

光纤安防监测信号的特征提取与识别研究综述

邹柏贤¹, 苗 军², 逯燕玲¹

1. 北京联合大学 应用文理学院, 北京 100191

2. 北京信息科技大学 计算机学院 网络文化与数字传播北京市重点实验室, 北京 100101

摘 要: 光纤安防监测系统信号的特征提取与识别方法是当前的研究热点。光纤振动信号的随机性、非平稳性, 以及各种信号的相似性, 导致信号的识别容易产生误报现象。识别入侵事件类型的关键是信号的特征提取和高效的识别方法。对光纤振动信号的各种特征提取方法和识别方法进行分析和比较, 把特征提取方法分为基于小波分解的特征提取法、基于其他分解模型的特征提取方法和基于波形统计参数的特征提取法; 把对光纤振动信号的识别方法分为经验阈值识别方法、支持向量机识别方法和神经网络识别方法, 最后对特征提取方法和识别方法进行总结和展望。

关键词: 入侵事件; 光纤振动信号; 特征提取方法; 识别方法

文献标志码: A **中图分类号:** TP181 **doi:** 10.3778/j.issn.1002-8331.1807-0045

邹柏贤, 苗军, 逯燕玲. 光纤安防监测信号的特征提取与识别研究综述. 计算机工程与应用, 2019, 55(3): 23-29.

ZOU Baixian, MIAO Jun, LU Yanling. Review on feature extraction and recognition of optical fiber security monitoring signals. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(3): 23-29.

Review on Feature Extraction and Recognition of Optical Fiber Security Monitoring Signals

ZOU Baixian¹, MIAO Jun², LU Yanling¹

1. College of Applied Arts and Science, Beijing Union University, Beijing 100191, China

2. Beijing Key Laboratory of Internet Culture and Digital Dissemination Research, School of Computer Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China

Abstract: The feature extraction and recognition method of optical fiber security monitoring system is the current research hotspot. The randomness, nonstationarity and similarity of various incident signals of optical fiber vibration signals cause false identification. The key to identify the types of intrusion event is signal feature extraction and efficient recognition. The characteristics extraction methods and recognition methods of optical fiber vibration signals are analyzed and compared. Feature extraction methods are divided into feature extraction based on wavelet decomposition, feature extraction based on other decomposition models and feature extraction based on waveform statistical parameters. The identification methods of optical fiber vibration signals are divided into empirical threshold recognition, support vector machine recognition and neural network recognition. Finally, the feature extraction methods and recognition methods are summarized and prospected.

Key words: invasion event; optical fiber vibration signal; feature extraction method; recognition method

1 引言

光纤传感和模式识别技术被用来构建新一代的安防监测系统。外界直接接触及或通过承载物(如覆土、铁丝网、围栏等)传递给光纤振动传感器的各种振动行为

会产生不同的光强波动信号^[1]。在需要安全防范的区域敷设传感光缆后, 通过传感光缆能够探测感知来自外界对设防区域的扰动或振动。当这些区域遭受外来人员或车辆等的非正常闯入或遭到破坏时, 安防系统中的

基金项目: 国家自然科学基金(No.41671165, No.61650201); 北京市自然科学基金(No.4162058); 北京未来芯片技术高精尖创新中心科研基金(No.KYJJ2018004); 北京市属高校高水平教师队伍支持计划高水平创新团队建设计划项目(No.IDHT20180515)。

作者简介: 邹柏贤(1966—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习、图像处理、计算机网络, E-mail: zoubx@buu.edu.cn; 苗军(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能、神经网络、图像理解。

收稿日期: 2018-07-11 **修回日期:** 2018-12-03 **文章编号:** 1002-8331(2019)03-0023-07

探测和信号处理子系统能探测到异常事件发生,并经过对这些信号采集、传输、分析及处理,结合入侵事件类型模式识别技术,以及白光干涉技术、长距离扰动定位技术,可以对安防区域进行持续、实时监测和安全定位,从而进行提前预警,对安防区域起到保护作用。因其具有定位精度高、监测距离长、智能识别能力强、反应速度快、综合成本低等优点,被广泛应用于军事基地、军用机场、石油天然气场站、国防边界线、监狱等重要基础设施的安防监测中。

由于振动信号的随机性、非平稳性以及某些入侵事件信号与非入侵事件信号的相似性,致使振动信号具有较大的不确定性,在对各种振动信号的识别中容易产生误报现象。因此,基于光纤振动的安防监测系统的关键是存在噪声干扰的情况下能精确地区分不同的振动事件,可采用信号处理技术和模式识别方法区分是否存在入侵信号及入侵事件类型。光纤传感振动信号的信息提取与识别成为研究热点。

