

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905105

基于啁啾光栅的温度与应变测量解耦方法研究*

夏晓鹏^{1,2}, 张钰民^{1,2}, 初大平^{1,2}, 孟凡勇^{1,2}, 祝连庆^{1,2}

(1.北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室 北京 100016;

2.北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100192)

摘要:实际环境中光纤光栅存在对应变与温度测量交叉敏感问题,提出了利用啁啾光纤光栅(CFBG)进行双参数同时测量的方法。通过将 CFBG 胶封于等强度梁上,利用 CFBG 反射谱的中心波长与带宽对温度与应变的灵敏度差异,组成系数解耦矩阵,实现对应变与温度的同时测量。室温下,CFBG 的中心波长与带宽随应变变化的灵敏度分别为 0.79、1.38 pm/ $\mu\epsilon$,线性度为 0.998 8、0.999 3;在-20~60℃温度范围内,CFBG 的中心波长与带宽随温度变化的灵敏度分别为 22.74、23.97 pm/℃,线性度为 0.999 8、0.997 0,表明使用单个 CFBG 可以实现同时测量应变与温度。

关键词:啁啾光纤光栅;中心波长;带宽;应力;温度

中图分类号: TN253

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

Research on decoupling method of temperature and strain measurement based on chirp fiber bragg grating

Xia Xiaopeng^{1,2}, Zhang Yumin^{1,2}, Chu Daping^{1,2}, Meng Fanyong^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2}

(1.Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and

Technology University, Beijing 100016, China; 2.Beijing Key laboratory of Optoelectronic

Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract:In the real environment, there is a cross-sensitivity problem between fiber grating strain and temperature measurement. This paper proposes a simultaneous measurement method of two parameters using chirp fiber grating sensor. By sealing chirp fiber bragg grating (CFBG) on the equal-strength beam, the difference between the sensitivity of the center wavelength and the bandwidth of the CFBG reflection spectrum to temperature and strain is used to form a coefficient decoupling matrix, which can achieve simultaneous measurement of the corresponding change and temperature. At the room temperature, the sensitivities of CFBG center wavelength and bandwidth with strain are 0.79 and 1.38 pm/ $\mu\epsilon$. The corresponding linearity values are 0.998 8 and 0.999 3. Among the temperature range of -20~60℃, the sensitivities of the central wavelength and bandwidth of CFBG with temperature are 22.74 and 23.97 pm/℃. The linearity values are 0.999 8 and 0.997 0. Experimental results show that the simultaneous measurement of strain and temperature can be achieved using one single CFBG.

Keywords:chirp FBG; center wavelength; bandwidth; stress; temperature

0 引言

光纤传感以光信号为载体,光纤为媒质,具有抗电磁干扰能力强、动态响应快、灵敏度与测试精度高、耐久性强及可实现远距离实时监测等优势^[1-2]。目前已开发出

具有高灵敏度的光纤光栅温度、应变、位移、压力、振动等多种参数的传感器^[3-8]。同时由于实际监测环境中光纤光栅对应变与温度交叉敏感问题普遍存在,近年来对温度应变解耦测量的传感器研究受到了持续广泛关注,并提出了不同解决方案^[9-11]。

