

时分复用光纤光栅系统的边缘滤波解调与标定

巩 鑫 华灯鑫 李仕春 王 骏 代晨昱

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 为实现高空间分辨率和高测量精度的准分布式光纤光栅应变传感系统,研究了基于时分复用光纤光栅传感系统的解调和标定方法。将波分复用和时分复用技术相结合,得到两个低反射率光纤光栅的应变灵敏度分别为 $33.40 \mu\epsilon/\text{mV}$ 和 $38.47 \mu\epsilon/\text{mV}$,标定的非线性误差为 2.8% 。基于光纤光栅光谱边缘滤波技术,构建时分复用光纤光栅应变传感系统,提出复用光纤光栅应变的交叉传感解调算法,实验测试并解调两个光纤光栅的交叉传感数据。实验分析表明,单次测量传感系统的最大误差为 $18 \mu\epsilon$,应变大于 $100 \mu\epsilon$ 时的传感相对误差小于 5% ,满量程 $600 \mu\epsilon$ 的引用误差小于 2% 。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 时分复用; 应变传感; 解调方法

中图分类号 TN86; TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1010006

Edge Filtering Demodulation and Calibration of Fiber Grating System Based on Time-Division Multiplexing

Gong Xin Hua Dengxin Li Shichun Wang Jun Dai Chenyu

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract To achieve the quasi-distributed fiber grating sensing system with high spatial resolution and high measurement accuracy, the demodulation and calibration methods for the fiber grating sensing system are studied based on the time-division multiplexing technology. By combining the wavelength-division multiplexing technique with the time-division multiplexing technique, the obtained strain sensitivities of the two fiber gratings with a low reflectivity are $33.40 \mu\epsilon/\text{mV}$ and $38.47 \mu\epsilon/\text{mV}$, and the non-linear error of the calibration is 2.8% . A time-division multiplexing fiber grating strain sensing system is established based on the edge filtering technique of the fiber grating spectrum. The cross-sensing demodulating algorithm of the multiplexing fiber grating strain is derived, and we test and demodulate the cross-sensing data of the two fiber gratings by experiments. The results show that the maximum error of the sensing system for a single measurement is $18 \mu\epsilon$, the relative error is less than 5% under the condition that the strain is more than $100 \mu\epsilon$, and the quoted error is less than 2% when the full scale is $600 \mu\epsilon$.

Key words fiber optics; fiber gratings; time-division multiplexing; strain sensing; demodulation method

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.4080

1 引 言

随着我国基础设施建设能力日益增强,需实时监测设施建筑结构的健康状况,以评估安全等级。光纤布拉格光栅(FBG)分布式应变传感系统作为一种健康状况的实时监测系统,发展较快,已应用于大型工程结构(如大坝、桥梁、航天器、船舶等)的安全监测领域^[1-3]。FBG 传感网络可通过复用技术实现分布式多点物理

收稿日期: 2016-04-14; 收到修改稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(61275185,61308106)、陕西省自然科学基金(2013JM5001)、陕西省教育厅科学研究计划专项(15JK1529)

作者简介: 巩 鑫(1984—),女,博士研究生,主要从事光纤传感及激光雷达分光方面的研究。

E-mail: gongxinhh@163.com

导师简介: 华灯鑫(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光雷达大气遥感探测方面的研究。

E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn(通信联系人)

参数的传感和探测^[4-6]。目前 FBG 复用技术主要包括波分复用(WDM)、时分复用(TDM)和空分复用(SDM)。WDM 为最成熟的复用方式,但复用数目受限于宽带光源的带宽,系统复用通道有限。SDM 多用于冗余传感设计以增加可靠性,通常与另外两种复用方式相结合构成 FBG 传感网络^[7-9]。

TDM 技术采用串联拓扑结构,可在单根光纤上间隔一定距离复用具有相同中心波长的低反射率 FBG (LR-FBG)^[10-11]。2003 年,Zhang 等^[12]提出了一种可降低光源起伏和光纤弯曲损耗的结构,提高了 LR-FBG 回波信号的探测可靠性;2005 年,Enami 等^[13]利用光时域反射计对 LR-FBG 进行应变测试,探测精度可达 $10 \mu\epsilon$ 量级;同年,Eom 等^[14]设计了应用于温度传感的 FBG 网络;2007 年,Lo 等^[15]利用双波段组合光源提高了光时域反射计传感系统的空间分辨率。以上方法都采用宽谱光源的边缘解调信号。2009 年,Crunelle 等^[16]利用可调谐激光器研制了温度传感系统,精度可达 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$;2010 年,刘川等^[17]利用扫描激光解调 LR-FBG,并采用掺铒光纤和拉曼混合放大技术增加传感距离;2013 年,张燕君等^[18]采用自制可调谐光源,解调时分复用 FBG 的传感网络。因此,光源扫频方法是 TDM 技术 LR-FBG 传感系统的一种解调方法。与光源扫频技术相比,边缘滤波解调技术具有结构简单、测量快速的优点。目前,边缘滤波技术主要利用宽谱光源的边缘进行解调,但其较低的功率谱密度限制了系统的传感距离。随着光纤光栅刻制技术的逐渐成熟,光谱边缘特性趋于稳定。因此采用光纤光栅光谱边缘滤波技术进行解调,可降低时分复用光纤光栅传感系统的复杂性及成本。

