

文章编号: 0258-7025(2008)06-0893-05

# 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法

朱浩瀚<sup>1</sup> 秦海琨<sup>2</sup> 张 敏<sup>1</sup> 赖淑蓉<sup>1</sup> 廖延彪<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学电子工程系光纤传感研究室, 北京 100084  
<sup>2</sup> 中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

**摘要** 分析比较了光纤布拉格光栅(FBG)传感解调系统的 6 种寻峰算法:蒙特卡罗(Monte Carlo)算法、直接比较法、二次插值数值微分法、一般多项式拟合法、多项式-高斯公式拟合法和高斯公式非线性曲线拟合法。通过分析算法理论误差,结合算法仿真和实验研究,给出了算法误差及相关影响因素。研究发现输入信号的信噪比与寻峰算法的算法误差呈线性关系,相同条件下,高斯公式非线性曲线拟合法获得的精度最高。在光纤布拉格光栅传感实验系统中,对于信噪比为 40 dB 的输入信号,算法的寻峰精度可达到 0.44 pm。结果表明,算法输入信噪比是影响寻峰算法中算法误差的决定因素,寻峰算法中的最佳算法为高斯公式非线性曲线拟合法。

**关键词** 光纤光学;光纤布拉格光栅传感;算法误差;寻峰算法;信噪比;解调;数据处理  
**中图分类号** TP 212 **文献标识码** A

## Peak-Detection Algorithm in the Demodulation for the Fiber Bragg Grating Sensor System

Zhu Haohan<sup>1</sup> Qin Haikun<sup>2</sup> Zhang Min<sup>1</sup> Lai Shurong<sup>1</sup> Liao Yanbiao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Optical Fiber Sensors Laboratory, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, The Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** This paper is focused on the peak-detection algorithms in the demodulation for the fiber Bragg grating (FBG) sensor system. 6 peak-detection algorithms have been analyzed and compared, such as the Monte-Carlo algorithm, the direct peak-located algorithm and the quadratic polynomial numerical derivative algorithm, the polynomial fitting, the polynomial-Gaussian fitting and the Gaussian nonlinear curve fitting. The theoretical and practical errors and the relative effect factors of errors were introduced, analyzed and evaluated by the combination of the simulations and the experiments. It is demonstrated that the relationship between the signal noise ratio (SNR) at the input of the algorithms and the error is linear. When the SNR is constant, the error in using Gaussian nonlinear curve fitting is the lowest. The error can be only 0.44 pm when the SNR is 40 dB in the FBG sensor experiment. Consequently SNR is the major factor which dominates the errors of the peak-detection algorithms in the demodulation and the Gaussian nonlinear curve fitting is considered as the best peak-detection algorithm.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg gratings sensors; algorithm error; peak-detection algorithm; signal noise ratio; demodulation; data processing

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有灵敏度高、动态范围宽、不受电磁干扰、可靠性高、成本低、体积小、可埋入智能结构等优点,可以应用于航空航天、

舰船工业、土木工程、石化工业、电力工业、核工业、医学工程等各种领域。在实际应用中,光纤布拉格光栅传感器的检测精度除了传感元件本身之外,其主要受限于光纤布拉格光栅波长解调系统的检测误

收稿日期:2007-07-20;收到修改稿日期:2007-11-30

基金项目:国家自然科学基金(60629401)资助项目。

作者简介:朱浩瀚(1984—),男,北京人,硕士研究生,主要从事光纤传感和算法方面的研究。E-mail:hh.zhu@siat.ac.cn

导师简介:张 敏(1971—),男,浙江人,副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感器包括光纤光栅传感器、光纤气体有源传感器、光纤温度传感器、光纤水听器及其系统集成技术的研究。E-mail:minzhang@mail.tsinghua.edu.cn