2015年卞继城等^[12]提出在单模光纤上熔接双球形

收稿日期:2010-05-07 Received Date:2010-05-07

* 基金项目:教育部“长江学者与创新团队发展计划”(IRT-16R07)、北京市属高校水平教师队伍建设支持计划(IDHT20170510)资助项目

结构与细芯光纤连接制作 M-Z (Mach-Zehnder) 干涉传感器实现对温度和应变的同时测量, 得两个波谷的温度灵敏度分别为 53.86 和 47.51 pm/°C, 应变灵敏度分别为 0.75 和 1.39 pm/μ ϵ 。2017 年, Sun 等^[13] 通过在 2 段单模光纤中插入 1 段经扭曲处理的多模光纤制得可同时测量温度及应变的传感器, 温度和应变灵敏度为 17.3 pm/°C 和 -2.19 pm/μ ϵ 。同年, 张雯等^[14] 设计了一种利用飞秒激光器刻写切趾布拉格光纤光栅并级联光纤法布里-珀罗腔 (F-P) 的微结构传感器。探究该传感器的温度与应变传感特性发现, 该微传感器 FBG 特征峰应变灵敏度为 1.17 pm/μ ϵ , F-P 腔特征谷波长应变灵敏度为 1.10 pm/μ ϵ ; 温度 50~200°C 范围内, FBG 特征峰应温度灵敏度为 10.09 pm/°C, F-P 腔特征谷波长温度灵敏度为 10.53 pm/°C。2018 年, 赵小丽等^[15] 提出一种用于同时测量应变、温度的传感器。该传感器由光纤布拉格光栅、在线 M-Z 干涉仪 (MZI) 相结合, 通过测试实验表明传感器对应变、温度的最大灵敏度分别为 -2.14 pm/μ ϵ 、35.2 pm/°C。2019 年 Barbara 等^[16] 设计了表面胶合的光纤布拉格光栅用于 -30~110°C 温度范围内的应变无关温度测量。两 FBG 光轴平行且分别呈 0° 与 90° 粘贴于样品表面, 消除胶水引起的横向力对光纤传感器温度测量的影响。目前大多数研究是将不同结构光纤通过串联的方式构成干涉结构或采用参考光栅实现双参数的测量, 一定程度上增加了传感器制作的复杂程度与成本。

本文提出了利用检测 CFBG 中心波长与带宽变化量来进行双参数同时测量的方法, 可应用于光纤光栅传感技术对铁路轨道应力、振动等状态参量的监测, 排除实际环境中温度对光纤光栅中心波长漂移影响巨大的干扰问题。通过搭建应变与温度测试系统, 对 CFBG 应变与温度传感特性进行了实验分析, 证明单个 CFBG 可实现应力与温度的解耦, 以应用于对轮轨应力等参量的准确监测。

1 传感器原理及封装

1.1 传感模型原理

光纤 Bragg 光栅利用自身折射率的周期性改变来反射入射光中满足 Bragg 条件的光, 其原理是将前向传输的波导模式耦合到后向传输模式中, 基本结构类似于一个反射型的光学滤波器, 如图 1 所示。由光栅耦合传输理论^[17] 可得光纤布拉格光栅的反射谱中心波长为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为光栅的反射谱中心波长; n_{eff} 为光栅纤芯有效折射率; Λ 为光栅周期。当作用于光纤光栅的外界物理量 (温度、应变、压力等) 发生改变时, 导致光栅周期与纤芯有效折射率的改变, 从而引起光纤光栅反射波峰发生

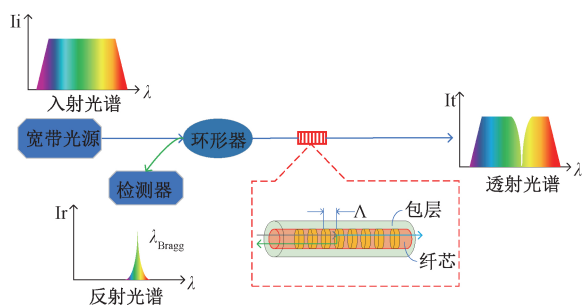


图1 光纤 Bragg 光栅工作原理

Fig.1 Principle of Fiber Bragg Grating

移动, 通过检测反射波峰移动量, 就可实现对该外界物理量改变的测量。根据麦克斯韦经典方程及光纤耦合理论, FBG 传感机制可表示为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon \quad (2)$$

式中: ΔT 为温度变化量; $\Delta\epsilon$ 为应变变化量; P_e 为弹光系数且由光纤自身特性决定, 可由式(3)表示。

$$P_e = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{d\epsilon} \quad (3)$$

式中: α_f 和 ξ 分别为石英光纤的热膨胀系数与热光系数, 如式(4)、(5)所示。

$$\alpha_f = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (4)$$

$$\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \quad (5)$$

联立式(2)~(5)可得式(6), 即 FBG 反射谱中心波长的漂移量与 FBG 所处环境温度与应变有关: 当应变恒定时, 中心波长与温度变化呈线性关系, 温度升高中心波长红移; 当温度恒定时, 中心波长与应变呈线性关系, 受拉应变时中心波长红移。

$$\Delta\lambda_B = 2\left(n_{\text{eff}} + \frac{dn_{\text{eff}}}{d\epsilon}\right)\Delta\epsilon\Lambda + 2\left(n_{\text{eff}}\frac{d\Lambda}{dT} + \Lambda\frac{dn_{\text{eff}}}{dT}\right)\Delta T \quad (6)$$

