

宽带 FBG 与自相关算法提高 CCD 解调精度的研究

魏钰柏^{1,2}, 刘 锋^{1,2}, 刘 佳^{1,2}, 祝连庆^{1,2}

(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. 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100016)

摘 要:为提高光纤光栅解调算法的精度,设计了3 dB带宽在1~3 nm之间的宽带布拉格光栅与自相关算法解调系统,使用线阵 CCD 检测光谱,进行波长寻峰分析与实验验证。线阵 CCD 离散像素点之间波长间距固定,宽带布拉格光栅可得到更多有效像素数据点;自相关算法只考虑传感测量时光谱的偏移程度,可抵消背景噪声,消除光栅刻写或封装过程中操作不当引起光谱异常的影响,从而提高光栅中心波长解调精度。温度测量结果表明,使用自相关算法解调啁啾光栅与宽带光栅,误差较高斯算法分别减少54.05%和40.87%,此算法可以使啁啾光栅达到正常光栅的解调精度。并且,使用宽带光栅的解调误差仅为啁啾光栅的50%。

关键词:光纤光栅;光栅中心波长解调;自相关算法;宽带布拉格光栅

中图分类号:TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.016

Research on demodulation precision of CCD improved by broadband FBG and self-correlation algorithm

WEI Yu-bo^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, ZHU Lian-qing^{1,2}

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments,

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to improve the demodulation accuracy of fiber grating, a broadband Fiber Bragg Grating (FBG) with a 3 dB bandwidth within 1 ~ 3 nm and self-correlation algorithm demodulation system are designed. A linear array CCD sensor is used to detect grating spectrum and tested in the wavelength peak finding experiment. Wavelength spacing between pixels is fixed in a CCD sensor, so higher bandwidth FBG can get more effective pixels, and self-correlation algorithm only demodulates the excursion of spectrum in sensing and testing, thus, background noise is offset and spectral anomaly caused by writing or packaging improperly is eliminated. The precision of the grating center wavelength demodulation is improved. Experimental results show that using self-correlation algorithm demodulate broadband FBG and chirp FBG, the error is respectively 54.05% and 40.87% lower than Gauss algorithm. Self-correlation algorithm can make the chirped grating reach the demodulation accuracy of normal grating. Also the error of broadband FBG is only 50% of chirp FBG error.

Key words: fiber grating; grating center wavelength demodulation; self-correlation algorithm; broadband FBG

基金项目:教育部“长江学者和创新团队”发展计划项目(No. IRT1212);北京市教委2015年度创新能力提升计划项目(No. TJSHG201510772016)资助。

作者简介:魏钰柏(1991-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感等方面研究。E-mail:wybwill@163.com

通讯作者:祝连庆(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为精密测量技术,光纤传感技术,光纤激光器技术及生物医学检测技术与仪器。E-mail:zhulianqing@sina.com

收稿日期:2017-05-26; **修订日期:**2017-07-16

1 引言

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 在温度与应变测量应用中具有准确度高、灵敏性好、不受电磁干扰、可远距离监测并且可实现准分布式或分布式测量等优点,因此被广泛应用于高精度测量领域以及各种复杂条件下的环境指数测量^[1-4]。FBG 通过外界参量对反射中心波长进行调制来获得传感信息,其解调的关键是测量其反射波峰中心波长的变化量。因此,要实现 FBG 的高精度与高灵敏度的传感测量,解调方法尤为重要^[5-7]。

本文使用 256 像素线阵 CCD 进行光谱检测, CCD 采用体光栅分光,光谱检测速度快,系统成本低,多点复用简单,从而得到广泛应用^[8-10]。但 CCD 光学分辨率低,难以分辨 FBG 中心波长的微小变化,为达到系统所需波长分辨率,需对其输出数据进行算法处理,常用的为高斯拟合算法^[11-12]。FBG 的 3 dB 带宽一般为 0.2 ~ 0.3 nm,因此在反射波峰范围内大约只存在 3 个像素点,依据高斯拟合算法解调出的中心波长精度较低,且在刻写或封装 FBG 的过程中操作不当会造成 FBG 反射光谱同标准函数差别较大,增大拟合误差^[13]。

针对以上问题,本文在 CCD 检测的基础上,研究了 3 dB 宽带在 1 ~ 3 nm 之间的宽带 FBG 传感与自相关解调算法。CCD 像素点波长间隔固定,因此宽带 FBG 可以获得更多有效像素数据点,从而提高数据拟合精度;自相关解调算法只与波峰漂移量有关而不受波形影响,因此可以抵消背景噪声,消除 FBG 波形异常引起的解调误差。