2 光纤安防监测系统

2.1 系统模型

目前,光纤安防监测系统中常用马赫-泽德(M-Z)干涉仪光纤传感器,主要由三根光纤(光纤1、光纤2及光纤3)、四个耦合器(耦合器 C_1 、耦合器 C_2 、耦合器 C_3 及耦合器 C_4)、两个探测器(探测器1、探测器2)、激光器以及光电隔离器等组成,其结构如图1所示^[2-3]。

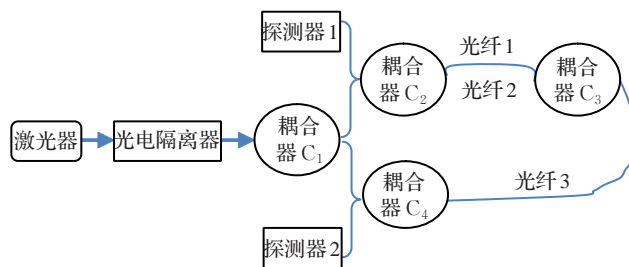


图1 光纤安防监测系统模型

图1中,激光器作为光源发出的光学信号通过光电隔离器后被耦合器 C_1 分成上、下两束相干光,其中,上束光沿着顺时针方向进入光纤1和光纤2,在耦合器 C_3 处发生干涉,干涉信号经过光纤3传至探测器2进行检测,形成第一个干涉仪;下束光则沿着逆时针方向传播,通过光纤3,在耦合器 C_2 处发生干涉,干涉信号传至探测器1进行检测,形成第二个干涉仪。

通过探测器能检测来自外界导致光纤振动的信号,探测器将此振动信号转换为电信号送至计算机处理或保存下来。当光纤未受到外界干扰时,激光以特定的路径传播,输出光强恒定;而当光纤受到外界入侵事件的干扰而发生振动时,光纤长度会发生变化,光弹效应使光纤折射率发生变化,致使传播光波的相位改变,因此干涉信号将产生很大变化。

2.2 光纤振动信号

基于光纤振动传感器的安防监测系统,是在安防区域周围布设传感光纤,可以直接铺设在各种铁网铁艺上,或直接埋设在各种地面甚至水下,系统以光纤传感器为感应单元。根据外界扰动引起光纤特性的改变实现对长达上百公里距离的大范围防区的探测。当有入侵行为发生时,通过敲击、攀爬、踩踏、触碰、摇晃、挤压等方式使得光缆发生微小振动时,传感光纤内传输光束产生扰动。扰动信号通过光纤传输至位于控制中心的系统主机,经过后端处理和分析,进而完成入侵定位和入侵行为识别。但是,这种户外系统都容易受到来自环境和人为的各种干扰因素的影响,包括刮风、暴雨,以及周围的交通环境,这对于系统正确识别入侵事件是特别的挑战,克服这个挑战的关键是正确选择入侵事件信号的特征特征或特征组合向量,以及识别率高、抗干扰性强的识别方法。

监测系统包括对信号预处理和实时分类两个部分^[4]。其中,预处理部分是对监测信号采用时频分析(Time Frequency Analysis)的处理方法,即分析随时间变化的信号频率^[5-6]。时频分布用于从选择区分不同类型信号的特征或特征向量。

对于长距离分布的光纤传感器,监测信号通常被描述成一种非平稳的随机信号,包括含有加性平稳随机噪声的调频信号和调幅信号,这里噪声包括光纤相位噪声和相干瑞利噪声。

由于光纤振动信号的非平稳特性,采用时频分析对于分析和识别光纤振动信号的特征至关重要^[7]。但因不同信号之间存在相互作用,时频分布在实际应用中受到限制^[5,8]。

因为光纤信号存在大量的噪声,而噪声的能量对信号的能量谱特征提取将产生影响。在环境噪声能量较大或者输入信号能量较小时,这种影响尤为明显,甚至导致分类系统出现错误的分类,使得识别正确率下降,所以,在许多特征提取方法中对光纤信号先进行降噪处理。由于噪声的能量主要分布在高频部分,故大多数降噪算法均针对信号的高频部分进行处理。但如果高频噪声抑制得过多,也同样会抑制信号本身的高频细节,引起信号失真,从而影响信号的特征提取与识别,所以应选取合适的信号降噪算法^[9]。

近年来,随着信号处理技术和模式识别方法的不断进步,光纤振动信号的识别研究取得了较大进展。这些研究主要集中在以下两个方面:(1)光纤信号预处理和特征提取方法,主要通过小波分析法降噪,然后提取时域或频域特征;(2)采用经典的分类识别方法,如神经网络方法、支持向量机方法或经验阈值法。此外,为减少噪声的影响,提高识别率,还有些方法对信号进行分帧或分段,以及降噪处理。

