

一种级联长周期光纤光栅动态解调光纤布喇格光栅的新方法

李彩虹,葛海波,侯元萌,王金豆

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710061)

摘要:为扩大传感光栅波长的解调范围,在原有级联长周期光纤光栅(CLPG)解调光纤布喇格光栅(FBG)系统的基础上增加了压电陶瓷,利用压电陶瓷的电致伸缩特性,实现对FBG的动态解调。系统仿真表明:加入压电陶瓷后CLPG的漂移量为1.6 nm,对传感光栅的解调范围增加了0.2 nm,并且提升了解调线性度。

关键词:级联长周期光纤光栅;压电陶瓷;动态解调;解调范围

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)08-0052-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.08.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



New method of dynamic demodulation system for fiber Bragg grating based on cascaded long-period fiber grating

LI Caihong, GE Haibo, HOU Yuanmeng, WANG Jindou

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to expand the demodulation range of sensing grating wavelength, piezoelectric ceramics are added to the original cascaded long period fiber grating (CLPG) demodulation system of fiber Bragg grating (FBG). The dynamic demodulation of FBG is realized by utilizing the electrostrictive characteristics of piezoelectric ceramics. The simulation results show that the drift of CLPG is 1.6 nm after adding piezoelectric ceramics, the demodulation range of the sensing grating is increased by 0.2 nm, and the demodulation linearity is improved.

Key words: cascaded long-period fiber grating; piezoelectric ceramic; dynamic demodulation; demodulation range

0 引言

光纤光栅波长的解调作为光纤光栅传感领域的一项重要技术,通过对光纤光栅中心波长变化量的测量,可获得外界物理量的变化,解调系统决定整个传感系统的稳定性及精确性^[1,2]。现如今,光纤布喇格光栅(FBG)波长的解调方法多种多样,解调方法按工作原理可分为干涉法、色散法、衍射法和滤波法等几大类^[3]。其中,滤波法可分为边缘滤波法、匹配光纤光栅滤波法和可调谐 Fabry-Port(F-P)滤波器法等^[4]。双长

周期光纤光栅(LPFG)边缘滤波的FBG解调系统作为边缘滤波法的一种,其线性相关系数为99.496%,解调检测精度为 0.14460 nm^{-1} ,该系统的线性相关系数较高,但是解调精度还有待提高^[5];匹配光纤光栅分辨率高,反射型可达0.01,透射型可达0.1,但是该方法对探测器及检验环境的要求较高,易受外界环境影响^[6];作为可调谐F-P滤波器法中的一种方法,F-P腔的双边缘滤波解调法的解调精度较高,可以达到 2.077 nm^{-1} ,同时线性度理想,但是该系统只适合于静态解调,应用范围较窄^[7]。级联长周期光纤光栅(CLPG)解调传感光栅作为边缘滤波法中的一种常见方法,可有效规避上述问题。CLPG作为边缘滤波解调法中的解调器件,从它的光谱特性来说,它比单一的LPFG光谱性能好,且透射谱带宽较宽,灵活可变性高^[8],但存在对传感光栅波长解调范围较小的问题。因此,本文就解调范围较小的问题提出基于CLPG动态解调FBG的新方法。

收稿日期:2019-04-22。

基金项目:陕西省自然科学基金(批准号:2011JM8038)资助。

作者简介:李彩虹(1997-),女,陕西汉中,西安邮电大学电子工程学院17级硕士研究生。主要研究方向是光纤光栅的传感解调、物联网安全。在就读硕士研究生期间曾获三等奖学金、“互联网+”创新创业大赛校二等奖。



