

doi: 10.3788/gzxb20124111.1274

# 不同采样方式下光纤布喇格光栅反射谱 寻峰算法的分析

余有龙, 王雪微, 王浩

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

**摘 要:**对光纤布喇格光栅反射谱的三种寻峰算法(三次样条插值数值微分法、高斯-多项式拟合法和高斯拟合法)进行了分析和比较;相同采样情况下,得出了高斯拟合法确定的峰值准确度最高的结论;采样点数为 250 的均匀采样中,三种算法寻峰结果对实际值的误差分别为: 3.4 pm、13.0 pm 和 2.6 pm. 引入了非均匀数据采集的寻峰思路,分别应用三种寻峰法对实际光栅的反射谱分别进行均匀采集和非均匀采集. 结果表明,对于相同寻峰方法在非均匀数据采集下获得的峰值更精确,采样点数为 250 时,高斯拟合法寻峰时非均匀采集对应的误差比均匀采集减少了 38.46%.

**关键词:**光纤光学;光纤布喇格光栅;非均匀采样;寻峰算法

**中图分类号:** TP212.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)11-1274-5

## 0 引言

波长编码的光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有体积小、灵敏度高、动态范围宽、不受电磁干扰、可靠性高和可埋入智能结构<sup>[1]</sup>等优点,可以应用于航空航天、舰船工业、土木工程、石化工业、核工业及医学工程等各种领域<sup>[2-3]</sup>. 光纤光栅传感器主要是通过观测布喇格波长漂移来判断待测量的变化,而布喇格波长对应反射谱的峰值位置,因此准确寻峰,对于提高观测准确度至关重要.

对于已有的技术,不论是光谱观测还是 F-P 滤波等方法,都是通过均匀采样获得待测的 FBG 光谱,进而对光谱进行寻峰得到布喇格波长. 在对 FBG 反射谱寻峰时,采样点密度大小和寻峰方法的选择会影响寻峰的准确性. 采样点密度越大,寻峰准确度越高,但其一方面会造成大量的数据冗余,增加了存储量;另一方面加大了系统的传输和处理压力,降低了系统的实时性.

对光纤光栅反射谱进行数据采集的实际操作时,往往夹有一定的噪音,导致寻峰位置与布喇格波长实际值间存有误差,因此常对采集到的谱插值拟合后再寻峰. 常见的方法包括:蒙特卡洛算法、二次插值微分算法、一般多项式拟合法、三次样条插值数值微分法<sup>[4-5]</sup>、高斯-多项式拟合法和高斯拟合

法<sup>[6-8]</sup>、基于径向基函数网络(Radial Basis Function Neural, RBFN)算法、遗传算法<sup>[9]</sup>及蚁群算法<sup>[10]</sup>. 其中,二次插值微分算法及一般多项式拟合法方法简单,易于实施,但是寻峰准确度有限. RBFN 算法及遗传算法等优化算法虽然可以提高寻峰准确度,但是需要较长的训练时间以确定算法中参量,不适合实时运算中应用,而蒙特卡洛算法的线性度较差<sup>[11]</sup>. 蚁群算法计算开销大,求解速度慢.

本文对常用的三次样条插值微分法、高斯多项式拟合法和高斯拟合法进行分析比较,提出非均匀采样方法,结合高斯拟合法寻峰,力图在保证寻峰准确度的前提下,减小数据量. 该工作有利于充分发挥光纤光栅传感系统实时、高准确度检测的特点.

## 1 拟合寻峰的原理

### 1.1 FBG 反射谱非均匀采样

任一曲线,通过求拐点和斜率的正负判断,可确定峰值位置. 通过采样,很容易获取该曲线,若其代表信号,波动则代表了信号分布的不均匀性.

采样点有限时,为保证精确寻峰,可对其进行分段采样. 每一段中均匀采样,不同段之间,采样点密度不同,这便是非均匀采集技术.

均匀周期光纤光栅的反射谱接近高斯分布<sup>[12]</sup>,具有明显的不均匀性,接近谱峰位置时谱线斜率绝

第一作者:余有龙(1965—),男,教授,博导,主要研究方向为光纤通信、光纤激光器以及光纤光栅传感器网络化. Email: youlongyu@163.com

通讯作者:王雪微(1987—),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感. Email: wangxuewei419@163.com

收稿日期:2012-03-31;修回日期:2012-07-30

对值较大,而峰值处谱线相对平坦,斜率较小但强度大.对其分段采样时,根据曲线斜率绝对值结合强度阈值可将反射谱分为密集采样区域和正常采样区域.当斜率绝对值较大,或者斜率绝对值小但采样点强度大于阈值时,进行密集采样,以增加峰值附近的采样点数;斜率绝对值较小,且强度低于阈值时,进行正常采样,以节省存储空间、减少计算量.

