

光纤光栅水听器技术实验研究*

刘波^{1,2} 曹晔² 罗建花² 牛文成¹ 开桂云² 张伟刚² 董孝义²

(1 南开大学信息技术科学学院, 天津 300071)

(2 南开大学现代光学所, 天津 300071)

摘要 采用光纤布喇格光栅作为基本传感器件, 设计制作了光纤光栅水听器. 利用匹配光纤光栅解调技术, 实现了高灵敏度、高速度的动态信号测量, 并进行了相关的水下声音测量实验. 实验系统可测量水声信号频率范围为 10 Hz ~ 3 kHz, 测量动态范围为 60 dB, 其结果具有很高的线性度.

关键词 光传感; 光纤光栅; 水听器; 传感; 匹配滤波

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

光纤水听技术是近几年来倍受瞩目的现代高科技水下探测技术, 它具有探测灵敏度高、抗干扰能力强、全天候实时探测的能力^[1]. 因此, 自 90 年代以来, 世界几个军事大国都先后竞相研究. 上世纪 70 年代中期, 美国的 J. A. Bucaro 首先提出在反潜战中利用光纤作为换能器, 研制光纤水听器, 替代已服役的系统. 而自从光纤光栅问世以来, 由于其优良的选频特性及声敏特性等以及可方便地将通信中的波分复用 (WDM)、时分复用 (TDM) 及空分复用 (SDM) 等技术运用于信号处理之中, 故采用光纤光栅所建立起的水听探测系统不但具有宽带宽、高灵敏度的优点, 而且结构灵巧紧凑、易于建立阵列型多维探测系统, 非常适合对水下目标的探测研究. 近年来, 美国、日本等军事大国均在光纤光栅水听器技术中投入了大量的人力财力从事研究, 取得了较好的效果^[2].

近期, 我们课题组也开展了以光纤光栅为传感基元的水听技术的实验研究. 实现原理是由于外界声压的作用, 将引起光纤光栅的反射谱或透射谱曲线的漂移. 在大多数 FBG 传感应用中, 使用反射波长漂移来进行测量. 而在用作水听器测量时, 由于声压引起的反射波长漂移太小, 而给直接探测带来了很大的难度. 因而, 我们采用了双光栅匹配解调技术, 检测光纤光栅透射谱与反射谱的卷积因压力而产生的光强度的变化, 这比波长检测或者相位检测更为简便. 因此, 这种光纤光栅水听器的结构可以做得比传统光纤水听器更为紧凑小巧.

1 基本原理

光纤光栅的布喇格中心波长是由纤芯折射率和栅格周期所决定的. 当外界声压作用于光纤光栅时, 会使光纤光栅发生微小的形变. 这种形变, 会引起光纤光栅的栅格周期或折射率分布发生变化, 从而使其反射谱或透射谱的中心波长发生移动. 因而经过光纤光栅透射或发射的光就携带了外界压力的变化信息, 也就是被外界压力所调制. 基本原理示意图如图 1.

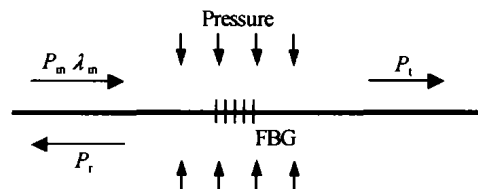


图 1 光纤光栅水听器传感原理
Fig. 1 Scheme of FBG hydrophone

当光纤光栅用作水听器传感时, 设光纤光栅的反射函数为 $R(\lambda)$, 则光通过光纤光栅反射后的光强为 $P_r = P_{in}R(\lambda)$. P_{in} 是入射进传感光纤光栅的光强. 如果声压作用在光纤光栅上, 光纤会因为本身的弹性而产生物理性的伸长或压缩, 从而反射率也由于光纤弹光效应而产生变化. 这两个物理效应使得光纤光栅反射布喇格波长移动. 由于声压作用造成的布喇格反射波长移动通常很小, 因此, 可认为其与施加的声压成比例. 设声压的表达式为

$$p = p_A \sin \omega_A t \quad (1)$$

式中 p_A 和 ω_A 分别是声压的幅度和角频率. 此声压作用于光纤光栅上, 将影响光纤光栅的反射光中心波长产生相应的变化, 如下式

$$R(\lambda) = R(\lambda)|_{p=0} + \frac{\partial R}{\partial p} p_A \sin \omega_A t \quad (2)$$

对于波长解调系统来说, 其输出光强应当是光纤光栅反射光中心波长的函数. 即当光纤光栅反射中心波长发生移动时, 其输出光强也应发生相应的

*国家 863 计划(2002A313110)、天津市科技重大攻关项目、南开大学创新科技基金资助
Tel: 022-23509849 Email: liubo@mail.nankai.edu.cn
收稿日期: 2004-04-05

