文章编号　1004-924X(2018)01-0031-07

利用超短 FBG 光谱线性区的传感解调系统

李　凯，辛璟焘，孟凡勇，刘　锋，祝连庆*
(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心，北京 100016；
2. 现代测控技术教育部重点实验室，北京 100192；
3. 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：为了研究一种星载光纤光栅传感解调系统，通过高掺锗光纤载氢增敏和优化紫外曝光功率，实现了栅区长度小于 0.5 mm，反射率大于 40%，3 dB 带宽大于 5 nm，反射谱边缘有效线性区域大于 2 nm 的超短光纤光栅的写制。提出了一种将超短 FBG 作为传感器件，利用其光谱线性区进行传感解调的方法。将中心波长位于光谱线性区域的稳频激光入射到超短光纤光栅，随着超短光纤光栅光谱的漂移，反射光的功率随之变化。由于稳频激光位于线性区域，返回光功率与光谱漂移量呈线性关系，因而可实现传感测量。将该系统用于应变和温度的测量，结果表明，光功率随应变、温度变化具有较好的线性关系，线性度分别为 0.997 和 0.999，灵敏度分别为 54.59 nW/με 和 230 nW/℃。该方法可用于温度及应变的精确测量，并且具有结构简单、功耗小、测量空间分辨率高等潜在优势。

关　键　词：光纤光学；光纤传感；光纤布拉格光栅；光谱线性区
中图分类号：TN253　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20182601.0031

Sensing demodulation system using US-FBG spectral linear region

LI Kai, XING Jing-tao, MENG Fan-yong, LIU Feng, ZHU Lian-qing*

(1. *Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing* 100016, *China*;
2. *Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing* 100192, *China*;
3. *Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing* 100192, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhulianqing@sina.com*

Abstract: To study a fiber grating sensing and demodulation system applied to satellites, ultra-short fiber Bragg gratings with grating length of less than 0.5 mm, reflectivity of over 40%, 3 dB bandwidth of over 5 nm, and the edge linear region of the reflection spectrum of over 2 nm were fabricated by the hydrogen enrichment of high germanium fiber and optimization of UV exposure power. A novel method was proposed to transmit the ultra-short FBG as a sensor and demodulate it by using its spectral linear region in this paper. The frequency stabilized laser whose central

收稿日期：2017-06-20；**修订日期**：2017-08-10.
基金项目：教育部“长江学者和创新团队”发展计划资助项目(No. IRT1212)；北京市教委 2015 年度创新能力提升计划资助项目(No. TJSHG201510772016)；北京市优秀人才培养资助项目(No. 016000020124G070)

wavelength was located in the spectral linear region was incident on the ultra-short fiber grating. The reflected optical power changed with the drift of the ultra-short fiber grating spectrum. As the frequency stabilization laser was located in the linear region, the reflected optical power was linearly related to the spectral drift, so that the sensing measurement could be realized. Using the system for strain and temperature measurements, the experimental results show that the optical power has a good linear relationship with strain and temperature, and the linearity is 0.997 and 0.999, the sensitivity is 54.59 nW/$\mu\varepsilon$ and 230 nW/℃, respectively. The method can be used for accurate measurement of temperature and strain, and has the potential advantages of simple structure, low power consumption and high measurement spatial resolution.

Key words: fiber optics; optical fiber sensing; fiber Bragg grating; spectral linear region

1 引 言

与传统电气传感器相比,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating,FBG)传感技术因采用波长编码的方式,具有抗电磁干扰,对被测量干扰小,易于埋入工程结构等优点,并成为近年来光纤传感领域的研究热点[1-2],被广泛应用于生物医学、飞行控制、结构监测、深海感知等领域[3-6]。

普通均匀光纤光栅为了保证较窄的反射光谱(一般小于0.2 nm),光栅长度一般需要达到厘米量级[7]。对于传统波长探测的解调方法来说,光纤光栅的这种窄线宽光谱特性非常重要,有助于实现高的测量分辨率和测量速度[8]。普通光纤光栅用于非均匀场的测量具有局限性,这是因为长栅区会产生光谱扭曲,从而影响测量精度[9]。除此之外,在封装过程中,光栅过长也容易产生啁啾[10-11]。