3 光纤振动信号的特征提取方法

在对光纤信号预处理和特征提取方面,主要通过小波分析法降噪,然后提取时域或频域特征。对光纤信号的预处理除运用不同层次的小波分解方法之外,还有根据时频特征、谱分析、回归方程、本征模态函数分解的方法、基于基音分析特征提取法、基于傅里叶分解的特征提取法、基于门限过零率和稀疏编码的特征提取法提取相应特征,它们不是基于小波分解的提取方法。此外,还有从信号的示意图中提取信号统计特征的方法。

3.1 基于小波分解的特征提取法

这是比较常见的特征提取方法。饶云江等^[10]提出一种利用小波处理对信号进行降噪和分割的方法。通过小波降噪,可保留尖锐变化的信号成分和一些微弱信号;采用DB2小波分解,根据小波系数的标准差选择正负阈值来估计信号的边界,同时合并相同类型的边界,去掉单个独立边界,合并成对的正负边界。这样分割信号的特征包括信号边缘、峰值、长度、幅度、周期等参数。虽然一个基本的分割信号是局部的、独立的,但它们是构成报警模式的基本单位,反映了报警信号模式的部分特征。进一步地,经过大量实验和信号分析后确定单个入侵事件的报警模式,其中包含事件所有的特征。

根据信号包络中的振动信号与噪音的不同,Jiang等^[11]提出运用基于希尔伯特变换算法对光纤信号进行预处理,通过小波阈值法去除噪声,再用小波包分解的方法提取光纤信号在不同子频带的三阶能量谱特征,选择七个频率参数作为信号特征向量。赵杰等^[12]利用小波包变换对光纤信号进行谱相减去噪声,通过信号端点的检测,实现信号分帧;然后对信号进行五层小波包分解,得到32个子频带的小波包系数,对这些系数进行重构之后,提取各频带内的信号分量,进而计算每个频带内的能量谱,组成能量谱特征向量。罗光明等^[13]首先从光纤的应力应变模型和马赫-泽德干涉仪出发,理论推导出分布式光纤周界安防系统的光路数学模型。在此模型上,运用小波多尺度分析方法,构造了信号在时-频域的方差特征向量,提出了根据特征向量的不同识别各种引起光缆振动的不同激励的“尺度-方差”信号识别方法,通过实验表明该方法可以区分各种激励,即不同入侵事件引起的振动信号及其变化会反映到各频带的能量上,导致特征向量的不同。根据信号与噪声的能量在时域分布的不同,万遂人等^[9]首先对光纤信号进行小波降噪和信号分割的预处理,选用一种改进的VisuShrink阈值去噪法,对小波分解的每一层的高频成分进行阈值滤波处理,然后在假定振动信号段开始于一个较大的能量点,随着入侵冲击的减小,信号能量会逐渐减小的前提下,对输入信号取平方,以及均值滤波后进行归一化处理,用分析方法分割得到该时间段内一段完整的振动信号,确保每次进行特征提取的信号中只含有一段振动

信号,从而提高了系统的稳定性和鲁棒性。在接下来的小波包变换中,分别对低频成分与高频成分进行四层小波包变换,得到32个小波包成分,计算各个小波包成分的总能量,形成一个32维的信号特征向量。

由于如何选择小波函数对信号进行分析处理目前还没有完整的理论标准,杨正理等^[4]通过大量的实验分析表明,Daubechies系列小波适合处理光纤振动电平信号分析,因此选择db8小波基函数对光纤振动信号进行两层离散小波分解,并选取小波分解第二层细节系数离散值进行分析,以单一尺度细节系数作为信号特征向量。通过实验确定蓄意入侵事件的阈值,能够滤除多数风雨所造成的干扰,将蓄意入侵所产生的振动频率体现在单一尺度细节系数上。采用小波变换方法将光纤信号在不同尺度上展开,并在不同频段上提取信号特征,但是小波变换不具备平移不变性,如果信号在时域有一个延时,小波系数会发生很大的改变,另一方面,光纤安防监测系统是延时的,对采集的信号作实小波变换得到的小波系数具有不准确性。

喻晓芒等^[14]利用小波阈值收缩去噪法对单一的振动信号和环境噪声进行去噪处理,然后通过小波包分解到三层,提取基于频带能量的特征,构成三种振动信号和三种环境噪声的特征向量。杨正理等^[15]根据不同入侵事件信号在时频分布上的差异用小波能量熵测度进行描述,从而获得振动信号的特征。其过程是先采集信号的512个数据序列作为处理信号的时间窗,通过阈值法降噪,然后运用db8小波基进行四层小波多尺度分解,计算各尺度下不同时刻的小波能量、不同分解尺度下的小波能量谱以及小波能量熵,得到振动信号的能量熵分布,并作为光纤振动信号的特征向量。