变化. 由于水听器传感光纤光栅反射中心波长移动很小, 因此, 我们认为波长解调系统的输出光强的变化与光纤光栅反射中心波长的移动是呈线性关系的. 则有

$$P_r = P_{in} R(\lambda) \quad (3)$$

式中, P_{in} 是入射进传感光纤光栅的光强值, 为常数. 将式(2)代入式(3)可得

$$P_r = P_{in} R(\lambda) |_{p=0} + P_{in} \frac{\partial R}{\partial p} p_A \sin \omega_A t \quad (4)$$

从式(4)最终可知, 波长解调系统的输出光强的交流部分和作用在传感光纤光栅上的声压成比例.

2 光纤光栅水听器波长解调系统原理

由于在用作水听器测量时, 由声压引起的反射波长移动很小, 所以必须采用灵敏度很高的解调方法. 我们设计的基于 FBG 传感元件的光纤光栅水听器的系统原理如图 2. 图中 FBG2 为水听信号传感光纤光栅. 宽带光源发出的光经光纤光栅 FBG1 透射后, 再经 FBG2 反射, 进入光电接收管进行光功率检测. 其中 FBG1 和 FBG2 为匹配光纤光栅对. 在外界声压作用下, FBG2 的反射谱曲线会发生移动. IMG 为折射率匹配液, 是为了防止光纤端面引起的反射光对后续光路的影响.

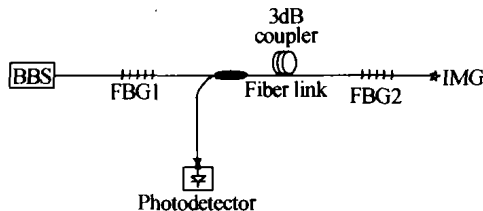


图 2 水听器实验系统原理图
Fig. 2 Diagram of FBG hydrophone experiment system

该水听器实验系统中, 光电接收管所接收的光功率, 实际上是 FBG2 的反射谱与 FBG1 的透射谱在频域上的卷积^[3,4], 当将光纤光栅的反射谱近似为高斯分布时, 光电接收管所接收的光功率可以表示为

$$P_D = \alpha I_0 R_{B1} R_{B2} \frac{\sqrt{\pi}}{2 \sqrt{\ln 2}} \Delta \lambda_{B2} \left\{ 1 - \frac{\Delta \lambda_{B1}}{\sqrt{\Delta \lambda_{B1}^2 + \Delta \lambda_{B2}^2}} \cdot \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{B1} + \lambda_{B2})^2}{\Delta \lambda_{B1}^2 + \Delta \lambda_{B2}^2} \right] \right\} \quad (5)$$

式中, R_{B1} 、 R_{B2} 分别为 FBG1 和 FBG2 的峰值反射率, λ_{B1} 、 λ_{B2} 分别为 FBG1 和 FBG2 的中心波长, $\Delta \lambda_{B1}$ 、 $\Delta \lambda_{B2}$ 分别为 FBG1 和 FBG2 的 3 dB 带宽. α 为经过耦合器的光能利用率. 由文献[3]的分析可知, 系统的波长检测分辨率主要取决于输出光功率谱曲线的波长测量灵敏度 $\frac{\delta P_D}{d\lambda}$ 和测量系统的最小可探测功率 δP_D , 用公式可以表示为

$$\delta \lambda = \frac{\delta P_D}{dP_D/d\lambda} \quad (6)$$

式中, 最小可探测功率 δP_D 的定义为信噪比为 1 时, 系统可接收的功率, 主要由光电探测器的响应度、暗电流及接收电路的特性决定.

在本系统中, 对光功率的测量反映为电压的变化. 因此, 可以将上式改为

$$\delta \lambda = \delta V \frac{d\lambda}{dV} \quad (7)$$

因此, 波长分辨率由测量所得波形两侧线性区域拟合直线斜率的平均值 $dV/d\lambda$ 、系统可分辨的最小稳定电压值 δV 两方面因素共同决定. 其中 $dV/d\lambda$ 可由输出光功率谱曲线经实验测得, 其大小主要是由最佳波长测量灵敏度、光源功率、光纤光栅反射率、放大电路的放大倍数和光电探测器的量子效率等因素决定. 经实验测得, $dV/d\lambda$ 的平均值约为 3000 mV/nm. 在采用了各种滤波方法之后, 系统可分辨的最小稳定电压 δV 为 500 μ V. 因此, 系统的可分辨的最小波长 $\delta \lambda$ 约为 0.2 pm.

