

多通道光纤光栅传感系统解调技术及算法研究

毕 婕^{1,2} 王拥军^{1,2} 张 琦^{1,2} 刘永超^{1,2} 忻向军^{1,2} 王 智^{1,2}

(¹ 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; ² 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 为了提高光纤光栅传感系统的容量和解调精度,研究了多通道光纤光栅传感系统的相关解调技术,提出了一种应用于多通道光纤布拉格光栅(FBG)传感系统解调的算法。结合仿真和实验,给出了该算法对光纤光栅反射峰的解调效果,分析了算法的精度。研究发现,整个系统可实现 32 路光栅复用,能在 1525~1585 nm 的波长范围内进行解调,算法的解调精度可达 2 pm,分辨率为 0.1 pm。该算法有效地降低了一般寻峰算法中输入信噪比(SNR)对系统解调精度的影响,系统的测量精度、测量范围、可靠性都得到改善,能够很好地应用于实际工程。

关键词 光纤光学;多路复用技术;可调谐环形激光器;梳状滤波器;有限冲激响应滤波器

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s105002

Research on Techniques and Algorithms of Signal Interrogation in Multi-Channel Fiber Bragg Sensing System

Bi Jie^{1,2} Wang Yongjun^{1,2} Zhang Qi^{1,2} Liu Yongchao^{1,2}
Xin Xiangjun^{1,2} Wang Zhi^{1,2}

¹ School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² State Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, Beijing University of

Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract To improve the capability and detection precision of the fiber Bragg sensing system, the novel interrogation technique and a fast wavelength detection algorithm are proposed for the multi-channel fiber Bragg grating (FBG) sensing system. With the combination of the numerical simulation and experiment, it is demonstrated that the average precision of interrogation is 2 pm and the resolution is 0.1 pm over the working range of 1525~1585 nm. The system can realize the real-time monitoring of 32 channels more than 1000 sensors. Present work shows that the algorithm described in this paper can reduce the signal noise ratio (SNR) at the input of the system which influences the precision of interrogation. Compared with traditional wavelength detection algorithms, this interrogation method is greatly improved in measurement precision, wavelength range and working reliability. It can well be applied to practical engineering applications.

Key words fiber optics; multiplexing; tunable ring laser; comb filter; finite impulse response filter

OCIS codes 060.2370; 060.3735

1 引 言

光纤光栅具有成本低、重量轻、不受电磁干扰、检测灵敏度高等特点,在光纤传感领域及其他领域得到了广泛应用,而光纤光栅解调技术是整个传感应用的关键^[1]。在实际应用中,传感系统的解调精度主要受

限于解调算法的解调精度,因此高精度的解调算法是保证系统检测精度的关键。针对自行研究的 32 通道解调系统,本文提出了一种降低误差的 3 dB 中点波长提取算法,能够有效地提高系统解调精度及分辨率,解调精度可达 2 pm,分辨率可达 0.1 pm。

收稿日期: 2011-07-03; **收到修改稿日期**: 2011-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(61077050,61077014,60932004)、国家 973 计划(2010CB328300)和国家重点实验室开放基金(2010OCTN-02)资助课题。

作者简介: 毕 婕(1987—),女,硕士研究生,主要从事光传感方面的研究。E-mail: bijiechina@163.com

导师简介: 王拥军(1968—),男,副教授,主要从事光传感方面的研究。E-mail: wangyj1284@yahoo.com.cn(通信联系人)

2 多通道光纤光栅传感解调系统的信号处理算法设计

由于光路和电路的噪声影响,系统输出解调信号波形会发生失真,光纤布拉格光栅(FBG)的反射谱不稳定,峰值跳动尤为明显。图1是多路复用光纤光栅传感系统解调得到的光栅反射谱。由于峰值容易受外界干扰,若采用直接求最大值的方法来确定峰值波长,无法获得准确的波长,进而导致系统解调精度的下降。

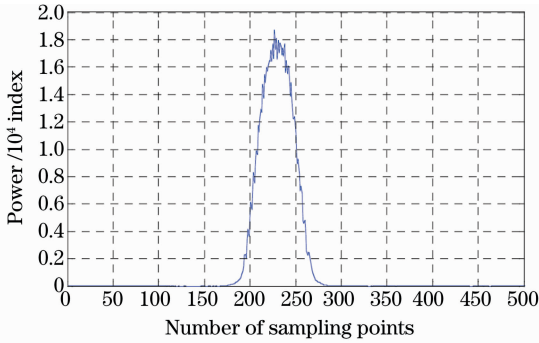


图1 系统解调的FBG反射谱

Fig. 1 Reflective spectrum of FBG

比较了各种能用于FBG波长检测的数字滤波方案和峰值提取算法,在保证高精度与实时性要求的前提下,最终确定的输出信号重建方法是基于数字低通滤波和3 dB中点的波长提取算法^[2]。

