

· 光电器件与材料 ·

基于滤波器的Bragg光纤光栅解调系统

庞 启, 王喜昌

(烟台大学光电信息学院, 山东 烟台 264005)

摘 要: 线性滤波器的FBG解调原理是: 根据滤波光与参考光的比值和波长之间的关系来判断比值变化时引起的外界物理量的改变。传统的滤波解调系统对波长和比值的关系统按线性处理, 而线性滤波器的滤波曲线本身不是完全的线性。实验中, 理论上推导出比值和滤波器的透过率之间成正比关系。对温度和应变相对应的比值和波长进行分开处理, 应变为零温度发生变化时, 波长和比值在数据拟合时加入高次项按非线性处理。温度一定压力改变时对波长和比值按线性处理。拟合结果表明: 非线性拟合情况下波长与比值的曲线与滤波曲线相似度很高, 不同温度下对应的曲线上, 同一比值相对应的波长差相等。

关键词: Bragg 光纤光栅; 解调系统; 线性滤波; 多项式拟合

中图分类号: O439; TN713⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-02-0036-04

Demodulation System of Bragg Fiber Grating Based on Filter

PANG Qi, WANG Xi-chang

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

Abstract: According to ratios of filter light and reference light and the relationships of wavelength, changes of external physical quantities are determined caused by changes of ratios. It is the principle of FBG demodulation of linear filters. For traditional filter demodulation system, the relationships between wavelength and ratios are processed in linearity. And curves of linear filters are not entirely linear. In the experiment, deduced ratios in theory are directly proportional to the transmissivity of filters. Temperature, ratios corresponding to strains and wavelength are processed separately. When a strain is zero and temperature changes, a high-order item is added during data fitting process, wavelength and ratios are processed in nonlinearity. When the temperature is a constant but pressure changes, wavelength and ratios are processed in linearity. Fitting results show that curves of wavelength and ratio are similar to filtering curves and wavelength differences are equal corresponding to the same ratios at different temperature curves.

Key words: Bragg fiber grating; demodulation system; linear filtering; polynomial fitting

光纤光栅传感技术由于自身突出的优势得到广泛的应用, 目前主要应用在大坝^[1-2]、桥梁^[3-5]的安全监测和火灾的检测及易燃^[6-7]、易爆等恶劣环境中温度^[8]或应变^[9]的测量等。因此, 更多的解调方法相继提了出来, 其中滤波器法^[10-13]的基本原理是根据滤波光和参考光功率的比值和波长的关系确定外界

物理量的变化。

FBG 传感器所处环境温度及其所受压力发生改变时, 引起FBG反射波长的变化, 进而引起比值的改变, 通常情况下都是对温度和压力的情况进行分开处理, 这样做可以区分得出温度和压力的变化分别引起的波长的变化量。

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 山东省省级重点攻关计划项目(WL10K28)

作者简介: 庞启(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅解调技术的研究; 王喜昌(1968-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤光栅传感及其解调技术的研究。

传统方法中采用滤波光和参考光的比值和波长进行线性拟合的方式确定外界物理量的改变,而滤波器的滤波曲线本身不是完全的线性,这导致系统解调精度较低。实验中,理论上推导出比值和线性滤波器的透过率之间成正比的关系,也就是比值曲线和滤波器曲线应该相吻合。当FBG所受应变为零时,只有温度的变化引起波长和比值的变化,对比值和波长进行非线性拟合,即拟合时加入高次项,在非线性的情况下可以使得拟合曲线更加接近滤波器的滤波曲线,一定程度上提高了解调系统的解调精度。测试压力时保持FBG所处环境温度一定,改变压力大小时,波长和比值也产生一定的变化,对其进行线性拟合,同一比值情况下,不同温度时比值对应的波长差相等。拟合结果表明,比值和波长的拟合曲线和滤波曲线之间有很高的相似度,用自制的解调系统对温度和压力进行了一定范围的测量,解调系统所测的物理量有较高的精度。

1 线性滤波器的解调系统介绍

解调系统原理如图1所示。从带宽为1520~1570 nm的ASE宽带光源出来的光通过隔离器经3 db耦合器1到达FBG传感器,从FBG反射回来的光经耦合器1到达耦合器2等功率分成两路光,一路经过线性滤波器作为滤波光 P_1 进行探测。另一路光作为参考光 P_2 进行直接探测。

