

文章编号 1004-924X(2013)11-2785-06

基于线性滤波器的布拉格光纤光栅 解调系统的稳定性

王喜昌, 庞 启*, 徐文军, 杨尚明, 王中训
(烟台大学 光电信息学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 基于线性滤波器的解调法是通过探测两路光的光功率比值来确定外界温度和压力变化的。本文通过实验证明了在相同的温度或压力下, 随着光源总功率减少, 两路光的比值不相同, 从而影响了系统的稳定性。为了提高系统的稳定性, 对两路光功率的变化进行了分析, 找到了背景噪声是影响两路光比值变化的基本原因, 并对背景噪声进行了处理。实验结果表明, 处理背景噪声后的光纤布拉格(FBG)传感器在不同的温度环境下并改变光源功率大小时, 比值较恒定, 系统具有很好的稳定性。该修正方法同样适用于应变和压力等实验中系统稳定性的测量。

关键词: 光纤传感器; 解调系统; 噪声分析; 光纤布拉格光栅(FBG); 线性滤波

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2785

Stability of demodulation system for fiber Bragg grating based on linear filter

WANG Xi-chang, PANG Qi*, XU Wen-jun, YANG Shang-ming, WANG Zhong-xun

(*Institute of Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China*)

* *Corresponding author, E-mail: pangqi429@163.com*

Abstract: The demodulation based on a linear filter determines the changes of external temperatures and pressures according to the ratio of optical powers from two beams. However, this paper points out that the ratio of two beams changes with the reduction of total powers of a light source under the same state of temperature and pressure by practical experiments and it effects the system stability seriously. In order to improve the stability of the system, this paper analyzes the changes of ratio of optical power from two beams, and obtains that the background noise is the significant reason that affects the two beams' ratio. Then it processes the background noise by a processed method. The experiment result shows that the Fiber Bragg Grating (FBG) sensor has a constant ratio under different temperatures and changed light source powers after processing the background noise. Experiments demonstrate that the method has improved the stability of the system and it also applies to the stability measurement in strain and pressure experiments.

Key words: optical fiber sensor; demodulation system; noise analysis; Fiber Bragg Grating(FBG); linear filtering

1 引言

布拉格光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器的作用是将外界的物理量转化为波长信息。目前, 布拉格光纤光栅传感器的解调方法主要有可调谐 F-P 滤波器法^[1], 可调谐光源解调法^[2], 匹配光栅滤波法^[3], 边缘滤波器法^[4], M-Z 干涉仪法^[5], 色散成像法等。其中, 边缘滤波法解调速度较快, 其不足之处是系统稳定性不高和解调精度较低。

近年来, FBG 的研究在国内外取得了很大的进展, 如利用光纤偏振分束器和保偏光纤对传感解调系统的研究^[6], 基于叠加型光栅的光纤扭矩传感器温度的研究^[7], 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性^[8], 基于微型 FBG 的高灵敏度压强传感器^[9]的研究。

目前, 基于线性滤波器解调方法的研究多用探测端两路光功率的比值来确定波长变化^[4, 10-14], 研究人员认为在固定的压力和温度下, 这两路光的比值是恒定的。但本课组的研究表明, 这两路光的比值是不稳定的, 光源功率的改变或者光纤由于自身弯曲产生能量损耗时, 比值会产生较大的变化。本文对这一现象进行了分析, 确定了背景噪声是影响比值不稳定的主要问题, 并进行了相应处理。虽然没有从根本上去除背景噪声, 但通过对背景噪声采取特殊的数据处理方法, 使系统达到了非常稳定的状态。

2 线性滤波器解调法的基本原理和问题

线性滤波器解调法的基本原理如图 1 所示。放大自发辐射 (ASE) 光源发出的光经耦合器 1 到达 FBG, FBG 产生的反射光经耦合器 1 到达耦合器 2。光分成两路, 一路作为参考光 P_1 进行直接探测, 另一路作为滤波光 P_2 经过线性滤波器后再探测。

