

优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究*

詹亚歌 陆青 向世清 方祖捷 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 利用悬臂梁调谐和两个并联二次反射匹配解调光栅的方法实现了光纤布喇格光栅(FBG)传感器的高精度大范围应变传感测量. 通过并联方式, 选择合适的匹配光栅波长, 增大了可检测的应变范围, 同时解决了双值问题. 应变传感信号经两路解调光栅解调, 并由数据采集卡采集后, 由计算机进行两路并联信号的综合处理后获取更准确的结果, 使得系统性能得到提升和优化. 试验结果与理论分析一致.

关键词 传感器; 应变; 光纤布喇格光栅; 并联反射匹配检测

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

光纤光栅传感器种类多, 能够测量许多物理参量, 10多年来发展迅速. 相对于机电类传感器, 其具有一些明显的优势, 包括抗电磁干扰、耐高温等. 与传统的光纤传感器相比, 光纤布喇格光栅传感器是更为理想的灵敏元件, 其最主要的优势是传感信号为波长调制以及复用能力强; 在一根光纤上串接多个布喇格光栅可同时得到几个测量目标的信息, 并可实现准分布式测量, 目前对于民用工程结构、电力工业、医药和化学传感等行业已经形成巨大的吸引力^[1-3].

在光纤布喇格光栅传感器的应用研究中, 波长解调是重要的一个方面, 目前限制光纤光栅传感器应用的最主要障碍是传感信号的解调. 波长解调方法主要有光谱仪, 斜边滤波法, 可调谐滤波法, 干涉扫描法, 匹配光栅法等. 但是在这几种方法中, 光谱仪代价较大, 斜边滤波法的分辨率较小, 干涉仪没有好的重复性, 而可调谐滤波器的扫描周期较长^[4]. 因此近年来匹配光栅法越来越受到人们的青睐.

匹配光栅法可达到较高的分辨率, 解调速度快, 重复性好, 代价小, 但其存在数方面的不足: 首先因为普通光纤布喇格光栅的 3 dB 带宽为 0.2 nm 左右, 所以单个匹配光栅的解调系统可解调被传感量的范围比较小, 在很多情况下不能满足应用; 同时, 单个匹配光栅解调系统存在双值问题; 另外, 如何提高其分辨率以及避免光强探测型方案的强度抖动误差问题是其被用于更多场合的关键, 这对研究实用的光纤光栅匹配光栅解调系统意义重大. 国内外对解决上述不足之处之研究报道很少, 尤其是对单个

匹配光栅可解调的物理量范围问题未见报道, 提高精度方面也没有看到专门的文献.

本文介绍一种简单、较为廉价的由两个并联的匹配光栅解调检测光纤光栅传感器的系统, 针对系统实用的目标, 对匹配光栅法的上述问题进行了较为深入的研究, 提高了可解调应变等物理量的范围, 探索了解调系统输出的优化方法.

1 原理

匹配光栅检测信号的基本原理如图 1 所示^[5], 其中图 1(a) 为传感光栅与匹配光栅的光路示意图, 图 1(b) 为两光栅的反射谱及光电探测器(PD)可检测到信号(阴影部分)的示意图.

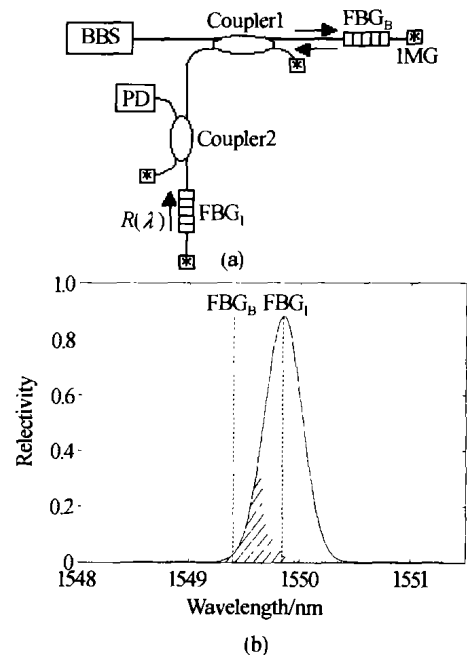


图 1 (a) 传感光栅与匹配解调光栅的光路示意图; (b) 两光栅的反射谱及光电探测器(PD)可检测到的信号示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the sensor-receiver grating pair schematic; IMG, index mating gel, PD, photo detector; (b) Schematic diagram of the spectra of the sensor-receiver grating pair and the detectable signal

