

基于小波变换的高斯曲线拟合在峰值定位中的应用

翟新伟, 李志斌

(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对低速解调仪采样获得光纤布喇格光栅反射光谱解调精度低的缺点, 采用了一种基于小波变换的高斯(WTG)曲线拟合方法。利用小波变换对反射光谱信号进行分解, 对小波细节分量进行阈值量化处理, 在此基础上, 运用处理后的细节分量和近似分量对信号进行重构; 然后对重构后的信号插值并进行高斯曲线拟合, 使用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法优化高斯拟合系数。仿真实验结果表明: 与直接寻峰算法、高斯拟合算法相比, WTG 算法的峰值定位误差最小, 解调精度更高。

关键词: 光纤布喇格光栅; 小波变换; 峰值定位; LM 算法; 高斯拟合

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)02-0010-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of wavelet transform-based Gauss curve fitting in peak positioning

ZHAI Xinwei, LI Zhibin

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To overcome the disadvantage of low demodulation accuracy of reflective spectrum of fiber Bragg grating sampled by portable demodulator, a wavelet transform-based Gaussian (WTG) curve fitting method is introduced. The reflection spectrum signal is decomposed by wavelet transform, and the wavelet detail component is quantized by threshold. On this basis, the signal is reconstructed by the processed detail component and approximate component. Then, the reconstructed signal is interpolated to fit the Gauss curve, and the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm is used to optimize the Gauss fitting coefficient. The simulation results show that the WTG algorithm has the smallest peak positioning error and higher demodulation accuracy compared with the direct peak seeking algorithm and the Gauss fitting algorithm.

Key words: fiber Bragg grating; wavelet transform; peak positioning; Levenberg-Marquardt algorithms; Gauss fitting

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)传感器^[1]具有灵敏度高、抗电磁干扰、重复性好以及适应性强等优点,被广泛应用于测温系统^[2]、应变测量系统^[3]和位移检测^[4]等。由于 FBG 是波长调制型传感器,对于外界参数的检测被转换成对 FBG 传感器反射光谱中心波长的检测,而光谱中心波长值又对应于反射光谱的峰值,所以 FBG 解

收稿日期: 2019-07-13。

基金项目: 上海市电站自动化技术重点实验室项目 (13DZ2273800)资助。

作者简介: 翟新伟(1995-),男,硕士生,现就读于上海电力大学自动化工程学院电气系统检测与控制专业,主要从事光纤光栅反射光谱的解调研究,包括交叉敏感问题、峰谱重叠问题等,侧重于提高反射光谱的解调精度,提高光纤利用率。



调系统的核心在于反射光谱的峰值定位,因此高精度的寻峰算法是解调系统的关键。目前,常见的寻峰算法有直接寻峰(DP)法、质心探测法^[5]、三点寻峰法和高斯拟合法^[6-8]。其中,DP 法易于操作,但对于光谱的采样点数要求较高,而便携式解调仪一般采样点数较少,采用 DP 法解调精度较低;三点寻峰法在寻峰精度上有一定的提高,但在寻峰过程中未考虑谱峰的不对称特性;高斯拟合是目前解调精度较高的算法,但是对光谱谱形要求严格。

在 FBG 解调系统中,由于检测环境、机器设备等影响,反射光谱中包含了许多噪声,因此对反射光谱解调的第一步就是对信号进行降噪处理,而降噪的效果会直接影响解调的精度。为了提高寻峰精度^[9-11],本文提出基于小波变换^[12-15]的高斯(WTG)曲线拟合法。

1 小波变换处理反射光谱信号

1.1 小波降噪基本原理

假设观察信号为:

$$x(n)=s(n)+u(n) \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 是含噪信号, $s(n)$ 是有用信号, $u(n)$ 是噪声序列。假定 $u(n)$ 是服从 $N:(0,\sigma_2^2)$ 分布的高斯白噪声,对于式(1)的信号进行正交小波变换后,最大程度地去除了 $s(n)$ 的相关性,其能量将集中在少数的小波系数上,这些系数就是在各个尺度下的模极大值。由于平稳白噪声的正交小波变换仍然是平稳的白噪声,因此,其小波系数仍然是互不相关的,它们将分布在各个尺度下的所有时间轴上。只要在小波变换后的各个尺度下保留那些模极大值,而将其它点置零,或是最大程度地减小,然后利用处理后的小波系数做小波反变换,就可以得到降噪后的信号。

