

带有温度补偿的高灵敏度光纤布喇格光栅水听器

李雪宾,张鑫*,简家文

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:针对海洋环境中不同温度下声音检测的需求,研发了一种基于光纤布喇格光栅(FBG)的温度补偿型水听器。该水听器利用侧面拉伸式结构进行增敏,通过有限元分析方法对水听器结构进行优化,并在该结构中使用了补偿材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),利用其热膨胀效应对FBG进行调制,以降低温度对FBG产生的影响,实现温度补偿。仿真结果表明:该结构在10~2000 Hz范围内可实现较高增敏,同时水听器的灵敏度增益谱显示出共振特征,相比于远离共振频率处,灵敏度增益有进一步的提高,最高达到145 dB;在海洋温度变化范围内(-2℃~30℃)可实现波长偏移小于0.01006 nm的温度补偿。

关键词:布喇格光栅;温度补偿;有限元分析;声音探测

中图分类号:TN25 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)04-0026-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

High sensitivity fiber Bragg grating hydrophone with temperature compensation

LI Xuebin, ZHANG Xin*, JIAN Jiawen

(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: In this paper, a temperature compensated hydrophone based on fiber Bragg grating (FBG) is developed to meet the requirements of sound detection in different temperature in marine environment. The hydrophone is sensitized by the side stretch structure, and the structure of hydrophone is optimized by the finite element analysis method. In this structure, the compensation material Polymethyl methacrylate (PMMA) is used, and its thermal expansion effect is used to modulate FBG, so as to reduce the impact of temperature on FBG and realize temperature compensation. The simulation results show that the structure can achieve higher sensitivity in the range of 10~2000 Hz, and the sensitivity gain spectrum of the hydrophone shows resonance characteristics. Compared with the place far away from the resonance frequency, the sensitivity gain is further improved, reaching 145 dB at most. In the range of ocean temperature (-2℃~30℃), the temperature compensation of wavelength shift less than 0.01006 nm can be realized.

Key words: fiber Bragg grating; temperature compensation; finite element analysis; sound detection

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)水听器因具有抗电磁干扰

收稿日期:2019-10-12。

基金项目:国家自然科学基金(61601253)资助;宁波市自然科学基金(2017A610102)资助。

作者简介:李雪宾(1994—),女,硕士,现就读于宁波大学信息科学与工程学院集成电路工程专业,从事光纤水声传感、温度传感和应力传感等传感器方面的研究,目前主要针对基于FBG的水下声音传感器进行仿真及实验验证。

*通信作者:张鑫(E-mail: zhangxin_NBU@163.com)。



能力强、体积小和易于波分复用等优点,近年来在水声探测领域获得了较快的发展^[1,2]。但由于FBG本身较小的受力面积和较大的硬度而严重影响了它的灵敏度,与此同时它还容易受到温度干扰,产生严重的温度漂移,所以在对其进行增敏的同时需要提供有效的温度补偿,以保证水听器不受温度干扰。目前常用增敏方法有端面拉伸式^[3-6]和侧面压迫式^[7-9];温度补偿方法有测量过程补偿^[10-12]和测量结果补偿^[13-15]。谭波等人^[4]采用端面拉伸式增敏方法对光纤进行增敏罐封装,实现了一定增敏,但是该封装结构中的聚合物在

温度变化时会产生较大形变,影响传感器性能。黄晔等人^[1]考虑到温度对传感器的影响,提出利用金属弹片中心毛细管的膨胀或收缩改变作用在 FBG 上的应力,抵消因温度变化引起的波长偏移,在不影响水听器原有尺寸的同时可以起到温度补偿作用,但在文章中没有对温度补偿效果进行研究。王永洪等人^[13]将温度补偿 FBG 结构与应变 FBG 结构串联,采用夹持式封装方式,根据温度 FBG 和应变 FBG 相对波长的变化确定被测结构的应变,实现温度补偿,但是该方法使用了 2 根 FBG,成本较高,不利于广泛使用。因此,本文设计一种具有温度补偿作用的新型高灵敏度 FBG 水听器,最大程度上降低温度对 FBG 的影响,实现温度补偿。

