

文章编号: 1006-4710(2015)04-0409-05

光纤光栅传感信号寻峰误差研究

胡辽林, 王亚萍, 王斌

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 光纤光栅传感器是通过检测被测物理量引起的光纤光栅中心波长的漂移量来得到该物理量的变化, 波长检测精度常受到寻峰算法的影响。本文研究了 5 种寻峰算法, 分析了加窗截断长度、信噪比及波长分辨率对寻峰算法误差的影响。截断长度太长或太短都会造成寻峰误差骤增, 每种寻峰算法对应的加窗截断长度稍有不同, 略大于 3 dB 带宽的 2 倍为最佳; 信噪比越高, 寻峰误差越小; 波长分辨率越高, 寻峰误差越小。通过与实验对比, 相同条件下, 高斯公式非线性拟合在 5 种算法中寻峰误差最小, 质心算法寻峰误差最大。实验中高斯公式非线性拟合算法的寻峰误差可以达到 1.00 pm。

关键词: 光纤光栅; 传感; 寻峰算法; 寻峰误差

中图分类号: TN911.4 **文献标志码:** A

Research on peak searching algorithms errors of fiber bragg grating sensing signal

HU Liaolin, WANG Yaping, WANG Bin

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Fiber Bragg grating sensor makes acquisition to physical change by detecting the FBG central wavelength drift that caused by physical change, while the wavelength detection precision is limited by peak searching algorithm. Five peak searching algorithms were studied. The influence of truncating length, signal to noise ratio(SNR) and wavelength resolution on peak searching algorithms were analyzed. It is found that the peak searching error is increasing rapidly if the truncating length is either too long or too short. The truncating length of each peak searching algorithm is generally different, while slightly larger than 2 times of the bandwidth of 3 dB is a better choice. We clarify a fact that the higher the SNR and wavelength resolution, the smaller the peak searching error. Combined with the experiment, the peak searching error of Gaussian nonlinear fitting is the smallest, while the centroid algorithm perform worst. The peak searching error of Gaussian nonlinear fitting can reach 0.01pm in experiment.

Key words: fiber Bragg grating; sensing; peak searching algorithms; peak searching error

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器有波长编码、抗电磁干扰、灵敏度高、复用能力强等优点, 广泛应用于应变、温度、压力、磁场等多种物理量的测量, 其原理都是通过检测由被测量引起的光纤光栅中心波长的微小漂移量而得到被测量的微弱变化^[1-2]。因此, 准确寻找波峰位置, 对提高波长检测精度和降低寻峰误差至关重要。高精度的寻峰算法是保证准确寻峰的关键。

由 FBG 构成的传感系统因各种噪声而限制了

其波长检测精度。特别是光路连接处和闲置的尾端等光纤端面产生的固有反射, 这些反射光会与 FBG 反射光产生干涉, 从而引起干涉噪声。光路噪声通常会带来 10 pm 量级的波长检测误差^[3]。还有解调系统存在的电子学噪声, 这些噪声是不可避免的。在高精度的 FBG 传感测量中必须考虑如何消减噪声的影响。本文先对光纤光栅传感信号进行 FIR (Finite Impulse Response) 数字低通滤波去噪, 使光栅反射谱变得平滑, 以提高峰值波长的分辨能

收稿日期: 2014-08-12

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2014JM7273)。

作者简介: 胡辽林, 男, 副教授, 研究方向为光纤传感及光纤通信。E-mail: huliaolin@163.com。

力^[4-6],再结合寻峰算法,有效降低峰值误差,提高峰值检测精度。

本文对三次样条插值、质心算法、一般多项式拟合、高斯公式非线性拟合和高斯多项式拟合 5 种寻峰算法进行研究^[7-9],理论仿真分析了引起寻峰误差的三个因素,即加窗截断长度、波长分辨率以及信噪比,并进行实验验证。发现相同条件下高斯公式非线性拟合算法寻峰误差最小。

1 光纤光栅传感系统

光纤光栅传感系统框图如图 1 所示。宽带光源发出的光经隔离器和 3 dB 耦合器入射到光纤光栅传感器。当反射光与可调谐滤波器选通波长相同时,光电探测器探测到最大光强。光信号经过光电探测器变为与之相对应的电信号,通过寻找电信号峰值即可得到波长的漂移量,进而得到被测量的变化。但是探测的反射光中干涉噪声与电子学噪声会影响对峰值检测精度,为了有效提高波长检测精度,必须先对信号做去噪处理,再寻峰。