## 1.2 寻峰算法

对于光纤光栅反射谱,它具有确定的带宽和峰值位置,对其拟合寻峰的思路为:

### 1.2.1 三次样条插值数值微分法

首先,对采集的数据进行三次样条插值,即在只给出插值点上函数值的情况下构造一个具有二阶连续微商的插值函数.

若采样区间 $[\lambda_a, \lambda_b]$ 上有 $n$ 个采样点 $(\lambda_i, I_i)$ , $(i=1, 2, \dots, n)$ ,其中 $\lambda_1 = \lambda_a, \lambda_n = \lambda_b$ ,构造函数 $I(\lambda)$ 在区间 $[\lambda_a, \lambda_b]$ 上有关于 $\lambda$ 的连续二阶导数,且在自变量的每个小区间 $[\lambda_i, \lambda_{i+1}]$ 上是三次多项式, $\lambda_i$ 处 $I(\lambda_i) = I_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,则 $I(\lambda)$ 为三次样条插值函数.对 $I(\lambda)$ 求微分,微分值为0的点可能为极值点<sup>[5,13]</sup>.

### 1.2.2 高斯-多项式拟合法

高斯-多项式拟合法<sup>[14-15]</sup>是对采集的数据进行高斯多项式变换,采用一般多项式拟合法进行曲线拟合进而确定峰值位置.

光纤光栅的反射谱,可以用高斯函数近似表达为<sup>[8]</sup>

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

式中 $I_0$ 为反射谱强度 $I$ 的幅值, $\lambda_B$ 为光栅的布喇格波长, $\Delta \lambda_B$ 为反射谱的3 dB带宽.对式(1)两边分别取对数,得

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

$$8 \ln 2 \frac{\lambda_B}{\Delta \lambda_B^2} \lambda - 4 \ln 2 \frac{1}{\Delta \lambda_B^2} \lambda^2$$

令

$$P(\lambda) = \ln I(\lambda)$$

$$a_0 = - \left( 4 \ln 2 \frac{\lambda_B^2}{\Delta \lambda_B^2} - \ln I_0 \right)$$

$$a_1 = 8 \ln 2 \frac{\lambda_B}{\Delta \lambda_B^2}, a_2 = -4 \ln 2 \frac{1}{\Delta \lambda_B^2}$$

则式(1)变为

$$P(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 \quad (2)$$

式(2)为典型的二次多项式拟合形式.若反射谱有 $n$ 个采样点 $(\lambda_i, I_i)$ , $(i=1, 2, \dots, n)$ ,按最小二乘法,式(2)的偏差平方和 $S$ 为

$$S = \sum_{i=1}^n (I_i - P(\lambda_i))^2 \quad (3)$$

当 $S$ 取得最小值时,可确定系数 $a_0$ 、 $a_1$ 和 $a_2$ 的值,考虑

$$\lambda_B = -a_1 / 2a_2 \quad (4)$$

因而,也就确定了布喇格波长.

### 1.2.3 高斯拟合法

高斯拟合法<sup>[16]</sup>是对光纤光栅反射谱采样后,得到 $n$ 个采样点 $(\lambda_i, I_i)$ , $(i=1, 2, \dots, n)$ ,对其直接进行高斯函数曲线拟合处理,不经过多项式变换.设拟合的高斯曲线表达式为式(1),拟合时根据最小二乘法,式(1)的偏差平方和 $S$ 为

$$S = \sum_{i=1}^n [I_i - I(\lambda_i)]^2 \quad (5)$$

当 $S$ 取得最小值时,可确定最佳拟合曲线 $I(\lambda)$ ,进而得到布喇格波长 $\lambda_B$ .由于高斯拟合法的表达式与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 仿真结果

用光谱仪获得光纤光栅的反射谱如图1,设置分辨率为0.02 nm,采样点数为2 001,扫描带宽为2 nm,测得光纤光栅的布喇格波长为1 561.702 0 nm,强度峰值为83.54 pW,3 dB带宽为0.320 0 nm,将其看作光纤光栅布喇格波长的真实值.