差和检测分辨率。光纤布拉格光栅解调系统的数据处理模块中,高精度的寻峰算法是保证系统检测精度的关键之一。本文比较了6种寻峰算法,分析了影响光纤布拉格光栅解调寻峰算法误差的原因,提出了进一步降低算法误差的途径,研究结果可以在一定程度上降低传感系统的误差,有效地提高传感系统的分辨率及精度。

## 2 6种寻峰算法的基本原理

### 2.1 蒙特卡罗算法

蒙特卡罗(Monte Carlo)算法<sup>[1~3]</sup>,也称为统计实验方法,应用在寻峰算法中又称为质心探测法。原理为利用蒙特卡罗算法,把数据采集卡(DAQ)采集的波形曲线数据进行分峰截幅后,作为质量非均匀的曲线段处理。波形数据中每点的横坐标值相当于质点系中各质点的位矢,纵坐标值相当于质点系中各质点的质量大小,质点系的质心横坐标可由质心定义式的蒙特卡罗算法求出。在波形轴对称或陡峭时,质心位置与波形峰值位置一致。

### 2.2 直接比较法

直接比较法<sup>[4,5]</sup>即线形插值微分法。原理为对数据采集卡采集的波形曲线数据进行分峰截幅后,应用一阶数值微分,微分值0点的位置即为原波形峰值位置。直接比较法应用前差公式或后差公式进行线形插值微分。两种公式的效果相同。

### 2.3 二次插值数值微分法

二次插值数值微分法<sup>[4,5]</sup>为非线性插值数值微分法,其峰值位置判定原理和直接比较法一致。二次插值数值微分法应用中点公式,即三点公式进行非线性插值数值微分。

### 2.4 一般多项式拟合法

一般多项式拟合法<sup>[4~6]</sup>原理为对数据采集卡采集的波形曲线数据进行分峰截幅后,采用一般多项式作拟合函数,最小二乘法作为判定,得到拟合式

$$p_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n, \quad (1)$$

拟合多项式的一阶微分解析式为

$$p'_n(x) = a_1 + 2a_2x_1 + \dots + na_nx^{n-1}, \quad (2)$$

对应的一阶微分方程为

$$p'_n(x) = a_1 + 2a_2x_1 + \dots + na_nx^{n-1} = 0, \quad (3)$$

方程的解即对应拟合函数的峰值位置。

### 2.5 多项式-高斯公式拟合法

多项式-高斯公式拟合法<sup>[2,7~9]</sup>原理为对数据采集卡采集的波形曲线数据进行高斯函数-多项式变换,采用一般多项式拟合法的原理得到峰值位置。

高斯函数为

$$y = Ae^{-\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right)^2} + y_0, \quad (4)$$

对高斯函数进行对数变换,则有

$$\ln(y - y_0) = -\frac{1}{\sigma^2}x^2 + \frac{2x_0}{\sigma^2}x - \left(\frac{x_0^2}{\sigma^2} - \ln A\right), \quad (5)$$

通过一般多项式拟合法中的二次多项式拟合,可得到高斯函数变换后的系数

$$p_2(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (6)$$

其中 $a_2 = -1/\sigma^2$ ,  $a_1 = 2x_0/\sigma^2$ 。把数据采集卡采集的波形数据分峰截幅后,取 $Y = \ln(y - y_0)$ ,用二次多项式拟合得到峰值位置。

### 2.6 高斯公式非线性曲线拟合法

高斯公式拟合法<sup>[4,6,10]</sup>原理为把数据采集卡采集的波形曲线数据直接作为高斯函数进行拟合处理,不经过多项式变换。运用莱文伯-马克特(Levenberg-Marquardt(L-M))算法和最小二乘法判定,拟合得出高斯函数((4)式)的一组参数,满足输入数据点 $(x, y)$ 。

L-M算法提供了一个求解函数最小值的数值方法,是在高斯-牛顿(Gauss-Newton(G-N))算法和非线性梯度下降算法之间插值,L-M算法相比较G-N算法,更能抵制噪声的影响,即使在初始值远离最终最小值的时候也可以精确得到解。