本文通过实验实现了基于时分复用光纤光栅传感系统的 FBG 光谱边缘滤波解调和标定。采用串联相同 LR-FBG 拓扑结构的方式构成传感网络,由光纤分布反馈式(DFB)窄线宽激光器产生的高速脉冲信号作为激励光源,基于 FBG 光谱边缘滤波法解调应变变量,实现了单路光纤串联解调。采用基于波分复用的参考光路和拟合修正方法对信号的非线性进行修正,获得应变量和电压的直接关系,从而直观反映设施结构的形变量。

2 LR-FBG 应变测量系统

时分复用光纤光栅传感网络的测量原理:利用脉冲激光入射到传感光纤,与 FBG 波长相匹配的光信号经反射形成回波信号,根据回波信号的滞后时间确定该 FBG 在光路中的位置,进而获得应变发生的具体位置。为避免相邻 FBG 反射谱发生重叠,影响后续的信号处理,相邻 FBG 的最小间隔(即测量的距离分辨率) L_{\min} 必须满足

$$L_{\min} = 0.5\tau c/n, \quad (1)$$

式中 n 为光纤折射率, τ 为激光脉冲宽度, c 为光速。减小脉冲激光的脉宽可提高距离分辨率。

监测设施结构时,通过检测 FBG 反射中心波长 λ_B 的变化,确定应变大小,图 1 为基于光纤光栅光谱边缘滤波技术的解调原理。当 FBG 未受应变时,FBG 的反射光谱如图 1(a)中实线所示,其中心波长为 λ_B ;当 FBG 表贴处受到轴向拉伸应变时,FBG 反射光谱的中心波长 λ_B 发生红移,即中心波长由 λ_B 移动至 $\lambda_B + \Delta\lambda$,如图 1(a)中虚线所示,且偏移量 $\Delta\lambda$ 由应变大小决定。假设脉冲激光对应的中心波长为 λ_L ,FBG 受到轴向拉伸应变后, λ_B 相对于 λ_L 的位置发生改变,FBG 中心波长偏移量 $\Delta\lambda$ 引起反射信号功率的变化。图 1(b)

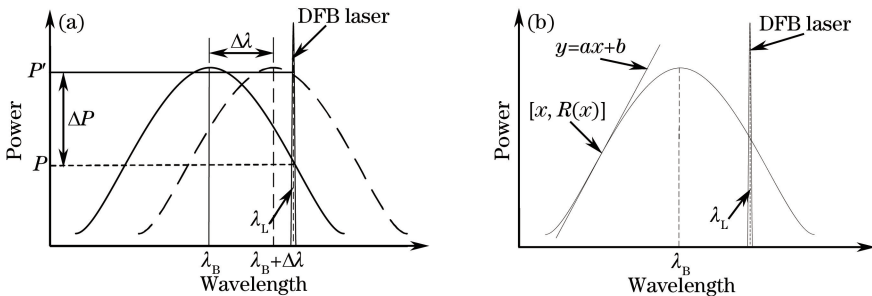


图 1 FBG 应变测量原理。(a) 受到轴向应力作用的 FBG 光谱;(b) FBG 光谱的边缘滤波解调

Fig. 1 FBG strain measurement schematic. (a) FBG spectrum subjected to axial stress; (b) edge filter demodulation of FBG spectrum

为 FBG 反射光谱的边缘滤波解调。

由于作为光源的 DFB 激光器的谱宽远小于 FBG 的半峰全宽,假设 DFB 激光谱线与 FBG 反射谱线 $[y=R(x)]$ 相交,且只存在一个交点,设该点坐标为 $[\lambda_L, R(\lambda_L)]$ 。解调时,只选取 FBG 谱线边缘线性度较高的部分,超出范围后会引入较大的非线性误差。激光波长与 FBG 反射光谱的初始位置如图 1(b)所示,图中直线为 FBG 反射光谱边缘点的切线,点 $[\lambda_L, R(\lambda_L)]$ 的解调直线可表示为

$$y(\lambda) = \frac{dR(\lambda_L)}{d\lambda_L} \lambda + R(\lambda_L) - \frac{dR(\lambda_L)}{d\lambda_L} \lambda_L. \quad (2)$$

