

基于改进变分模态分解的光纤周界安防入侵识别研究

彭广建^{1,3},王宇^{1,3},程安文^{1,3},白清¹,王鹏飞²,刘昕^{1,2},靳宝全^{1,2*}

(1. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室,太原 030024;
2. 太原理工大学 电子信息工程学院,太原 030024; 3. 太原理工大学 物理与光电工程学院,太原 030024)

摘要:为了满足周界安防领域精准识别入侵事件的需求,设计了一种基于双马赫-曾德尔干涉的光纤振动传感系统。采用灰狼优化算法改进变分模态分解,自动优化模态分量数与惩罚因子,对踩踏、敲击、攀爬3种入侵事件的连续扰动信号进行本征模态函数提取与峭度特征分析,并结合支持向量机实现事件分类识别。实验结果表明:在2.05 km传感光纤上,踩踏与敲击事件的峭度均值在第三层最大,攀爬事件在第五层最大;3类事件的平均识别率分别达到97.2%、98.6%和97.9%,验证了该方法在光纤周界安防入侵识别中的有效性与实用性。

关键词:光纤传感;周界安防;双马赫-曾德尔干涉;变分模态分解

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0007-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.002

Research on fiber-optic perimeter security intrusion identification based on improved variational mode decomposition

PENG Guangjian^{1,3}, WANG Yu^{1,3}, CHENG Anwen^{1,3}, BAI Qing¹, WANG Pengfei², LIU Xin^{1,2}, JIN Baoquan^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To meet the demand for accurate intrusion event recognition in the field of perimeter security, a fiber-optic vibration sensing system based on dual Mach-Zehnder interferometry is designed. The grey wolf optimization algorithm is employed to improve the variational mode decomposition, automatically optimizing the number of modal components and the penalty factor. The intrinsic mode functions and kurtosis features of continuous disturbance signals from three types of intrusion events (stepping, knocking, and climbing) are extracted, and a support vector machine is used for event classification and recognition. Experimental results show that on a 2.05 km sensing fiber, the mean kurtosis values of stepping and knocking events reach their maxima in the third layer, while that of climbing events reaches its maximum in the fifth layer. The average recognition rates for the three types of events are 97.2%, 98.6%, and 97.9%, respectively, demonstrating the effectiveness and practicality of the proposed method for intrusion recognition in fiber-optic perimeter security systems.

Key words: fiber-optic sensing, perimeter security, dual Mach-Zehnder interferometry, variational mode decomposition

收稿日期:2025-01-27。

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2024C002)资助;山西省重点研发计划项目(202102130501021)资助;山西省科技创新团队项目(201805D131003)资助;中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B004)资助。

作者简介:彭广建(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤干涉技术、光纤传感、信号处理。

*通信作者:靳宝全(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤传感。



0 引言

光纤振动传感技术具有本质安全、铺设灵活、易于组网、抗电磁干扰、灵敏度高优势,已在交通运输、国防边境、能源输送、文物古迹等周界安防领域得到了广泛应用^[1-4]。其中,双马赫-曾德尔干涉(DMZI)型光纤振动传感技术具有结构简单、成本低廉等优点,且在事件监测领域具有较高精度,已成为全光纤周界安防领域的重要研究方向^[5-7]。外界入侵扰动事件的精准识别一直是干涉型光纤振动传感系统研究的热点。时频信号分析技术是常见的振动事件识别

