

基于高斯差分的光纤布拉格光栅反射谱峰值检测算法研究

蔺彦章, 刘毅, 潘玉恒*, 李国燕

天津城建大学计算机与信息工程学院, 天津 300384

摘要 针对光纤 Bragg 光栅 (FBG) 解调系统中 FBG 反射谱因包含高斯白噪声、工频噪声而导致解调误差大、解调系统稳定性差的问题, 提出一种基于高斯差分 (DoG) 的 FBG 峰值检测算法。利用该算法对包含大量噪声的 FBG 反射谱信号进行峰值检测, 平均误差为 4 pm, 标准差为 4.2 pm, 相比其他传统算法误差最小。实验结果表明, DoG 算法稳定性高, 解调误差小, 能够明显地降低噪声对 FBG 反射谱的影响, 提高了 FBG 解调系统的解调精度。

关键词 光纤光学; 光纤 Bragg 光栅; 反射谱; DoG 算法; 峰值检测

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0706002

Fiber Bragg Grating Spectrum Peak-Detection Algorithm Based on Difference of Gaussian

Lin Yanzhang, Liu Yi, Pan Yuheng*, Li Guoyan

School of Computer and Information Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

Abstract To minimize demodulation error and system instability due to the Gaussian white noise and power frequency noise, we presented a fiber Bragg grating (FBG) peak-detection algorithm based on difference of Gaussian (DoG). This algorithm enabled the detection of the peak wavelength of FBG reflection spectrum with strong noise. The mean error and standard deviation are 4 pm and 4.2 pm, respectively, which are much lower than those of other traditional algorithms. Experimental results show that the DoG algorithm can provide good stability and low demodulation error. In addition, it can substantially resist the noise in the FBG reflection spectrum, thereby improving the accuracy of the FBG demodulation system.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; reflection spectrum; DoG algorithm; peak detection

OCIS codes 060.3735; 120.5700; 300.6380

1 引言

光纤 Bragg 光栅 (FBG) 作为一种新型的传感器件, 具有体积小、质量小、耐腐蚀、抗电磁干扰强及灵敏度高优点, 被广泛应用于石油、电力、土木工程等领域^[1-4]。FBG 传感器的检测原理是通过其反

射谱中心波长的偏移量来反映被测物理量的变化量^[5], 因此, 准确检测反射谱峰值波长是 FBG 解调技术的关键, 也是提高 FBG 解调精度和稳定性的重要手段之一。但是在 FBG 解调系统数据采集过程中, 外界环境和系统内部都很容易带来高斯白噪声、工频噪声等, 容易使得采集到的 FBG 反射谱信

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-08-26; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 天津市教委科研项目 (2017KJ058)

*E-mail: yuheng0616@sina.com

号发生抖动和波形畸变,导致反射谱峰值检测不准确^[6]。

目前,用于解调FBG传感信号的峰值检测算法有质心法、一般多项式法、高斯拟合法、遗传算法和神经网络算法等^[7-10]。其中,质心法计算简单,响应时间短,当光谱信号波动大且包含大量噪声时,会导致峰值检测精度较低,不适用于恶劣环境下的FBG反射谱检测^[11]。一般多项式法运算量少,易于实现,但其峰值检测精度依赖于观测数据,噪声敏感度高。高斯拟合算法是通过反射谱信号左右两边斜边对称关系找到峰值点,对光谱谱形严格要求,当反射谱谱形因噪声产生畸变时,会导致此算法峰值检测误差增大^[12]。遗传算法和神经网络算法虽然大幅提高了其峰值检测的精度,但需要长时间进行计算,解调时间过长,因此不适合实时检测^[13-15]。

本文针对FBG反射谱因噪声而导致的解调误差大、解调系统稳定性差的问题,提出了一种基于高斯差分(DoG)的FBG峰值检测算法。DoG算法的原理是通过不同尺度的DoG检测函数与反射谱信号进行卷积,获取其局部极大值的位置,该位置即为FBG反射谱的峰值波长。DoG算法是求取两个高斯函数与信号的卷积结果之差,因此具有很强的抗噪性,即使在包含大量噪声的情况下,DoG算法也可以有效减小寻峰误差,从而提高FBG反射谱峰值检测的稳定性和准确度。

2 FBG传感解调原理

当入射光进入FBG时,根据光栅耦合模定理^[16-17],FBG反射谱的中心波长可表示为

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, λ_b 为反射谱中心波长, n_{eff} 为FBG的纤芯有效折射率, Λ 为FBG周期。由此可见,反射谱的中心波长与FBG的纤芯有效折射率和FBG的栅格周期有关。

