

光纤 Bragg 光栅水听器特性及实验研究

郑承栋^{1,2} 郑黎^{1,2} 何俊华¹ 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 论述了光纤 Bragg 光栅(FBG)水听器探头基元-(FBG)的传感特性,分析了 FBG 的耦合系数、反射率、反射带宽和栅长对光纤 Bragg 光栅水听器传感特性的影响. 通过改进光纤 Bragg 光栅水听器探头封装结构,增加了其压力敏感系数. 并将实验结果与标准水听器(压电型)比较,标出光纤 Bragg 光栅水听器的声压灵敏度;对传感信号进行电路解调,得出了解调结果,结果显示与原始声波信号基本一致. 试验表明,在 1 kHz~25 kHz 的声波检测范围,光纤 Bragg 光栅水听器响应平坦度好,信号输出稳定,证明文中采取的改进措施是有效的.

关键词 光纤 Bragg 光栅水听器;波长偏移;水声增敏;频响

中图分类号 TB565+.1 **文献标识码** A

0 引言

FBG 水听器是一种新型的压力传感器,近年来以其独特的优点及波长编码效果受到水声传感领域界的重视. FBG 水听器除了拥有高灵敏度、宽动态测量、抗磁抗腐的特性外,还具有体积小、分布式点传感、信号稳定等优点. FBG 水听器虽然具有上述独特的优点,但裸露的 FBG 纤细且易断,在实际的海洋水声探测应用中容易受损,破坏其有效探测结果. 因此要实现 FBG 水听器有效的实用化,必须了解 FBG 探头特性对传感的影响并研究 FBG 探头的工艺封装结构^[1].

本文重点描述 FBG 的光谱特性,并就封装结构对 FBG 水听器的传感特性的影响做了深入的研究,通过实验测出了其压力敏感系数,并与标准水听器(压电型水听器,其自由场电压灵敏度级 M_0 为 -200 dB)进行标定实验测量,得出该 FBG 水听器的声压灵敏度,为 FBG 水听器从实验室走向实际应用做出有效的探索. 由于在实验中保持恒温环境,故可以忽略温度引起 FBG 波长的偏移^[2,3].

1 FBG 的光谱特性

了解 FBG 的光谱特性,对于 FBG 的传感应用来说,有着重要的理论指导作用. 根据 FBG 耦合模方程的解对 FBG 的光谱特性进行了数值模拟研究. 以此来讨论 FBG 的基本光学参量——耦合系数、反射率 R_g 、栅长 L 以及反射带宽 $\Delta\lambda$ 等对 FBG 传感特性的影响. 在数值模拟计算中,取 FBG 的纤芯有效折射率为 1.45,光栅周期 534 nm,对应的 FBG 波长

为 1548.6 nm.

图 1 是 FBG 的反射谱. 图 1(a)中耦合系数为 0.2 mm^{-1} ,光栅长度为 10 mm;图 1(b)中耦合系数为 0.4 mm^{-1} ,光栅长度为 10 mm. 从图中可以看出,增大耦合系数可以增大 FBG 的峰值反射率,但过大的耦合系数会使反射峰两侧的旁瓣显著增大,使得 FBG 的光谱特性变坏,所以在使用 FBG 时应考虑这一点.

