

基于宽谱光源的光纤传感波长解调系统的研究

王晓娜¹ 宋世德² 于清旭¹

(¹ 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116023
² 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 研究制作了基于宽谱光源的光纤传感波长解调系统,以多光纤光栅作为波长参考基准、采用可调谐光纤法布里-珀罗(F-P)滤波器作为波长扫描器件。系统中采用三次多项式拟合的方法对滤波器锯齿波的扫描电压与透射波长关系曲线进行非线性拟合,解决可调谐光纤 F-P 滤波器的电压—波长非线性关系对系统测量带来的较大误差问题,实现波长的高精度解调。采用五光纤光栅做波长参考,单根光纤光栅传感器的解调实验结果表明:待测光纤光栅布拉格波长短期测量分辨率为 3.5 pm,长期测量稳定性为 7 pm。采用该系统对光纤非本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)应变传感器的测试结果表明,测量应变灵敏度为 2.41 nm/ $\mu\epsilon$,并且应变和波长之间存在良好的线性关系,线性相关度达到 0.99991。

关键词 波长解调;三次多项式拟合;可调谐光纤 F-P 滤波器;光纤光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0205

Optical Fiber Sensor Wavelength Demodulation System Based on Broadband Light Source

Wang Xiaona¹ Song Shide² Yu Qingxu¹

(¹ School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116023, China
² State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract Research work has been done in optical fiber sensor demodulation system based on broadband light source. Multi-FBGs are used as wavelength reference and fiber Fabry-Pérot tunable filter (FFP-TF) is used as wavelength selection device in the system. A non linear fitting based on cubic polynomial is adopted as the best fitting algorithm to convert scanned voltage of FFP-TF sawtooth wave to scanned transmission wavelength, which can solve the systemic error caused by the non linear relation between the wavelength and scanning voltage of FFP-TF, and then get higher demodulation resolution. In the experiment, five reference FBGs are used in the demodulation system. One FBG sensor demodulation result shows that wavelength resolution of measurement FBG is 3.5 pm for a short time, and long-term stability is 7 pm. An EFPI optical fiber strain sensor is tested with the demodulation system, which shows the strain sensitivity of 2.41 nm/ $\mu\epsilon$, besides, there is good linear relation between strain and wavelength with a linear correlation coefficient of 0.99991.

Key words wavelength demodulation; cubic polynomial fitting; Fiber Fabry-Pérot tunable filter; fiber Bragg grating

1 引 言

光纤传感器以其体积小、可靠性高、传输损耗小、传输信息负载量大等优点成为研究热点。光纤 Fabry-Pérot(F-P)传感器^[1]和光纤 Bragg 光栅^[2]具有重复性好、分辨率和精度高、不受电磁辐射干扰、

耐腐蚀、耐高温高压等优点,因而在建筑结构健康监测、石油化工行业恶劣环境下的多参量测量等领域有广阔的工业应用前景。

在光纤传感系统中,解调系统接收携带有被测参量信息的光纤传感器信号,通过光电转换、信号放

大、采集和处理,从而得到被测量信息。光纤解调系统作为整个光纤传感系统的核心,对光纤传感器高精度、高分辨率的测量起着关键的作用。目前,光纤光栅和光纤 F-P 传感器的解调方法很多^[3~10],比如基于宽谱光源(ASE, SLED)和通用光谱分析仪或者特制微型光纤光谱仪的方法,该方法优点是光路简单、使用方便,缺点是波长分辨率低、解调速度慢,且受温度的影响比较大,不利于其在恶劣环境中的应用;基于可调谐光纤 F-P 滤波器和宽带光源的波长扫描解调方法,具有测量范围宽和动态测量响应快的优点。本文在对可调谐光纤 F-P 滤波器工作特性进行系统测试和分析的基础上,研制了以五光纤光栅作为波长参考基准、以可调谐光纤滤波器作为波长选择器件的光纤传感波长解调系统。

2 工作原理与解调方法

图 1 给出了基于多光纤光栅参考的宽谱光源光纤传感器单通道波长解调系统,为提高光电信号的信噪比,图 1 采用了分光比为 1:9 光纤耦合器,其中 1 和 1' 的分光比为 90%,2 和 2' 的分光比为 10%。系统的工作原理为:大功率 SLED 光源输出的宽谱光经过可调谐光纤 F-P 滤波器后形成窄带的扫描光谱,入射到分光比为 1:9 的耦合器的端口 1,90% 能量的光信号从出射端口 1' 传输到光循环器的 1 分支,从 2 分支出射的光传输到光纤传感器,受到调制的光纤传感器的反射光谱沿原路返回,从光循环器

的 3 口出射,由光电探测器接收。来自出射端口 2' 的 10% 能量的光信号传输到由五光纤光栅串联的波长参考阵列,其反射信号经由光纤耦合器的端口 2' 和 2 进入光电探测器。光纤传感器和参考光纤光栅阵列的反射光谱分别由光电探测器检测、放大,经数据采集卡转换后输入计算机,通过程序计算出参考波长对应的电压,进行非线性拟合,转换后得到光谱图,再经光纤传感器解调算法得到被测的参量。

