

文章编号: 0253-2239(2007)09-1575-5

新型光纤光栅水声传感器的研究*

杨 剑 赵 勇 倪行洁

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 提出了一种新型的光纤布拉格光栅(FBG)水声传感探头结构以及光纤光栅传感信号的自解调方法。利用一对匹配光栅构成推挽结构,实现了传感-解调的合二为一,大大地减小了系统的复杂度;并通过筒状弹性体结构,解决了裸光纤光栅测量水声信号的灵敏度过小的问题,并具有温度补偿作用。仿真与初步实验结果表明,该水听器探头的测量动态范围超过 100 dB,在 100~200 dB re 1 μ Pa 的水声压范围内,测量灵敏度为 0.36 nm/MPa。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅; 水声传感器; 水听器; 自解调

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Development of Novel Fiber Bragg Grating Underwater Acoustic Sensor

Yang Jian Zhao Yong Ni Xingjie

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A new type of optical fiber underwater acoustic sensor (hydrophone) constructed with two fiber Bragg gratings (FBG) with signal self-demodulation function is presented. This fiber Bragg grating hydrophone uses a pair of matched fiber Bragg gratings with push-pull structure for both sensing and demodulating, which greatly reduces system complexity. The cylindrical structure of the hydrophone improves the sensitivity of the bare fiber Bragg grating acoustic sensors and also can compensate temperature. Simulation and preliminary experimental results indicate that the dynamic range of the hydrophone unit is beyond 100 dB and the measurement sensitivity can reach 0.36 nm/MPa for underwater acoustic pressure range 100~200 dB re 1 μ Pa.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating; acoustic sensor; hydrophone; self-demodulation

1 引 言

光纤水听器是一种基于光纤光电子技术的新型水听器,1977年 J. A. Bucaro 等^[1]发表首篇关于光纤技术的水声传感系统的文章。光纤布拉格光栅传感器(Fiber Bragg grating, FBG)不仅具有普通光纤传感器的优点,而且还具有许多重要的特性:外部对前端光纤的干扰几乎不会影响测量性能;由于光纤布拉格光栅传感器优良的选频特性,可以方便地将通信中的波分复用(WDM)、时分复用(TDM)及空分复用(SDM)等技术运用于传感器系统之中进行多点测量或者同时进行多参量测量^[2]。

N. Takahashi 等^[3]首先将光纤布拉格光栅用于水中声场的检测,通过声场对光纤布拉格光栅的作用引起反射光波长或者透射谱曲线的移动来探测声场信号,并取得了很好的效果(很好的线性,动态特性宽,探头体积小等)。然而,在光纤布拉格光栅水听器中由声场引起的反射光波长移动过于微小,已测得裸光纤布拉格光栅对周围压力的灵敏度为 6 pm/MPa^[4],这对光纤布拉格光栅波长信号的解调带来了困难。

近年来,国内对光纤布拉格光栅水听器的研究主要还是针对裸光纤布拉格光栅水听器^[5,6],虽然

* 国家自然科学基金(50575111)和清华大学基础研究基金(JCqn2005025)资助课题。

作者简介: 杨 剑(1983-),男,北京人,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: Yangjian01@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 赵 勇(1973-),沈阳市人,博士,副教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: zhaoy18@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-11-09; 收到修改稿日期: 2007-04-10

其中也有探头设计方面的研究^[7~10],但主要的工作还是对裸光纤布拉格光栅水听器探头的增敏,在信号的解调方面还是采用传统的解调方法,解调速度慢,而且需要独立的解调单元,系统结构复杂、成本高。

本文设计了一种新型的基于光纤布拉格光栅的水声传感器探头结构,利用弹性材料带动光纤布拉格光栅进行测量,大大提高了裸露光纤布拉格光栅对水中声场的灵敏度;而且,探头采用双光纤布拉格光栅测量、差分输出,进一步提高了灵敏度,并使得温度对探头的影响大大降低。另外,探头本身实现了光纤布拉格光栅的自解调,使系统结构更为简化。