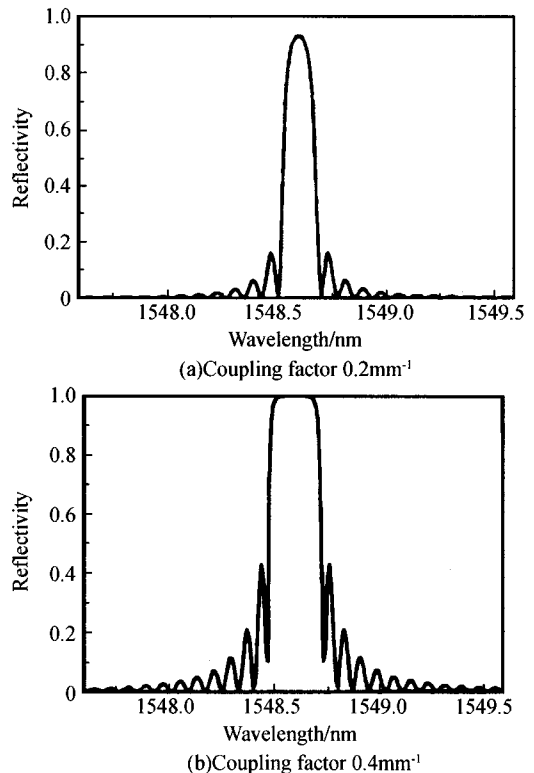


图 1 FBG 的反射谱

Fig. 1 The reflectance spectrum of FBG

图 2 是 FBG 峰值反射率与耦合系数和光栅长度的关系曲线. 图 2(a)是在不同光栅长度下峰值

反射率与耦合系数的关系曲线,由图中可以看出,对一定的光栅,反射率随耦合系数的增加而增大,并逐渐趋于饱和,光栅越长趋于饱和速度越快.图 2(b)是在不同耦合系数下 FBG 的峰值反射率与光栅长度的关系曲线,从图中可以看出,对一定的耦合系数,反射率随光栅长度的增加而增大,并逐渐趋于饱和,耦合系数越大则趋于饱和的速度越快.因此,FBG 的反射率受到耦合系数和光栅长度的综合影响,要提高反射率,既可增大耦合系数,也可以增加光栅长度,但在两者乘积达到一定时将趋于饱和,因而可以协调两者大小得到所需的反射率.

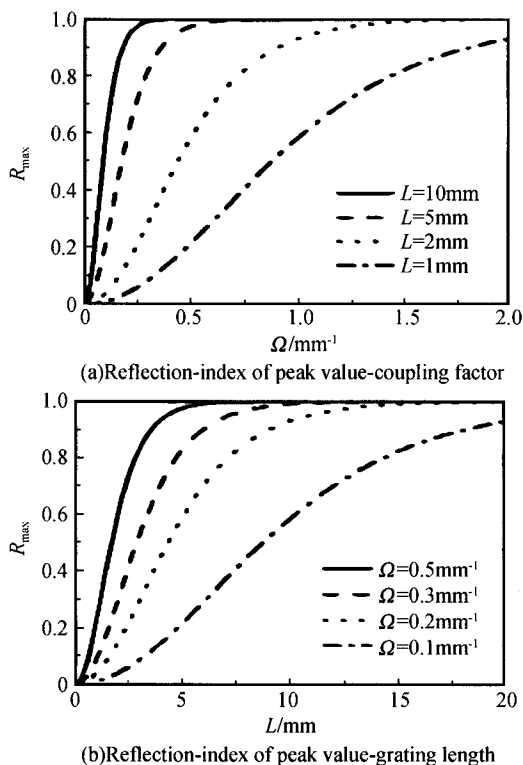


图 2 FBG 峰值反射率与耦合系数和光栅长度的关系曲线
Fig. 2 The relationship among reflection-index of peak value, coupling factor and grating length

图 3 是 FBG 反射带宽与耦合系数和光栅长度的关系曲线.其中图 3(a)是在不同光栅长度下反射带宽与耦合系数的关系曲线,从图中可以看出,对一定的光栅长度,反射带宽随耦合系数的增加而增加,耦合系数较大时其之间关系近似线性,而且光栅越长线性度越好.图 3(b)是在不同耦合系数下反射带宽与光栅长度的关系曲线,从中可以看出,对一定的耦合系数,反射带宽随长度的增加而减小,起始时减小很快,随光栅长度的增加,反射带宽减小速度逐渐变慢,并趋于饱和.因此要获得较小的反射带宽,需减小其耦合系数或者增加光栅的长度.

