

文章编号 1004-924X(2007)04-0473-05

光纤光栅空分光复用传感系统的研究

李 丽^{1,2}, 林玉池¹, 付鲁华¹, 沈小燕¹, 陈清海¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 天津理工大学 自动化与能源工程学院, 天津 300191)

摘要:介绍了一种光纤光栅空分复用传感系统,并将光纤光栅的传感特性应用于结构健康检测系统中。宽带光源发出的光波进入光栅阵列时,利用光开关选通不同光路实现 FBG 空分复用传感系统。系统采用等腰三角形悬臂梁调谐装置对 FBG 进行挠度加载,利用非平衡 M-Z 干涉技术对传感信息进行解调,将包含被测应变信息的 FBG 波长信号转变成相位信号,从而得到被测应变的大小,成功地实现了空分复用传感。该系统可用于静态应变和动态应变的检测,具有高分辨力、大测量范围的特点,其传感分辨率为 $7.3 \text{ n}\epsilon$,灵敏度的实验值为 $0.82^\circ/\mu\epsilon$ 。

关键词: 光纤光栅; 应变传感; 干涉解调; 空分复用; 相位测量

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors

LI Li^{1,2}, LIN Yu-chi¹, FU Lu-hua¹, SHEN Xiao-yan¹, CHEN Qing-hai¹

(1. *State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*; 2. *School of Automation and Energy Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China*)

Abstract: Controlled by an optical switch, a fiber Bragg grating sensing system based on spatial division multiplexing is developed under a broad-band source illumination. With an isosceles triangle cantilever beam to realize linear tuning of Bragg wavelength of fiber grating without chirping, the system employs an unbalanced Mach-Zehnder interferometer to translate the FBG wavelength signal into phase signal. The strain can be recovered by measuring the phase change with signal processing circuit. With a high resolution characteristic and wide measurement range, this sensor system has the capability of measuring static strain as well as dynamic strain. Experiment demonstrates that the sensing sensitivity of this system is resolution of $7.3/\mu\epsilon$, and experimental sensitivity of $0.82^\circ/\mu\epsilon$.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); strain sensing; interferometric demodulation; spatial division multiplexing; phase measurement

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器是近几年光纤传感技术领域的研究热点,也是进行应力和温度测量的有力竞争者。它们有许多特性优于传统的传感器,如灵敏度高、防电磁干扰、耐腐蚀、避免接地回路、带宽大和远程操控能力以及在高温下对微应力的有效测量。基于光纤光栅的传感器在民用工程领域和军事领域均有广泛的应用前景^[1-4],特别是在材料中分布式埋入传感器组成智能结构的领域,近 10 年引起很多的关注。由于大规模、多点应用于结构健康监测的光纤光栅传感阵列需求,使得光纤光栅复用传感技术成为目前研究的热点。而在许多需要进行多点测量的应用中,网络中的传感器要求能够相互独立地、可相互交换地工作,并能够在 FBG 传感器损坏时可替代,而不需要重新进行校准。空分复用(SDM)网络^[5-6]突出的优点就是各传感器相互独立工作,互不影响,因此串音效应很小,信噪比较高;同时,复用能力不受频带资源的限制。根据光纤光栅的传感原理,本文介绍了一种基于非平衡 M-Z 干涉解调系统和空分复用技术的 FBG 复用传感系统^[5-7],对应变传感参数进行了研究,测量系统分辨力达到 0.006°。

2 工作原理

如图 1 所示,宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器进入光开关阵列,光开关受信号控制电路控制

