

Gaussian-LM 算法在光纤布拉格光栅 反射光谱寻峰中的应用

胡正文, 庞成鑫, 程冯宇

上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090

摘要 针对光谱仪采样获得布拉格光栅反射谱含有干扰严重的噪声的问题,采用 Levenberg-Marquardt (LM)算法对高斯曲线拟合系数进行优化,并使用优化后的 Gaussian-LM 算法对采样的光纤布拉格光栅的反射谱进行寻峰。通过寻峰结果的对比分析,验证了 Gaussian-LM 算法对高斯曲线系数优化的重要性,实验结果表明 Gaussian-LM 寻峰算法可以有效减小寻峰误差。对基于波长解调原理的光纤布拉格光栅传感系统而言,提高了中心波长检测的准确度和稳定性。

关键词 光谱学; LM 算法; 高斯拟合; 光纤布拉格光栅; 光谱寻峰

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.013001

Application of Gaussian-LM Algorithm in Fiber Bragg Grating Reflection Spectrum Peak Search

Hu Zhengwen, Pang Chengxin, Cheng Fengyu

School of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

Abstract The analysis of the sampled fiber Bragg grating reflection spectrum usually obtained with so much noise. Levenberg-Marquardt (LM) algorithm is used to optimize the Gaussian curve fitting coefficient and the optimized Gaussian-LM algorithm is used for fiber Bragg grating spectrum peak detection. The comparison of the peak search results proves that the Gaussian-LM algorithm is important for optimizing the Gaussian curve coefficient. Research shows that Gaussian-LM peak detection algorithm can effectively reduce the peak error. It also improves stability of central wavelength detection and accuracy in fiber Bragg grating sensor system based on wavelength demodulation system.

Key words spectroscopy; LM algorithm; Gaussian fitting; fiber Bragg grating; spectrum peak search

OCIS codes 300.6170; 120.5700; 050.2770

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)利用光纤材料的光敏性,在纤芯内形成空间相位光栅,其实质是在纤芯内形成一个窄带的反射镜。FBG 已经广泛地应用于光纤传感技术领域,基于 FBG 反射谱的中心波长受到外界参量(例如应力、温度等)的调制来获取传感信息^[1]。所以 FBG 传感解调系统的关键技术是检测其中心波长的移动,因此精确地提取 FBG 反射光谱的中心波长值对于提高传感系统波长检测的准确度和分辨率至关重要^[2]。光谱仪采集的 FBG 反射谱采样信号中含有多种噪声源,在采样信号中直接获取的峰值及其对应的中

收稿日期: 2016-05-31; 收到修改稿日期: 2016-06-21; 网络出版日期: 2016-12-30

基金项目: 上海市东方青年东方学者(QD2015044)、上海市浦江人才 A 类项目(15PJ1402700)

作者简介: 胡正文(1991—),男,硕士研究生,主要从事电力传感、智能电网方面的研究。

E-mail: huzhengwen2011@gmail.com

导师简介: 庞成鑫(1979—),男,博士,教授,主要从事硅光子器件、光传感技术、智能电网光传输方面的研究。

E-mail: chengxin.pang@gmail.com(通信联系人)

心波长误差较大,常用的光谱拟合寻峰算法有三点寻峰法^[3]、多项式拟合法^[4]、高斯拟合法^[4]、高斯多项式拟合法^[4]等。

2 FBG 反射光谱噪声分析

FBG 反射光谱具有窄带、平滑、反射率和边模抑制比高的特点。FBG 反射光谱信号采集过程的噪声主要来自仪器噪声。仪器噪声主要包括仪器放置的环境干扰,由于仪器的波动或者传输过程中脉冲性的干扰等。仪器噪声影响光谱分析的分辨率和灵敏度,目前没有成熟的技术能很好地滤除光谱的仪器噪声^[5]。FBG 反射光谱含有的噪声类型成分复杂,主要有白噪声、高斯噪声、相位工频噪声等。这些噪声会干扰反射光谱峰值对应中心波长值的检测,因此需要有合适的寻峰算法滤除光谱噪声,不同类型的噪声对不同的寻峰算法影响程度各异。高斯曲线拟合法寻峰的误差主要受到白噪声和高斯噪声影响。而多项式拟合寻峰误差主要来自高斯噪声和相位工频噪声。综合对于各种类型的噪声相混合的影响,高斯曲线拟合寻峰算法的抗干扰能力最强^[6]。