当外界温度、应变作用于FBG时,其纤芯有效折射率和栅格周期会发生相应的变化,导致其反射谱中心波长偏移^[18-19]。因此,只需测量出反射谱中心波长的偏移量就可以知道环境温度、应变的变化量。其中,FBG反射谱输出可近似表示为^[20-21]

$$I(\lambda) = A \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_b}{\Delta\lambda}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中, A 为反射谱的幅值, λ 为FBG的波长, $\Delta\lambda$ 为反

射谱的3 dB带宽。根据(3)式,可知FBG反射谱特征具有近似高斯曲线的特点,其中心波长是峰值点的位置,因此,FBG解调系统的解调精度可由系统的峰值检测精度来决定。

3 基于DoG的FBG峰值检测算法分析

DoG算法的作用是精确并快速地检测图像里的斑点^[22-24]。斑点主要指的是其灰度值与其他周围灰度值相比具有剧烈变化的区域,由于FBG反射谱的光功率与其他区域光功率有较大的差异,与一维斑点信号相似,因此,可以将FBG反射谱视为图像的斑点进行检测。

3.1 斑点检测算法

斑点检测算法是采用不同尺度的斑点检测函数与图像斑点信号进行卷积,通过合适的尺度识别灰度值剧烈变化的区域,实现对图像斑点的提取。

在一维空间里,理想的一维斑点信号是一个具有一定宽度和两个阶跃边缘的矩形脉冲信号。宽度为 s 和高度为 h 的矩形脉冲信号可表示为

$$F_{s,h}(x) = \begin{cases} h, & |x| < \frac{s}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3)$$

高度 h 的阶跃函数可表示为

$$S_h(x) = \begin{cases} h, & x > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

当规范化高斯二阶导数与信号卷积后,其两边阶跃边缘会产生极大值,如图1所示。

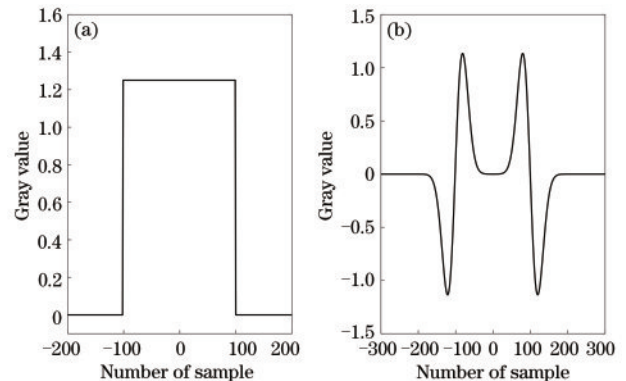


图1 一维斑点信号与规范化高斯二阶导数的卷积结果。

(a)原始信号($s=200$);(b)卷积信号($\sigma=20$)

Fig. 1 Convolution results of dot signal and second derivative of normalized Gaussian function.

(a) Original signal ($s=200$); (b) convolution signal ($\sigma=20$)

在一维斑点检测中,由于斑点信号宽度不一定,采用不同尺度(本文以高斯方差 σ 表示尺度)规范化高斯二阶导数作为高斯拉普拉斯(Laplace of Gaussian, LoG)算法^[25]的检测函数与脉冲信号进行卷积。当尺度为脉冲信号的半峰全宽($\sigma=100$)时,

脉冲信号的中心点会叠加出一个最大的局部极大值,且其宽度 $s=2\sigma$,如图 2 所示。因此,本研究将不同尺度的规范化 LoG 函数与脉冲信号进行卷积,用取得最大局部极大值的位置对脉冲信号的中心点和宽度进行提取。