2.1 数字低通滤波

为了提高系统的解调精度,可以用各种数字信号处理方法来提高信号的信噪比(SNR),如数字低通滤波法、匹配滤波法和自适应线性网络。经研究发现,匹配滤波法需要预先知道未受噪声污染的信号特征,由于实际中传感信号特征是不清楚的,故不太适合实际应用。自适应线性网络的方法虽然在噪声自由谱宽较宽时可以达到更高的精度,但在采样点数量较大时,运算量相当大,影响测量的实时性。而数字低通滤波器则能同时满足实际应用、精度和实时性的要求。因此选用的数字滤波方案为数字低通滤波器。有限冲激响应(FIR)结构的低通滤波器具有严格的线性相位响应,不会导致信号失真,更适用于FBG传感解调系统的应用。

选用基于窗函数的FIR滤波器来对信号进行处理。根据解调信号的特性,设计符合要求的FIR滤波器,其频谱特性如图2所示。图3是经过FIR滤波后的信号。

从图1可见,在实际系统中解调信号受噪声的影响比较大,因此在波长定位之前必须要经过相应

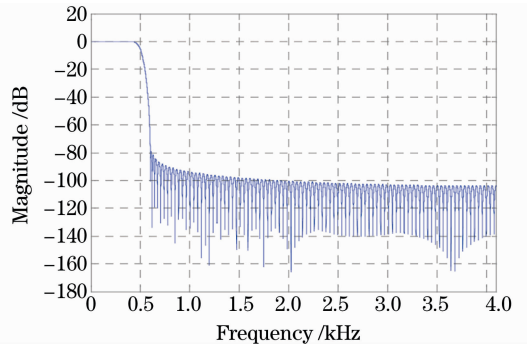


图2 FIR滤波器频谱

Fig. 2 Frequency spectrum of FIR filter

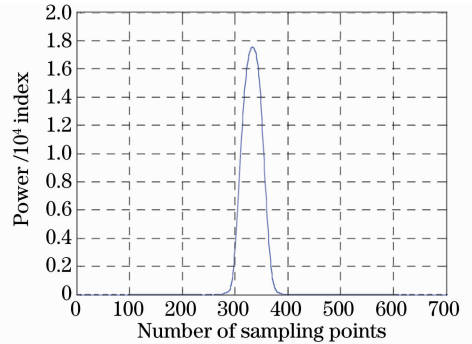


图3 滤波后光栅谱

Fig. 3 Output FBG spectrum of FIR filter

的信号处理。由图3可见滤波后的信号要比直接检测到的信号平滑,易于辨别峰值波长,消除了图1中峰值波长的不确定性。比较图1和图3可以看出,滤波后信号的幅度降低,位置也发生了移动。对于FIR滤波器,位置的移动仅仅依赖于滤波器的阶数,和输入信号的具体形式无关,因而不会影响波长检测精度。将FIR滤波器在高速现场可编程逻辑阵列(FPGA)实现,可以多路并行处理,因此提高了多路复用多通道光纤光栅传感系统的解调效率。

2.2 3 dB中点波长提取算法

仅采取单一的滤波算法还不够,还需要配合其他算法来提高系统的解调精度。由于该解调系统需要对多个光栅进行波长提取,若采用多项式拟合或高斯拟合等算法,随着拟合点数的增加,数据计算量增大,这对信号处理系统的运算速度和数据传输速度有很高的要求,也不满足实际工程实时性需求。同时,拟合的数据点数以及函数型取决于所用FBG的光谱特点,需要根据实际光谱特点选择最适合的函数型进行拟合,才能保证拟合度。若没有选中合适的拟合函数,会降低系统的精确度。因此,多项式拟合和高斯拟合算法的灵活性降低,难以适应不同光纤光栅的解调需求^[3]。