2 原理

2.1 FBG 带宽分析

本文使用宽带 FBG 进行传感测量,根据光纤耦合模理论,当宽带光在光纤光栅中传输时,产生模式耦合,满足 Bragg 条件的光被反射。光纤纤芯折射率变化会使中心波长发生漂移,实际测量中 FBG 中心波长为:

$$\lambda = \left(1 + \frac{\Delta n_{\max}}{n_{\text{eff}}}\right) \lambda_{\text{Bragg}} \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光纤纤芯折射率; $\Delta n_{\max}$ 为折射率变化量。

同时,根据模式耦合理论,FBG 的反射率 $R_{\max}$ 与 3 dB 带宽 $\Delta\lambda$ 分别表示为:

$$R_{\max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (2)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_B s \sqrt{\left(\frac{\Delta n_{\max}}{2n_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2} \quad (3)$$

式中, κ 为耦合系数; L 为光栅长度; Λ 为光纤光栅

的周期;对于宽带 FBG, s 可取值为 0.5。

综上可知,光纤光栅的反射率与折射率调制 Δn 以及光栅长度 L 成正比,其 3 dB 带宽与 Δn 成正比,而与 L 成反比。取栅区长度 L 等于 1 mm,通过 MATLAB 仿真宽带 FBG 反射光谱,并与普通 FBG 光谱进行比较,其光谱如图 1 所示。

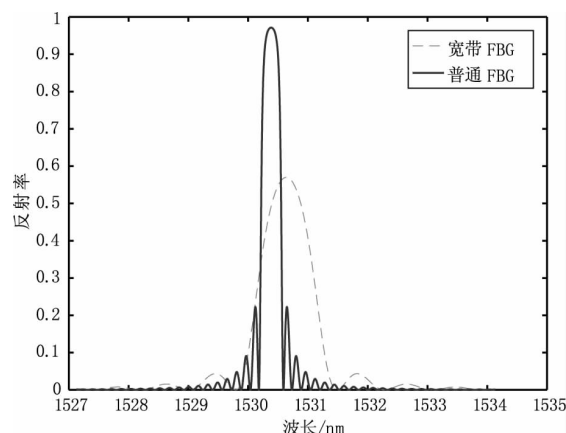


图 1 宽带 FBG 与普通 FBG 仿真光谱对比

Fig. 1 Comparison of Broadband FBG and General FBG Simulation Spectrum

2.2 FBG 光谱异常原因分析

FBG 传感器进行封装时,覆盖在光纤光栅表面的胶层需要高温固化。当胶层受热不均时,光纤光栅表面的胶层收缩不一致,导致光纤光栅上部分光栅周期 Λ 变化为 Λ' ,如图 2 所示。因 $\Delta\Lambda = \Lambda - \Lambda'$ 较小,两个反射峰不能完全分开,光谱上表现为两个反射峰的叠加,产生啁啾现象,形成 FBG 非对称反射峰,其光谱如图 3 所示。