1.2 小波阈值及阈值函数的选取

小波降噪的关键在于小波阈值以及阈值函数的选取,二者将直接关系到信号重构的连续性和精度。小波阈值函数分为硬阈值函数和软阈值函数,式(2)为硬阈值函数,式(3)为软阈值函数。

$$\omega_\lambda = \begin{cases} \omega, & |\omega| \geq \lambda \\ 0, & |\omega| < \lambda \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_\lambda = \begin{cases} [\text{sign}(\omega)] (|\omega| - \lambda), & |\omega| \geq \lambda \\ 0, & |\omega| < \lambda \end{cases} \quad (3)$$

其中, ω 是小波系数的大小, ω_λ 是施加阈值后的小波系数大小, λ 是阈值。从式(2)可以看出,硬阈值是一种简单的置零方法,在处理信号过程中,易发生抖动现象;式(3)中的软阈值对大于阈值的小波系数作“收缩”,从而使处理后的曲线更加光滑。为了使降噪后曲线更方便进行高斯拟合,本文采取软阈值处理

1.3 小波基和分解层数的选取

不同的小波基以及分解层数对信号的去噪效果是不同的,Daubechies 小波具有紧支、正交和连续等优点^[6],Symlets 小波的构造类似于 Daubechies 小波,主要的区别在于 Symlets 小波具有更好的对称性,能够减少重构时的相移,因此本文选取 Symlets 小波。

图1是在相同分解层数(6层)下,Symlets 小波系(Sym5~Sym8)对反射光谱信号进行降噪重构后的光谱图。可以看出,采用 Sym5 小波函数进行降噪重构后,信号仍保留太多谱峰信息,降噪效果较差;Sym7 和 Sym8 扣除太多谱峰信息,导致重构信号谱峰抖动较大。综上考虑,本文选取 Sym6 作为小波基函数,既能

够保留光谱中的有用信号,又可以较好地去除噪声干扰。

图2是利用 Sym6 小波在不同分解层数下的重构信号图,当分解层数为5层时,反射光谱信号仍保留太多的原始信息,不利于高斯拟合;当分解层数超过6层时,其对重构信号的影响几乎不变。因此,为了降低算法的复杂度,最适合的分解层数为6层。

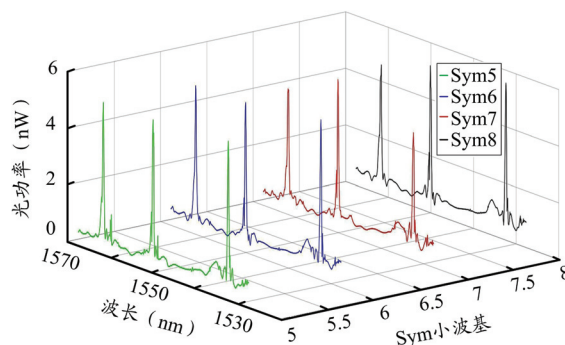


图1 光谱信号在分解层数为6时经不同小波处理后的重构信号图

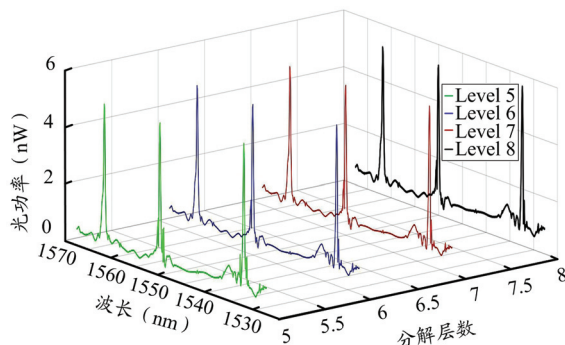


图2 光谱信号在 Sym6 小波不同层数下的重构信号图

2 改进高斯曲线拟合算法

FBG 反射光谱具有窄带、反射率高和边模抑制比高的特点,其反射光谱理论上强度最大值位于中心波长处,并以中心波长为轴左右对称,这与高斯曲线模型十分相似^[7]。高斯拟合的原理是最小化其均方差,当波长分辨率和信噪比相同时,高斯曲线拟合误差最小,因此用高斯曲线对光谱进行拟合可以得到更优的光谱信号。高斯曲线拟合 FBG 反射光谱信号的具体形式为:

