的敏感元件, DFB 光纤激光器对其传感特性具有极其重要的影响, 因此对激光器在弯曲条件下的动态特性进行研究很有必要, 对于 DFB 光纤激光水听器的实用化研究, 解决其抗干扰问题, 以及指导 DFB 光纤激光水听器探头的设计都具有非常重要的意义。

考虑到光纤通常由熔融石英拉制而成, 材料坚硬, 其弹性恢复力主要由本身的劲度提供, 弯曲时具有梁的特性; 而且激光器在应用中通常需要对其两端进行固定。因此本文基于梁的理论对两端固定的 DFB 光纤激光器的动态特性进行了分析。

2 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度

DFB 光纤激光水听器利用 DFB 光纤激光器作为敏感元件。将 DFB 光纤激光水听器放置在声场中时, 声压将引起激光腔的应变, 从而使激光器输出波长 λ_{FL} 发生变化。将这个变化检测出来, 就可以测定激光腔的受激励程度, 从而解调出声压信号。该输出波长是由谐振腔内相移光栅的布喇格波长决定的, 即 $\lambda_{FL}=\lambda_B$ ^[6]。布喇格反射波长满足如下光学方程^[7]:

$$\lambda_B=2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中, λ_B 为布喇格波长, Λ 是光栅周期, n_{eff} 是纤芯的有效折射率, 一般取值 1.456。

在激光器均匀拉伸的情况下, 波长输出与其轴向应变之间的关系满足^[8]:

$$\frac{\Delta\lambda_{FL}}{\lambda_{FL}}=k|\varepsilon_z| \quad (2)$$

其中, $\Delta\lambda_{FL}$ 为 DFB 光纤激光器出射波长的漂移量, k 为相对波长漂移应变灵敏度系数 (在受均匀轴向应力作用时其大小为 0.784), ε_z 为光纤受均匀拉伸时的轴向应变。

采用非平衡干涉仪系统对 DFB 光纤激光水听器解调时, 波长漂移信息进入非平衡干涉仪后被转换为相位漂移信息, 其关系满足^[2]:

$$\Delta\phi=\frac{2\pi n_{\text{eff}}d}{\lambda_{FL}^2}\Delta\lambda_{FL} \quad (3)$$

其中 $\Delta\phi$ 为波长漂移引起的相位漂移量, d 为非平衡路径长度。

结合以上公式可得:

$$\Delta\phi=\frac{2\pi nd}{\lambda_{FL}}\cdot k|\varepsilon_z|=|\varepsilon_z|\cdot\frac{2\pi nk}{\lambda_{FL}}\cdot d \quad (4)$$

因此, DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度可分为 3 个部分表示, 即:

$$M_{\text{DFB}}=20\lg\Delta\phi=20\lg E_z+G_{\text{int}}+20\lg d \quad (5)$$

其中 M_{DFB} 表示 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度, 单位为 $\text{dB}(\text{re } 1\text{rad}/\mu\text{Pa})$; E_z 表示每 μPa 声压下引起的光纤的轴向应变, 单位为 $1/\mu\text{Pa}$; G_{int} 是一个常数, 表示单位长度非平衡干涉仪对激光器单位应变的相位增益, 该常数与激光器初始波长有关, 若波长为 1550nm, 代入式(4)和(5)则可计算出 $G_{\text{int}}=133.26\text{dB}(\text{re } 1\text{rad})$; d 为非平衡干涉的长度, 单位为 m。

可见对 DFB 光纤激光水听器灵敏度进行分析时, 只需计算出单位声压下所引起的 DFB 光纤激光器的轴向应变, 结合非平衡路径长度所产生的增益, 即可计算出声压灵敏度。