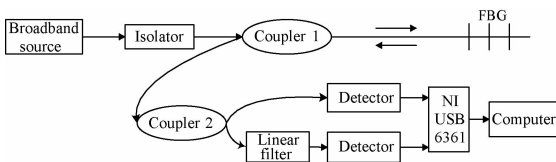


图 1 解调系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of demodulation system

经耦合器 2 后, 两路光 P_1 和 P_2 通过光电转换变为电压信号 U_1 和 U_2 , U_1 和 U_2 反映了 P_1 和 P_2 两路光功率的大小。将两路光电压值进行比较得:

$$B = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\int S(\lambda) T_1(\lambda) R(\lambda) T_1(\lambda) T_2(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) T_1(\lambda) R(\lambda) T_1(\lambda) T_2(\lambda) D(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中: $S(\lambda)$ 为光源功率, $T_1(\lambda)$ 为耦合器 1 的透过率, $T_2(\lambda)$ 为耦合器 2 的透过率, $R(\lambda)$ 为 FBG 的反射率, $D(\lambda)$ 为线性滤波器的透过率。由于 $S(\lambda)$, $T_1(\lambda)$ 以及 $T_2(\lambda)$ 为常数, 式 (2) 可简化为:

$$B = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\int R(\lambda) d\lambda}{\int R(\lambda) D(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

其中: $R(\lambda)$ 为一常数。由式 (2) 可知, 比值的变化的变化只与 $D(\lambda)$ 有关, 而 $D(\lambda)$ 只与波长有关。反射波长一定时, $D(\lambda)$ 为一常数。当外界物理量不变时, 比值 B 为中常数。

实际工作中, 将整个解调系统放在一个稳定环境中, 如图 1 所示。通过 3 种方式改变光功率的大小: (1) 改变光源的功率; (2) 改变耦合器 2 的输入光功率大小; (3) 使 FBG 前端弯曲产生能量损耗。这时观察到 U_1 和 B 的变化关系如图 2 所示。

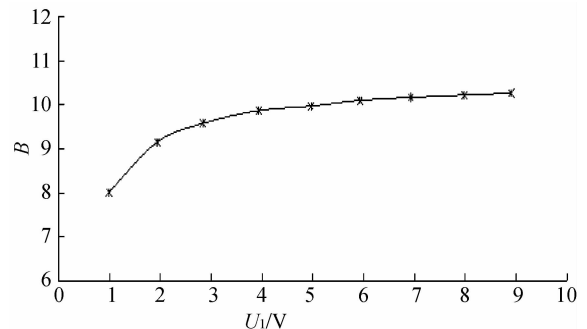


图 2 比值随光电压 U_1 的变化曲线

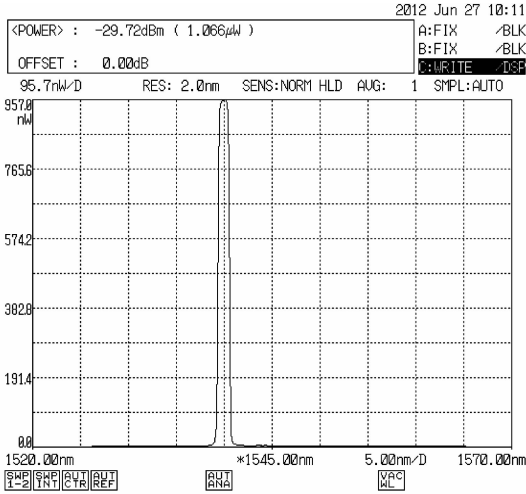
Fig. 2 Relationship between ratio B and light voltage U_1