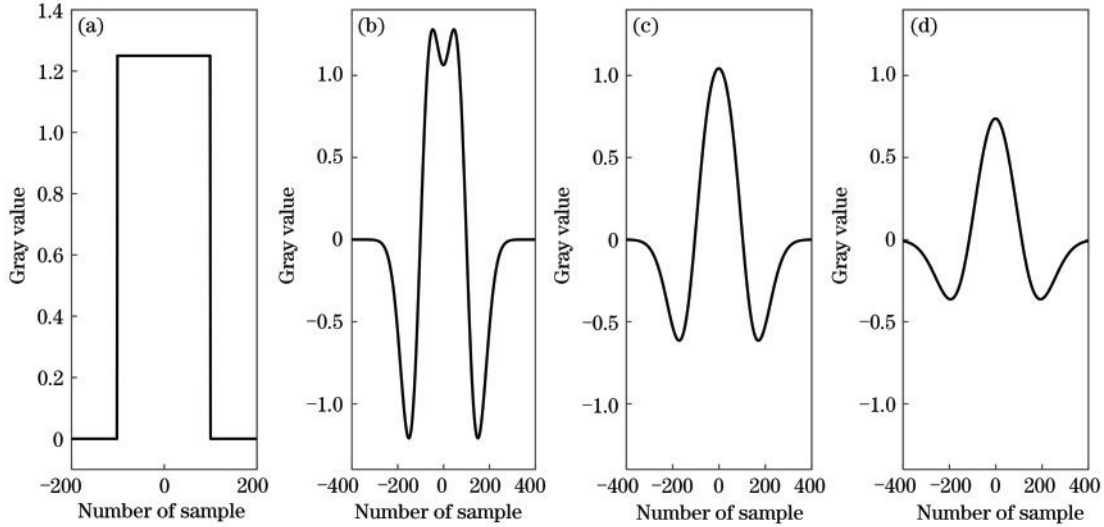


图 2 斑点信号与不同尺度的规范化高斯二阶导数卷积结果。(a)原始信号($s=200$);(b)卷积信号($\sigma=70$);(c)卷积信号($\sigma=100$);(d)卷积信号($\sigma=130$)

Fig. 2 Convolution results of dot signal and second derivative of Gaussian function on the different scales. (a) Original signal ($s=200$); (b) convolution signal($\sigma=70$); (c) convolution signal($\sigma=100$); (d) convolution signal($\sigma=130$)

设一维高斯函数 $G_\sigma(x)$, 规范化的高斯二阶导数(LoG 算法的检测函数)为 $\sigma^2 \Delta^2 G$, 一维斑点信号为 $F_{s,h}(x)$, σ 为高斯函数的尺度, 则有

$$G_\sigma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial G_\sigma}{\partial \sigma} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{-1}{\sigma^2} + \frac{x^2}{\sigma^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 G_\sigma}{\partial x^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left(\frac{-1}{\sigma^2} + \frac{x^2}{\sigma^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

联立(6)式和(7)式,可知

$$\frac{\partial G_\sigma}{\partial \sigma} = \sigma \frac{\partial^2 G_\sigma}{\partial x^2}, \quad (8)$$

又因为

$$\frac{G_{k\sigma}(x) - G_\sigma(x)}{k\sigma - \sigma} \approx \frac{\partial G}{\partial \sigma}, \quad (9)$$

根据(8)式和(9)式,可知

$$G_{k\sigma}(x) - G_\sigma(x) \approx (k-1)\sigma^2 \Delta^2 G. \quad (10)$$

斑点信号 $F_{s,h}(x)$ 在高斯尺度空间的表达式为

$$L(x, \sigma) = G_\sigma(x) * F_{s,h}(x), \quad (11)$$

且

$$(k-1)\sigma^2 \Delta^2 G * F_{s,h}(x) \approx [G_{k\sigma}(x) - G_\sigma(x)] *$$

$$F_{s,h}(x) = L(x, k\sigma) - L(x, \sigma), \quad (12)$$

式中: $\sigma^2 \Delta^2 G * F_{s,h}(x)$ 是 LoG 的响应值; $L(x, k\sigma) - L(x, \sigma)$ 是 DoG 的响应值, 其中 $k-1$ 是 LoG 和 DoG 响应值的比例系数, 不影响斑点的中心位置。因此, 可以使用 DoG 算法代替 LoG 算法对斑点进行检测。LoG 算法是规范化的高斯二阶导数与信号作卷积运算, 相当于高斯函数与信号卷积后再求二阶差分, 因此噪声敏感度大。而 DoG 算法则是两个高斯函数与信号的卷积结果之差, 因此抗噪性强, 并且其卷积核比 LoG 算法简单。通过上面分析可知, DoG 算法的计算过程简单, 抗噪性强, 稳定性好, 因此具有广泛的应用前景。

3.2 基于 DoG 的 FBG 峰值检测算法

在实际情况下, FBG 反射谱的光功率与其他区域的光功率有较大的差异, 类似于 一维斑点信号, 因此, 可以将 FBG 反射谱视为斑点进行检测。由于 FBG 反射谱的峰值检测算法只需检测其峰值点的位置(中心波长), 并且每一次解调的 FBG 反射谱宽度(本文以 FBG 反射谱 3 dB 带宽表示其宽度)大致相同, 因此, 只需计算 FBG 反射谱信号以及 DoG 检测