在 FBG 水听器的实际应用中,希望反射率 R_g 较高,反射带宽 Δ 较窄,这样有利于提高输出的检测信号信噪比.根据上述的理论分析以及对多组不

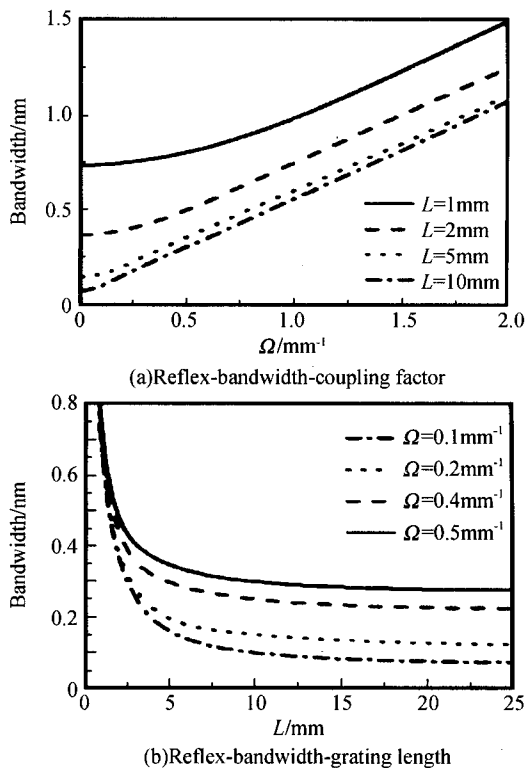


图 3 FBG 反射带宽与耦合系数和光栅长度的关系曲线
Fig. 3 The relationship among reflex-bandwidth, coupling factor and grating length

同光学参量的光栅进行实验,对比得出耦合系数为 0.4 mm^{-1} ,反射率 R_g 为 90%,反射带宽 Δ 为 0.2 nm,栅长 L 为 10 mm 的 FBG 作水听器探头更利于水声探测.

2 FBG 水听器探头封装结构及理论分析

水声声压范围一般在几十帕至几百帕之间,而裸光纤光栅的压力灵敏度为 $7 \times 10^{-3} \text{ nm/MPa}$,此时它无法直接测量声波这样的微小压力,必须对 FBG 进行声增敏聚合物的封装.在实验中通过一定的工艺制作使得聚合物材料与 FBG 紧密结合,形成 FBG 水听器探头.其结构示意图如图 4.其具体的方法是将声敏感聚合物固化于厚壁刚性金属外套圆筒中,将光纤光栅置于圆筒轴线上,并固定于声敏

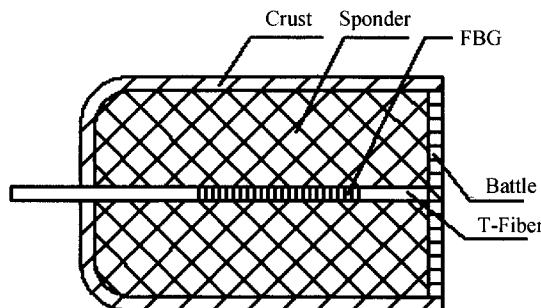


图 4 水听器单元探头结构
Fig. 4 Structure of FBG hydrophone

感聚合物中. 这样金属套筒可以屏蔽了其他方向的压力, 只允许开口方向的声波压力对声敏感聚合物弹性体产生轴向应(力). 挡板(Baffle)呈网状, 既允许声压通过网状小孔直接作用在声敏感聚合物上, 又可以起保护聚合物的作用, 以适应恶劣的外部物理环境. 图 5 为研制的水听器样品.

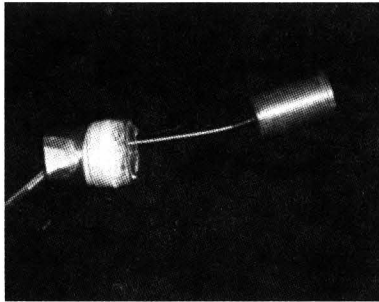


图 5 FBG 水听器探头实物照片
Fig. 5 Practical Photograph of FBG hydrophone

下面讨论这种封装方法的原理. 在静态压力 P 的作用下, 封装于声增敏聚合物中的 FBG 的波长变化可表示为^[4]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \epsilon_z - \lambda_B \left\{ \frac{n_e^2}{2} [(P_{11} + P_{12}) \epsilon_r + P_{12} \epsilon_z] \right\} \quad (1)$$

式中 ϵ_z, ϵ_r 分别为光栅的轴向和径向应变.

图 6 是封装于声增敏聚合物的光纤光栅的剖面图. 光栅的半径为 R_1 , 弹性模量和泊松比分别为 E_1 和 ν_1 . 介质的半径为 R_2 , 弹性模量和泊松比分别为 E_2 和 ν_2 .

