

基于扫频光源的光纤光栅温度和轴向拉力传感系统

苏红, 王健*, 刘岚岚, 吴重庆

北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 传统宽带光源光纤光栅(FBG)传感系统的解调部分比较复杂,为了克服这一缺点,使用线性扫频激光器作为FBG传感系统的光源,并选定一个光栅作为参考光栅,将其他光栅作为传感光栅。根据传感光栅与参考光栅的反射信号时间间隔的变化,解调得到FBG反射中心波长的变化,解调过程非常简便。基于FBG传感系统进行了温度和光纤轴向拉力的测量实验,验证了该系统的可行性和正确性,也证明了该系统可单独或同时测量温度和光纤轴向拉力。给出了提高系统测量精度的途径,包括保证参考光栅的温度稳定以及使用扫频速率较小的扫频光源和采样速率较高的示波器。

关键词 传感器; 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 扫频光源; 温度; 轴向拉力

中图分类号 TP212 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.040601

Optical Fiber Grating Temperature and Axial Tension Sensing System Based on Swept Source

Su Hong, Wang Jian, Liu Lanlan, Wu Chongqing

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The demodulation part of a traditional fiber grating sensing system with a broadband light source is complex. In order to overcome this shortcoming, a linear swept laser is used as light source of the FBG sensor system. One of the gratings is used as reference grating, and other gratings are used as sensing gratings. The change of the reflection center wavelength of FBG is obtained according to the change of time interval between reflection signals of the sensing grating and the reference grating. The demodulation process is very simple and straightforward. The FBG sensing system is used to accomplish experiments of temperature measurement and fiber axial tension measurement. The results verify the feasibility and the correctness of the FBG sensing system and also prove that the FBG sensing system can either individually or simultaneously measure temperature and fiber axial tension. Some methods which improve the measurement precision are presented, including keeping the temperature of reference grating stable and using the swept light source with low swept rate and the oscilloscope with high sampling rate.

Key words sensors; fiber sensing; fiber Bragg grating; swept light source; temperature; axial tension

OCIS codes 060.2370; 060.4510; 060.3738

1 引言

光纤光栅(FBG)是一种利用光纤纤芯的光敏特性并通过曝光的方法在沿光纤长度方向上形成折射率周期性扰动的光学元件^[1]。1993年,Hill等^[2]利用相位掩模法制成FBG,大幅降低了写入设备的复杂程度,使批量生产反射任意中心波长的FBG成为可能。FBG作为近几年来发展最快的无源光器件之一,因其独特

收稿日期: 2016-11-11; 收到修改稿日期: 2016-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(61275075)

作者简介: 苏红(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信和光纤光栅传感等方面的研究。

E-mail: 14121573@bjtu.edu.cn

导师简介: 刘岚岚(1970—),女,博士,副教授,主要从事光纤通信和光纤传感器等方面的研究。E-mail: llliu@bjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jwang@bjtu.edu.cn

的优点,在传感领域得到了广泛应用。

参数测量、解调技术是目前 FBG 传感系统的主要研究热点。早期的 FBG 传感器主要用于测量温度和应变,并且只能进行单参数测量。1989 年,Morey 等^[3]采用专用涂层,并利用 FBG 实现对其他物理量的检测,如镍涂层可用于检测磁场,聚偏二氟乙烯涂层可用于检测电场。随着 FBG 传感技术的不断发展,如今 FBG 传感器可以测量的参数包括温度、应变、振动、压力、拉力、扭角、加速度、位移、电场和磁场等^[4-5],同时,可测参数也由单一参数测量发展为多参数同时测量^[6-7]。

目前大多数 FBG 传感系统使用宽带光源,并用可调谐滤波器进行解调^[8-11]。宽带光源的输出光谱较宽,经 FBG 反射的中心波长处峰值功率较小,系统可实现的传感距离受光功率的限制。使用可调谐滤波器进行解调时,解调部分除了可调谐滤波器本身外,还要有相应的控制电路、光电探测器和数据采集电路,并将光纤法布里-珀罗标准具或气体透射光谱作为波长参考来计算 FBG 反射中心波长,系统的结构和控制都比较复杂。为此,采用了基于线性扫频光源的 FBG 传感系统^[12],依靠光电探测器和示波器,通过探测参考光栅与传感光栅时域信号间隔的变化得到传感光栅反射中心波长的变化,可方便地对传感信号进行解调。此外,为验证该方案的可行性,利用该系统进行了温度和光纤轴向拉力的测量。

2 传感原理

根据光纤耦合模理论,得到 FBG 的反射中心波长为^[13]

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

式中 n_{eff} 为光纤芯区的有效折射率, Λ 为光栅折射率的调制周期。当温度或轴向拉力作用于光纤光栅时, n_{eff} 和 Λ 都会发生改变,从而引起反射中心波长 λ_B 的变化。

2.1 光纤光栅温度传感原理

温度对于 FBG 反射中心波长的影响是由热光效应和热膨胀效应引起的,其中热光效应引起有效折射率 n_{eff} 的变化,而热膨胀效应引起光栅周期 Λ 的变化^[14-15]。当轴向拉力不变时,由温度变化引起的反射中心波长变化量为

$$\Delta\lambda_B = \alpha_T \Delta T, \quad (2)$$

式中 $\alpha_T = (\alpha + \xi)\lambda_B$ 为反射中心波长变化与温度变化的关系系数,称为温度灵敏度,其中 ξ 为光纤的热光系数; ΔT 为温度变化量。在外界温度变化不大的情况下, ξ 和 α 近似为常数,因此忽略发射中心波长变化对 α_T 的影响时,光栅的反射中心波长变化与温度变化呈较好的线性关系。

2.2 FBG 轴向拉力传感原理

当轴向拉力作用于光栅时,光栅产生形变,引起的反射中心波长变化量为^[16]

$$\Delta\lambda_B = \alpha_F F, \quad (3)$$

式中 $\alpha_F = (1 - P_e)\lambda_B/ES$ 表示反射中心波长变化与轴向拉力变化的关系系数,称为拉力灵敏度,其中 P_e 、 E 和 S 分别为光纤的有效弹光系数、弹性模量和横截面积; F 为轴向拉力。当温度变化范围不大时, P_e 和 E 近似为常数。因为 S 在轴向拉力作用下的变化及波长 λ_B 的变化对 α_F 的影响可忽略,故 FBG 材料确定后, α_F 为一常数,光栅的反射中心波长变化与轴向拉力变化也表现出较好的线性关系。

3 实验系统

基于线性扫频光源的 FBG 温度和轴向拉力传感系统的结构如图 1 所示。扫频激光器发出的扫频光由环形器 1 端口输入,并由环形器 2 端口输出,进入含有 3 个 FBG 的传感光路中。FBG 1 为参考光栅,FBG 2 和 FBG 3 为传感光栅,3 个 FBG 具有不同的反射中心波长。当扫频光的波长等于 FBG 的反射中心波长时,这一波长的光被光栅反射后返回环形器 2 端口,再由环形器 3 端口输出并进入光电探测器,然后由光电探测器将探测到的光信号转换为电信号,最后由示波器记录电信号。示波器记录的 FBG 反射信号如图 2 所示。

实验系统使用的扫频激光器(HSL-20,Santec 公司,美国)的扫频重复频率为 100 kHz,扫频波长范围为 1260~1370 nm。在 1270~1340 nm 的波长范围内,扫频速率 γ 为常数, $\gamma = 27.5 \text{ nm}/\mu\text{s}$ 。实验室自制的光

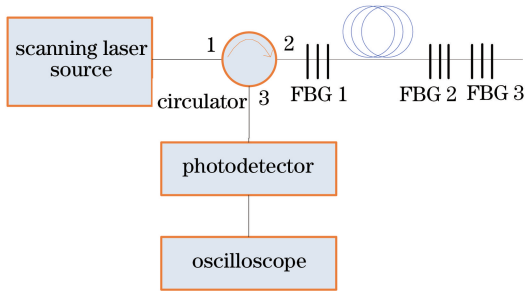


图 1 基于线性扫频光源的 FBG 温度和轴向拉力传感系统

Fig. 1 FBG temperature and axial tension sensing system based on linear swept light source

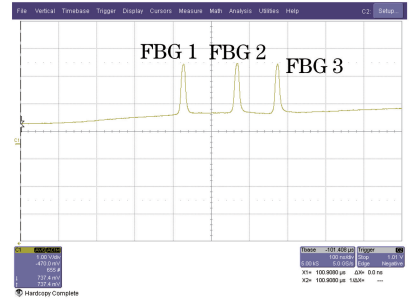


图 2 FBGs 的反射信号

Fig. 2 Reflection signals of FBGs

电探测器的光谱响应范围为 800~1700 nm, -3 dB 带宽为 200 MHz, 增益为 1.4×10^4 V/W。示波器 (SDA500A, LeCroy 公司, 美国) 的带宽为 5 GHz, 有 4 个通道。

实验中, 参考光栅 FBG 1 的温度固定不变, 且处于自由状态(轴向拉力未作用在此光栅上), 因此 FBG 1 的反射中心波长 λ_{B1} 固定不变。设 FBG 1、FBG 2 和 FBG 3 的反射峰对应的时间分别为 t_1 、 t_2 和 t_3 , 则 FBG 2 与 FBG 3 的反射中心波长 λ_{B2} 和 λ_{B3} 可表示为

$$\lambda_{Bj} = \lambda_{B1} + \gamma(t_j - t_1), \quad j = 2, 3. \quad (4)$$

当传感光栅的温度和作用在其上的轴向拉力变化时, 传感光栅的反射中心波长也会发生变化。根据(4)式, 反射中心波长的变化量可表示为

$$\Delta\lambda_{Bj} = \gamma[(t_j^{(2)} - t_1^{(2)}) - (t_j^{(1)} - t_1^{(1)})], \quad j = 2, 3, \quad (5)$$

式中 t 的上标(1)和(2)分别表示第 1、2 次测量对应的时间。由此可见, 此系统无需使用复杂的解调结构, 仅通过时域上信号间隔的变化即可直接得到 FBG 反射中心波长的变化量。

系统中 FBG 2 为温度及拉力传感元件, 而 FBG 3 仅为温度传感元件, 两光栅的组合可同时测量温度和轴向拉力。根据(2)、(3)式, 可得 $\Delta\lambda_{B2}$ 、 $\Delta\lambda_{B3}$ 与温度变化 ΔT 和轴向拉力 F 之间的关系为^[17]

$$\Delta\lambda_{B2} = \alpha_{T2} \Delta T + \alpha_{F2} F, \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_{B3} = \alpha_{T3} \Delta T, \quad (7)$$

式中 α_{T2} 和 α_{F2} 分别为 FBG 2 的温度和轴向拉力灵敏度, α_{T3} 为 FBG 3 的温度灵敏度。这些系数可用此实验系统测定。根据(6)、(7)式, 温度变化 ΔT 和轴向拉力 F 可分别表示为

$$\Delta T = \frac{\Delta\lambda_{B3}}{\alpha_{T3}}, \quad (8)$$

$$F = \frac{\Delta\lambda_{B2} - (\alpha_{T2}/\alpha_{T3}) \Delta\lambda_{B3}}{\alpha_{F2}}. \quad (9)$$

从以上推导过程可以看出, 在测量出两传感光纤温度和拉力灵敏度(α_{T2} 、 α_{T3} 和 α_{F2}) 的情况下, 根据测量出的两个传感光栅的反射中心波长的变化量 $\Delta\lambda_{B2}$ 和 $\Delta\lambda_{B3}$, 即可由(8)、(9)式得到温度变化 ΔT 和轴向拉力 F 。

4 分析与讨论

4.1 传感光栅温度和拉力灵敏度的测量

使用如图 1 所示的传感实验系统。当室温约为 28 °C 时, 将参考光栅 FBG 1 置于室温下, 两个传感光栅 FBG 2、FBG 3 置于热水中, 在水温由 80 °C 自然冷却至 35 °C 的过程中, 每下降 5 °C 记录一次实验数据。根据传感光栅 FBG 2、FBG 3 与参考光栅 FBG 1 反射峰之间的时间差, 并利用(5)式可得两个传感光栅反射中心波长变化量 $\Delta\lambda_{B2}$ 和 $\Delta\lambda_{B3}$ 随温度 T 的变化, 变化曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出, FBG 反射中心波长均随着温度的增加而增加, 并且基本保持线性关系。通过拟合, 得到两个传感光栅的温度敏感系数分别为 $\alpha_{T2} = 9.9$ pm/°C、 $\alpha_{T3} = 9.8$ pm/°C。

为了测量 FBG 2 的拉力灵敏度, 使 FBG 2 尾纤绕过一滑轮, 在 FBG 2 尾纤后加上不同数量的砝码(每

个砝码重约 50 g),记录每增加一个砝码时的实验数据,利用(5)式计算 FBG 2 的反射中心波长变化量 $\Delta\lambda_{B2}$ 随轴向拉力 F 的变化,得到的结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,FBG 2 的反射中心波长随轴向拉力的增加而增加,通过拟合,得到 FBG 2 的拉力敏感系数 $\alpha_{F3} = 1.1730 \text{ nm/N}$ 。

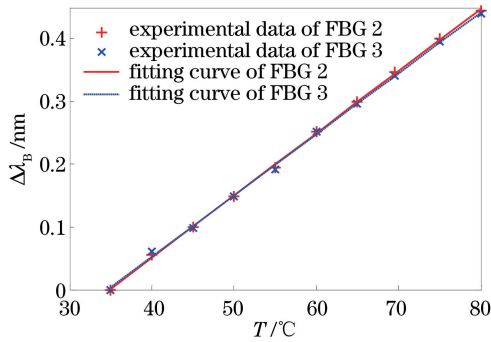


图 3 FBG 反射中心波长变化量随温度的变化

Fig. 3 Variation in reflected central wavelength change of FBG with temperature

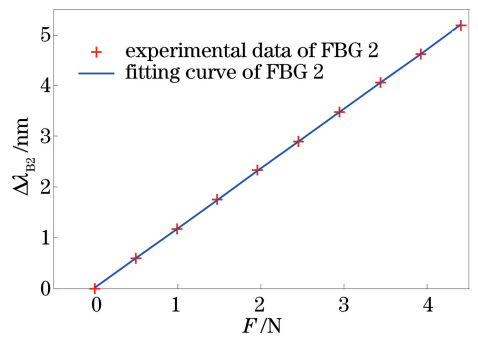


图 4 FBG 2 的反射中心波长变化量随轴向拉力的变化

Fig. 4 Variation in reflected central wavelength change of FBG 2 with axial tension

4.2 温度和轴向拉力的同时测量

将 FBG 2、FBG 3 同时置于热水中,用电子温度计测量水温,即为实测温度。在水自然冷却的同时,给 FBG 2 依次增加砝码(水温降到 35 °C 时取下所有砝码),用拉力计记录 FBG 2 因水的浮力和砝码共同提供轴向拉力的大小,即实测轴向拉力。在记录实测温度和轴向拉力的同时,用示波器记录光栅的反射信号,利用(5)、(8)、(9)式计算得到 FBG 传感系统测量的温度和轴向拉力。最后将 FBG 传感系统测量的温度和轴向拉力与实测温度和轴向拉力进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 实际测量与 FBG 传感系统测量的温度和轴向拉力的比较

Table 1 Comparison of temperature and axial tension obtained by actual measurement and FBG sensing system

Time	Actual temperature / °C	Actual axial tension / N	Measured temperature / °C	Measured axial tension / N	Temperature error / °C	Axial tension error / N
1	75.7	0.4332	76.0	0.4324	-0.3	0.0008
2	67.1	0.8634	67.6	0.8597	-0.5	0.0037
3	53.1	1.2671	53.0	1.2733	0.1	-0.0062
4	45.0	1.6856	44.8	1.6911	0.2	-0.0055
5	35.0	0	0	0	0	0

由表 1 可以看出,实际测量所得的温度和轴向拉力结果与 FBG 传感系统测量结果基本一致,证明了基于扫频光源的 FBG 传感系统是可行的。对于实验中产生的误差,分析其主要来源:1) 参考光栅温度的波动,实验过程中参考光栅处于室温下,室温并非恒定 28 °C 不变,随着实验的进行,室温会发生波动,波动范围为 0.1~0.2 °C;2) 激光器扫频速率较高而示波器的采样速率较低,实验中扫频激光器的扫频速率 γ 较高且不可调整, $\gamma = 27.5 \text{ nm}/\mu\text{s}$,而示波器的采样速率为 5 GHz,即两采样点之间的时间间隔 $\Delta t = 0.2 \text{ ns}$,因此数据点的选取会造成所测的反射中心波长产生漂移偏差,漂移偏差 $\Delta\lambda = \Delta t\gamma = 5.5 \text{ pm}$,从而产生约 0.5 °C 的测温误差。因此,若要提高测量精度,应把参考光栅放在恒温箱中,且使用扫频速率较低的扫频光源和采样速率较高的示波器。

5 结 论

使用基于线性扫频激光器的 FBG 传感系统进行了温度和光纤轴向拉力的测量实验。系统通过解调传感信号与参考信号时间间隔的变化量,得到 FBG 反射中心波长的变化量,解调过程非常简便,克服了传统宽带光源 FBG 传感系统的解调部分较为复杂的缺点。该系统不仅能单独和同时测量温度和光纤轴向拉力,还能很方便地将其扩展为准分布式光纤传感系统。下一步工作可将此系统拓展后应用于其他物理量的测量。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [2] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, *et al.* Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [3] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors[C]. SPIE, 1989, 1169: 98-107.
- [4] Huang Yonglin, Tong Zhengrong, Xiang Yang, *et al.* Temperature-insensitive displacement sensing using the chirp effect of fiber Bragg grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(11): 1015-1018.
黄永林, 童峥嵘, 项 阳, 等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的位移传感[J]. *中国激光*, 2002, 29(11): 1015-1018.
- [5] Zhang Xuhui, Wang Lutang, Fang Nian. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020603.
张旭辉, 王陆唐, 方 捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020603.
- [6] James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(12): 1133-1134.
- [7] Wang Pengzhi, Liu Chuntong, Li Hongcai, *et al.* A quasi distributed fiber Bragg grating sensing demodulation system design based on LabVIEW[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 022801.
王鹏致, 刘春桐, 李洪才, 等. 一种基于 LabVIEW 的准分布式光纤光栅传感解调系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 022801.
- [8] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(16): 1370-1372.
- [9] Zhang Jian, Liu Bo, Kai Guiyun, *et al.* The application of gas absorption cell in the engineering fiber grating sensor system[J]. *Photon Technology*, 2006(2): 88-91.
张 键, 刘 波, 开桂云, 等. 实现高精度、高稳定性的工程化光纤光栅解调系统的研究[J]. *光子技术*, 2006(2): 88-91.
- [10] Yang Sha, Cai Haiwen, Huang Chong, *et al.* Stability analysis and improvement of an interferometric interrogation for fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(11): 1537-1541.
阳 莎, 蔡海文, 黄 冲, 等. 光纤光栅传感器干涉型解调仪的稳定性分析和改进[J]. *中国激光*, 2006, 33(11): 1537-1541.
- [11] Liu Pengfei, Hao Fenghuan, He Shaoling, *et al.* Wavelength demodulation for distributed feedback active fiber grating sensor based on wavelength scanning[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1010002.
刘鹏飞, 郝凤欢, 何少灵, 等. 基于波长扫描的分布反馈有源光纤光栅传感器波长解调[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010002.
- [12] Mei Jiawei, Xiao Xiaosheng, Xu Mingrui, *et al.* Wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application on the demodulation of fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1114003.
梅佳伟, 肖晓晟, 许明睿, 等. 基于色散调谐宽带扫频光纤激光器及其在光纤光栅解调中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1114003.
- [13] Jiang Yi. Advanced optical fiber sensor technology[M]. Beijing: Science Press, 2009: 274-275.
江 毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 274-275.
- [14] Zhang Weigang. Principle and application of fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 119-125.
张伟刚. 光纤光学原理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 119-125.
- [15] Zhang W, Webb D J, Peng G D. Enhancing the sensitivity of poly (methyl methacrylate) based optical fiber Bragg grating temperature sensors[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 4046-4049.
- [16] Nan Qiuming. Study and application of fiber Bragg gratings strain sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003.
南秋明. 光纤光栅应变传感器的研制及应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [17] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, *et al.* Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors[J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(13): 1085-1087.