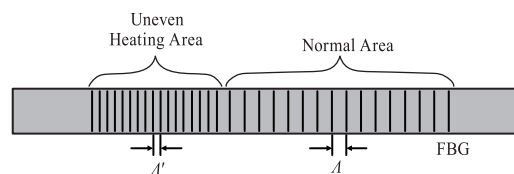


图 2 啁啾光栅示意图

Fig. 2 Chirped grating schematic

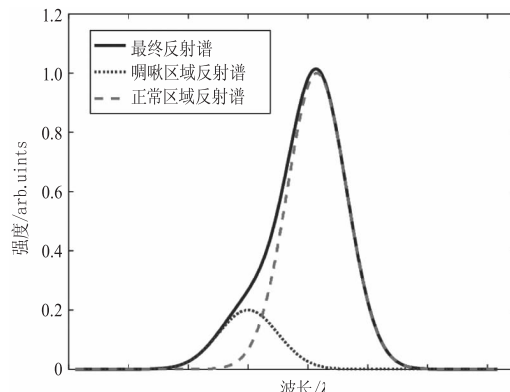


图 3 啁啾光栅光谱分析

Fig. 3 Analysis of chirped grating spectrum

2.3 自相关算法原理

自相关函数是比较同一信号在某一时刻与延时 τ 时刻的相似程度的信号分析函数,是不同时刻信号之间相似性的度量,延迟时间为零时具有最大值。

CCD 检测光谱时,256 个离散像素点分别测得相应光强度,因此可以将 CCD 检测到的原始数据信号视为离散信号。应变或温度变化引起其中心波长漂移,可将其视为同一序列在不同时刻的测量结果,可对其进行离散自相关计算。实际测量时,首先选取某一时刻作为基准,记录其原始光谱数据,对其进行三次样条插值,通过算法提高系统分辨率。光谱中每个像素点视为一个插值节点 $x_i (i = 1, 2, \dots, 256)$, 对应光强度值为 $y_i (i = 1, 2, \dots, 256)$, 若函数 $S(x)$ 满足 $S(x_i) = y_i (i = 1, 2, \dots, 256)$, 且 $S(x)$ 在 $[x_i, x_{i+1}] (i = 1, 2, \dots, 256)$ 内均为不高于三次的多项式,在 $[x_i, x_{256}]$ 内具有二阶连续导数, $S(x)$ 则为三次样条插值函数。令插值后的基准光谱序列为 $f_1(n)$, 应变或温度改变后测得光谱数据并插值后得到光谱序列 $f_2(n)$, 对两个序列进行自相关计算:

$$R(n) = f_1(n) * f_2(-n) = \sum_{n=0}^{N-1} f_1(m) f_2(m-n) \quad (4)$$

当序列 $f_1(n)$ 与 $f_2(n)$ 对齐后, 自相关函数 $R(n)$ 有最大值, 最大值点即为波峰位置。当待测物理量发生变化时, 引起 FBG 峰值漂移, 此时自相关函数 $R(n)$ 最大值点位置也随之变化, 其变化量可直接表征 FBG 中心波长变化量, 通过标定系数可解算出待测物理量的变化量。

3 实验与分析

实验使用啁啾 FBG 与宽带 FBG 进行温度测量对比实验, 并分别使用高精度光谱仪记录中心波长、使用解调仪记录高斯拟合结果、使用解调仪记录光谱原始数据进行自相关解调得到自相关拟合结果。

实验借助 Fluke 7381 恒温水浴箱, 其温控精度达 0.01°C 。实验中, 使温度从 25°C 到 35°C 范围内间隔 0.25°C 线性变化, 分别记录不同 FBG 在特定温度下光谱仪测量数据、高斯拟合数据、自相关解调数据, 共进行 41 次温度测量。本实验采用的 FBG 解调系统如图 4 所示。

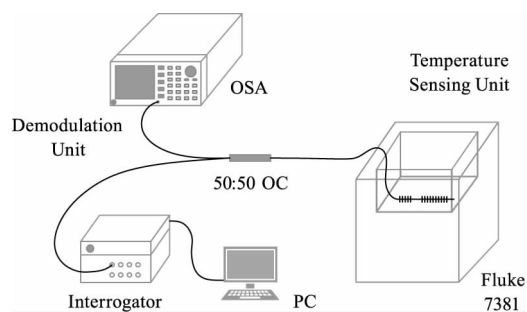


图 4 FBG 解调系统示意图

Fig. 4 FBG demodulation system schematic

本系统包含一个 50 : 50 光纤耦合器 (OC), 其公共端串联一个啁啾 FBG 与一个宽带 FBG, 并将其置于 Fluke 7381 恒温水浴箱内进行温度测量, 水浴箱温度在 25°C 到 35°C 范围内线性变化。耦合器分光端分别连接光纤光栅解调仪 (Interrogator) 与高精度光谱仪 (OSA), 解调仪内有 ASE 宽带光源, 可以通过耦合器传输到光纤光栅, FBG 传感器因布拉格条件的作用, 满足其条件波长的光被反射, 不满足条件的光透射出光纤。此时, 外界的参量就被调制到反射波长中, 经由耦合器分别进入解调仪与光谱仪进行解调, 通过改进解调仪上位机程序, 可以使解调仪同时保存高斯解调中心波长数据与光谱原始数据, 对原始数据进行自相关算法拟合即可得到自相关解调中心波长。将高斯拟合结果、自相关拟合结果与高精度光谱仪测量结果作比较, 即可验证自相关解调算法与宽带 FBG 是否具有提高解调精度的实际研究意义。

解调仪使用线阵 InGaAs 图像传感器测量在温度变化时 FBG 反射谱的变化, 该图像传感器在 $1525 \sim 1570 \text{ nm}$ 波长的范围内有 256 pixels, 波长间隔约为 0.176 nm 。图 5(a)、(b) 分别为啁啾 FBG 和宽带 FBG 测量在 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内温度变化时, 高精度光谱仪、解调仪高斯拟合算法、解调仪自相关算法得到的中心波长变化对比图。