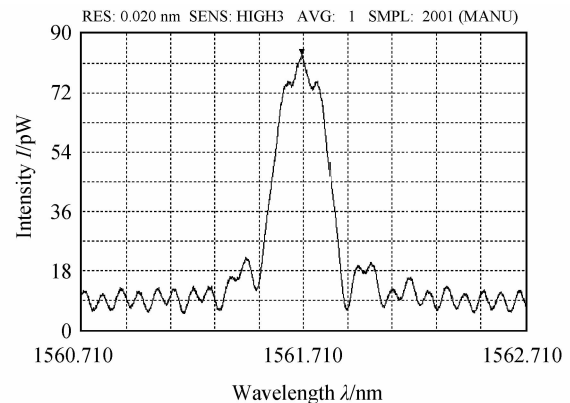


图1 光谱仪记录光纤光栅光谱图

Fig. 1 Fiber Bragg grating reflection spectrum recorded by optical spectrum analyzer

对反射谱分别用均匀及非均匀方式进行数据采集.非均匀采样方式下,为选取合适的阈值条件进行分段采样,根据光纤光栅的反射谱强度对波长分布不均匀的特点,设置多组阈值,进行寻峰比较,观测光谱分段情况及寻峰结果.考虑到不同光栅反射谱形状的差异,选择3根光栅在不同的斜率阈值条件下进行寻峰,获得的寻峰误差值示如图2.由图2可见误差值随斜率阈值的增加而变大,且当斜率阈值大于500 pW/nm时,寻峰误差的增加趋势明显,这

是由于斜率阈值增大,导致反射谱峰值位置的采样点数减少.而当斜率阈值在 500 pW/nm 以内,寻峰误差变化不大,不过当斜率阈值减小时,会将反射谱噪音部分斜率略大区域误判为峰值进行密集采样,影响对反射谱线分段的合理性.

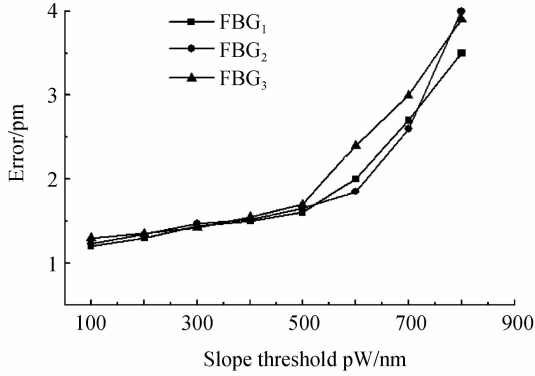
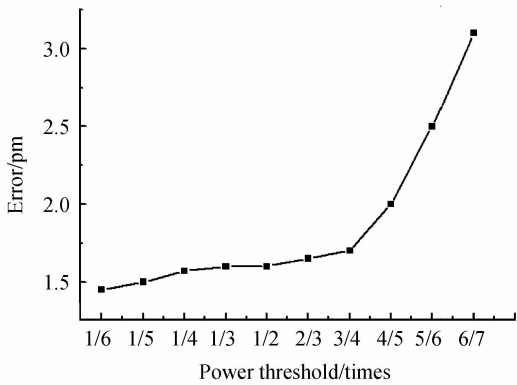
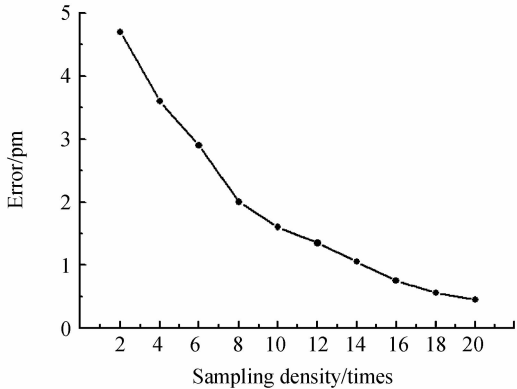


图 2 斜率阈值对寻峰误差的影响  
Fig. 2 The effect on the error of peak-detection by slope threshold

强度阈值对寻峰结果的影响示如图 3(a),改变功率阈值观测寻峰准确度变化.当强度阈值小于峰值强度的 1/4 时,寻峰准确度较小,不过,由于强度阈值设置较低,分段采样时,误将光栅反射谱能量较高的噪音部分认为是峰值区域也进行密集采样.而当阈值条件大于峰值强度的 4/5 时,寻峰误差明显



(a) The effect on the error of peak-detection by power threshold



(b) The effect on the error of peak-detection by sampling density

图 3 功率阈值和采样密度对寻峰误差的影响  
Fig. 3 The effect on the error of peak-detection by power threshold and peak-detection by sampling density

增大,这是由于分段采样时不能有效识别出反射谱峰值拐点区域所致.强度阈值在峰值强度的 1/4 至 4/5 之间,寻峰误差变化不大,可以有效对光谱进行分段.图 3(b)为密集采样时采样密度对寻峰结果的影响,可见增加采样点密度,通过增加峰值附近采样点数目能有效降低寻峰误差,从而提高了寻峰准确度.