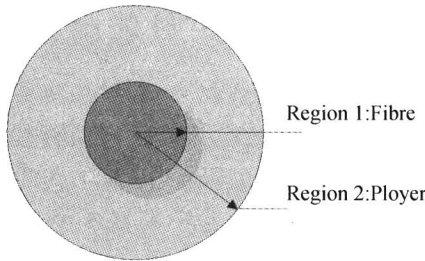


图 6 封装于声增敏聚合物的光纤光栅的剖面图
Fig. 6 The section of FBG hydrophone capsulated

静态压力下, 上述水听器探头结构的应力分布为^[5]

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \begin{cases} \frac{A}{r^2} + 2C & (\text{区域 2}) \\ 2D & (\text{区域 1}) \end{cases} \\ \sigma_\theta &= \begin{cases} -\frac{A}{r^2} + 2C & (\text{区域 2}) \\ 2D & (\text{区域 1}) \end{cases} \\ \sigma_z &= \begin{cases} F & (\text{区域 2}) \\ G & (\text{区域 1}) \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 A, C, D, F, G 为待定系数. 因为金属套筒屏蔽了其他方向的压力, 故只考虑轴向应变, 根据胡克定

律

$$\epsilon = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \quad (3)$$

于是轴向应变为

$$\epsilon_z = \begin{cases} \frac{1}{E_1} (G - 4\nu_1 D) & (\text{区域 1}) \\ \frac{1}{E_2} (F - 1\nu_2 C) & (\text{区域 2}) \end{cases} \quad (4)$$

轴向压缩量 $u = \int \epsilon_r dL$, 区域 1 和区域 2 的轴向压缩量为

$$u = \begin{cases} \frac{1}{E_1} (G - 4\nu_1 D) L & (\text{区域 1}) \\ \frac{1}{E_2} (F - 4\nu_2 C) L & (\text{区域 2}) \end{cases} \quad (5)$$

上述方程有四个待定系数 A, C, D, F, G , 因此需要几个边界条件, 分别是

a) 在 $r=R_2$ 的径向应力等于 0, 即

$$\frac{A}{R_2^2} + 2C = 0 \quad (6)$$

b) 在 $r=R_1$ 处, 区域 1 和区域 2 的径向应力均等于 0, 即

$$D = 0 \quad (7)$$

c) 轴向应力在整个区域(包括区域 1 和区域 2)内的积分等于由压力所产生的总的轴向力, 即

$$G + \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - 1 \right] F = - \left[\frac{R_2}{R_1} \right]^2 P \quad (8)$$

d) 远离光纤末端时, 区域 1 和区域 2 的轴向应力相等, 即

$$G - 4\nu_1 D + (E_1/E_2)(4\nu_2 C - F) = 0 \quad (9)$$

在 R_2 远大于 R_1 及 E_1/E_2 远大于 1 的情况下, 由式(6)、(7)、(8)和式(9)可解出其轴向应变为

$$\epsilon_z = -\frac{1}{E_2} (1 - 2\nu_2) P \quad (10)$$

将式(10)带入式(1), 可以得到 FBG 探头的压力灵敏度为

$$K_P = \nabla \lambda_B / P \lambda_B = -(1 - P_e)(1 - 2\nu_2) / E \quad (11)$$

式中 P_e 为光纤的有效光弹系数. 由式(11)可以看出, FBG 中心反射波长的相对变化与声压呈线性关系. 通过代入 ν_2, E 和 P_e 可得到 FBG 水听器探头的压力敏感系数 k_p .

3 FBG 水听器探头的实验及结果

对 FBG 水听器探头的压力敏感特性进行实验, 实验装置示意图如图 7, 图 8 为实验实物图. 在 0~0.06 MPa 压强范围内, 将上述的 FBG 水听器探头置于精密控制的压力容器中, 逐渐增加容器内压强, 同时用光谱仪测量 FBG 探头反射的中心波长.