3 Levenberg-Marquardt (LM) 算法

基于高斯-牛顿算法和梯度下降算法提出的 LM 算法是对前两者的优化。该算法既有梯度下降法的全局特性,又具有高斯-牛顿法的局部收敛性。LM 算法通过自适应调整阻尼因子实现收敛,在进行 FBG 光谱信号拟合优化过程中能得到稳定的结果。初值选取是决定 LM 算法迭代计算速度和精度的关键因素。选取的初值越接近真实值时,收敛和求解全局最优解的速度越快。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^[7]

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

利用 LM 算法可以得到关于函数 $s(p) = \sum_{i=1}^m [p(x_i | p) - f(x_i)]^2$ 的最小值的解 p ,从而获得高斯拟合曲线函数的各个系数,最终确定峰值对应的中心波长。

4 Gaussian-LM 算法

高斯曲线模型的表达式与采样得到的 FBG 反射光谱信号整体相似,通过高斯拟合去噪声能得到更优的光谱信号,从而能从其中更准确地获取光谱的峰值波长特征。高斯拟合的原理是最小化其均方差。当窗口大小、波长分辨率和信噪比相同时,高斯拟合法是误差变化最小且最稳定的算法。高斯函数近似表示 FBG 反射光谱的功率密度谱曲线,具体形式为^[8]

$$y = a_0 \exp \left[-4 \ln 2 \times \left(\frac{\lambda - a_1}{a_2} \right)^2 \right]. \quad (2)$$

因此选择合适的高斯拟合系数值 a_0 、 a_1 、 a_2 对于高斯拟合的精度至关重要,理论上 a_0 对应着真实的 FBG 反射谱的波峰强度, a_1 对应中心波长值, a_2 对应反射谱的 3 dB 带宽。此时高斯拟合曲线能通过采样光谱精确地拟合出真实光谱曲线,误差均值和标准偏差都最小。但实际上反射谱的三个参数是未知的,受到仪器噪声和背景噪声的干扰,从采样的数据点中无法直接获取真实的系数^[9]。一般寻峰采用的是直接寻峰得到的高斯拟合系数值 a_0 、 a_1 、 a_2 ,但是直接寻峰得到的系数会受光谱中噪声的影响产生较大的误差。为了解决该问题,一般是通过采集大量的原始光谱数据来对真实值有一个较准确的估计,但是在光谱处理中采集的数据都是有限的,如果采集的数据过多会影响信息处理的速度^[10]。

使用 LM 算法优化高斯拟合系数值 a_0 、 a_1 、 a_2 的选取。将直接寻峰得到的高斯拟合系数作为 LM 算法的初值,结合高斯曲线模型,LM 算法能选取能够利用高斯函数的二次导数信息对迭代步长进行自适应调整,可以快速地收敛到最优解。两者的混合算法称为 Gaussian-LM 算法。其中 LM 算法中的函数关系为(2)式,采集的光谱数据作为 LM 算法中含噪声观测的向量 x ,光谱采样的窗口为 1549.6~1551.5 nm,波长分辨率为 0.01 nm。其寻峰过程如图 1 所示,光谱输入光谱仪后,通过光谱仪确定数据处理窗口大小并采样