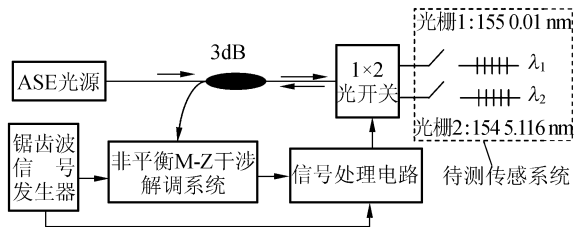


图 1 传感系统整体方案设计图

Fig. 1 Integral scheme of sensing system

可选通光路,光波经待测传感系统后进入非平衡 M-Z 干涉解调系统,干涉仪将来自传感光栅的包含被测应变的波长信号转化为相位信号,再通过

信号处理电路,即可得到传感光栅上待测应变的大小。由于应变使得传感光栅出现波长漂移,温度不变时,相对漂移量 $\Delta\lambda/\lambda_B$ 与轴向应变 ϵ 成正比^[8]即:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中 P_e 为有效弹光系数,若干涉仪的臂长差为 L ,纤芯折射率为 n ,当光纤光栅反射光中心波长移动 $\Delta\lambda$ 时,相当于注入干涉仪的光频(波长)发生变化,输出相位变化为^[9]

$$\Delta\phi \approx -\frac{2\pi n L \Delta\lambda}{\lambda_B^2}, \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),则有:

$$\epsilon = -\frac{\lambda_B}{2\pi n L (1 - P_e)} \Delta\phi, \quad (3)$$

由式(3)可知相位的变化与施加在传感光栅上的待测应变大小有关^[10-11],且呈线性关系,通过对非平衡 M-Z 干涉仪的输出相位进行检测,就得出待测物理量(应变)的大小。通过观测相位的变化可判断待测应变的变化程度,进而得到 FBG 波长移动变化量。

3 实验过程及结果

3.1 光电转换及放大

系统采用中心波长分别为 1 550.010 nm 和 1 545.116 nm 的两根传感光栅,非平衡 M-Z 干涉仪的臂长差 L 为 4.55 mm,光纤纤芯的有效折射率 n_{eff} 为 1.448 9,将干涉仪的一个臂粘贴在压电陶瓷上,另一个用作参考臂。当有电压加在压电陶瓷上时,压电陶瓷的伸缩效应使光纤拉伸(或缩短)^[12],引起干涉仪两臂差发生改变。压电陶瓷 PZT 受锯齿波信号驱动,压电陶瓷的伸缩导致该臂光程周期性改变,从而对波长进行扫描,锯齿波驱动信号频率为 100 Hz。

由光电探测器得到的干涉信号经二次放大后为 2 V 左右,呈正弦波曲线变化规律。当信号发生器频率为 100 Hz,信号发生器输出锯齿波信号的幅值调为 0.64 V,直流偏置为 0.32 V 时,两路信号的频率一致,且干涉信号为规律的正弦曲线,图 2 为示波器观察到的干涉信号与参考信号的波形图。当给光纤光栅施加拉应变时,两路信号的相位差变小,干涉信号向左移动;当给光纤光栅施加压应变时,两路信号相位差变大,干涉信号向右

