

基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术

王巧妮¹ 杨远洪^{1,2}

(¹ 北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)
(² 北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191)

摘要 分析了实际光纤布拉格光栅(FBG)反射谱的特性,建立了FBG反射峰超高斯模型。将图像处理技术用于FBG寻峰,提出了一种基于Steger图像算法的FBG寻峰技术,并给出了非对称光谱中心波长修正公式及峰值亚步长修正公式。Steger寻峰算法兼具滤波和寻峰功能,具有较强的抗噪能力,能克服步长限制,有效消除非对称光谱的干扰。通过理论仿真及实际寻峰研究,对比了该算法与不同寻峰算法在不同采样步长、噪声大小、光谱非对称性下的峰值检测精度。结果表明,该方法较质心法、高斯拟合法具有显著优势。

关键词 图像处理;Steger算法;光纤布拉格光栅;寻峰算法;非对称光谱

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0810004

A FBG Spectrum Peak Detection Technique Based on Steger Image Algorithm

Wang Qiaoni¹ Yang Yuanhong^{1,2}

(¹ Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of the Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)
(² National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract A super Gaussian model is established to describe the characteristics of real fiber Bragg grating (FBG) reflective spectrum. Utilizing image processing technique, a FBG peak detection technique based on Steger image algorithm is proposed, which provides a modified formula for the condition of asymmetric spectrum and a sub-step modified formula. Steger peak detection algorithm performs the function of both filter and peak detector to help eliminate the influence of noise, step and asymmetrical spectrum. Theoretical simulations and practical experiments are carried out to estimate the performance of this algorithm under different steps, signal noise ratio (SNR) and level of asymmetry. The results show that the proposed algorithm shows better adaptability and higher accuracy than the Centroid method and Gaussian curve fitting.

Key words image processing; Steger algorithm; fiber Bragg grating; peak detection algorithm; asymmetric spectrum

OCIS codes 060.3735; 070.2025; 070.4790

1 引言

光纤光栅传感器具有灵敏度高、不受电磁干扰、可靠性高、成本低、体积小等特点,被广泛应用于航空航天、石化电力工业、医学工程等各种领域。基于波长解调的均匀光纤布拉格光栅(FBG)传感器的解

调技术有滤波法、可调谐窄带光源检测法、干涉式检测法、电荷耦合器件(CCD)光谱仪或线阵 InGaAs 图像传感器检测法等^[1-3],检测精度主要受限于解调系统的探测误差和检测分辨率。寻峰算法是解调系统中的关键环节之一,合适的寻峰算法能提高系

收稿日期: 2014-03-17; **收到修改稿日期**: 2014-04-24

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 王巧妮(1991—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。

E-mail: sy1317123@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn

统的检测精度。

常用的寻峰算法有最值法、导数法、半峰检测法、质心法、拟合法等^[4]。拟合法的精度高,但对谱型要求严格;质心法要求谱型对称;质心法、导数法、半峰检测法则对噪声敏感。现有的FBG光谱寻峰算法多从算法的检测精度、抗噪特性等方面进行分析研究,对光谱非对称性的影响则研究较少。Wang等^[5]发现FBG反射谱为非标准高斯谱,波峰形状不规则;Zhang等^[6-7]中分析了不均匀的应力分布或横向载荷会使FBG反射谱发生形变;Cai等^[8]分析了系统中存在的光噪声及测量环境(温度、振动等)的变化会造成FBG反射光谱的跳动或变形,提出了一种基于状态机的自适应半峰检测寻峰算法,引入一个实验统计的补偿量 M 来消除光谱非对称性的影响。由此可见,FBG非对称光谱寻峰问题有待进一步研究,这对完善寻峰算法,提高检测精度具有重要意义。

图像处理算法在目标识别和位置提取中具有精度高,专用芯片实现并行快速处理等优点。在提取灰度值呈高斯分布的圆光斑或光条纹中心时,通常采用灰度重心法、拟合法、Steger算法等^[9-10],并根据目标的实际特征进行修正。这些算法的本质在于提取灰度曲线的峰值点位置,与提取FBG反射光谱的中心波长是类似的。因此,将图像处理思想与FBG反射光谱峰值提取相结合在理论上是可行的。