彭广建,王宇,程安文,等. 基于改进变分模态分解的光纤周界安防入侵识别研究

方法,该技术以信号的幅值、方差、过零率等参数作为信号特征进行振动事件分类识别,具体方法包括小波变换、傅里叶变换、经验模态分解等。2013年,复旦大学吴红艳等人^[8]提出了一种基于端点检测技术的光纤周界安防系统,通过截取指定长度的待识别信号,与入侵信号的短时平均过零率和短时能量进行对比来识别事件类型,然而截取指定长度的待识别信号,容易造成信息的丢失或者人为干扰数据样品,从而影响识别结果。2015年,Liu Kun等人^[9]结合了模态分解、峰度特征和径向基函数(RBF)神经网络,有效区分4种常见的入侵事件,平均识别率为85%,但是普通的模态分解容易造成模态混叠。2016年,Fedorov A K等人^[10]提出了一种将信号去噪滤波与用于聚类的高斯混合模型相结合的方法,用于识别相敏光学时域反射传感器信号中的特定类别非常规事件,在足够数量的训练样品下,单目标通道、在电缆附近挖掘这2类事件的最佳识别概率接近90%。但此方法需足够数量的训练样品,不利于实际应用。2017年,Wu Hujuan等人^[11]对比研究了在基于光时域反射技术的分布式光纤振动传感系统中,3种典型现场测试信号的小波分解和小波包分解特征提取方法,构建了人工神经网络进行事件识别,其中基于小波包能量分布特征的识别网络可将识别率提高至94.4%,将妨害报警率有效控制至5.6%以下,但小波与小波包分解存在计算复杂度高、基函数选择依赖性强、对噪声敏感等缺点。2018年,Xu Chengjin等人^[12]提出了利用短时傅立叶变换法和谱减法增强振动信号的时频特征,并搭建了基于相位敏感的光时域反射分布式光纤传感系统,对挖掘、行走、车辆通过和损坏这4种不同振动事件识别率达到90%以上。2019年,华侨大学陈沛超等人^[13]采用单模-多模-单模光纤结构,利用短时傅里叶变换和卷积神经网络相结合的分类方法,实现了高效识别人为入侵信号和非人为入侵信号。上述2种方法虽然达到了较高的识别率,但是卷积神经网络对数据量的依赖性强,而且引入快速傅里叶变换获取信号的频域分布,额外增加了计算量,且对噪声敏感和时间序列的数据处理存在局限性。2020年,合肥工业大学朱程辉等人^[14]提出一种基于自适应经验模态分解的光纤周界安防入侵事件识别方法,通过自适应经验模态分解提取与原信号相似本征模态函数(IMF)分量,将获得的特征采用支持向量机(SVM)进行识别,该方法可以有效识别入侵信号的类别,解决了部分模态混叠问题,但在分解过程中模态分量数等参数仍需自行选取。2023年,

华北电力大学尚秋峰等人^[15]提出了一种多注意力时间卷积网络识别模型,通过利用通道和时序注意力优化网络学习机制,提高模型的鲁棒性,准确高效地对周界入侵事件进行识别,且识别率达到了98%,此方法虽然解决了卷积网络对时间序列数据处理的局限性,但多注意力时间卷积网络的性能高度依赖于超参数的选择,从而训练难度较大,不利于实际场景中的应用。

除此之外,快速且有效地提取原始信号特征、减少机器学习的计算资源仍是亟需解决的问题。因此,本文提出一种基于改进变分模态分解(VMD)的光纤周界安防入侵识别系统。

1 振动传感识别理论分析

1.1 DMZI型光纤振动传感原理

DMZI型光纤振动传感系统结构图如图1所示,主要包括光源(窄线宽激光光源)、隔离器、1×2耦合器C₁、2×2耦合器C₂、2×1耦合器C₃和C₄、传感光纤、参考光纤、光电探测器。当在传感光纤上P点处施加振动信号时,振动信号会分别在C₂和C₃处发生干涉。光电探测器1可接收在C₂处发生的干涉信号,光电探测器2可接收在C₃处发生的干涉信号。