2 传感器结构与测量原理

本文设计的水听器探头如图 1 和图 2 所示。图 1 中截面为“工”字形的部分为水听器支撑体,用相对刚性的金属材料制成,支撑体的内外都填充弹性材料,弹性材料的内外表面各缠绕有一只刻有光纤布拉格光栅的光纤。

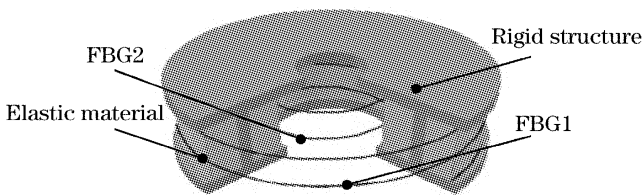


图 1 水听器探头三维视图

Fig. 1 Three-dimensional view of hydrophone head

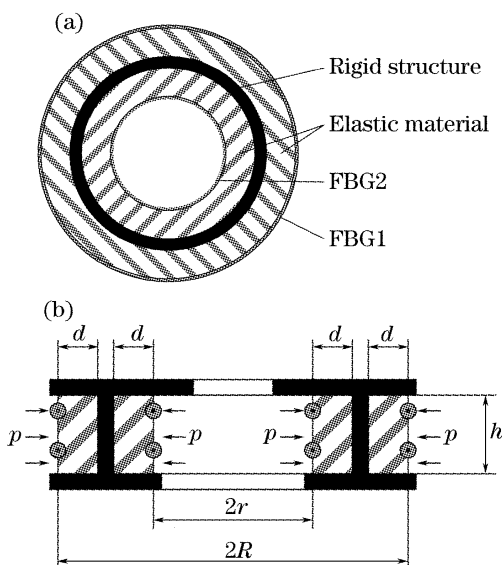


图 2 水听器探头截面图。(a) 横截面图, (b) 纵截面图
Fig. 2 Hydrophone section view. (a) Transverse cross section, (b) longitudinal section

系统的光路如图 3 所示,宽谱光源(Broad band source, BBS)输出光首先经过光隔离器进入到光纤

布拉格光栅 1,由光纤布拉格光栅 1 透射的光通过耦合器进入光纤布拉格光栅 2。光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 是匹配光栅,即两光纤光栅的参数基本相同。光纤布拉格光栅 2 反射的光再次进入耦合器,由耦合器的另一端进入光电探测器(Photoelectric detector, PD)。光电转换后经过放大以及模/数变换输出到数据处理设备。光路中光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 都用于传感,分别贴附于筒状结构的外层和内层弹性材料表面。当探头外界有声压 p 作用时,如图 2(b)所示,贴于外圈弹性材料上的光纤布拉格光栅 1 受压缩,贴于内圈弹性材料上的光纤布拉格光栅 2 受拉伸。光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 两者波长移动方向相反,如图 4 所示,因此灵敏度加倍。并且,这种设计能使光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 实现自解调。