采用边缘滤波解调时,随着线性度误差增大,应变测量范围逐渐增大,在切点处误差最小。FBG 反射光谱线性度最好的区域为半峰全宽(3 dB)附近,因此选取反射率略低于 3 dB 带宽的位置作为初始点。

影响 FBG 光栅周期的主要因素为应变 ϵ 和温度 T 。与应变相关的参数包括有效弹光系数 P_e 和光栅长度 l ,与温度相关的参数包括热膨胀效应 α_s 和热光效应 ξ_s ,应变和温度的变化引起有效折射率 n_{eff} 和波长 λ 的变化。FBG 的 $\Delta\lambda_B$ 与应变变化量 $\Delta\epsilon$ 、温度变化量 ΔT 之间的关系可以表示为^[19]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha_s + \xi_s)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon. \quad (3)$$

由(3)式可得,FBG 反射中心波长的漂移与应变(轴向应变)、温度的变化均呈线性关系。已有研究方案解决了温度与应变的交叉敏感问题^[20],这里着重讨论复用光纤光栅应变的交叉传感解调与标定。实验在恒温实验室 $[(25 \pm 1)^\circ\text{C}]$ 中进行,且忽略温度与应变的交叉敏感问题。

在恒温恒压环境中,仅考虑 FBG 受轴向应变时,(3)式可简化为

$$\Delta\lambda_B = K \Delta\epsilon, \quad (4)$$

$$P_e = n_{\text{eff}}^2 [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] / 2, \quad (5)$$

式中 K 为 FBG 的应变灵敏度, $K = \lambda_B(1 - P_e)$; P_{11} 为光纤纤芯的弹光系数; P_{12} 为光纤包层的弹光系数; μ 为泊松比。由(4)式和(5)式可得, $\Delta\lambda_B$ 和 FBG 受到外界影响所产生的轴向应变 $\Delta\epsilon$ 之间的关系为

$$\Delta\lambda_B = K \Delta\epsilon. \quad (6)$$

在实际应用中,光纤粘结剂的不同、梁杨氏模量的不同以及刚性连接不理想等问题导致理论灵敏度与实际灵敏度之间存在差异,因此反射中心波长随应变变化量 $\Delta\lambda_B$ 通常表示为^[20]

$$\Delta\lambda_B = \eta K \Delta\epsilon, \quad (7)$$

式中 η 为修正系数, $\eta \in (0, 1)$ 。

当串接多个 FBG 时,FBG 回波信号强度 x 与应变变量 y 之间应满足

$$\begin{cases} y_1(x_1) = k_{11}x_1 + b_1 \\ y_2(x_2) = k_{12}x_1 + k_{22}x_2 + b_2 \\ y_3(x_3) = k_{13}x_1 + k_{23}x_2 + k_{33}x_3 + b_3 \\ \dots \end{cases}, \quad (8)$$

式中 k_{11} 、 k_{22} 、 k_{33} 为 FBG 应变传感灵敏度, k_{12} 为 FBG₁ 对 FBG₂ 对应的回波信号的应变交叉灵敏度, k_{13} 和 k_{23} 分别为 FBG₁ 和 FBG₂ 对 FBG₃ 对应的回波信号的应变交叉灵敏度,其他系数的物理意义以此类推。

综上所述,通过建立 FBG 中心波长和回波信号功率之间的关系,采用边缘滤波解调法分析 FBG 的轴向应变特性,得到中心波长与功率、应变之间的线性关系;将这两种线性关系进行关联,得到应变和信号峰值电压之间的关系,从而由信号峰值电压直接得到应变变量。

3 解调与标定实验系统

基于光谱分析仪标定系统及高速数据采集卡的传感系统构成的光路如图 2 所示。采用时分复用方式串联两个 LR-FBG(峰值反射率 5%),它们分别表贴于悬臂梁 C_1 和 C_2 。由于光谱仪不具有自动区分光谱来源的功能,无法区分测量串联中心波长相同的 FBG 反射谱。因此,实验中采用光谱分析仪对单个悬臂梁上的 FBG 加减载荷后的波长变化进行标定;将高速数据采集系统(图 2 中虚线方框中的部分)作为 FBG 的解调仪器,对悬臂梁加减载荷后的电压变化进行解调;利用高速数据采集卡的高采样速率分别获取每个 FBG 的反射信号电压,进而实现 FBG 寻址。