本文结合FBG的光谱图像特征以及图像处理

的思想,提出了一种基于Steger算法的FBG寻峰算法,分析了该算法的峰值检测精度、抗噪特性、非对称谱峰值检测能力,给出了非对称光谱寻峰的补偿公式及亚步长修正公式,完善了寻峰算法在不同情况的适用性。

2 原 理

2.1 FBG反射峰的图像特征

FBG反射光谱具有窄带、边模抑制比高、反射率高、光谱两侧十分“陡峭”、平滑、整体光谱近似高斯曲线等特点。图1(a)~(d)为目前FBG传感器产品中典型的反射谱型,是通过大量实测获得的,也是后文实际寻峰用的部分样品反射谱型。从图1中可以看出,反射光谱存在谱峰顶部较平、顶部局部波动、谱型展宽、侧偏等现象,与标准高斯曲线有较大区别。FBG的反射光谱是纤芯内折射率调制的合成结果,其容易受制作工艺^[11]、环境温度、应变等因素的影响。此外,实际应用中光路连接器、探测器等设备本身非线性及延迟等原因,会使反射光谱发生变形,表现为展宽、侧偏等。现有理论采用耦合模理论、传输矩阵法等描述FBG反射光谱,模型较为复杂,较难描述其侧偏等特征;相关光栅解调方案的寻峰算法大都将FBG谱作为标准高斯形处理,模型简单,但基于此设计的算法适应性和抗干扰能力有限。

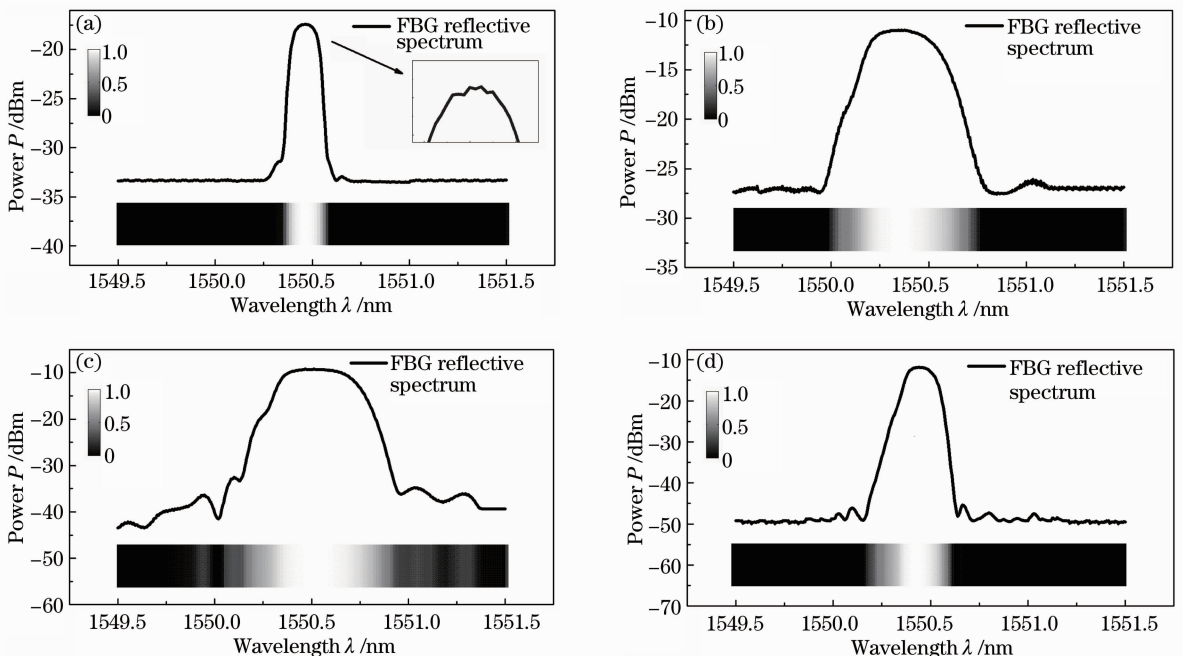


图1 典型FBG反射光谱(反射谱下方图谱为对应的强度图像)