1 FBG 水听器结构及工作原理

为实现声压增敏,本文设计了一种新型的侧面拉伸式增敏结构如图 1 所示。该结构由金属架(承压面、弹簧板)、补偿材料和 FBG 组成。承压面与弹簧板为连接体,弹簧板中央开有小孔,FBG 穿过小孔后通过固化胶粘结,然后对金属架上下两端施加压力,使 FBG 处于拉伸状态^[6,16]。光纤两端穿过带有小孔的补偿材料,最后将补偿材料固定在金属架两端。承压面受压后将引起弹簧板弯曲,使弹簧板中间向两边凸出,带动 FBG 拉伸,即 FBG 产生轴向应变。由于承压面大大增加了声压的作用面积,因此利用该结构可达到增敏的效果。探头的灵敏度取决于承压面面积与弹簧板的弹性,为取得最佳的效果,本文利用有限元分析方法对探头各几何参数进行了优化设计。

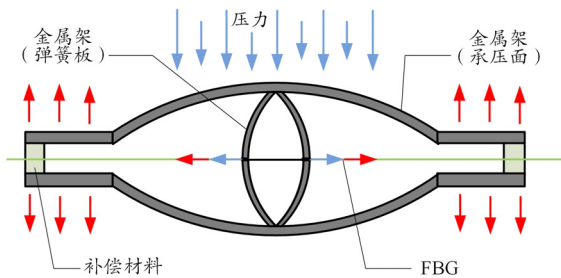


图1 侧面拉伸式增敏结构原理图

该结构在增敏的同时具有温度补偿作用。当温度变化时,FBG 受热膨胀和热光效应的影响,中心波长偏移^[1]。补偿材料同时受到热膨胀效应的影响,体积发生变化,使得金属架上、下两面距离改变,带动光纤伸缩,中心波长也产生偏移。此时,光纤受到了 2 个方向相反的作用力,通过选用合适的热膨胀系数及材料尺

寸,可控制这 2 个作用力在温度变化时大小相同、方向相反,从而实现温度补偿。

2 几何结构及计算方法

本文基于有限元分析方法进行模拟仿真,分别计算了水听器在水声环境中工作的灵敏度及封装前后的 FBG 在温度变化时的波长变化。

水听器的平面示意图、三维结构图分别如图 2、图 3 所示。水听器金属架部分选用了热膨胀系数较小的钨金属,仿真结果显示,钨金属在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内因受热形变而对整体结构造成的影响可同时被补偿而忽略。补偿材料选用了比重小、耐腐蚀的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),在温度变化时,PMMA 受热形变引起的 FBG 应变幅值与 FBG 受热时波长变化幅值基本一致且方向相反,能起到很好的温度补偿效果。

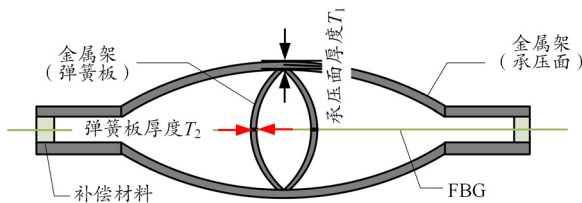


图2 水听器平面示意图

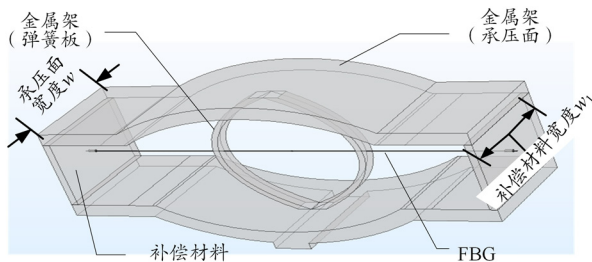


图3 水听器的三维结构图

文献[7]通过三维分析得出了沿 x 、 y 、 z 轴的应变分布 $\varepsilon_i (i=x, y, z)$, 计算出水听器的灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0 p_0} = \frac{1}{p_0} \left\{ \varepsilon_z - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{11}\varepsilon_x + P_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \right\} \quad (1)$$

其中, $\Delta\lambda$ 为中心波长偏移量, λ_0 为中心波长, p_0 为传感器受到的压强, P_{11} 和 P_{12} 分别为光纤纤芯、光纤包层弹光系数, n_{eff} 为光纤有效折射率, ε_x 、 ε_y 和 ε_z 分别为沿 x 、 y 和 z 轴的应变。此外,根据计算的灵敏度与流体静压情况下裸露(即未封装)光纤的灵敏度之比,灵敏度增益可定义为:

$$S_{\text{Gain}} = 20 \lg \left(\left| \frac{S}{S_{\text{BARE}}} \right| \right) \quad (2)$$

