

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513708

基于 VMD 融合降噪的 FBG 光谱寻峰算法*

潘红宇¹, 吕 峥¹, 欧建臻^{1,2}, 徐春锋¹, 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016;
2. 北京信息科技大学北京市光电测试技术重点实验室 北京 100192)

摘 要:针对基于 CCD 的光谱衍射法对光纤布拉格光栅解调过程中受到噪声干扰,导致 FBG 中心波长解调精度和稳定性降低的问题,提出了一种基于变分模态分解的 VMD-WT-SG 融合降噪算法。通过结合不同降噪算法的优势以及算法参数的调整,实现了对光谱信号中噪声成分的有效去除,在保留原始信号大部分特征的同时光谱波形更加平滑和连续,降噪效果明显。与传统的 VMD 降噪、SG 降噪、Kalman 滤波 3 种方法对比,经 VMD-WT-SG 融合降噪法处理后的光谱信噪比为 20.14 dB,均方根误差为 0.017,信噪比分别提升了 23.94%、41.14% 和 94.97%,均方根误差分别降低了 39.29%、45.16% 和 67.92%,在 4 种降噪方法中效果最好。为了提高解调速率,在常用寻峰算法的基础上,提出了一种针对降噪后多峰光谱的中垂线相交寻峰算法,通过计算峰值点与左、右次大值点连线的中垂线的交点坐标来求取中心波长。并通过实验与多项式拟合、质心、高斯拟合算法对比了寻峰精度。结果表明提出的算法平均寻峰偏差为 3.3 pm,优于质心法与多项式拟合法,算法平均运行时间为 0.261 ms,优于多项式拟合法和高斯拟合法。实时应用中在保证精度的同时解调速率可达 4 kHz,同时该算法的稳定性较好,解调的波长平均标准差为 1.8 pm,能够满足实际应用的需求,对 FBG 传感网络中的多峰值实时快速检测具有一定的参考价值。

关键词: FBG 传感; VMD 分解; 光谱降噪; 寻峰算法

中图分类号: TH74 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

A FBG spectral peak-finding algorithm based on VMD fused noise reduction

Pan Hongyu¹, Lyu Zheng¹, Ou Jianzhen^{1,2}, Xu Chunfeng¹, Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 2. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To address the noise interference during the demodulation of fiber Bragg grating (FBG) by the CCD-based spectral diffraction method, which leads to the reduction of the demodulation accuracy and stability of FBG center wavelength, a fusion noise reduction algorithm based on the variational mode decomposition (VMD-WT-SG) is proposed. By combining the advantages of different noise reduction algorithms and adjusting algorithm parameters, the effective removal of noise components in the spectral signals is realized. The spectral waveforms are smoother and more continuous while retaining most of the features of the original signals, and the noise reduction effectiveness is obvious. Compared with the traditional three methods, such as the VMD noise reduction, the SG noise reduction, and the Kalman filter, the spectral SNR of the spectral signal-to-noise ratio processed by the VMD fusion noise reduction method (VMD-WT-SG) is 20.14 dB, and the root-mean-square error is 0.017. The signal-to-noise ratio is improved by 23.94%, 41.14%, and 94.97%, respectively. The root mean square error is reduced by 39.29%, 45.16%, and 67.92%, respectively. It is the best among the four noise reduction methods. To improve the demodulation rate, an intersection peak-finding algorithm is proposed for the noise-reduced multi-peak spectra based on the commonly used peak-finding algorithm. The center wavelength is obtained by calculating the coordinates of the intersection of the peaks with the intersection of the left and right sag lines of the next largest points. The peak-finding accuracy is compared with the polynomial fitting, the center-of-mass, and the Gaussian

收稿日期: 2025-01-20 Received Date: 2025-01-20

* 基金项目: 北京学者计划研究项目 (BJXZ2021-012-00046) 资助

fitting algorithms through experiments. The results show that the average peak-finding deviation of the proposed algorithm is 3.3 pm, which is better than that of the center-of-mass and the polynomial fitting. The average running time of the algorithm is 0.261 ms, which is better than those of the polynomial fitting and the Gaussian fitting. In real-time applications, the demodulation rate can reach 4 kHz while ensuring accuracy. Meanwhile, the algorithm has good stability, the average standard deviation of the demodulated wavelengths is 1.8 pm, and it can meet the requirements of practical applications, which has some reference values for the fast multi-peak real-time detection in the FBG sensing networks.

Keywords: FBG sensing; VMD decomposition; spectral noise reduction; peak searching algorithm

0 引 言

近年来,随着光通信与传感技术的迅猛发展,光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)得到了广泛的应用^[1]。该技术集传输和传感为一体,具有体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀、绝缘性好以及易于组建传感网络等优势^[2]。能够感知温度、应变、压力参量,实现对这些参量的实时动态监测^[3]。在结构健康监测^[4]、航空航天^[5]、生物医学^[6]、电力系统^[7]等领域发挥重要作用。

在进行FBG传感时,待测参量的变化会使FBG反射谱的中心波长发生改变,从而产生波长漂移。通过实时追踪FBG反射谱的中心波长,根据中心波长与待测物理量之间的对应关系即可间接得到参量的变化情况。常用的FBG解调方法主要有光谱仪检测法、匹配光栅法、边缘滤波法、扫描光源法、基于电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)的CCD光谱衍射法等。CCD光谱衍射法由于具有高灵敏度、测量范围大、解调速度快等优点,使其在实时监测领域中至关重要,被广泛应用于FBG解调系统。但是在基于CCD的解调系统中,CCD器件和解调电路元件会由于其本身的噪声以及外部环境的影响,常常导致采集的光谱中含有噪声,进而影响到中心波长的解调精度和稳定性。因此,对基于CCD解调法采样光谱信号的降噪研究成为提升解调精度的关键。