1 解调原理

本文在原有 CLPG 解调 FBG 系统中加入了压电陶瓷^[9]贴片,通过 CLPG 的线性区域实现对 FBG 的动态解调。利用 CLPG 动态解调 FBG 的原理图如图 1 所示。曲线 1 为 CLPG 原透射谱,中心波长为 1545 nm;曲线 2 为 CLPG 发生漂移后的透射谱,漂移后的中心波长为 1546.6 nm;曲线 3 为 FBG 的反射谱,中心波长为 1554.2 nm。选择线性度良好的区域作为 CLPG 的线性解调范围,在图 1 中可选择的透射谱范围为 1536~1543 nm 和 1548~1555 nm。本文选用 1548~1555 nm 范围内的线性区域作为对 FBG 解调的线性区域。该解调系统中,分为 2 路光路:一条光路是由 CLPG 以及压电陶瓷组成;另一条光路则由 FBG 反射光谱

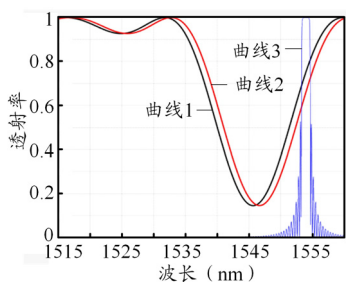


图 1 基于 CLPFG 动态解调原理图

经由耦合器直接进入

光电探测器。压电陶瓷

驱动 CLPG 的透射谱发生漂移,致使 CLPG 的中心波长发生变化,漂移后的线性区域为 1549.6~1556.6 nm,温度(应力)的改变也会使 FBG 的中心波长产生影响,使其发生漂移。引入压电陶瓷后,CLPG 的线性范围增大,对 FBG 的解调范围也变大。

基于 CLPG 边缘滤波的动态解调系统框图如图 2 所示。压电陶瓷贴片紧贴在 CLPG 表面,利用压电陶瓷的电致伸缩性使 CLPG 透射谱发生漂移。同时,CLPG 作为边缘滤波器件,它的光谱具有良好的线性度,利用 CLPG 的线性区可以实现对 FBG 的动态解调。在图 2 中,由宽带光源(ASE)发出的光先后进入隔离器(使用隔离器的目的是将 FBG 发射回来的光隔离掉,以防止其光谱对宽带光源造成影响)、耦合器 1 到达 FBG。在理想状态下,假设 FBG 反射光谱是谱宽($\Delta\lambda$)的高斯分布^[10],则其反射光强为^[11]:

$$P_r(\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} b(\lambda - \lambda') d\lambda' = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 b \quad (1)$$

其中, b 代表 FBG 的反射率, I_0 为宽带光源的入射强度。FBG 反射回来的光通过耦合器 2 后将分为 2 个支路,一个支路的光束先通过带有压电陶瓷贴片的 CLPG。假设级联后的 LPFG 滤波器的透射谱为 $H(\lambda)$,近似为线性函数:

$$H(\lambda) = R(\lambda - \lambda_0) \quad (2)$$

其中, R 为线性滤波器件的比例系数, λ_0 为 FBG 的初

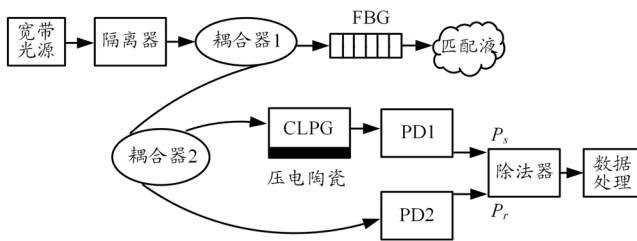


图 2 CLPFG 边缘滤波的动态解调系统框图

始波长。反射光经过耦合器进入带有压电陶瓷的 CLPG 后,该支路的光电探测器 PD1 接收到的光功率信号为 $P_s(\lambda)$,其值为:

$$P_s(\lambda) = RI_0 \gamma_i \int_{-\infty}^{\infty} b(\lambda - \lambda') H \lambda' d\lambda' = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 b R (\lambda_B - \lambda_0 + \Delta\lambda / \pi) \quad (3)$$