FBG 反射带宽是 FBG 反射谱的一个重要指标, 反射带宽为可表示为中心波长两侧反射率第一次为 0 的波长间距^[18], 数值如式(7)所示。

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda} = \frac{s}{n_{\text{eff}}} \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Lambda} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_B}{s\Delta n_{\text{eff}}L}\right)^2} \quad (7)$$

式中: s 为光栅条纹可见度, Δn_{eff} 为直流有效折射率变化。由式(7)可得光栅反射光谱的带宽由光栅调制深度、折射率、光栅周期 Λ 及栅长 L 及等参数共同决定。即温度与应力使光栅周期和有效折射率发生改变引起光纤 Bragg 波长漂移的同时会影响反射谱带宽的大小。由上述公式原理可知, 因变量中心波长 λ_B 为关于温度 T 与应变 ϵ 的函数, 因变量带宽 B_w 也为关于温度 T 与应变 ϵ 的

函数,如式(8)所示。且光栅中心波长、带宽均与应变、温度呈线性关系,相同应力与温度变化条件下光栅反射谱中心波长与带宽对变化灵敏度不同。由此得当外界应力或温度变化时,Bragg 反射谱的中心波长与带宽同时变化,若测得光栅中心波长与带宽的变化量,及温度与应力分别对反射谱中心波长与带宽的影响系数,联立两函数方程,即可由中心波长与带宽的变化量得到温度与应力的变化量 ΔT 与 $\Delta \varepsilon$, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \lambda_B = f_2(T, \varepsilon) \\ B_w = f_1(T, \varepsilon) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta \lambda_B = K_{11} \Delta \varepsilon + K_{12} \Delta T \\ \Delta B_w = K_{21} \Delta \varepsilon + K_{22} \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta \lambda_B$ 为光栅反射光谱中心波长变化量; ΔB_w 为带宽变化量; K_{11}, K_{12} 为此 CFBG 反射谱中心波长随应变与温度的灵敏度系数; K_{21}, K_{22} 为 CFBG 反射谱带宽随应变与温度的灵敏度系数。

传统普通 FBG 的 3 dB 带宽为 0.2~0.3 nm, 此宽度在光谱仪中不易准确测得其带宽变化, 因此本文中采用 CFBG。使用 MATLAB 软件对普通 FBG 与 CFBG 的仿真反射光谱进行比较, 光谱图如图 2 所示。

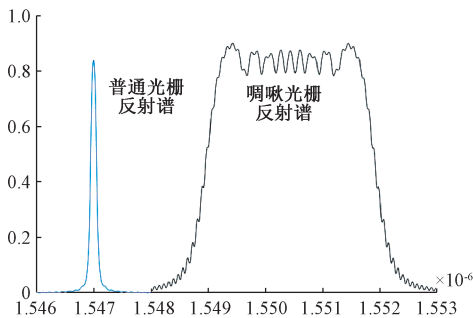


图2 普通 FBG 与 CFBG 反射光谱仿真

Fig.2 Spectrum of ordinary FBG and chirp FBG reflection

1.2 传感器封装制作

基于波长为 244 nm 的氩离子紫外激光器与相位掩模板相结合,在经载氢后处理的 SM-28 单模光纤上直写栅区长度为 10 mm 的 C 波段 CFBG,并将制备后的光栅高温退火处理。使用按 2:1 比例混合的 DP420 型环氧胶将 CFBG 胶封于 7075-T6 铝合金材质等强度梁基底上,等强度梁基底的粘贴位置经砂纸打磨后使用无尘纸蘸取酒精擦拭并风干。为防止 CFBG 出现失稳现象及对应力灵敏,环氧胶封装前需静置 15 min 至气泡消失,均匀涂抹于等强度梁表面均匀覆盖 CFBG,同时施加预紧力进行封装。封装后将等强度梁置于室温使胶层完全固化 24 h,固化后胶层长 20 mm,宽度 3 mm,厚度 1.5 mm;固化后 CFBG 中心波长为 1 557.183 7 nm。