在最小二乘法中,设给定实验数据 $x$ 和 $f(x)$ ,以及拟合曲线 $p(x)$ ,要求拟合最佳,则要求满足最小二乘准则

$$\sum_{i=1}^m [p_n(x_i) - f(x_i)]^2 = \min. \quad (7)$$

利用L-M算法可以得到关于函数的 $S(p) =$

$\sum_{i=1}^m [p_n(x_i | p) - f(x_i)]^2$ 的最小值的解 $p$ ,从而获得高斯公式非线性曲线拟合的各个系数,最终得到峰值位置。

## 3 光纤布拉格光栅传感原理及实验系统

实验中采用的光纤布拉格光栅传感解调系统如图1所示,分为光路部分、电路部分和计算机部分。从中心波长为1550 nm的放大自发辐射(ASE)光源发出的光经过可调谐光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)滤波器后,被光纤耦合器分束,其中一部分光入射到采用高斯切趾函数掩模板写入的光纤布拉格光栅传感器上,反射回来的窄带光再次经过光纤耦

合器后被高灵敏度的光电转换 PIN 管接收。数据采集卡(DAQ)上的数模转换通道输出三角波信号驱动法布里-珀罗滤波器,实现对光纤布拉格光栅波长的扫描;经 PIN 管转换的电信号被放大后由数据采集卡采集进入到计算机,然后由算法实现对光纤布拉格光栅中心波长的检测。

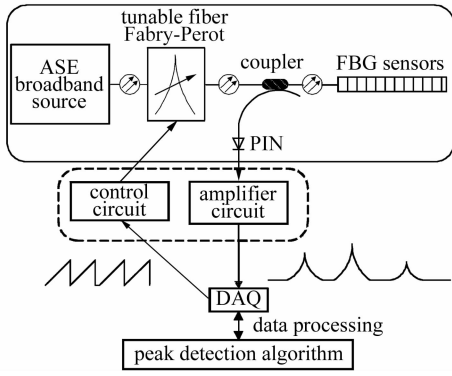


图 1 实验光纤布拉格光栅传感系统

Fig. 1 FBG sensor system in experiment

为了准确评价寻峰算法的性能,即其计算过程中产生的误差大小,也为了准确分析导致计算过程中产生误差的主要因素,需要先排除对算法计算过程的误差产生直接影响的因素。通过参数的选取和设定,可以使得仪器的性能不成为影响算法精度的来源。系统中法布里-珀罗滤波器的波长扫描范围为 1545~1555 nm,采用高精度的 16 bit 的数据采集卡控制法布里-珀罗滤波器的扫描范围和步长,对应 0~10 V 的 DA 输出和 16 bit 的输出精度,波长扫描的精度为 0.07 pm,实验结果表明该值数量级低于所有算法误差的数量级,即可以在评估算法误差时其精度不会对计算结果产生影响。

### 4 6 种寻峰算法仿真和实验比较

在仿真研究中,首先选取高斯切趾函数模拟光纤布拉格光栅的反射信号,输入到算法程序中,选取高斯噪声为噪声类型,并使噪声大小占信号源的 0.01,由此建立仿真的标准环境。仿真结果如图 2 中虚线所示。仿真结果表明,使用高斯公式非线性曲线拟合法的寻峰算法的误差最小,算法误差仅为 ±0.05 pm;蒙特卡罗算法在同环境下,误差为 ±0.65 pm;直接比较法误差为 ±12 pm;二次插值数值微分法误差为 ±12 pm;一般多项式拟合法误差为 ±0.30 pm;多项式-高斯公式拟合法误差为 ±0.08 pm。