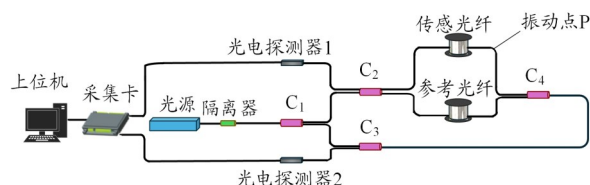


图1 DMZI型光纤振动传感系统结构图

设 ε 为光在光纤中的传播系数, n 为光纤纤芯折射率, λ_0 为光在真空中的波长。当光信号通过长度为 L 的传感光纤时,其相位 φ 可以表示为

$$\varphi = \frac{2\pi nL}{\lambda_0} = \varepsilon L \quad (1)$$

当外界振动信号施加到传感光纤上时,由光纤应变效应、光弹效应以及泊松效应可知,振动信号会引起光纤的长度、折射率和直径发生变化,进而导致传感光纤中光相位发生相应变化。外界振动作用力 F_p 引起的相位变化量 $\Delta\varphi$ 可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon L F_p (1 - 2\mu)}{E} \left[\frac{1}{2} n^2 (F_m + 2F_n) - 1 \right] \quad (2)$$

式中: E 为单模光纤杨氏模量, μ 为泊松系数, F_m 与 F_n 分别是外力 F_p 的光弹系数张量。由式(1)可知,在其他参数不发生改变的情况下,光纤中的光相位变化量

与外界振动作用力 F_p 成正比,因此可以用光纤的相位变化量 $\Delta\varphi$ 来表示施加在传感光纤上的外力大小。

1.2 改进VMD

VMD需要合适的参数来对原始信号分解。模态分量与惩罚因子对分解结果影响较大:模态分量数的大小影响模态分解的效果,若分解数量太大会导致模态分解过度,太小则会导致频率混叠;惩罚因子主要控制分解模态的带宽,不恰当的惩罚因子值不利于模态分量的保存。基于此,本文加入灰狼优化(GWO)算法^[6]对VMD进行改进,使VMD的模态分量数^[17]与惩罚因子进行自动寻找,直至返回最优参数值并作为最终分解参数,其步骤如下:

1)设置灰狼算法^[18]的初始参数值:种群规模设置为50;模态分量数的取值范围为[2, 10],惩罚因子的取值范围为[100, 3000]。

2)选取能量熵最大函数作为适应度函数。根据初始化所经历的最优适应度值更新下一代适应度值。如果高于原有的灰狼适应度值,则代入当前最优值位置。将该次的适应度值与全局最优值进行比较,如果适应度值更好,则再次替换。

通过优化参数设置,对采集的原始信号进行降噪和特征提取,将提取的特征输入SVM算法进行处理,最终实现周界安防入侵事件的连续扰动信号精准识别。

1.3 连续扰动信号识别

SVM算法被广泛用于分类与回归问题中^[19]。SVM算法的本质是在数据点之间找到一个最优的决策边界,以此来对数据进行分类,且可保证边界距离最近的数据点的距离最大化。该方法可以有效将不同类型的数据进行分隔,因此本文采用SVM算法对周界安防不同连续扰动信号类型进行识别。SVM算法的核心是选取核函数。RBF^[20]具有较强的泛化归纳能力与较高的网络逼近度,且适合处理特征的非线性问题。所以本文采用RBF核作为SVM的核函数。

假设数据集为 $\{x_i, y_i\}$, 输入数据为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, n 为向量维数, y_i 为输出数据, 且 $y_i \in \{-1, 1\}$ 。 x_i, y 分别对应二分类问题中的2个不同类别,则需要一个超平面将2个不同类别区分开,如式(3)所示。