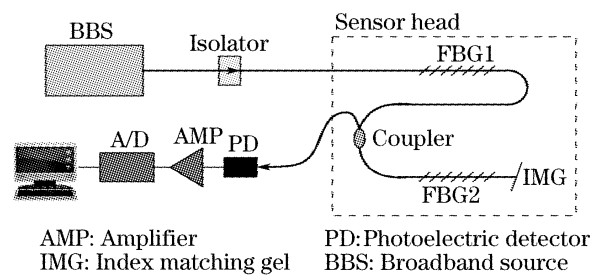


图 3 系统光路图

Fig. 3 Optical configuration of system

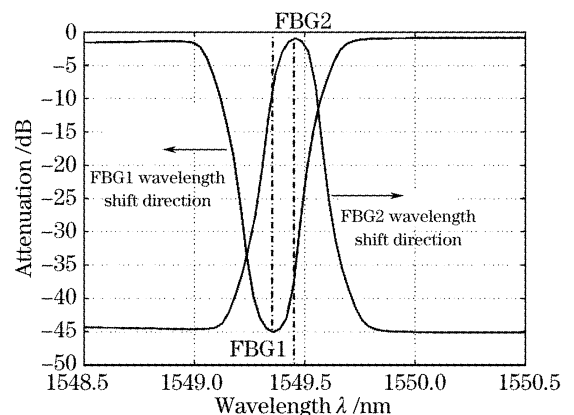


图 4 光纤布拉格光栅自解调示意图

Fig. 4 Self-demodulation demonstration of fiber Bragg grating

由图 4 可看出,两只光纤光栅在测量水声信号时,还相互对另一只光栅的反射波长移动信号做匹配光栅解调。当 FBG1 和 FBG2 的波峰和波谷重合时(初始匹配状态),返回的光强最小。随着光纤布拉格光栅 1 波谷和光纤布拉格光栅 2 波峰的分,返回的光强逐渐增大,因此,只要用光电探测器测量由光纤布拉格光栅 2 返回光的光强,就能测得相应

的光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 波长移动的相对量,即从中恢复出水声信号。

该系统的另一个优点是对温度的变化能起到一定的补偿作用。当温度发生变化时,由于光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 在探头内相距很近,两者所受到的温度效应是近似相同的,即波长移动的方向是一致的,没有相对的波长移动,因此温度的变化对输出影响较小。

设光源入射光强为 $I_s(\lambda)$, 光纤布拉格光栅 1 的反射率为 $R_1(\lambda)$, 光纤布拉格光栅 2 的反射率为 $R_2(\lambda)$, 光功率损耗系数为 $\alpha(\lambda)$, 则静态时探测器处光强为

$$I_d(\lambda) = \alpha(\lambda) I_s(\lambda) [1 - R_1(\lambda)] R_2(\lambda), \quad (1)$$

设探头附近声压为 $p = p_A \cos \omega t$, p_A 和 ω 分别为声压的振幅和角频率。在此声压下探测器处光强可表示为

$$I_d(\lambda) = \alpha(\lambda) I_s(\lambda) \{1 - R_1[(\lambda - \Delta\lambda_1(p))] R_2[\lambda + \Delta\lambda_2(0)]\}, \quad (2)$$

由于波长移动相对于中心波长很小,所以可以将接收光强 $I_d(\lambda)$ 用其在 λ 处的一阶泰勒展开来近似为

$$I_d(\lambda) = \alpha(\lambda) I_s \left[1 - R_1(\lambda) \Big|_{p=0} + \frac{\partial R_1(\lambda)}{\partial p} p \right] \left[R_2(\lambda) \Big|_{p=0} + \frac{\partial R_2(\lambda)}{\partial p} p \right], \quad (3)$$

忽略(3)式中的二阶项,得到

$$I_d(\lambda) = \alpha(\lambda) I_s(\lambda) \left\{ [1 - R_1(\lambda) \Big|_{p=0}] R_2(\lambda) \Big|_{p=0} + \left\{ \frac{\partial R_1(\lambda)}{\partial p} R_2(\lambda) \Big|_{p=0} + \frac{\partial R_2(\lambda)}{\partial p} [1 - R_1(\lambda) \Big|_{p=0}] \right\} p_A \cos \omega t \right\}, \quad (4)$$

所以,由光电探测器接收到的总光强可以表示为

$$W = \int_0^{+\infty} \rho(\lambda) \alpha(\lambda) I_s(\lambda) [1 - R_1(\lambda) \Big|_{p=0}] R_2(\lambda) \Big|_{p=0} d\lambda + p_A \cos \omega t \int_0^{+\infty} \rho(\lambda) \alpha(\lambda) I_s(\lambda) \left\{ \frac{\partial R_1(\lambda)}{\partial p} R_2(\lambda) \Big|_{p=0} + \frac{\partial R_2(\lambda)}{\partial p} [1 - R_1(\lambda) \Big|_{p=0}] \right\} d\lambda, \quad (5)$$