Fig. 1 Typical fiber Bragg grating (FBG) spectrum (the profile below spectrum is the corresponding intensity image)

为了更精确地描述 FBG 谱平顶、侧偏的特征，采用了改进的超高斯函数作为 FBG 反射峰模型。

该模型组合了 2 段分段超高斯函数，并引入非对称系数 α 表示非对称光谱侧偏的情况，方程如下所示：

$$s_{-}(x) = \begin{cases} 0, & x \geq 0 \\ \exp(-2^m \ln 2 \cdot x^m), & x < 0 \end{cases}, \quad s_{+}(x) = \begin{cases} \exp(-2^m \ln 2 \cdot x^m), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$f(x) = A \cdot \left[s_{-} \left(\frac{x - \lambda_B}{\Delta \lambda_1} \right) + s_{+} \left(\frac{x - \lambda_B}{\alpha \cdot \Delta \lambda_1} \right) \right] + h_{\text{noise}}(x), \quad m = 2, 4, 6 \dots, \quad (2)$$

式中 s_{-} 和 s_{+} 分别代表超高斯模型的左、右半侧曲线， A 为反射功率， λ_B 为中心波长，带宽 $\Delta \lambda = (1 + \alpha) \cdot \Delta \lambda_1 / 2$ ， $h_{\text{noise}}(x)$ 为谱上的噪声波动，用信噪比 (SNR, R_{SN}) 来衡量噪声大小。当 $\alpha = 1$ 时为对称光谱， $\alpha > 1$ 时为右侧偏光谱， $\alpha < 1$ 时为左侧偏光谱；在 $\alpha = 1$ 的情况下，当 $m = 2$ 时为标准高斯函数， $m \neq 2$ 时为超高斯函数，文中取 $m = 4$ ，模型与实际光谱相似，且计算量小。图 2 为 $m = 4$ ， α 取不同值的归一化超高斯模型曲线，图中将 4 条曲线错位放置，以便区分其特征。

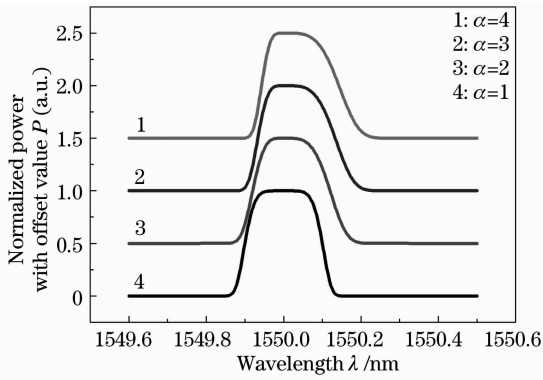


图 2 不同非对称量下的光谱模型曲线

Fig. 2 Modified super Gaussian model curves of different distortion α

在图像处理算法中，通常对图像进行滤波预处理，然后识别灰度值变化剧烈的像素点来提取目标的边界，根据边界信息以及目标物已知特征可以获取有用信息，使获取信息更具目的性和有效性。针对反射峰两侧较陡的图像特点，在寻峰过程中，可以利用图像处理算法识别光谱半腰位置，根据半腰位置与谱峰位置的相对关系获取谱峰精确位置及非对称修正量，以减小噪声干扰，提高寻峰精度。