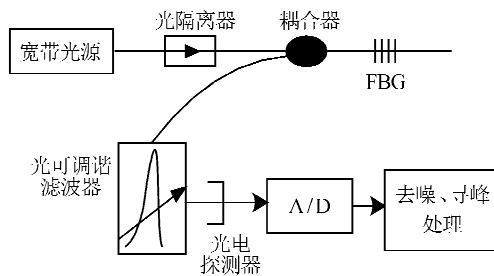


图 1 光纤光栅传感系统框图

Fig. 1 Diagram of the fiber Bragg grating sensing system

光栅反射谱轮廓可以近似成高斯型^[10],波长为 λ ,中心波长为 λ_B ,3 dB 谱宽为 $\Delta\lambda_B$,光栅峰值反射率为 R_0 ,则光栅反射光谱为:

$$R(\lambda) = R_0 \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right] \quad (1)$$

光源输出经隔离器后的光强记为 I_0 ,则到达光电探测器的光栅反射光强为:

$$I_s(\lambda) = \frac{1}{4} I_0 R(\lambda) \quad (2)$$

当系统存在有害干涉信号时,即光栅反射信号与其它残余反射光相互干涉,此时探测器探测到的光强可以表示为一个复合信号 $I_n(\lambda)$,即 $I_s(\lambda)$ 与 $I_{uw}(\lambda)$ 之和,其中 $I_{uw}(\lambda)$ 是有害干涉带来的附加项。假设系统中存在一个固有反射点,且反射点与光栅距离为 L ,从光栅和反射点反射的光在探测器处干涉,两光波的光程差为 $2nL$, Φ 为环境扰动引起的随机相位变化,则固有反射引入的噪声 $I_{uw}(\lambda)$ 为^[11]:

$$I_{uw}(\lambda) = \frac{1}{4} I_0 (1 - R(\lambda))^2 \alpha^2 + \frac{1}{2} I_0 \sqrt{R(\lambda) \alpha^2} (1 - R(\lambda)) \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda} + \Phi\right) \quad (3)$$

式中 n 为光纤折射率; α^2 为反射点处光强反射率,影响噪声幅值; L 影响噪声频率;改变 α^2 与 L 的值可模拟不同噪声。

将光纤尾端绕成小圈,引入微弯或者将光纤尾端插入折射率匹配液都可以在一定程度上减小固有反射对波长检测精度的影响,但不能彻底消除。数字滤波与寻峰算法结合使用可以有效降低寻峰误差。

2 寻峰算法

2.1 一般多项式拟合

最小二乘法的原理为对采集的光栅反射谱数据采用一般多项式作拟合函数,用最小二乘法作为断定,得到拟合式:

$$I_n(\lambda) = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda + \dots + \alpha_m \lambda^m \quad (4)$$

该拟合多项式的一阶微分为:

$$\frac{dI_n(\lambda)}{d\lambda} = I'_n(\lambda) = \alpha_1 + 2\alpha_2 \lambda + \dots + m\alpha_m \lambda^{m-1} \quad (5)$$

对应的一阶微分方程式为:

$$I'_n(\lambda) = \alpha_1 + 2\alpha_2 \lambda + \dots + m\alpha_m \lambda^{m-1} = 0 \quad (6)$$

方程的解即对应拟合函数的峰值位置。

2.2 三次样条插值

对采集的光栅反射谱进行三次样条插值,即在给出插值点函数值的情况下构造一个具有二阶连续导数的插值函数。采样区间 $[\lambda_a, \lambda_b]$ 上有 N 个采样点 $(\lambda_i, I_n(\lambda_i))$,其中 $i=1, 2, \dots, N$, N 为正整数。构造函数 $I_a(\lambda)$ 在区间 $[\lambda_a, \lambda_b]$ 上具有连续二阶导数,且在自变量的每个小区间 $[\lambda_i, \lambda_{i+1}]$ 上是不超过三次的多项式, λ_i 处 $I_a(\lambda_i) = I_n(\lambda_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$),则 $I_a(\lambda)$ 为三次样条插值函数。对 $I_a(\lambda)$ 求微分,微分值为 0 的点为峰值点。