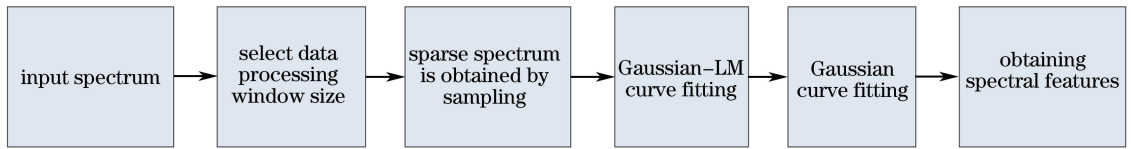


图 1 寻峰流程图

Fig. 1 Process of peak detection

得到稀疏光谱,再将存储的光谱数据导入 Matlab 中使用高斯拟合寻峰算法进行处理,LM 算法将采集的光谱数据迭代后获取最佳的高斯拟合系数。

5 实验结果讨论

5.1 实验平台

实验平台结构图如图 2 所示。宽带光源使用 Yenista TUNICS T100R 激光器,具备稳定输出功率高和光源光谱宽的特点,主要性能指标:波长范围为 1480~1640 nm,功率为 10 mW^[11]。光谱分析仪选择日本安立光谱分析仪 MS9740A,最大输入光功率 223 dBm,波长测试范围 600~1750 nm,波长精度 ± 20 pm^[12]。3 dB 耦合器选择 Thorlabs 公司的产品(型号 TW1550R5A2),工作波长 1550 nm,双向耦合。FBG 为杭州光佑科技有限公司提供,中心波长为 (1550 ± 0.2) nm,反射率大于等于 85%,3 dB 带宽小于等于 0.3 nm,边模抑制比大于等于 15 dB,栅区长度为 12 mm,光纤类型为 SMF-28C^[13]。

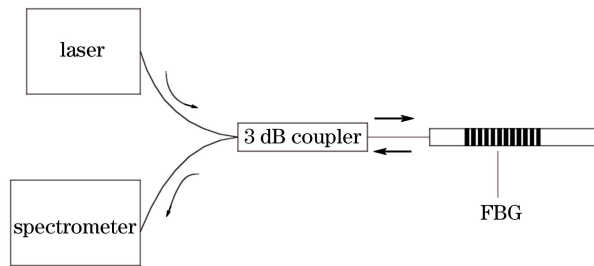


图 2 实验平台结构示意图

Fig. 2 Schematic of the experimental platform

实验原理为宽带光源产生宽带出射光经过 3 dB 耦合器后,有部分出射光耦合进入 FBG,FBG 产生的反射光会再次进入 3 dB 耦合器,会有部分反射光耦合进入光谱仪。通过光谱分析仪分析和存储 FBG 的反射光谱。

5.2 实验结果分析

通过图 3 和图 4 可以对比发现,直接采集的光谱数据存在严重的干扰噪声。在相同环境下进行反复多次的光谱数据采集时,波形出现很明显的抖动。光谱也出现了明显的失真。原始光谱数据受噪声影响很大,

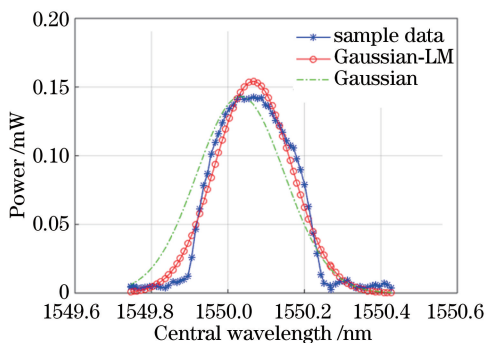


图 3 高斯拟合及 Gaussian-LM 算法的光谱拟合对比

Fig. 3 Gaussian fitting and spectral fitting of Gaussian-LM algorithm

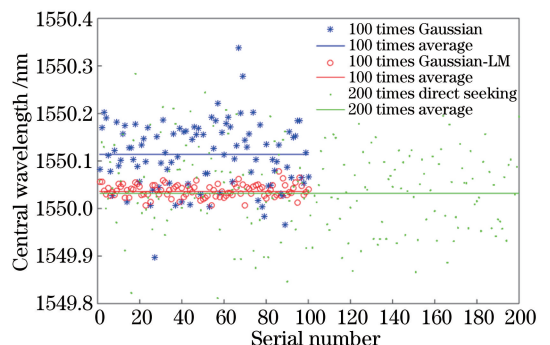


图 4 中心波长真实值的标定及 Gaussian 与 Gaussian-LM 算法的对比

Fig. 4 Calibration of the true value and the comparison of Gaussian and Gaussian-LM algorithms

对采集的原始光谱数据进行直接寻峰误差很大,对多次采集的数据进行处理发现在相同环境下波长的漂移范围达到了 ± 0.2 nm,这样会使波长解调精度产生很大的测量误差。

相同环境下实验采样 100 组原始光谱数据,每组光谱分别进行直接寻峰、高斯拟合寻峰、Gaussian-LM 寻峰,取 100 次寻峰的平均值结果与 200 次重复实验标定的真实值进行对比,因为只有大量的重复实验才能接近真实值,所以实验通过 200 次的重复测量的均值来标定真实值。表 1 的数据表明,高斯拟合寻峰的波峰强度和 3 dB 带宽误差相比于直接寻峰有明显的降低,但是中心波长的误差保持一致。然而经过 Gaussian-LM 拟合寻峰,波峰强度、3 dB 带宽与高斯拟合寻峰的误差保持在相同的水平,相比与直接寻峰同样有明显的降低。