*上海市科委专项基金资助项目(项目编号:0116610811)

Tel: 021-59914167 Email: zhanygdove@163.com

收稿日期: 2003-06-09

1.1 并联匹配光栅法增大测量范围的原理

当传感光栅受到压缩或拉伸时,其波长将减小或增大.如图1(b)所示,当 λ_1 与 λ_B 差值较大,即实线和虚线的两个高斯反射谱的中心波长相差较大时,两者卷积值很小,PD探测到的光信号将会很小,这时信噪比很小,测量将会有很大误差.如果再增大光栅的中心波长差,PD将几乎探测不到光信号.因此这里存在一个阈值 $\Delta\lambda$,即 λ_1 与 λ_B 的差值大于阈值时,PD探测到的信号不能从噪声中分别出来.这一阈值决定了可探测的应变或其他物理量的范围^[6].

因为普通光纤光栅的3 dB带宽在0.2 nm左右,所以在利用一个匹配光栅解调的方法中,系统可检测的应变或其他物理量范围非常有限.例如对于应变,通常可按下式计算^[6]

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{0.78 \times \lambda_B} \quad (1)$$

取 λ_B 为1550 nm,对于带宽为0.20 nm的光栅,可探测的最大应变范围为165 $\mu\varepsilon$ (为避免双值问题而只取用传感光栅反射谱的单边),这一范围对于许多应用都是不够的.

为了扩大测量范围,与通常的匹配光栅法不同,这里选择了两个与传感光栅的3 dB带宽及反射率近似相等、但布喇格中心波长相差一定值的光纤光栅分为两路匹配解调元件检测.信号光在被传感光栅反射后,带着被传感的信息经第二个耦合器入射到两路匹配光栅,反射后的光信号被各自的PD接收.各PD接受到的光信号强度与传感光栅的反射谱函数和其对应的匹配光栅反射谱函数的卷积值成正比关系.其原理的理论模拟如图2所示,两边虚线代表匹配光栅的反射谱,中间的实线代表传感光栅反射谱.传感光栅的中心波长 λ_B 随实际要求检测的物理量的范围而定.若检测的应变包含正负应变范围, λ_B 应满足: $\lambda_1 < \lambda_B < \lambda_2$;若要求检测的应变只包含正应变或负应变,那么相应的传感光栅的中心波长应选择为: $\lambda_B < \lambda_1 < \lambda_2$ 或 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_B$.

以 $\lambda_B < \lambda_1 < \lambda_2$ 为例,当传感光栅的反射谱与第一个匹配光栅的反射谱的重叠部分逐渐减小时,其与第二个匹配光栅的反射谱重叠部分逐渐增大,与第一个匹配光栅对应的第一个PD探测到的功率逐渐减小,与第二个匹配光栅对应的第二个光电探测器的探测功率逐渐增大.这一方法因此可以利用两个匹配光栅的范围重叠增加并实现大范围的应变或其他物理量的传感测量.同时它还可以解除单光栅解调时为避免双值问题而只取用传感光栅反射谱的单边的限制.具体见接下来的分析.

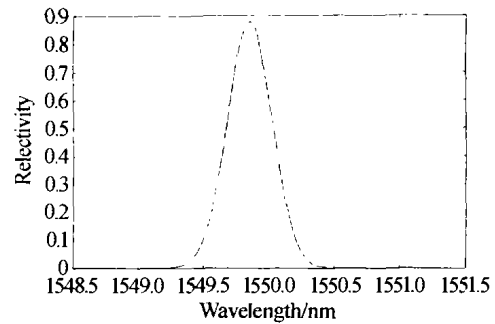


图2 传感光栅与两个并联匹配检测光栅反射谱示意图

Fig.2 The spectra of sensor FBG and the two paralleled matched FBGs

1.2 可以解决双值问题的原理

在单匹配光栅解调方法中,对于PD接收到的某一光强值,对应传感光栅的波长可能等于匹配光栅中心波长两侧接近对称的两个不同波长值,解调系统本身无法辨认,这就是单个匹配光栅解调时的双值问题.由图2可知,当光栅发生某一应变时,两个PD均接受到了信号,但是接收到的光功率不同,输出电压不同.也就是说,一个需要测量的应变有两个输出信号对应,这两个信号来自不同的PD输出,只要选取合适的中心波长和带宽,即可根据前一路的输出来确定后一路的输出是对应于后一路可能对应的双值中的哪一个.反之亦然.因此双光栅解调方法在本质上已经内在地具备了解决双值问题的能力.

