

文章编号:1004-4213(2011)04-0578-5

# 基于 PCF-LPG 的差分算法实现对光纤传感器的 的噪音消除

王云鹏,赵春柳,董新永,康娟

(中国计量学院 光电子技术研究所,杭州 310018)

**摘 要:**为了有效消除光源抖动及系统不稳定因素给光纤传感器带来的噪音干扰,提高光纤传感器的准确度,本文提出了一种基于光子晶体光纤长周期光栅的差分算法.利用光子晶体光纤长周期光栅良好的温度稳定性及宽光谱滤波特性,同时监测位于光子晶体光纤长周期光栅透射谱正负斜率线性区域内的两个信号功率变化.这两个信号是经同一路径到监测设备的,包含光源抖动以及系统其它不稳定因素带来的噪音干扰,对这两个信号进行差分处理即可有效消除噪音干扰,并将其应用于光纤环镜温度传感器.结果表明:通过基于光子晶体光纤长周期光栅的差分处理,在光源功率变化 $\pm 10\%$ 的情况下,差分值基本保持不变,由此获得的温度测量值与真实值相对误差分别为 0.04 和 0.03;与未引入差分算法相比,传感器准确度从约 76% 提高到约 97%.本文提出的基于光子晶体光纤长周期光栅的差分算法可以有效消除光纤传感器内功率抖动所带来的噪音干扰,大大提高系统的准确度.

**关键词:**光子晶体光纤;长周期光栅;差分算法;光纤传感器;噪音

**中图分类号:** TN25

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114004.0578

## 0 引言

光纤传感器具有质量轻、体积小、抗电磁干扰等优点,已得到广泛的研究和应用<sup>[1-3]</sup>.基于光纤的传感器通常可以通过检测光的强度、相位、极化、波长等的改变来检测待测量.但有些如波长、极化等参量不易检测,所以有时要在传感系统内引入解调器,把它们转化为易检测量.目前,光纤传感解调技术主要有用于光纤光栅传感系统的匹配光纤光栅解调技术<sup>[4]</sup>、滤波扫描寻峰技术<sup>[5]</sup>、长周期光栅解调技术<sup>[6]</sup>、以及用于干涉型光纤传感系统的相位生成载波技术等<sup>[7]</sup>.虽然光纤传感解调方法较多,但准确度高的解调单元仍是设计的难点.其中需要考虑的一个重要问题是如何减少光源抖动及传感系统各种不稳定因素所带来的干扰,提高系统准确度,减少测量误差.常用的方法是在光电转换后利用差分电路消除光源抖动带来的干扰<sup>[8]</sup>.这种方法基于电路解调实现噪音滤除,系统引入有源器件,可能限制传感器

的适用范围.

本文提出了一种基于光子晶体光纤长周期光栅(Long-period Grating in a Photonic Crystal Fiber, PCF-LPG)的差分算法,利用 PCF-LPG 良好的温度稳定性及宽光谱滤波特性,同时监测位于 PCF-LPG 信号功率进行差分处理有效消除噪音干扰.将其应用于光纤环镜(Fiber Loop Mirror, FLM)温度传感器中,结果表明通过基于 PCF-LPG 的差分处理,光源抖动等系统不稳定因素带来的噪音干扰被有效消除,并且系统灵敏度提高一倍.

## 1 原理

PCF-LPG 是一种新型光纤光栅,具有良好的温度稳定性<sup>[9]</sup>,研究人员已经利用 PCF-LPG 实现了温度不敏感的应力传感<sup>[9]</sup>及温度不敏感的传感解调器<sup>[6]</sup>.

若利用 PCF-LPG 作为光纤传感的解调器,本文只在它的线性区内监测一个波长信号的功率变

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB327804)、基于光子晶体光纤的偏振器件研究(No. QJD0902005)和浙江省教育厅重点项目(No. Z200909231)资助

**第一作者:**王云鹏(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为长周期光纤和光子晶体光纤. Email: seanxiangyi@live.cn

**导师(通讯作者):**赵春柳(1973),女,教授,博士,主要研究方向为光纤光栅、光纤放大器和激光器以及光子晶体光纤的应用.

Email: zhchunliu@hotmail.com

**收稿日期:** 2010-04-09; **修回日期:** 2010-08-17

化,当待测量变化时,这个被监测波长的信号功率就会发生相应的变化,所以利用这一关系可以实现对光信号的解调<sup>[6]</sup>.然而被监测信号中往往掺杂有光源抖动以及系统其它不稳定因素带来的噪音,给传感系统带来较大误差.