小波降噪法^[8-9]是目前应用较为广泛的降噪算法,韩超等^[10]提出了一种基于小波降噪的FBG高精度解调算法,对降噪处理后的光谱进行运算,使得波长解调的最大标准差 <1.67 pm,大幅提升了解调精度,但是存在阈值选择困难、小波基函数选择困难的问题。卡尔曼(Kalman)滤波^[11]具有良好的实时性和稳定性,但是计算复杂度高。SG(Savitzky-Golay)滤波^[12]能够很好的保留信号的特征,提高信号的信噪比,但是存在边界效应和参数选择复杂的问题。经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[13]适应性强,简单易用,但存在模态混叠的问题。滑动滤波^[14]原理简单,灵活性高,但是存在窗口大小选择复杂和边界信息丢失的问题。变分模态分解^[15](variational mode decomposition, VMD)通过其变分框架和参数优化能够抑制能量泄露和边界效应,

且参数选取合适时受到模态混叠的影响很小,此外相比于需要对多帧进行滑动计算的滤波算法,VMD可以直接对单帧光谱数据进行滤波操作,降低了滞后性,更适合实时系统。由于不同降噪算法各具特点,在实际应用中需根据光谱信号的特征进行针对性选择。根据目前的研究结果来看,单一的降噪算法往往具有局限性,容易导致有效信号的损失或过度平滑,降噪效果有待提高。

在对光谱降噪处理之后,为了精确计算FBG的中心波长,一般需要先设立分峰阈值,得到各反射峰大致位置,然后使用寻峰算法对光谱数据进行寻峰计算,最终得到各峰对应的中心波长。因此寻峰算法的精度也直接影响了了解调系统的解调精度。目前常用的寻峰算法主要有直接寻峰法、多项式拟合法、质心法、高斯拟合法等^[16-17]。直接寻峰法最为简捷,但是误差较大;多项式拟合法解调时对采样数据的依赖性较大,且抗噪性能不佳;质心法的解调速度很高,但是容易受到噪声和波形不对称的影响;高斯拟合法的解调精度相对较高,但是计算速度较慢。在这些常用寻峰算法的基础上,胡正文等^[18]使用Gaussian-LM(Levenberg-Marquardt)算法对反射谱进行中心波长的计算,对高斯曲线拟合系数进行优化之后寻峰,有效减少了噪声干扰问题。实验结果显示该方法可以有效减小寻峰误差,中心波长的误差由0.2 nm降低到了0.03 nm以内。苏建洪等^[19]使用卡尔曼-滑动均值混合滤波对原始光谱进行去噪滤波处理,然后采用自适应多峰值区域判别,结合双质心寻峰算法实现了多个FBG的快速解调,实验结果表明FBG温度传感器的中心波长解调精度可达 ± 3 pm。解调系统的精度与降噪算法和寻峰算法密切相关,且有效的降噪往往是后续能否精准寻峰的前提。

当前单一的降噪算法去噪效果一般,不能很好的结合各自算法的优势,平衡信号特征保留与噪声抑制,实现最佳的降噪效果。且使用寻峰算法对中心波长进行拟合计算时往往需要进行大量数学拟合计算,运算时间较长,解调的效率与实时性有待提高。针对这个问题,提出了基于VMD分解的融合降噪寻峰算法,结合不同降噪算法的优势对光谱进行融合降噪处理,有效对光谱中的噪声分量处理,保留原始信号特征。接着采用中垂线相交寻

峰算法进行寻峰计算,根据数形结合的思想只需3点即可快速计算出中心波长,相比传统寻峰算法计算量大大减小,提升了解调速率。通过仿真与实验验证了该算法可以保证解调的精度、速度和稳定度,为实时物理量的多峰值检测提供及时可靠的信息。

1 基于VMD融合降噪的寻峰原理

1.1 CCD解调原理

FBG是一种通过紫外激光在光纤纤芯内形成周期性折射率调制结构的光纤器件,能够反射特定波长的光而透射其他波长。当入射光谱经过FBG,会将其中满足布拉格条件的中心波长 λ_B 反射出去, λ_B 满足条件如式(1)所示。

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中: η_{eff} 为光纤纤芯区有效折射率; Λ 为光纤布拉格光栅的周期。 η_{eff} 和 Λ 会随着外界环境温度和应变的改变而变化,从而导致中心波长 λ_B 的数值发生改变,根据 λ_B 数值的改变量就能间接的得到待测物理量的变化,实现传感的目的,因此对中心波长进行精准的解调是整个解调系统的关键。

CCD光谱解调法^[20]主要基于衍射光栅和线阵CCD探测器原理,解调原理如图1所示,宽带光源发出的入射光经光纤耦合器进入到FBG传感器,经过FBG反射后,含有传感信息的反射光经过准直透镜后入射到衍射光栅上,经过色散处理,将入射信号中含有不同波长信息的光经聚焦透镜成像到CCD线阵光电探测器上,得到FBG反射谱的光强分布信息,CCD阵列上的每个像素点都对应着一种特定波长光的光强。然后经过光电转换,将测量出的光谱输送至上位机进行信号处理与计算分析,通过寻峰算法实现中心波长的解调计算。根据计算出的中心波长的变化,间接的得到待测参量的变化,从而实现FBG传感^[21-22]。