实验中所用 7075-T6 铝合金材质等强度梁及加载装置如图 3 所示,强度梁的各横截面最大正应力为相同值,且均达到铝合金材料的许用应力。

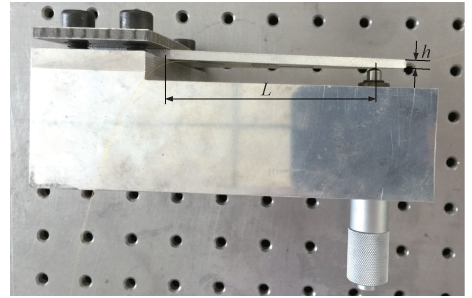


图3 等强度实物

Fig.3 Photo of equal strength beam

其有效长度 $L = 100$ mm,厚度 $h = 3$ mm。在梁的端部施加作用力 F 时,梁截面上的最大应变为:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{6Fl}{Eb h^2} \quad (10)$$

式中:7075 铝合金的弹性模量为 71.7 GPa。

同时等强度梁自由端挠度为:

$$y = \frac{6l^3 F}{b_0 h^3 E} \quad (11)$$

若光纤 Bragg 光栅所处温度不变时,其应变与中心波长有线性关系,将式(10)、(11)代入式(2)可得:

$$y = \frac{\Delta \lambda_B l^2}{K_\varepsilon h} \quad (12)$$

由式(12)可以看出挠度与波长变化量 $\Delta \lambda_B$ 的变化成线性关系,由此可通过微分头控制挠度变化产生线性波长漂移。实验中微分头控制的挠度范围为 0~25 mm,微分头每转一个刻线,即 0.01 mm,等强度梁在水平方向上的形变为 $3 \mu\varepsilon$ 。

2 传感系统的搭建与实现

该实验传感系统由宽带光源 (ASE), 1×2 光纤环形器,光谱仪 (OSA)、等强度梁及加载装置组成,如图 4 所示。ASE 发出的光经过环形器入射到封装于等强度梁上的 CFBG,等强度梁末端施加挠度产生应力或改变环境温度使 CFBG 反射光谱中心波长与带宽产生变化,其反射光经环形器到达 OSA,以分析应力或温度对 CFBG 反射谱中心波长与带宽的影响并由计算机处理数据。

对传感器进行温度测试时,将悬臂梁置于高低温箱中以模拟产生均匀精确的温度变化。实验所用的高低温箱型号为 GDW-100,测试范围为 -60~150℃,精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。实验温度范围为 -20~60℃,高低温试验箱设定程序使得温度从室温降低至 -20℃ 后再升至 60℃ 再降低

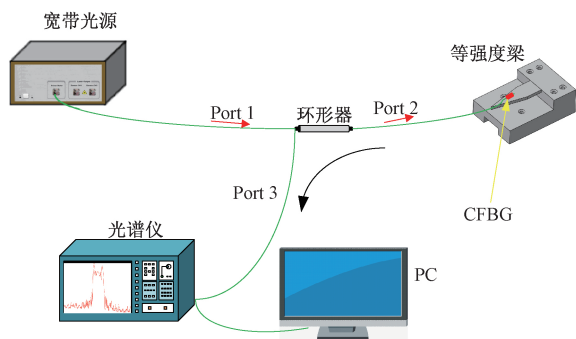


图4 实验测试系统结构

Fig.4 Experimental test system structure

至室温,温度变化步长为 20℃,每个温度点保持 10 min 平稳状态,平稳阶段光谱仪采集频率为 1 min/次。高低温实验现场如图 5 所示。



图5 高低温实验现场

Fig.5 High and low temperature experiment field

3 实验结果及分析

3.1 应变特性

在恒温恒湿的千级超净间下,旋转微分头至传感装置反射光谱开始移动时记为初始值,对等强度梁进行应力加载试验。当应变由 0 $\mu\epsilon$ 增至 750 $\mu\epsilon$ 时,该CFBG 反射谱中心波长向左漂移 0.589 nm,得应变灵敏度为 0.79 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度良好且高于 0.99;反射谱带宽变宽 1.032 nm,得应变灵敏度约 1.38 $\text{pm}/\mu\epsilon$,线性度良好且高于 0.99,得到的啁啾 FBG 中心波长与带宽随等强度梁挠度的变化特性如图 6 所示。