函数卷积产生局部极大值的尺度范围,即可通过其局部极大值来提取FBG反射谱的峰值点位置。

由于DoG算法可以用LoG算法来表示,因此可以先计算LoG算法与 $F_{s,h}(x)$ 信号卷积后产生的局部极大值的尺度范围,再通过两个算法之间的关系

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_h(u) \frac{\partial^2 G_\sigma(x-u)}{\partial x^2} du = h \int_{-\infty}^0 \frac{\partial^2 G_\sigma(x-u)}{\partial x^2} du = h \frac{\partial G_\sigma(x)}{\partial \sigma}, \quad (13)$$

式中: $\frac{\partial G_\sigma(x)}{\partial \sigma}$ 为高斯一阶微分函数。又因

$$F_{s,h}(x) = S_h\left(x - \frac{s}{2}\right) + S_h\left(-x + \frac{s}{2}\right) - h, \quad (14)$$

故由(13)式和(14)式可得

$$F_{s,h}(x) * \frac{\partial^2 G_\sigma(x)}{\partial x^2} = h \frac{\partial G_\sigma\left(x - \frac{s}{2}\right)}{\partial x} - h \frac{\partial G_\sigma\left(x + \frac{s}{2}\right)}{\partial x}. \quad (15)$$

(15)式表明LoG算法是两个边缘处两个相反的高斯一阶微分函数的叠加。根据(15)式,可知

求出DoG算法的尺度范围。

首先根据(3)式和(4)式,可知LoG算法就是将

$\frac{\partial^2 G_\sigma}{\partial x^2}$ 和 $F_{s,h}(x)$ 两个阶跃函数作卷积处理,其中 $\frac{\partial^2 G_\sigma}{\partial x^2}$ 与 $S_h(x)$ 的卷积为

在 $x=0$ 处的一阶导数为0和二阶导数小于0时,有

$$s < 2\sqrt{3}\sigma. \quad (16)$$

当宽度 $s=2\sigma$ 时,被检测出的局部极大值最大。

当被检测的 $F_{s,h}(x)$ 信号宽度 s 在 $(0.8\sigma, 2\sqrt{3}\sigma)$ 的范围内时, $F_{s,h}(x)$ 信号的中心处产生局部极大值,并且两个阶跃边缘卷积后的极大值消失。

在(12)式中,DoG算法是将两个不同尺度上的高斯函数之差与信号进行卷积。因此,设DoG检测函数的表达式为

$$D_{\sigma_1, \sigma_2}(x) = G_{\sigma_1}(x) - G_{\sigma_2}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \times \left\{ 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \exp\left[\frac{-x^2[-x^2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)]}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}\right] \right\}. \quad (17)$$

使 σ_1 固定不变, $\sigma_2 \in (\sigma_1, +\infty)$,当 σ_2 趋近于 σ_1 时,则有

$$\lim_{\sigma_2 - \sigma_1 \rightarrow 0^+} \exp\left[\frac{-x^2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}{2\sigma_1^2\sigma_2^2}\right] = \frac{-x^2(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)}{2\sigma_1^2\sigma_2^2} + 1. \quad (18)$$

将(18)式代入(17)式,可得

$$\lim_{\sigma_2 - \sigma_1 \rightarrow 0^+} D_{\sigma_1, \sigma_2}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) \times \left[\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_2} - \frac{x^2(\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_1)}{2\sigma_1\sigma_2^3} \right]. \quad (19)$$

由于 σ_2 趋近于 σ_1 ,在(19)式用 σ_1 代替 σ_2 ,并令 $\sigma_2 - \sigma_1$ 为 δ ,则有

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{\delta}{\sigma_1^2} - \frac{\delta x^2}{\sigma_1^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) = \delta \sigma_1 \frac{\partial^2 G_{\sigma_1}(x)}{\partial x^2}, \quad (20)$$

其中, $\delta\sigma_1$ 为幅值比例系数,该系数并不影响 $F_{s,h}(x)$ 信号的中心点检测。因此,当 σ_2 趋近于 σ_1 时,DoG算法的检测函数 $D_{\sigma_1, \sigma_2}(x)$ 将收敛于 $\frac{\partial^2 G_{\sigma_1}}{\partial x^2}$ 。

当 σ_2 趋近于 $+\infty$ 时,由(5)式和(17)式可知, $G_{\sigma_2}(x)$ 将趋近于0,因此, $D_{\sigma_1, \sigma_2}(x)$ 函数将收敛于 $G_{\sigma_1}(x)$ 。 $G_{\sigma_1}(x)$ 与 $F_{s,h}(x)$ 信号卷积后,根据(16)式,可求出 $F_{s,h}(x)$ 信号宽度小于 $6\sigma_1$ 时,卷积后 $F_{s,h}(x)$ 信号中心处产生的局部极大值。