利用图 1 实验系统进行实际光纤布拉格光栅的

波长检测,实验环境为:控制系统噪声幅度大小占信号幅度大小的 0.01,噪声较均匀,信号源稳定。实验结果如图 2 中实线所示。可以得到高斯公式非线性曲线拟合法的寻峰算法的误差最小,算法误差为 0.44 pm;蒙特卡罗算法在同样实验条件下,算法误差为 0.70 pm;直接比较法误差为 1.50 pm;二次插值数值微分法误差为 0.97 pm;一般多项式拟合法误差为 0.70 pm;多项式-高斯公式拟合法误差为 0.90 pm。

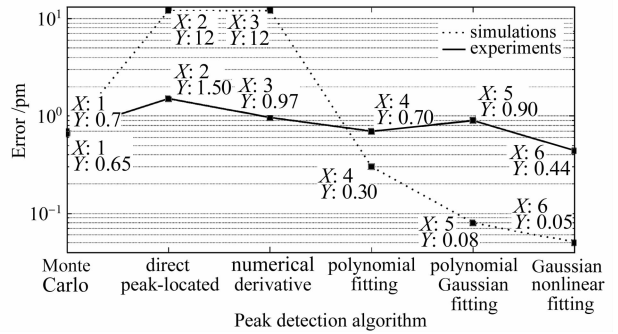


图 2 不同寻峰算法在仿真和实验中的误差结果和比较  
Fig. 2 Results and comparisons of the error of the peak-detection algorithms in simulations and experiments

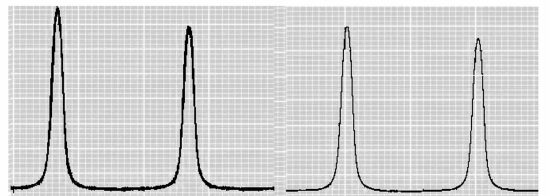


图 3 数据采集卡采集的波形曲线(左)和拟合曲线(右)  
Fig. 3 Waveform from DAQ (left) and fitting curve (right)

由仿真与实验可以得到一致的结果,即寻峰算法中的最佳算法为高斯公式非线性曲线拟合法。图 3 左边为实验中数据采集卡采集的波形曲线数据的图形,右边为高斯公式非线性曲线拟合之后,根据拟合系数重绘的图形。拟合之后曲线变细,表明:在动态采集过程的记录中,原始信号的峰值位置会产生较大的偏离误差,在图中体现为曲线线条变粗;拟合之后降低了峰值位置偏离误差,其中高斯公式非线性曲线拟合法的偏离最小。

实验中采用分峰截幅的方式拟合曲线,截幅的方法是依据采集数据的幅值进行手动截取,消除低幅度的不规则波形对拟合的影响。

比较仿真结果和实验结果,实验实际检测结果的精度达不到算法仿真的精度,其原因在于仿真中信号源为标准高斯切趾函数,噪声为模拟标准高斯

噪声;而实验系统中信号源通过滤波降低了噪声,并且在传输过程中可能产生一定变化,这使得与标准高斯切趾函数有一定差别,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,造成了误差大小的差异。但实验和仿真结果仍可明显得到一致的结论,即高斯公式非线性曲线拟合法的寻峰算法在6种算法中误差最小。

## 5 影响寻峰算法误差的原因分析

影响寻峰算法中误差的主要因素包括噪声类型、光纤布拉格光栅谱型和噪声大小。

### 5.1 噪声类型

不同的噪声类型:例如高斯噪声、白噪声或50 Hz随机相位工频噪声,对不同的寻峰算法误差的影响大小不尽相同。对于高斯公式非线性曲线拟合法,高斯噪声和白噪声的影响比50 Hz随机相位工频噪声更大。而在一般多项式拟合中,白噪声的影响相比较其他二者更小。但不同噪声类型的影响大小在数量级上基本保持一致。高斯公式非线性曲线拟合法对各种噪声类型混合的综合抗干扰能力最强。相对于信号源和信噪比,噪声类型的影响最小。