表 1 三种寻峰方法获取的光谱特征对比

Table 1 Comparison of the spectral features obtained by the three methods

Feature	True value	Direct seeking	Gaussian	Gaussian-LM
Central wavelength /nm	1550.032	1550.114	1550.114	1550.036
Power /mW	0.149366	0.133219	0.149219	0.150254
3 dB bandwidth /nm	0.271365	0.255652	0.275244	0.275222

图 4 中将最重要的特征值即中心波长的实验数据与真实值进行对比,经过 Gaussian-LM 拟合寻峰后,中心波长的误差也由 0.2 nm 降低到了 0.03 nm 以内,并且采样数据的方差明显降低,测量的稳定性有了极大的提高,说明光谱的噪声大部分得到滤除,尤其中心波长检测误差的降低对基于波长解调原理的光纤布拉格光栅传感系统有重要作用,并且能降低寻峰精度对于大量重复实验的依赖,从较少的光谱数据中得到更高的波长解调精度,减少波长解调系统的资源和时间的浪费。

6 结 论

提出了一种基于 LM 优化的高斯寻峰算法,通过 LM 算法优化高斯函数系数,进而对 FBG 的反射光谱进行更精确的高斯拟合,获得了更精确的中心波长、波峰强度、3 dB 带宽等光谱特征。通过实验数据分析可得,经过 LM 算法优化后的 Gaussian-LM 算法能够提高 FBG 反射谱中心波长解调系统的精度和稳定性,并且能以较少的光谱数据获得更高的中心波长解调精度,实验表明中心波长的误差由 ± 0.2 nm 降低到 ± 0.03 nm。该系统减少 FBG 反射光谱的中心波长检测系统的资源消耗,具有重要的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, *et al.* Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405005.
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405005.
- [2] Zhang Xin, Yang Zhi, Li Qianglong, *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. 啁啾光纤光栅的温度调谐特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505002.
- [3] Chen Yong, Wang Kun, Liu Huanlin, *et al.* Processing FBG sensing signals with three-point peak-detection algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2751-2756.
陈 勇, 王 坤, 刘焕淋, 等. 三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2751-2756.
- [4] Chen Zhijun, Bai Jian, Wu Zutang, *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.
- [5] Lin Y Z, O'Malley D, Vesselinov V V, *et al.* A computationally efficient parallel Levenberg-Marquardt algorithm for highly parameterized inverse model analyses[J]. Water Resources Research, 2016, 52(9): 6948-6977.
- [6] Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage detection based on long-gage fiber Bragg grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010604.
田石柱, 温 科, 王大鹏. 基于长标距 FBG 传感器宏应变技术的损伤识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51

- (1): 010604.
- [7] Zhao R X, Fan J Y. Global complexity bound of the Levenberg-Marquardt method[J]. Optimization Methods & Software, 2016, 31(4): 805-814.
- [8] 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.
- [9] Su Juan, Dong Xiaopeng, Shi Zhidong. Design of the sensitivity enhanced strain sensor based on fine transmission spectrum of FBG[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805002.
苏娟, 董小鹏, 石志东. 基于FBG精细谱的应变增敏型传感器的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805002.
- [10] Wang Qiaoni, Yang Yuanhong. A FBG spectrum peak detection technique based on Steger image algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810004.
王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810004.
- [11] Wang Peng, Zhao Hong, Liu Jie, *et al.* Dynamic real-time calibration method for fiber grating wavelength demodulation system based on tunable Fabry-Perot filter[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806006.
王鹏, 赵洪, 刘杰, 等. 基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806006.
- [12] Haddout S, Rhazi M. Levenberg-Marquardt's and Gauss-Newton algorithms for parameter optimisation of the motion of a point mass rolling on a turntable[J]. European Journal of Computational Mechanics, 2015, 24(6): 302-318.
- [13] Zhou Peng, Zhang Wenbin, Wang Junxing, *et al.* Peak detection algorithm of optical fiber SPR signal based on the Gaussian fitting[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(6): 1949-1953.
周鹏, 张文斌, 王军星, 等. 基于高斯拟合的光纤型 SPR 信号的峰值检测算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(6): 1949-1953.