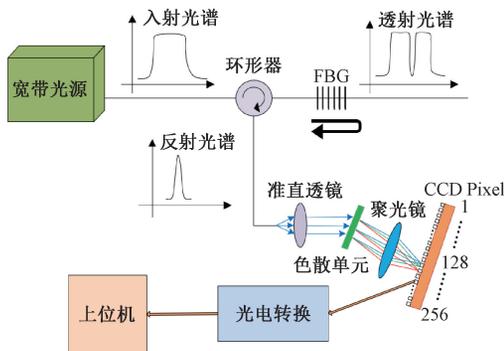


图1 CCD解调原理

Fig. 1 The principle of CCD demodulation

1.2 VMD融合降噪原理

变分模态分解^[23]是由Konstantin Dragomiretskiy和Dominique Zosso在2014年提出的一种完全非递归的自适应信号分解估计方法,能够自适应实现噪声信号的频域剖分及各噪声信息分量的有效分离,实现信号降噪。VMD的分解过程本质上是变分问题的求解过程,主要步骤为:首先建立约束变分模型如式(2)所示。然后根据扩展拉格朗日展开式(Lagrange)得到约束变分模型的最优解,最后迭代求解,确定惩罚因子 α 和分解模态数 K ,当满足收敛条件则停止迭代,获得 K 个IMF分量,完成光谱信号的VMD分解。最后通过相关模态筛选机制,选择不含噪声的IMF分量进行重构,达到降噪的目的。

$$\left(\begin{array}{l} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left\{ \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] u_k(t) \right\} e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = f \end{array} \right) \quad (2)$$

式中: $u_k(t)$ 为本征模态函数分量(intrinsic mode function, IMF); f 是光谱信号; k 为迭代次数; K 为分解模态数; $\delta(t)$ 为冲激函数; ω_k 为每个分量的中心频率;s. t.表示约束条件。

运用小波变换(wavelet transform, WT)进行光谱降噪效果好,适用范围广,信号的原始特征能够较好的保留。在对信号进行小波降噪时,可以根据光谱信号的特点调整小波基函数、分解层数、阈值、阈值函数等几个关键参数,实现对光谱信号的分解与重构,最终达到降噪的目的。

SG滤波器是一种移动窗口的加权平均算法,在光谱预处理中常使用该方法进行平滑滤波,以提高光谱的平滑性,降低噪声的干扰。在滤波时根据信号的特点选择合适的窗口大小和多项式阶数,完成对信号的平滑处理。

通过结合上述3种降噪算法的特点,提出了一种基于变分模态分解的VMD-WT-SG融合降噪算法,降噪具体步骤为:1)根据经验设置惩罚因子 α 和分解模态数 K 的最佳参数对光谱信号进行VMD分解,得到不同的IMF分量。2)计算IMF分量的方差贡献率,即每个IMF分量对原始光谱信号方差的贡献程度。将所有IMF分量的方差贡献率的平均值设为阈值,方差贡献率大于阈值的IMF分量被认为是信号主导成分,予以保留,方差贡献率小于阈值的IMF分量被认为是噪声主导成分,进行小波降噪处理。3)将小波降噪处理后的IMF分量与含信号主导成分的IMF分量进行信号重构,并对重构后的信号进行SG平滑滤波处理。融合降噪算法流程如图2所示。

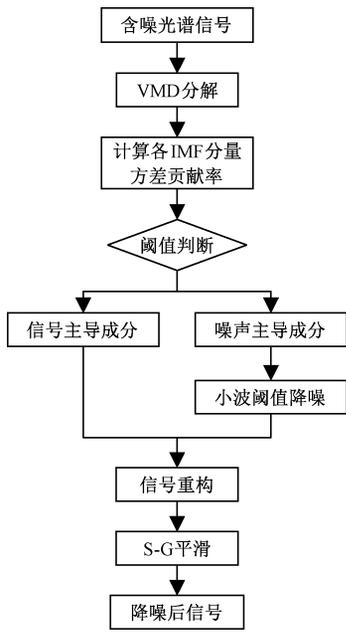


图 2 融合降噪原理

Fig. 2 The principle of fusion denoising

1.3 中垂线相交寻峰算法原理

针对降噪后的 FBG 反射光谱,为提高解调计算的速率,提出了一种中垂线相交寻峰算法,在对光谱数据进行融合降噪处理之后,采用数形结合的思想分别求得峰值点与左、右次大值点连线的中垂线,之后快速计算出 2 条中垂线的交点坐标,交点横坐标即视为光纤光栅的中心波长。具体计算过程为:设峰值点 A 坐标为 (x_1, y_1) ,左侧的次大值点 B 坐标为 (x_0, y_0) ,右侧的次大值点 C 坐标为 (x_2, y_2) 。首先求出线段 AB 的斜率 k_1 和线段 AC 的斜率 k_2 ,由直线的两点式方程可知斜率计算结果如式(3)所示。

$$\begin{cases} k_1 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \\ k_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \end{cases} \quad (3)$$

接着求出线段 AB 的中点坐标 m_1 和线段 AC 的中点坐标 m_2 ,由中点坐标公式求出结果如式(4)所示。

$$\begin{cases} m_1 = \left(\frac{x_1 + x_0}{2}, \frac{y_1 + y_0}{2} \right) \\ m_2 = \left(\frac{x_1 + x_2}{2}, \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