设 $D_{\sigma_1, \sigma_2}(x)$ 和 $F_{s,h}(x)$ 信号的卷积结果中,能够

在 $F_{s,h}(x)$ 信号中心处叠加出局部极值的信号宽度,则 $D_{\sigma_1, \sigma_2}(x)$ 的宽度 $W \in (2\sqrt{3}\sigma_1, 6\sigma_1)$ 。

因此,DoG算法检测出的宽度 W 可简单表示为

$$W \approx \begin{cases} 2\sqrt{3}\sigma_1 + 2(\sigma_2 - \sigma_1), & \sigma_1 < \sigma_2 \leq 1.2\sigma_1 \\ 2\sqrt{3}\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_1, & 1.2\sigma_1 < \sigma_2 \leq 3\sigma_1 \\ 6\sigma_1, & \sigma_2 > 3\sigma_1 \end{cases}. \quad (21)$$

通过上面分析,DoG算法和LoG算法的卷积结果都能够在 $F_{s,h}(x)$ 信号的中心处叠加出局部极大值。而DoG算法对能量中心集中信号的响应比LoG算法强,因此一般采用DoG算法。

FBG解调系统的实际数据采集过程中,由于解调系统很容易受到外界环境和系统器件内部噪声的影响,FBG反射谱中心波长发生了抖动和波形畸

变,导致FBG解调精度降低。现有的FBG反射谱峰值检测算法在处理含有大量噪声的反射谱信号时,会导致其峰值检测精度下降,误差增大。而基于DoG的峰值检测算法则是求取两个高斯函数与信号卷积的结果之差,该方法能够明显地减少噪声对峰值检测精度的影响。此外,基于DoG的峰值检测算法不用对FBG反射谱原始信号进行去噪,可以

避免原始信号由于去噪导致的波形畸变。基于DoG的FBG反射谱峰值检测算法流程如图3所示,在获得FBG反射谱信号时,将反射谱的宽度界定为FBG反射谱3 dB带宽,根据反射谱宽度与DoG算法尺度的关系,找到合适的尺度 σ_1 和 σ_2 ,使其卷积后产生局部极大值,此时极大值的位置就是反射谱的峰值波长。

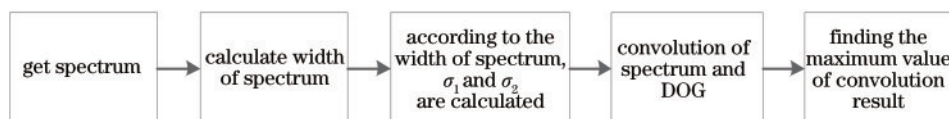


图3 峰值检测流程

Fig. 3 Process of peak detection

4 实验分析

4.1 基于DoG的FBG峰值检测实验平台

实验平台原理如图4所示,由放大自发辐射(ASE)宽带光源发出的光经可调谐F-P滤波器转变成窄带光,

再由光纤耦合器分成两路光信号,分别输入至FGB传感器和F-P标准具,然后通过光电探测器转变为电信号后由数据采集模块进行采集。采集完成后,反馈系统驱动锯齿波产生下一个锯齿波,并由计算机对采集的数据进行处理,得到的FBG反射谱的波形如图5所示。