为消除噪音带来的不利影响,提高传感系统的准确度,可利用 PCF-LPG 的宽谱特性,在 PCF-LPG 透射谱正负斜率线性区域内各监测一个波长处的信号功率变化.如图 1 中的  $W_1$  和  $W_2$ ,其中  $W_1$  的变化直接与待测量相关, $W_2$  可选作参考点,可与待测量无关.引入差分量, $\Delta W = (W_1 - W_2) / (W_1 + W_2)$ ,由于  $W_1$  和  $W_2$  是光源经同一路径到监测设备的,所以尽管  $W_1$  中可能包含光源抖动以及系统其它不稳定因素带来的噪音干扰,但经过差分处理, $\Delta W$  仅与信号有关,因此可有效消除系统噪音.

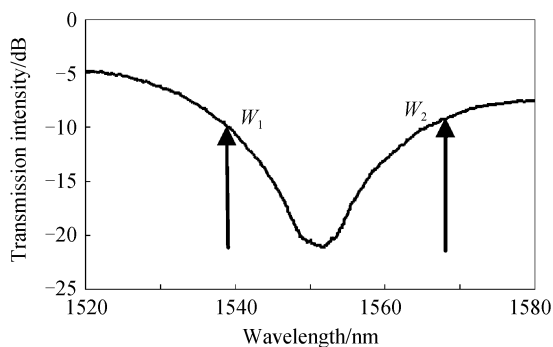


图 1 PCF-LPG 的透射谱

Fig. 1 Transmission spectra of the LPG in PCF

## 2 实验及结果

本文设计了一个高双折射光纤环镜 (High-Birefringence Fiber Loop Mirror, HiBi-FLM) 温度传感系统,实验装置如图 2. 宽带光源发出的光进入 HiBi-FLM,其透射光经 PCF-LPG 滤波后入射到分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪 (OSA, YOKOGAWA735301).

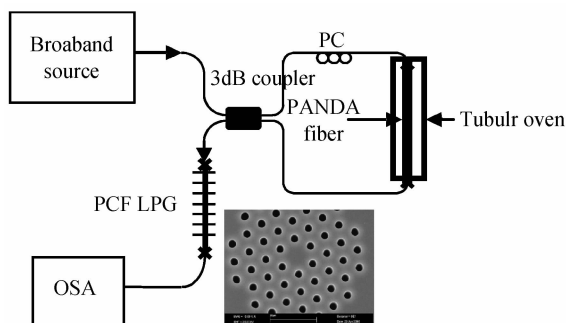


图 2 接有 PCF-LPG 的光纤环镜实验装置

Fig. 2 Experimental setup of a FLM concatenated with a LPG in PCF

HiBi-FLM 由 3 dB 耦合器,熊猫保偏光纤 (Polarization Maintaining Fiber, PMF) 和偏振控制器 (PC) 构成. 保偏光纤由天津 46 所提供,长 30.5 cm,纤芯直径约 10  $\mu\text{m}$ ,在波长 1550 nm 处的双折射  $\Delta n = 6.24 \times 10^{-4}$ ,其两端与单模光纤 (康宁 SMF-28) 熔接,FLM 总插入损耗为 2.4 dB. HiBi-FLM 透射谱两谐振峰的间距  $\Delta\lambda$  由  $\Delta\lambda = \lambda^2 / \Delta n \cdot L$  ( $L$  为光纤环镜长度) 决定,本文选取保偏光纤长度为 30.5 cm,以保证 FLM 两相邻谐振峰分别落在 PCF-LPG 正负斜率线性透射区域. HiBi-FLM 的输出光谱如图 3. 在实验中,整根保偏光纤为温度传感单元.

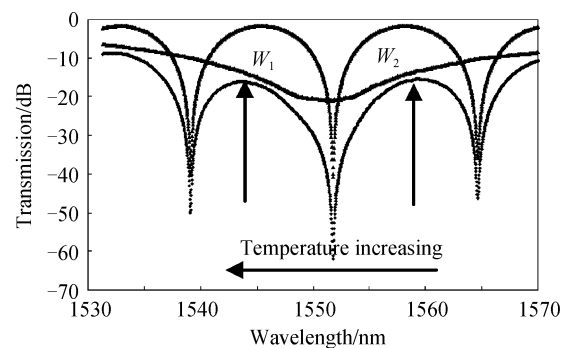


图 3 HiBi-FLM、输出信号和长周期光栅的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of the FLM and of the LPG in PCF and the output signal