然后根据 2 条垂直的直线的斜率乘积为 -1 这个性质,可以得到线段 AB 的中垂线的斜率为 $-1/k_1$,线段 AC 的中垂线的斜率为 $-1/k_2$,联立求得的中点坐标 m_1 和 m_2 即可根据点斜式方程求出 2 条中垂线的一般式方程 L_1 和 L_2 分别如式(5)和(6)所示。

$$L_1: A_1x + B_1y + C_1 = 0 \quad (5)$$

$$L_2: A_2x + B_2y + C_2 = 0 \quad (6)$$

联立式(5)和(6)有唯一解,即中垂线交点的坐标 D , D 点的横坐标即为对应的光纤光栅的中心波长。中垂线相交寻峰算法原理如图 3 所示。

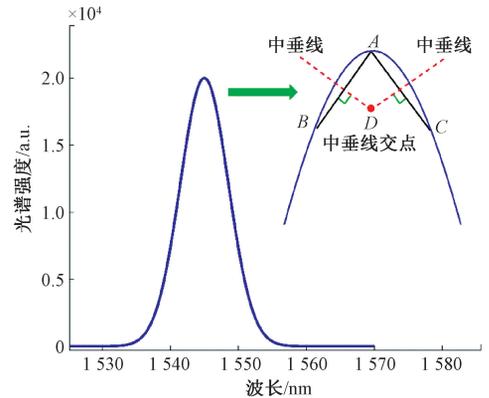


图 3 中垂线相交寻峰算法原理

Fig. 3 The principle of peak finding algorithm for intersecting perpendicular lines

中垂线相交寻峰算法采用数形结合的思想,通过光谱强度最大值点与左、右次大值点连线的中垂线相交,仅仅需要 3 点即可计算出中心波长,计算量小,易于实现,可以提升解调速度,适合实时应用。

2 仿真分析

2.1 VMD-WT-SG 融合降噪算法仿真

通过仿真探究融合降噪算法的性能,进而确定算法中的关键参数。首先对 CCD 解调法采集的原始光谱数据加入 20 dB 的高斯白噪声,接着使用融合降噪算法及其他几种降噪算法对光谱进行降噪处理,并根据信噪比和均方根误差 2 项指标来评价降噪效果。

CCD 器件使用的是 Ibsen 公司 256 pixels 的线阵光电探测模块,该模块包括了 256 个光敏元探测器,经过模数转换,得到 256 个采样点的强度值,从而获取到离散的原始光谱数据。

原始光谱中的传感器信号由 9 个 FBG 串联组成,将其反射谱作为原始光谱信号,加入 20 dB 高斯白噪声,从而模拟解调系统在实际工作过程中受到噪声影响的情况。如图 4 所示,噪声导致光谱信号产生畸变,使信噪比降低,影响寻峰的精度和稳定性。

采用 VMD-WT-SG 融合降噪算法对光谱信号进行降噪处理。首先使用 VMD 方法对含噪信号进行分解,在本算法中将惩罚因子 α 的数值设置为 1 000,分解模态数量 K 值设置为 5。分解结果如图 5 所示,包括 5 个 IMF 分量。对各 IMF 分量的方差贡献率进行计算,计算结果如表 1 所示。

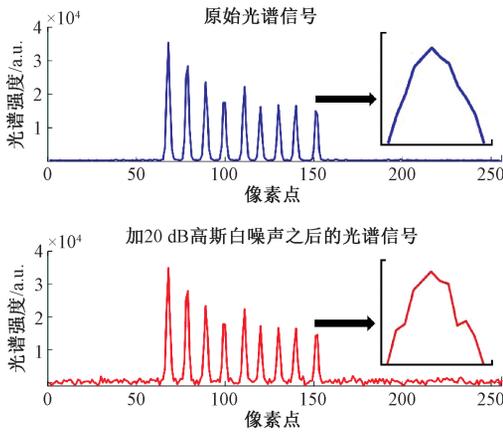


图4 原始光谱信号及含噪声光谱信号

Fig. 4 Original spectral signal and noisy spectral signal

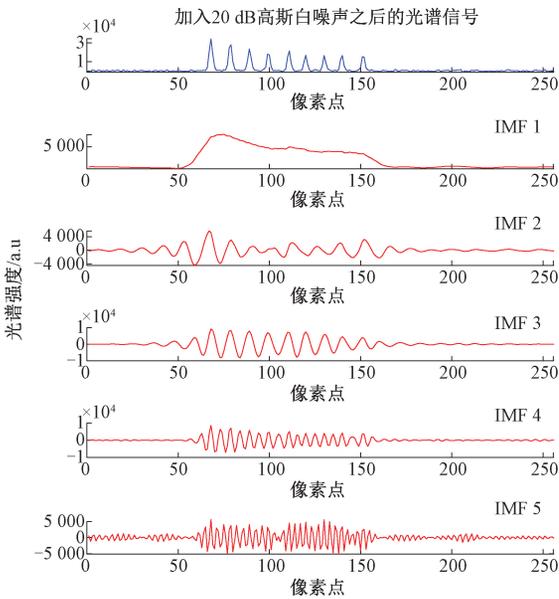


图5 VMD分解结果

Fig. 5 VMD decomposition results

表1 各IMF分量的方差贡献率

Table 1 The variance contribution rate of each IMF component

IMF 分量	方差贡献率/%	成分判断
IMF1	20	信号
IMF2	7	噪声
IMF3	35	信号
IMF4	30	信号
IMF5	8	噪声

导成分,低于平均值的 IMF 分量认定为噪声主导成分。对噪声主导成分的 IMF 分量进行小波降噪。在小波降噪过程中采用平滑性较好的 db4 小波基,分解层数设置为 5,阈值函数设置为 SURE,阈值设置为软阈值。SG 平滑滤波采取五点二次窗口平滑进行处理,完成融合降噪。仿真结果如图 6 所示,通过采用 VMD-WT-SG 融合降噪算法,能够有效去除信号中残留的高频噪声和波动,在保留原始信号大部分特征的同时波形更加平滑和连续,降噪效果明显。算法参数汇总如表 2 所示。

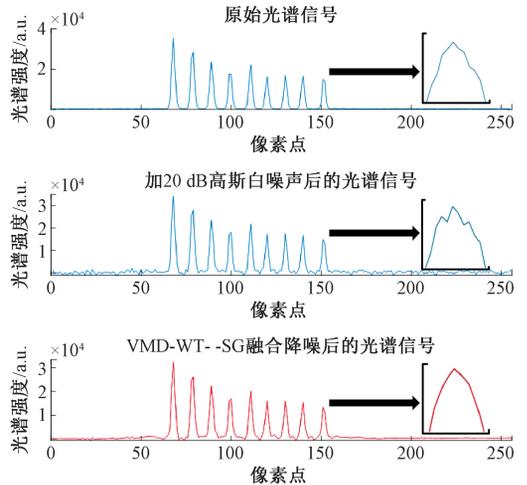


图6 VMD-WT-SG 融合降噪算法仿真结果

Fig. 6 Simulation results of VMD-WT-SG fusion denoising algorithm

表2 VMD-WT-SG 融合降噪算法参数

Table 2 The parameters of VMD-WT-SG fusion noise reduction algorithm

算法	参数	参数值
VMD	K	5
	α	1 000
WT	小波基	db4
	分解层数	5
	阈值函数	SURE
SG	阈值设置	软
	点数	5
	次数	2

为了验证融合降噪算法的性能,在同样加入 20 dB 高斯白噪声的情况下,采用 VMD-WT-SG 融合降噪和 VMD、SG 平滑、Kalman 3 种方法同时对光谱信号进行降噪处理,并进行对比分析。为了表征降噪算法的降噪效果,采用信噪比(signal to noise ratio, SNR)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来进行衡量。计算方式如式(7)和(8)所示。

然后对其进行阈值判断,阈值为所有 IMF 分量方差贡献率的平均值,高于平均值的 IMF 分量认定为信号主

经过计算,4种降噪方法的 SNR 和 RMSE 如表 3 所示。

$$SNR = 10 \times \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \right) \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (8)$$

式中: N 为信号长度; x_i 是降噪前信号; y_i 为降噪后信号。

表 3 不同算法的信噪比和均方根误差

Table 3 The signal-to-noise ratio and root mean square error of different algorithms

算法	SNR/dB	RMSE
VMD-WT-SG	20.14	0.017
VMD	16.25	0.028
SG	14.27	0.031
KALMAN	10.33	0.053

由表 3 可以看出,VMD-WT-SG 融合降噪算法处理后的光谱 SNR 最高,为 20.14 dB, RMSE 最低,为 0.017,具有最优的降噪效果。与其他 3 种降噪算法的性能作对比,相比于 VMD 降噪算法,SNR 提升了 23.94%,相比于 SG 滤波算法和 Kalman 滤波算法,SNR 分别提升了 41.14% 和 94.97%。相比于 VMD 降噪算法,均方根误差降低了 39.29%,相比于 SG 滤波算法和 Kalman 滤波算法,均方根误差分别降低了 45.16% 和 67.92%。

2.2 中垂线相交寻峰算法仿真

采用中垂线相交寻峰算法、质心法、高斯拟合法和二次多项式拟合算法计算光谱信号的峰值。计算出 9 个 FBG 在 300 帧光谱数据内的中心波长的平均值,并与中心波长的实际值进行比较,得到每个中心波长的偏差。然后计算出 9 个中心波长的平均偏差。结果如表 4 所示,高斯拟合算法的平均偏差最小,为 2.3 pm,精度最高;质心算法的偏差最大为 4.6 pm,精度最差;多项式拟合算法和中垂线相交算法的偏差分别为 3.4 和 3.1 pm,偏差接近,说明中垂线相交寻峰算法具有较高的精度,是一种有效的寻峰算法。

表 4 不同寻峰算法性能对比

Table 4 Comparison of performance of different peak-finding algorithms

寻峰算法	平均偏差/pm	平均标准差/pm	最长运行时间/ms	最短运行时间/ms	平均运行时间/ms
多项式拟合	3.4	1.9	10.178	6.794	9.206
高斯拟合	2.3	1.5	18.283	13.806	15.272
质心	4.6	3.2	0.211	0.083	0.117
中垂线相交	3.1	1.8	0.344	0.139	0.261

为了验证算法的稳定性,使用不同算法分别计算出 9 个 FBG 在 300 帧内的波长标准差,再求出 9 个波长标准差的平均值。结果如表 4 所示,质心法解调的平均波长标准差最大,为 3.2 pm,稳定性最差;高斯拟合算法的稳定性最好,为 1.5 pm;中垂线相交寻峰算法的平均标准差为 1.8 pm,优于多项式拟合算法的 1.9 pm,具有较好的稳定性。

解调算法的运算速度是保证解调系统实时性的关键。仿真在 Windows11、64 位、12th Gen Intel (R) Core (TM) i7-12700CPU、16 GB 运行内存的操作环境下进行,记录上述 4 种寻峰算法对 9 个 FBG 中心波长的单峰计算处理时间,各算法重复记录 50 次运算时间,并求出 50 次的平均运行时间,由表 4 可知,质心法的平均运行时间最短,为 0.117 ms,高斯拟合算法的平均运行时间最长,为 15.272 ms,二次多项式拟合算法平均运行时间为第二长,为 9.206 ms,而中垂线相交寻峰算法的平均运行时间为 0.261 ms,相比于高斯拟合算法的计算时间大大缩短,缩短了约 98.3%,只需要 3 点即可进行寻峰计算,能够较大程度提升计算的速度,保证解调系统的效率与实时性。

在实时高精度 FBG 解调应用中,高斯拟合法虽能提供较高的波长解调精度,但由于其计算复杂度高往往会导致解调速率受限,通常 ≤ 1 kHz,难以满足高频动态测量需求。相比之下,中垂线相交法通过简化运算流程,在保持合理精度的同时,可将解调速率提升至 4 kHz,更适合高速采样场景,从而在精度与实时性之间实现优化平衡。

3 实验及结果分析

3.1 实验系统搭建

为验证基于 VMD-WT-SG 融合降噪的中垂线相交寻峰算法在实际解调工作中的可靠性,搭建实验系统进行测试,系统主要包括宽谱光源、CCD 光谱采集模块、FBG 传感器、波长计、环形器、耦合器、上位机算法处理模块等。解调实验系统原理如图 7 所示。根据解调实验系统原理图对硬件设备进行连接,解调实验系统实物如图 8 所示。

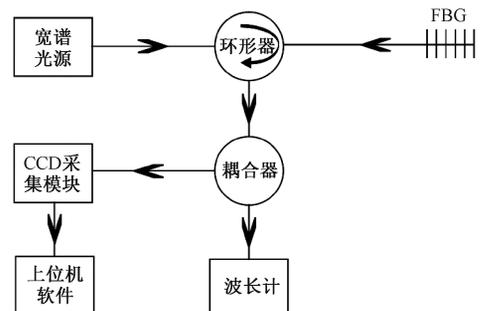


图 7 实验系统原理

Fig. 7 Schematic diagram of the experimental system

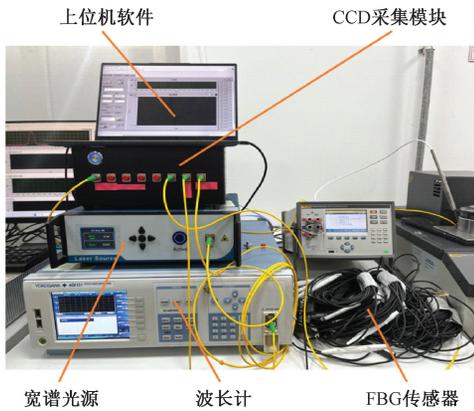


图8 实验系统实物

Fig. 8 Physical image of the experimental system

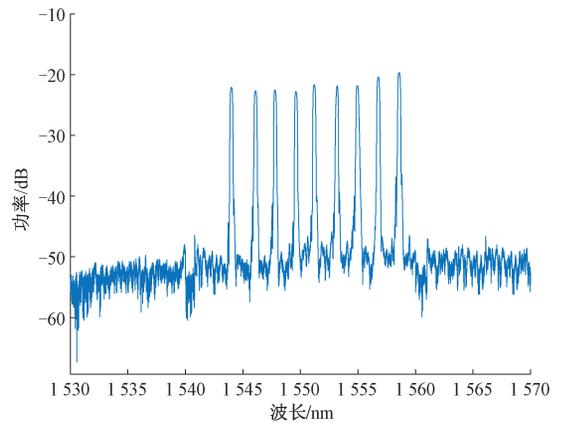


图9 FBG传感器原始信号

Fig. 9 Raw signal diagram of the FBG sensor

3.2 寻峰算法性能验证

实验共由9个FBG组成FBG阵列作为待测对象,按照中心波长由大到小将其命名为FBG1~FBG9。FBG传感器的原始信号由Yokogawa 6370 D光谱仪进行采集,结果如图9所示。

以Yokogawa AQ6151B型波长计对FBG传感器中心波长的测量结果作为理论值。使用二次多项式拟合算法、质心算法、高斯拟合算法、中垂线相交算法对采集

到的光谱信号进行寻峰计算,得到各光纤光栅中心波长的计算结果。然后计算出各个FBG在不同算法下的波长偏差以及9个FBG在同一算法下中心波长的平均偏差。实验计算结果如表5所示。质心算法的波长解调精度最低,9个FBG中心波长的平均偏差为4.9 pm,高斯拟合算法的解调精度最高,达到了2.5 pm,二次多项式拟合算法和中垂线相交算法的解调精度居中,分别达到了3.9和3.3 pm。