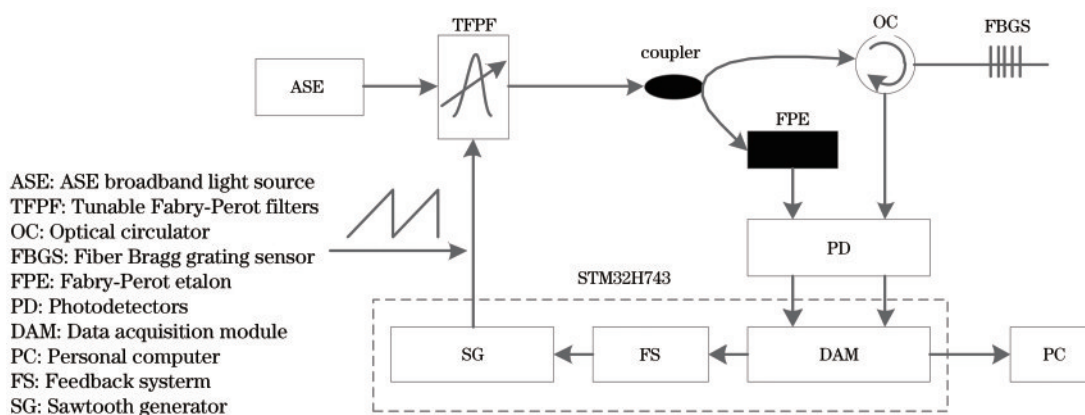


图4 实验平台原理图

Fig. 4 Schematic of the experimental platform

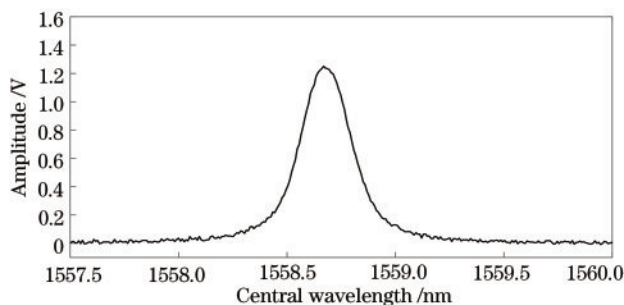


图5 FBG反射谱

Fig. 5 FBG reflection spectrum

实验平台实物图如图6所示,其中:ASE光源是输出光功率为10 mW,波长范围为1527~1565 nm的宽带光,经可调谐F-P滤波器后变为线宽为

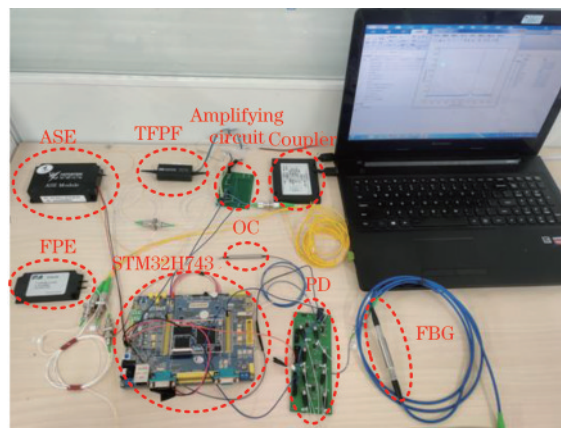


图6 实验平台实物图

Fig. 6 Physical diagram of the experimental platform

0.0375 nm 的窄带光;F-P 滤波器的自由光谱范围为 70 nm,调谐电压为 0~14 V;光纤耦合器将光信号分成 1:9 两路信号,其中 10% 的光进入 F-P 标准具,90% 的光经环形器进入传感通道。光电探测器将 FBG 反射光和 F-P 标准具透射光转换为电信号,然后由 STM32H743 ARM 处理器内部集成的模数转换器(ADC)采样模块将电信号进行采样,其 A/D 采样通道可以扩展到 16 路,采样率可达 1 MHz。同时,ARM 处理器可向可调谐 F-P 滤波器提供驱动电压。

将 FBG 传感器放入 28 °C 恒温容器中,实验采集 50 组 FBG 反射谱的原始数据,采用 DoG 算法对每一组反射谱进行峰值检测,检测出的 FBG 反射谱

平均中心波长为 1558.668 nm。

4.2 三种峰值检测算法比较

为验证 DoG 算法对峰值检测精度和系统稳定性的影响,采取以下措施:1)将 28 °C 下 FBG 传感器的初始中心波长 1558.672 nm 作为 FBG 反射谱中心波长的真实值;2)在 MATLAB 上将采集到的 50 组 FBG 反射谱数据分别采用质心法、高斯拟合算法和 DoG 算法进行峰值检测,计算三种算法的平均中心波长、标准差、平均误差,见表 1;3)再选取一组采集的 FBG 反射谱进行同样的峰值检测,记录每个算法均运行 10 次的时间并取均值,见表 1。不同算法的峰值检测结果如图 7 所示。

表 1 三种算法的平均波长、标准差、平均误差和平均运行时间

Table 1 Average wavelength, standard deviation, average error and operation time of the three algorithms

Peak-detection algorithm	Centroid detection algorithm	Gaussian fitting algorithm	DoG algorithm
Mean value /nm	1558.678	1558.671	1558.668
Standard deviation /pm	24	4.9	4.2
Error /pm	16	5	4
Operation time /ms	0.2	105.9	56.2