式中 $\rho(\lambda)$ 为光电探测器的波长敏感函数。由(5)式可以看出,探测器接收到的光强与探头附近水声声压成线性关系。

3 灵敏度分析

如图 2(b)所示,探头高度为 h , 弹性层材料厚度为 d , 其体压缩系数(Bulk modulus)为 B , 水听器内部半径为 r , 外部半径为 R 。首先计算内圈光纤布拉格光栅在水声作用下布拉格波长的变化情况。在水声压为 $p = p_A \cos \omega t$ 时,由此引起的内圈弹性层体积变化为

$$\Delta V = \frac{pV}{B} = p \frac{\pi[(r+d)^2 - r^2]h}{B}, \quad (6)$$

式中 V 和 ΔV 分别为水听器内圈弹性层体积和体积变化量。若将引起的内部半径的变化记为 Δr , 则

$$\begin{aligned} \pi[(r+d)^2 - (r+\Delta r)^2]h &= \\ \pi[(r+d)^2 - r^2]h - \Delta V, \end{aligned} \quad (7)$$

将(6)式代入(7)式,得到

$$2r\Delta r + \Delta r^2 = \frac{p}{B}(2rd + d^2), \quad (8)$$

由于 Δr 很小,所以(8)式忽略二阶小量后可得

$$\Delta r = \frac{p}{B} \frac{2rd + d^2}{2r}, \quad (9)$$

则内圈光纤的轴向应变为

$$\epsilon_{z_2} = \frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{2\pi\Delta r}{2\pi r} = \frac{p}{B} \frac{2rd + d^2}{2r^2}, \quad (10)$$

式中 L_2 和 ΔL_2 分别光纤布拉格光栅 2 光纤一圈的原长和长度变化量。由轴向应力而引起的光纤布拉格光栅波长的相对变化为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_z, \quad (11)$$

式中 $P_e = 0.22$ (对于石英光纤)^[11], $\Delta\lambda_B$ 为波长移动量, λ_B 为光纤布拉格光栅的波长。因此

$$\Delta\lambda_{B2} = 0.78\lambda_{B2} \frac{p}{B} \frac{2rd + d^2}{2r^2}, \quad (12)$$

式中 $\Delta\lambda_{B2}$ 为光纤布拉格光栅 2 的波长移动量, λ_{B2} 为光纤布拉格光栅 2 的波长。同理,外圈光纤布拉格光栅 1 在水声压 p 下的波长移动量 $\Delta\lambda_{B1}$ 可以表示为

$$\Delta\lambda_{B1} = 0.78\lambda_{B1} \frac{p}{B} \frac{2Rd - d^2}{2(R-d)^2}, \quad (13)$$

式中 λ_{B1} 为光纤布拉格光栅 1 的波长。

4 仿真与初步实验结果

仿真和实验所用的光纤布拉格光栅 1 中心波长为 1549.41 nm,反射峰 3 dB 带宽为 0.221 nm;光纤布拉格光栅 2 中心波长为 1549.36 nm,反射峰 3 dB 带宽 0.223 nm;两光栅反射系数均在 90% 以上。水听器探头内径 $r=10$ mm,外径 $R=22$ mm,内外弹性层厚度均为 $d=5$ mm,弹性材料采用聚乙烯,其体压缩系数 $B_{PE}=3.22 \times 10^9$ Pa,光纤中光功率损耗系数设为常量 $\alpha(\lambda)=0.0468$ 。两光栅波长分离量与输出光强变化关系曲线如图 5 所示。按照计算可知,光纤布拉格光栅 1 和光纤布拉格光栅 2 对应于 1 Pa 声压产生的波长移动量分别为 2.347×10^{-7} nm 和 1.267×10^{-7} nm。两者结合起来对水声声压的灵敏度约为 3.614×10^{-1} nm/MPa,与裸光纤的 6 pm/MPa^[4]相比提高了 60 多倍。