3.2 温度特性

在等强度梁施加挠度为 0 mm 即无应变的情况下,温度由-20℃升至 60℃,该 CFBG 反射谱中心波长右移

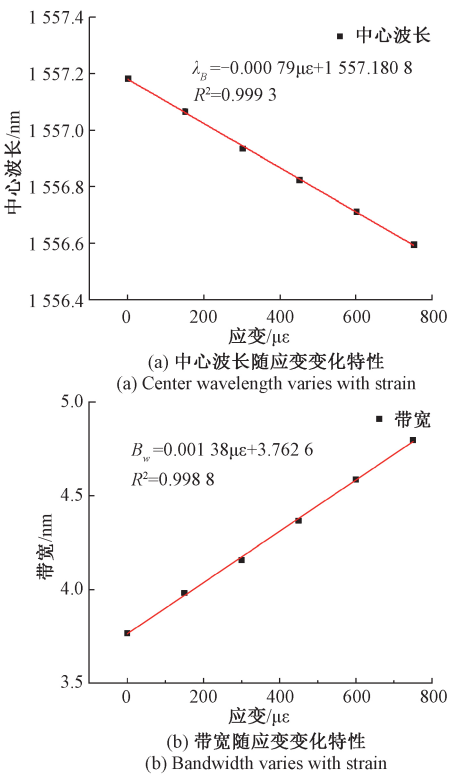


图6 CFBG 中心波长与带宽随应变的响应特性
Fig.6 Center wavelength and bandwidth response of chirp FBG with strain response

1.825 nm,关于温度的灵敏度为 22.81 $\text{pm}/\text{℃}$,线性度良好且高于 0.99;反射谱带宽变窄 1.933 nm,温度灵敏度约 24.16 $\text{pm}/\text{℃}$,线性度良好且高于 0.99。得到的CFBG 中心波长与带宽在匀速升温过程反射谱与响应特性如图 7 和 8 所示。

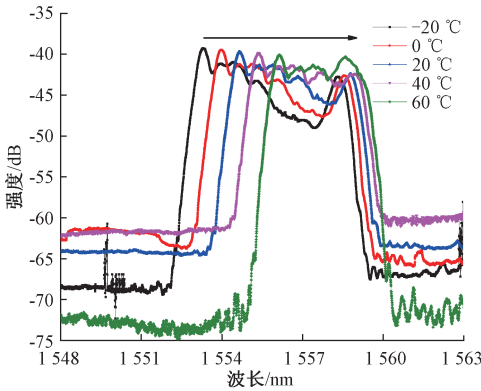


图7 CFBG 中心波长与带宽升温过程反射谱
Fig.7 Reflection spectrum of FBG sensor under different temperatures

3.3 分析讨论

由 CFBG 应变特性与温度特性实验数据得,CFBG 反

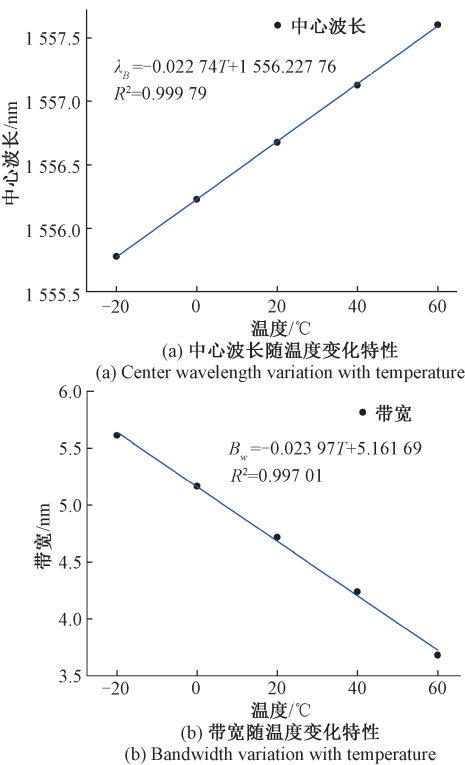


图 8 CFBG 中心波长与带宽随温度的响应特性
Fig.8 Center wavelength and bandwidth response of chirp FBG with temperature response