超短光纤光栅(Ultra Short FBG, US-FBG)的栅区长度只有几百甚至只有几十微米。因此,超短光纤光栅可以从根本上解决上述非均匀场的测量和封装问题。更重要的是,基于US-FBG的传感系统在功率预算和感测能力方面也有显著的提高[12]。US-FBG的写制类似于普通的均匀光纤光栅,通过在相位掩模板之间放置可调节狭缝并且通过调整狭缝可以很容易地控制光纤光栅的长度,具有较高的成本效益和写制效率[13]。

在实际工程应用中,人们多使用基于衍射光栅和线阵CCD的光纤光栅解调仪对光纤光栅波长进行解调,该方法具有解调速度快、集成度高的独特优势[14]。和多数解调方法一样,解调仪依赖于光纤光栅的窄线宽,并且分辨率受到衍射光栅分辨率的限制[15]。基于光纤光栅的星载传感器因其应用环境的复杂性与特殊性,解调系统需要做到防振动、体积小、质量轻、功耗低,而基于解调仪构建的传感解调系统显然无法满足这些要求,因此找到一种适用于星载恶劣环境的光纤光栅传感解调方法,具有重要的实际应用价值。

本文以US-FBG为传感单元,利用其反射谱边缘的线性区域,结合稳频激光器输出功率、中心波长稳定的特点,提出了一种用于温度及应变测量的传感解调方法。该方法通过稳频激光器输出激光束经US-FBG边缘线性区反射回来的光功率进行解调,具有结构简单、功耗低的优点。采用超短光纤光栅作为传感元件,可避免栅区长度长,在封装过程中产生啁啾的问题,并可实现高空间分辨率测量,因此具有重要的工程化应用价值。

2 理论分析

2.1 超短光纤光栅光谱特性

根据耦合模理论,定义光纤光栅反射光谱宽度$\Delta\lambda_0$为峰值波长两侧零点的间距,其波长的相对值为:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda}=\frac{\upsilon\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}}{n_{\mathrm{eff}}}\sqrt{1+\left(\frac{\lambda_{\mathrm{d}}}{\upsilon\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}L}\right)^2},\tag{1}$$

其中:$\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}$是平均折射率变化,$\upsilon$是折射率调制深度,$\lambda_{\mathrm{d}}$是$\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}\to 0$时的中心反射波长,$L$是光栅长度。对于弱光栅,$\upsilon\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}\ll\frac{\lambda_{\mathrm{d}}}{L}$,则有:

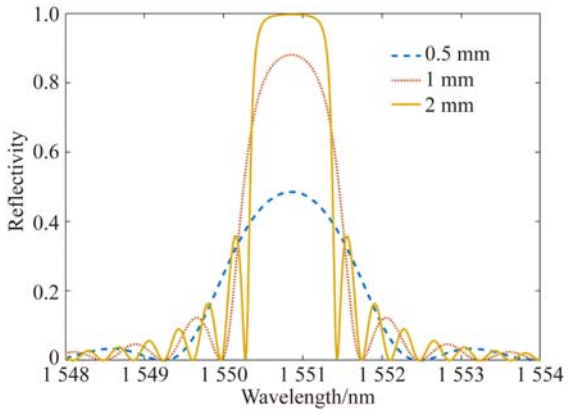
$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda}\to\frac{\lambda_{\mathrm{d}}}{n_{\mathrm{eff}}L}.\tag{2}$$

可见反射光谱带宽与光栅长度成反比;对于强光栅,$\upsilon\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}\gg\frac{\lambda_{\mathrm{d}}}{L}$,则有:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda}\to\frac{\upsilon\overline{\delta n_{\mathrm{eff}}}}{n_{\mathrm{eff}}}.\tag{3}$$