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

其中, I 是反射光谱的强度峰值; λ_s 为中心波长值; I_0 为中心波长为 λ_s 时对应的光谱强度峰值; $\Delta \lambda_s$ 为反射光谱 3 dB 带宽。从式(4)中不难发现,高斯曲线拟合的关

键在于 I_0 、 λ_s 和 $\Delta\lambda_s$ 参数的确定,参数的准确与否将直接影响寻峰的精度。一般通过直接高斯拟合获得的参数由于受到噪声和采样率的影响,误差较大,寻峰精度较低。本文引入 Levenberg-Marquardt (LM) 算法,将直接拟合获得的参数作为 LM 算法的初值,通过 LM 算法迭代优化后获得新的高斯参数。

LM 算法属于信赖域算法^[18-20]的一种,它介于高斯-牛顿法和梯度下降法之间,既具有高斯-牛顿法的局部收敛特性,也具有梯度下降法的全局性特点,其数学模型为:

$$\begin{cases} \min m_k(s) = f_k + g_k^T s + \frac{1}{2} s^T G_k s \\ \text{s.t. } \|s\|_2 \leq h_k \end{cases} \quad (5)$$

其中, $m_k(\cdot)$ 、 $f_k(\cdot)$ 和 g_k 依次表示第 k 次迭代的预测函数、目标函数和梯度函数, T 表示转置, s 为位移量, G_k 为 Hesse 矩阵, h_k 为第 k 次迭代的信赖域上界(信赖域半径)。

由于 LM 算法需要对每个待估参数求偏导,因此目标函数 $f(\cdot)$ 不能过于复杂,待估参数控制在 5 个以内,通过 LM 算法对高斯曲线拟合参数进行优化,其待优化参数数量为 3 个,分别是中心波长值 λ_s 、中心波长为 λ_s 时对应的光谱强度峰值 I_0 以及反射光谱 3 dB 带宽 $\Delta\lambda_s$ 。

在 LM 算法优化中,其函数关系为式(4),迭代次数为 1000 次,迭代初始步长 s 根据 A 矩阵对角线最大值来设定,其中 $A=J' \times J$, J 是雅可比矩阵。具体寻峰步骤具体如图 3 所示。

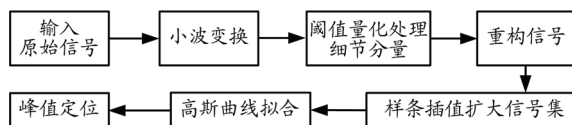


图 3 改进高斯拟合寻峰流程图

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

本文对 WTG 曲线拟合在峰值定位中的应用进行了实验,实验平台包括:3 根 KNPDT-1 型光纤光栅通用温度传感器,中心波长分别为 1533.684 nm、1549.672 nm 和 1561.696 nm;VST.R-95A 型标准恒温水槽;KingYeeM02 型光纤光栅便携式解调仪,其扫描频率为 1 Hz,工作带宽为 1528~1568 nm,精度为 5 pm,分辨率为 0.1 pm,波长稳定性为 0.5 pm。

3.2 相同温度下(70 °C)寻峰算法比较

本文将 FBG1、FBG2 和 FBG3 温度传感器置于

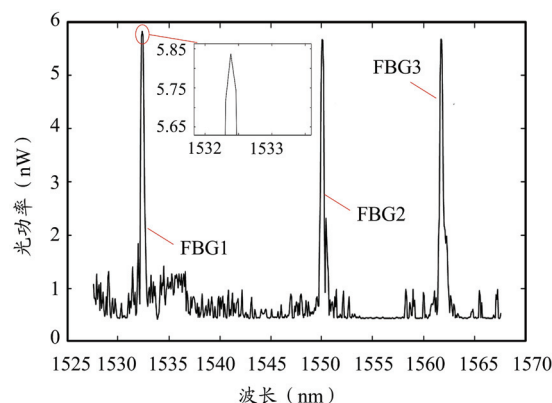


图 4 70 °C 下 FBG 反射光谱图

70 °C 恒温水槽所采集到的反射光谱图如图 4 所示。由于解调仪采样速率较低,导致峰值处采样点较少,解调精度较低。分别使用 DP 法、高斯拟合法以及本文提出的 WTG 法进行寻峰。