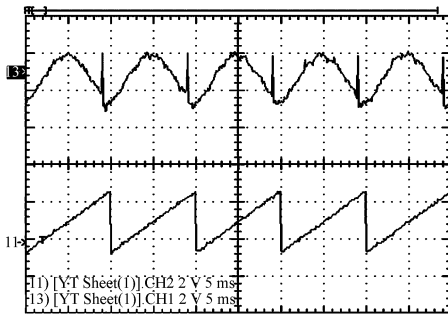


图 2 放大后的波形图

Fig. 2 Amplified oscillogram

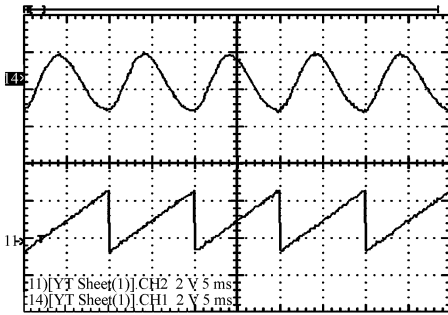


图 3 滤波后光电信号波形图

Fig. 3 Photoelectric oscillogram after filtering

移动。由于外界干扰和锯齿波高频分量的影响, 会给信号带来一些噪声, 所以必须通过滤波电路去除, 图 3 为经过滤波后的光电信号波形图。

3.2 实验过程

利用光谱仪对等腰三角形悬臂梁的调谐装置进行应变检测来评价该调谐装置, 将光纤光栅 FBG 粘贴于悬臂梁的中心线上, 利用螺旋测微仪调节悬臂梁自由端挠度, 对 FBG 施加拉应变和压应变, 由于梁的变形引起光栅的波长变化量与施加在梁自由端的挠度呈线性关系, 实验中通过用光谱仪扫描 FBG 的反射光谱测得不同挠度下 Bragg 波长的变化量。通过数据分析可得, 拉应变下光栅 1 545.116 nm 和 1 550.010 nm 的调谐灵敏度分别为 0.133 nm/mm 和 0.106 nm/mm, 压应变下调谐灵敏度分别为 0.138 nm/mm 和 0.114 nm/mm。对数据进行最小二乘法直线拟合, 并采取添加修正因子的方法使实测值与理论值逼近, 测试结果表明挠度与中心波长呈良好的线性关系, 该调谐装置符合系统要求。

在此基础上实现 FBG 应变传感的实验研究,

通过对悬臂梁调谐装置进行挠度加载应变传感实验、重复性实验和稳定性实验等, 对所设计的传感系统进行指标评价。实验中将传感光栅的 Bragg 反射光波通过一个耦合器同时输入到光谱仪和干