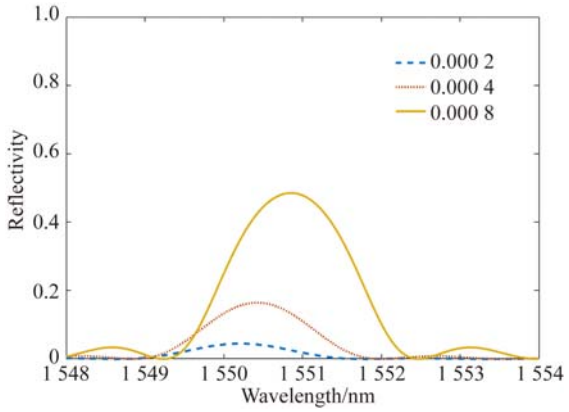
此时，反射光谱宽度与折射率调制深度成正比。

对 FBG 的带宽与栅区长度以及调制深度之间的关系进行仿真，得到不同栅区长度与调制深度下 FBG 的光谱图，如图 1 所示。



(a)不同栅区长度

(a)Different grating lengths



(b)不同调制深度

(b)Different refractive index modulation depths

图 1　光纤光栅的反射谱特性

Fig. 1　Reflective spectral characteristics of fiber Bragg gratings

图 1(a)是 8×10^{-4} 折射率调制深度下，不同栅区长度的光栅反射谱。观察光谱图可以发现，随着栅区长度的增加，光纤光栅边沿变得更加陡峭，反射光谱宽度逐渐变窄。图 1(b)是 0.5 mm 栅区长度下，不同折射率调制深度的光栅反射谱。当光栅长度不变时，反射光谱宽度随折射率调制深度的增加而增大。综上所述，光纤光栅边缘线性区域的最大化，可以通过减小栅区长度和提高折射率调制深度来实现，该方法还能同时兼顾反射率。从栅区长度为 0.5 mm、折射率调制深度为8×10^{-4}的光纤光栅反射谱看到，在其反射峰两侧各有一段近似线性的区域，利用该区域可以对传感系统进行线性解调。

2.2　超短光纤光栅传感解调原理

稳频光纤激光器具备线宽窄、高稳定性、高集成度和高输出功率等性能，其 3 dB 带宽只有 0.02 nm 左右，远小于超短光纤光栅的反射谱宽度[16]。图 2 是该方法的传感解调原理示意图。

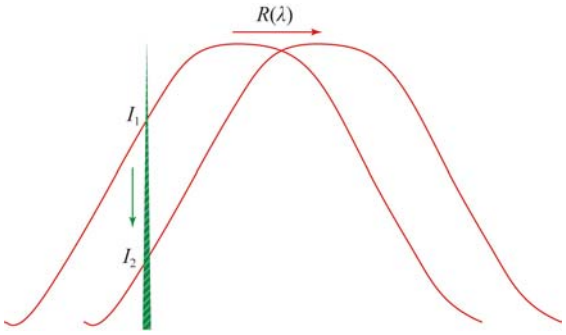


图 2　传感解调原理示意图

Fig. 2　Principle schematic of sensing demodulation

激光经过 US-FBG 后的反射光功率函数可以表示为[17]：

$$I_n = \int_0^{\infty} R(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda, \tag{4}$$

其中 $R(\lambda)$和 $S(\lambda)$分别是 US-FBG 的反射谱函数和激光的光功率函数。由于稳频激光器线宽远小于反射谱的带宽，当 US-FBG 处于一个特定状态时，可将其反射谱函数看成一个稳定的常量。则反射光功率函数可表示为：

$$I_n = R(\lambda)\int_0^{\infty} S(\lambda)\mathrm{d}\lambda = R(\lambda)S, \tag{5}$$

其中 S 是激光功率。由式(5)可知，反射光功率只与 US-FBG 的反射谱函数有关，因此可利用反射谱的线性区域进行传感解调，光谱线性区域越大，解调范围越大。常规 FBG 的光谱线性区域为百皮米量级无法用于传感解调，US-FBG 的栅区越短，线性区域越大。但是随着栅区长度的减小，光栅反射率下降，系统反射光强下降，导致动态范围也大幅下降，降低了解调精度。

根据上述传感解调原理，将中心波长位于光谱线性区域的功率稳定的窄线宽激光入射到传感系统，外界环境的变化会引起 US-FBG 光谱的漂移，US-FBG 反射的光功率随之线性变化，从而实现传感测量。

