

# 基于密集波分复用技术的 Bragg 光栅水听器\*

郑黎<sup>1,2</sup> 郑成栋<sup>1</sup> 何俊华<sup>1</sup> 陈良益<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所水下光电室, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 论述了用 Bragg 光栅制作水听器的原理和意义, 利用光纤通信的密集波分技术, 实现声压信号动态解调. 采用压力增敏材料对 Bragg 光栅封装来增加其响应灵敏度, 为避免温度变化引起光栅交叉敏感, 在室温  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  条件下进行试验, 给出实验结果. 实验表明: 基元水听器的频率响应平坦度好, 信号输出稳定. 同时采用密集波分技术动态解调声信号方案是可行的.

**关键词** Bragg 光栅水听器; 波长偏移; 密集波分复用

**中图分类号** TB565+.1 **文献标识码** A

## 0 引言

潜艇“静音”技术的发展, 使传统的压电式水听器无法探测水下声场信息. 而光纤光栅水听器是利用光栅基于外界应力和温度对光纤光栅 Bragg 反射谱或透射谱的敏感性, 光纤光栅可以用来实现多种物理量的传感和探测水下声波的器件, 它与传统的压电水听器相比, 具有极高的灵敏度、足够大的动态范围、本质的抗电磁干扰能力、无阻抗匹配要求、质量轻和结构的任意性等优势, 成为各发达国家反潜战略的急需, 用以对付来自潜艇静噪技术不断提高的挑战. 本文采用具有窄反射带宽, 高反射率的 Bragg 光栅, 通过采用压力增敏材料对光栅进行封装, 以构成小量程高分辨率的光纤光栅水听器, 使用 DWDM (Dense Wave Division Multiplexing) 技术和设备组建了传感网络和解调信号. 在室温  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  条件下开展实验工作, 可以避免温度<sup>[1]</sup>引起 Bragg 光栅波长的偏移.

## 1 光纤光栅水听器原理

如图 1 根据 Bragg 光栅方程  $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  和光纤材料的光敏性和热光效应, 当 Bragg 光栅在外界应力和温度的作用下, 反射光谱的中心波长将发生变化, 其波长偏移量可表示为

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Lambda = [(1 - P_i)\varepsilon_z + (\alpha + \xi)\Delta T]\lambda_B \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\Delta\lambda_B$  为波长变化量,  $\varepsilon_z$  为轴向应变变量,  $\Delta T$  为温度变化量,  $P_i$  为弹光系数,  $\xi$  热光系数,  $\alpha$  热膨胀系数.

由式(1)中看出, 如外界声波对 FBG 产生一个

微压力, 相应它就会产生周期性的应变, 于是中心波长将产生周期性偏移. 检测出这个周期偏移的信号就获得了声波频谱信息. 当温度和应变同时发生变化时, FBG 本身无法分辨出两者分别引起的波长偏移. 即光纤光栅的交叉传感<sup>[2]</sup>. 因此, 测量一个量时会受到另一个变化量的影响. 如果当轴向应变和温度变化均为零时, 波长偏移量也就不发生变化, 即从光栅输出光的中心波长将不发生位移; 当温度变化  $\Delta T$  为零时, 波长的偏移只由轴向应变来引起改变. Bragg 光纤光栅用于传感器的机理是基于波长的调制, 通过测量其反射光或透射光的波长相对于 Bragg 光栅中心波长的变化获取目标的信息. 从反射光的角度来分析, 当光栅受到压力时, Bragg 光栅反射光的强度会随着压力的变化而变化, 也即反射光强受压力的调制. 设反射光的光强为  $I_r$ , 入射光为  $I_{\text{in}}$ , 声压为  $P = P_0 \sin(\omega_a t)$ , 有下面公式表示出在外界压力作用下反射光的光强

$$I_r = I_{\text{in}} \left[ R(\lambda_{\text{in}}) \Big|_{P=0} + \frac{dR(\lambda_{\text{in}})}{dP} P \right] \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 当没有外界压力  $P$  时, 反射光强由 Bragg 光栅的反射中心波长来决定, 当外界压力存在时, 其反射光强就受压力的调制. 对于光栅用作水听器的敏感元件, 不要求测量其压力引起波长偏移量的具体值, 而是探测出光强的变化, 进而反映出压力的变化, 由式中可以看出二者的线性关系.

