

投弃式光纤海洋温深传感器光路设计与优化

赵强¹, 陈世哲¹, 吕日清², 张继明¹, 张可可¹, 张丽³, 丁园强³

¹齐鲁工业大学(山东省科学院)海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061;

²东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

³齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省海洋仪器仪表科技中心, 山东 青岛 266061

摘要 针对海洋剖面观测的需求和传统投弃式海洋温度剖面测量仪(XBT)存在的问题,提出一种基于光纤布拉格光栅-长周期光纤光栅(FBG-LPG)级联结构的光纤海水温深剖面传感器(光纤 XBT),设计了传感器光路,利用光纤端面反射镜简化了光路结构,通过调整反射率优化了系统性能。实验表明,当光纤端面反射率在 48.8%~72.5% 时,FBG 和 LPG 的谐振峰相对强度较为合理,整体光谱波形较好,利于解调。

关键词 光纤光学; 投弃式深温计; 光纤光栅; 光纤传感; 海洋探测

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060601

Design and Optimization of Optical-Path for Expendable Optical Fiber Ocean Temperature-Depth Sensor

Zhao Qiang¹, Chen Shizhe¹, Lü Riqing², Zhang Jiming¹,

Zhang Keke¹, Zhang Li³, Ding Yuanqiang³

¹Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao, Shandong 266061, China;

²College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

³Shandong Oceanographic Instrumentation of Science and Technological Center, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract Aiming at the requirements of oceanic profile observation and problems of traditional expendable bathythermograph(XBT), we propose a kind of optical fiber temperature-depth oceanic profile sensor based on fiber Bragg grating-long period fiber grating (FBG-LPG) cascaded structure (fiber XBT), and design and optimize the optical path by using the reflective optical fiber end mirror. The experimental results show that, when the end reflectivity of fiber is in the range from 48.8% to 72.5%, the resonant peaks of FBG and LPG are reasonable and the whole spectrum is suitable for demodulation.

Key words fiber optics; expendable bathythermograph; optical fiber gratings; fiber sensors; ocean detection

OCIS codes 060.2340; 050.2770; 060.2370; 170.6050

1 引言

投弃式温度剖面测量仪(XBT)是海洋监测中常用的设备,具有使用方便、价格低廉等优点,利用船舶或飞机将其批量投放至特定海域,可快速获取

大面积海域的温深剖面资料,为海洋调查、科学研究、军事应用提供了先进的测量手段,应用广泛^[1-3]。传统的 XBT 系统一般由传感探头(含下线轴)、发射装置(含上线轴)和船载数据采集处理系统组成。然而,传统传感探头一般采用电学方法(热敏电阻探测

收稿日期: 2017-11-07; 收到修改稿日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61405106,41406104)、国家重点研发计划(2017YFC1403303)、山东省重点研发计划(2017GHY215010,2016GGH4501)、山东省科学院青年基金(2014QN029,2015QN026)、青岛市应用基础研究计划(17-1-1-99-jch)

作者简介: 赵强(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事光纤传感在海洋观测方面的研究。

E-mail: zqhero9494@163.com

海水温度)进行探测,且内置测量电路和电池,存在漏水漏电的风险^[4]。此外,其深度数据由探头下落速度和下落时间估算得到,受海底浪流和温度变化等因素的影响,计算误差较大^[5-6]。这些亟待解决的问题严重影响了传统 XBT 在实际应用过程中的工作效率。

光纤光栅传感器具有抗干扰能力强、灵敏度高、体积小、本征绝缘等优点^[7],特别适合在海洋环境中的应用。近年来,光纤光栅级联因传感特性新颖成为研究热点^[8-10],其中对光纤布拉格光栅-长周期光纤光栅(FBG-LPG)级联结构的研究主要有两个方向:一是针对包层模式再耦合的研究^[11],即利用 FBG 和 LPG 近距离模式耦合后形成的干涉光谱进行多参数同步检测,但包层模式再耦合的发生受间隔光纤长度^[12]、LPG 透射特性^[13]、FBG 反射特性^[14]和光纤相位角失配^[15]等因素的影响,传感器灵敏度低、制作工艺复杂,难以满足海洋观测的需求;二是针对边缘滤波的研究^[16],即利用 LPG 吸收峰边缘的线性区对 FBG 进行滤波解调,将 FBG 波

长随外界参数的变化转化为 FBG 反射峰强度的变化。采用参考光路的方法虽能在一定程度上减轻光源功率起伏、连接处损耗和传输过程微弯等因素的影响^[17],但边缘滤波应用时要求两器件的光谱相互重叠,且对 LPG 透射峰的上升(或下降)沿线性范围和线性度有较高要求。