$$f(x) = \rho^T x + b \quad (3)$$

式中: ρ 为法向量, b 为截距, x 是数据点的特征向量。

令 x 垂直投影到超平面上, 对应表示为 x_0 , x 到分类间隔的距离用 γ 来表示, 则可得到

$$x = x_0 + \gamma \frac{\rho}{\|\rho\|} \quad (4)$$

因为 $f(x_0) = 0$, 将上述问题转化为带惩罚项的最小化问题, 可表示为

$$L = \min \frac{\|\rho\|^2}{2} + C_r \sum_{i=1}^n \zeta_i$$

$$\text{s.t. } y_i (\rho^T x_i + b) \geq 1 - \zeta_i \quad (5)$$

式中: C_r 为惩罚因子, ζ_i 为松弛因子, $\zeta_i \geq 0$ 。

为了解决以上问题, 引入拉格朗乘子 α_i 求解 ρ 和 b , 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \rho = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i x_i \\ b = -\frac{1}{2} \left[\max_{i: y_i = -1} (\rho^T x) \quad \min_{i: y_i = 1} (\rho^T x) \right] \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得到 ρ 和 b 即可求出分离超平面和分类决策函数。连续信号识别流程图如图2所示。

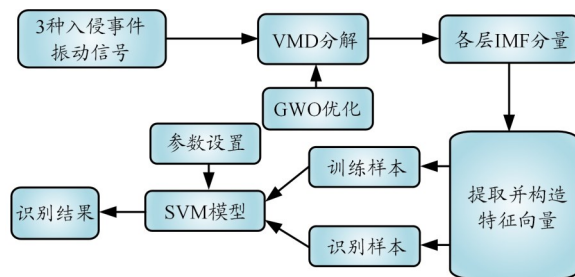


图2 连续扰动信号识别流程图

2 实验设计

本文根据图1的结构搭建了基于DMZI的光纤周界安防系统,在耦合器 C_2 和耦合器 C_4 间的传感光纤上施加踩踏、敲击、攀爬3类连续扰动信号,采集360组实验数据来验证方案的有效性。激光器光源选用型号为FYB-NLWFL-1550-SM的窄线宽激光光源,光功率为4.8 mW,隔离器负责使光源单方向通过,光源经过耦合器 C_1 被分为2路光信号,分别沿顺、逆时针方向传播,在耦合器 C_2 、耦合器 C_3 处发生干涉后分别被光电探测器1与光电探测器2采集。经光电探测器转化后的电信号通过数据采集卡采集后传至上位机,进行振动定位算法和事件识别算法的处理。实验中的传感光纤、参考光纤均采用长度为2000 m的双芯铠装单模光纤和50 m的三芯铠装单模光纤构成,其中铠装光纤抗噪声能力较强,不易受到外界环境影响且利于实际应用。另外,返回光纤的长度为50 m。

为了验证事件识别的准确性,本文使用采样卡采

彭广建,王宇,程安文,等. 基于改进变分模态分解的光纤周界安防入侵识别研究

集3类连续扰动信号数据,采样率设置为1 MHz/s,采样时间为2 s,总采样点个数为2 000 000,共采集360组。采集卡采集的连续扰动信号的时域图如图3所示。

从图3可以看出,踩踏事件由于在接触光纤到完全踩踏在光纤上需要一段时间,所以反映在时域上振动波形相对滞后;敲击事件由于敲击的瞬间作用于光纤上,反映在时域上振动波形会在瞬间产生,然后产生回落;攀爬事件相对踩踏、敲击这2个动作而言,相对连贯且持续,则反映在时域上的振动波形会在接触到光纤后持续产生。

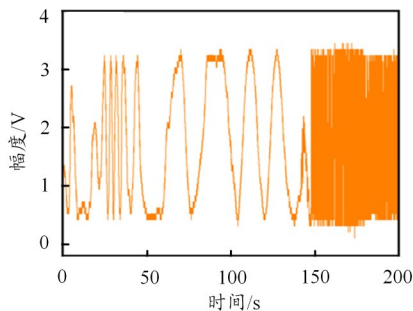
2.1 连续扰动信号特征提取

本文设最优模态分量数为6,即进行6层分解,最优惩罚因子为1 000。实验中,通过改进VMD对采集卡采集到的3种不同的连续扰动信号进行特征提取,提取到连续扰动信号的6个IMF分量的峭度特征,进行峭度均值计算,结果如表1所示。可以看出,踩踏事件的峭度特征在IMF1~IMF3保持上升,在IMF3最大;敲击事件是瞬间作用在传感光纤上的,所以其在IMF2、IMF3与IM4处峭度特征较大;攀爬事件的峭度特征在IMF1~IMF5保持逐步上升,在IMF5最大。