从图 2 中得出, 随着电压值 U_1 的减小, 比值由缓慢减小变为急剧减小, 不再是一个常数。这是目前的滤波解调方法精度不高的原因之一。

2 误差产生原因分析

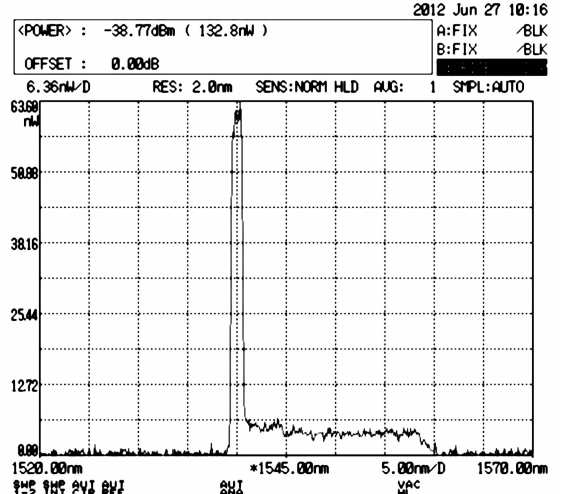
由图 2 可知, B 随 U_1 的减少而减少, 因而一定存在背景噪声。光谱仪测得的 P_1 和 P_2 光路上

1 520~1 570 nm 波段的光谱图如图 3(a), 3(b) 所示。因为全波段, 所以这两个图像是带有背景噪声的光谱; 图 3(c) 和图 3(d) 测量的是没有背景噪声的峰值光谱。



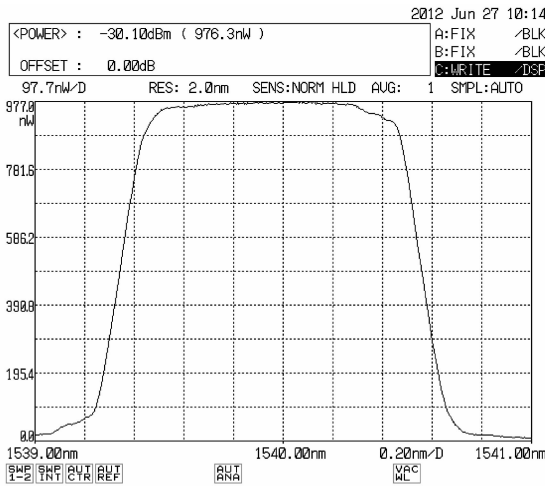
(a)直接探测的光谱图功率为1.066 μW

(a)Spectral power in 1.066 μW with direct detection



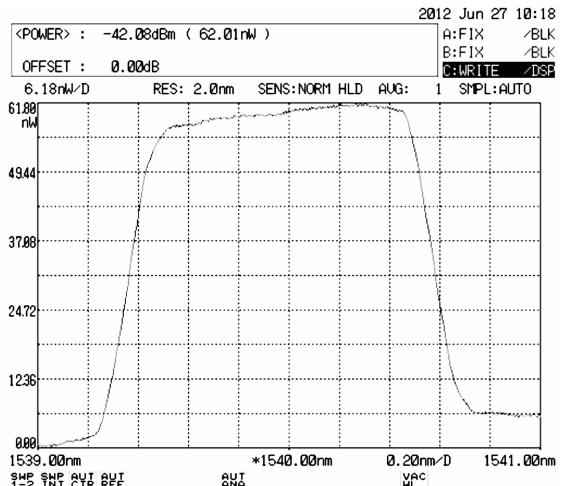
(b)通过滤波器的光谱图功率为132.8 nW

(b)Spectral power in 132.8 nW through filter



(c)直接探测的峰值光谱图峰值功率为976.3 nW

(c) Peak spectral power in 976.3 nW with direct detection peak



(d)通过滤波器的峰值光谱图峰值功率为62.01 nW

(d) Peak spectral power in 62.01 nW through filter

图 3 探测端的光谱图和显示的功率

Fig. 3 Spectra and powers of probe ends

将图 3 中对应的光功率相减就可以得出光路上两路光背景噪声的大小。通过分析可知, 第一路光中的光功率(1.066 μW)远大于这路光的背景噪声(89.7 nW); 而第二路经过线性滤波器的光功率(132.8 nW)和背景噪声(70.79 nW)相比较, 背景噪声基本占了总光功率的一半。相比较第一路直接探测光, 第二路滤波光的背景噪声对光信号的影响更加明显。