1.3 利用两路信号优化最终传感结果的原理

两路并联的结果为我们能够利用计算机对信号进行处理从而获得更稳定和更准确的测量结果.

首先,因为数据采集速率达到100 Hz以上,可以对确定时间段内的所有测量值在软件上做统计平均处理,同时利用前面已经获得的数据预计后面的数据,将预计的数据与后面实测的数据对比,去除可以判断为偶然误差型的数据;同时在其中将两路的结果做每次的对比,只要发现两者由于误差引起的漂移不一致,则进行数据挑选;然后将处理和挑选完的结果作为该段时间内获得的最终测量数据输出.这样做的优点是,去除了由于光强抖动等产生的随机误差;避免了单路数据无法提供参考坐标从而无法判定绝对变量值的内在误差因素.同时这样还可以在相当程度上避免由于偶然或者固有原因如温度引起的漂移所带来的误差.

另外,通过一段时间的统计,可以分辨结果中是否具有环境温漂引入的误差,从而可以通过软件设计自动在输出结果中分离这一误差.这对于光纤光栅传感器系统总是要面对温度与其他传感量的固有问题的解决具有重要的意义.因为一般这一问题都要加入硬件来同时给出温度信息.而这里的好处就

是不再需要这样的硬件单元. 通过计算机程序设计好的模式, 将由光栅本身特性所决定的温度漂移曲线预先输入程序, 假如发生了温漂, 只需从所获得的应变曲线中减去温漂引起的数值, 即可获得准确的应变引起的传感量结果. 因为在我们的准高速采样下, 应变变化结果是一个随机量, 而环境温度变化引起的温漂则是一个缓变量, 所以非常容易地就可以利用统计规律在软件上去除温度变化引起的影响. 这一考虑的直接结果是我们在本设计中无需专门添加温度与应变分离的解调硬件装置, 当然也就同时去除了温度测试硬件. 所有的工作只需要事先在实验室测定光栅的温度引起应变的曲线, 然后在软件上添加一个功能模块即可.

2 实验及结果

图 3 为实验装置示意图, 两个匹配光栅的中心波长 λ_1 、 λ_2 分别为 1549.78 nm 和 1550.01 nm. 实验通过加砝码对悬臂梁施加拉伸的应力而引起光栅的正应变, 传感光栅的中心波长 λ_B 为 1549.56 nm. 所用光栅的 3 dB 带宽均为 0.2 nm. 两个匹配光栅反射的光信号同时分别被 PD1 和 PD2 接收, PD 输出的模拟电压信号由数据采集卡采集到计算机变为数字信号, 直接由 Labview 程序显示出来, 直到所显示的电压信号与噪声信号不能分辨为止. 程序中加入了 Savitzky-Golay 滤波器处理, 以消除部分噪声, 提高信噪比. 最终的输出结果是在此采集的数据基础上进一步处理以后所得, 具体的数据处理方法和过程限于篇幅, 这里不予给出.

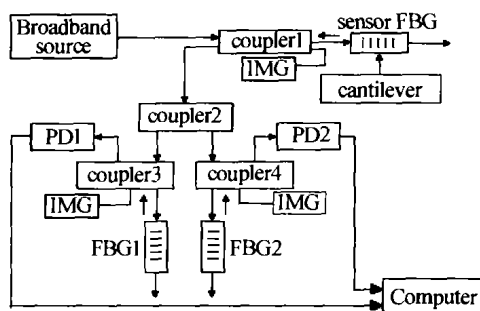


图 3 反射并联匹配光栅测量大范围应变的方案示意图
Fig. 3 Sketch of the paralleled reflective-matched FBGs for demodulation scheme

实验结果如图 4 和图 5 所示: 图中 AE、GC 和 BH、FD 分别为两路检测的线性响应(线性拟合的相对误差为 2.13×10^{-4})部分. 加砝码时光栅发生正应变, 使光栅布喇格中心波长增大, 两路的 PD 输出电压发生变化. 当所加的砝码质量在 AB 范围(30 ~ 1280 g)内时, PD1 的电压输出随所加的砝码质量增大而线性的增大, PD2 的电压输出随所加的砝码的增大呈非线性响应; 砝码的质量继续增大(在

BM, MN, NC, 或 CD 范围内)时, 总有对应的线性电压输出.