射谱中心波长对应变与温度的变化系数 $K_{11} = -0.79$, $K_{12} = 22.74$; CFBG 反射谱带宽对应变与温度的变化系数 $K_{21} = 1.38$, $K_{22} = -23.97$ 。将其代入式(9)可得 CFBG 中心波长与带宽随应变与温度的变化关系矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta B_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \tag{13}$$

求逆可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta B_w \end{bmatrix} \tag{14}$$

将测得的该 CFBG 带宽与中心波长随温度与应变的变化系数代入式(14)得:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\ 926.0901 & 827.255 \\ 110.888 & 8\ 63.479\ 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_B \\ \Delta B_w \end{bmatrix} \tag{15}$$

根据式(15)可知,通过 OSA 监测 CFBG 透射谱带宽与中心波长的变化即可对外界环境的应变与温度进行实时监测,实现应变与温度的双参数同时测量。可将等强度所受挠度与所处环境温度同时进行改变,以对式(15)进行验证。表 1 所示为实验温度与应变同时变化时 CFBG 带宽与中心波长变化的采集数据。

表 1 温度与应变同时改变时带宽与中心波长
Table 1 Bandwidth and center wavelength change simultaneously with temperature and strain

序号	温度/℃	应变/ $\mu\varepsilon$	带宽/nm	中心波长/nm
1	20.0	150.0	4.845 4	1 556.569 6
2	0.0	300.0	5.457 4	1 556.063 6
3	-20.0	450.0	6.135 1	1 555.499 9

由表 1 得, $\Delta B_{w1} = 0.612\text{ nm}$, $\Delta\lambda_{B1} = -0.506\text{ nm}$, $\Delta B_{w2} = 0.677\ 7\text{ nm}$, $\Delta\lambda_{B2} = -0.563\ 7\text{ nm}$ 。将 $\Delta\lambda_{B1}$, ΔB_{w1} 代入式(15)得理论应变变化 $\Delta\varepsilon_1 = 143.68\ \mu\varepsilon$, 理论温度变化 $\Delta T_2 = -17.26\text{ }^\circ\text{C}$, 与实际应变与温度变化的相对误差为 4.21% 与 13.70%。将 $\Delta\lambda_{B2}$, ΔB_{w2} 代入式(15)得理论应变变化 $\Delta\varepsilon_2 = 152.59\ \mu\varepsilon$, 理论温度变化 $\Delta T_2 = -19.49\text{ }^\circ\text{C}$, 与实际应变与温度变化的相对误差为 1.72% 与 2.55%。

实验结果表明,在实际测量中通过解调 CFBG 反射谱中心波长及带宽的变化值,可以解耦温度与应变的变化量,实时监测所处环境的温度及应变,满足铁路系统等工程的需求。实验验证中一组数据相对误差较大,原因分析可能与与等强度强梁上胶封 CFBG 的均匀性有关^[19]。

4 结 论

本文提出了 CFBG 的应变/温度特性与反射光谱中心波长、带宽变化之间的传感模型,并对 CFBG 的应变、温度特性进行了实验研究,确定了传感系数并组成系数矩阵进行解耦。实验表明所用 CFBG 的反射谱心波长对应变灵敏度为 $0.79\text{ pm}/\mu\varepsilon$, 对温度灵敏度为 $22.74\text{ pm}/^\circ\text{C}$; 反射谱带宽对应变灵敏度为 $1.38\text{ pm}/\mu\varepsilon$, 对温度灵敏度为 $23.97\text{ pm}/^\circ\text{C}$, 由此系数可实现对环境应变和温度的检测。本文提出的利用单个 CFBG 实现应力温度测量解耦的方法结构简单,且能良好地解决应力与温度的交叉敏感问题,是解决利用 FBG 进行温度应变双参数测量的有效手段,在建筑结构、轨道交通监测等方面具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] CHEN SH ZH, WU G, FENG D CH, et al. Development of a bridge weigh-in-motion system based on long-gauge fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(9) : 04018063.