背景噪声的产生有很多原因, 这里的背景噪声主要是由光纤光栅旁瓣和经过线性滤波器后旁瓣产生的。光路接头处的接口反射或者透射, 光子在光纤内部的散射以及经测量光电放大时探测器端存在的噪声(这些噪声甚至大于信号)都会对系统的探测结果产生较大影响。

3 噪声修正方法

实验测量发现,总的光功率和光路中的背景噪声同比例减少,因此它们之间成正比关系。这些噪声主要由光纤光栅旁瓣和经过线性滤波器后旁瓣产生的,若 P_1 和 P_2 光路上的比例系数为 k_1 和 k_2 , k_1 和 k_2 均为常数。光电转换后,修正值变为 $U_1 - k_1 U_1$ 和 $U_2 - k_2 U_1$ 。

设直接探测时光电探测器带来的背景噪声为 C_1 ,经过线性滤波器时光电探测器带来的背景噪声为 C_2 ,则修正值变为 $U_1 - k_1 U_1 - C_1$ 和 $U_2 - k_2 U_1 - C_2$,修正后的比值变为:

$$B = \frac{U_1 - k_1 U_1 - C_1}{U_2 - k_2 U_1 - C_2}. \quad (3)$$

由于直接探测光的光功率远大于光电转换探测器,因此设 $C_1 = 0$;而经过线性滤波器的探测端的背景噪声和信号相比较, C_2 不能忽略,则有:

$$B = \frac{U_1 - k_1 U_1}{U_2 - k_2 U_1 - C_2}. \quad (4)$$

解调系统处于稳定环境时,取两组光源在输出功率不同时两路光 P_1 和 P_2 的电压值,可得:

$$B = \frac{U_1 - k_1 U_1}{U_2 - k_2 U_1 - C_2} = \frac{U_3 - k_1 U_3}{U_4 - k_2 U_3 - C_2}, \quad (5)$$

式中: U_1 和 U_2 为光源功率较大时的电压值, U_3 和 U_4 为光源功率较小时的电压值。

化简式(5)可知,两边的 k_1 和 k_2 可以约去,它们只影响比值的大小,不影响比值的稳定性。因此设 k_1, k_2 为 0,解方程后可得 P_2 光路上光电探测器

带来的背景噪声 C_2 为:

$$C_2 = \frac{U_1 U_4 - U_2 U_3}{U_1 - U_4}. \quad (6)$$

由此可知,比值的稳定性可以修正,但背景噪声不能完全去除。若解调系统处于稳定状态,当光电转换的放大倍数一定时, C_2 为常数。目前的线性滤波器理论都是基于理想情况,也就是没有考虑噪声的情况,将式(4)写为倒数形式,经变换得:

$$\frac{1}{B} = \frac{U_2}{(1 - k_1)U_1} - \frac{k_2}{(1 - k_1)} - \frac{C_2}{(1 - k_1)U_1}, \quad (7)$$

式中:第一项中 $k_1 = 0$ 时正是传统理论的结果,第二项是两路光光路上系统噪声的比值,是个常数项,第三项称为稳定性修正项。当不考虑稳定性修正项时,传统的线性滤波器方法仍然适用,但稳定性不高。 k_1 和 k_2 只是影响比值结果,不影响比值稳定性,原则上可以设置为任意值,本实验中设为 0。

上述的噪声修正是从线性滤波解调法的基本思想着手,因此适合于使用线性滤波器解调法测量的外界物理量,如温度、应变和压力等。

4 实验验证

解调系统处于稳定状态且 FBG 所受应变为零时,在不同的温度下进行修正前和修正后的比值的分析。由式(6)计算得到的修正值 $C_2 = 0.03$,修正后的比值和对应的两路光光电压 U_1 和 U_2 的值如表 1 所示。