### 5.2 光纤布拉格光栅谱型

数值微分法中的直接比较法和二次插值数值微分法对于不同的光纤布拉格光栅谱型敏感度较低。蒙特卡罗算法、一般多项式拟合法的二次多项式拟合、多项式-高斯公式拟合法和高斯公式非线性曲线拟合法这4种算法理论与光纤布拉格光栅谱型有关。采用非对称切趾函数作为谱型时,蒙特卡罗算法偏离值较大;波形严重偏离标准二次型的形状时,一般多项式拟合法的二次多项式拟合会出现较大误差;波形严重偏离高斯切趾函数时,多项式-高斯拟合法和高斯公式非线性曲线拟合法会出现较大误差,产生较大的理论偏差。光纤布拉格光栅谱型的影响对于寻峰算法的选取有一定的限制作用,但只有在采集的谱型和标准谱型差异较大时,其影响作用才较为明显。

仿真中可以发现,不同参数的高斯切趾函数,Blackman切趾函数, Cauchy切趾函数模拟光纤布拉格光栅谱型,在函数参数的选取使得波形接近的情况下,不同谱型的影响基本一致。光栅进行传感时谱型会产生变化,经过滤波消除噪声时谱型亦有变化。实验和仿真的结果对比可以看出,同样信噪比情况下,不同谱型会对算法产生一定影响,但在滤

波和传输过程中使得波形不产生严重的失真,则光纤布拉格光栅谱型的影响比信噪比的影响相对较小,也不影响算法本身的优劣比较。

### 5.3 噪声大小

输入电信号的信噪比对于寻峰算法中算法误差的影响最大。信噪比大小的改变对算法精度的影响超过相同信噪比时各种算法间精度的差异,且信噪比对所有算法的影响基本一致。

6种算法的误差随噪声幅度的增大而增大。仿真结果表明,在噪声幅度/信号幅度为0.001~0.080的范围内,算法误差与信噪比呈线性关系,

除数值微分法外,其余算法的误差不会随噪声大小的增大而无限增长,而是会根据拟合以及统计特性趋于一定的误差。根据图2实验结果所示,在实验室测定下,当噪声幅度大小占信号幅度大小0.01的情况下,除了直接比较法,其他算法的误差均可以达到小于1 pm的精度。

对于高斯公式非线性曲线拟合法,当噪声幅度大小占信号幅度大小0.001的时候,算法误差为 $\pm 0.005$  pm;噪声幅度大小占信号幅度大小0.01的时候,算法误差为 $\pm 0.045$  pm;噪声幅度大小占信号幅度大小0.1的时候,算法误差为 $\pm 0.5$  pm。算法误差的数量级跟噪声幅度大小占信号幅度大小的数量级相当,如图4所示。这种信噪比和寻峰算法之间的关系对于其他寻峰算法亦适用。