### 2.1 寻峰方法比较

对图 1 反射谱分别用均匀及非均匀方式进行数据采集,每种采集方式下又分别用三次样条插值微分法、高斯-多项式拟合法、高斯拟合法和直接对曲线求拐点结合斜率正负方法进行寻峰.由于所得图 1 反射谱线为 2 nm 范围内取得采样点数为 2 001 点,波长采样间隔为 1 pm,即采样密度为 1 个/pm,因此在该谱线进行采样时,采样密度需小于理论谱线密度,即采样点数应小于 2 001.实验中设置采样点数由 30 增至 1 000,分别得到各种算法的峰值与光谱仪测得中心波长值的误差(见图 4).

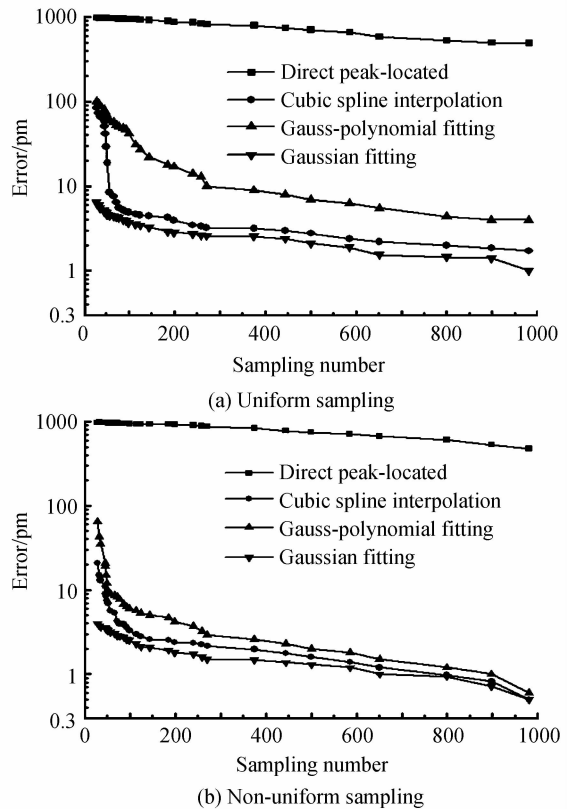


图 4 实验测得不同拟合方法的寻峰误差比较  
Fig. 4 Comparisons of the error of the peak-detection algorithms in experiments

从图 4 可以看出:对于均匀采样和非均匀采样,随采样点数增加,寻峰误差均会降低,且在相同采样点数时高斯拟合方法确定的峰值对应的误差最小,三次样条插值微分法次之,高斯-多项式拟合法所得误差相对较大,而未经过拟合算法直接测得的峰值与真实值相差最大.以采样点数为 250 的均匀采样

为例,直接寻峰、高斯多项式拟合法、三次样条插值微分法和高斯拟合法寻峰结果对实际值的误差分别为:891.0 pm、13.0 pm、3.4 pm 和 2.6 pm.

## 2.2 采样方式比较

对比图 4(a)和(b)中高斯拟合寻峰结果,可以看出相同采样点数时,非均匀采样方式的寻峰误差较小,且无论哪种采样方式,当采样点数减少时,寻峰准确度都有所降低,当采样点数小于 250 点时,寻峰误差明显增大.为了比较两种采样方式的寻峰准确度差别,实验中以采样点数 250 为例详细说明,在均匀采样方式下,图 1 光谱 2 nm 带宽内采样点密度为 0.125 个/pm,反射谱 3 dB 带宽内的采样点数为 40 个.

250 个采样点时,非均匀采样方式下,设置谱线斜率阈值为 500.00 pW/nm,谱线斜率绝对值大于 500.00 pW/nm 时,认为此时采样点接近反射谱峰值位置,开始密集采样.第 5 个密集采样点的强度接近峰值一半,设其为强度阈值.若谱线斜率绝对值小于 500.00 pW/nm,但采样点强度大于该阈值时,仍

进行密集采样.若采样点强度低于阈值,且斜率绝对值小于 500.00 pW/nm 时,则进行正常采样.密集采样区域的采样点密度是正常采样区域的 10 倍.