分析解调结果如图 6 所示, 使用啁啾 FBG 进行温度测量时, 高斯拟合算法解调出的中心波长 λ_c 与波长真实值 λ_T 的绝对误差 $\varepsilon_{CT} = (\lambda_c - \lambda_T)$ 在 $-0.0087 \sim 0.0209 \text{ nm}$ 范围内, 方差为 7.17813×10^{-5} ; 自相关算法解调出的中心波长 λ_c 与波长真实值 λ_T 的绝对误差 $\varepsilon_{CT} = (\lambda_c - \lambda_T)$ 在 $-0.0093 \sim 0.0043 \text{ nm}$ 范围内, 方差为 1.14237×10^{-5} 。

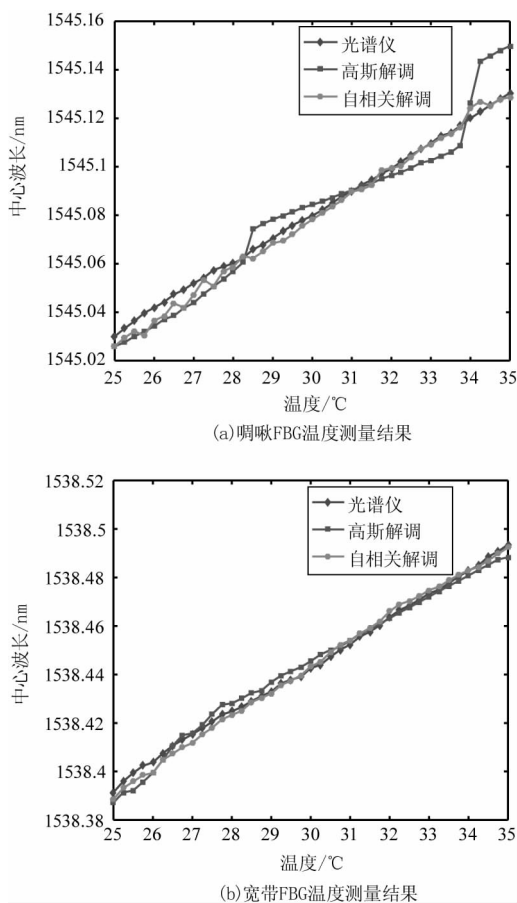


图5 啁啾 FBG 与宽带 FBG 的高斯、自相关解调结果对比
Fig. 5 Results of broadband and general FBG demodulate by Gauss and self-correlation

使用宽带 FBG 进行测量时,高斯算法解调的中心波长 λ_c' 与波长真实值 λ_T' 的绝对误差 $\varepsilon_{CT}' = (\lambda_c' - \lambda_T')$ 在 $-0.0072 \sim 0.0043$ nm 范围内,方差为 9.07687×10^{-6} ;自相关算法解调出的中心波长 λ_c' 与波长真实值 λ_T' 的绝对误差 $\varepsilon_{CT}' = (\lambda_c' - \lambda_T')$ 在 $-0.0043 \sim 0.0025$ nm 范围内,方差为 4.42998×10^{-6} 。自相关算法的解调误差比高斯算法减少了 40.87%,离散程度提高了 51.19%。同时,使用自相关算法解调时,宽带 FBG 较啁啾 FBG 绝对误差减少了 50.74%,离散程度提高了 61.22%。

实验结果表明,啁啾 FBG 自相关算法的解调误差比高斯算法减少了 54.05%,离散程度提高了 84.08%。宽带 FBG 自相关算法的解调误差比高斯算法减少了 40.87%,离散程度提高了 51.19%。同时,使用自相关算法解调时,宽带 FBG 较啁啾 FBG 绝对误差减少了 50.74%,离散程度提高了 61.22%。