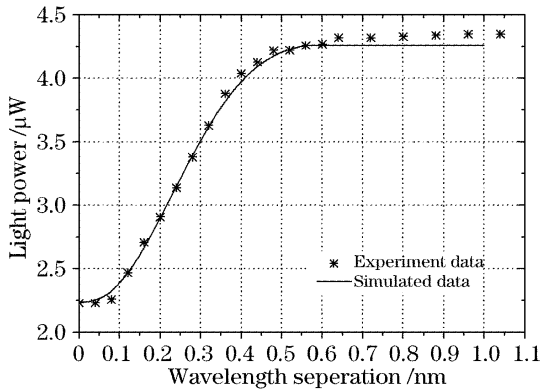
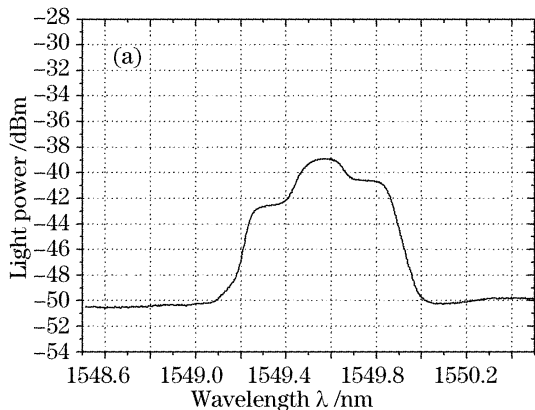


图 5 两光栅布拉格波长分离量与输出光功率变化的关系曲线
Fig. 5 Relationship between the total wavelength separation of two fiber Bragg gratings and the detected light power

对于水声强度范围为 100~200 dB re 1 μPa,对应的波长分离量在 3.614×10^{-3} nm 以内,因此在制做探头时,对光纤布拉格光栅 1 进行预撑拉,使得在没有水声作用时光纤布拉格光栅 1 波谷和光纤布拉格光栅 2 波峰已经有 0.2 nm 的分离。这样在测量



水声时,探头的工作段处于如图 5 曲线横轴 0.2 nm 左右的位置,使得自解调结果具有比较好的线性。仿真时模拟输入 100~200 dB re 1 μPa 的水声信号,由于光电管在测量敏感区域内(1549~1551 nm)波长敏感函数基本可以认为是一致的,所以将光电探测器的波长敏感函数 $\rho(\lambda)$ 取为常数 1。图 6 表征了被测水声声压与光电探测器输出电流之间的关系曲线。从图 6 中可看出,探测器所接收到信号与被测水声声压之间存在较好的线性关系,线性度大于 0.999,从拟和曲线的斜率可以得到,光电探测器端输出的测量灵敏度为 6.5 μA/MPa。同时,根据实验测得数据,该水听器的动态范围超过 100 dB。如果采用高精度的电流放大电路或者采用 3 dB 带宽较大的光纤光栅,动态范围能得到进一步的提高。图 7 为模拟外界水声声压变化由小变大过程中,由光谱分析仪测得实际测试结果,可见压力较小时两光纤布拉格光栅透射谱波谷和反射谱波峰彼此分离较小,随压力的增加,波峰和波谷之间的分离量也随之增加,同时伴随着光功率的升高。仿真和实验与理论分析结果相吻合。

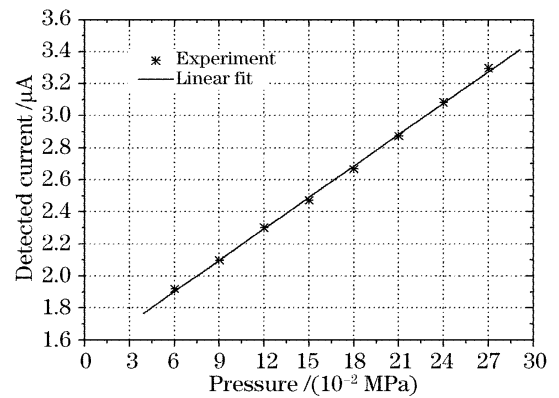


图 6 探测器接收光强度与被测水声声压的关系曲线
Fig. 6 Underwater acoustic pressure dependence of light intensity detected by fiber Bragg grating hydrophone unit