实验中所用的 PCF 是由 Crystal Fiber A/S 生产的无截止单模光纤 (Endless Single Mode Photonic Crystal Fiber, ESM-PCF),其剖面电镜扫描图如图 2 中插图. PCF 模场直径 6.4  $\mu\text{m}$ ,空气孔直径 3.55  $\mu\text{m}$ ,孔间距 7.78  $\mu\text{m}$ ,包层直径 125  $\mu\text{m}$ ,PCF 总长 5cm. PCF 两端用熔接机 (Erisson FSU975) 与单模光纤 (康宁 SMF-28) 相熔接,熔接损耗约为 0.5 dB. 实验中所用的 PCF-LPG 是利用二氧化碳脉冲激光器制作<sup>[10]</sup>,LPG 的栅格周期为 467  $\mu\text{m}$ ,周期数为 40. LPG 透射谱如图 1,PCF-LPG 的谐振波长为 1552.45 nm,损耗强度约 -20 dB. PCF-LPG 透射光谱负斜率线性区的波长范围是 1520~1552.45 nm,宽度约 32 nm,正斜率线性区的波长范围是 1552.45~1580 nm,宽度约 28 nm.

为研究 PCF-LPG 的温度特性,将其置入一个温控箱内,使温控箱的温度从 25  $^{\circ}\text{C}$ ~100  $^{\circ}\text{C}$  变化,通过光谱仪观察 PCF-LPG 的透射谱,得到在不同温度下 PCF-LPG 的透射曲线,如图 4. 从图中可知温度变化 1  $^{\circ}\text{C}$  时 PCF-LPG 的谐振波长只漂移 7 pm 左右,因此 PCF-LPG 具有良好的温度稳定性.

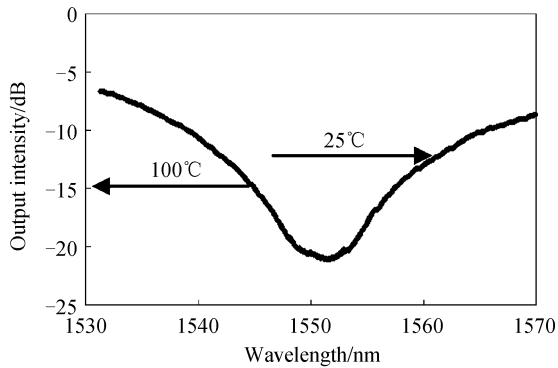


图4 PCF-LPG在不同温度下的透射谱(25~100°C)  
Fig. 4 Transmission spectra of the PCF-LPG at the different temperature (25~100°C)

将保偏光纤置入准确度为0.1°C的温控箱内,每间隔0.5°C调节温控箱温度从50°C~58°C变化,HiBi-FLM在热光效应和热膨胀的共同作用下透射谱向短波漂移,而PCF-LPG的透射谱基本保持稳定,整个系统输出光谱向短波漂移,如图3.

监测一个波长处信号的功率变化可反映温控箱的温度变化.图5为监测位于PCF-LPG负斜率线性区域内的FLM谐振峰(1545 nm附近)随温度变化的工作曲线.信号功率 $W_1$ 随温度升高而增加,如果采用线性拟合功率 $W_1$ 对温度的灵敏度约为0.0056 dB/°C.当监测位于PCF-LPG正斜率线性区域内的FLM谐振峰(1558 nm附近)的功率变化,同样可以获得温控箱内温度变化,图5给出了 $W_2$ 随温度变化的情况.当温度升高时 $W_2$ 降低,所对应的温度灵敏度约为0.0027 dB/°C.然而当光源抖动或存在不确定干扰时, $W_1$ (或 $W_2$ )变为 $W'_1$ (或 $W'_2$ ),这时由传感器得出的温度将与真实值偏离,偏离量 $\Delta T = 188.68 \cdot |W'_1 - W_1|$ (或 $\Delta T = 370.37 \cdot |W'_2 - W_2|$ )的变化.若在实验中同时监测这两个相邻谐振峰的功率,即同时监测 $W_1$ 和 $W_2$ .通过对 $W_1$ 和 $W_2$ 做差分处理 $\Delta W = (W_1 - W_2)/(W_1 + W_2)$ 可获得 $\Delta W$ .由于 $W_1$ 和 $W_2$ 都是由宽带光源发出的光经HiBi-FLM入射到监测设备,是在同一条件下同时测得的,又因为它们分别位于PCF-LPG透射谱的负斜率区和正斜率区,在温度变化时 $W_1$ 和 $W_2$ 的变化趋势相反,所以差分之后的 $\Delta W$ 不仅滤除光源抖动及系统其它不稳定因素带来的噪音干扰,而且使系统的灵敏度加倍. $\Delta W$ 与温度的变化关系如图6. $\Delta W$ 随温度的增加而增大, $\Delta W$ 与温度变化关系可近似为二次函数,关系式为 $y = -0.012x^2 + 0.2327x - 0.255$ .其拟合度达0.9988.在实验中以光源功率的增大和减少来模拟光源抖动或不确定的干扰,进一步考察本方案是否能够有效消除噪音影响.图6为光源功率变化±10%及光源功率保持不