其中, $S_{\text{BARE}} = -2.76 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ ^[17,18]。

本文利用结构力学模块,对光纤在温度变化时的应力应变分布及其几何变形进行了数值模拟,计算出光纤光栅分别沿 x 、 y 和 z 方向的主应力分量等,然后得出FBG有效折射率偏移量,进而得出封装后的FBG在温度变化时中心波长偏移量 $\Delta\lambda_{B1}^{[9]}$ 。中心波长偏移量计算公式为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \varepsilon_{z,\text{core}} \right) \quad (3)$$

其中, λ_B 为FBG的中心反射波长, Δn_{eff} 为FBG有效折射率偏移量, $\varepsilon_{z,\text{core}}$ 为FBG纤芯轴向应变变量。根据式(3)可计算出未进行温度补偿的FBG在温度变化时的中心波长偏移量 $\Delta\lambda_{B2}$, 对比 $\Delta\lambda_{B1}$ 、 $\Delta\lambda_{B2}$ 两者大小得出温度补偿结果。

3 仿真结果与分析

3.1 灵敏度增益

本文保持水听器的结构及材料不变,分别调整水听器承压面宽度 w 、承压面厚度 T_1 和弹簧板厚度 T_2 ,使得水听器灵敏度增益达到最佳。调整补偿材料宽度 w_1 , 讨论调整该参数对水听器进行温度补偿时是否会对水听器灵敏度增益产生较大影响。

不同水听器承压面宽度、承压面厚度、弹簧板厚度及补偿材料宽度时的灵敏度增益谱如图4所示。图中峰值点对应的频率为水听器的共振频率,改变水听器的尺寸时,水听器共振频率会发生相应变化。图4(a)中,水听器未达到共振时曲线较为平坦,灵敏度增益随 w 的增加而增加;峰值点对应的灵敏度增益在水听器承压面宽度 $w=15$ mm 时达到最大值 145 dB, 在 $w=20$ mm 时灵敏度增益略微下降。这表明在一定范围内,增大受力面积可以提高水听器的灵敏度增益。同时随着水听器承压面宽度 w 的增加,水听器的共振频率增大,即通过调整参数 w 可以制作出工作在不同频率处的水听器。将 $w=15$ mm 作为定值,通过改变水听器承压面厚度 T_1 得到灵敏度

增益谱如图4(b)所示。可以看出,随着 T_1 增大,水听器共振频率呈现增大的趋势,其灵敏度增益随着 T_1 的增大而减小;当 $T_1=2$ mm 时水听器灵敏度增益最大。固定水听器承压面宽度 $w=15$ mm、厚度 $T_1=2$ mm,改变水听器弹簧板厚度 T_2 得到灵敏度增益谱如图4(c)所示。可以看出,不同弹簧板厚度下的水听器灵敏度增益都比较高,没有表现出像图4(a)、图4(b)那么大的差异,且水听器共振频率随着弹簧板厚度的增加有小幅度的增大。因此,调节 T_2 可以在不降低水听器灵敏度增益的同时调节水听器共振频率,使其工作在特定频率处。由于补偿材料的体积对补偿效果有较大影响,随着水听器几何参数的变化,需要对补偿材料宽度 w_1 进行相应的调节,以保证补偿效果最佳。对于调整参数 w_1 是否会影响水听器灵敏度增益,本文做了相应的仿真:固定使灵敏度增益最佳的水听器几何参数 $w=15$ mm、 $T_1=2$ mm 和 $T_2=0.9$ mm 不变,通过改变补偿材料宽度,得到灵敏度增益谱如图4(d)所示。可以看出,在 w_1 分别为 3 mm、5 mm 和 10 mm 时,峰值对应的灵敏度增益及频率基本一致,仅在 $w_1=15$ mm 时水听器灵敏度增益有所提高。整体上补偿材料宽度的改