针对这种多通道的光纤光栅传感结构,提出 3 dB 中点波长提取算法,通过算法找到每个光栅 3 dB 中点对应的采样点标识,再根据模/数(A/D)转换器的采样精度确定出波长,同时用校准器件进行对波长实时校准和标定,很容易检测出光栅的波长漂移。图 4 所示为多路复用系统采样的光栅谱,从峰值细节可以看出,反射谱并不是标准的高斯型,波峰的形状不规则,有的峰值偏左,有的偏右。若采用寻峰的方法^[4],波长一旦漂移,会带来很大误差,系统的解调精度也会降低。但是,如果使用 3 dB 中点的波长提取方法,则不受以上的情况影响,可以较为准确地确定中点波长,解调精度较寻峰算法有了很大的提高。

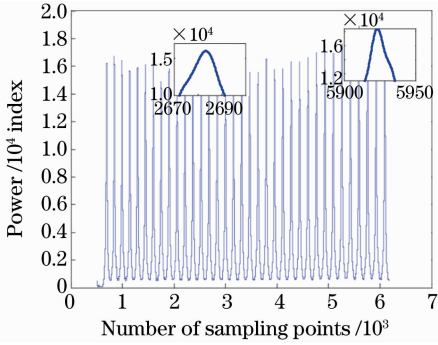


图 4 系统采样的一个通道 FBG 光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of a channel of FBG sensors in multiplexing system

3 多通道光纤光栅传感解调系统实验

实验中采用的多通道传感解调系统如图 5 所示。用可调谐环形激光器作为扫描光源,控制法布里-珀罗(F-P)滤波器的压电陶瓷,即可按波长对系统中的 FBG 阵列进行扫描。再经过光电转换等电路,将光信号转换成电信号,并送入计算机进行数据处理^[5,6]。经过实验测量,该系统光源输出的光功率大幅提高,扫描光源的线宽很窄,约 0.01 nm,波长范围在 1525~1585 nm。基于这种方案,可以对多支路光栅进行解调,单位光栅检测成本较低。实验表明,该系统可以进行 32 路复用,每一路获得的光功率接近 200 μ W,可复用的光栅数目能达到 30~50 个,因此整个系统可复用的光栅数超过 1000 个,较传统的宽带光源解调方法大大增加。根据测量距离的长短,1 s 内可以对所有支路实现 2~100 次测量,系统的实时性高。在这种情况下,系统对于温度的检测范围可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应变的检测范围为 $\pm 1500\text{ }\mu\epsilon$ 。结合第 2 节提到的数字信号处理方法和算法,系统解调精度可达 2 pm,分辨率可达到 0.1 pm。对于波长

定标的问题,系统中使用光纤梳状滤波器代替传统的参考光栅阵列,作为单独的校准支路实现波长的标定和校准。由于梳状滤波器体积小,其滤波特性由光纤内部的折射率调制决定,对温度漂移不敏感,因此比传统参考光栅有更高的精确度,且更方便操作,更适合实际工程应用。

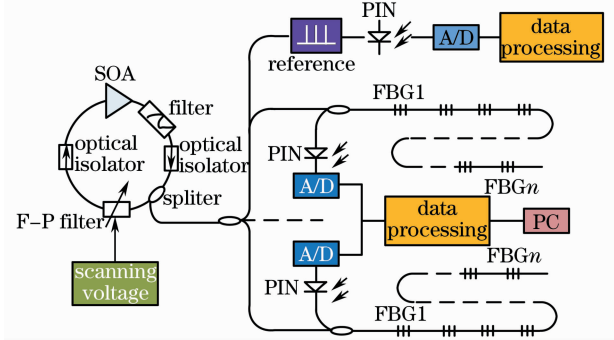


图 5 多通道 FBG 传感解调系统

Fig. 5 Diagram of multi-channel FBG sensing system

4 算法仿真和实验分析

按照图 5 所示的实验系统,选取两个被测光栅作为监测点,其中应变 FBG 的波长为 1549.5 nm,温度 FBG 的波长为 1547.7 nm,峰值反射率为 0.9。分别进行了两组实验,测试外界应变和温度变化对光栅波长的影响。

第一组实验中,在 FBG 上加上线性变化的应变,以步长 50 $\mu\epsilon$ 增加,并记录下经过数据处理后的波长,作为施加应变的测量结果。由于光纤光栅应变传感器同时受温度和应变的影响,为得到被测点的真实应变,就需要消除掉温度变化引起的波长漂移。因此,同时布设了光纤光栅温度传感器和应变传感器,近似认为二者处于同一温度场,温度传感器作为温补光栅进行修正,可以得到仅有应力引起的波长变化。计算方法为

$$\epsilon = K_1(\lambda_1 - \lambda_0) + B_1(\lambda_{t1} - \lambda_{t0}), \quad (1)$$