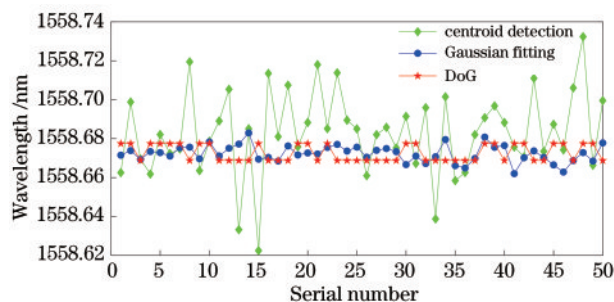


图 7 三种峰值检测算法结果

Fig. 7 Detection results of three peak-detection algorithms

通过表 1 和图 7 可以看出,质心法误差值为 16 pm,标准差最大,算法的稳定性最差;高斯拟合算法的误差为 5 pm,算法稳定性较好;DoG 算法误差值为 4 pm,且标准差最小,是对比算法里稳定性最高、误差最小的算法。并且,DoG 算法运算时间为 56.2 ms,介于质心法和高斯拟合算法之间,其解调精度是三种算法里最高的。

4.3 噪声对峰值检测算法的影响

为了进一步验证 DoG 峰值检测算法的抗噪性和稳定性,在噪声幅值与信号幅值之比(信噪比的倒数, $1/R_{SN}$)为 0.01~0.30 时对三种算法作误差比较。三种算法信噪比与误差值的关系曲线如图 8 所示。

通过图 8 分析可知,质心法随着噪声的增大其误差迅速增大,解调的稳定性和精度都会受到噪声的影响,

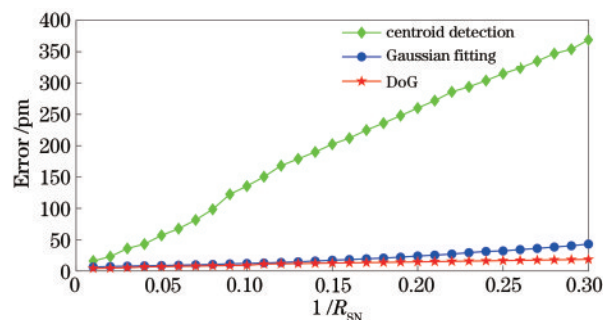


图 8 三种算法的信噪比和算法误差的关系曲线

Fig. 8 Relation between SNR and algorithm error by the three algorithms

抗噪性最差。当噪声幅值与信号幅值之比为 0.01~0.10 时,DoG 算法和高斯拟合算法的误差都增加了 4.5 pm;当噪声幅值与信号幅值之比为 0.10~0.30 时,高斯拟合算法的解调误差增加了 31 pm,而 DoG 算法误差只增加了 10 pm。因此,DoG 算法可以很明显地减少噪声影响,提高了 FBG 解调系统的稳定性和解调精度。

5 结 论

提出一种基于 DoG 的 FBG 反射谱峰值检测算法。DoG 算法具有抗噪性强、稳定性高等特点,能够显著减少噪声对 FBG 反射谱的影响,从而提高解调系统的稳定性和解调精度。仿真实验结果表明,基于 DoG 的 FBG 峰值检测算法的平均误差值仅为

4 pm, 且标准差是上述其他算法里最小的, 即使在噪声幅度与信号幅度之比大于 0.10 时, 其解调误差仍很小。该算法提高了 FBG 反射谱峰值检测的稳定性和准确度, 在 FBG 信号处理上有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang X H, Wang L T, Fang N. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020603.
张旭辉, 王陆唐, 方捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020603.
- [2] Xu G Q, Xiong D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317.
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
- [3] Quan W W, Kang J, Yang L, et al. Young's modulus measurement of metal beams based on fiber Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 040604.
全文文, 康娟, 阳丽, 等. 基于光纤布拉格光栅的金属梁杨氏模量的测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 040604.
- [4] Chen Y, Chen Y W, Liu Z Q, et al. A gear fault detection method based on a fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304007.
陈勇, 陈亚武, 刘志强, 等. 基于光纤布拉格光栅传感的齿轮故障检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0304007.
- [5] Zhang X, Yang Z, Li Q L, et al. Research on temperature tuning properties of chirped fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0505002.
张新, 杨直, 李强龙, 等. 啾啾光纤光栅的温度调谐特性研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0505002.
- [6] Yin C Q, Wang Z S, He Y J, et al. Simulation and experiment analysis of central wavelength detection algorithm for FBG reflection spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 322-327.
尹成群, 王梓萌, 何玉钧, 等. FBG 反射谱中心波长检测算法仿真与实验分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 322-327.
- [7] Shang Q F, Lin B H. The comparison and analysis of typical peak-detection algorithms in fiber Bragg grating sensor system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, 47(2): 1-4.
尚秋峰, 林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. *电测与仪表*, 2010, 47(2): 1-4.
- [8] Chen Z J, Bai J, Wu Z T, et al. Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1112001.
陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1112001.
- [9] Lee H W, Park H J, Lee J H, et al. Accuracy improvement in peak positioning of spectrally distorted fiber Bragg grating sensors by Gaussian curve fitting [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(12): 2205-2208.
- [10] Hu L L, Wang Y P, Wang B. Research on peak searching algorithms errors of fiber Bragg grating sensing signal [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(4): 409-413.
胡辽林, 王亚萍, 王斌. 光纤光栅传感信号寻峰误差研究[J]. *西安理工大学学报*, 2015, 31(4): 409-413.
- [11] Jing W C, Wang G H, Liu K, et al. Application of weighted wavelength algorithm on the demodulation of a fiber Bragg grating optical sensing system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2007, 18(9): 1022-1025.
井文才, 王光辉, 刘琨, 等. 功率加权法用于光纤 Bragg 光栅特征波长检测[J]. *光电子·激光*, 2007, 18(9): 1022-1025.
- [12] Hu Z W, Pang C X, Cheng F Y. Application of Gaussian-LM algorithm in fiber Bragg grating reflection spectrum peak search [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 013001.
胡正文, 庞成鑫, 程冯宇. Gaussian-LM 算法在光纤布拉格光栅反射光谱寻峰中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 013001.
- [13] Zhang T D, He F T, Zhou Q, et al. Research of peak-detection algorithm in a fiber grating demodulation system [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 36-39.
张天地, 贺锋涛, 周强, 等. 光纤光栅解调系统的寻峰算法研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(1): 36-39.
- [14] Han P, Zhou Z D. Feedback relative peak-detection algorithm for high-speed and high-precision grating demodulator [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*,