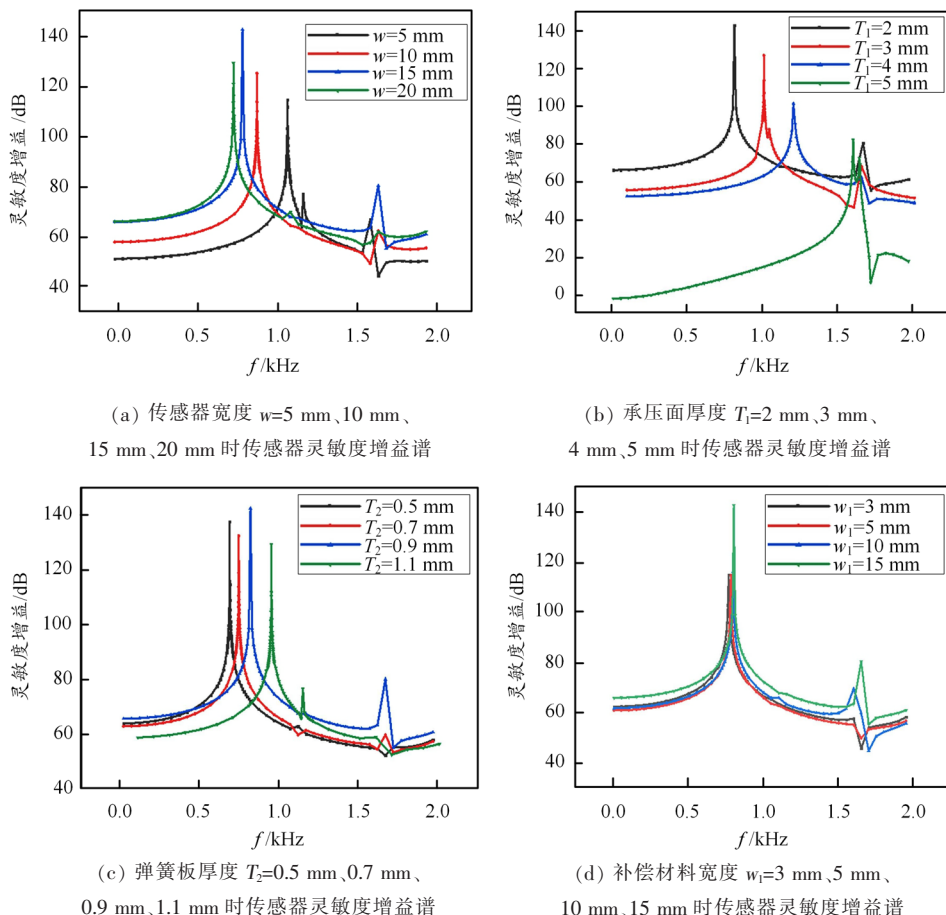


图4 不同几何参数下水听器的灵敏度增益谱

变没有对水听器产生大的影响,所以可通过改变该参数实现最佳温度补偿。

由以上分析可知,当 $w=15\text{ mm}$ 、 $T_1=2\text{ mm}$ 和 $T_2=0.9\text{ mm}$ 时水听器的灵敏度增益最佳,在共振频率处灵敏度增益达最大值 145 dB。调整水听器参数 w 、 T_1 和 T_2 可以改变水听器共振频率,使其工作在特定频率处,用于检测特定的频率,为主动声呐接收器、水听器阵列等检测特定频率声音水听器的制作提供了参考方法。

3.2 温度补偿

FBG 温度补偿前后波长变化曲线图如图 5 所示,黑色曲线为未封装 FBG 在温度变化时的波形,可看出 FBG 中心波长偏移量与温度的变化呈线性关系,其它曲线为封装后改变水听器补偿材料宽度 w_1 时的补偿结果。由图 5 可知,当 $w_1=3\text{ mm}$ 时水听器的温度补偿效果最好,在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波长偏移量为 0.01006 nm 。随着补偿材料宽度 w_1 增大,受温度影响时材料体积变化较大,引起的 FBG 应变超过了温度对 FBG 的影响,产生了过度补偿。 $w_1=3\text{ mm}$ 时 FBG 对温度的响应整体较为平稳,在接近 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时略微向下,这是因为温度较高时,补偿材料热膨胀系数增大引起的 FBG 应变过大,产生过补偿。若水听器长期工作在此温度范围可通过调节参数 w_1 减小误差。对比温度补偿前后,水听器受温度的影响大幅度减小,实现了温度补偿。