式中 K_1 为应变系数, $K_1 = 850.05899616\text{ }\mu\epsilon/\text{nm}$, B_1 为温度修正系数,通过测量得到 $B_1 = -995.13569116\text{ }\mu\epsilon/\text{nm}$ 。在 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, λ_{t0} 为温补光栅的初始波长, $\lambda_{t0} = 1530.961\text{ nm}$, λ_0 为应变光栅的初始波长, $\lambda_0 = 1549.508\text{ nm}$, λ_{t1} 为温补光栅的当前波长, λ_1 为应变光栅的当前波长。测量结果如图 6 所示,解调结果和线性拟合之间的误差对应变 $1\text{ }\mu\epsilon$ 。

第二组实验中,在 $50\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内检测光纤光栅波长随温度的变化。将光栅置于恒温箱内,每隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 设置一个恒温点,多次测量的平均值作为该

点的波长值,测量结果如图 7 所示。

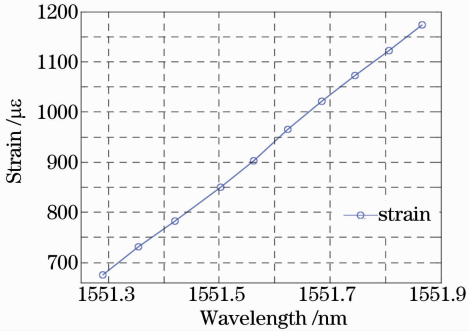


图 6 所加应变和解调波长之间的对应关系

Fig. 6 Relation between wavelength and strain

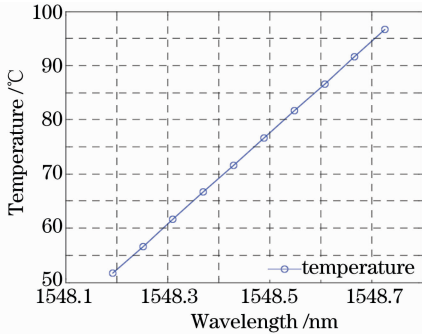


图 7 所加温度和解调波长之间的对应关系

Fig. 7 Relation between wavelength and temperature

从图 7 可以看出,FBG 的反射波长随温度的变化基本符合线性关系。当测温精度要求不高时,实

验结果和一次拟合的误差对应温度 0.5 °C,二次拟合的误差对应温度 0.1 °C,精度较高。一次线性拟合的结果为

$$T = K(\lambda - \lambda_{00}), \quad (2)$$

式中 $K = 100.0701078 \mu\text{ε}/\text{nm}$, λ_{00} 为温度光栅的初始波长, $\lambda_{00} = 1547.741 \text{ nm}$, 温度为 0 °C, λ 为光栅的当前波长。二次拟合的结果为

$$T = A(\lambda - \lambda_{00})^2 + B(\lambda - \lambda_{00}) + C, \quad (3)$$

式中 A 为二次项系数, $A = -10.55199414 \text{ °C}/\text{nm}^2$, B 为一次项系数, $B = 108.704748 \text{ °C}/\text{nm}^2$, C 为常数项, $C = -0.638767511 \text{ °C}/\text{nm}^2$ 。

第三组实验中,为了比较各种信号处理方法之间的性能,我们进行了多次测量。对比分析了用高斯拟合寻峰法、3 dB 中点波长提取算法的实验效果,两种方法的测量误差绝对值如图 8 所示。实验中记录了 10 组测量的光栅反射数据,然后分别用这两种方法进行计算处理。在系统 SNR 较高的情况下,高斯拟合法寻峰法的波长漂移标准差(SD)为 4.238 pm,而 3 dB 中点波长提取算法所获得 SD 的为 1.249 pm。在系统 SNR 较差的情况下,由于峰值受噪声影响大,高斯拟合法寻峰法的误差更大些。不难看出,运用高斯拟合寻峰的方法对系统精度的影响较大,采用提出的 3 dB 中点波长提取算法可以有效地提高波长检测精度^[7]。