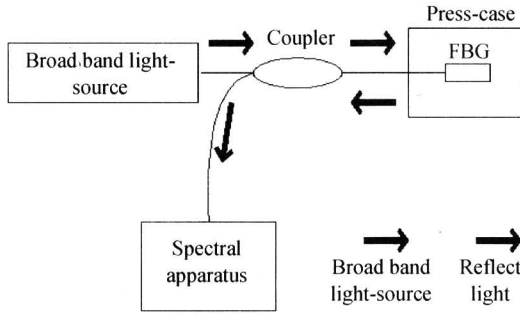


图 7 FBG 水听器探头压力响应实验
Fig. 7 Experimental setup of pressure response of FBG hydrophone sensing head

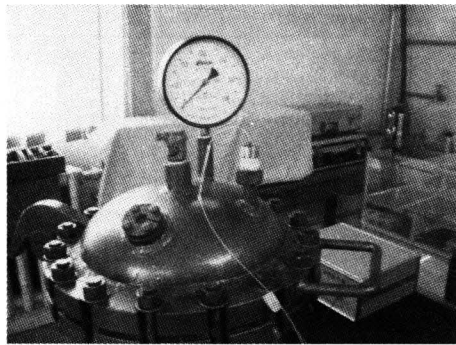


图 8 FBG 水听器探头压力响应实验实物图
Fig. 8 Experimental practicality of pressure response of FBG hydrophone sensing head

记录下 FBG 水听器探头因压强变化而引起的中心波长变化值, 其压力响应曲线如图 9, 图 10 为

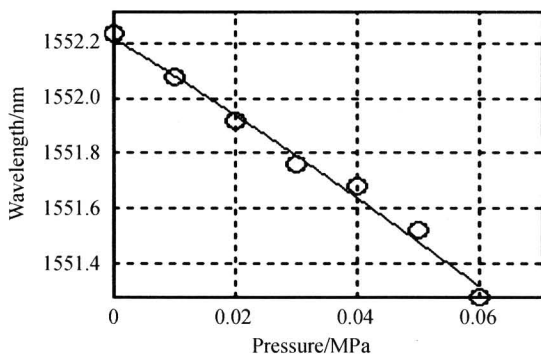


图 9 光纤光栅水听器的压力响应曲线
Fig. 9 Pressure response curve of FBG hydrophone

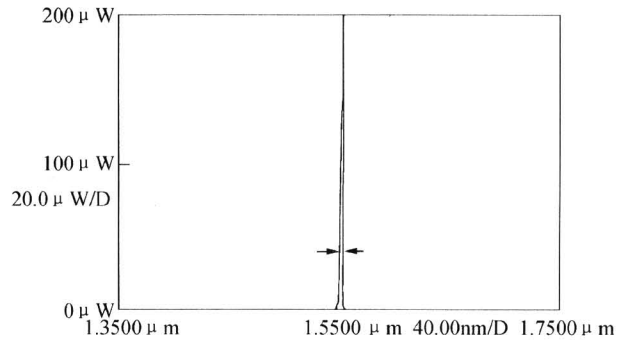


图 10 在 $P=0.04$ MPa 时 FBG 探头的反射谱
Fig. 10 Spectrum of FBG sensing head(0.04 MPa)

FBG 探头在 $P=0.04$ MPa 时的反射谱. 由图 9 显示这种封装的 FBG 水听器的声压响应曲线为线性关系, 其斜率即 FBG 探头的压力灵敏度为 -17.3 nm/MPa, 是裸纤的 FBG 压力灵敏度 (0.007 nm/MPa) 的 2471 倍. 根据表达式(11)可计算出 FBG 水听器探头的实验压力敏感系数为 $k_p = -26.76$ MPa⁻¹ (负号表示 FBG 受轴向声压作用向短波长方向偏移).

根据式(11)和实际的声敏感材料弹性特征及光栅参量^[6], 理论计算得 FBG 水听器探头的压力敏感系数 $k_{p0} = -31.56$ MPa⁻¹ (相当于压力灵敏度为 -20.4 nm/MPa), 比实验值大. 通过分析, 由两方面的原因所致: 一方面是由于聚合物与刚性体筒内壁紧密粘结, 产生的阻尼力使聚合物弹性体受外界轴向压力作用时的应变减小; 另一方面, 圆筒壁还限制了聚合物弹性体的径向变化, 使其泊松比为 0, 因此弹性体的等效杨氏模量增大.