3 DFB 光纤激光器水下弯曲振动分析

根据声学理论可知, 当光纤置于水下声场中时, 光纤的存在将改变原有声场的分布, 引起声波的散射。由于光纤所产生的散射波具有方向性, 因此未受干扰的平面波与散射波叠加后的声场将在光纤上产生与声波传播方向相同的净力^[9]; 在此净力作用下, 光纤将沿声波传播方向产生横向振动, 造成光纤轴向上的拉伸, 此

时 DFB 光纤激光器内部除均匀受压而产生受声信号调制的应变外,还将产生由于弯曲而引起的应变,导致 DFB 光纤激光器出射激光波长的变化。

3.1 由于声散射作用在光纤上的净力

根据声的散射理论,当一个圆柱体置于平面波声场中时,由于声散射影响而作用在每单位长度圆柱上的净力为^[9]:

$$F=a \int_0^{2\pi} p \cos \phi d\phi \omega \frac{4\pi^2 a^2}{c} P_0 e^{-i\omega t} \quad (6)$$

由式(6)可知,平面波每单位声压作用在每单位长度圆柱上的净力 $|F/P_0|$ 与频率 f 成正比关系:

$$|F/P_0|=\frac{8\pi^3 a^2}{c} \cdot f=A_0 \cdot f \quad (7)$$

其中 A_0 为常数, f 为声波频率,单位为 Hz。将光纤半径 $a=62.5\mu\text{m}$,以及声速 $c=1500\text{m/s}$ 代入式(7)可得 $A_0=6.45 \times 10^{-10}\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

3.2 弯曲引起的光纤拉伸

光纤在此净力作用下,将产生横向振动,从而引起光纤的拉伸,并在光纤内部产生应变。设沿光纤轴向上各点的横向位移为 $\eta(x)$,则由结构横向位移与纵向伸长之间的关系,可知长度为 L 的光纤总伸长量为:

$$\Delta L=\int_0^L \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \eta(x)}{\partial x} \right)^2 dx \quad (8)$$

故应变为:

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta L}{L}=\frac{1}{L} \int_0^L \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \eta(x)}{\partial x} \right)^2 dx \quad (9)$$

3.3 DFB 光纤激光器声压灵敏度数值仿真

取裸纤直径 $D=125 \times 10^{-6}\text{m}$,密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$,光纤弹性模量 $E=7.5 \times 10^{10}\text{Pa}$,泊松比 $\nu=0.17$,长度 $L=50 \times 10^{-3}\text{m}$,在有限元软件 ANSYS 中建立 DFB 光纤光栅激光器两端固定的梁模型;施加载荷为平面波单位声压作用在单位长度光纤上的净力,根据公式(7)可知其幅度为 $F_0=6.45 \times 10^{-10} \cdot f$;以每 40Hz 为一个间隔点,对 20Hz~2000Hz 频率范围内 50 个频点的光纤的弯曲振动进行了谐响应分析,得到光纤模型各节点在声波净力作用方向上的位移幅值;根据公式(9),由各横向位移值计算出 DFB 光纤激光器在各个频点内部产生的轴向应变;将应变值以及非平衡干涉仪路径长度 $d=60\text{m}$ 代入公式(5),计算出采取 60m 非平衡路径长干涉仪解调所得的各个频点 DFB 光纤激光器的声压灵敏度,并绘制了频响曲线。

由分析可以看出,根据弯曲引起光纤轴向应变计算所得的 DFB 光纤激光水听器声压灵敏度在计算频率范围内整体达到了高于-140dB (re 1rad/ μPa)的

水平,在约 350Hz 和 1900Hz 附近出现谐振,峰值灵敏度达到约-100dB。而根据文献[2],在静水压力作用下采用 200m 非平衡路径长度干涉仪解调的 DFB 光纤激光器灵敏度仅为-171dB(re 1rad/ μPa),若同样采用 60m 非平衡路径长度的干涉仪解调,则根据公式(5)改变 d 值计算可知灵敏度约为-175.4dB,可见由于弯曲引起的应变已远远高于均匀受压时引起的应变,而且灵敏度起伏非常大。