本文将 FBG 与 LPG 视为两个独立的器件,独立级联后,分别对外界环境参数进行检测,既充分利用两个器件各自的优点,又避免了上述问题。而后,采用光纤端面镜的方式,将透射光路结构转化为反射式光路,便于后期光纤 XBT 纤轴的绕制和布放。与此同时,通过改变光纤端面镜反射率来调节 FBG-LPG 独立级联系统的光谱特性,实现 FBG 和 LPG 的准确寻峰解调。该研究结果可为海洋温深剖面快速大面积观测提供一种新的思路和方法。

2 光路设计与实验

2.1 透射光路结构简化与器件串并联

图 1 为 FBG-LPG 结构光路。

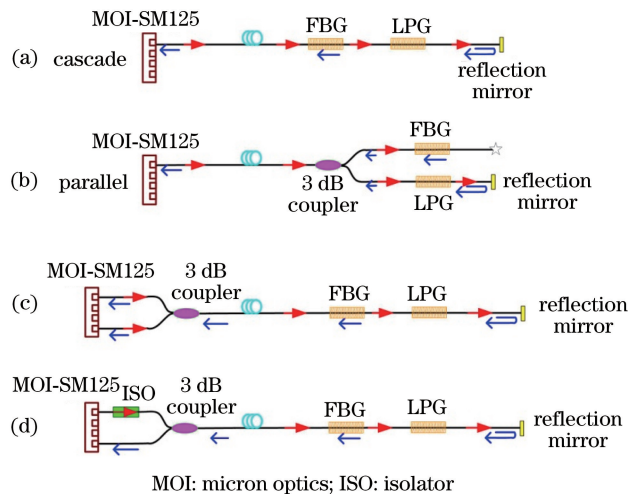


图 1 FBG-LPG 级联结构光路图。(a)串联;(b)并联;(c)接入 3 dB 耦合器分光路;(d)加入隔离器

Fig. 1 Optical path diagrams of FBG-LPG cascaded structure.

(a) Cascade; (b) parallel; (c) splitting with 3 dB coupler; (d) with ISO

为了便于光纤 XBT 系统中纤轴的绕制和传感器的布放,将传输光路设计为单根光纤,即 FBG 和 LPG 的输入输出信号共用一个信道。作为反射型器件,FBG 输入输出共用一个信道是可行的。针对透射型器件 LPG 输入输出光通常为双信道的问题,利用光纤端面反射镜将透射 LPG 的光再次反射回光路,从而实现了单信道通信。如图 1 所示,传感部分的 FBG 和 LPG 可以串联[图 1(a)]或并联[图 1(b)],但考虑到物理结构的复杂程度将会对传

感器的制作工艺及环境适用性产生一定影响,本研究选择 FBG 和 LPG 串联的方式。

FBG-LPG 串联结构通常有两种顺序,即 FBG 在光路近末端(近反射镜端)或 LPG 在近末端。实验测试表明,在 FBG 和 LPG 的串联结构中,两种串联顺序对光路结构和整体光谱特性没有显著影响。然而,探头有一定的配重和落水高度,为防止布放落水瞬间直接冲击压力敏感元件,特将 LPG 设置于近末端,顺序结构如图 1(a)所示。

图 1(c)和(d)分别为接入 3 dB 耦合器和接入隔离器的改进光路图。

2.2 双器件同步解调与光源间干涉

如图 2(a)所示,FBG 的光谱表现为反射峰,LPG 则为透射波谷,然而目前商用的 MOI-SM125 解调仪单个通道无法同时解调 FBG 和 LPG 的峰值。针对这一问题,提出在系统的解调端接入 1:1 的 3 dB 耦合器,将返回光分成等强度的两束,分别接入 SM125 的两个通道,光路结构如图 1(c)所示。SM125 通道之间是独立运行的,即含有独立光源和探测器,可得到两条几乎重叠的透射谱线,如图 2(b)所示(为了便于观察,对一个通道进行了衰减)。为了能够精确寻峰,实验中 FBG 的寻峰条件设定如下:阈值为

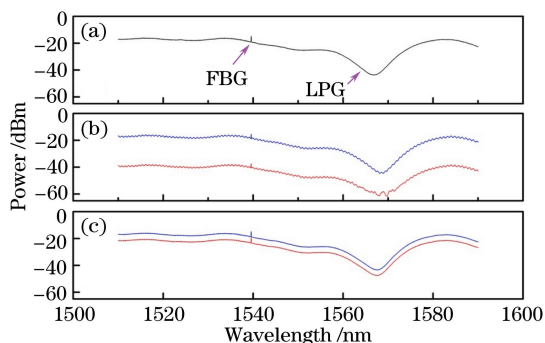


图 2 光路结构不同的光谱图。(a)串联后直接解调;

(b) 3 dB 耦合器分光路;(c)加入隔离器

Fig. 2 Spectra of different optical path structures.