表 1 比值随电压变化的情况

Tab. 1 Variation of ratios with voltages

次数	22.4 °C				35 °C				42 °C			
	U_1/V	U_2/V	B		U_1/V	U_2/V	B		U_1/V	U_2/V	B	
			修正前	修正后			修正前	修正后			修正前	修正后
1	8.908	0.885	10.066	10.419	8.908	1.037	8.590	8.843	8.908	1.192	7.473	7.668
2	7.908	0.789	10.023	10.419	7.973	0.932	8.555	8.839	7.885	1.059	7.446	7.663
3	6.871	0.689	9.972	10.426	6.898	0.811	8.506	8.832	6.744	0.909	7.419	7.672
4	5.826	0.589	9.891	10.422	5.933	0.699	8.488	8.864	5.913	0.802	7.373	7.660
5	4.891	0.499	9.802	10.422	4.946	0.588	8.412	8.862	4.836	0.662	7.305	7.652
6	3.433	0.358	9.589	10.467	3.798	0.458	8.293	8.875	3.852	0.533	7.227	7.658
7	2.569	0.276	9.308	10.443	2.756	0.341	8.082	8.866	2.983	0.419	7.119	7.648
8	1.828	0.205	8.917	10.446	1.985	0.254	7.815	8.872	1.814	0.266	6.820	7.687
9	0.854	0.112	7.625	10.417	0.954	0.141	6.766	8.876	0.898	0.147	6.109	7.675

表 1 是 FBG 分别处在 22.4 和 35,42 °C 情况下,解调系统在数据处理前后随着 U_1 和 U_2 电压值等同改变时,比值的变化情况。从表 1 可以看出,修正后的系统比值修正前更加稳定性。修正前后比值和光电压之间的关系曲线如图 4 中所示。

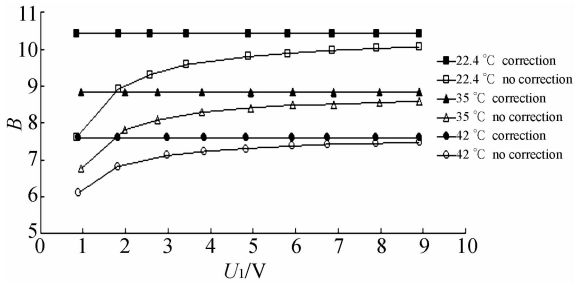


图 4 比值随光电压 U_1 变化曲线

Fig. 4 Relationship between ratio B and light voltage

分析图 4 可知,FBG 传感器分别处在 22.4, 35,42 °C 的温度下时,修正后比值的稳定性优于修正前。

5 结 论

基于线性滤波器的解调方法中,线性滤波系统中的不稳定性极大地限制了它在传感领域的应用。目前的线性滤波解调系统理论普遍认为两路探测器的比值是两路光信号的直接比值,本文通过实验研究证明了两光路上光功率的比值是两路光信号与背景噪声之和的比值,而且有时候线性滤波器的背景噪声大于信号;光源和线性滤波器自身带来的背景噪声只影响比值的大小,不影响比值的稳定性;系统比值的稳定性由接入线性滤波器的光电探测器系统决定。本文虽然用温度传感器来验证背景噪声修正后比值的稳定性,但修正方法同样适用于应变和压力的稳定性测量。实验结果表明,去除背景噪声后的比值在不同温度下具有非常高的稳定性。本文主要通过宏观角度来说明修正背景噪声的方法,对于微观背景噪声产生的原因,还有待进一步的研究。

参考文献:

[1] 丁晖,吴相楠,梁建奇,等. 粒子群优化算法在光纤光栅传感器波长解调中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2010, 30(2): 563-566.
DING H, WU X N, LIANG J Q, *et al.*. Application of POS in wavelength detection of FBG sensors [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 563-566. (in Chinese)

[2] BALL G A. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation[J]. *Light Wave Technology*,1994, 12(4): 700-703.