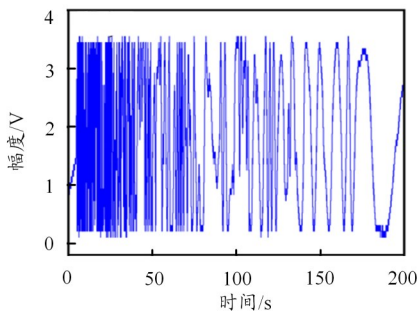
通过峭度特征构建特征向量,计算连续扰动信号特征向量的方差均值,结果如表2所示。可以看出,3类连续扰动信号在各IMF分量上的方差均值具有较

表1 连续扰动信号IMF分量的峭度特征均值

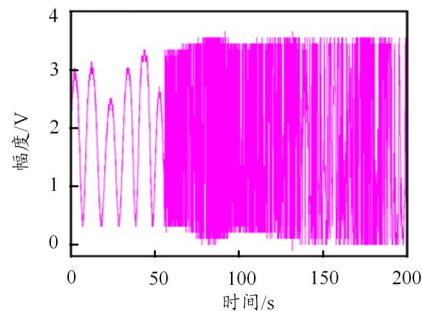
信号类型	峭度特征均值					
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6
踩踏	3.69	32.53	120.25	3.33	3.26	3.32
敲击	3.25	32.26	80.48	44.91	9.26	3.01
攀爬	2.07	4.59	7.28	43.56	53.64	3.77



(a) 踩踏



(b) 敲击



(c) 攀爬

图3 3类连续扰动信号时域波形图

表2 连续扰动信号特征向量的方差均值

信号类型	特征向量的方差均值					
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6
踩踏	0.46	0.02	0.002	0.003	0.001	0.001
敲击	0.39	0.04	0.013	0.003	0.003	0.001
攀爬	0.52	0.14	0.03	0.006	0.007	0.007

好的区分性,尤其在IMF1和IMF2分量上差异较为明显,反映出不同扰动类型在模态能量分布上的特征差异,可以为后续模式识别提供有效的判别信息。因此,本文提出的改进VMD能有效实现连续扰动信号的分类识别。

2.2 入侵事件识别

经过特征提取后,将提取到的特征向量数据进行样品分类,每类连续扰动信号样品个数为120,共360个样品,其中样品划分重叠个数为0。如果增大训练样品数可以提高识别的准确性,但会增加计算机处理时间,不利于实际应用。为兼顾识别准确性与计算资源,实验中每次识别的SVM模型均不间断运行3次,每次都随机划分数据集,且训练集的比例为60%,剩余40%的数据作为测试集进行事件识别,得到的识别混淆矩阵如图4所示。图中对角线上的数值(深蓝底色)表示各类样品被正确识别的数量,非对角线上的数值(浅蓝底色)表示各类样品被错误识别的数量。

从图4可以看出,踩踏、敲击和攀爬样品分别有140、142和141个被正确分类,说明模型对3类连续扰动信号均具有较好的识别能力。

本文采用召回率、 F 值和识别准确率来验证本系统的有效性,结果如表3所示。其中召回率表示某一真实类别样品中被正确识别的比例, F 值是精确率与召回率的调和平均,用于综合评价分类性能。从表3