表5 不同算法中心波长计算偏差结果

Table 5 Calculation deviation results of different algorithm center wavelengths

FBG 编号	寻峰算法	二次多项式拟合法		质心算法		高斯拟合法		中垂线相交算法		
	理论值/nm	中心波长/nm	偏差/pm	中心波长/nm	偏差/pm	中心波长/nm	偏差/pm	中心波长/nm	偏差/pm	
FBG1	1 558.665 8	1 558.669 9	4.1	1 558.670 5	4.7	1 558.664 0	1.8	1 558.662 4	3.4	
FBG2	1 556.853 3	1 556.850 0	3.3	1 556.848 1	5.2	1 556.851 4	1.9	1 556.857 0	3.7	
FBG3	1 555.042 7	1 555.046 3	3.6	1 555.047 1	4.4	1 555.045 4	2.7	1 555.045 5	2.8	
FBG4	1 553.256 2	1 553.260 7	4.5	1 553.261 5	5.3	1 553.253 3	2.9	1 553.252 8	3.4	
FBG5	1 551.289 5	1 551.294 2	4.7	1 551.295 6	6.1	1 551.286 4	3.1	1 551.287 0	2.5	
FBG6	1 549.695 7	1 549.698 1	2.4	1 549.690 8	4.9	1 549.698 1	2.4	1 549.691 5	4.2	
FBG7	1 547.888 6	1 547.884 8	3.8	1 547.883 8	4.8	1 547.885 1	3.5	1 547.892 2	3.6	
FBG8	1 546.179 8	1 546.174 6	5.2	1 546.174 8	5.0	1 546.178 1	1.7	1 546.176 7	3.1	
FBG9	1 544.082 8	1 544.086 2	3.4	1 544.086 6	3.8	1 544.080 6	2.2	1 544.079 9	2.9	
平均偏差/pm			3.9			4.9			2.5	3.3

对寻峰算法进行稳定性测试,选择中心波长理论值为1 551.289 5 nm的FBG5传感器,使用二次多项式拟合算法、质心算法、高斯拟合算法、中垂线相交算法4种算法对FBG5进行多帧的寻峰计算,计算出寻峰误差,中心

波长的误差变化情况如图10所示。通过观察可以发现高斯拟合算法在这4种算法中稳定度最高,多项式拟合算法和中垂线相交算法稳定度居中,质心算法的稳定度最差。

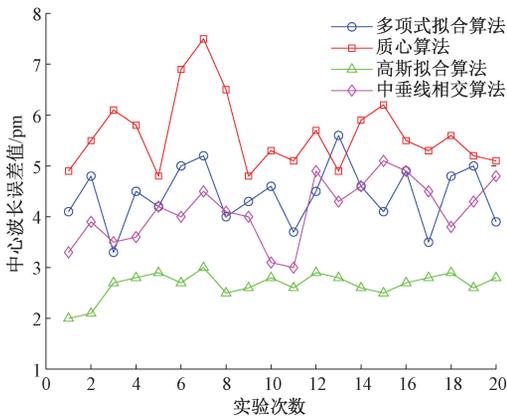


图 10 不同算法的中心波长误差

Fig. 10 Center wavelength error of different algorithms

仿真和实验结果表明,基于VMD融合降噪的中垂线交点寻峰算法具有较高的解调精度和较高的算法稳定性,平均寻峰偏差为3.3 pm,同时寻峰时数据计算量小,故计算速度快,平均运算时间为0.261 ms,为中心波长的实时解调提供了一种新的思路。

4 结 论

针对使用CCD光谱衍射解调法对FBG传感网络进行解调过程中因受噪声影响,导致中心波长解调精度降低的问题,提出了一种基于VMD融合降噪的中垂线交点寻峰算法,首先对光谱数据进行了VMD-WT-SG融合降噪处理,通过阈值判断分离出噪声主导成分和信号主导成分,对噪声主导成分进行小波降噪处理之后与信号主导成分进行重构,再通过SG滤波完成光谱平滑,实现光谱降噪。通过仿真实验确定了各算法最佳参数,并通过信噪比和均方根误差指标来验证了融合降噪效果。相比于VMD降噪、SG降噪、Kalman滤波等单一降噪算法提高了光谱信号的信噪比,降低了均方根误差,能够在保留原始数据特征的同时去除大部分噪声,降低了噪声对解调过程的影响。针对传统寻峰算法在寻峰过程中计算量大,复杂度高的问题,提出了基于数形结合思想的中垂线交点寻峰算法,通过仿真及实验验证,结果表明中垂线相交寻峰算法相比质心法、多项式拟合法精度更高,相比高斯拟合算法、多项式拟合算法速度更快,寻峰计算时仅仅需要3点即可快速进行寻峰计算,提高了解调的效率,寻峰过程中算法也能保持足够的稳定性,为含噪声FBG传感网络中的多峰值实时快速检测提供了一种新的思路,有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 魏鹤鸣,车嘉炜,侯林嵩,等. 高精度光纤光栅振动解调系统研究与应用[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1): 82-88.
WEI H M, CHE J W, HOU L S, et al. Research and application of high precision fiber grating vibration demodulation system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(1): 82-88.
- [2] 刘杰,夏彦卫,贾伯岩,等. 基于高精度温度传感器的多股碳纤维导线潜伏性缺陷检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 65-71.
LIU J, XIA Y W, JIA B Y, et al. Detection of latent defects in multi-stranded carbon fiber wires based on high-precision temperature sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 65-71.
- [3] 丁宝艳,赵强,陈东营,等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展[J]. 光通信研究, 2024(3): 75-86.
DING B Y, ZHAO Q, CHEN D Y, et al. Progress of pressure sensing technology and application of fiber Bragg grating [J]. Optical Communication Research, 2024(3): 75-86.
- [4] 况卓林,李素贞. 基于分布式光纤声振传感的索结构监测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 197-205.
KUANG ZH L, LI S ZH. Cable structure monitoring based on distributed optical fiber acoustic sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 197-205.
- [5] 曲道明,孙广开,李红,等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 144-151.
QU D M, SUN G K, LI H, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 144-151.
- [6] 张雄雄,宋言明,孙广开,等. 柔性复合基体光纤布拉格光栅曲率传感器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 217-223.
ZHANG X X, SONG Y M, SUM G K, et al. Flexible composite matrix fiber Bragg grating curvature sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 217-223.
- [7] 龚天森,全芳轩. 基于光纤光栅传感器高压开关柜温度监测系统[J]. 激光杂志, 2014, 35(9): 89-91.