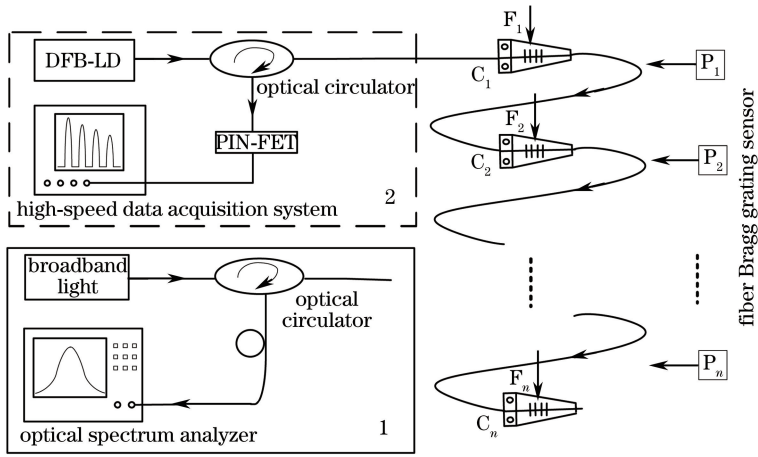


图 2 解调与标定系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of demodulation and calibration systems

信号解调与标定的具体过程如下。

1) 信号的解调。选定悬臂梁 C_1 上的 FBG 作为标定传感器接入光谱分析仪-标定系统,对 C_1 进行加减载荷实验。由宽带光源发出包含有 FBG 光谱范围的光信号,信号经环形器到达 FBG 传感器,同时有一部分光信号被反射回到入射方向,由环形器改变光纤传播路线后到达光谱分析仪,直接观察记录得到中心波长-载荷的关系,结合(6)式得到应变-载荷的关系。将 FBG 接入高速数据采集系统,进行同样步骤的加减载荷。采用高速数据采集模块对系统进行加减载荷标定时,窄脉冲激光器驱动电路驱动 DFB 激光器发出纳秒级的窄脉冲,经环形器到达 FBG 传感器,部分光信号被反射回到入射方向,再由环形器改变光纤传播路线后到达光电探测器,完成光电转换,最终由高速数据采集卡探测 FBG 反射脉冲的峰值,实现探测信号的解调。

2) 信号的标定。将探测信号转化为电压信号,不同的应变强度将产生不同的电压强度。光谱分析仪的标定系统与数据采集系统的区别在于数据采集方式不同,传感器和环境参数完全相同。因此,将同一时间段内两系统采集的数据进行对比标定,可得到第 1 个 FBG 上电压-应变的对应关系。以同样的方式对 C_2 上的第 2 个 FBG 进行标定。将 C_1 和 C_2 上的 FBG 串联,进行加减载荷的实验。将 C_1 加载固定的载荷量,改变串接的 C_2 处 FBG 发生的轴向应变,则 C_2 反射的光信号峰值改变,这些信号被光电探测器接收,因此可在高速数据采集模块上观测到 C_2 处 FBG 反射电压与载荷的关系。利用 TDM 光纤光栅传感系统的测量原理,同时可得到产生应变的具体位置(C_2)。利用上述方法,可获得 C_n 上产生的轴向应变,根据被测物体的需求,选择不同数目的 FBG,监测产生应变的位置。

4 实验测试与分析

4.1 标定实验

为了实现 TDM 光纤光栅应变传感系统的边缘解调,需要对系统进行标定。以 C_1 上固定的 FBG 为例,阐述标定实验过程。首先将 C_1 上 FBG 接入光谱分析仪系统(AQ6317C 型,分辨率为 0.015 nm),在 C_1 上进行附加载荷实验,每次增加载荷 500 N,共加载 26 次,最高加载值为 13000 N。FBG 的中心波长为 1542.2 nm,峰值反射率为 5%,半峰全宽为 1.4 nm。

图 3(a)为实验中 FBG 波长随载荷变化的数据, x 轴为实验在 C_1 上的加载荷, y 轴为 FBG 的中心波长。图 3(a)中空点为实验数据,直线为与实验初始条件相同的理论计算值。FBG 的中心波长随着载荷的增加产生相应的漂移,即传感器上施加的载荷变大,FBG 中心波长产生红移;当载荷从 0 N 增加到 1.3×10^4 N 时,中心波长从 1542.206 nm 增加至 1542.982 nm(漂移量为 0.776 nm)。根据图 3(b)中的误差分布可知,标定系统中 FBG 受载荷后波长的最大平均线性误差值为 0.028 nm,中心波长漂移量为 0.776 nm,因此得到光谱分析仪的系统误差为 2.7%。