(a) Direct demodulation after cascaded;

(b) splitting with 3 dB coupler; (c) with ISO

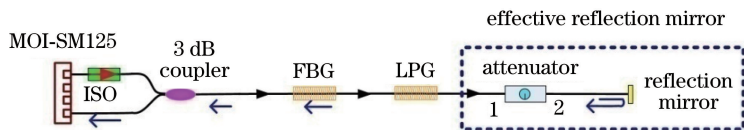


图 3 实验光路图

Fig. 3 Optical path diagram of experiment

FBG 和 LPG 均采用紫外准分子激光掩模法写制,其特征波长分别为 1539.5 nm 和 1568.5 nm;解调仪采用 MOI-SM125;光纤端面反射镜在(1550 ± 40) nm 范围内反射率为 95%。当衰减器完全放开时,实验测试其透光比约为 86.1%,此时图 3 蓝框部分的实际有效反射率约为 81.8%。通过增大衰减器的衰减强度,获得 8 种不同有效反射率时的光谱变化规律,如图 4 所示。反射率与 FBG/LPG 谐振峰相对强度的关系如图 5 所示。

FBG 反射峰相对强度随端面镜反射率增大而减小,且二者几乎呈线性关系。端面反射率在

-30 dBm,相对阈值为 -8 dBm,带宽为 0.01 nm; LPG 的寻谷条件设定如下:阈值为 -50 dBm,相对阈值为 -8 dBm,带宽为 0.1 nm。

采用 3 dB 耦合器分光路的方法实现了 FBG 和 LPG 峰值信号的同步解调,光路如图 1(c)所示。通过在 3 dB 耦合器的一端加入光纤隔离器的方式,消除了图 2(b)中接收信道光源的干扰现象,改善光谱质量,改进光路如图 1(d)所示,实验结果如图 2(c)所示。

3 光谱特性分析与优化

3.1 光谱特性的分析与验证

从图 2(a)可知,在 1510~1590 nm 波长范围内,LPG 的透射吸收峰非常明显,损耗强度约为 17 dBm;然而,FBG 反射峰强度仅为 2 dBm~3 dBm,难以找到准确的反射峰,从而造成 FBG 解调困难。文献[18]分析了 FBG-LPG 级联结构光谱传播过程,得出光纤端面反射率降低,FBG 反射峰的相对强度将会变大的结论。并且文献[18]给出了特定反射率(95%和 70%)时 FBG-LPG 级联结构光谱对比图,初步验证了其结论的正确性。

3.2 光谱特性的优化

图 2(a)中 FBG 的特征反射峰强度仅有 2 dB,难以准确寻峰解调。利用如图 3 所示的光路结构,对光谱特性优化进行了初步探索。其中,光纤端面反射镜与光纤可调衰减器串联后作为有效反射镜,如图 3 蓝框中所示。

48.8%~85.8%时,LPG 反射峰相对强度几乎不变,光谱波形光滑,便于解调仪的寻峰探测。如图 4(e)所示,FBG 和 LPG 的反射峰相对强度分别约为 10 dB 和 17 dB,且 LPG 的光谱波形较好。端面反射率在 18.5%~48.8%时,LPG 反射峰相对强度迅速变小,光谱波形出现毛刺,寻峰探测变得困难。如图 4(f)所示,FBG 和 LPG 的反射峰相对强度分别约为 22 dB 和 13 dB,但不利于寻峰解调。随着有效反射率的降低,FBG 相对反射峰高度逐渐增加,有利于 FBG 反射波长的寻峰探测。但是,整体光谱强度的下降会导致 LPG 整体

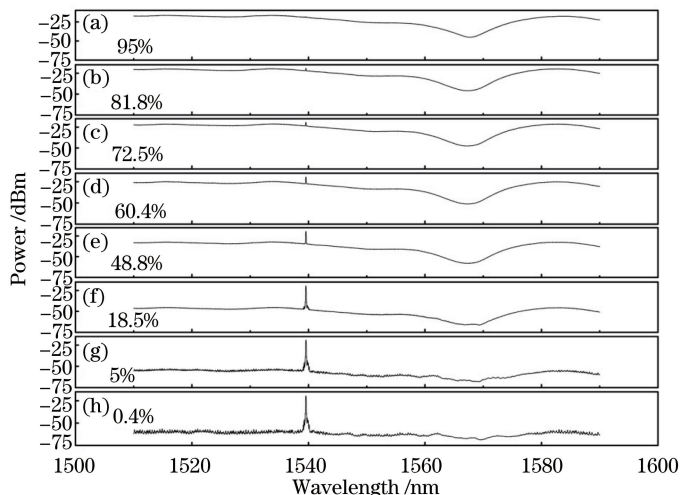


图 4 不同有效反射率的光谱图。(a) 95.0%;(b) 81.8%;(c) 72.5%;(d) 60.4%;(e) 48.8%;(f) 18.5%;(g) 5.0%;(h) 0.4%

Fig. 4 Spectra with different effective reflectivities.