另外,还有采用基于小波分解结合其他方法进行特征提取的方法。朱程辉等^[2]首先对采集到的原始信号进行加窗分帧处理,提取短时能量特征值和短时平均过零率特征值,采用双重阈值综合方法判断是否发生入侵事件。过零率表示在一定时间内,信号线与预定阈值线的相交次数;然后对光纤振动信号进行小波变换,把信号在不同尺度上的能量谱求解出来,将这些能量值按顺序排列起来分析信号在不同尺度上的能量分布,结合振动持续时间,形成识别振动信号的特征矢量。李凯彦等^[16]利用希尔伯特变换对信号进行包络提取并检查包络幅度,如果包络幅度在一段时间内均大于某个阈值时,确定该段信号有效,据此逐点检查,直至检测出所有有效信号段,然后结合最大能量与最高信噪比挑选出采样周期内主要振动信号的特征段,再用特征段时域持续时间和小波包能量谱构成复合特征向量。朱程辉等^[17]针对光纤周界安防系统入侵信号的非线性、非平稳性和间歇性等特点,提出了一种时域与频域特征相结合的特征提取方法。通过计算信号的饱和嵌入维数,将入侵时域信

号进行分帧处理,使得单次振动信号的完整性在后续处理中不受影响;采用计算嵌入维数方法,确定信号的最小分帧长度,因而能够较好地保留信号时间序列内在的动力学特性;提出对入侵振动信号两级判定识别方法,利用短时能量和短时平均过零率特征来判断是否有振动信号产生;对确定的振动信号进行小波变换,提取信号在各尺度上的小波系数的能量分布特征作为特征向量。

3.2 基于其他分解模型的特征提取方法

除基于小波分解的特征提取方法之外,还有利用信号统计参量,如标准差、脉冲计数、铃计数、事件持续时间、均值及方差、短时平均频率、能量等进行回归、动态规划、经验模态分解、谱分析等处理的特征提取方法,分别称作回归方程特征提取法、频率-时间特征提取法、本征模态分解特征提取法、谱分析特征提取法、基于基音特征分析的特征提取法、基于傅里叶分解的特征提取法,以及基于门限过零率和稀疏编码的特征提取法。

(1) 回归方程特征提取法

陶沛琳等^[18]首先基于常用的信号统计特征参量,即标准差、脉冲计数、铃计数、事件持续时间、均值及方差,采用逐步引入校验方法计算每个特征参量的显著性,选取多元回归平方和最大的三个特征参量用于解释因变量,计算得到检验统计量拒绝方向的概率小于0.001,表明特征参量能很好地解释因变量;然后,对于选取的特征参量,构建基于感知准则的判决器。计算结果发现,以脉冲数、方差和持续时间为特征向量的三种特征值,能很好地预测因变量即入侵行为的类别。

(2) 频率-时间特征提取法

王思远等^[19]用提取的短时过零率描述传感信号的短时平均频率,并将时频特性分段后构成相应的特征向量,通过计算短时平均频率降噪,并进行分段,再通过动态规划算法筛选出最优特征元素模型,将信号所有最优模型的参数作为信号特征向量。邹柏贤等^[20]对挖掘机挖掘、人工挖掘、汽车行走、人员行走和噪声这五种光纤振动信号的短时过零率和能量特征进行可视化分析,提出一种光纤振动信号的特征选取方法,即对过零率采样数据在采样点和时间两个维度组成的二维矩阵中,提取以中心位置对应的能量值大于阈值的 3×3 的数据块样本作为光纤振动入侵事件的描述特征,经实验数据验证,取得较好的识别效果。

(3) 本征模态分解特征提取法

蒋立辉等^[21]针对光纤安防监测系统输出信号的非平稳特性,采取一种新的处理方法,在振动信号中加入 N 组均方根相等的不同白噪声,对每个混入白噪声的信号进行经验模态分解成 N 组本征模态函数(IMF)分量,再对 N 组同阶IMF分量计算平均值,得到IMF分量的一组平均值,归一化后作为描述振动信号的特征。本征

模态分解方法对非平稳信号的时频分析特性优于小波方法,但存在边缘效应和模态混叠问题。

(4) 谱分析特征提取法

张燕君等^[22]首先对光纤入侵原始信号进行经验模态分解去除噪声,然后对本征模态分量进行自适应小波包分解,采用阈值法处理小波分解系数,再进行小波重构信号处理,以改善信号特征提取精度,最后采用高阶谱分析提取信号特征。

(5) 基于基音分析特征提取法

毕福昆等^[23]归纳出光纤振动信号与语音信号在特征分析上的相似之处,运用语音信号中的基音提取方法进行光纤振动信号的特征分析,运用平均幅差函数检测法提取光纤振动信号的平均幅差,作为光纤振动信号识别的特征。提取振动信号的基音时,即局部最小值之间的距离差,需要确定门限阈值,这个动态的,随不同信号的波形而变化。