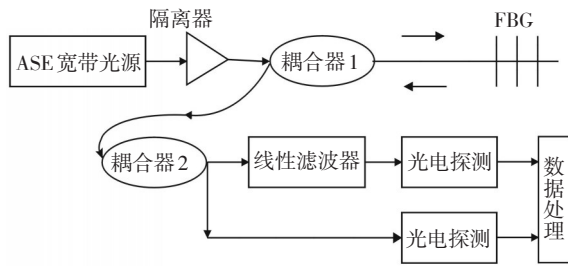


图1 解调系统基本原理图

基于线性滤波器的解调原理是

$$B = \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

式中, P_1, P_2 分别是透过滤波器的和直接探测光的光功率。 P_1 的表达式可以写为

$$P_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda)T_1(\lambda)R(\lambda)T_1(\lambda)T_2(\lambda)D(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

式中, $S(\lambda)$ 为光源功率, $T_1(\lambda)$ 、 $T_2(\lambda)$ 分别为耦合器1和耦合器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。 P_2 可表示为

$$P_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda)T_1(\lambda)R(\lambda)T_1(\lambda)T_2(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

则滤波光 P_1 和直接探测光 P_2 的比值 B 表示为

$$B = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda)T_1(\lambda)R(\lambda)T_1(\lambda)T_2(\lambda)D(\lambda)d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} S(\lambda)T_1(\lambda)R(\lambda)T_1(\lambda)T_2(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

由于 $S(\lambda)$ 、 $T_1(\lambda)$ 以及 $T_2(\lambda)$ 均为常数,FBG的反射率对应不同的波长时也为一常数,式(4)可简化为

$$B = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} D(\lambda)d\lambda}{\int_{-\infty}^{+\infty} d\lambda} \quad (5)$$

FBG反射回来的光的光谱为一窄带光,若窄带光所在区间表示为 $[a_1, a_2]$ 时, λ_0 为此区间上的点,由积分中值定理可知

$$B = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{a_1}^{a_2} D(\lambda)d\lambda}{\int_{a_1}^{a_2} d\lambda} = \frac{D(\lambda_0)(a_2 - a_1)}{a_2 - a_1} = D(\lambda_0) \quad (6)$$

分析可知,当光源功率不变时, P_2 光路上的光功率保持不变,对比值的变化没有影响。比值的改变只受到线性滤波器透过率的影响,且比值和线性滤波器的透过率之间存在正比关系,这样,比值的变化只受到 P_1 光路的影响。

滤波范围内透过线性滤波器的光功率随着反射波长的改变而发生变化,即波长变化时比值也发生改变。反之,比值发生改变时,通过比值的改变判断波长的变化量,从而确定出FBG传感器所处温度及所受压力的改变。图2为线性滤波器的部分实际光谱图。

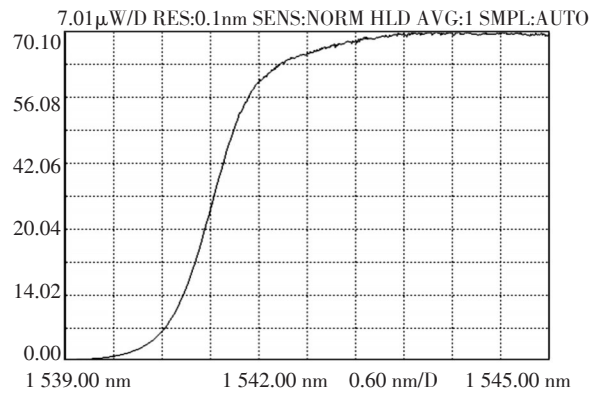


图2 透过滤波器的部分光谱图

2 多项式系数拟合

按照光纤光栅的基本传感原理,波长和比值的关系统基本模型可写为

$$\lambda = k_0 + k_1 B_T + k_2 B_P \quad (7)$$

式中, k_0, k_1, k_2 为常数, B_T 为温度单独变化时对应的比值, B_P 为压力单独变化时对应的比值。

FBG 传感器所处温度和所受压力均发生改变时, 波长的变化引起滤波光 P_1 的改变, 比值 B 也发生改变, 由于滤波曲线本身不是线性的, 也就是波长和 P_1 光功率之间非线性关系, 因此波长和比值之间也是非线性的关系, 数据拟合时加入多次项进行非线性拟合。当压力为零时, 比值的改变只与温度有关, 这时对波长和比值进行多项式拟合, 方程如下

$$\lambda = k_0 + k_1 B_T + k_2 B_T^2 + k_3 B_T^3 + k_4 B_T^4 + k_5 B_T^5 \quad (8)$$

式中, $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 均为常数。

式(8)写为矩阵时为

$$\mathbf{B}_T = \begin{pmatrix} 1 & B_{T1} & \dots & B_{T1}^5 \\ 1 & B_{T2} & \dots & B_{T2}^5 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & B_{Tn} & \dots & B_{Tn}^5 \end{pmatrix}, \mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_0 \\ k_1 \\ \vdots \\ k_5 \end{pmatrix}, \boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}$$