2.2 基于 Steger 的 FBG 寻峰算法

将 Steger 图像中心定位算法^[12]引入 FBG 寻峰中，采用改进的超高斯 FBG 反射谱模型，提出了新的 FBG 寻峰算法。

将 FBG 的反射光谱 $f(x)$ 与高斯模板及其一阶、二阶微分形式进行卷积，如 (3) 式所示，图 3(a)~(c) 分别为卷积的结果图。

$$\begin{cases} r(x, \sigma) = g_{\sigma}(x) * f(x) \\ r'(x, \sigma) = g'_{\sigma}(x) * f(x), \\ r''(x, \sigma) = g''_{\sigma}(x) * f(x) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $g_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$ ， σ 为高斯函数的带宽，当 $\sigma = N_{3\text{dB}}/8$ 时，可以定位光谱的半腰位置， $N_{3\text{dB}}$ 为光谱带宽内采样点个数；通常取高斯模板的大小为 $8[\sigma] + 1$ ， $[\]$ 为取整符号。

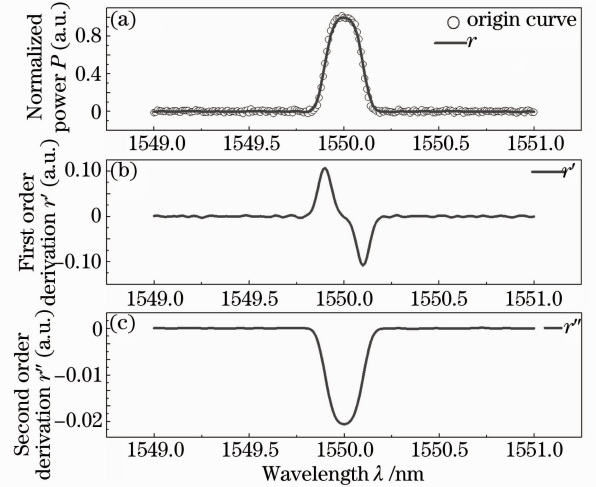


图 3 高斯模板及其一、二阶微分形式与原光谱信号卷积结果

Fig. 3 Convolution of derivations of Gaussian kernel and spectrum signal

如图 3(a) 所示，高斯模板与 FBG 反射光谱卷积具有预处理的滤波作用。图 3(b) 中，光谱峰值位置对应于 $r'(x, \sigma)$ 曲线峰点至谷点的零交叉点位置。对于离散数据而言，只能得到 $r'(x, \sigma)$ 上最接近于零的数 x_0 ，因此，对 r 的 x_0 邻域进行二阶泰勒展开得

$$r(x_0 + \delta x) = r(x_0) + r'(x_0)\delta x + \frac{1}{2}r''(x_0)\delta x^2, \quad (4)$$

根据峰值点处的导数为零，可得到峰值位置的亚步长修正量为

$$\delta x = -\frac{r'(x_0)}{r''(x_0)}, \quad \delta x \in [-0.5l_{\text{step}}, 0.5l_{\text{step}}], \quad (5)$$

则修正后的中心位置 l 可以表示为

$$l = x_0 + \delta x. \quad (6)$$

对于对称谱情况,可以直接采用峰谷均值法确定零交叉点,减小截断误差,亚步长修正可以有效克服采样步长的限制。

2.3 非对称谱型的影响与补偿

为了研究非对称光谱对峰值提取的影响程度以及修正量,将光谱简化为分段三值模型,如图4中虚线曲线所示,由(7)式表示。由于非对称光谱右侧偏占据较大的能量,因此简化右侧光谱能量为 a ,左侧光谱能量为 0 。此时,中线位置即 $r'=0$ 的解具有解析公式,如(8)式所示:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < -\omega \\ 1, & |x| < \omega \\ a, & x > \omega \end{cases} \quad (7)$$

$r'=0$ 的解定义为非对称修正量 E 为

$$E = -\frac{\sigma^2}{2\omega} \ln(1-a), \quad (8)$$

(8)式为理论公式,实际任意谱型难以计算。因此,定义 r' 的波峰波谷位置 e_1, e_r 之差为 2ω ,该位置对应的 r' 值之比为非对称量 $1-a$ 。则(8)式可简化为实际计算:

$$E = -\frac{\sigma^2}{e_r - e_1} \ln[r'(e_r)/r'(e_1)], \quad (9)$$

则修正后的光谱峰值位置为

$$l = x_0 + \delta x - E. \quad (10)$$

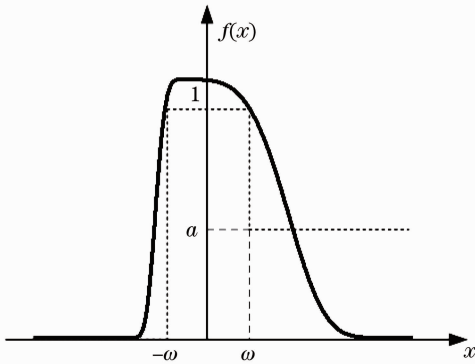


图4 非对称光谱及简化模型

Fig. 4 Asymmetric spectrum and simplified model

任意实际谱型经算法计算后可得到对应的 E ,其既为修正量也可作为谱型对称程度的判断依据,当 $|E| < 10^{-4}$ nm 时,可认为谱型对称无需修正。Steger 寻峰算法将滤波与寻峰结合在一起,利用 $r'(x, \sigma)$ 初步确定峰值点位置,又根据谱峰及谱型情况进一步引入修正量,是 Steger 寻峰算法的优势所在。

3 仿真及实验研究

3.1 仿真结果

3.1.1 算法仿真流程

Steger 寻峰算法流程如图5所示。根据数据采集步长及 FBG 带宽确定高斯模板带宽的值;分别将一、二阶微分形式的高斯模板与光谱数据进行卷积;检测 $r'(x, \sigma)$ 的峰点及谷点位置,并计算非对称修正量 E ,根据 E 的大小选择不同的方法确定零交叉点位置;计算亚步长修正量,判断修正量是否满足区间要求,得到最终修正后的峰值结果。

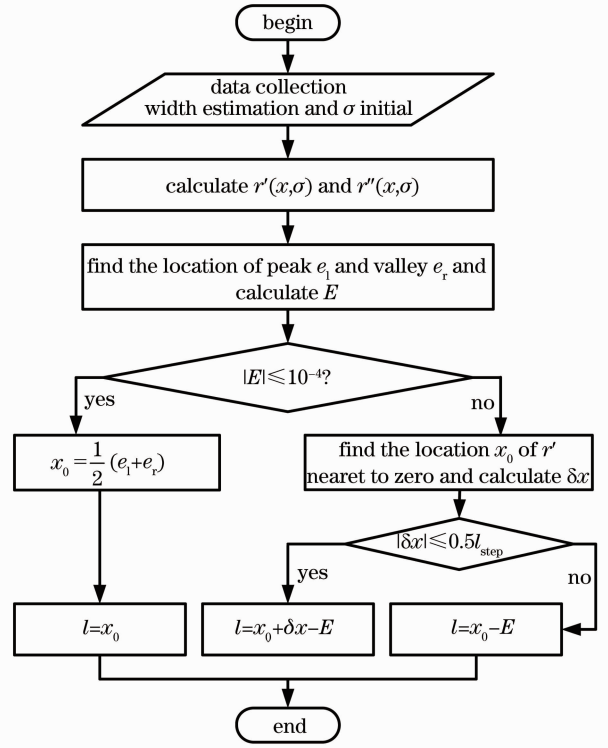


图5 算法流程图

Fig. 5 Flow chart of algorithm

3.1.2 对称光谱下不同采样步长对寻峰精度的影响研究

仿真过程中,设置仿真参数为 $A = 1, \Delta\lambda = 0.2$ nm, $\alpha = 1, \lambda_B = 1550.0005$ nm,波长范围为 1549~1551 nm,并添加 R_{SN} 为 30 dB 的高斯白噪声 $h_{noise}(x)$ 。使 λ_B 位于采样点外,选取仿真步长为 0.1、0.08、0.06、0.04、0.02、0.005、0.001 nm,仿真研究不同步长对典型的高斯拟合法、质心法以及本文算法寻峰精度的影响。定义寻峰误差 e 为算法计算结果与设定值之差,并用 e 的大小来衡量寻峰精度。如图6所示,采样点从步长及采样点分布两方面影响了寻峰精度。步长对3种算法的寻峰精度影响较小,均为亚步长精度。由于 $\Delta\lambda = 0.2$ nm,当步长为 0.06 nm 时,部