变三种情况下,测量的差分值与温度变化的关系曲线.如图6,三种情况下的关系曲线基本保持一致,充分说明基于PCF-LPG的差分算法可以有效地消除系统的噪音.当光源功率变化±10%时,把温度变化2°C测得功率值代入光源功率恒定时的拟合函数反求温度分别得1.92°C和1.94°C,相对误差分别为4%和3%.与传感器未引入差分算法相比,HiBi-FLM温度传感器的准确度从约76%提高到约97%.

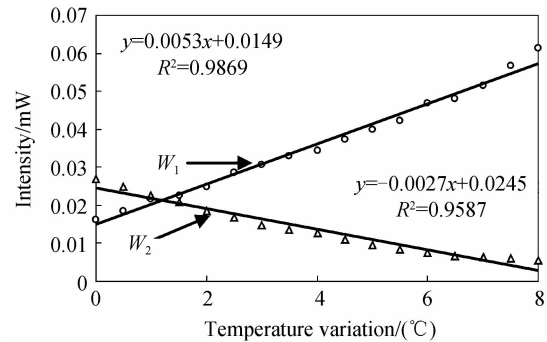


图5  $W_1$ 、 $W_2$ 和温度的关系曲线  
Fig. 5 The relation curve of  $W_1$ ,  $W_2$  and temperature

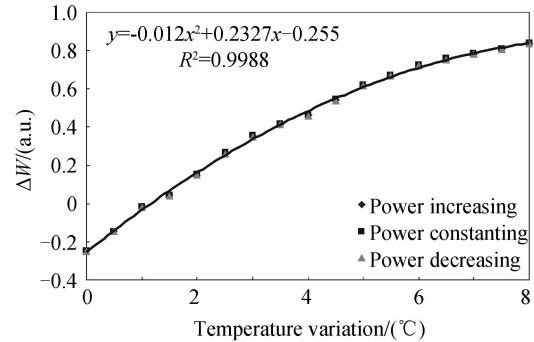


图6 光源功率变化时 $\Delta W$ 与温度变化的关系曲线  
Fig. 6 The relation curve of  $\Delta W$  and temperature when the power of the light source changes

考虑到PCF-LPG透射谱的不对称性可能影响差分算法对干扰和噪音的有效补偿,对实验中所用的PCF-LPG的透射谱进行镜像对称处理后发现:实验中使用的PCF-LPG本身就不完全对称,如图7.可见本论文提出的差分算法实现对光纤传感

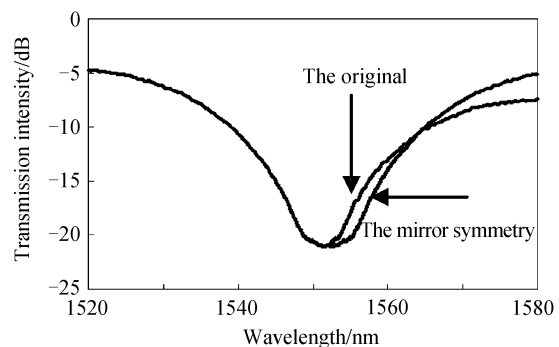


图7 镜像对称后的PCF-LPG的透射谱  
Fig. 7 Transmission spectra of the PCF-LPG with mirror symmetry

器的噪音消除并不依赖于 PCF-LPG 透射谱的对称性.

本文提出的基于 PCF-LPG 的差分算法可以有效消除光纤传感器的系统噪音,但是整个温度传感器的灵敏度并不高,解决灵敏度低的一个有效方法是采用一些增敏措施来提高温度传感器的灵敏度,这一部分将在后继工作中继续开展.另外,在实验室中利用 OSA 常用仪器进行峰值强度的监测,用以验证本论文提出的基于 PCF-LPG 差分算法对光纤传感器的噪音消除方案;在实际应用中,可利用 PCF-LPG 的出射端连接波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和 PIN 光电探测器分别把  $W_1$  和  $W_2$  光强信号转换为电压信号  $V_1$  和  $V_2$ ,对  $V_1$  和  $V_2$  做差分可得  $\Delta V = (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2)$ ,获得高速解调系统.