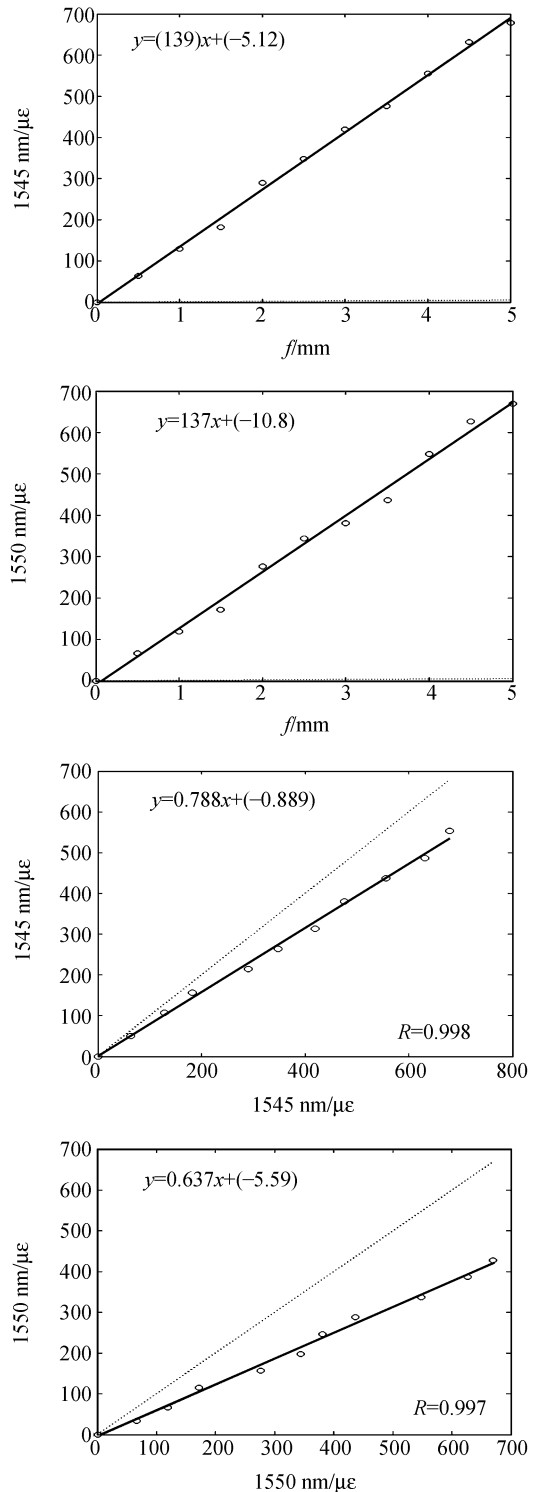


图 4 拉应变下光纤光栅的实验结果曲线图

Fig. 4 Experimental plot of fiber grating strain response

涉解调系统中,通过调节悬臂梁的挠度实现对光纤光栅的调谐,此时,将光谱仪测得的量作为基准,对系统所测的应变值进行标定,并与解调系统所测得的结果相对比。系统检测 1 545 nm 和 1 550 nm 系列两根光栅的分辨率分别为:在拉应变下为 $1.374 \mu\epsilon$ 和 $1.374 \mu\epsilon$,在压应变下为 $1.385 \mu\epsilon$ 和 $1.383 \mu\epsilon$;光栅应变灵敏度分别为拉应变下: $S_{545} = 139 \mu\epsilon/\text{mm}$ 和 $S_{1550} = 137 \mu\epsilon/\text{mm}$,压应变下 $S_{545} = 138 \mu\epsilon/\text{mm}$ 和 $S_{1550} = 38 \mu\epsilon/\text{mm}$,可以看出两根光栅在承受拉、压应变下的灵敏度基本相同,造成这一差别的原因主要是粘贴过程中光纤光栅存在预应力和调谐装置未能完全将应变传达至光纤光栅。综合以上得到两根光栅的分辨率分别为 $1.380 \mu\epsilon$ 和 $1.379 \mu\epsilon$,灵敏度分别为 $S_{1545} = 138.5 \mu\epsilon/\text{mm}$ 和 $S_{1550} = 137.5 \mu\epsilon/\text{mm}$;最后通过添加修正因子对系统进行标定,分别为拉应变下: $\eta_{1545} = 1.489$ 和 $\eta_{1550} = 1.516$,压应变下: $\eta_{1545} = 1.489$ 和 $\eta_{1550} = 1.476$,即可使系统测得值与理论值基本吻合。实验结果如图 4 所示(以拉应变为例),挠度加载与系统所测应变量呈现良好的线性关系。

图 5 为 $\Delta\phi$ 与 ϵ 间变化的实验曲线,两者呈线性关系,其斜率值为 $0.82^\circ/\mu\epsilon$,是本系统传感灵敏度的实验值。而典型的石英光纤 $P_e = 0.22^{[13]}$,由式(2)确定的灵敏度理论值为 $1.19^\circ/\mu\epsilon$ 。造成理论值与实验值出现少量差别的原因有:(1)引用的 P_e 与所用光纤材料的实际值有出入;(2)螺旋测

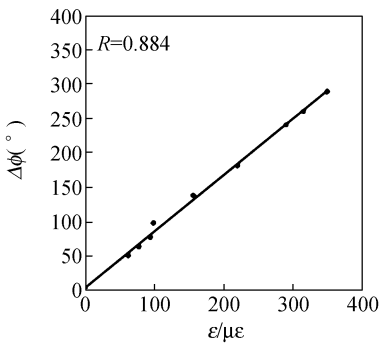


图 5 $\Delta\phi$ 随 ϵ 变化关系实验曲线

Fig. 5 Relationship between the variations of phase $\Delta\phi$ and applied strain ϵ

微仪的探头与悬臂梁自由端相接触进行挠度加载时可能发生一些滑动,使悬臂梁的受力产生一个倾角,造成应变读数有误差存在;(3)光纤光栅的粘贴质量、环境温度的影响。通过添加修正因子对系统进行标定,取修正因子: $\eta_{1545} = 1.489$ 和 $\eta_{1550} = 1.516$,进一步的应变实验表明,检测值与理论值基本吻合。

4 结 论

本系统采用悬臂梁调谐装置对 FBG 进行挠度加载,结合空分复用技术采用光开关实现 FBG 阵列的复用,利用非平衡干涉技术对传感光栅的波长信息进行解码,成功地对应变进行了感测。该系统的传感灵敏度为 $0.82^\circ/\mu\epsilon$,由于系统的传感分辨率主要取决于干涉仪的臂长差和相位检测系统的测量精度,则其对应的系统传感分辨率为 7.3 ne 。该方案最大的优点就是能够准确地进行空间选址且检测精度很高,因为空分复用的 FBG 传感元基于并行接法,减少了通常如波分或时分复用所采用的单一光纤串由于断裂而造成的损失,平行连接光纤上的 FBG 可以是相同的布拉格波长,它不受复用数目的约束,也可以减少成栅的费用;单根光纤上 FBG 数目少,这样网络布置起来具有更大的灵活性;空分复用增加 FBG 复用的数目的同时,不会降低信噪比,而且同样复用数目的 FBG,采用空分复用的方法可以有效地减少传感元间的串音,不足之处就是空分复用的功率利用率较低,实际复用的传感器不能太多。