3　实验装置

本文将两种解调测量方法设计到一个实验装置中，一种采用光谱仪监测中心波长漂移，另一种采用功率计监测反射光功率。前者用于验证后者的可行性和可靠性。图 3 是该传感系统的实验装置示意图。ASE 宽谱光源与稳频激光器输出的激光分别由光开关的两个端口进入到环形器的 1 端口。通过接入隔离器(ISO)来避免反射回来的光对激光器造成损坏，环形器的 2 端口与光纤光栅传感元件相连接。经由光纤光栅反射回来的光通过环形器的 3 端口输入到另一个光开关的公共端，光开光的另外两端分别接光谱仪(OSA)和功率计(PM)。通过光谱仪监测光纤光栅的中心波长，通过功率计监测经光纤光栅边缘反射回来的激光光功率。实验中，通过同步触发的方式，实现两个光开关的同时切换，以保证宽谱光源-光谱仪和激光器-功率计两路的通断。其中，宽谱光源-光谱仪仅用于实验验证，在实际工程应用中，仅需采用稳频激光器、隔离器、环形器和功率计，从而简化了传感系统，具备结构简单的优势。

实验中，光谱仪型号为 AQ6370C(YOKOGAWA 公司)，分辨率为 0.02 nm，扫描波段为 600～1 700 nm。宽带光源为实验室自行研制的放大自发辐射光源，输出功率为 13.3 dBm，波段为 C+L 波段(1 525～1 610 nm)。功率计为 Newport 公司的 2936-C。稳频激光器为安捷伦 8164A 可调激光光源，最大输出功率为 8 dBm，激光线宽小于 5 pm，波长稳定性小于 1 pm。1 min 内功率稳定性波动小于 1%。

US-FBG 的制备采用相位掩模板下准分子激光器紫外曝光的方法。商用掩模板的掩模区长度一般为 10 mm，因此需要在掩模板前面放置宽度可调的光阑，通过调节光阑宽度来实现不同栅区长度的 US-FBG 写制。通过上述仿真可知，要在栅区长度较短的情况下实现一定的反射率，需要尽可能提高折射率的调制深度，这对光纤的光敏性提出了较高的要求。通过对多种光纤进行实验，最终采用 Corning HI1060 FLEX 光纤。为提高光敏性，刻写之前将该光纤放入低温、高压载氢罐中进行载氢处理，时长 2 周。刻写完成后，退火 24 h。总共制备了反射率大于 40%的两根 US-FBG，分别用于测量应变和温度。刻写过程中发现，准分子激光器的能量密度不能过高，过高的能量密度会产生大量的热，热将光纤中的氢气驱逐出光纤，降低了光纤的光敏性，从而导致折射率调制深度的降低；但能量密度也不能过低，否则将增加刻写时间，并且增加擦写的可能性。

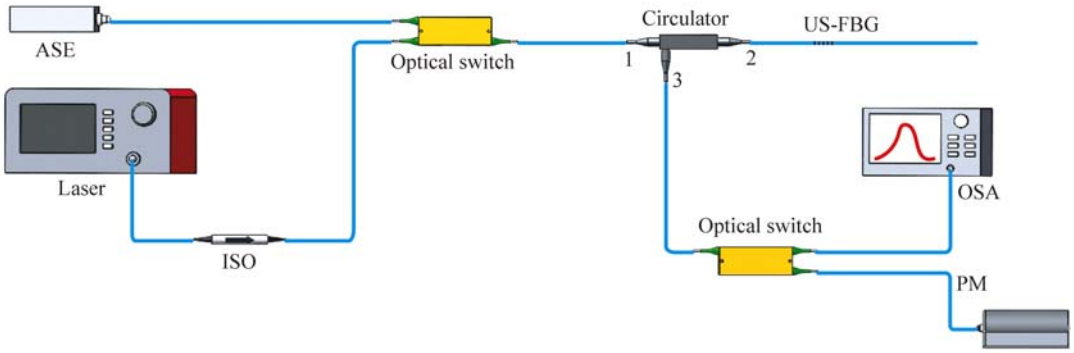


图 3　光纤布拉格光栅传感系统实验装置示意图

Fig. 3　Experimental setup of FBG sensing system

4　应变传感特性

实验采用镁铝合金 7075-T6 材质的三角形等强度梁来验证该传感系统的应变传感特性。等强度梁厚 2 mm，中心线长度为 28 mm。裸 US-FBG 栅区长度小于 0.5 mm，中心波长为 1 550.84 nm，3 dB 带宽 2.5 nm，光谱线性区域大于 1 nm。为保证激光正好落在光纤光栅的边缘线性区域，设置激光器的输出波长为 1 549.9 nm，输出功率为