- [2] SU Y, ZHOU H, SHEN H P, et al. High-sensitivity and real-time displacement sensor based on polarization properties in fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 46: 24-29.
- [3] 钱牧云,余有龙,李慧,等.基于光纤光栅的机械手指触觉觉传感研究[J].仪器仪表学报, 2016, 37(4): 730-736.
- QIAN M Y, YU Y L, LI H, et al. Study on mechanical finger touch and sliding sensing based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 730-736.
- [4] 宋世德,张作才,王晓娜.光纤布拉格光栅水下钢筋腐蚀传感器[J].电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1002-1008.
- SONG SH D, ZHANG Z C, WANG X N. A reinforced corrosion sensor for underwater steel bar of fiber Bragg grating [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(7): 1002-1008.
- [5] ZHANG F L, LI M, ZHANG H J, et al. A method for standardizing the manufacturing process of integrated temperature and humidity sensor based on fiber Bragg grating [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 46: 275-281.
- [6] ZHANG L CH, JIANG Y, JIA J SH, et al. Fiber-optic micro vibration sensors fabricated by a femtosecond laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 207-210.
- [7] BAI X, HU M, GANG T, et al. Simultaneous acoustic and magnetic measurement using cascaded fibre Bragg grating [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 376-382.
- [8] LEAL A G, THEODOSIOU A, DIAZ C R, et al. Simultaneous measurement of axial strain, bending and torsion with a single fiber Bragg grating in CYTOP fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 971-980.
- [9] ZENG H, GENG T, YANG W, et al. Combining two types of Gratings for simultaneous strain and temperature measurement [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(4): 477-480.
- [10] ZHU L Q, YANG R T, ZHANG Y M, et al. Metallic-packaging fiber Bragg grating sensor based on ultrasonic welding for strain-insensitive temperature measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(4): 5.
- [11] DONG X R, DU H F, SUN X Y, et al. Simultaneous strain and temperature sensor based on a fiber Mach-Zehnder interferometer coated with Pt by iron sputtering technology[J]. Materials, 2018. 11(9): 10.
- [12] 卞继城,郎婷婷,俞文杰,等.基于马赫-曾德尔干涉的温度和应变同时测量的光纤传感器研究[J].光子·激光, 2015, 26(11): 2169-2174.
- BIAN J CH, LANG T T, YU W J, et al. Fiber optic sensor based on simultaneous measurement of temperature and strain based on Mach-Zehnder interference [J]. Optoelectronics Laser, 2015, 26(11): 2169-2174.
- [13] SUN Y, LIU D, LU P, et al. Dual-parameters optical fiber sensor with enhanced resolution using twisted MMF based on SMS structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(10): 3045-3051.
- [14] 张雯,孟凡勇,宋言明,等.飞秒刻写光纤 F-P 腔级联 FBG 传感特性研究[J].仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2193-2199.
- ZHANG W, MENG F Y, SONG Y M, et al. Study on the sensing characteristics of fiber-optic F-P cavity cascade FBG in femtosecond writing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2193-2199.
- [15] ZHAO X L, DONG M L, ZHANG Y M, et al. Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on a fiber Bragg grating and an in-line Mach-Zehnder interferometer [J]. Optics Communications, 2019, 435: 61-67.
- [16] HOPF B, FISCHER B, BOSSELMANN T, et al. Strain-independent temperature measurements with surface-glued polarization maintaining fiber Bragg grating sensor elements[J]. Sensors, 2019, 19(1): 144.

- [17] 孙丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京:北京科学出版社, 2011.
- SUN L. Analysis of application problems of fiber grating sensing [M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [18] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [19] 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1744-1750.
- LI H, ZHU L Q, LIU F, et al. Strain transfer analysis and experimental study of bare fiber grating surface mount structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1744-1750.

作者简介



夏晓鹏, 2017 年于北京信息科技大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感器封装及轨道状态监测应用。

E-mail: ayb@live.com

Xia Xiaopeng received his B.Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2017. He is currently a M.Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber grating sensing and track condition monitoring application.



祝连庆(通信作者), 分别在 1982 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器技术、光电精密测试技术等。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Hefei University of technology in 1982 and 1989 respectively, and received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include optical fiber sensing technology, fiber laser technology, photoelectric precision testing technology, etc.