其次, 对 FBG 水听器进行声压灵敏度的标定实验. 利用消声实验水池以及可调频率声源, 将 FBG 水听器和标准声压水听器(压电型)置于同一位置如图 11. 声源发生器离水听器距离 12 m, 对两水听器在相同环境参量下进行测量, 在不同声源频率下, 从数据采集系统中可直接读出各自的响应输出值. 测试数据如表 1 (M 表示 FBG 水听器信号输出值, M_0 表示标准水听器信号输出值).

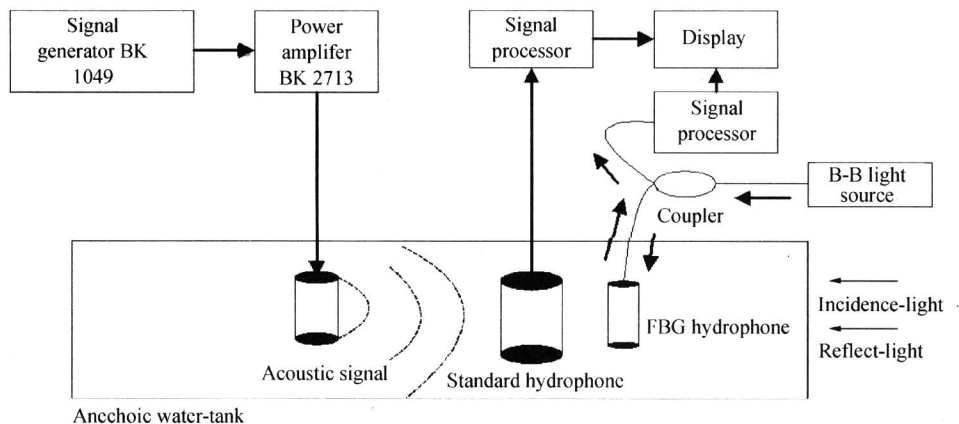


图 11 FBG 水听器消声水池实验布置图
Fig. 11 The experiment of FBG hydrophone in muffling tank

表 1 FBG 水听器进行声压灵敏度标定实验数据

声源频率 /Hz	前放倍数 /dB	信号输出 / $(\text{mv} \cdot \text{uv}^{-1})$	$20\lg(M/M_0)$ /dB	声源频率 /Hz	前放倍数 /dB	信号输出 / $(\text{mv} \cdot \text{uv}^{-1})$	$20\lg(M/M_0)$ /dB
1K	40	M 4.00 mV	27.2	8K	40	M 7.00 mV	28.9
	100	M_0 19.0 uV			80	M_0 18.0 uV	
1.5K	40	M 3.80 mV	29.4	10K	30	M 8.0 mV	27.3
	100	M_0 11.00 uV			80	M_0 40.0 uV	
2K	30	M 23.0 mV	27.9	15K	40	M 2.70 mV	23.1
	80	M_0 76.0 uV			80	M_0 26.0 uV	
3K	30	M 22.0 mV	29.8	20K	60	M 1.80 mV	20.6
	80	M_0 62.0 uV			80	M_0 14.7 uV	
4K	60	M 27.0 mV	26.7	25K	60	M 0.8 mV	18.2
	60	M_0 55.0 uV			60	M_0 12 uV	

由测试数据计算得到 FBG 水听器相对标准水听器的频率响应曲线如图 12.

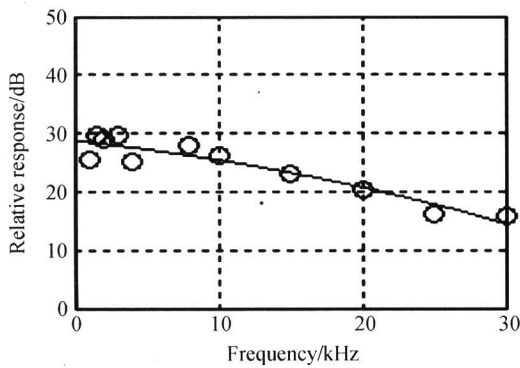


图 12 光纤水听器相对标准声学水听器的相对响应曲线
Fig. 12 Relative response of FBG hydrophone and Fiber hydrophone