5 dBm。US-FBG 粘贴在等强度梁上表面的中心线上，粘贴位置表面经砂纸打磨后用酒精擦拭干净，用胶带将两端固定。使用环氧树脂 DP420 将光纤光栅覆盖粘贴，并在室温下固化 24 h。通过微分头对等强度梁的自由端进行加载，微分头控制的挠度为 0～25 mm。固化完成后，在室温下对等强度梁加载应变。图 4 是加载过程中不同应变下的 US-FBG 反射谱。从图中看到随着挠度的增加，光谱向短波长方向漂移。

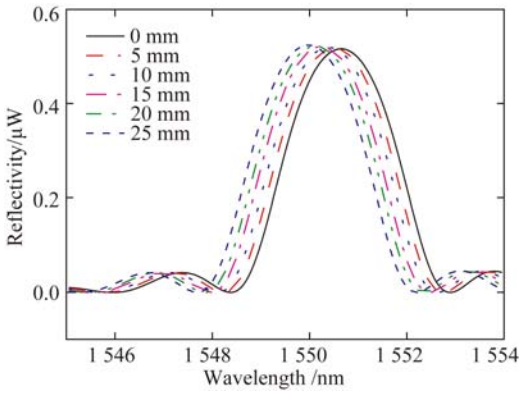
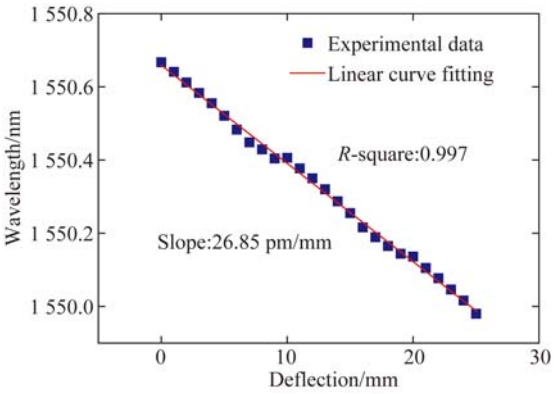


图 4　不同应变下 US-FBG 的反射谱

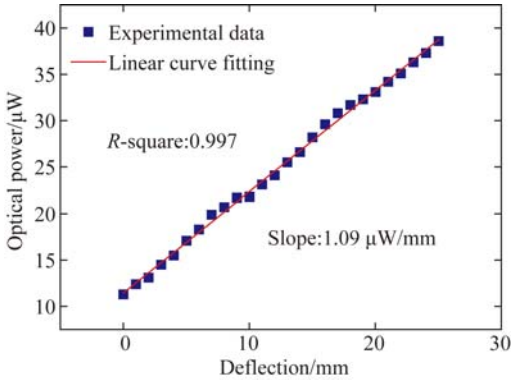
Fig. 4　Reflection spectra of US-FBG with different strains

微分头每行进 1 mm，记录 US-FBG 中心波长以及从 US-FBG 反射回的光功率。两者与等强度梁挠度呈现良好的线性关系，如图 5 所示。



(a)US-FBG 中心波长

(a)US-FBG central wavelength



(b)光功率

(b)Optical power

图 5　US-FBG 中心波长、光功率与挠度的关系曲线

Fig. 5　Relations of US-FBG central wavelength and optical power with deflection respectively

使用最小二乘法对实验数据进行拟合，拟合结果为：$\lambda=-0.026\ 85x+1\ 550.659\ 12$ 和 $P=1.091\ 83x+11.459\ 83$，线性度均达到 0.997 以上。根据材料力学中的悬臂梁弯曲理论，等强度梁弯曲时其表面应变与自由端挠度的关系为 $\varepsilon=Fh/l^2$，其中 F 是梁末端（施加作用力 P）的挠度[18]。经换算可得，应变灵敏度系数为 1.34 pm/$\mu\varepsilon$和 54.59 nW/$\mu\varepsilon$。

5　温度传感特性

为了提高温度传感的灵敏度，对 US-FBG 进行温度增敏封装，封装后温度传感器的温度灵敏度是裸光纤光栅的 2～3 倍。为了保证测量范围，用于温度测量的 US-FBG 的中心波长为 1 551.6 nm，3 dB 带宽为 5.18 nm，光谱边缘线性区域大于2 nm。同样地，为保证激光正好落在 US-FBG 的边缘线性区域，激光器的输出中心波长为 1 550.4 nm。将封装后的 US-FBG 放入高低温实验箱中，其测量精度为 0.1 ℃。温度起始点为 0 ℃，每次以 5 ℃ 步进升温，一直加热到 80 ℃，通过光谱仪和功率计分别记录对应温度点 US-FBG 的中心波长及反射回的激光功率。为了减小温度不平衡带来的误差，数据记录均在恒温一段时间后进行。图 6 是不同温度下 US-FBG 的光谱图，随着温度的不断提高，US-FBG 的中心波长发生红移。