- 2011, 33(1): 10-12, 17.
- 韩屏, 周祖德. 高速高精光栅解调器的反馈式相对寻峰算法[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2011, 33(1): 10-12, 17.
- [15] Negri L, Nied A, Kalinowski H, et al. Benchmark for peak detection algorithms in fiber Bragg grating interrogation and a new neural network for its performance improvement [J]. *Sensors*, 2011, 11(4): 3466-3482.
- [16] Ullan A, Quintela M A, Rodriguez-Cobo L, et al. Sensor system based on a Brillouin fiber laser for remote in series fiber Bragg gratings interrogation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(12): 3480-3482.
- [17] Ma J X, Wang Y H, Zhang M Y, et al. Penetration characteristics of jacked piles with different pile diameters based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0504003.
- 马加骁, 王永洪, 张明义, 等. 基于光纤布拉格光栅传感技术的不同桩径静压桩贯入特性研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0504003.
- [18] Xiong T. Hardware design of the high-speed fiber grating demodulation instrument based on FPGA [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- 熊涛. 基于FPGA的高速光纤光栅解调仪的硬件电路设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [19] Zhang X, Hou M S, Liu Z C, et al. Surface reconstruction algorithm of plate-shell structure based on fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090603.
- 张旭, 侯茂盛, 刘智超, 等. 基于光纤布拉格光栅传感器的板壳结构曲面重构算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090603.
- [20] Wu F G, Zhang Q S, Jiang D S, et al. Method of Gaussian curve fitting for measuring fiber Bragg wavelength [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(12): 116-118.
- 吴付岗, 张庆山, 姜德生, 等. 光纤光栅 Bragg 波长的高斯曲线拟合求法[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(12): 116-118.
- [21] Mao L M, Tao C Y, Gu Z D, et al. Dynamic strain sensing system based on fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1006006.
- 毛黎明, 陶传义, 顾子迪, 等. 基于光纤环形激光器的动态应变传感系统[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1006006.
- [22] Ji H, Wu Y H, Sun H H, et al. SIFT feature matching algorithm with global information [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 439-444.
- 纪华, 吴元昊, 孙宏海, 等. 结合全局信息的 SIFT 特征匹配算法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 439-444.
- [23] Yang X M, Wu W, Qing L B, et al. Image feature extraction and matching technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(9): 2276-2282.
- 杨晓敏, 吴炜, 卿粼波, 等. 图像特征点提取及匹配技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2276-2282.
- [24] Ding X M, Wang W Y, Huang X D. New method for detecting and tracking of moving target based on difference and invariant [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(4): 570-576.
- 丁雪梅, 王维雅, 黄向东. 基于差分和特征不变量的运动目标检测与跟踪[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 570-576.
- [25] Lindeberg T. Scale-space theory: a basic tool for analyzing structures at different scales[J]. *Journal of Applied Statistics*, 1994, 21(1/2): 225-270.