[3] 庄其仁,龚冬梅,曾永西. 啁啾效应对 Bragg 波长匹配解调精度的影响与消除[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3):364-370.
ZHUANG Q R, GONG D M, ZENG Y X. Influence of chirp effects on FBG wavelength-matched demodulation precision and its elimination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 364-370. (in Chinese)

[4] MELLE S M, LIU K, MEASURES R M. A passive wavelength demodulation system for guided wave Bragg grating sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 23(12): 1424-1428.

[5] 李丽,林玉池,王为,等. 光纤光栅非平衡 M-Z 干涉解调技术研究[J]. 压电与声光, 2008, 30(1): 16-18.
LI L, LIN Y CH, WANG W, *et al.*. The study of fiber grating demodulation technology based on unbalanced M-Z interferometer [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, 30(1): 16-18. (in Chinese)

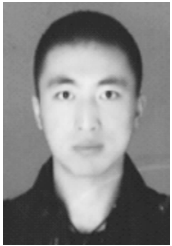
[6] 王葵如,张锦龙,余重秀,等. 利用光纤偏振分束器和保偏光纤的传感解调系统[J]. 光学精密工程, 2010,18(9):1923-1929.
WANG K R, ZHANG J L, YU CH X, *et al.*. Sensor demodulation system using PBS and PMF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1923-1929. (in Chinese)

[7] DONG X Y, LIU Y, SHAO L Y, *et al.*. Temperature-independent fiber bending sensor based on a superimposed grating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(11): 3019-3022.

[8] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 光学精密工程, 2007,15(3):326-330.
GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. *Opt.*

- Precision Eng.*, 2007, 15(3): 326-330. (in Chinese)
- [9] CHUNG K M, LIU ZH Y, LU CH, *et al.*. Highly sensitive compact force sensor based on microfiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 700-702.
- [10] 闫丽琴, 陈希明, 吴小国, 等. 基于边缘滤波的温度传感实验研究[J]. *天津理工大学学报*, 2007, 23(5): 69-71.
YAN L Q, CHEN X M, WU X G, *et al.*. Temperature-sensed researches based on edge filter demodulation [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2007, 23(5): 69-71. (in Chinese)
- [11] 张卫华, 童嵘嵘, 苗银萍, 等. 基于倾斜光纤光栅的传感解调技术[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(4): 284-287.
ZHANG W H, TONG ZH R, MIAO Y P, *et al.*. Sensing and demodulation technique based on tilted fiber Bragg grating[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(4): 284-287. (in Chinese)
- [12] 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.
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. (in Chinese)
- [13] 姜明顺, 孟玲, 隋青美, 等. 一种新颖的双边缘滤波光纤布拉格光栅解调技术[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(3): 355-358.
JIANG M SH, MENG L, SUI Q M, *et al.*. A novel double edge filter wavelength interrogation technology for FBG [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(3): 355-358. (in Chinese)

作者简介:



庞 启(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤解调技术的研究。E-mail: pangqi429@163.com



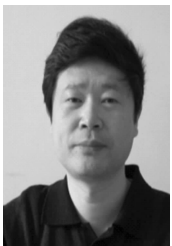
王中训(1964—),男,教授,主要从事移动通信中的信道编码及水下通信的研究。E-mail: ytwzx3@126.com



徐文军(1987—),男,硕士研究生,主要从事物联网,嵌入式方向的研究。E-mail: xuwenjun_world@163.com



王喜昌(1968—),男,博士,教授,硕士生导师,1999年于长春光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光纤光栅传感及其解调技术的研究。E-mail: xichang_wang@sohu.com



杨尚明(1958—),男,教授,硕士生导师,主要从事物联网,嵌入式方向的研究。E-mail: ysmhh@163.com

导师简介: