

线阵 InGaAs 扫描 FBG 反射谱的传感解调方法

李 红^{1,2}, 祝连庆^{1,2}, 张钰民², 刘 锋², 骆 飞², 黄强先¹

- (1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

摘 要: 研究并实现了一种基于 256 像元线阵 InGaAs 扫描的光纤布拉格光栅传感解调系统。针对线阵 InGaAs 探测器, 分析了光纤光栅反射谱中心波长定位原理, 可实现多个 FBG 光谱的同时解调, 单通道解调传感器数量取决于 FBG 的带宽和中心波长漂移范围。对 256 个像素点的光谱数据, 通过设置的阈值判断反射谱的个数, 分别对每一个谱峰进行拟合, 基于高斯指数曲线模型实现了寻峰算法, 获得了中心波长。搭建 FBG 解调系统采集光谱数据, 寻峰算法的稳定性达到 ± 0.5 pm。该解调方法无机械移动部件, 实现了多光纤光栅波长寻峰的并行快速响应, 波长解调范围为 1 525~1 570 nm, 为多光纤光栅传感提供了高速解调方案。

关键词: 光纤布拉格光栅解调; InGaAs 探测器; 256 像元; 中心波长检测; 高斯曲线
中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0122004

Demodulation method for FBG reflection spectrum based on linear array InGaAs scanning

Li Hong^{1,2}, Zhu Lianqing^{1,2}, Zhang Yumin², Liu Feng², Luo Fei², Huang Qiangxian¹

- (1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: A demodulation system based on 256 pixels linear array InGaAs detector for fiber Bragg grating sensors was researched and realized. Based on the linear array InGaAs detector, the peak positioning principle of the fiber Bragg grating reflection spectrum was put forward. This multiple FBG spectrum parallel processing could be realized. The demodulation quantity of single channel depended on the bandwidth of the FBG sensor and the center wavelength drift range. Based on the spectral data of 256 pixels, Gaussian curve model for central wavelength was adopted. By setting the threshold value, the number of reflection spectrum peak was obtained, separately for each spectrum peak fitting. The demodulation technique was proved to be highly accurate and highly stable by the experiment results. The stability of peak searching algorithm reached ± 0.5 pm. The demodulation method has no mechanical moving parts, which realizes the parallel processing and quick response of the fiber Bragg grating center

收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-06-12

基金项目: 北京市重大科技成果转化项目(PXM2013_014224_000077); 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT1212)

作者简介: 李红(1985-), 女, 博士生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。Email: honglee123@126.com

导师简介: 祝连庆(1963-), 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤传感和光电精密测试技术方面的研究。

Email: zhulianqing@sina.com

wavelength. The wavelength demodulation range is 1 525–1 570 nm. It provides a high-speed demodulation scheme for fiber Bragg grating sensing.

Key words: fiber Bragg grating demodulation; InGaAs detector; 256 pixels; central wavelength measurement; Gaussian curve

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器是以光为载体、光纤为媒质来感知和传输外界信号的新型传感技术。与传统的电阻应变计等电类传感器相比,FBG 传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、防爆性能好、耐腐蚀能力强、体积小等诸多优点,已在土木工程、石油化工、航空航天等领域得到广泛应用^[1]。在光纤光栅传感系统中,反射光谱的解调技术一直是研究难点,影响着整个测试过程的精度和解调速度。针对光纤光栅传感系统,人们研究并提出了许多解调方法^[2-8]:匹配光栅法测量范围窄,光谱匹配性制作要求高;CCD 解调法由于分辨率低且在 400~1 100 nm 光谱敏感,不适合 FBG 的传感解调;可调谐激光器解调系统受限于光源的稳定性和调谐范围;目前最常用的是可调谐 F-P 滤波解调系统虽然精度高,但解调速度慢。无论是哪种解调方法,对于 FBG 的中心波长的定位离不开寻峰算法的处理。尹成群等人对多种常用寻峰算法的比较结果显示,遗传算法或神经网络算法等虽然检测精度较高,但不适合实时运算,高斯曲线拟合可兼顾实时性与高精度的双重要求^[9-10]。基于线阵探测器扫描 FBG 的解调系统中无机械移动部件,稳定性好,但由于线阵光电探测器的尺寸限制,光谱数据点数少,对寻峰定位算法要求较高。

文中提出 256 像元的线阵 InGaAs 扫描 FBG 解调方法,在此扫描数据基础上采用高斯拟合寻峰算法,对反射谱中心波长进行定位,实现 FBG 反射谱的并行快速响应。

1 FBG 传感原理

FBG 是一种刻写在光纤纤芯中的布拉格光栅,它能够把前向传输的纤芯模式能量耦合给后向传输的纤芯模式,形成在谐振波长附近一定带宽的能量

反射。光纤布拉格波长 λ_B 可由公式(1)表示^[10]:

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

式中: Λ 为光栅周期; n_{eff} 为光纤的有效折射率; λ_B 为反射的中心波长。光纤光栅的中心波长与温度和应变的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 + P_e)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\alpha_f = d\Lambda/(\Lambda dT)$ 为光纤的热膨胀系数; $\xi = dn_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}}dT)$ 为光纤材料的热光系数; $P_e = -dn_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}}d\varepsilon)$ 为光纤材料的弹光系数。光纤光栅反射光中心波长的变化反映了外界信号的变化,因此针对 FBG 中心波长的分析处理是 FBG 传感系统的关键。

2 解调系统

基于线阵 InGaAs 光电阵列扫描的 FBG 解调系统如图 1 所示。由宽带光源入射的光经 FBG 反射后,带有解调信息的反射谱光信号,经由光纤传输送入线阵光电探测处理系统,其中包括光学预处理部分和线阵光电探测成像部分。光学部分通过色散原理把光信号投射到线阵光电探测器上,每个光敏元由 InGaAs 光电二极管组成,可以探测红外波长的光学信号,探测范围为 900~1 700 nm,由于色散的影响,不同光敏元对应不同的光谱谱线。

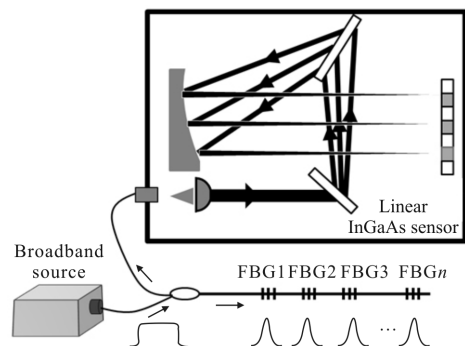


图 1 基于线阵 InGaAs 扫描 FBG 的解调系统

Fig.1 Demodulation system of FBG based on linear array InGaAs scanning

从分光光路和线阵光电探测采集信号的方式可以看出,光谱采集部分没有机械移动部件,不需要调谐式滤波器件。利用此系统对光纤光栅反射谱进行解调,可以实现多点 FBG 的同时采集,反射谱线由线阵 InGaAs 光电阵列的光敏元信号给出,如图 2 所示。

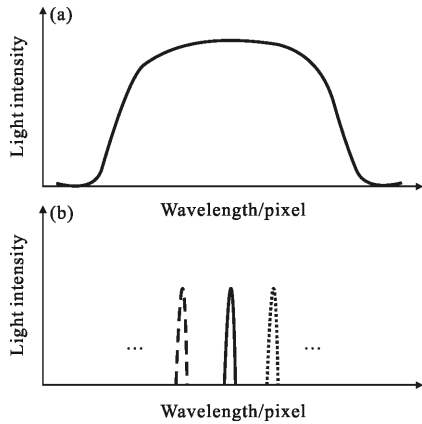


图 2 多点 FBG 的反射谱

Fig.2 Reflection spectrum of FBGs

3 中心波长定位原理

光纤光栅链路中的反射光经过耦合器后经过线阵光电探测器的采集处理,得到的是 FBG 反射谱的光强信息,并且与线阵探测器的像素点一一对应。通过设置阈值,将 FBG 传感链上的光谱分段,再分别对每一段 FBG 反射谱离散数据进行拟合,如图 3 所示。

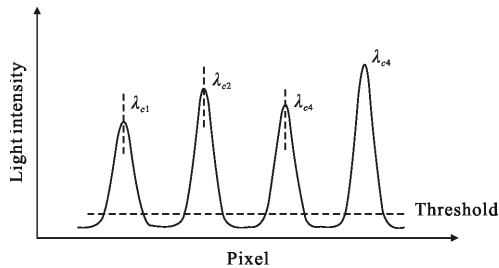


图 3 FBG 链反射谱分段拟合

Fig.3 Segmentation fitting of FBGs reflection spectrum

FBG 反射谱可看作一个高斯曲线,表达式为^[9]:

$$I(\lambda)=I_0\exp\left[-4\ln 2\left(\frac{\lambda-\lambda_c}{\Delta\lambda}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中: I_0 为反射谱强度的幅值; λ_c 为反射谱中心波长; $\Delta\lambda$ 为反射谱的 3 dB 带宽。FBG 反射谱是通过线阵 InGaAs 探测器的输出得到 (P_i, I_i) ,即每一个像素点对应的光强值。将得到的一系列离散光强数据代入到上述指数模型,通过最小化误差的平方和寻找数

据的最佳函数匹配,如图 4 所示。

$$\sum_{i=0}^N [F(P_i)-I(P_i)]^2=\min \quad (4)$$

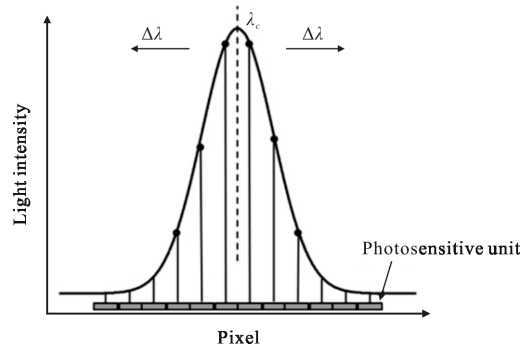


图 4 高斯拟合寻峰示意图

Fig.4 Schematic diagram of Gaussian fitting for the peak

图 1 所示分光光路中的线阵探测器像素点与波长的关系通过可调谐激光器标定得到。像素点与波长的对应关系表示为:

$$\lambda[\text{nm}]=\alpha+\beta_1p+\beta_2p^2+\beta_3p^3+\beta_4p^4+\beta_5p^5 \quad (5)$$

式中: $p=0.255$ 表示线阵探测器的像素点数。

4 实验与分析

FBG 解调实验系统如图 5 所示。实验系统包括宽谱光源、3 dB 光纤耦合器、FBG、256 像元线阵 InGaAs 光谱采集模块 (Ibsen 公司 I-MON 256 HS)、光谱仪和作寻峰算法处理的计算机。由宽带光源发出的光,经过光纤耦合器入射到 FBG 中,光栅反射谱经耦合器送到线阵 InGaAs 探测器,FBG 的反射谱经过计算机的寻峰算法进行处理,得到中心波长及漂移量。

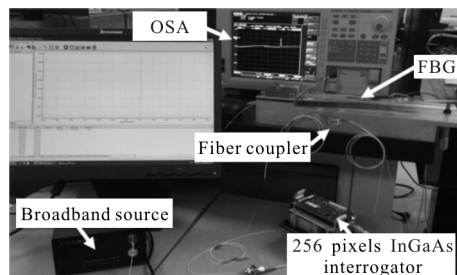


图 5 FBG 解调实验系统

Fig.5 Experiment system of FBGs demodulation

4.1 FBG 解调复用

图 6 所示为单通道采集 5 个 FBG 的反射谱,线阵 InGaAs 探测器像素点 0~255 对应于光谱波长

1 525~1 570 nm。

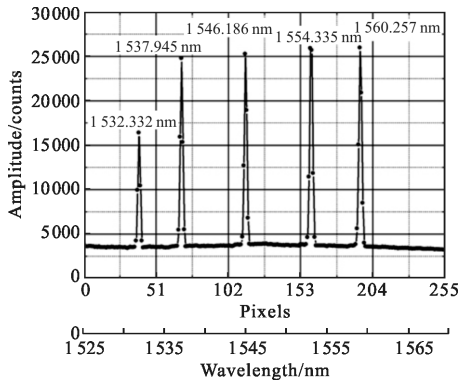


图 6 FBG 反射谱

Fig.6 FBGs reflection spectrum

单通道同时解调传感器的数量取决于 FBG 的带宽和中心波长的漂移范围。单位应变引起的相对波长漂移约为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，以光栅布拉格波长中心，要测量应变最大范围的 $\pm 4000 \mu\epsilon$ ，那么中心波长左右需要各漂移 5 nm，而且，光栅反射谱本身存在谱宽，一般为 2~4 nm，因此，至少在中心波长两侧留出 7 nm 的间隔来复用，总的解调谱宽范围是 45 nm，单路复用可达到 6 个点。

4.2 算法稳定性

FBG 解调系统寻峰稳定性定义为外界条件不变情况下，FBG 反射谱拟合得到的峰峰值变化。室温为 25℃，宽谱光源功率分别为 1 mW、5 mW、10 mW，积分时间为 6 μs，阈值均为 30%，对其中一个 FBG 反射谱寻峰得到的中心波长连续记录 200 次，求取平均值后计算偏差 Δ。从图 7 中可以看出，光源功率为