其中, λ_B 为待测的 FBG 波长, γ_i 为耦合分光比以及系统的耦合器、连接器等各接点造成的衰减因子。另一个支路的光束则直接进入光电探测器 PD2,PD2 接收到的光功率信号为 $P_r(\lambda)$ 。由式(1)、式(3)可得:

$$P_s(\lambda) / P_r(\lambda) = R (\lambda_B - \lambda_0 + \Delta\lambda / \pi) \quad (4)$$

由式(4)可知,通过对信号功率 $P_s(\lambda)$ 与参考功率 $P_r(\lambda)$ 的比值进行测量,得到待测 FBG 波长的信息,实现对 FBG 的波长监测。该系统的解调原理是将波长的变化量转换为光功率信号的比值,理论证明该方法可以实现对 FBG 波长值求解,完成动态解调。

2 系统仿真和结果分析

本文根据 CLPG 边缘滤波解调系统框图搭建仿真实验平台。在该仿真实验中,解调系统加入了由美国 AVX 公司生产的压电陶瓷,型号为 AEC060215C(压电伸缩型),该压电陶瓷的电容值在 0.5 μF 左右,功率损耗较小,并且其温度对性能影响小。选用的光源是 ASE 宽带光源,该光源不仅稳定性好,并且其输出光谱在 1527~1564 nm 范围内波长平坦,输出功率为 20 mW。该实验选取的 FBG 中心波长为 1554.2 nm;CLPG 是由多个 LPFG 级联而形成的一种新型光纤光栅结构,具有完全不同于 LPFG 的光谱特性,可作为滤波器件。在该仿真实验中,滤波器选用 2 个光栅周期、长度等参数均相同的 LPFG 级联而成,并且这 2 个 LPFG 的中心波长为 1545 nm,级联后的 LPFG 中心波长仍然为 1545 nm,透射谱在波长范围为 1548~1555 nm 内线性度极高,光谱峰值透射率高,耦合器的耦合系数均为 0.5。利用频谱仪来检测 FBG 的反射谱

李彩虹,葛海波,侯元萌,等:一种级联长周期光纤光栅动态解调光纤布喇格光栅的新方法

以及 FBG 反射光谱经过 CLPG 滤波后的光谱值,光功率计将会对来自这 2 个支路的功率进行监测。最后利用数据处理器将得到的光电信号进行数据处理,得到传感信号波长与光功率的关系。在该仿真实验中,温度是影响 FBG 波长漂移的原因,通过改变温度来实现 FBG 中心波长的变化。在整个解调系统中选择的压电陶瓷对温度变化不敏感,但为提高数据的精准度,将压电陶瓷放置在恒温控制箱中,防止外界温度对压电陶瓷产生影响,造成 CLPG 光谱的漂移。

仿真结果如表 1 所示。外部温度升高导致光信号电压变化,致使压电陶瓷驱动 CLPG 发生波长漂移,而 FBG 的波长也由于温度的变化发生漂移,并且漂移的范围仍然处于 CLPG 线性解调区域。由表 1 可知,随着温度的不断升高,FBG 的中心波长(λ_B)不断变化,呈现出向长波长漂移的趋势。

表 1 CLPG 动态解调仿真数据

温度(℃)	$P_s(\lambda)/P_r(\lambda)$	$\lambda_B(\text{nm})$	线性拟合波长(nm)
19.56	0.51	1554.18	1554.172
28.85	0.54	1554.27	1554.267
38.97	0.59	1554.39	1554.371
47.30	0.62	1554.47	1554.458
56.67	0.68	1554.56	1554.554
62.54	0.69	1554.62	1554.614
75.28	0.76	1554.73	1554.746
82.95	0.79	1554.84	1554.825
95.08	0.84	1554.95	1554.951
98.62	0.86	1555.01	1554.987
108.01	0.90	1555.09	1555.084
117.68	0.94	1555.20	1555.183