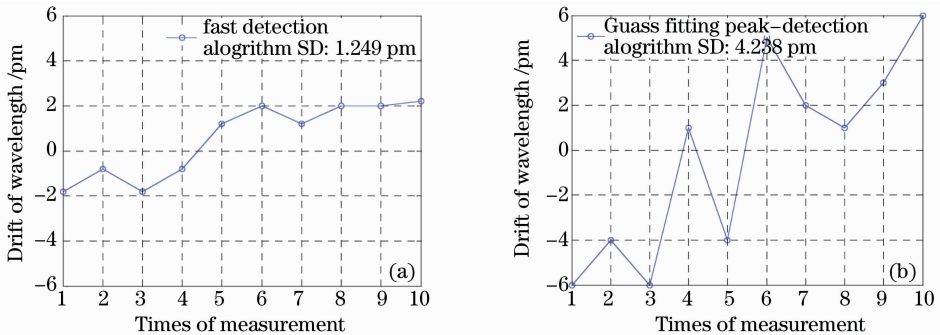


图 8 两种算法在实验中的误差比较。(a) 3 dB 中点波长提取算法;(b) 高斯拟合寻峰法

Fig. 8 Comparisons of two algorithms. (a) Wavelength detection algorithm based on 3 dB point;

(b) Gaussian fitting peak-detection algorithm

还用实验验证了系统的稳定性。实验中对系统某一通道的不同波长光栅进行了长期观察,选取了其中 10 次随机测量结果,如表 1 所示。可以看出,在同一环境下,系统的稳定性较高,可以达到 2 pm。

5 结 论

实验分析了提出的解调方案和 3 dB 中点波长提取算法的检测精度,分别进行应力和温度传感实

验,达到了较好的检测效果。利用这种解调技术,不仅加大了可调谐 F-P 滤波器的扫描范围,使其可以在 60 nm 的范围精确定标,而且系统的检测精度可达到 2 pm,分辨率可达到 0.1 pm。整个系统可实现 32 路复用,能检测超过 1000 个光栅,系统实时性和稳定性高。由于该解调系统具备高精度大范围的性能特点,可以很好地适用于实际工程应用,具有较高的市场价值^[8]。

表 1 通过算法得出的 10 次随机测量 FBG 中心波长

Table 1 10 times experimental results of the FBG central wavelength

Times of measurement	Measured FBG wavelength /nm		
	FBG1	FBG2	FBG3
1	1531.0601	1547.2619	1549.6595
2	1531.0603	1547.2621	1549.6595
3	1531.0607	1547.2624	1549.6596
4	1531.0611	1547.2626	1549.6600
5	1531.0614	1547.2627	1549.6601
6	1531.0616	1547.2628	1549.6608
7	1531.0618	1547.2629	1549.6608
8	1531.0620	1547.2631	1549.6610
9	1531.0620	1547.2634	1549.6610
10	1531.0622	1547.2636	1549.6620

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.* 1997, **15**: 1442~1463
- 2 Fu Jianwei, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong *et al.*. Methods for improving fiber Bragg grating wavelength measurement precision [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(2): 123~126
付建伟, 肖立志, 张元中等. 提高光纤 Bragg 光栅波长测量精度的方法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(2): 123~126

- 3 Li Ying, Zhang Shulian. A novel fiber Bragg grating sensor interrogation system utilizing a tunable Fabry-Perot 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统[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 237~240
- 4 Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min *et al.*. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 893~897
朱浩瀚, 秦海琨, 张 敏等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 893~897
- 5 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Chung Wenghong *et al.*. Technique for fiber Bragg grating array interrogation with a tunable Fabry-Perot Filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(12): 1103~1106
余有龙, 谭华耀, 钟永康等. 基于可调 F-P 滤波器的光纤光栅传感器阵列查询技术[J]. *中国激光*, 2000, **27**(12): 1103~1106
- 6 Bai Junjie, Wang Lixin, Ran Changyan *et al.*. Demodulating and calibrating for fiber Bragg grating based on fabry-perot filter[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, **25**(3): 10~11
柏俊杰, 王立新, 冉昌艳等. 基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调和标定[J]. *传感器与微系统*, 2006, **25**(3): 10~11
- 7 T. Bodendorfer, M. S. Muller, F. Hirth *et al.*. Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber bragg grating interrogation systems[J]. *Proceedings of the International Symposium on Optomechatronic Technologies*, 2009, 122~126
- 8 A. Othonos, K. Kalli. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[M]. Norwood, MA: Artech House, 1999. 139~143

栏目编辑: 李文喆