根据最小二乘法求的拟合系数为

$$\mathbf{K} = (\mathbf{B}_T^T \mathbf{B}_T^{-1}) \mathbf{B}_T^T \boldsymbol{\lambda} \quad (9)$$

其中, \mathbf{B}_T^T 为 \mathbf{B}_T 的转置矩阵

温度和应变同时改变时, 对 B_P 与波长进行一次线性拟合, 则拟合方程为

$$\lambda = k_0 + k_1 B_T + k_2 B_T^2 + k_3 B_T^3 + k_4 B_T^4 + k_5 B_T^5 + k_6 B_P + k_7 B_T B_P \quad (10)$$

由于压力为零时, 波长只与温度有关, 式(10)变为

$$\lambda = (k_0 + k_1 B_T + k_2 B_T^2 + k_3 B_T^3 + k_4 B_T^4 + k_5 B_T^5)(1 + k_6 B_P) \quad (11)$$

这样压力为零时, 温度对应的波长和比值的拟合系数便可求出。将式(11)变化一下为

$$\frac{\lambda}{k_0 + k_1 B_T + k_2 B_T^2 + k_3 B_T^3 + k_4 B_T^4 + k_5 B_T^5} = 1 + k_6 B_P \quad (12)$$

若用 λ^* 代替

$$\frac{\lambda}{k_0 + k_1 B_T + k_2 B_T^2 + k_3 B_T^3 + k_4 B_T^4 + k_5 B_T^5}, \text{ 则}$$

式(12)变为

$$\lambda^* = 1 + k_6 B_P \quad (13)$$

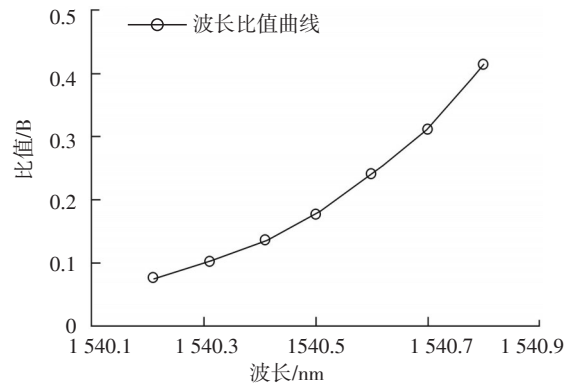
当温度为一定值时, λ^* 的变化只与压力有关, 得出拟合系数后, 代入式(11)可以知道波长的变化量, 进而知道外界物理量的变化。

3 实验及结果分析

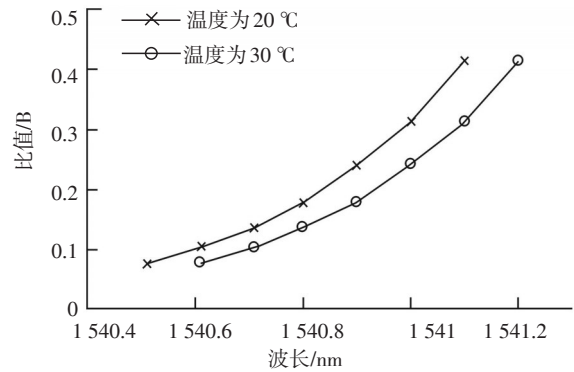
3.1 波长和比值曲线拟合

实验中, 当 FBG 传感器所受压力为零时, 比值的

变化只受温度的影响, 将解调系统放置在一个恒温装置中, 利用恒温水槽对 FBG 进行均匀加热, 每隔一个温度间隔存储一组温度对应的波长和比值的数据, 经过数据拟合后得到拟合曲线。在保持 FBG 传感器所处温度为一定值时, 增加 FBG 所受到的压力大小, 每隔一定的间隔记录一次压力对应的波长及比值数据。拟合曲线如图 3 所示。



(a) 压力为零时波长和比值拟合曲线



(b) 不同温度下波长和比值的拟合曲线

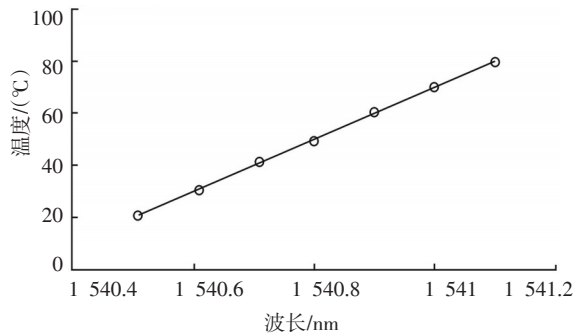
图3 比值和波长拟合曲线

图 3a 中为 FBG 所受压力为零时波长和比值之间的关系曲线, 拟合曲线为一非线性曲线。图 3b 中为温度分别在 20 °C、30 °C 时压力发生改变时波长和比值的拟合曲线, 拟合曲线为一非线性曲线, 两条曲线相比在不同温度下, 曲线上同一比值对应的波长差值相同。图 3 中的拟合曲线和图 2 中滤波器的滤波曲线相比较, 曲线之间相当吻合, 相似度很高。