由图 2 的系统原理可以看出, 该解调系统无需任何机械调谐的部件. 整个系统的检测速度仅取决于光电检测器以及后续放大电路的特性. 现有 PIN 光电检测器件的响应频率可达 1GHz, 而相关检测电路的响应频率也可达数百 kHz. 因此, 系统可以达到很高的解调速度.

3 实验结果与讨论

根据图 2 所示的系统原理, 我们在实验时, 采用了如图 3 所示的实验结构.

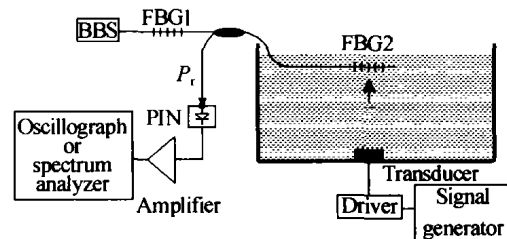


图 3 实验装置结构图
Fig. 3 Structure of hydrophone experiment

水听器实验是在一个充满水的水箱中进行的. 利用换能装置模拟水声信号. 该装置放置于水箱底部. 由信号发生器发生单频正弦信号, 经功率放大器后驱动换能器发生固定频率的水声信号. 通过调整信号发生器的输出信号幅度, 可以产生不同的声压. 由于容器体积有限, 因此, 水箱四壁对水箱内声场的分布是有影响的. 因此, 将换能器放置于水箱底部, 使水声信号向上传播. 由于声波为纵波, 因此, 水箱四壁的反射可以大大减弱. 另外, 我们还在水箱四壁上贴附了吸音材料, 最大程度地减小了水

箱四壁对声场的影响。

实验时,将 FBG2 经封装后,悬浮固定于水面下约 20 cm 处。同时,在同一位置也安装了传统的声纳传感探头以进行对比。光源采用宽带光源(BBS),其带宽范围为 50 nm,输出光功率为 8 mW。实验中所选用的光纤光栅 FBG1 的透射谱如图 4 中曲线 a 所示,其中心波长为 1547.700 nm,3 dB 带宽约为 0.24 nm,反射率为 90%。传感光纤光栅 FBG2 的反射谱如图 4 中曲线 b 所示,其中心波长为 1547.600 nm,3 dB 带宽约为 0.26 nm,反射率为 90%。FBG 水听器的反射光用光电二极管(PIN)检测,经低噪声、高增益放大电路以及滤波电路^[5]后,送入计算机进行分析。

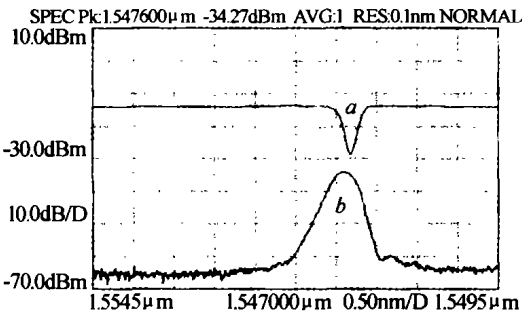


图 4 实验用 FBG1 与 FBG2 的透射谱/反射谱
Fig. 4 Transmission spectrum FBG1 and reflection spectrum FBG2 of FBG in experiment

由于光纤光栅传感器存在温度/应变交叉敏感的问题,在实验时,我们将 FBG1 固定在经过封装的 FBG2 水听器的侧面,并使其处于自由状态。这种结构,使得水温变化时,FBG1 与 FBG2 的中心波长同时向相同的方向漂移,使水听器解调系统的测量结果受温度的影响减小到最小。

首先,我们将水声信号频率设定为 200 Hz。通过调整信号发生器输出信号的幅度,使光纤光栅水听传感探头处感测的声压从 100 ~ 160 dB μ Pa 变化。图 5 为该频率下,不同声压下光电探测器输出电压的峰峰值。图中,圆点为实验结果,直线是用曲线拟合理论得到的结果,其拟合度为 0.99。由图可知,输出信号和作用在 FBG 水听器上的声压成正比。

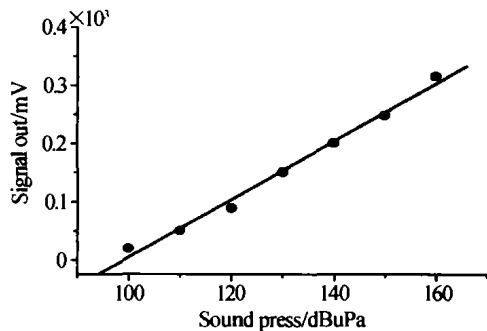


图 5 200 Hz 时,FBG 水听器输出信号与声压关系
Fig. 5 Relationship of sound press and hydrophone output signal at 200 Hz