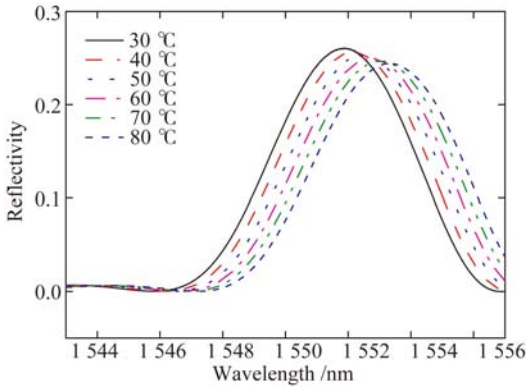
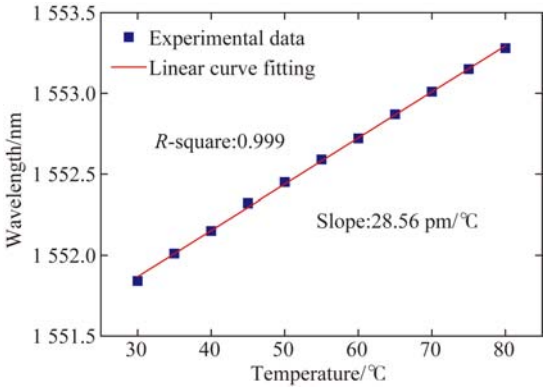


图 6 不同温度下 US-FBG 的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra of FBG at different temperatures

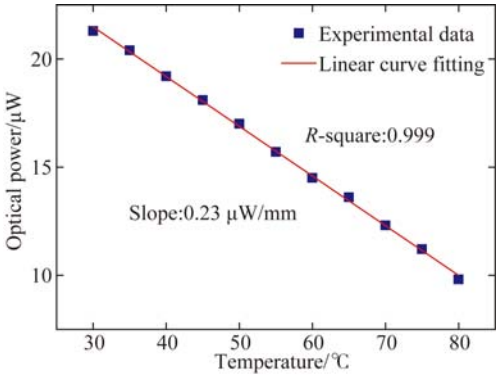
实验中测得的 US-FBG 中心波长以及光功率随温度变化的曲线如图 7 所示，US-FBG 的中心波长、光功率与温度变化呈良好的线性关系。

根据实验中测得的中心波长和功率示数与温度变化的关系，利用最小二乘法拟合得到 $\lambda = 0.028\,56T + 1\,551.009\,91$ 和 $P = -0.23T + 28.386\,36$，线性度均达到 0.999。温度灵敏度系数为 28.56 pm/℃和 230 nW/℃。



(a)US-FBG 中心波长

(a)US-FBG central wavelength



(b)光功率

(b)Optical power

图 7 US-FBG 中心波长、光功率与温度的关系曲线

Fig. 7 Relations of US-FBG central wavelength and optical power with temperature respectively

6 结 论

本文利用超短光纤光栅光谱边缘的有效线性区域，结合稳频激光器高稳定性输出功率和中心波长的特点，以超短光纤光栅作为传感单元，提出了一种用于应变和温度测量的传感解调方法，并通过理论分析和数值仿真对该方法的可行性进行了分析。将实际测得的光功率与应变以及温度变化进行曲线拟合，得到的线性度分别为 0.997 和 0.987。实验结果表明，该传感解调方法具有结构简单、功耗低的优点，能够有效测量应变和温度，应变和温度的灵敏度分别为54.59 nW/$\mu\varepsilon$和 230 nW/℃，在实际工程项目中具有重要的应用价值。

参考文献：

[1] 王义平，唐剑，尹国路，等. 光纤光栅制作方法及传感应用 [J]. 振动、测试与诊断，2015，35(5)：809-819.
WANG Y P, TANG J, YIN G L, *et al.*. The fabrication method and sensing application of fiber grating [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(5): 809-819. (in Chinese)