4 DFB 光纤激光器振动液柱法实验

为了验证理论分析的正确性,准确测量 DFB 光纤激光水听器在平面波声压作用下的声压灵敏度,搭建了如图 1 所示的 DFB 光纤激光水听器振动液柱法实验系统。

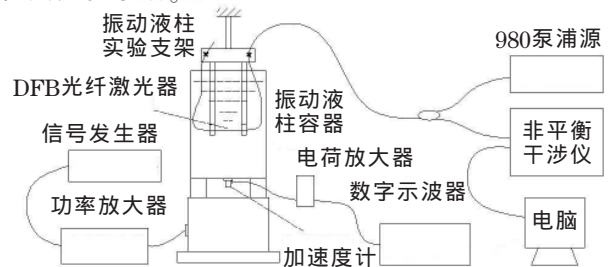


图 1 振动液柱法实验系统示意图

Fig.1 Sketch of the experimental system of vibration column

系统中铝合金振动液柱容器直径为 140mm,厚度为 8mm,高度为 200mm,容器内水深 180mm;加工了如图 2 所示的夹具将 DFB 光纤激光器水平夹持,两端固定点间距为 50mm;激光器伸入液柱容器中,入水深度 90mm,激光器轴线与水平面平行;将 DFB 激光器在夹具上固定前,首先将 DFB 激光器拉伸一定长度,使其保持一定的预应力,夹持激光器的夹具固定于与振动系统隔开的连杆上;DFB 激光器引出端与光源及非平衡干涉仪解调系统相连,非平衡路径长度为 60m;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,联入电脑,通过解调后得到 DFB 光纤激光水听器的相位漂移信息。

搭建实验系统后,开启功放,通过信号发生器改变加速度激励的频率及幅值,为振动台输入信号,频率选择为 50Hz~2000Hz 频率范围内的三分之一倍频程中心频率。

根据振动液柱法声压计算公式,通过读取加速度大小,即可计算出 DFB 光纤激光器所处深度的声压大小,再根据该声压作用下所测得的相位漂移大小,可得到 DFB 光纤激光器在各个频点的声压灵敏度。

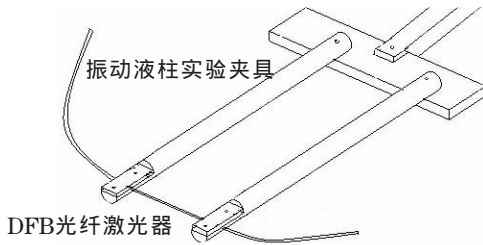


图2 DFB光纤激光器夹具

Fig.2 The clamp of the DFB fiber laser

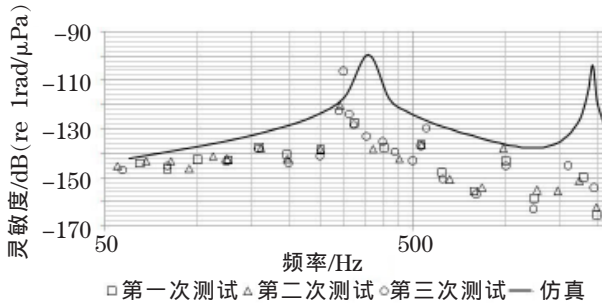


图3 频响曲线的比较

Fig.3 Comparison of the frequency response curves

实验记录了3组数据，根据数据计算所得的DFB光纤激光水听器声压灵敏度数据点如图3所示。由图3数据可看出，3次实验测得的数据具有良好的可重复性；根据实验结果计算所得的DFB光纤激光水听器的声压灵敏度趋势与仿真所得的频响曲线比较吻合，在低频段声压灵敏度略低于-140dB，与仿真计算所得灵敏度非常接近，在约300Hz附近灵敏度急剧增加；300Hz以后灵敏度开始下降，比仿真计算所得灵敏度整体要低约20dB，在500Hz、1000Hz、2000Hz附近实测数据出现较大起伏，与仿真结果曲线有较大区别。