进行分均匀采样中,反射谱斜率绝对值为 500.00 pW/nm 时,对应波长为 1 561.531 0 nm 和 1 561.899 0 nm.且第 5 个密集采样点的强度为 38.00 pW,以该点为采样强度阈值,结合斜率,将图 1 所示的反射谱范围分成 [1 560.710, 1 561.531 0]nm、(1 561.531 0, 1 561.899 0] nm 和 (1 561.899 0, 1 562.710 0] nm 三个区间.得到三个区间中采样点密度分别为 0.05 个/pm、0.5 个/pm 和 0.05 个/pm,反射谱 3 dB 带宽内有 160 个采样点.使用高斯拟合法寻峰,得到结果见图 5,为了清楚看到不同采样方式寻峰的结果,将光谱反射率较大区域(图 5 左上角方框部分)进行放大观察,其中星形表示均匀采样时得到的采样点,圆点代表非均匀采样时所得采样点,可以看到,在非均匀采样时,不同区间的采样密度不同.

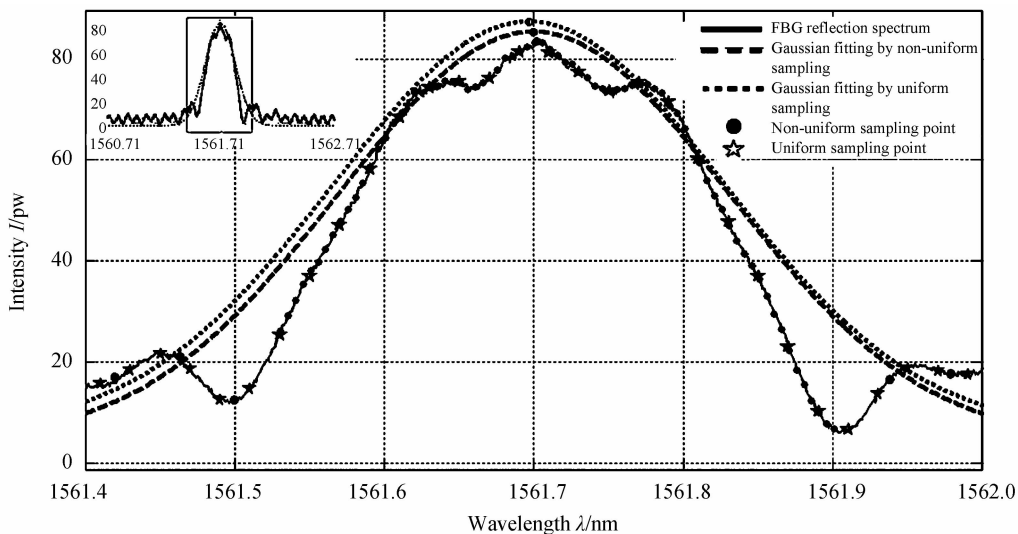


图 5 均匀采样方式及非均匀采样方式下高斯拟合寻峰结果

Fig. 5 Results of Gaussian fitting peak-detection by uniform sampling and non-uniform sampling

非均匀采样和均匀采样方式下高斯拟合法确定的峰值对应的误差分别为:1.6 pm 和 2.6 pm,前者较后者减小了 38.46%;而要使寻峰误差达到 1.6 pm,由图 4(a)可知均匀采样时需 650 个采样点.可见,相同采样点数时非均匀采样增加了光栅反射谱 3 dB 带宽内的采样密度,得到的寻峰结果更精确,对于同样的寻峰准确度非均匀采样需要的采样点数更少,节约了系统的存储量和计算量.

## 3 结论

针对实际光纤光栅反射谱强度对波长分布不均匀的特点,利用谱线斜率变化结合强度阈值,对

FBG 反射谱进行了分段非均匀采样,应用三次样条插值微分法、高斯-多项式拟合法、高斯拟合法对采样数据进行寻峰判断,得到了寻峰误差与拟合方法及采样方式的关系.通过仿真得到:1)在相同采样方式及采样点数的条件下,三种寻峰算法中高斯拟合法对于 FBG 寻峰的误差最小;2)同样的数据采集量时,采用非均匀采样方式所获得的寻峰准确度比均匀采样时更高.仿真中采样点数为 250 时,非均匀数据采集下高斯拟合寻峰误差比均匀数据采集下减少了 38.46%.该工作在保证准确度的前提下,提高了系统的采样效率,为光纤光栅在传感和通信领域的应用提供了技术支持.