## 2 实验

### 2.1 实验基础

实验结构如图 1 所示. 温度和压力交叉敏感问题的解决已有相关文献报道<sup>[3]</sup>. 我们的实验是将温度控制在室温  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  下, 以防止由于温度的起伏变化引起 Bragg 波长的漂移, 影响声信号的探测. 采用 ASE 宽带光源, 由于使用 GFF (Gain Flat Filter) 技术, 该光源具有很好的光谱平坦度 ( $\leq 2 \text{ dB}$ ), 功率  $10 \text{ mW}$ ,

\* 中国科学院创新基金资助

Tel: 029-88483821 Email: zlsunny@sina.com

收稿日期: 2004-03-30

工作波段为 C 波段(1525 ~ 1565),其光谱图如图 2 所示. 四个光纤光栅的光谱曲线和参数见图 3,其中  $L$  为栅区长度,  $\lambda_B$  为中心波长,  $BD$  为带宽,  $R$  为

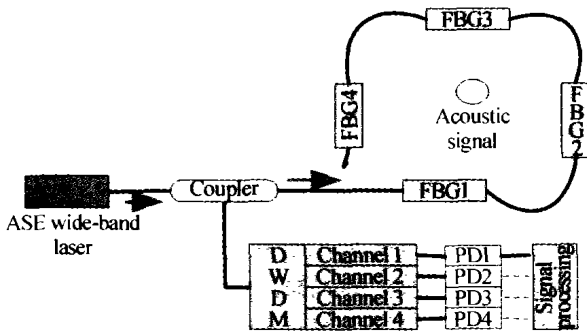


图 1 基于 DWDM 光纤光栅水听器系统结构  
Fig. 1 Architecture of DWDM based hydrophone system

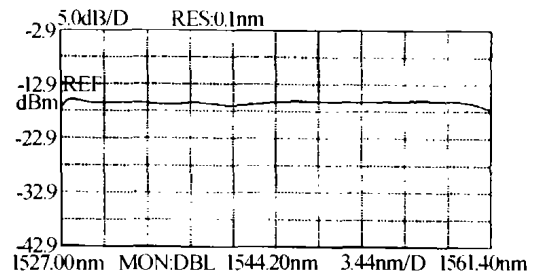


图 2 宽带光源的光谱  
Fig. 2 Spectrum of ASE light source

光栅的反射率. 光栅采用聚合物材料封装来达到对压力增敏的目的. 密集波分复用器 (De-multiplexing) 的参数为 8 Channels, 100 GHz (0.8 nm) 通道间隔, 通道中心波长  $\lambda_c$  在 C 波段. 通道带宽  $\lambda_c \pm 0.2$  nm.

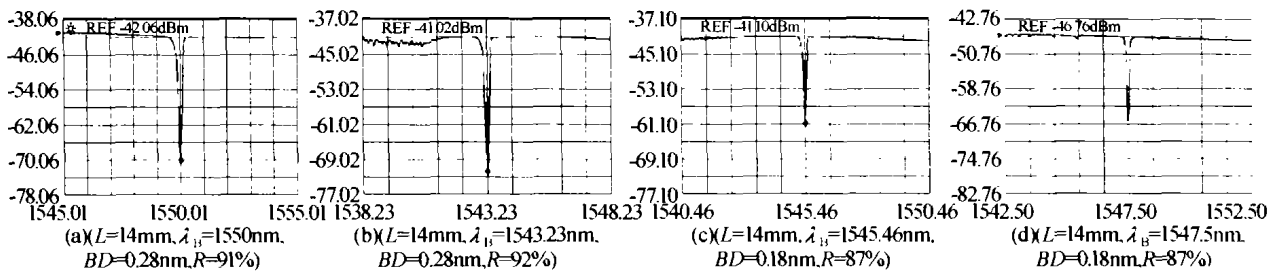


图 3 Bragg 光纤光栅的光谱  
Fig. 3 Reflection spectrum of Bragg grating

## 2.2 信号解调和实验结果

近年来 DWDM 技术在通信领域发展极为迅速并得到广泛应用<sup>[4,5]</sup>. 光纤传感器也引起了科研人员的关注, 利用该技术组建大规模传感网络<sup>[6-8]</sup>. 本文提出了一种基于 DWDM 技术的动态波长偏移检测方法.