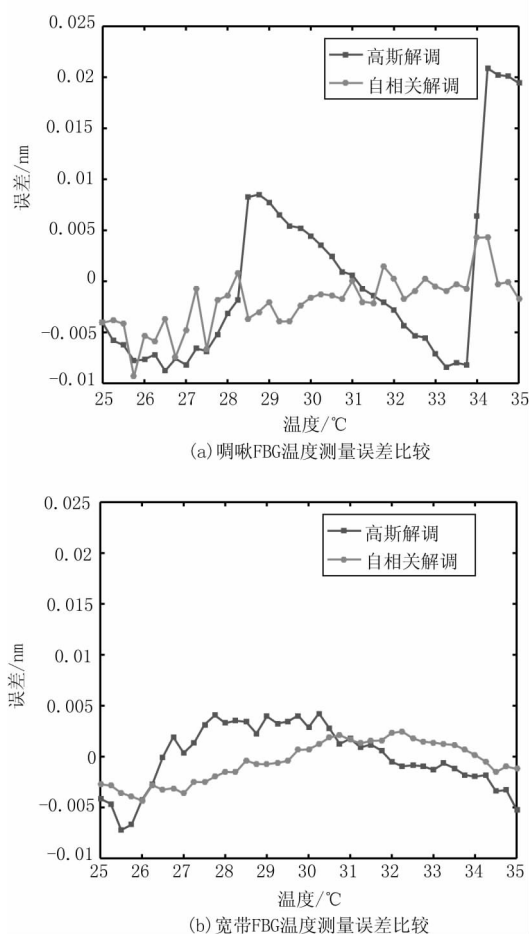


图6 解调结果误差对比图

Fig. 6 Comparison of algorithms' demodulate deviation

4 结论

本文针对 FBG 反射波峰光谱窄、使用线阵 CCD 采集光谱数据时有效像素点少、寻峰解调中心波长精度较低的问题,设计并实现了宽带 FBG 自相关解调系统,可用于高精度测量 FBG 反射峰波长漂移量。实验证明,与高斯拟合解调方法相比,自相关算法减小了反射峰形状对解调结果的影响,解调啁啾 FBG 时误差减小了 54.05%;宽带 FBG 波峰处有效像素点数量为普通 FBG 的 3~5 倍,提高算法准确性,用自相关算法解调宽带 FBG 的误差比啁啾 FBG 减小了 50.74%。本文提出的宽带 FBG 自相关解调算法与传统解调方法相比,准确度与稳定性大幅提高,对提高 FBG 解调精度的研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhang L Y, Shen X Y, Sun J, et al. Demodulation system of the FBG reflectance spectrum based on optical low coherence reflectometry[C]//International Conference on Electri-

- cal, Automation and Mechanical Engineering, 2015.
- [2] ZHANG Faxiang, LV Jingsheng, JIANG Shaodong, et al. High sensitive anti-shock fiber grating micro vibration sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 61–66. (in Chinese)
张发祥, 吕京生, 姜邵栋, 等. 高灵敏抗冲击光纤光栅微振动传感器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 61–66.
- [3] WANG Guina, ZENG Jie, MU Hao, et al. Optimization of fiber Bragg grating sensing network[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(1): 66–69. (in Chinese)
王桂娜, 曾捷, 穆昊, 等. 光纤光栅传感网络的优化研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(1): 66–69.
- [4] LIU Feng, ZHU Lianqing, LOU Xiaoping, et al. Signal distortion analysis of fiber grating line array detector demodulation system[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(10): 1119–1122. (in Chinese)
刘锋, 祝连庆, 娄小平, 等. 光纤光栅线阵探测器解调系统信号失真分析[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1119–1122.
- [5] ZHANG Dengpan, WANG Jin, WANG Yongjie. Real-time calibration method based on FBGA fiber grating demodulation system[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(7): 825–829. (in Chinese)
张登攀, 王璿, 王永杰. 基于FBGA光纤光栅解调系统的实时校准方法[J]. 激光与红外, 2015, 45(7): 825–829.
- [6] Wu M, Xiong Y, Ren N, et al. Design of FBG demodulation system based on arrayed waveguide grating[J]. International Journal of Smart Home, 2016, 10(7): 21–28.
- [7] Huang W, Zhang W, Zhen T, et al. A cross-correlation method in wavelet domain for demodulation of FBG-FP static-strain sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1597–1600.
- [8] Huang W, Zhen T, Zhang W, et al. A high-resolution demodulation algorithm for FBG-FP static-strain sensors based on the hilbert transform and cross third-order cumulant[J]. Sensors, 2015, 15(5): 9928–9941.
- [9] Harasim D, Gulbahar Y. Improvement of FBG peak wavelength demodulation using digital signal processing algorithms[C]//XXXVI Symposium on Photonics Applications in Astronomy. International Society for Optics and Photonics, 2015: 966212.
- [10] Chen J, Shi F Q, Lei X, et al. A wide-range demodulation method for FBG sensor[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2016, 58(10): 2416–2419.
- [11] Xiong Y L, Ren N K, Wu M Z, et al. Sensitivity-enhanced FBG demodulation system with multi-sideband filtering method [J]. Optics Communications, 2017, 382: 246–252.
- [12] LI Zhengying, ZHOU Zude, TONG Xinglin, et al. Study on high-speed and high-capacity fiber grating demodulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 52–57. (in Chinese)
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 52–57.
- [13] HU Chenyuan. High-speed fiber grating sensing network high-speed demodulation method and key technology research[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
胡宸源. 大容量光纤光栅传感网络高速解调方法及关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.