(6) 基于傅里叶分解的特征提取法

盛智勇等^[24]将入侵信号变换到频域并借鉴声信号的处理方法,提出一种基于能量占比特征的有害入侵事件识别算法。对采集到的振动信号进行自相关处理后傅里叶变换,并计算功率谱密度,计算各信号不同频段的能量占比,作为信号分类识别的特征。

(7) 基于门限过零率和自稀疏编码的特征提取法

Wang^[25]提出基于门限过零率和稀疏编码器的算法提取光纤振动信号的两级特征,第一级特征提取过零率特征,以识别振动是否发生,通过第一级特征提取,降低光纤振动信号数据的维数。在发生振动的情况下,采用稀疏自编码神经网络算法提取振动信号的高维特征。

3.3 基于波形统计参数的特征提取法

除了上述通过基于小波分解或基于其他模型分解的方法提取信号特征之外,还有通过信号示意图等更为直观地提取信号统计特征的方法。例如,由于不同入侵事件,以及同一入侵事件不同时间内的信号的过零率也各不相同,它是检测和识别虚假警报信号,以及区分入侵事件和虚警事件的基础,Seedahmed等^[26]提取过零率在一段时间内的最小值、最大值、平均值、标准偏差等参数,构成描述入侵事件类型的特征向量,可以通过实验确定各入侵事件的特征向量范围。

Mahmoud等^[27]提出基于信号的过零率参数表示的特征提取方法,分两步完成。(1)首先提出基于过零率参数表示的四个可配置参数,检测出光纤入侵事件。这四个可配置特征参数分别是触发电平(Trigger Level, TL)、含零电平的时间段个数(Zero Settle Blocks, ZSB)、零电平(Zero Level, ZL)、事件连续的最长时间(Maximum Duration of the event, MD)。其中,触发电平表示事件被发现时的电平;含零电平的时间块个数表示含有零电平的时间段个数,用于确定入侵事件的起始和终止;零

电平表示在一个时间块内所有低于零电平的电平值都看作是零,即被当作零电平的实际电平上限值;事件连续的最长时间表示连续发生事件的最长持续时间。根据这四个参数的预设值($TL=5(LCs)$ 、 $ZSB=5(Blocks)$ 、 $ZL=0(LCs)$ 、 $MD=46(Blocks)$)检测出光纤入侵事件;(2)在对振动信号进行事件检测后,提取被检测入侵事件信号,提取以下用过零率LC表示的五个特征参数,即总电平交叉个数(Total Level Crossings)、被检测事件持续时间(Duration)、电平交叉表示的下降斜率(Slope of the falling edge of the LCs)、电平交叉表示的上升角度(The angle of the rising edge of the LCs)、零点个数(Number of Zeros),运用前馈神经网络中的多层感知机进行训练和测试。

Seedahmed等^[28]分别对围栏和地下两种环境下的光纤振动信号的处理、检测、识别,以及噪声抑制等进行了探讨和研究。提取信号的以下三个参数:(1)光纤信号的连续性参数过零率,它是这是衡量光纤信号持续期间连续性的量度,可用于区分光纤入侵事件和一些虚假事件;(2)信号的最大振幅强度,实际上是一个信号超出给定阈值的量度,并以百分数表示,它与振幅超出给定阈值多少有关,这个阈值随具体应用而不同;(3)信号的最大偏差,即每个信号段的最大振幅减去该分段的振幅均值,有助于区分挖掘入侵事件和连续较长的虚假事件。由以上三个参数构成识别入侵事件的信号特征向量。

4 光纤振动信号的识别方法

在对光纤入侵事件的识别方面,主要的识别方法有神经网络方法、经验阈值识别法及支持向量机方法,所探讨的光纤入侵事件类型各不相同,主要有:人工行走、汽车行驶、攀爬光缆、敲击、切断光缆、拖拽光缆、冰雹、大风、挖掘机挖掘、人工挖掘等,目前还没有适合各种光纤振动信号的通用识别方法。因实验环境、特征提取方法、识别方法,以及研究的入侵事件本身的不同,对各种入侵事件的正确识别率差别很大。