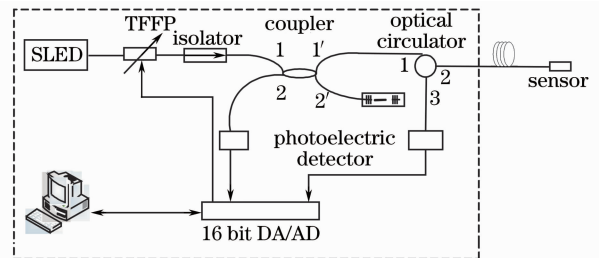


图 1 基于多光纤光栅为波长参考的光纤解调系统框图
Fig. 1 Diagram of EFPI demodulation system based on the reference of five FBGs

作为波长选择器件的可调谐光纤 F-P 滤波器,其输出的透射波长与施加的驱动电压在理想状况下为线性关系,但实际上,由于压电陶瓷具有蠕变、迟滞等特性,可调谐光纤 F-P 滤波器的透射波长-扫描电压曲线并非成线性关系且存在蠕变、温漂和明显的迟滞现象。对可调谐光纤 F-P 滤波器透射波长-扫描电压关系的拟合对比结果如表 1 所示,可直观地看出,对于同一组扫描电压数据,三次多项式的拟合曲线相关系数最大,拟合标准差最小。

表 1 可调谐光纤 F-P 滤波器的拟合结果对比

Table 1 Fitting comparison of fiber Fabry-Pérot tunable filter

	Correletion coefficient	Standard deviation	Fitting formula
Linear fitting	99.963%	0.62043	$\lambda = 12.31471 * V + 1404.16963$
Quaratic polynomial fitting	99.994%	0.17356	$\lambda = -0.19596 * V^2 + 16.95995 * V + 1377.3063$
Cubic polynomial fitting	99.999%	0.07577	$\lambda = -0.03173 * V^3 + 0.9322 * V^2 + 3.78231 * V + 1427.83617$

因此,本文选用三次多项式拟合方法得到可调谐光纤 F-P 滤波器的透射波长-扫描电压关系曲线,根据宽谱光源的带宽以及三次多项式拟合所需要的参考点数,选用五根光纤光栅,采用高精度控制电路稳定其波长作为参考波长。从图 1 中可以看出,参考光纤光栅的信号与光纤传感器反射信号的测量通道完全分离,参考光纤光栅的反射光谱不会对传感光谱造成干扰。由于参考光纤光栅通道共用的是一个信号放大通道,因此在选择五参考光纤光栅时,也必须考虑光源光谱高斯分布的影响,计算出每个参考光纤光栅的峰值反射率,使光电探测器接收的每个光

纤光栅的反射功率基本一致,从而最大限度地提高参考波长的整体检测精度。表 2 为经过理论计算后需要的参考光纤光栅的反射波长和反射率。

表 2 五参考光纤光栅的参数

Table 2 Parameters of five reference FBGs

	Wavelength /nm	Reflectivity
1	1511	45%
2	1530	20%
3	1550	25%
4	1570	50%
5	1588	99%

3 实验结果及分析

应用本文研究的解调系统,对光纤 Bragg 光栅和光纤非本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)传感器进行波长解调实验。采用高斯拟合方法确定光纤光栅的反射波长,图 2 是该系统在 5 分钟内的测量结果,以系统短期解调的标准差的 2 倍作为测量系统的分辨率,分辨率为 3.5 pm。长期波长稳定性为 7 pm。

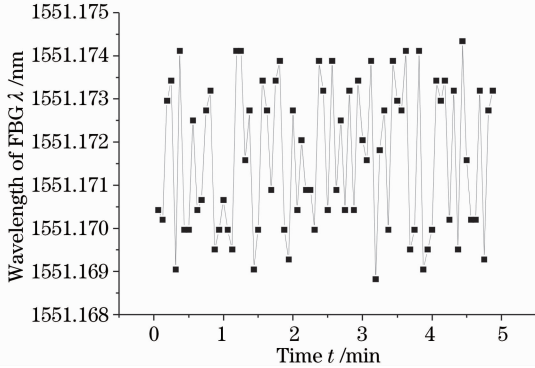


图 2 系统的波长分辨率测试结果

Fig. 2 Wavelength resolution test result of the system

采用本系统测量了光纤 EFPI 传感器的应变特性。实验中采用悬臂梁对应变进行标定,将光纤 EFPI 传感器和 120 Ω 的电阻应变片通过环氧树脂并排地粘贴在悬臂梁的同一位置,保证二者所测量的应变相同。在悬臂梁的自由端连续加载,则能够连续地改变测点处的应变,由静态电阻应变仪测量出该点的应变值。另一方面,基于五光纤光栅参考的光纤传感解调系统也实时地解调该应变对应的光纤 EFPI 传感器的腔长值,从而得到二者的标定曲线。