## 参考文献

- [1] ZHANG W H, TONG Z R, MIAO Y P. Sensing and demodulation technique based on tilted fiber bragg grating[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, **6**(4): 284-287.
- [2] 余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2003: 3-11.
- [3] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1441-1463.
- [4] LIU Q, WANG H. Research on the peak-detection algorithm in the high-frequency demodulation for the fiber bragg grating [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, **32**(6): 59-61, 88.
- [5] ZHU H H, QIN H K, ZHANG M, *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] LEE H W, SONG M. FBG interrogation with a scanning Fabry-Perot filter and Gaussian line-fitting algorithm [A]. LEOS[C]. 2005: 963-964.
- [7] SONG H C, MIAO C Y, ZHANG C, *et al.* Application of wavelength demodulation algorithm on calculating body's temperature in smart textile based on fiber bragg grating[A]. *Image and Signal Processing*[C]. 2009: 1-5.
- [8] LI Y Q, XIE Y, YAO G Z. Comparison of peak searching algorithms for wavelength demodulation in fiber bragg grating sensors[A]. *Information Engineering and Computer Science (ICIECS)*, [C]. 2010: 1-4.
- [9] YANG Guang-xue, YIN Li-jing, KANG Shou-qiang. Reconstruction of FBG spectrum based on radial basis function network [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(10): 12-14.  
杨广学, 尹丽静, 康守强. 基于径向基函数网络的 FBG 传感光谱的重构[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(10): 12-14.
- [10] WU Fei, KUANG Min-min, ZHAO Jing, *et al.* Application of ant colony algorithm in analyzing of traverse uniform strain reflective spectrum of fiber bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **32**(6): 477-483.  
吴飞, 邝敏敏, 赵静, 等. 蚁群算法在光线布拉格光栅横向均匀受压反射谱分析中的应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 477-483.
- [11] ZHU Min, ZHANG M, HU Li-zhang, *et al.* Peak-search algorithm for center wavelength detection in fiber Bragg gratings[J]. *Study on Optical Communications*, 2011, **37**(5): 60-63.  
朱梅, 张森, 胡立章, 王梓蒨. 光线布拉格光栅中心波长检测中的寻峰算法[J]. *光通信研究*, 2011: 60-63.
- [12] CHAN C C, JIN W, DEMOKAN M S. Enhancement of measurement accuracy in fiber Bragg grating sensors by using digital signal processing [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(4): 3199-3307.
- [13] 金一庆, 陈越. 数值方法[M]. 北京: 机械工业出版社. 2000: 106-131.
- [14] CHEN Qing-shan, LÜ Nai-guang, YAN Bi-xi, *et al.* Analysis to the methods for calculating the center position of gaussian-distributed beam spot adopted in a laser alignment system[J]. *Computer Automated Measurement and Control*, 2004, **12**(5): 486-488.  
陈青山, 吕乃光, 燕必希, 等. 激光准直高斯光斑中心位置计算方法分析[J]. *计算机测量与控制*, 2004, **12**(5): 486-488.
- [15] ZOU Xi-hua, 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. 非啾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.
- [16] BODENDORFER T, MULLER M S, HIRTH F, *et al.* Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber bragg grating interrogation systems [C]. ISOT 2009, International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2009: 122-126.

## Analysis of Peak-detection Algorithms in Fiber Bragg Grating by Different Sampling Methods

YU You-long, WANG Xue-wei, WANG Hao

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Three peak-detection algorithms (cubic spline interpolation differential method, Gauss polynomial, Gaussian fitting algorithm) for fiber Bragg grating reflection spectrum were analyzed and compared. It is demonstrated that Gaussian fitting algorithm produces the lowest error under the same sampling conditions; when the uniform sampling number is 250, the errors of three peak-detection algorithms are respectively 3.4 pm, 13.0 pm and 2.6 pm. The idea of non-uniform data sampling method to search peak was proposed. Sample the actual FBG reflection spectrum with uniform and non-uniform sampling method, and search peak using the three peak-detection algorithms respectively. It can be concluded that the error of a certain algorithm by non-uniform sampling is lower than by uniform sampling method; when the sampling number is 250, FBG peak error of Gaussian fitting algorithm under non-uniform sampling method is reduced by 38.46% than uniform sampling method.

**Key words:** Fiber optics; fiber Bragg grating; Non-uniform sampling; Peak-detection algorithm