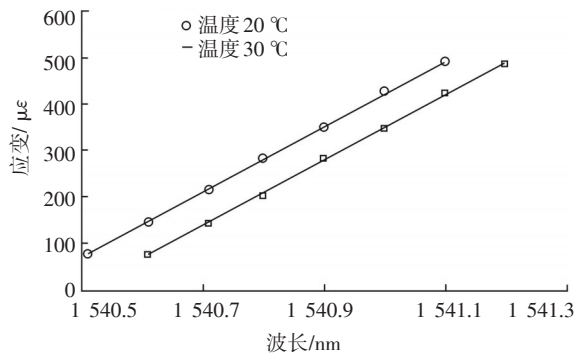
3.2 实验验证

FBG 传感器所受压力为零时, 利用恒温水槽对 FBG 传感器进行均匀加热, 利用研制的解调仪对 FBG 所处的温度进行多个温度点的测量。温度分别为 20 °C、30 °C 时, 增加 FBG 所受到的压力并用解调仪对

其进行测量。所测温度和压力与对应的波长关系曲线如图4所示。



(a)压力为零时温度和波长对应曲线



(b)不同温度下压力及其波长变化曲线

图4 解调系统测量的温度和压力与对应波长曲线

图4a中是压力为零时解调系统所测得的温度和波长对应曲线,曲线有很好的线性度。图4b中为FBG分别处在温度为20℃、30℃的环境时,解调系统测得的压力及其波长的变化曲线,两条曲线之间平行,且波长和压力之间具有很好的线性关系。

4 结 论

基于线性滤波器解调系统中,以往的解调方法对波长和比值的关系按线性处理,解调精度较低,而滤波器的滤波曲线本身不是完全的线性。在实验中,理论上推导出比值和滤波器透过率之间是正比的关系,比值和透过率同步变化。对温度和压力变化时对应的比值和波长分开处理,应变为零时,对波长和比值的关系加入高次项按非线性进行处理。温

度一定压力改变时对波长和比值按线性处理。在非线形拟合情况下波长与比值的拟合曲线与滤波曲线的相似度很高,温度和压力同时改变时同一比值对应的不同温度曲线上的波长差相等。系统解调结果显示,在对波长和比值的非线性拟合情况下,解调系统具有较高的解调精度。

参考文献

- [1] 陶珺,穆磊,杜平.基于InGaAs光谱成像技术的光纤光栅传感器在大坝渗流监测系统的应用[J].光子学报,2010,39(1):42-46.
- [2] 赵印明,刘春红,陈爽.金属基底光纤光栅应变传感器的传感特性研究[J].光学与光电技术,2011,9(1):24-26.
- [3] 卢哲安,江志学,石玉华,等.光纤光栅传感技术在桥梁监测中的应用研究[J].应用光学,2003,25(11):57-59.
- [4] 吴朝霞,阎冬梅,李志全.光纤光栅多参数桥梁结构监测系统的研究[J].应用光学,2009,30(1):114-117.
- [5] 徐汉锋,杨樟成,刘胜春,等.光纤光栅传感技术在桥梁试住桩中的应用[J].中国计量学院学报,2012,23(1):52-56.
- [6] 吴慧娟,李姗姗,卢祥林,等.一种新型光纤光栅围栏防火放入侵同步预警系统[J].光子学报,2011,40(11):1671-1676.
- [7] 张嵩,王剑.光纤光栅传感技术在隧道火灾监控中的应用[J].激光与红外,2010,40(2):178-180.
- [8] 李莹,梁大开,曾捷,等.基于长周期光纤光栅的可变体机翼翼表温度测试系统研究[J].光学技术,2011,37(1):7-10.
- [9] 朱丹丹,王海芳,张冉,等.啁啾光栅结合边缘线性滤波解调的FBG应变测量系统[J].应用光学,2005,26(4):50-52.
- [10] 杨洋,王宗和,赵志骏.基于滤波器边缘解调技术的光纤光栅压力测试系统[J].仪表技术与传感器,2008(6):82-84.
- [11] 周广,赵启大,开桂云,等.利用高双折射光纤环境的边缘滤波解调方法[J].光电子·激光,2003,14(12):1245-1249.
- [12] 王云新,刘铁根,汪俊峰.便携式光纤Bragg光栅波长解调仪的研制[J].仪器仪表学报,2007,28(6):1104-1107.
- [13] 康彦深,王友波,张栋,等.基于WPM的高精度光纤Bragg温度传感系统研究与设计[J].仪表技术与传感器,2010(6):12-14.