实验中采用的光纤 EFPI 传感器的初始腔长为 287.131 μm,标定的过程中电阻应变片测量的应变从 0 开始增加,最大值为 800 με,光纤 EFPI 传感器的腔长则从 287.131 μm 增加到 289.073 μm,腔长变

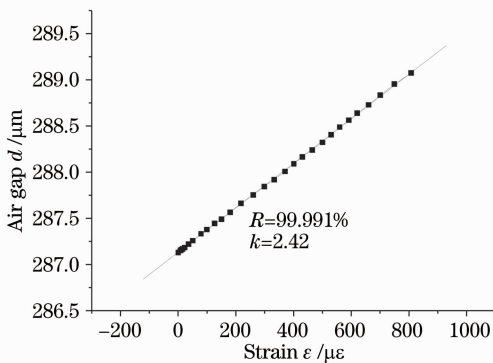


图 3 光纤 EFPI 传感器应变标定曲线

Fig. 3 Calibration curve of EFPI strain sensor

化了 194 nm,如图 3 所示。图 3 中横坐标为静态电阻应变仪测量的应变值,纵坐标为本系统解调的光纤 EFPI 传感器腔长值,图 3 中的直线是对定标曲线进行线性拟合的结果,可以看出,光纤 EFPI 传感器具有良好的线性度,线性拟合的相关度可以达到 0.99991,应变灵敏度为 2.41 nm/με。

图 4 是经过标定的光纤 EFPI 传感器的应变测量结果,其中横坐标是静态电阻应变仪测得的应变值,纵坐标是光纤 EFPI 传感器测到的应变,二者的最大偏差在 ±6 με 之内。

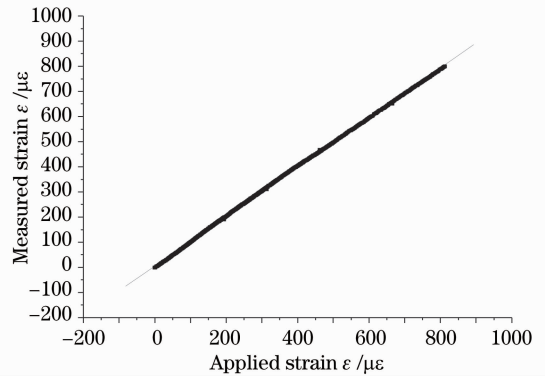


图 4 光纤 EFPI 传感器应变测量曲线

Fig. 4 Measurement curve of EFPI strain sensor

4 结 论

本文采用多光纤光栅作为波长参考,利用三次非线性拟合方法对波长解调系统进行实时标定,解决了光纤 F-P 可调谐滤波器调谐电压与峰值透过波长的非线性、迟滞和漂移问题,研制出基于宽谱光源的光纤传感解调系统。实验表明,测量光纤光栅解调的分辨率为 3.5 pm,长期测量的稳定性为 7 pm。另外,对光纤 EFPI 应变传感器的测试结果表明,测量应变灵敏度为 2.41 nm/με,并且应变和波长之间存在着良好的线性关系,线性相关度达到 0.99991。该解调系统具有结构简单、成本低、解调精度较高等优点。

参 考 文 献

- 1 K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. Wang *et al.*. Extrinsic Fabry-Pérot optical fiber sensor [C]. *Optical Fiber Sensors Conference*, 1992. 193~196
- 2 Y. J. Rao. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 1999, **31**: 297~324
- 3 Li Ying, Zhang Shulian. A novel fiber Bragg grating sensor interrogation system utilizing a tunable Fabry-Pérot filter[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 237~240
- 李 营,张书练. 基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅解调系[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 237~240
- 4 Minh Song, Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin. Fiber Bragg grating

- strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7): 1106~1111
- 5 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 822~823
- 6 Jing Zhenguo, Yu Qingxu, Zhang Guiju *et al.*. A novel wavelength demodulating method for white light optical fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1347~1351
荆振国, 于清旭, 张桂菊 等. 一种新的白光光纤传感系统波长解调方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1347~1351
- 7 Chen Changyong, Qiao Xueguang, Wang Xiaofeng *et al.*. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 825~828
陈长勇, 乔学光, 王小凤 等. 基于实时校准技术的光纤光栅传感解调系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 825~828
- 8 Rao Yunjiang, Wang Xijing, Zhu Tao *et al.*. Demodulation algorithm for frequency-division-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 997~1000
饶云江, 王希晶, 朱 涛 等. 光纤菲佐传感器频分复用网络解调方法研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 997~1000
- 9 Jiang Yi. White Light interferometry for the measurement of extrinsic Fabry-Pérot interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 381~384
江 毅. 测量光纤外腔 Fabry-Pérot 干涉仪的白光干涉术[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 381~384
- 10 Tang Qingtao, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. High-resolution signal demodulation method for fiber-optic Fabry-Pérot multiplexing system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1353~1357
唐庆涛, 饶云江, 朱 涛 等. 光纤法-珀传感系统高分辨率复用信号解调方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1353~1357