ASE 宽带光源发出的宽带光经耦合器到达光栅阵列后, 光栅传感信号按各自的中心波长被反射回来, 再次经过耦合器进入 DWDM 中, 被 DWDM 系统按其通道中心波长进行波分, 然后到达相对应的光电探测器 (PD) 后, 转化为电信号进行信号处理. 在传感阵列中用四个 FBGs 与 DWDM 器件的四个信道相连, 如图 1 所示, FBG<sub>1</sub>、FBG<sub>2</sub>、FBG<sub>3</sub>、FBG<sub>4</sub> 均布在一圆盘上, 将声场发生器置于圆盘中心, 圆盘有调节距离的装置用来调节声场作用在 FBGs 上的变化. 仔细调整 FBGs 和声发生器使得声辐射场和 FBGs 在同一平面上, 这样 FBGs 将受到相同的声压作用. 其获得实验结果见图 4, 因光栅的反射率略有不同, 其信号输出的幅度也稍有不同, 另外, FBG 水听器所处的位置不同, 因此图中 (a)、(b)、(c)、(d) 相位也是不一致的. ASE 宽带光源提供 1525 ~ 1565 nm 的人射光进入 FBG 水听器, 那么经过中心波长分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  的 FBGs 反射后, 得到  $\lambda_{11}$ 、 $\lambda_{22}$ 、 $\lambda_{33}$ 、 $\lambda_{44}$  ( $\lambda_i$  对应  $\lambda_{ii}$ ) 各反射波长的光再通过耦合器进入 DWDM 器件, 在分别进入相对应中心波长的信道进

行波分输出光到光电探测器转换为电信号.

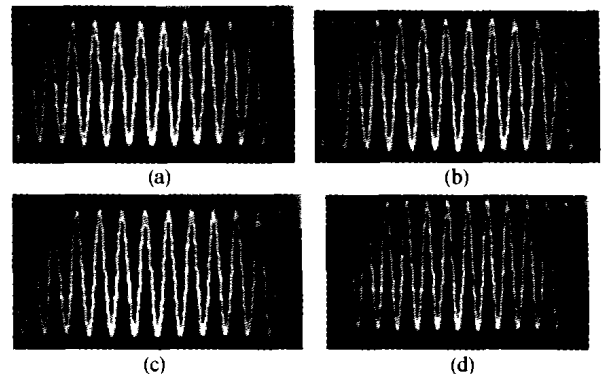


图 4 四个光栅水听器对频率为 13 kHz 声波的响应输出  
Fig. 4 Acoustic response of FBG hydrophones (acoustic frequency 13 kHz)

以光栅 FBG<sub>1</sub> 为例, 假设其反射光信号通过 DWDM 信道 1. 第  $i$  个光栅的中心波长与相对应的通过该光栅反射信号的 DWDM 第  $i$  通道的关系. 设在应力作用下光栅中心波长变化范围为 0 至  $\Delta\lambda_B$ , 我们可设 DWDM 通道 1 的中心波长为  $\lambda_B + \Delta\lambda_B/2$ , 又因为 DWDM 信道带宽为 0.8 nm, 在 0.4 dB 处的通道带宽为  $\pm 0.125$  nm, 所以说, 当  $\Delta\lambda_B \leq 0.8$  nm 时, 信号的波长变化范围将完全在信道内. 因此, 在实际中声波信号作用下, 光栅中心波长的最大偏移量应小于 0.8 nm. 这样保证了光栅波长偏移变化幅度在 DWDM 器件通道的带宽内.

声波在水中传播形成声压, 使光栅产生微形变; 声压是动态变化的, 导致光栅微形变也是变化的; 微

形变与波长偏移是一一对应的关系,微形变的变化是随着声波的频率而变;光电探测器输出信号与声压变化是相对应的.从图5的曲线可以看出,在实验的频率范围内,光栅在不同的声频率作用下响应基本是一致的,也即频率响应的平坦度很好,实验是在不同频率的声波携带同样声波能量的条件下完成的;同时也表明随着声压强度的增加,FBG反射光输出信号强度也增加.实验室测得单元 Bragg 光栅水听器灵敏度在 5~30 kHz 约为 -140 dB. (0 dB re 1v/ $\mu$ Pa).