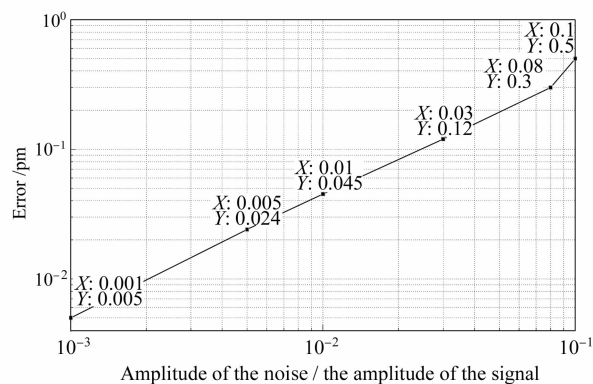


图4 高斯公式非线性曲线拟合法信噪比和算法误差关系曲线

Fig. 4 SNR-error curve in the Gaussian nonlinear curve fitting

减小噪声对寻峰算法的误差影响,可采取提高信噪比的方法:例如提高输入到PIN管进入解调电路的光功率;或减小放大电路的噪声影响,从而提高信噪比。

实验中先后采用了放大自发辐射宽带光源与超

辐射发光二极管光源进行了对比,放大自发辐射光源光功率可达6.4 dBm,而超辐射发光二极管光源功率仅为-6.5 dBm。应用相同的电路装置,使用放大自发辐射宽带光源,提高了光源的光功率,保持信号幅度在检测范围内,使得噪声幅度占信号幅度的0.01。而使用超辐射发光二极管光源,光功率较低,保持信号幅度在检测范围内,则噪声幅度占信号幅度的0.08。实验得到,应用高斯非线性拟合,使用放大自发辐射光源,寻峰算法的误差为0.44 pm;使用超辐射发光二极管光源的误差为1 pm。说明提高输入到PIN管的光功率,可以有效提高信噪比,从而提高精度。

通过对电路噪声的不同滤波进行对比实验,应用放大自发辐射宽带光源,保持信号幅度在检测范围内,通过调整滤波器引入不同大小的噪声,使得噪声幅度分别占信号幅度的0.01和0.02。实验得到,利用高斯非线性拟合,噪声幅度占信号幅度的0.01时,寻峰算法的误差为0.44 pm,占0.02时,误差为0.7 pm。说明减小放大电路的噪声影响,可提高信噪比,从而提高算法精度。

## 6 结 论

通过仿真和实验,分析了光纤布拉格光栅谱型、噪声类型和噪声大小对寻峰算法误差的影响,得到信噪比大小的影响是决定寻峰算法误差大小的最主要因素。

在信噪比、噪声类型、光纤布拉格光栅谱型一定时,寻峰算法中的最佳算法为高斯公式非线性曲线拟合法,实验室测定在信号幅度为6~7 V,控制噪声幅度大小占信号幅度大小0.01的情况下,高斯公式拟合法的寻峰算法误差为0.44 pm。采用光纤布拉格光栅进行准静态的温度传感应用,利用上述实

验系统和算法,得到温度传感器的温度测量误差为0.044 ℃。

## 参 考 文 献

- 1 Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing [M]. Boston: Artech House Publishers, 1999
- 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 Н. П. Бусленко, Ю. А. Шрейдер. Monte Carlo Method [M]. Wang Yuyun, Du Shumin translated. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1964  
Н. П. 步斯连科, Ю. А. 施廖盖尔. 统计实验法[M]. 王毓云, 杜淑敏译. 上海:上海科学技术出版社, 1964
- 4 Xu Shiliang. Numerical Analysis and Algorithm [M]. Beijing: China Machine Press, 2003  
徐士良. 数值分析与算法[M]. 北京:机械工业出版社, 2003
- 5 Jiang Qiyuan, Xing Wenxun, Xie Jinxing *et al.*. University Mathematics Experiments [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005  
姜启源,邢文训,谢金星等. 大学数学实验[M]. 北京:清华大学出版社, 2005
- 6 Wang Fuming, He Zhenghui, Suo Jin. Application of Numerical Calculation Method [M]. Beijing: Science Press, 1992  
王福明,贺正辉,索瑾. 应用数值计算方法[M]. 北京:科学出版社, 1992
- 7 Zou Xihua, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Reflection peak wavelengths for sampled fiber Bragg gratings without chirp [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):971~976  
邹喜华,潘炜,罗斌等. 非啁啾取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(6):971~976
- 8 Yage Zhan, Shaolin Xue, Qinyu Yang. Multiplexed reflective-matched optical fiber grating interrogation technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3):135~137
- 9 Wu Bo, Liu Yongzhi, Zhang Qianshu *et al.*. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):350~353  
武波,刘永智,张谦述等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔的高效窄线宽光纤激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(3):350~353
- 10 Jin Yiqing, Chen Yue. Numerical Methods [M]. Beijing: China Machine Press, 2000  
金一庆,陈越. 数值方法[M]. 北京:机械工业出版社, 2000