实际情况	踩踏	140	2	2
	敲击	2	142	0
	攀爬	3	0	141
		踩踏	敲击	攀爬
		预测情况		

图4 连续扰动信号识别混淆矩阵图

表3 连续扰动信号识别有效性

预测情况	召回率/%	F值/%	准确率/%
踩踏	96.5	96.9	97.2
敲击	98.6	98.6	98.6
攀爬	98.6	98.2	97.9

可以看出,各类别的召回率和F值均较高,入侵事件的识别准确率能达97%以上,表明本系统具有较好的分类效果。

3 结束语

本文介绍了一种基于改进VMD的周界安防光纤传感系统。通过构建DMZI型光纤振动传感系统,采集入侵事件的原始连续扰动信号,利用GWO算法优化VMD参数,对原始信号进行降噪分解,基于分解后的IMF分量分析3类连续扰动信号特征,将特征信息输入以RBF为核函数的SVM分类器中进行连续扰动信号类型识别。实验采集了踩踏、敲击、攀爬3种连续扰动信号各120组数据进行识别,实验结果表明,本系统可实现踩踏、敲击、攀爬3类连续扰动信号的精准识别,平均识别准确率分别为97.2%、98.6%、97.9%。本文的研究为光纤周界安防入侵事件识别提供了新的解决方案。

参考文献:

[1] 付会军. 基于光纤光栅传感的数字化文物智能保护系统[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(5): 145-148.

[2] 范军领,何昊,毕海胜,等. 油气管道及站场光纤监测技术研究进展[J]. 管道技术与设备, 2022(3): 32-35.

[3] 尹露. 光纤传感技术下的快速路交通状态监测研究[J]. 交通工程, 2020, 20(6): 24-29, 36.

[4] 魏波, 宁吉粤. 视频联动的光纤振动传感周界安防系统[J]. 警察技术, 2021, (4): 61-65.

[5] 邢八一, 徐方辰. 光纤周界安防系统技术现状及市场前景分析[J]. 中国安防, 2014(Z1): 85-89.

[6] 陈勇, 安汪悦, 刘焕淋, 等. 改进经验模态分解算法在光纤布拉格光栅周界入侵行为分类中的应用[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 175-184.

[7] Li Junchan, Wang Yu, Wang Pengfei, et al. Pattern recognition for distributed optical fiber vibration sensing: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(10): 11983-11998.

[8] 吴红艳, 贾波, 卞庞. 光纤周界安防系统端点检测技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 743-748.

[9] Liu Kun, Tian Miao, Liu Tiegeng, et al. A high-efficiency multiple events discrimination method in optical fiber perimeter security system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4885-4890.

[10] Fedorov A K, Anufriev M N, Zhimov A A, et al. Note: gaussian mixture model for event recognition in optical time-domain reflectometry based sensing systems[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(3): 036107.

[11] Wu Huijuan, Qian Ya, Zhang Wei, et al. Feature extraction and identification in distributed optical-fiber vibration sensing system for oil pipeline safety monitoring[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(4): 305-310.

[12] Xu Chengjin, Guan Junjun, Bao Ming, et al. Pattern recognition based on time-frequency analysis and convolutional neural networks for vibrational events in ϕ -OTDR[J]. Optical Engineering, 2018, 57(1): 016103-016103.

[13] 陈沛超, 游赐天, 丁攀峰. 光纤周界防区入侵事件的模式识别研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 275-284.

[14] 朱程辉, 朱睿, 王建平, 等. 基于自适应EMD的光纤安防系统入侵信号识别[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(4): 26-30.

[15] 尚秋峰, 黄达. 基于MATCN的光纤周界入侵信号识别方法[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 92-103.

[16] 徐达宇, 丁帅. 改进GWO优化SVM的云计算资源负载短期预测研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(7): 68-73.

[17] 刘长良, 武英杰, 甄成刚. 基于变分模态分解和模糊C均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3358-3365.

[18] Li Hu, Li Songsong, Sun Jiao, et al. Ultrasound signal processing based on joint GWO-VMD wavelet threshold functions[J]. Measurement, 2024, 226: 114143.

[19] 谢锋云, 胡旺, 刘慧, 等. 基于VMD-SVM的三相异步电机故障诊断方法[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(1): 100-104.

[20] Gabriel S G C, David M S, Sanchez-Moreno J, et al. Design and development of an SVM-powered underwater acoustic modem[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(5): 773.