光纤的材料为熔融石英,参数 $P_{11} = 0.121, P_{12} = 0.270, \mu = 0.17, n_{\text{eff}} = 1.468$ 。根据(5)式,得到

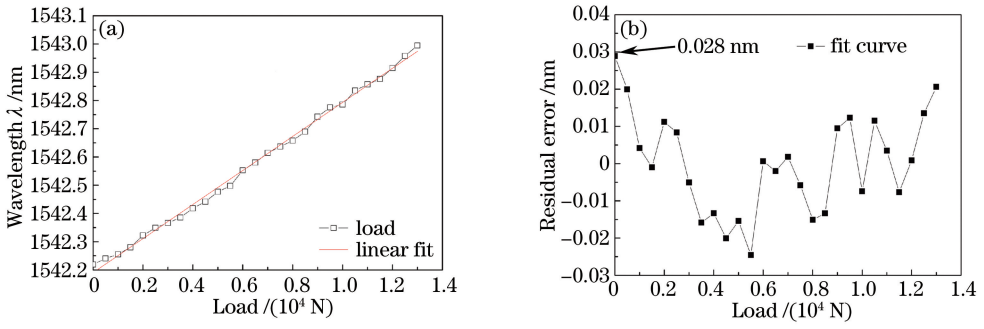


图 3 (a)中心波长和(b)残余误差随载荷的变化

Fig. 3 (a) Center wavelength and (b) residual error versus load

$P_e = 0.216$ 。当 $\lambda_B = 1543 \text{ nm}$ 时,轴向应变引起的FBG波长变化的灵敏度 $K = 1.22 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。因此,在温度恒定条件下,FBG轴向应变与波长漂移量呈良好的线性关系。由(6)式可知,当FBG受到载荷作用时,中心波长为 $\lambda'_B = \Delta\lambda + \lambda_B$,由此可将图3(a)中的波长和载荷的关系转换为应变和载荷的关系,如图4所示。

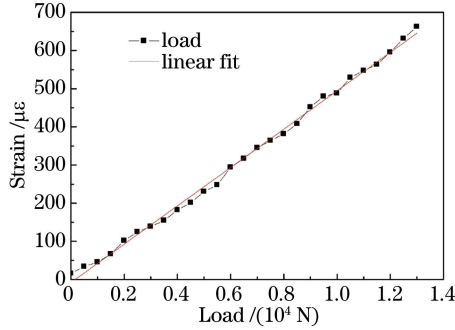


图 4 应变随载荷的变化

Fig. 4 Relationship between strain and load

图4中应变量的变化范围为 $0 \sim 646.46 \mu\epsilon$,载荷变化范围为 $0 \sim 1.3 \times 10^4 \text{ N}$,FBG的应变与施加到悬臂梁载荷的变化趋势相同。经计算可得,FBG的应变量对应力值的灵敏度为 $0.0497 \mu\epsilon/\text{N}$;根据悬臂梁的材质特性参数,得到应变灵敏度为 $0.0520 \mu\epsilon/\text{N}$,根据(7)式可得修正系数 $\eta = 95.6\%$ 。

将高速数据采集系统与 C_1 上的FBG传感器连接,并将脉冲激光光谱置于FBG反射光谱边缘半峰全宽以下,进行载荷实验。图5(a)为 C_1 上FBG的反射光谱所对应脉冲电压与载荷的关系, x 轴为附加在 C_1 上的载荷, y 轴为高速数据采集卡探测到的FBG反射光谱对应的脉冲电压。图5(a)中实心方点为附加载荷时,FBG反射光谱对应的脉冲电压幅值;直线为对FBG反射光谱对应的脉冲电压的拟合。由图5(a)可得,当载荷从 0 N 增加到 $1.3 \times 10^4 \text{ N}$ 时,反射脉冲的幅值从 199.09 mV 增加到 218.98 mV (电压幅值增量为 19.89 mV),因此附加在 C_1 上的载荷与FBG反射光谱对应的脉冲电压幅值呈正比关系。由图5(b)中的残差分析可知,监测系统中最大平均线性误差为 1.11 mV 。