系统中只给出了两个波长的形式,实际上,这一工作的特点在于多波长,只要在光源带宽和待测物理量的动态范围内的任何波长的光栅都可以适用于此传感系统。另外,SDM 的网络复用能力,分辨率和工作速率与采用的探测技术有很大的关系。本系统如果采用 $1 \times n$ 多路开关,即可实现 n 路信号的解调。该系统具备查询解调光纤光栅网络传感信号的能力,结合波分复用技术以植入的方式对复合材料或其他结构的内应力分布进行实时监测,具有实际使用价值和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 姜德生,范典,梅加纯.基于FBG传感器的波分复用技术[J].激光与光电子学进展,2005,42(4):14-19.
JIANG D SH,FAN D,MEI J CH. Multiplexing/demultiplexing technology based on fiber Bragg grating sensors[J].
Laser Optoelectron. Prog., 2005,42(4):14-19. (in Chinese)
- [2] 唐婷,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程. 2002,10(1):79-83.
TANG T,SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):79-83. (in Chinese)
- [3] 钱晋武,孙流川,沈林勇,等. 非开挖地下管线探测中的弯曲变形检测装置研究[J]. 光学精密工程, 2005,13(2):179-184.
QIAN J W,SUN L CH,SHEN L Y,*et al.*. On sensing apparatus for bending deformation in trenchless underground pipeline detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):179-184. (in Chinese)
- [4] 桑新柱,余重秀,颜纷纷,等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. 光学精密工程, 2006,14(5):771-774.
SANG X ZH,YU CH X ,YAN B B,*et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):771-774. (in Chinese)
- [5] RAO Y J, KALLI K, BRADY G,*et al.*. Spatially-multiplexed fiber-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron. Lett.*, 1995,31:1009.
- [6] 余永龙,谭华耀. 有源波、空分复用光纤光栅传感网络[J]. 中国激光. 2002,29(2):131-134.
YU Y L,TAN H Y. Active spatial/wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Laser*, 2002, 29(2):131-134. (in Chinese)
- [7] 张燕君,陈才和,吴波,等. 硅微光机械加速度地震检波器中 M-Z 光波导干涉仪结构设计[J]. 光学精密工程, 2006,14(1):77-82.
ZHANG Y J,CH C H,WU B,*et al.*. Structure design of Mach-Zehnder interferometer in electrooptic integrated acceleration seismic geophone[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):77-82. (in Chinese)
- [8] 江毅,陈伟民,杨礼成,等. 光纤光栅用于应变/温度传感初探[J]. 传感技术学报,1997,9(3):43-47.
JIANG Y,CHEN W M,YANG L C,*et al.*. The investigation on strain/temperature sensor based on optic-fibre grating[J]. *Chin. J. Sensor Actuator*. 1997,9(3):43-47. (in Chinese)
- [9] KERSEY A D. A review of recent developments in optic sensor technology[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1996,2:291-317.
- [10] CHANG L W,LEE C T. Displacement measurement by synthesized light source based on fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Commu.*, 1998,154:261-267.
- [11] HO H L,JIN W,CHAN C. A fiber Bragg grating sensor for static and dynamic measurement[J]. *Sensor Actuator A*, 2002,96:21-24.
- [12] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程,1998,6(5):26-32.
ZHANG T,SUN L N,CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(5):26-32. (in Chinese)
- [13] 余永龙,谭华耀,鍾永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. 光学学报. 2001,21(8):987-989.
YU Y L,TAN H Y, CHUNG Y H. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001,21(8):987-989. (in Chinese)

作者简介:李 丽(1974—)女,讲师,天津大学博士研究生,研究方向为光纤传感和精密测试技术。E-mail:green_linda@163.com

林玉池(1946—)男,教授,博士生导师,主要从事光电测控与视觉检测技术、现代传感与测试、信息技术等方面研究。E-mail:yuchilin@tju.edu.cn.