水听器所探测的水声波信号,解调前及经解调电路处理后的信号分别如图 13 和图 14,发现实验结果与声波发生装置产生的原始信号及标准水听器

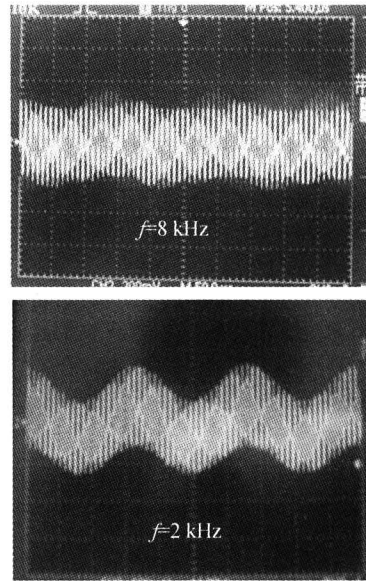


图 13 未解调的光纤水听器输出
Fig. 13 The un-modulated acoustic signals of the fiber hydrophone detecting

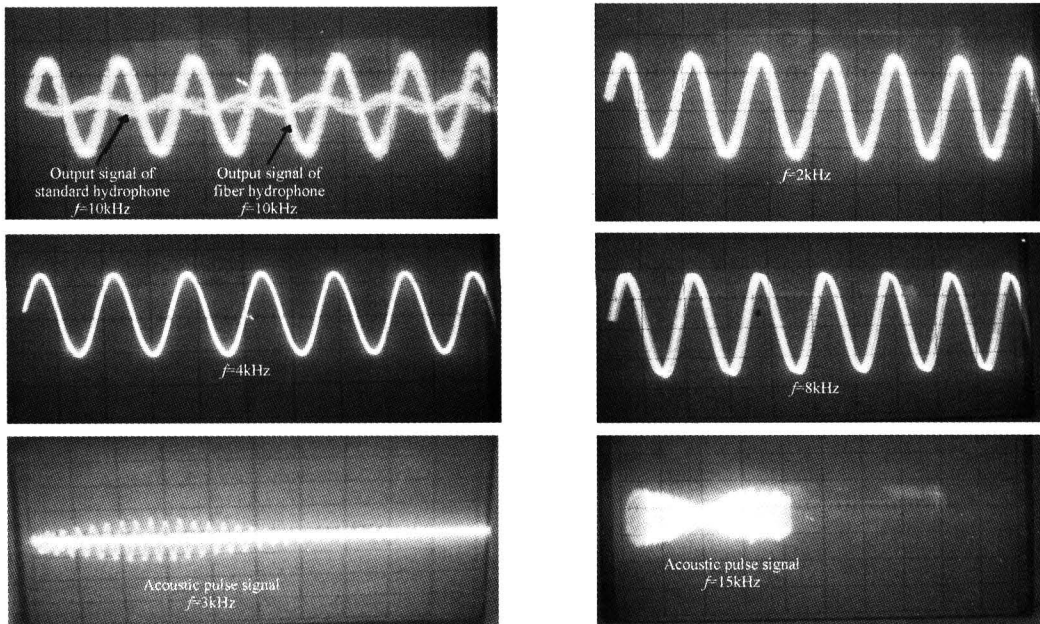


图 14 解调后的水听器所探测水下声波信号
Fig. 14 The modulated underwater acoustic signals of the fiber hydrophone

探测信号相比较是一致的. 实验结果表明 FBG 水听器的灵敏度高于压电型水听器, 在 10 kHz 时其声压灵敏度约为 -175 dB (0 dB ref $1\text{V}/\mu\text{Pa}$) (相对于标准压电型水听器, 其灵敏度为 -200 dB). 由图 12 可以看出, 其低频灵敏度好于高频灵敏度, 信号输出稳定方面还有待改善. 经多次实验的分析表明可以通过适当增大刚性金属套筒直径, 以及改进聚合物与 FBG 和套筒壁间的粘接工艺, 可使实验测量结果更接近于理论值.

4 FBG 水听器试验测量的误差分析

在用 FBG 水听器测量水声信号时, 在上述实验中通过与标准水听器对比测量来评估 FBG 水听器灵敏度, 对误差评估是粗略的. 下面讨论影响测量误差的因素.