将图5中的载荷-电压关系曲线和图4中的载荷-应变关系曲线作对比。由于两者的实验初始条件和加载过程完全相同,将载荷作为中间量,得到FBG解调系统的峰值电压与应变的对应关系,如图6(a)所示。由图6(a)及(2)式可以得到用于标定的 C_1 上的FBG应变-电压的拟合曲线为

$$y_1(x)_{\Delta_{\mu\epsilon}} = 33.40x_{\Delta_V} + 5.26. \quad (9)$$

采用同样的方法对 C_2 上的FBG进行标定,由图6(b)及(2)式可以得到用于标定 C_2 上FBG应变-电压的拟合曲线为

$$y_2(x)_{\Delta_{\mu\epsilon}} = 38.47x_{\Delta_V} - 5.03. \quad (10)$$

综上所述, C_1 和 C_2 悬臂梁上的两个FBG的应变灵敏度分别为 $33.40 \mu\epsilon/\text{mV}$ 和 $38.47 \mu\epsilon/\text{mV}$,FBG标定的非线性误差为 2.8% 。测量数据的线性度和灵敏度差异主要来源于边缘解调的非线性、修正系数、FBG旁瓣干扰、器件差异等因素。

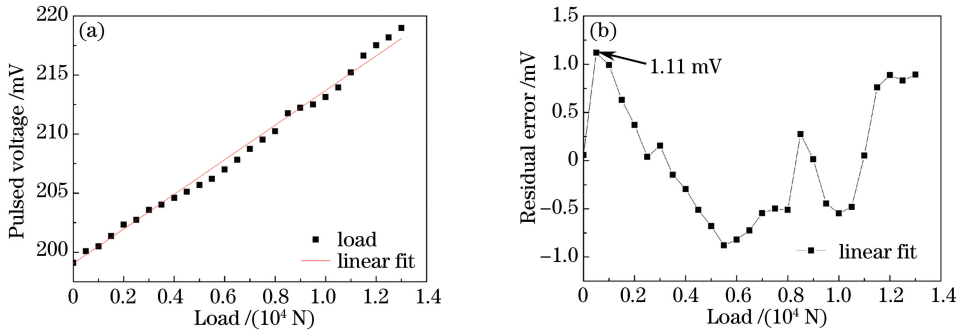


图 5 (a) 脉冲电压和(b)残余误差随载荷的变化

Fig. 5 (a) Pulsed voltage and (b) residual error versus load

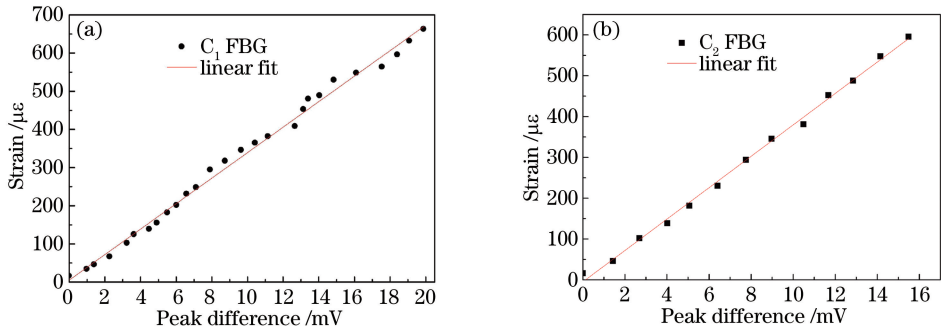


图 6 FBG 回波脉冲峰值电压与应变量的标定

Fig. 6 Calibration of peak voltage of FBG echo impulse and strain

4.2 测试实验

为验证传感系统的可行性,开展如下测试实验。基于高速数据采集卡的监测系统,将多个 FBG 传感器串联组成传感器阵列,并在 C_1 和 C_2 上均施加载荷。具体过程:首先,在 C_1 作为基准的 FBG 传感器上加上 1000 N 的载荷;然后在 C_2 上依次施加 $0 \sim 1.2 \times 10^4$ N 的载荷(每次增加 1000 N),得到 1 组数据;以类似方式在 C_1 上分次加载 2000, 3000, 4000 N 的载荷,再在 C_2 传感器上加载 $0 \sim 1.2 \times 10^4$ N 的载荷,从而得到 3 组数据(图 7)。

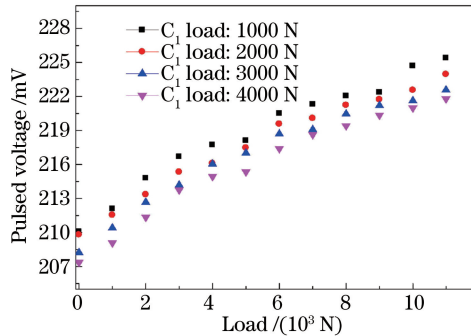


图 7 基于 TDM 的应变实验结果

Fig. 7 Results of strain experiments based on TDM

第 1 个 FBG 上加载 1000, 2000, 3000, 4000 N 的载荷对应的脉冲峰值分别为 210.05, 210.34, 210.69, 211.02 mV。根据(8)~(10)式得到 C_2 上串联的 FBG 的解调直线为

$$y_2(x_2)_{\Delta_{\mu\epsilon}} = 38.47x_{2\Delta_V} + 33.40x_{1\Delta_V} - 25.76. \quad (11)$$