- GONG T S, TONG F X. Design of high-voltage switchgear temperature monitoring system based on fiber grating sensor[J]. *Laser Journal*, 2014,35(9):89-91.
- [8] 于永胜,白清,蒋心雄,等. 基于小波阈值降噪的长距离 BOTDR 测温系统研究[J]. *光学技术*, 2024, 50(6):737-744.
- YU Y SH, BAI Q, JIANG X X, et al. Research on long-range BOTDR temperature measurement system based on wavelet threshold noise reduction[J]. *Optical Technology*, 2024, 50(6):737-744.
- [9] 胡业林,马向阳,钱文月,等. 基于小波包信息熵和 SO-SVM 的滚动轴承故障诊断[J]. *电子测量技术*, 2023,46(14):80-86.
- HU Y L, MA X Y, QIAN W Y, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on wavelet packet information entropy and SO-SVM[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023,46(14):80-86.
- [10] 韩超,胡宾鑫,朱峰,等. 基于小波降噪的光纤布拉格光栅波长高精度解调算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022,59(5):132-138.
- HAN CH, HU B X, ZHU F, et al. High-precision demodulation algorithm of fiber Bragg grating wavelength based on wavelet noise reduction[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2022, 59(5): 132-138.
- [11] 王日东,刘丽,宋浩霖,等. 基于卡尔曼滤波算法的嵌入式光纤光栅解调系统[J]. *传感技术学报*, 2023, 36(10): 1602-1606.
- WANG R D, LIU L, SONG H L, et al. Embedded fiber grating demodulation system based on Kalman filter algorithm[J]. *Journal of Sensing Technology*, 2023, 36(10): 1602-1606.
- [12] 董是,龙志友,毕洁夫,等. 基于 Savitzky-Golay 平滑-小波降噪处理的桥梁结构监测数据分析方法[J]. *测绘通报*, 2023(9):100-106.
- DONG SH, LONG ZH Y, BI J F, et al. Analysis method of bridge structure monitoring data based on Savitzky-Golay smoothing-wavelet noise reduction processing[J]. *Surveying and Mapping Bulletin*, 2023(9):100-106.
- [13] 吕峥,庄炜,吴越,等. 基于改进 EMD 方法的 FBG 传感网络光谱基线校正研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1):190-197.
- LYU ZH, ZHUANG W, WU Y, et al. Research on spectral baseline correction of FBG sensor network based on the improved EMD method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022,43(1):190-197.
- [14] 马嘉仪,张旭,李红,等. FBG 反射谱数据滑动相关滤波算法设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(6):155-167.
- MA J Y, ZHANG X, LI H, et al. Design and implementation of sliding correlation filtering algorithm for FBG reflection spectrum data[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024,53(6):155-167.
- [15] 邢燕好,于昊,张佳,等. 基于粒子群参数优化的 O-VMD 数据处理方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4):304-313.
- XING Y H, YU H, ZHANG J, et al. Research on the O-VMD thickness measurement data processing method based on particle swarm optimization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023,44(4):304-313.
- [16] 张博文. 光纤光栅波长解调关键算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
- ZHANG B W. Research on key algorithms for wavelength demodulation of fiber Bragg gratings[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [17] ZHANG F X, JIANG SH D, WANG CH, et al. Broadband and high sensitivity FBG accelerometer based on doubledaphragms and h-shaped hinges[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1):353-359.
- [18] 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):300-304.
- HU ZH W, PANG CH X, CHENG F Y. Application of Gaussian-LM algorithm in peak-finding of fiber Bragg grating reflectance spectra[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2017,54(1):300-304.
- [19] 苏建洪,朱星,焦彤. 基于自适应寻峰算法的 FPGA 高精度 FBG 感知解调系统[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(11): 184-194.
- SU J H, ZHU X, JIAO T. FPGA high-precision FBG sensing demodulation system based on adaptive peak seeking algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(11): 184-194.
- [20] 李红,祝连庆,张钰民,等. 线阵 InGaAs 扫描 FBG 反射谱的传感解调方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1):236-240.
- LI H, ZHU L Q, ZHANG Y M, et al. Sensing and demodulation method of linear InGaAs scanning FBG reflection spectrum[J]. *Infrared and Laser Engineering*,

2016, 45(1): 236-240.

- [21] SUN X Y, ZENG L, HU Y W, et al. Fabrication and sensing application of phase shifted Bragg grating sensors[J]. *Materials*, 2022, 15(10): 3720.
- [22] 刘强,李斌雯,孙宇丹,等. 基于长周期光纤光栅的FBG解调方法[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 160-166.
LIU Q, LI B W, SUN Y D, et al. FBG demodulation method based on long period fiber grating[J]. *Applied Optics*, 2022, 43(1): 160-166.
- [23] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.

作者简介



潘红宇, 2020年于安徽工程大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感与光电器件。

E-mail: panhongyu2022@163.com

Pan Hongyu received his B. Sc. degree from Anhui

Polytechnic University in 2020. He is currently a master student in the School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include optical fiber sensing and optoelectronic devices.



祝连庆(通信作者), 分别在1982年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感技术、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail: lqzhu_bistu@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing technology, fiber laser, and opto-electrical precision measurement technology.