2.3 高斯多项式拟合

高斯多项式拟合算法先对光栅反射谱进行高斯多项式变换,然后采用一般多项式拟合算法得到峰值位置。光纤光栅的反射光谱可以用高斯函数近似表示。

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right] \quad (7)$$

对上式进行对数变换得:

$$\ln I(\lambda) = -4\ln 2 \frac{1}{\Delta\lambda_B^2} \lambda^2 + 8\ln 2 \frac{\lambda_B}{\Delta\lambda_B^2} \lambda - \left(4\ln 2 \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda_B^2} - \ln I_0\right) \quad (8)$$

令：

$$\begin{aligned} y &= \ln I(\lambda) \\ a &= -4\ln 2 \frac{1}{\Delta\lambda_B^2} \\ b &= 8\ln 2 \frac{\lambda_B}{\Delta\lambda_B^2} \\ c &= -\left(4\ln 2 \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda_B^2} - \ln I_0\right) \end{aligned}$$

式(8)变为关于 λ 的二次多项式,对其进行二次多项式拟合,按最小二乘法确定其系数 a 、 b 、 c ,反射谱中心波长为 $-b/(2a)$ 。

2.4 高斯公式非线性拟合

高斯公式非线性拟合法是对光纤光栅反射谱采样后,得到 N 个采样点 $(\lambda_i, I_n(\lambda_i))$,对其直接进行高斯函数拟合处理,不经过多项式变换。设拟合的高斯公式为(7)式。拟合时根据非线性最小二乘法,求出下式的最小值。

$$E = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I(\lambda_i) - I_n(\lambda_i)|\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中, E 为测量数据与拟合值的均方根误差。

式(9)对 I_0 、 λ_B 、 $\Delta\lambda_B$ 求偏导数,并令其偏导数为零,化简可得正规方程组,利用莱文伯-马克特(L-M; Levenberg-Marquardt)算法求解,从而获得高斯公式非线性拟合的各个系数,最终得到峰值位置。由于高斯公式非线性拟合法的表达式与FBG反射谱类似,且拟合时使其偏差平方和最小,所以能比较准确地寻峰。

2.5 质心算法

将反射光谱看成是一个由质点组成的物体,光强由其纵坐标表示,波长由横坐标表示,那么将这些点的光强乘以波长后求和,除以它们的光强之和,就可以求出该波形对应的质心,这一质心值就是这一段波形的峰值点的位置。其质心 p 可以通过式(10)得到。

$$p = \frac{\sum \lambda_i I_n(\lambda_i)}{\sum I_n(\lambda_i)} \quad (10)$$

3 寻峰算法仿真

下面仿真分析引起寻峰误差的三个因素(加窗截断长度、信噪比和波长分辨率)对不同寻峰算法误差的影响^[12-13]。由式(2)与式(3)仿真得到光纤光栅反射谱,其参数取值:中心波长为1547 nm,光谱扫

描范围为1546~1548 nm,其3 dB带宽为0.3 nm。生成含噪声光栅反射谱信号经51阶Kaiser窗函数低通滤波器滤波后作为寻峰光栅反射谱信号。

一般多项式拟合需要选择合适的阶次。均方根误差(RMSE)和确定系数R-square通常被用来评价拟合效果,RMSE越接近0、R-square越接近1,拟合效果越好。图2为不同拟合阶次时RMSE与R-square的值,可以得出在16次时RMSE较小,且R-square接近1。后面分析中一般多项式拟合都选择16次。

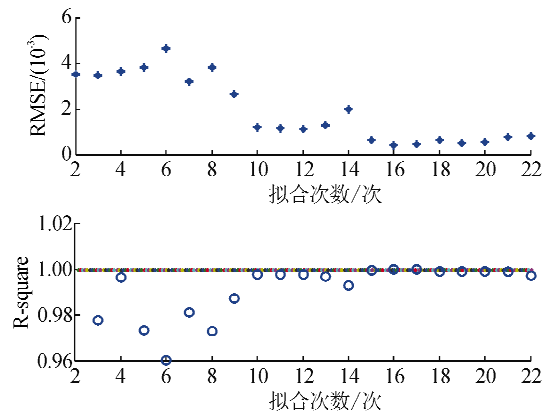


图2 不同阶次的一般多项式拟合效果

Fig. 2 Different order polynomial fitting effect

采集整个光栅反射谱数据量较大,干扰大,处理速度慢,并且获取峰值波长只需峰值波长附近的反射谱数据即可,因此需要给光栅反射谱加窗截断,不同截断长度时的寻峰算法误差如图3所示,其波长分辨率都为10 pm。