分采样点位于光谱的边缘附近,存在相邻采样值突变的情况,3种算法均出现较大误差,而本文提出的算法误差最小。除该点外,本文所提算法在不同步长下的寻峰精度基本一致,即相对寻峰精度高,能有效克服步长的限制,当仿真步长为 1 pm 时,检测精度最高。

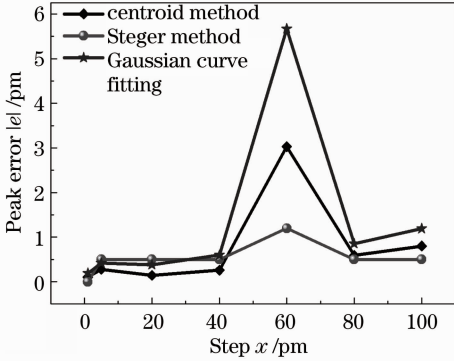


图 6 不同步长下不同算法的寻峰误差曲线图
Fig. 6 Peak error curves of different peak algorithms in different simulate steps

3.1.3 对称光谱下不同寻峰算法抗噪特性研究

仿真参数同 3.1.2 节,取波长步长为 1 pm,在光谱上加入波动,即噪声,在 20~50 dB 噪声范围内,每隔 5 dB 进行仿真,对比不同算法在不同 R_{SN} 下的寻峰精度。如图 7 所示, R_{SN} 越小,算法检测精度越高。噪声对本文算法的影响最小,质心法次之,高斯拟合法最大。



图 7 不同 SNR 下不同算法寻峰偏差曲线图
Fig. 7 Peak error curves of different peak detections algorithm in different SNR

3.1.4 不同光谱非对称性对寻峰算法精度的影响研究

仿真参数同 3.1.2 节,取仿真步长为 1 pm,使 α 分别为 1、2、3、4,并对比不同寻峰算法在不同非对称系数 α 下的寻峰精度。如图 8 所示,当 α 减小时,质心法及高斯拟合法的检测精度都得到了提高,但是本文算法在检测非对称光谱峰值方面较其他算法

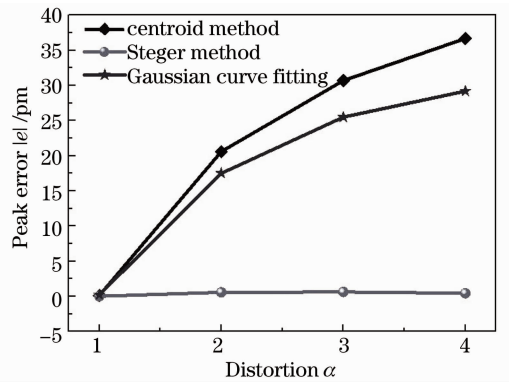


图 8 不同非对称量下不同算法的寻峰误差曲线图

Fig. 8 Peak error curves of different algorithms in different distortion α

具有显著的优势,非对称量 $\alpha \leq 4$ 的范围内,检测精度能稳定在 1 pm 以内。

3.2 实验结果

实验采用 Micron Optics 公司的 SM125-500 光栅解调仪对 10 根不同的 FBG 进行光谱数据采集,采样步长为 5 pm。以光栅解调仪解算的中心波长为参考,采用不同算法进行寻峰计算,结果如表 1 所示。

表 1 不同算法的寻峰结果比较

Table 1 Comparison of peak error of different algorithms

No.	Asymmetric modified parameter $E \times 10^{-1} / \text{pm}$	Steger method e / pm	Centroid method e / pm	Gaussian curve fitting e / pm
1	-0.47747	-0.20931	-0.3618	1.2
2	0.60971	-0.8886	2.7	-0.37234
3	0.7645	0.40681	1.6	1.9
4	1.0882	-1.5	-1.4	-1.7
5	-1.6	-0.3024	4.9	4.8
6	4.2	0.37203	-0.27034	3.0
7	4.1752	0.07385	-1.7	0.72452
8	6.6264	0.17687	-2.5	0.78685
9	7.6453	0.84376	-3.5	-0.36448
10	8.3157	0.88397	-4.6	-3