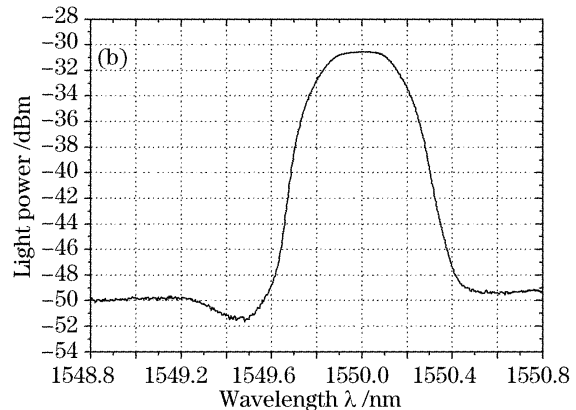


图 7 声压由小到大变化时接收器端光谱变化情况。(a) 低声压下,(b) 高声压下

Fig. 7 Receiver spectrum Variation for acoustic pressure varying from low to high. (a) In low pressure, (b) in high pressure

5 结 论

提出了一种新型的光纤布拉格光栅水声传感器探头结构和相应的波长解调方法。该设计采用一对匹配光纤光栅组成推挽结构对水声进行测量,使得系统的灵敏度由裸光纤布拉格光栅的 6 pm/MPa 提高到 0.36 nm/MPa。系统信号解调采用双光纤光栅互相进行解调,实现了自解调测量。实验表明,该水声传感器具有灵敏度高、结构简单、线性度好和动态响应范围大(100 dB 以上)等优点。

参 考 文 献

- 1 J. A. Bucaro, H. D. Dardy, E. F. Carome. Fiber-optic hydrophone[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, **62**(5): 1302~1034
- 2 J. P. Dakin, M. Volanthen. Distributed and multiplexed fibre grating sensors[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3746**: 134~140
- 3 N. Takahashi, K. Yoshimura, S. Takahashi *et al.*. Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating[J]. *Ultrasonics*, 2000, **38**(1~8): 581~585
- 4 N. Takahashi, K. Yoshimura, S. Takahashi *et al.*. Characteristics of fiber Bragg grating hydrophone[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, **E83-C**(3): 275~281
- 5 Liu Bo, Cao Ye, Luo Jianhua *et al.*. Researching on the experiment of fiber Bragg grating hydrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 686~689 (in Chinese)
- 6 Hu Yongqing, Wang Junjie, Luo Fei. The study of demodulation technique on the hydrophone based on FBG[J]. *Sensor World*, 2005, (8): 13~16 (in Chinese)
- 7 Zhao Shen, Luo Fei, Liang Lei *et al.*. Experiment and research of fiber Bragg grating hydrophone [J]. *J. Transducer Technology*, 2004, **23**(6): 12~13 (in Chinese)
- 8 Zheng Chengdong, Zheng Li, He Junhua *et al.*. Characteristics of FBG hydrophone[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(5): 22 (in Chinese)
- 9 Zheng Chengdong, Zheng Li, He Junhua *et al.*. Study on characters and experiment of FBG hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1934~1940 (in Chinese)
- 10 Zhang Xiping, Xie Guanmo, Jin Shan *et al.*. The free vibration characteristics of bar-type fiber optic hydrophone unit [J]. *J. Wuhan University of Technology*, 2006, **28**(6): 73~75 (in Chinese)
- 11 L. Yu-Lung, C. Han-Sheng. Measurement of thermal expansion coefficients using an in-fibre Bragg-grating sensor [J]. *Measurement Science & Technology*, 1998, **9**(9): 1543~1547