当在悬臂梁 C_1 上分别施加 1000, 2000, 3000, 4000 N 载荷时,得到 FBG 应变变量 Y_2 分别如表 1 中 Y_{21} 、 Y_{22} 、 Y_{23} 和 Y_{24} 所示。表 1 中第 6~8 列为算术平均值及误差分析,计算得到应变值随脉冲峰值的变化关系如图 8 所示。由表 1 可知,应变传感系统的单次测量的最大误差为 $18 \mu\epsilon$ 。测试系统时未附加预紧力,故 $0 \sim$

100 $\mu\epsilon$ 为预加应变变量,100 $\mu\epsilon$ 以上测量的相对误差、平均值最大绝对误差、平均值的相对误差分别为 5%、11 $\mu\epsilon$ 、2%。随着应变变量增加,相对误差逐渐减小,得到满量程 600 $\mu\epsilon$ 的单个测量引用误差小于 2%。

表 1 测量得到的 FBG 应变变量及其算术平均值和误差分析

Table 1 Average value and error analysis of measured FBG strain

True strain $Y_2/\mu\epsilon$	Measured strain $Y_{21}/\mu\epsilon$	Measured strain $Y_{22}/\mu\epsilon$	Measured strain $Y_{23}/\mu\epsilon$	Measured strain $Y_{24}/\mu\epsilon$	Average value $\bar{Y}_2/\mu\epsilon$	Absolute error / $\mu\epsilon$	Relative error
-8	-25.76	-16.07	-5.39	6.73	-10.12	-17.76	-
42	55.33	46.26	50.84	45.94	49.59	13.33	0.317
92	106.82	105.27	110.39	109.17	107.91	18.39	0.200
142	148.06	149.39	140.33	148.84	146.66	7.39	0.052
192	199.76	201.14	193.27	201.49	198.92	9.49	0.049
242	253.40	238.41	245.02	248.78	246.40	11.40	0.047
292	303.17	305.46	291.78	295.21	298.91	13.46	0.046
342	354.09	337.66	342.10	355.06	347.23	13.06	0.038
392	403.14	407.25	386.82	390.34	396.89	15.25	0.038
442	438.39	447.19	443.79	452.12	445.37	10.12	0.023
492	503.94	498.35	506.41	505.21	503.48	14.41	0.029
542	552.72	548.39	549.19	553.46	550.94	11.46	0.021
592	602.72	597.92	593.54	602.19	599.09	9.29	0.016

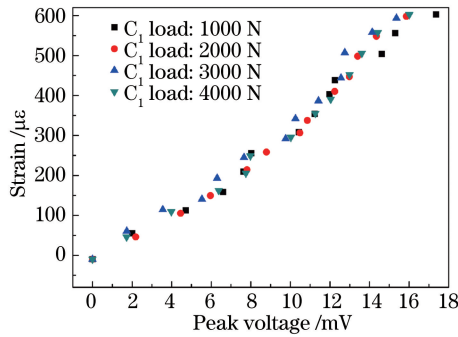


图 8 应变量和峰值电压的关系

Fig. 8 Relationship between strain and peak voltage

综上所述,该解调与标定方案可有效测量应变。窄带光纤光栅的量程较小,却具有较高的灵敏度;增加光纤光栅带宽,量程增加,但灵敏度下降。因此,该系统量程受限于光纤光栅的带宽,需要进一步优化传感灵敏度与量程间的关系。在要求高灵敏度时,采用双 LD 光源可增加传感系统的量程^[21]。实验中采用了非均匀的切趾光纤光栅,以获得光滑的光纤光栅光谱边缘,但实验结果表明,该非均匀光纤光栅的光谱边缘仍存在法布里-珀罗效应,影响传感系统的测量误差。

5 结 论

TDM 光纤光栅传感网络具有明显的复用优势,基于光纤光栅光谱边缘滤波技术的解调与标定方法可有效实现应变测量数据的解调。通过实验获得了 2 个光纤光栅的应变灵敏度分别为 33.40 $\mu\epsilon/\text{mV}$ 和 38.47 $\mu\epsilon/\text{mV}$,非线性误差为 2.8%。计算得到 FBG 的应变变量对应力值的灵敏度约为 0.0497 $\mu\epsilon/\text{N}$,修正系数为 95.6%。构建 TDM 光纤光栅应变传感系统,测试了 2 个光纤光栅的交叉应变传感数据。分析实验数据得到传感系统的单个测量最大误差约为 18 $\mu\epsilon$,应变变量大于 100 $\mu\epsilon$ 的传感相对误差约为 5%,满量程 600 $\mu\epsilon$ 的引用误差小于 2%,测量平均值的相对误差为 2%。