非对称修正量 E 是本算法的计算过程数据,是表述谱型数据非对称程度的参数。实验中,序号 1~3 的样品 FBG 反射光谱为对称光谱[图 1(a)];序号 4 和 5 的样品侧偏程度较小,光谱展宽[图 1(b)];序号 6 和 7 的样品侧偏程度居中,光谱展宽[图 1(c)],序号 7~10 的样品侧偏程度较大[图 1(d)]。经计算,在对称光谱寻峰中,算法检测精度在 ± 1 pm 内,优于质心法及高斯拟合法;在非对称光

谱寻峰中,算法检测精度为 ± 1.5 pm,高斯拟合法与质心法的检测精度均为 ± 5 pm,而高斯拟合法寻峰误差整体情况优于质心法。实测数据计算结果表明,Steger 寻峰算法在对称光谱及非对称光谱峰值检测方面均有较大的优势,与理论仿真结果一致。

4 结 论

根据 FBG 反射峰的图像特征建立了光谱模型,能够描述平顶及非对称光谱等特征。引入图像处理算法,提出了一种 FBG 反射光谱寻峰的新思路。Steger 寻峰算法兼具滤波和寻峰功能,并引入了非对称谱型修正及亚步长修正公式,具有抗噪、克服步长限制、寻峰精度高的特点。仿真结果表明,该算法能克服采样步长的限制; $R_{SN} \geq 30$ dB 时,该算法能准确寻找峰值位置,具有良好的抗噪特性;在非对称光谱寻峰方面,非对称系数 $\alpha \leq 4$ 的仿真范围内,该算法检测误差控制在 1 pm 以内,较其他寻峰算法具有明显优势。实测数据计算结果表明,Steger 寻峰算法在对称光谱及非对称光谱峰值检测方面均有较大的优势,与理论仿真结果一致。

参 考 文 献

- 1 A D Kersey, M A Davis, T A Berkoff, *et al.*. Progress towards the development of practical fiber Bragg grating instrumentation systems [C]. SPIE, 1996, 2839: 40–63.
- 2 Li Guoyu, Guo Tuan, Zhang Hao, *et al.*. Fiber grating sensor interrogation based on the linear InGaAs photodiode array [J]. Appl Opt, 2007, 46(3): 283–286.
- 3 A G Simpson, K Zhou, L Zhang, *et al.*. Optical sensor interrogation with a blazed fiber Bragg grating and a charge-coupled device linear array [J]. Appl Opt, 2004, 43(1): 33–40.
- 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 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
- 王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 6 X Zhang, J Max, X Jiang, *et al.*. Experimental investigation on optical spectral deformation of embedded FBG sensors [C]. SPIE, 2007, 6478: 647808.
- 7 Wu Fei, Kuang Minmin, Zhao Jing, *et al.*. Application of ant colony algorithm in analyzing of traverse uniform strain reflective of fiber Bragg grating [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 477–483.
- 吴飞, 邝敏敏, 赵静, 等. 蚁群算法在光纤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.
- 8 L J Cai, Z Y Li, Z H Tang, *et al.*. A novel peak-peek algorithm used in FBG sensor demodulation system for vibration monitoring [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 160: 135–139.
- 9 Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1672–1677.
- 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672–1677.
- 10 Hu Kun, Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Fast extrication method for sub-pixel center of structured light stripe [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1326–1329.
- 胡坤, 周富强, 张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10): 1326–1329.
- 11 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Wang Chang, *et al.*. Experimental research of thermal effect in FBGs fabrication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120602.
- 宋志强, 祁海峰, 王昌, 等. 光纤布拉格光栅制作中热效应影响的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120602.
- 12 C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113–125.

栏目编辑: 张浩佳