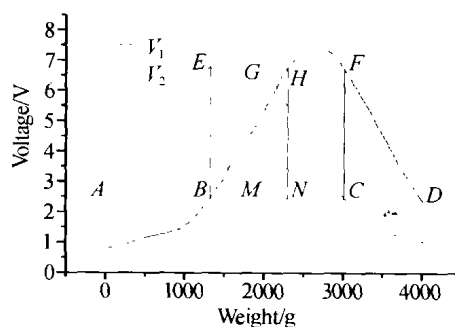


图 4 实验测量结果
Fig. 4 Results of the experimental measurement

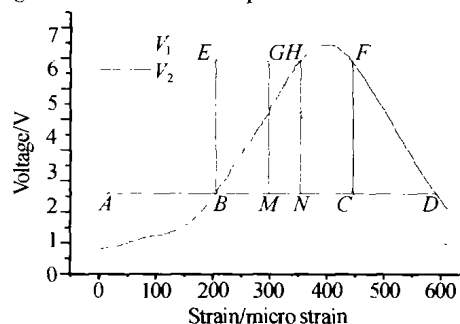


图 5 电压 ~ 应变的关系图
Fig. 5 Curve of the output voltage of the PDs to the strain of the sensor FBG

图 4 为砝码 - 电压关系图, 而图 5 为应变 - 电压关系图. 图中 V_1 为第一路光电探测器的输出电压, V_2 为第二路光电探测器的输出电压. 这样的两路输出电压结合的方式, 可以解决双值问题, 例如当根据 V_1 值无法确定传感光栅的应变是处于 A 或者 C 点时, 只要根据 V_2 的大小, 即可准确判定传感光栅的应变值. 同样如原理中所述的, 可根据两条曲线的对比去除光源抖动等引起的误差.

3 分析与讨论

根据所用悬臂梁的物理尺寸和材料计算知道, 在一端加 1000 g 砝码时可引起悬臂梁 $130 \mu\epsilon$ 的应变. 实验中加 30 ~ 4020 g 的范围内加砝码时均有对应的 PD 电压线性响应. 光栅粘于梁的表面中心处, 所以光栅受到的应变与梁受到的应变相等, 其对应的应变数为

$$\Delta\epsilon = [(G_{\max} - G_{\min}) / 1000] * 130 = 515 \mu\epsilon$$

即由一个匹配解调光栅时可解调的 $165 \mu\epsilon$ 增大到 $515 \mu\epsilon$, 这一测量范围符合绝大多数桥梁、建筑物等应变监测系统的测量要求. 试验中系统的应变分辨率达到了 $0.65 \mu\epsilon$.

另外, 从图 5 可以看出, 第一档的非线性部分与第二档的线性部分交叠, 同理, 第二档的非线性部分也与第一档的线性部分交叠. 选取两个合适的功率阈值, 也即探测器输出电压的阈值 V_L 、 V_H , 就可将图

5 中的曲线转化为如图 6 所示的四条直线相接而构成的一条折线,即应变的变化总有与之对应的线性变化的电压输出,消除了非线性部分的数据。

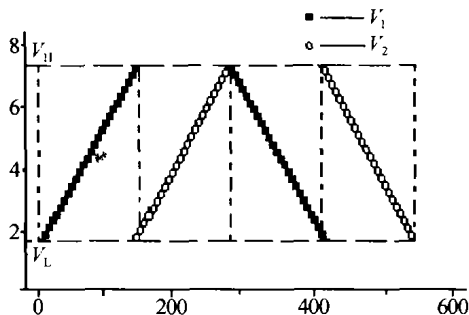


图 6 解决双值问题的模型

Fig. 6 Model to solve two-values question

根据图 5 和图 6,具体的定标程序如下

$$\varepsilon = \begin{cases} V_1 k_1 & V_L < V_1 < V_H \quad \text{且} \quad V_2 < V_L \\ V_2 k_1 + \varepsilon_1 & V_H < V_1 \quad \text{且} \quad V_L < V_2 < V_H \\ \varepsilon_2 + V_1 k_2 & V_L < V_1 < V_H \quad \text{且} \quad V_H < V_2 \\ \varepsilon_3 + V_2 k_2 & V_1 < V_L \quad \text{且} \quad V_L < V_2 < V_H \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_1, k_2, k_3 和 k_4 是与图中数据有关的电压-应变转化系数, $\varepsilon_1 = V_1 * k_1, \varepsilon_2 = V_2 * k_2, \varepsilon_3 = \varepsilon_2 + V_1 k_3$. 若两个匹配光栅的反射谱相同,则有, $k_1 = k_2, k_3 = k_4 = -k_1$. 即根据两个探测器的输出电压的相互比较关系,能够判断和定标出所对应的传感光栅的波长即其所发生应变的确切值,克服了双值问题。