[2] 郭永兴，熊丽，孔建益，等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器 [J]. 光学 精密工程，2017，25(1)：50-58.
GUO Y X, XIONG L, KONG J Y, *et al.*. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)

[3] 于海鹰，秦旭辉，刘耀东，等. 一种用于人体测温的高精度 FBG 传感器 [J]. 光通信技术，2016，40(4)：33-35.
YU H Y, QIN X H, LIU Y D, *et al.*. High-precision FBG sensor for human body temperature detection [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(4): 33-35. (in Chinese)

[4] 梁居发，敬世美，孟爱华，等. 基于光纤布拉格光栅与长周期光栅并联的集成光学传感器[J]. 中国光学，2016，9(3)：329-334.
LIANG J F, JING SH M, MENG A H, *et al.*. In-

tegrated optical sensor based on a FBG in parallel with a LPG [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2016, 9(3): 329-334. (in Chinese)

[5] COELHO L, VIEGAS D, SANTOS J L, *et al.*. Optical sensor based on hybrid FBG/titanium dioxide coated LPFG for monitoring organic solvents in edible oils [J]. *Talanta*, 2016, 148: 170-176.

[6] 高潮，刘邦，郭永彩，等. 5 MN 光纤布拉格光栅力值传感器 [J]. 光学 精密工程，2017，25(4)：857-866.
GAO CH, LIU B, GUO Y C, *et al.*. Five MN force sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 857-866. (in Chinese)

[7] WANG Y M, GONG J M, WANG D Y, *et al.*. A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 70-72.

[8] ZHANG Q, ZHU T, YIN F Y, *et al.*. Temperature-insensitive real-time inclinometer based on an etched fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 1049-1052.

[9] KUANG K S C, KENNY R, WHELAN M P, *et al.*. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(10): 1379-1387.

[10] 刘明尧，季冬亮，肖爽，等. 胶黏剂黏弹性对粘贴式 FBG 应变传递的影响 [J]. 光学 精密工程，2016，24(6)：1307-1318.
LIU M Y, JI D L, XIAO SH, *et al.*. Effect of adhesive viscoelasticity on strain transfer mechanism of bonded FBG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1307-1318. (in Chinese)

[11] 柳智慧，石文玉，张蕊. 光纤光栅传感器封装增敏技术的研究 [J]. 光通信技术，2015，39(1)：45-46.
LIU ZH H, SHI W Y, ZHANG R. Research on improving FBG sensing sensitivity based on packaging technology [J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(1): 45-46. (in Chinese)

[12] CHENG R, XIA L, SIMA C, *et al.*. Ultra-short FBG based distributed sensing using shifted optical Gaussian filters and microwave-network analysis [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2466-2484.

[13] LI X L, SUN Q ZH, LIU D, *et al.*. Simultaneous wavelength and frequency encoded microstructure based quasi-distributed temperature sensor [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12076-12084.

[14] 吴晶，吴晗平，黄俊斌，等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展 [J]. 中国光学，2014，7(4)：519-531.
WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese)

[15] 杜平，穆磊. 基于线阵 CCD 的光纤光栅传感解调技术 [J]. 光电技术应用，2008，23(2)：58-61.
DU P, MU L. Demodulation of fiber grating sensor based on linear CCD [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(2): 58-61. (in Chinese)

[16] 瞿荣辉，蔡海文. 高稳定度窄线宽激光器的研究 [J]. 红外与激光工程，2009，38(6)：1033-1038.
QU R H, CAI H W. Narrow linewidth lasers with high stability [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1033-1038. (in Chinese)

[17] ROHOLLAHNEJAD J, XIA L, CHENG R, *et al.*. Fast and reliable interrogation of USFBG sensors based on MG-Y laser discrete wavelength channels [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 253-257.

[18] 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 research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1744-1750. (in Chinese)

作者简介：

李　凯(1992－)，男，江苏泰州人，2010 年于南京信息工程大学获得学士学位，主要从事光纤传感方面的研究。
E-mail：1339363718@qq.com

导师简介：

祝连庆(1963－)，男，浙江兰溪人，教授，博士生导师，2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位，主要从事生物医学检测技术与仪器、光电精密测试技术和光纤传感与激光器等方面的研究。
E-mail：zhulianqing@sina.com