其次,我们保持传感探头处的声压为 10 dB μ Pa,

而只改变水声信号的频率,频率调节范围为 10 Hz 到 3 kHz。图 6 给出了同一声压不同声频下,光电探测器输出电压的峰-峰值。

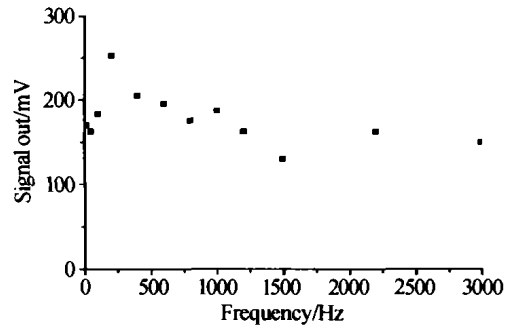


图 6 同一声压下,输出信号与声频关系曲线
Fig. 6 Frequency response of FBG hydrophone

由实验结果可以知道,这种光纤光栅水听器可在较大的探测范围(100 ~ 160 dB μ Pa)内具有很高的检测灵敏度(0 ~ 4000 mV)。本实验系统所检测最大水声频率为 3 kHz,这是由于我们采用的光纤光栅水听器传感探头的谐振频率较低造成的,通过改变传感探头的封装方式,可以进一步提高其谐振频率以增大最大检测频率。

另外,由图 2 所示的水听器波长解调系统原理可知。接成透射方式的光纤光栅 FBG1 与接成反射方式的光纤光栅 FBG2 均可用于水声信号的测量。我们在实验中使 FBG1 保持固定,而仅将 FBG2 用于水声信号的传感。当需要进一步提高检测灵敏度时,可以将 FBG1 与 FBG2 同时封装到水听器的传感探头内。封装结构的设计,应使有水压作用于传感探头时,FBG1 与 FBG2 的波长漂移方向相反。由此,可进一步提高水听器的检测灵敏度。

4 结论

利用光纤光栅(FBG)作基本传感元件,设计制作了 FBG 水听器,并进行了实验研究。利用匹配光纤光栅解调技术,实现了高灵敏度动态信号的测量。实验测得的 FBG 水听器频率测量范围为 10 Hz ~ 3 kHz,动态范围为 60 dB。基于 FBG 本身的特点,我们可以采用波分复用(WDM)、时分复用(TDM)的方法,实现多点网络化水声信号的测量。

参考文献

- 1 郑黎,洪新华,何俊华,等.采用密集波分复用技术的光纤水听器阵列研究.光子学报,2003,32(2):137~139
Zheng L, Hong X H, He J H, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(2):137~139
- 2 Takahashi N, Yoshimura K, Takahashi S, et al. Characteristics of fiber Bragg grating hydrophone. IEICE Trans, Electron, 2000, E83-C(3):275
- 3 刘云启,刘志国,郭转运,等.光纤光栅传感器的调谐滤波

- 检测技术. 光学学报, 2001, **21**(1): 88 ~ 92
- Liu Y Q, Liu Z G, Guo Z Y, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 88 ~ 92
- 4 詹亚歌, 陆青, 向世清, 等. 优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究. 光子学报, 2004, **33**(6): 711 ~ 715
- Zhan Y G, Lu Q, Xiang S Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **33**(6): 711 ~ 715
- 5 刘波, 孙桂玲, 童峥嵘, 等. 光纤光栅传感网络中微弱光信号的检测. 南开大学学报, 2003, **36**(2): 55 ~ 57
- Liu B, Sun G L, Tong Z R, *et al.* *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2003, **36**(2): 55 ~ 57

Researching on the Experiment of Fiber Bragg Grating Hydrophone

Liu Bo^{1,2}, Cao Ye², Luo Jianhua², Niu Wencheng¹, Kai Guiyun², Zhang Weigang², Dong Xiaoyi²

¹ College of Information Technology and Science, Nankai University, Tianjin 300071

² Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

Received date: 2004-04-05

Abstract The FBG being used as the basic sensor unit, a hydrophone sensor has been designed and manufactured. Its principle and relevant experimental result are introduced. By using the matched fiber grating demodulation technique, dynamic signal measurement with high sensitivity is realized. The frequency range of the FBG-based hydrophone is 10 ~ 3 kHz with a dynamic range of 60 dB. Due to the characters of FBG itself, the measure of multiple-points underwater signal can be realized conveniently by using WDM and TDM techniques.

Keywords Fiber sensor; FBG, Hydrophone; Sensor; Mach filter

Liu Bo was born in 1975 in Shandong Province. He received Ph. D. degree from Nankai University in 2004. Now he is a post doctor of the College of Information Technology and Science, Nankai University. His research interests are fiber sensors, fiber Bragg grating sensors and sensing system.