参 考 文 献

1 Wang X C, Yan Z J, Wang F, *et al.* An OTDR and gratings assisted multifunctional fiber sensing system [J]. IEEE

- Sensors Journal, 2015, 15(8): 4660-4666.
- 2 Pahl C, Mazle H A B, Supriyanto E. Design of virtual instrument for automatic temperature visualization in magnetic fields using LabVIEW in combination with fiber-optical temperature measurement [C]. 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications, 2015: 393-399.
 - 3 Yu Y L, Zhao H X. A novel demodulation scheme for fiber Bragg grating sensor system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 166-168.
 - 4 Zhu Zhu, Liang Dakai, Sun Hongbing. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305001.
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拉格光栅解调系统 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305001.
 - 5 Sai Yaozhang, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.* Acoustic emission location technology research based on FBG sensor network and time reversal focusing imaging method [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805003.
赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于 FBG 传感网络和时间反转聚焦成像方法的声发射定位技术研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805003.
 - 6 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen'an, *et al.* High-accuracy quasi-distributed optical fiber Bragg grating seismic demodulation system [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 074221.
乔学光, 丁 峰, 贾振安, 等. 高精度准分布式光纤光栅地震检波解调系统的研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(7): 074221.
 - 7 Li Zhengying, Sun Wenfeng, Wang Honghai. Research on the ultra-weak reflective fiber Bragg grating sensing technology based on optical frequency domain reflection technology [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806003.
李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806003.
 - 8 Jin J, Lin S, Song N F. Irradiation effect on strain sensitivity coefficient of strain sensing fiber Bragg gratings [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(1): 014206.
 - 9 Wei K H, Jiang P P, Wu B, *et al.* Fiber laser pumped burst-mode operated picosecond mid-infrared laser [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(2): 024217.
 - 10 Ma Weichao, Chen Shaohua, Zhao Kun, *et al.* Phase-shifted fiber Bragg grating strain sensor demodulated by edge filter [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905004.
马伟超, 陈少华, 赵 昆. 边缘滤波法解调的相移光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905004.
 - 11 Balcı S, Ünverdi N Ö. Applications of optical fiber Bragg grating sensors in optical communication systems [C]. 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference, 2015: 2678-2681.
 - 12 Zhang P, Cerecedo-Núñez H H, Qi B, *et al.* Optical time-domain reflectometry interrogation of multiplexing low-reflectance Bragg-grating-based sensor system [J]. Optical Engineering, 2003, 42(6): 1597-1603.
 - 13 Enami Y, Iwashima H, Kobayashi T. Fiber strain sensor using low reflective fiber Bragg gratings [C]. Lasers and Electro-Optics, 2005: 755-757.
 - 14 Eom T J, Kim M J, Lee B H, *et al.* Temperature monitoring system based on fiber Bragg grating arrays with a wavelength tunable OTDR [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2005, E88-C(5): 933-937.
 - 15 Lo Y L, Xu S H. New sensing mechanisms using an optical time domain reflectometry with fiber Bragg gratings [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(1): 238-243.
 - 16 Crunelle C, Wuilpart M, Caucheteur C, *et al.* Original interrogation system for quasi-distributed FBG-based temperature sensor with fast demodulation technique [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 150(2): 192-198.
 - 17 Liu Chuan, Rao Yunjiang, Ran Zengling, *et al.* Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on time division multiplexing and narrow wavelength swept laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 2004-2007.
刘 川, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于时分复用和窄波长扫描激光的长距离光纤布喇格光栅传感系统 [J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2004-2007.
 - 18 Zhang Yanjun, Xie Xiaopeng, Bi Weihong. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405006.
张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405006.
 - 19 Li Shichun, Hua Dengxin, Song Yuehui, *et al.* Research on spectroscopic technique of fiber Bragg grating for all-fiber rotational Raman lidar [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 110-115.
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 全光纤转动拉曼激光雷达的光纤光栅分光技术研究 [J]. 量子电子学报, 2013, 30(1):

110-115.

- 20 Li J Z, Sun B C. Theory analysis of novel fiber Bragg grating temperature compensated method based on thermal stress [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(2): 024115.
李建芝, 孙宝臣. 新型光纤光栅温度自补偿方法理论分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(2): 024115.
- 21 Gong X, Hua D X, Zhang P B, *et al.* Alternate dual pulses technique for Bragg grating ultra-multi-point strain measurement[C]. SPIE, 2012, 8759: 875927.