70 °C 下 3 种寻峰方法的误差对比情况如表 1 所示。可以看出,在 70 °C 下,DP 法的误差在 15 pm 左右,对应温度误差在 1.5 °C 左右;而高斯拟合法误差虽然降低了,但仍在 10 pm 左右,对应温度误差在 1 °C;本文提出的 WTG 法误差最小,小于 5 pm。

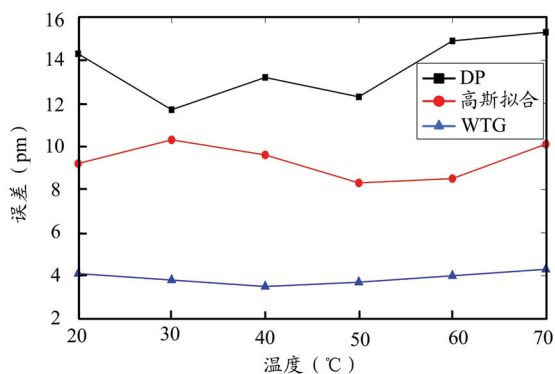
表 1 70 °C 下 3 种寻峰方法误差对比

标定值及 寻峰方法	FBG1		FBG2		FBG3	
	中心波长 (nm)	误差 (pm)	中心波长 (nm)	误差 (pm)	中心波长 (nm)	误差 (pm)
标定值	1534.1817	0	1550.1740	0	1562.1989	0
DP	1534.197	15.3	1550.1872	13.2	1562.2135	14.6
高斯拟合	1534.1918	10.1	1550.1834	9.4	1562.2075	8.6
WTG	1534.186	4.3	1550.1777	3.7	1562.2035	4.6

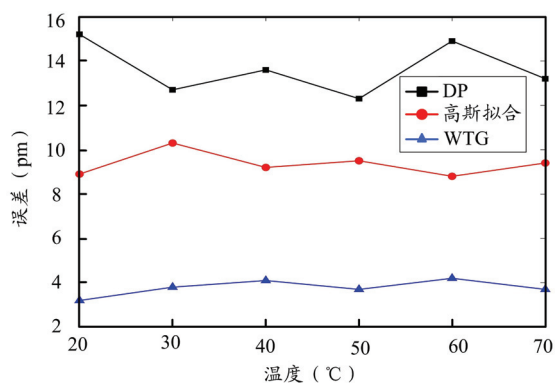
3.3 不同温度下寻峰算法比较

为了进一步验证 WTG 算法的可行性,本文针对 20 °C~70 °C 的温度范围,每 10 °C 采集一组反射光谱,并对反射光谱分别用 DP 法、高斯拟合法以及 WTG 法进行寻峰,得到的结果如图 5 所示。

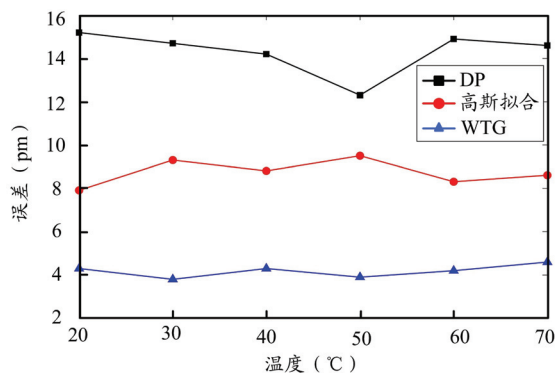
从图 5 可以看出,在不同温度下,DP 法寻峰误差在 15 pm 左右,其解调精度为 ± 1.5 °C;高斯拟合法的寻峰误差在 10 pm 左右,其精度为 ± 1.0 °C;而 WTG 算法的寻峰误差在 5 pm 左右,其精度可达到 ± 0.5 °C。因此,本文提出的 WTG 算法在应对低速率采样解调精度较差的问题上是可行的,在保证解调仪实时性的条件下,可以有效地提高低速率解调仪的解调精度。