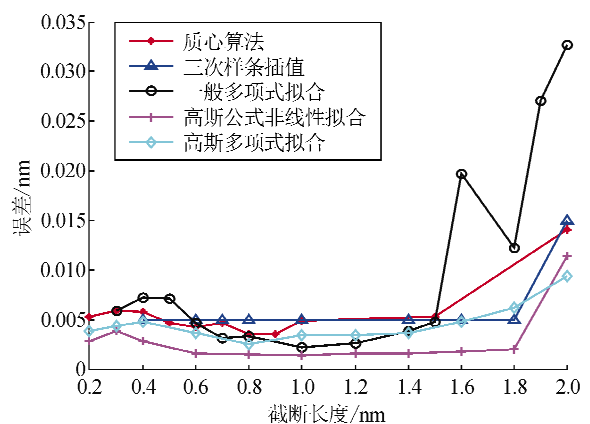


图3 不同截断长度的寻峰误差

Fig. 3 Peak searching error of different truncating length

当信噪比分别是25.2、28.1、32.1、39.1 dB时,寻峰误差如图4所示。从图4可看出,信噪比较大时,寻峰误差小。但是信噪比对不同算法的影响程度不同,信噪比的变化对高斯公式非线性拟合、一般多项式拟合和高斯多项式拟合影响较大,对三次

样条插值和质心算法相对较小。对于提高信噪比,可以选择反射率较大的光纤光栅传感器,减小光电检测电路的噪声,从而降低寻峰误差。

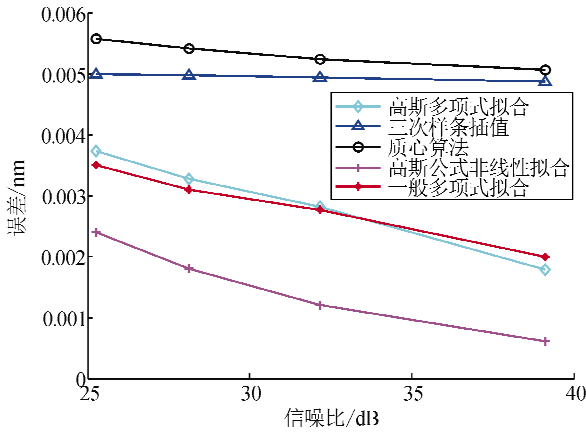


图 4 不同信噪比的寻峰误差
Fig. 4 Peak searching error of different SNR

表 1 是波长分辨率为 10 pm、1 pm、0.1 pm 时各寻峰算法的误差。

表 1 不同波长分辨率的寻峰误差
Tab. 1 Peak searching error of different wavelength resolution

算 法	不同波长分辨率的寻峰误差		
	10 pm	1 pm	0.1 pm
一般多项式拟合	2.21	0.91	0.68
三次样条插值	4.85	1.74	0.63
高斯多项式拟合	3.48	0.43	0.48
高斯公式非线性拟合	1.47	0.24	0.01
质心算法	5.09	2.62	1.01

由表 1 可以看出两点,第一,寻峰算法相同时,波长分辨率越高,寻峰误差越小;第二,在同一波长分辨率的情况下,高斯公式非线性拟合误差算法最小,质心算法误差最大。高斯公式非线性拟合算法的表达式与光栅反射谱信号类似,因此能够比较准确地寻峰。拟合原理是使其均方误差最小,拟合曲线不一定过观测数据点,因此抗噪性能最好。质心算法是以观测到的数据来计算,噪声导致反射光谱波动较大时,峰值波长误差相对应的也较大,抗噪性能最差。这种方法只有在有害干涉噪声信号及电子噪声比较小的情况下,寻峰误差才会比较低。

三次样条插值是分段插值,尽管可以使整个曲线平滑性较好,但整体逼近效果不是很好,因此寻峰误差相对也较大。

4 仿真与实验结果比较

按照图 1 搭建实验系统,先对采集到的光栅反

射信号进行 51 阶 Kaiser 窗数字低通滤波,再将采集到的数据输入到 PC 机做寻峰处理,由于实验系统所采用的可调谐滤波器只能达到 0.01nm 的波长分辨率,波长分辨率不能无限制提高。用真实光谱数据寻峰结果如表 2 所示。

表 2 波长分辨率为 10 pm 的寻峰误差
Tab. 2 Peak searching error with that the wavelength resolution is 10 pm