4.1 经验阈值识别方法

经验阈值法方法识别光纤振动信号的特点是需要经验确定特征向量中各分量的阈值,这需通过长期实验经验的积累,因此这种方法缺乏自适应性。饶云江等^[10]根据信号的边缘、峰值、长度、幅度、周期等参数组成的信号特征,用经验阈值法识别人行走及奔跑、汽车行驶、物体跳跃这四种光纤振动事件。罗光明等^[13]通过对光纤信号的小波多尺度分解计算得到的方差特征的实验参数值及环境噪声事件的特征区间,组成不同入侵事件的识别判据,根据提取的特征识别冰雹、大风、攀爬光缆、敲击光缆以及环境噪声事件。杨正理等^[4]根据小波分解单一尺度细节系数特征,通过实验确定蓄意入侵事件的阈值,滤除多数刮风下雨等事件所造成的干扰,将蓄意入侵所产生的振动频率体现在单一尺度细节系数上,并根据小波分解的结果定位蓄意入侵的位置。识别什么事件有男子攀爬及弱扰动事件(下雨、来往车辆震动、飞鸟起降等)。杨正理等^[15]依据不同时刻不同分解尺度下的小波能量谱以及小波能量熵分布组成的信号特征向量,确定不同入侵事件产生的信号经验值范围,再识别入侵事件。能够区分外界轻微扰动、风雨等环境因素与蓄意入侵事件,识别无扰动、轻微扰动、中度扰动和蓄意入侵事件。朱程辉等^[17]对入侵事件的识别分为确定振动信号是否存在和进一步识别入侵事件类型这两个阶段。先提取各分帧信号的短时能量和短时平均过零率特征,与先验得到的振动信号短时能量和短时平均过零率特征进行比较,判断振动信号是否存在,以提高入侵事件的正确识别率,减小误判率;为进一步识别入侵事件类型,提取信号能量分布特征与先验特征进行比较,从而识别入侵事件类型。实验研究的入侵事件类型包括:敲击栏杆、人员攀爬、大风、暴雨、飞鸟降落等典型入侵振动事件。Seedahmed等^[26]根据信号在预定时间长度内过零率的最小值、最大值、平均值、标准偏差及总数组成的特征向量,对比通实验确定的入侵事件的经验阈值范围,当信号超出事件阈值时,被认为发生入侵事

表1 三种特征提取方法的特点

特征提取方法	特点	实例
基于小波分解的特征提取法	需要预先设定基函数,计算复杂度为 $O(n)$,提取的特征维数较高,也增加了存储空间和分类识别计算复杂度。该方法适合于大部分信号,其对低频部分具有较高的频率分辨率,对高频部分具有较高的时间分辨率,很适合于探测正常信号中夹带的瞬变反常信号并分析其成分	文献[2,4,9-17]
基于其他分解模型的特征提取法	计算复杂度各不相同:回归方程法计算复杂度 $O(n^2)$,适合于信号的特征向量能很好解释因变量的情形;频率-时间法将频谱随时间的演变关系明确表现出来,适用于具有明显非平稳特征的故障信号识别,复杂度是 $O(1)$;本征模态分解法不需要预先设定基函数,具有自适应性,所得的本征模态分量突出了数据的局部特征,适用于非平稳性、非线性过程信号的特征提取;谱分析方法含有相位信息,可抑制高斯白噪声,能够刻画信号偏离高斯过程的信息,适用于非线性和非高斯信号特征提取,其中包含本征模态分解、小波分解及高阶谱分析等过程,复杂度可能更高,但是由于识别率一般不高,实用性受限	文献[18-25]
基于波形统计参数的特征提取法	缺乏信号的模式表达细节,利用经验阈值识别,缺乏自适应性,参数特征灵敏,易出现虚假警报,计算复杂度为 $O(1)$,适用于统计特征比较明显的情形	文献[26-28]

件,识别的光纤入侵事件包括在地面上攀爬围栏和切割围栏。陶沛琳等^[18]基于信号的常见统计量,即标准差、脉冲计数、铃计数、事件持续时间、均值及方差,采用逐步引入校验方法提取最显著的三个特征参量:脉冲数、方差和持续时间,根据这三个特征参量的经验阈值范围,判定入侵行为的类别,对车辆行驶入侵、人员步行入侵以及跑步入侵三种入侵行为有较好的识别能力。毕福昆等^[23]对提取的光纤振动信号的平均幅差,采用门限阈值的方法区分人工镐刨、人工挖地和机械电钻、机械电镐四种入侵事件。

在采用经验阈值识别法的文献中,对各种光纤振动入侵事件的正确识别率差距很大,如文献[17],对攀爬事件的正确识别率达到99.3%,而对鸟类着陆的识别率只有3.2%,文献[18]对车辆行驶、人员行走和跑步入侵事件的正确识别率为83.33%,而更多数文献则提出方法,但并未给出测试结果。

4.2 支持向量机识别方法

支持向量机方法识别光纤振动信号的特点是对大规模训练难以实施,解决多分类有困难,需要通过将多个向量机进行组合,实现基于向量机的多分类器,需要选择基函数,如径向核函数、线性核函数。