(a) FBG1 误差分析图



(b) FBG2 误差分析图



(c) FBG3 误差分析图

图5 不同温度下3种方法误差曲线

4 结束语

本文提出了一种 WTG 曲线拟合峰值定位算法,对低速率采样的便携式解调仪反射光谱进行解调,有效地提高了解调精度。本文在相同温度(70 °C)下,采用 DP 法、高斯拟合法以及本文提出的 WTG 算法对 3 根 FBG 反射光谱进行寻峰,实验结果证明:在相同温度下,WTG 算法寻峰误差最小。为了进一步验证 WTG 算法的可行性,同样是采用 DP 法、高斯拟合法以及 WTG 算法,本文在不同温度下对 3 根 FBG 反射光谱

进行寻峰,实验结果证明:依然是 WTG 算法的寻峰精度较高,误差在 5 pm 以下,实际温度误差在 ± 0.5 °C。因此,本文提出的 WTG 曲线拟合峰值定位算法对低速率解调仪反射光谱的解调具有参考价值,可以有效提高解调精度。

参考文献:

- [1] 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):147-150.
- [2] 王琳慧,贾丹平,于洋,等.基于光纤光栅的电机温度测量系统的研究[J].仪表技术与传感器,2019(4):48-51.
- [3] 常莹.航天液体发动机光纤应变测量技术应用研究[J].中国计量,2019(6):71-75.
- [4] 刘国卫,王军涛,凌骐,等.一种新型光纤光栅位移传感器的研制[J].工业仪表与自动化装置,2018(5):119-121.
- [5] 陈志军,白剑,吴祖堂,等.光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J].光子学报,2015,44(11):83-88.
- [6] 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.
- [7] 郭晓彤,杨秋翔.基于FPGA状态机非对称高斯拟合寻峰算法的研究[J].电子设计工程,2018,26(1):161-165.
- [8] WEN Xiaoyan, ZHANG Dongsheng, QIAN Yu, et al. Improving the peak wavelength detection accuracy of Sn-doped, H₂-loaded FBG high temperature sensors by wavelet filter and Gaussian curve fitting[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2012(174): 91-95.
- [9] 赵欣丹,张小栋,侯成刚,等.光纤光栅传感信号解调技术研究[J].电子测量技术,2017,40(10):1-7.
- [10] 高卓婷.提高光纤光栅解调系统测量精度的方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [11] 郭衬村.光纤光栅传感解调系统研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [12] 王梦樱,冯茗杨,于杰.小波阈值降噪在GPS伪距单点定位中的应用[J].全球定位系统,2019,44(2):121-126.
- [13] 梁利利,高楠,李建军.基于小波变换和均值滤波的图像去噪方法[J].计算机与数字工程,2019,47(5):1229-1232.
- [14] 刘忠,周云贵,邹淑云,等.水轮机空化声发射信号的提升小波改进阈值降噪方法研究[J].水力发电,2019,45(8):85-89,98.
- [15] 彭怀敏,张超,倪演海,等.基于小波变换的OTDR降噪算法研究[J].光通信技术,2019,43(7):17-20.
- [16] 张德丰. MATLAB 小波分析[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [17] 李宁,王东,王宇,等.曲线拟合算法对光纤光栅传感解调性能的影响研究[J].传感技术学报,2019,32(5):711-714.
- [18] KOZIEL Slawomir. Improved trust - region gradient - search algorithm for accelerated optimization of wideband antenna input characteristics[J]. International Journal of RF and Microwave Computer - Aided Engineering, 2019, 29(4): 1-7.
- [19] SAEED Rezaee, SAMAN Babaie-Kafaki. An adaptive nonmonotone trust region algorithm [J]. Optimization Methods and Software, 2019, 34(2): 264-277.
- [20] 卢晓宁.无导数优化的信赖域算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2018.