当温度变化时,2 个支路的光功率探测器数值 P_s 、 P_r 都会发生相应的变化,利用光功率计对 2 个支路光强值进行比较,得到 P_s/P_r 的值。由表 1 可以得到 FBG 中心波长与 P_s/P_r 的关系如图 3 所示。通过对 FBG 中心波长变化与 2 个支路光功率探测器数值之比进行线性拟合,得到线性拟合公式为 $Y=0.4351X-676.12$,系统的解调精度为 0.4351 nm^{-1} ,线性相关系数为 99.7%。仿真数据表明:在加入压电陶瓷后,基于 CLPG 动态解调 FBG 的系统精度较双 LPFG 边缘滤波解调

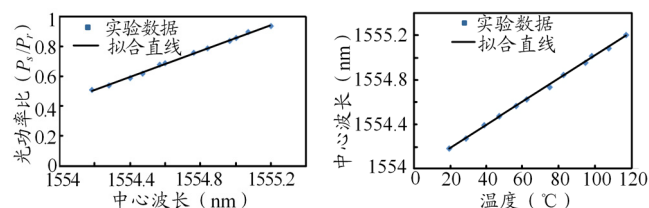


图 3 中心波长与 P_s/P_r 的关系

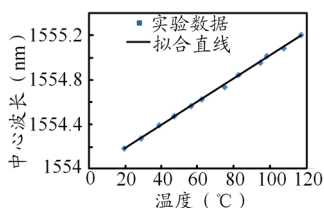


图 4 中心波长与温度的关系

系统有明显提升,此外,线性拟合度较高,证明仿真结果与理论数据具有一致性。

根据表 1 拟合出温度与 FBG 中心波长变化的线性图如图 4 所示。将温度范围控制在 $19\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 118\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,FBG 中心波长随温度发生变化,并且两者有明显的线性关系。将表 1 中得到的温度与 FBG 波长数据进行拟合,得到拟合关系式为: $Y=0.01031X+1553.97$,拟合直线的斜率为 $0.01031 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,线性相关系数达到了 99.89%,FBG 线性拟合值与实际数值的最大残差为 0.019 nm ,仿真结果与理论数据具有较高的一致性。由此可见,在加入压电陶瓷后,利用 CLPG 作为边缘解调滤波器件,具有线性度高的优点。

3 结束语

本文提出了一种基于 CLPG 动态解调 FBG 的新方法,FBG 的反射光强通过带有压电陶瓷贴片的 CLPG,压电陶瓷驱动 CLPG 的透射谱发生漂移,实现对 FBG 的动态解调。这种方法具有结构简单、系统稳定性好等优点。该方法的理论与仿真结果具有一致性,系统可行性高,为边缘滤波系统的解调提供了一种新思路、新方法,但在实际应用中还需对其精度及稳定性进行实验验证。

参考文献:

- [1] 李永倩,姚国珍,杨志. 一种高准确度光纤光栅波长解调系统[J]. 光子学报,2012,41(12):1405-1411.
- [2] 刘俊承,胡通,程鹏申. 基于布喇格光栅测温解调系统研究[J]. 仪器仪表用户,2017,24(11):1-5.
- [3] 赵亚丽. 光纤光栅传感系统解调方法概述[J]. 承德石油高等专科学校学报,2018,20(1):48-53.
- [4] 吴晶,吴晗平,黄俊斌,等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学,2014,7(4):519-531.
- [5] 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喇格光栅解调系统[J]. 中国激光,2013,40(3):115-121.
- [6] 方福波,刘有源,陈定方. 单片机在光纤 Bragg 光栅传感系统中的应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2002(2):264-266.
- [7] 刘睿,葛海波,何其睿,等. 基于 F-P 腔的双边缘滤波解调系统研究[J]. 光通信研究,2018(2):51-54.
- [8] 匡娅祺,周次明,张文举. 级联长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. 光学与光电技术,2013,11(2):43-47.
- [9] 陈晓杪. 基于压电陶瓷的布拉格光纤光栅匹配测温系统[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.
- [10] MELLE S M, LIU K, MEASURES R M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors [J]. IEEE Photo. Technol. Lett., 1992, 4(5): 516-518.
- [11] 邹红波,梁大开,曾捷,等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布喇格光栅解调系统[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(6):723-727.