朱程辉等^[2]对采集到的原始信号提取短时能量和短时平均过零率特征值,首先运用双重阈值综合方法判断是否存在入侵事件;然后,对信号进行小波变换,提取小波能量谱特征,结合事件振动持续时间,用支持向量机分类算法识别入侵事件。实验研究的入侵事件类型包括敲击栏杆、人员攀爬、大风、暴雨、飞鸟降落。李凯彦等^[16]提取 Hilbert 变换提取信号包络,利用包络幅度、最大能量、最高信噪比确定有效信号段,由有效信号段持续时间和小波包能量谱组成复合特征向量,采用二叉树支持向量机方法识别自然噪声、光纤切断(剪网)、攀爬、大雨、大风这五种入侵事件。万遂人等^[9]根据提取信号在小波空间的能量分布的32维特征向量,用支持向量机分类器对光纤信号进行分类,研究识别非入侵信号、剪网信号、爬网信号入侵事件。蒋立辉等^[21]根据本征模态函数分解的分量特征,利用 SVM 及二值分类方法识别敲击光缆、攀爬围栏、汽车振动及大风入侵这四种事件。

在采用 SVM 识别方法的文献不多,但对入侵事件的正确识别率较高。文献[9]对这剪网和爬网两种入侵事件的正确识别率达到95%和98%;文献[16]对的正确识别率99.6%,文献[21]对攀爬、敲击、其他(风和汽车振动),平均识别率达92%以上。

4.3 神经网络识别方法

采用神经网络方法识别光纤振动信号的特点是要求较多的实验样本,而光纤振动实验环境的准备和数据采集工作量大,且神经网络模型训练时间较长,正确识别率还不能令人满意。

Jiang 等^[11]根据提取光纤信号的能量谱特征向量,用 BP 神经网络识别机场周围的三种入侵行为,即人工行走、汽车行走、小动物爬行。赵杰等^[12]根据小波分解的能量谱特征向量,先将信号分为有害信号和无害信号两大类,采用综合考虑观测数据和确定性先验知识的 BVC-RBF 神经网络算法实现信号分类,识别人或器械对光纤的侵扰侵害光纤围栏、攀爬光纤围栏事件。喻晓芒等^[14]根据提取信号的小波三层分解能量特征向量,基于实验数据确定各特征向量的阈值范围,再运用 BP 神经网络的方法识别自然环境噪声,以及在无干扰环境下的三种入侵事件:行人、小汽车、小动物干扰事件。

Wang^[25]在发生振动的情况下,采用稀疏自编码神经网络算法提取振动信号的高维特征,通过自编码神经网络分类器识别四种通过仿真实验的光纤入侵事件,即冲压振动、摇摆振动、短爆震和长振动。Mahmoud 等^[27]根据提取的四个参数:触发电平、含零电平的时间块个数、零电平和事件连续的最长时间进行阈值检测,进而提取入侵事件信号的总电平交叉个数、事件持续时间、信号示意图的下降斜率和上升角度,还有零点个数,用前馈神经网络中的多层感知机进行入侵光纤信号数据的训练和测试,研究识别攀爬围栏、切割围栏、扔石头、拖拽这四种入侵事件。Seedahmed 等^[28]通过信号的过零率特征抑制因暴雨引起的虚假警报,根据信号的过零率、最大振幅强度、信号振幅的最大偏差组成的特征向量,利用神经网络及决策二叉树方法识别手工挖掘、过往交通车辆、以及道路交叉口这三种入侵地下光纤事件。王思远等^[19]根据光纤振动信号的短时平均频率和时间特征,建立相应的特征元素模型,使用动态时间规划算法进行模型筛选处理,根据欧式最短距离选择最优模型,利用人工神经网络识别四种对光纤损伤事件。张燕君等^[22]根据对处理信号的高阶谱分析提取的特征,使用粒子群优化后的支持向量机和反向传播神经网络进行信号分类,利用仿真光纤入侵信号进行验证。

在采用人工神经网络识别方法的文献中,如文献[11],对人员行走、汽车行走、动物爬行这三种入侵事件的正确识别率是96.8%,文献[14]对人员行走、小汽车、小动物行走事件的正确识别率是96.9%,文献[19]对四类入侵事件(敲打、拉伸、摇晃、踩踏)的平均识别准确度在97%,而文献[26]对扔石头和攀爬这两种入侵事件的识别率分别是100%和50%。

此外,盛智勇等^[24]对提取的光纤振动信号的各频段的能量占比,采用线性判别分析分类器识别人工走路振动、人工作业信号和机械信号。

5 结论与展望

由于光纤振动信号的随机性、非平稳性以及某些入侵事件信号与非入侵事件信号的相似性,致使光纤振动

表2 三种识别方法的特点

识别方法	特点	实例
经验阈值识别法	需要积累相关经验才能确定特征向量中各分量的阈值,缺乏自适应性,适用于信号变化比较平稳的情形	文献[4,10,13,15,17,18,23,26]
支持向量机识别方法	对大规模训练难以实施,解决多分类有困难,一般只用于二分类,但需要通过将多个向量机进行组合实现基于向量机的多分类器。需要凭经验选择核函数。当 N (N 为样本数)数目很大时SVM的存储和计算将耗费大量的机器内存和运算时间,计算复杂度 $O(N^3)$	文献[9,16,21]
神经网络识别方法	应用比较广泛,要求较多的实验样本,而光纤振动实验环境的准备和数据的采集工作量大。该算法不易解释,由于神经元的数目较多,神经网络模型训练时间较长,在训练过程中往往需要对一些参数进行人为的调整。目前对光纤振动信号的正确识别率还不能令人满意	文献[11,12,14,19,22,25,27-28]