在没有利用两路的数据进行处理并将处理结果作为最终数据之前,我们发现,直接输出的数据最多可有的抖动限制了只能将结果判定为 $\pm 5 \sim 10$ 个微应变的精度. 在处理之后,根据相对于施加于悬臂梁的应变变化情况的对比,实验中发现结果的应变数据序列已经表现得没有明显的抖动性,精度已经被改善到了 $\pm 0.5 \sim 1$ 个微应变甚至更小,表明由于系统中光强抖动以及 PD 自身的精度抖动等因素已经得到去除。

另外,实验中通过空调变化环境温度初步试验了系统分离温度漂移的能力,结果正如我们所预计的,随着温度上升,在 20°C 的范围中,整个获得应变曲线斜率有明显的变化,当通过减去温度理论上会

引起的漂移量后,应变曲线的斜率回到了我们实际所加应变的规律上. 关于这一点,我们正进一步做细致的实验,但这里已经明显地给出了本系统能力的证明。

4 结论

提出两个并联匹配光栅的解调方案并从实验上证实,从下述几个方面优化了光纤光栅传感器的匹配光栅解调方法:

1) 扩大了被传感量(包括应变、温度等)的可解调范围. 匹配光栅并联的数量实际上还可以增加,以实现应变等物理量的更大范围检测。

2) 两个 PD 的输出电压为数据采集卡的两路模拟输入信号,通过简单的信号处理,可以解决单个二次反射匹配光栅解调时存在的双值问题。

3) 结合两路信号的结果,可以消除光强抖动等产生的随机误差,并可以修正环境温漂引起的误差,无需专门添加温度与应变分离的测量装置,优化了最终解调的传感结果。

以上的优势使得本文提出的方案可以在光纤光栅传感器的波长解调中推广使用. 解调系统简单、廉价,具有实用价值。

参考文献

- 1 Rao Y J. Recent progress in application of in-fiber bragg grating sensors. *Optics and Laser in Engineering*, 1999, **31**(4):297 ~ 324
- 2 Zhang S L, Lee S B, Fang X, *et al.* In-fiber grating sensors. *Optics and Laser in Engineering*, 1999, **32**(5):405 ~ 418
- 3 Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic bragg grating sensors. *Proc SPIE*, 1989, **1169**:98 ~ 107
- 4 Kersey D A, Davis A M, Patrick J H, *et al.* Fiber grating sensors. *Journal of Technology*, 1997, **15**(8):1442 ~ 1463
- 5 盛秋琴, 施可彬, 高立模, 等. 光纤光栅振动传感匹配检测方法的研究. *光学学报*, 2002, **22**(7):847 ~ 851
Sheng Q Q, Shi K B, Gao L M, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7):847 ~ 851
- 6 Lobo A B, Ribeiro L A, Ferreira J L, *et al.* Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme. *Applied Optics*, **36**(4):934 ~ 939

Study on the Optimization of Matched Grating Interrogation Technique of Fiber Grating Sensor

Zhan Yage, Lu Qing, Xiang Shiqing, Fang Zujie, Wang Xiangzhao

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2003-06-09

Abstract A technique for the interrogation of fiber Bragg grating (FBG) sensors based on the use of two paralleled second wavelength-matched FBG receiver to track wavelength shift from the FBG sensor was analyzed and experimented. Selecting two FBGs with appropriate wavelength and bandwidth as second wavelength-matched FBG receivers, the real-time analog electric signal from the photo detectors was collected by the Data Acquisition Card, and then was processed by the computer. The method can enlarge the dynamic range and high resolution. The advantages and the disadvantages of the method were analyzed. The sensor and interrogation system has been optimized. The experiment results are in excellent agreement with the theoretical analysis.

Keywords Sensor; Strain; Optical fiber Bragg grating; Paralleled reflective-matched detection

Zhan Yage was born in 1978. She received the B. S. degree in physics from Henan University in 2000, and the M. S. degree in optical engineering from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, in 2002 respectively. She is now working for her Ph. D. Her research interests include fiber Bragg grating sensors and interrogation technology.