(a) 95.0%; (b) 81.8%; (c) 72.5%; (d) 60.4%; (e) 48.8%; (f) 18.5%; (g) 5.0%; (h) 0.4%

光谱下移,波形逐渐变差,最终无法观测,如图 4(h)所示。综上所述,图 5 中阴影部分是较为理想的端面反射率设定区间,其反射率为 48.8%~72.5%。

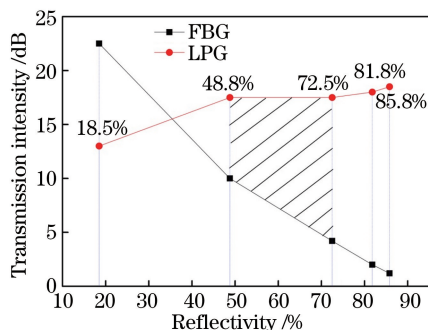


图 5 不同反射率下 FBG 及 LPG 的光谱峰值

Fig. 5 Spectral peaks of FBG and LPG with different reflectivities

4 结 论

基于 FBG-LPG 独立级联特点,定性分析了 FBG-LPG 级联光谱特性,设计并优化了光纤 XBT 串联光路。通过在光路末端接入光纤端面反射镜,实现了 FBG 和 LPG 单传输信道共享,从而便于后期纤轴的绕制和传感器布放,增强了传感器在投弃式场合中的适用性。利用解调端加设光纤 3 dB 耦合器分光,实现了 FBG-LPG 峰谷极值的同步解调;通过在光源出射端串接光纤隔离器,避免了解调仪双光源间的干涉问题。当反射率在 48.8%~72.5% 范围时,光纤 XBT 光谱结构较好,便于准确解调。

致谢 感谢西南交通大学郑良副研究员对本文的建议和修改。

参 考 文 献

- [1] Mesecar R, Wagner J. An XBT digital recording and display system [C]. IEEE OCEANS' 79, 1979: 1151293.
- [2] Bringas F, Goni G. Early dynamics of deep blue XBT probes [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(12): 2253-2263.
- [3] Abraham J P, Cowley R, Cheng L. Quantification of the effect of water temperature on the fall rate of expendable bathythermographs [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016 (6): 1271-1284.
- [4] Goes M, Goni G, Dong S. An optimal XBT-based monitoring system for the South Atlantic meridional overturning circulation at 34° S [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(1): 161-181.
- [5] Stark J, Gorman J, Hennessey M, et al. A computational method for determining XBT depths [J]. Ocean Science, 2011, 7(6): 733-743.
- [6] Cheng L, Abraham J, Goni G, et al. XBT science: assessment of instrumental biases and errors [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(6): 924-933.
- [7] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.

- [8] Zhang L, Yu Q X. An improved demodulation method for F-P and FBG multiplexing system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, 20(8): 1008-1011.
张磊, 于清旭. 光纤 F-P 腔与 FBG 复用传感器精确解调方法研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2009, 20(8): 1008-1011.
- [9] Ding J F, Zhang A P, Shao L Y, *et al.* Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(6): 1247-1249.
- [10] Luo Z H, Wen H Q, Guo H Y, *et al.* A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22799-22807.
- [11] Zhang A P, Tao X M, Chung W H, *et al.* Cladding-mode-assisted recouplings in concatenated long-period and fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(14): 1214-1216.
- [12] Cao Y, Gu Z T. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0405003.
曹莹, 顾铮. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405003.
- [13] Han M, Guo F, Lu Y. Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 399-401.
- [14] Sun A, Wu Z. Hybrid long-period-grating and fiber Bragg grating for cladding-mode-recoupling-based discrimination of temperature and strain [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(4): 044402.
- [15] Fu M Y. Refractive index sensing based on the reflectivity of the backward cladding-core mode coupling in a concatenated fiber Bragg grating and a long period grating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1415-1420.
- [16] Zhou R, Qiao X G, Wang R H, *et al.* Seismic wave interrogation system based on the linear edge filter characteristics of long period fiber grating [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(7): 987-991.
周锐, 乔学光, 王若晖, 等. 基于长周期光纤光栅线性边缘滤波的地震波解调系统 [J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(7): 987-991.
- [17] Zhu Z, Liang D K, Sun H B. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0305001.
朱珠, 梁大开, 孙红兵. 基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统 [J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305001.
- [18] Zhao Q, Yan X K, Zhang K K, *et al.* Research progress of fiber Bragg grating-long period fiber grating cascaded structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 080002.
赵强, 闫星魁, 张可可, 等. 光纤布拉格光栅-长周期光纤光栅级联结构研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 080002.