将实验结果与仿真分析比较可以看出，实验数据在多个频点呈现峰值，这与两端固定梁的结构特点相吻合，但仿真结果曲线仅出现两个谐振峰，而且在300Hz以后实测灵敏度远低于理论灵敏度。分析原因可能是因为仿真分析中没有考虑水介质对DFB光纤激光器振动的影响。而实际上受水介质的影响，激光器振动时受到的阻力也要增大，因此激光器的振动幅度可能会降低，而且随频率的上升这种影响越明显，从而导致了300Hz以后实测灵敏度远低于理论灵敏度；但300Hz~2000Hz之间所出现的灵敏度剧增的原因还有待于进一步的研究。

5 结论

基于梁的理论，研究了两端固定的DFB光纤激光水听器在横向平面波作用下的弯曲振动及其轴向

拉伸特性；总结了其采用非平衡干涉仪解调系统解调后的声压灵敏度计算公式；通过数值计算得到了两端固定的DFB光纤激光器在50Hz~2000Hz频率范围内的声压灵敏度，绘制了该频率范围内的频响曲线；采用振动液柱法对一支DFB光纤激光器在该频率范围内1/3倍频程的频点上进行了实验研究，实验数据具有良好的可重复性，实验结果与理论分析吻合。

实验结果表明，受平面波净力的影响，DFB光纤激光器产生了弯曲振动，声压灵敏度到达了-140dB以上，远远高于激光器均匀受压时的水平，而且水听器频响曲线出现了很大的起伏；可见极其微弱的弯曲就可能使细长型结构的DFB光纤激光器产生较大的信号输出，使其声压灵敏度要远高于径向均匀受压时的灵敏度，在实际应用中很容易引入较大的非声压振动的干扰信号，影响DFB光纤激光器在水听器领域的应用是非常不利的，因此在DFB光纤激光水听器探头设计过程中有必要充分考虑这种影响。但是在研究中出现的一些现象还有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Hill D J, Nash P J. Progress toward an ultra thin optical hydrophone array[A]. Proceedings of SPIE[C]. 1998, 3473: 301-304.
- [2] Hill D J, Nash P J. A fiber laser hydrophone array[A]. Proceedings of SPIE[C]. 1999, 3860: 55-66.
- [3] Scott Foster, Alexei Tikhomirov, Mark Milnes, et al. A fibre laser hydrophone[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2005, 5855:627-630.
- [4] Løvseth S W, Bløtekjær K, Kringelbotn J T. Contributions to wavelength shifts of DFB fiber lasers used as acoustic sensors in air[A]. Proceedings of SPIE[C]. 1998, 3483: 69-73.
- [5] Tikhomirov A, Foster S, Milnes M, et al. Acoustic and vibrational response of a DFB fibre laser sensor[A]. COIN/ACOFT 2003 Conference Proceedings[C]. 2003: 440-443.
- [6] Ian Leung, Zourab Brodzeli, Trevor Whitbread, et al. A distributed-feedback fibre laser based optical fibre hydrophone system with very high-sensitivity[C]. Proceedings of SPIE, 2005, 5634: 434-443.
- [7] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 72.
WANG Huiwen. The technology and application of fiber sensing[M]. Beijing: Press of national defence industry, 2001: 72.
- [8] 廖延彪, 编. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 第1版, 2000: 197-202.
LIAO Yanbiao, Compile. Optics of fiber[M]. Beijing: Press of Tsinghua. 2000: 197-202.
- [9] (美)P.M.莫尔斯, K.U.英格特, 著. 杨训仁, 吕如榆, 戴根华, 译. 理论声学[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 476-478.
Morse P M, Ingard K U, Compile. YANG Xunren, LÜ Ruyu, DAI Genhua. Translate. Theoretical acoustic[M]. Beijing: Press of Science, 1986: 476-478.