假设 λ_0 表示为波长测量的准确值, $\delta\lambda$ 表示其误差, 则

$$\lambda = \lambda_0 + \delta\lambda \quad (12)$$

则声波引起的应变误差为

$$\delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0 = K^{-1}\lambda - K_0^{-1}\lambda_0 \quad (13)$$

式中 K^{-1} 和 K_0^{-1} 分别为 FBG 水听器灵敏度矩阵测量值和灵敏度矩阵准确值^[7]. 如果知道 $\delta\lambda$ 的值, 则可以直接通过式(13)计算出声压信号测量误差. 利用上述分析对试验系统测量误差进行评估, 应变的测量准确度达到 $1.45 \mu\varepsilon$.

5 结论

通过对 FBG 的光谱特性分析, 选择了适当的 FBG 参量和更利于传感的声压敏感材料, 使得 FBG 水听器探头具有好的线性压力传感特性; 在压力容器内测出了 FBG 水听器探头压力响应曲线和压力敏感系数, 并与理论结果进行比较分析得出封装材料和封装结构的改进是有效的; 经过与标准水听器

校准, 测出了相对频率响应曲线并标定出该 FBG 水听器的声压灵敏度. 为进一步改进 Bragg 光栅水听器的性能提供了理论和实验基础. 在实验过程中, 因为声波发生器的频响范围不足 ($0 \sim 30$ kHz), 导致水听器的高频响应实验无法进行, 下一步重点应该是针对光纤 Bragg 光栅水听器的动态范围和频响范围 (理论范围为 $1 \sim 150$ kHz) 的不足进行改善.

参考文献

- 张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性研究. 光子学报, 2002, **22**(1): 89~91
Zhang Y, Liu Z G, Guo Z Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **22**(1): 89~91
- 黄波, 周荫清, 谭立英. 温度及应力变化对光纤光栅布拉格波长的影响. 光纤与电缆及其应用技术, 2001, (3): 23~25
Huang B, Zhou Y Q, Tan L Y. *Optical Fiber and Electric Cable*, 2001, (3): 23~25
- 郑黎, 郑承栋, 何俊华, 等. 基于密集波分复用技术的 Bragg 光栅水听器. 光子学报, 2003, **33**(11): 1348~1350
Zheng L, Zheng C D, He J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1348~1350
- Hill D J, Cranch G A. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fiber Bragg grating. *Electron Lett*, 1999, **35**(15): 1268~1269
- Hocker G B. Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis. *Appl Opt*, 1999, **18**(21): 3679~3683
- 郁可, 张永胜, 姜德生, 等. 光纤光栅反射特性及相位掩模法制作的理论分析. 光电子·激光, 1998, **9**(4): 275~278
Yu K, Zhang Y S, Jiang D S, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1998, **9**(4): 275~278
- 贾宏志. 光纤光栅传感器的理论和技术研究. 博士论文, 2000. 91~94
Jia H Z. Theoretical and technical researches on the optical fiber grating sensors. Ph. D thesis, 2000. 91~94

Study on Characters and Experiment of FBG Hydrophone

Zheng Chengdong^{1,2}, Zheng Li^{1,2}, He Junhua¹, Chen Liangyi¹

¹ *Xian Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xian 710068*

² *The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Received date: 2005-04-30

Abstract The acoustic sensing characters of Fiber Bragg Grating (FBG) hydrophone were addressed and the relationship on FBG's sensing character and the reflection index, grating distance and reflection wavelength bandwidth of the FBG was analyzed. By improving encapsulation structure of FBG sensing-head, the acoustic sensing-index was increased. The experiment sensing result of FBG hydrophone was compared with which of standard hydrophone and response dexterous was demarcated. The sensing signal was demodulated with demodulateonal circuit and the result according with acoustic signal was obtained. The test result indicates that at the acoustic frequency of 1 kHz~30 kHz, compared with the standard piezo-acoustic hydrophone, the frequency response of the FBG hydrophone is very flat and the SNR of output signal is good. The improved measures are in effect.

Keywords Bragg grating hydrophone; Wavelength shift; Pressure-sensitive polymer; Frequency response



Zheng Chengdong was born in 1977, and in Sichuan Province. He graduated from Department of Machine-electron of Northwestern Polytechnical University in 2001. He has been a postgraduate of Xi'an institute of optics and precision mechanics of CAS, the Graduate School of Chinese Academy of Sciences since 2002. His research focuses on optical engineering.