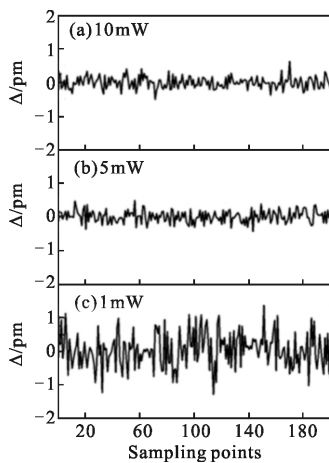


图 7 算法稳定性

Fig.7 Result of algorithm stability

1 mW 时，拟合得到的中心波长波动性较大，5 mW 和 10 mW 时算法稳定性基本一致，达到 $\pm 0.5 \text{ pm}$ 。

实现光电采集的 InGaAs 探测器件存在本底电流噪声，因此为了保证复用的 FBG 全部被解调，分段阈值设置需要大于电流噪声，并低于 FBG 链路中的最小峰值。在多点 FBG 复用的传感光路中，因为光路器件等原因引起的光强损耗，造成 FBG 反射谱的强度不同。如果光源功率比较低，光源以及光路损耗使得某一位置 FBG 的反射谱强度很低时，在同一阈值情况下，进行拟合的离散点数较少并且波动，造成解调出的中心波长稳定性差。另一方面，如果光源功率低，那么对 InGaAs 探测器的积分时间要求较长，会降低扫描频率。因此，在 FBG 解调系统中要综合考虑解调速度和解调的稳定性，需要根据传感系统及复用点数优化光源功率及探测器积分时间，解调中心波长的光谱分段阈值可以根据硬阈值和可调阈值窗口相结合的方式进行改善。

5 结论

文中基于 256 像元线阵 InGaAs 探测器扫描光谱系统对 FBG 进行解调，分光光谱成像原理使得该解调系统中无机械调节部件，响应速度快，可实现 1 525~1 570 nm 范围内共 45 nm 带宽的 FBG 传感器阵列并行解调，单通道复用点数与 FBG 的带宽和中心波长的漂移范围有关。利用高斯指数曲线模型对采集到的 FBG 反射谱数据进行寻峰拟合处理，定位反射光谱的中心波长。光纤在光纤光栅传感中起到了光信号传输的作用，要考虑光源以及远距离监测时光路损耗对解调结果的影响。通过实验结果发现，光源功率过低时，寻峰稳定性差，大于 5 mW 的寻峰结果基本一致，可达到 $\pm 0.5 \text{ pm}$ 。FBG 多点并行传感技术要求解调波长范围宽，解调速度快，该系统对于准分布式 FBG 传感的高速解调具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(4): 420-430. (in Chinese)
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 420-430.

[2] Xu Mingming, Jiang Qingwu, Liu Wenqing, et al. An

- improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 184–189. (in Chinese)
- 徐明明, 江庆五, 刘文清, 等. 一种新型双光栅光谱仪光学系统设计及优化[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 184–189.
- [3] Chen Yong, Zhang Yulan, Liu Huanlin, et al. FBG sensing signal dealing with improved orthogonal subspace pursuit method[J]. *Optik*, 2015, 126: 3303–3309.
- [4] Ren Naikui, Xiong Yanling, Wu Mingze, et al. Simulation of FBG wavelength signal demodulation based on sideband filter[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 981: 412–416.
- [5] Zhang Zhili, Fu Zhulin, Zhao Bing, et al. FBG sensing technology application in detection of bastion safety [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 492–496. (in Chinese)
- 张志利, 付祝林, 赵兵, 等. 光纤光栅传感技术在阵地安全监测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 492–496.
- [6] Li Guoyu, Zhang Hao, Liu Bo. The interrogation system for FBG sensing based on the InGaAs linear image sensor[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(4): 1101–1104.
- [7] Jia Hua, Yang Jiankun, Li Xiujian. Minimum variance unbiased subpixel centroid estimation of point image limited by photon shot noise [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(9): 2038–2045.
- [8] Yan Lianshan, Yi Anlin, Pan Wei, et al. A simple demodulation method for FBG temperature Sensors using a narrow band wavelength tunable DFB laser [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2010, 22(18): 1391–1393.
- [9] Zhang Tiandi, He Fengtao, Zhou Qiang, et al. Research of peak-detection algorithm in fiber grating demodulation system [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 36–39. (in Chinese)
- 张天地, 贺锋涛, 周强, 等. 光纤光栅解调系统的寻峰算法研究[J]. 激光技术, 2013, 37(1): 36–39.
- [10] Yin Chengqun, Wang Zishuo, He Yujun, et al. Simulation and experiment analysis of central wavelength detection algorithm for FBG reflection spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 322–327. (in Chinese)
- 尹成群, 王梓蒴, 何玉钧, 等. FBG 反射谱中心波长检测算法仿真与实验分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 322–327.