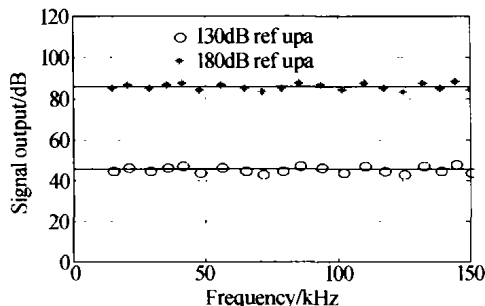


图5 光栅水听器的声频响应关系

Fig.5 Acoustic frequency response of FBG hydrophone

### 3 结论

对光纤光栅做水听器的原理进行了探讨,实验表明了其反射光能量与声压的线性关系,与理论是一致的.由于声波压是微小压力信号,因此本文采用具有窄反射带宽,高反射率的光栅,对其进行了压力增敏处理封装,提高其对外界微小压力的响应,增强输出信号的信噪比.下一步将对光栅水听器温度补偿,指向性和加速度响应进行研究,为Bragg光纤

光栅水听器实用化奠定基础.

### 参考文献

- 1 孙安,乔学光,贾振安,等. 光纤光栅温度和应力同时区分测量传感技术. 光电子激光,2003,14(2): 210~214  
Sun A, Qiao X G, Jia Z A, et al. *Journal of Optoelectronics · laser*, 2003,14(2):210~214
- 2 Takahashi N, Saeki T, Tetsunmua K, et al. Pressure and temperature dependence of fiber Bragg grating for acoustic sensing. *J Marine Acoust Soc Jpn*, 1999,26(4):231~238
- 3 焦明星,赵恩国. 光纤 Bragg 光栅应变温度交叉敏感问题解决方案. 应用光学,2003,24(2):20~23  
Jiao M X, Zhao E G. *Journal of Applied Optics*, 2003,24(2):20~23
- 4 盛钟延,何赛灵,何建军,等. 蚀刻衍射光栅波分复用器件的设计与模拟. 光子学报, 2001,30(5):567~571  
Sheng Z Y, He S L, He J J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(5):567~571
- 5 李志然. 城域波分复用传输系统. 电信科学,2002,18(5):27~30  
Li Z R. *Telecommunications Science*, 2002,18(5):27~30
- 6 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
- 7 Geoffrey A, Philip J N. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM. *IEEE J Lightwave Technology*, 2001,LT9(5):687~699
- 8 李川,韩雪飞,张以谟,等. 采用 WDM 技术的光纤 Bragg 光栅传感网络. 光子学报,2003,32(5):542~545  
Li C, Han X F, Zhang Y M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(5):542~545

## Bragg Grating Hydrophone Based on Dense Wave Division Multiplexing

Zheng Li<sup>1,2</sup>, Zheng Chengdong<sup>1</sup>, He Junhua<sup>1</sup>, Chen Liangyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School of the CAS, Beijing 100039

Received date:2004-03-20

**Abstract** The principle and purpose of Bragg grating hydrophone are introduced. The technique of dense wave division multiplexing is used to process the acoustic wave signal. The sensitivity of FBG hydrophone is enhanced by encapsulated the FBG with pressure-sensitive polymer. To prevent cross-sensing to FBG from temperature, FBG hydrophone test is operated under the condition of room temperature  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ , and the results are offered. The FBG hydrophones detect an acoustic field with good performances; wide and flat operation frequency, stable signal output. The test indicates that the method of processing the detecting acoustic field in DWDM is effective.

**Keywords** Bragg grating hydrophone; Wavelength shift; Dense wave division multiplexing

**Zheng Li** was born in 1973, in Henan Province. He received his B. S. degree from Jilin University in 1996 and M. S. degree from National University of Defense Technology in 2001. Now his interests are electro-optical technology and optical fiber sensors.