寻峰算法	误差/pm
一般多项式拟合	4.63
三次样条插值	5.87
高斯多项式拟合	3.49
高斯公式非线性拟合	1.00
质心算法	14.50

由表 2 可以看出,还是高斯公式非线性拟合误差最小,质心算法误差最大。与仿真结果一致。

对比表 1 与表 2 可以看出,实验结果的寻峰误差比仿真寻峰误差大,其原因如下:其一,仿真中采用光栅反射谱为标准高斯函数,与实际光栅反射谱有一定差异;其二,仿真中噪声为标准高斯噪声,而且实际环境噪声为多种噪声混合叠加。这些实验环境与仿真环境的不同,使得信号的信噪比发生变化,造成了误差大小的差异。但仿真和实验结果均得出高斯公式非线性拟合法在 5 种寻峰算法中误差最小这一结论。

5 结 论

本文介绍并分析了光纤光栅传感信号的 5 种寻峰算法,对经过数字低通滤波后的光纤光栅传感信号进行寻峰算法仿真与实验分析。通过仿真得到,加窗截断长度对寻峰算法的影响较大,截断长度太长或太短都会造成寻峰误差骤增,每种寻峰算法对应的加窗截断长度稍有不同,略大于 3 dB 带宽的 2 倍为最佳。在同一加窗截断长度下,信噪比越高,寻峰误差越小,信噪比对不同算法的影响程度不同。波长分辨率对寻峰算法影响也很大,波长分辨率越高,寻峰误差越小。通过对比发现,高斯非线性拟合法在 5 种算法中寻峰误差最小,质心算法寻峰误差最大。验证实验的结论与仿真结果一致。

参考文献:

[1] 王亚萍,胡辽林,张卫超. 分布式光纤光栅传感系统中微弱信号检测研究[J]. 西安理工大学报, 2013, 29(4):88-94.
Wang Yaping, Hu Liaolin, Zhang Weichao. Research

- on weak signal detecting in distributed FBG sensing system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(4):88-94.
- [2] 胡辽林,张卫超,华灯鑫,等.基于LabVIEW的光纤光栅传感的动态解调[J].计算机应用,2013,33(5):1473-1475.
Hu Liaolin, Zhang Weichao, Hua Dengxin, et al. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating sensing based on LabVIEW[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(5):1473-1475.
- [3] 应祥岳,徐铁锋.高斯拟合提高光纤布拉格光栅波长检测精度[J].激光技术,2009,33(3):323-325.
Ying Xiangyue, Xu Tiefeng. Improvement of measurement precision of fiber Bragg grating wavelength by means of Gaussian fitting[J]. Laser Technology, 2009, 33(3):323-325.
- [4] 余有龙,王雪微,王浩.不同采样方式下光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法的分析[J].光子学报,2012,41(11):1274-1278.
Yu Youlong, Wang Xuewei, Wang Hao. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by different sampling methods[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11):1274-1278.
- [5] 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.
Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min, et al. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6):893-897.
- [6] 蔡能宏,闫连山,陈娟子,等.基于可调谐F-P滤波器的光纤光栅传感解调系统寻峰算法对比分析[J].仪表技术与传感器,2013,4:100-106.
Cai Nenghong, Yan Lianshan, Chen Juanzi, et al. Peak-detection algorithm in tunable F-P Filter based demodulation system for FBG sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, 4:100-106.
- [7] Thomas Bodendorfer, Mathias S Muller, Florian Hirth. Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber Bragg grating interrogation systems[C]//Information Engineering and Computer Science. 2009: 122-126.
- [8] Li Qiong, Liao Haiyang, Liu Xiaozhou. Novel peak-search algorithms of raman spectrum[C]// The English International Conference on Electronic Measurement and Instrument, 2007:392-395.
- [9] Li Yongqian, Xie Yang, Yao Gaozhcn. Comparison of peak searching algorithms for wavelength demodulation in fiber Bragg grating sensors[C]// Information Engineering and Computer Science, 2010: 1-4.
- [10] 张天地,贺锋涛,周强,等.光纤光栅解调系统寻峰算法研究[J].激光技术,2013,37(1):36-39.
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.
- [11] 勒伟,阮双琛,等.光纤传感技术新进展[M].北京:科学出版社,2005.
- [12] John H Mathews, Kurtis D Fink. 数值方法(MATLAB版)[M].周璐,译.北京:电子工业出版社,2005.
- [13] 张德峰. MATLAB实用数值分析[M].北京:清华大学出版社,2012.

(责任编辑 王卫勋)