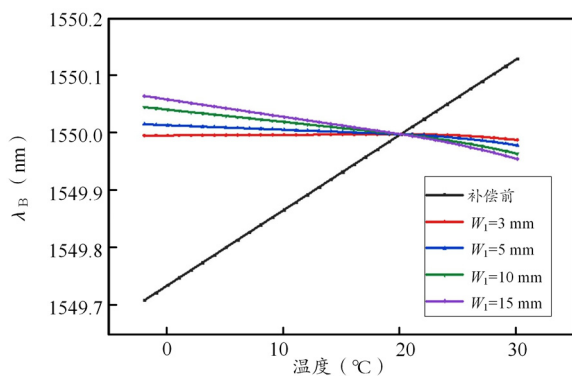


图 5 温度补偿前与温度补偿后对比图

4 结束语

本文利用新型的带有温度补偿的侧面压迫式增敏结构对 FBG 进行封装,有效提升 FBG 探测水声的灵敏度,同时大大改善温度变化对水听器的影响。经仿真计算,在海洋温度变化范围($-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$)内,FBG 中心波长偏移量仅为 0.01006 nm 。对水听器几何参数进行分析可知:在一定范围内,水听器承压面宽度越

大灵敏度越高,水听器承压面越薄灵敏度越高;水听器共振频率随水听器承压面厚度及弹簧板厚度的增加而增加,最终得到水听器在共振频率处的灵敏度增益最高为 145 dB。根据这一规律来调节水听器的共振频率,可使其工作在不同频率处,应用于特定频率检测,如主动声呐的信号接收,同时为水听器阵列的研制提供了一种参考方法。

参考文献:

- [1] ARKWRIGHT J W, KARAS A R, PAPAGEORGIOU A W, et al. A passive optical fibre hydrophone array utilising fibre Bragg grating sensors [C]//Proceedings of SPIE, 2018, DOI: 10.1117/12.2291102.
- [2] 徐汉锋,李东明,吴国军. 光纤光栅水听器研究进展[J]. 声学及电子工程, 2014(1): 1-5.
- [3] 赵申,罗裴,梁磊,等. 光纤 Bragg 光栅水听器的实验研究[J]. 传感器与微系统, 2004, 23(6): 12-13.
- [4] 谭波,余勃彪,黄俊斌. 光纤光栅水听器的动态特性研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1382-1386.
- [5] 唐波,黄俊斌,顾宏灿,等. 应用于舷侧阵的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 256-261.
- [6] 唐波,黄俊斌,顾宏灿,等. DFB 光纤激光水听器预应力理论与实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 131-136.
- [7] MOCCIA M, PISCO M, CUTOLO A, et al. Opto-acoustic behavior of coated fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2011, 19(20): 18842-18860.
- [8] 田军政. 光纤水听器梭形封装结构灵敏度分析 [J]. 信息通信, 2014(11): 31-32.
- [9] SRIDHAR S, SEBASTIAN SUNEETHA, ASOKANS. Highly sensitive fiber Bragg grating-based pressure sensor using side-hole packaging [J]. APPLIED OPTICS, 2019, 58(3): 535-539.
- [10] 王艳,闫卫平,张玉书,等. 基于负膨胀材料的光纤 Bragg 光栅温度补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S1): 10-11.
- [11] 黄晟晔,周金海,倪娟,等. 带温度补偿的新型 FBG 水听器[J]. 光机电信息, 2011, 28(5): 22-26.
- [12] 梁磊,曹珊,仇磊,等. 一种温度自补偿的高灵敏度光纤光栅应变传感器[J]. 光电子·激光, 2017(7): 5-9.
- [13] 王永洪,张明义,张春巍,等. 夹持式温度自补偿光纤布喇格光栅应变传感测试技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 94-98.
- [14] 樊晓宇. 光纤光栅应变传感器温度补偿系统研究 [J]. 光通信技术, 2012, 36(6): 7-9.
- [15] JIANZHI L, BAOCHEN S. Theory analysis of novel fiber Bragg grating temperature compensated method based on thermal stress [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(2): 84-90.
- [16] 陈昊,闫光,庄炜,等. 光纤光栅应变传感器预紧封装及传感特性研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1128-1132.
- [17] HILL D J, CRANCH G A. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fiber Bragg grating [J]. Electronics Letters, 1999, 35 (15): 1268-1269.
- [18] HOCKER G B. Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis[J]. Applied optics, 1979, 18(21): 3679-3683.