### 3 结论

本文提出了一种基于 PCF-LPG 做光纤传感解调时消除噪音的一种方法.选择分别位于 PCF-LPG 正斜率和负斜率线性区的两个信号,对选择监测的两个信号功率做差分,差分后的信号不仅能反映待测量的变化,而且能消除噪音的干扰.设计的基于 PCF-LPG 解调的 HiBi-FLM 温度传感实验很好地证明了这个方法的可行,相比于传感器未引入差分算法,传感器准确度从约 76% 提高到约 97%.这种利用数学算法滤除噪音的方法为提高传感系统准确度提供了一种新的思路.

#### 参考文献

- [1] WANG Xiao-na, WANG Qi, CHEN Le-hua, *et al.* Swept fiber laser based fiber optic sensor demodulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 82-85.  
王晓娜,王琦,陈乐华,等.基于扫描光纤激光器的光纤传感解调研究[J],光子学报,2009,**38**(1):82-85.
- [2] WANG Li-wei, LIU Yang, ZHANG Min, *et al.* Analysis and improvement of the phase generator carrir method in fiber interometer sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 766-769.  
王利威,刘阳,张敏,等.干涉型光纤传感器相位生成载波技术研究及改进[J].光子学报,2009,**38**(4):766-769.
- [3] YUAN Xiao-qing, SHI Yi-kai, DENG Liang. The design and realization of an optic fibre F-P axoustic emission sensor[J]. *Acta photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 82-85.  
袁小庆,史仪凯,邓梁.一种光纤 F-P 声发射传感器的设计与实现[J].光子学报,2008,**37**(1):82-85.
- [4] LU Qing, ZHAN Ya-ge, XIANG Shi-qing. Two-values question in signal detecting of strain sensor based on fiber bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(8): 988-992.  
陆青,詹亚歌,向世清.光纤光栅应力传感器信号检测中双值问题的研究[J].中国激光,2004,**31**(8):988-992.
- [5] ZHU Hao-han, QIN Hai-kun, ZHANG Min, *et al.* Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber bragg grating sensor system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(6): 893-897.  
朱浩瀚,秦海琨,张敏,等.光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J].中国激光,2008,**35**(6):893-897.
- [6] ZHAO Chun-liu, Demokan M S, JIN Wei, *et al.* A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber[J]. *Optics Communications*, 2007, **276**: 242-245.
- [7] BO Lin-hou, LIAO Yan-biao, ZHANG Min, *et al.* The improvement on the PGC denoudulation method based on optical fiber interferometer sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1324-1327.  
柏林厚,廖延彪,张敏,等.干涉型光纤传感器相位生成载波解调方法改进与研究[J].光子学报,2005,**34**(9):1324-1327.
- [8] ZHAO Dong-hui, SHU Xue-wen, ZHANG Lin. Sensor interrogation technique using chirped fiber grating based sagnac loop[J]. *Electronics Letters*, 2002, **38**(7): 312-313.
- [9] ZHAO Chun-Liu, XIAO Li-ming, JU Jian, *et al.* Strain and temperature characteristics of a long-period grating written in a photonic crystal fiber and its application as a temperture-insensitive strain sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(2): 220-227.

## A Differential Algorithm Based on PCF-LPG to Eliminate Noise of the Fiber Sensor

WANG Yun-peng, ZHAO Chun-liu, DONG Xin-yong, KANG Juan

(*Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

**Abstract:** A differential algorithm based on a long-period grating in a photonic crystal fiber was proposed to eliminate the noise of fiber sensors and raise the accuracy of fiber sensors. Utilizing the property temperature insensitive and wide transmission spectrum of the long-period grating, the intensities of two signals located respectively within the positive and negative linear region of the long-period grating's transmission spectrum could be monitored simultaneously and accurately. The noise of fiber sensors was eliminated effectively by the algorithm of two signals, since the two signals (also including the noise of fiber sensors) transmit through the same way to the monitor. When the differential algorithm based on the long-period grating in photonic crystal fiber was applied in a high-birefringence fiber loop mirror temperature sensor, experimental results show that the differential algorithm eliminates the broadband source fluctuations and all of power fluctuations in the system, and raises the accuracy of the sensor by the differential algorithm based on the long-period grating in a photonic crystal fiber. The value of the algorithm remains constant when the power of light source varies  $\pm 10\%$  and the relative error between the measured temperature change and the true change is only 0.04 and 0.03. Compared with the sensing without the algorithm, the accuracy increases from  $\sim 76\%$  to  $\sim 97\%$ .

**Key words:** Photonic crystal fibers; Long-period gratings; Differential algorithm; Fiber sensor; Noise