信号识别具有较大的不确定性,容易产生误报现象。因此,基于光纤振动安防监测系统的关键是准确识别不同的光纤振动事件,这就需要研究确定描述不同事件的本质特征,以及高识别率的识别方法。

光纤振动信号的特征提取方法有三种,分别是基于小波分解的方法、基于其他分解模型的方法,以及提取信号波形图统计特征的方法,各有其特点,以第一种特征提取方法为主。但是,由于信号的峰值、功率谱和频带能量等特征容易受到高斯噪声的影响,在小波方法处理中存在模糊提取和线性稳态的缺陷;小波分析方法虽能得到信号的细节变化,但其实质仍是一种窗口可调的傅里叶变换,没有摆脱傅里叶变换的束缚,在实际应用中缺乏自适应性,且当数据量比较大时这种处理方法的计算量较大。

光纤振动信号的识别方法也可分为神经网络方法、经验阈值识别法及支持向量机方法,采用经验阈值法和神经网络方法识别为主,经验阈值法有其固有的不足,即自适应性差。神经网络识别方法的识别率较高,随着计算机计算速度的进一步提高,深度学习技术的不断发展,这种方法将成为未来发展的趋势。因此,为应用深度学习方法,需要有效地特征提取方法。文献[20]通过可视化分析时间-过零率、时间-能量的视图提出一种新的特征提取方法,这是一种不同于现有方法的新思路,以及模拟生物视觉系统处理数据的方式,有望成为应用于深度学习识别的特征提取方法。

对于光纤振动信号的识别,面临的问题除了特征提取和识别方法之外,对更多更广泛的入侵事件类型的研究也是重要研究课题,包括搭建真实的实验环境、实验数据的采集、对信号的去噪声和分段(帧)的预处理等,以及进一步提高特征提取方法及识别方法的泛化能力,最终得到适合于各种入侵事件的特征提取和识别的通用方法,这诸多问题仍有待解决。

参考文献:

[1] 周正仙,肖石林,全芳轩.基于M-Z干涉原理的定位式光纤振动传感器[J].光通信研究,2009,155(5):67-70.
[2] 朱程辉,瞿永中,王建平.基于时频特征的光纤周界振动信

号识别[J].光电工程,2014,41(1):16-22.
[3] 周正仙,段绍辉,田杰,等.分布式光纤振动传感器及振动信号模式识别技术研究[J].光学仪器,2013,35(6):11-15.
[4] 杨正理.采用小波变换的周界报警信号辨识[J].光电工程,2013,40(1):84-89.
[5] Hussain Z M,Boashash B.Adaptive instantaneous frequency estimation of multi-component FM signals using quadratic time frequency distributions[J].IEEE Transactions on Signal Processing,2002,50(8):1866-1876.
[6] Mahmoud S S,Hussain Z M,Cosic I,et al.Time-frequency analysis of normal and abnormal biological signals[J].Journal of Biomedical Signal Processing and Control,2006,1(1):33-43.
[7] De Vries J.A low cost fence impact classification system with neural networks[C]//IEEE 7th Africon Conference in Africa,2004:131-136.
[8] Cohen L.Time-frequency analysis[M].Englewood Cliffs,New Jersey:Prentice Hall PTR,1995.
[9] 万遂人,彭丽成.安防系统光纤信号特征提取与分类算法研究[J].科技导报,2012,30(36):24-28.
[10] 饶云江,吴敏,冉曾令,等.基于准分布式FBG传感器的光纤入侵报警系统[J].传感技术学报,2007,20(5):45-49.
[11] Jiang Lihui,Liu Xiangming,Zhang Feng.Multi-target recognition used in airpoty fiber fence warning system[C]//Proceeding of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Qingdao, China, July 11-14 2010:1126-1129.
[12] 赵杰,丁吉,万遂人,等.全光纤安防系统模式识别混合编程的实现[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(1):41-46.
[13] 罗光明,李泉,崔平贵,等.分布式光纤传感器的周界安防入侵信号识别[J].光电工程,2012,39(10):71-77.
[14] 喻晓芒,罗光明,朱珍民,等.分布式光纤传感器周界安防入侵信号的多目标识别[J].光电工程,2014,41(1):36-41.
[15] 杨正理,孙书芳.基于小波能量熵的光纤周界安防系统信号识别[J].光电子·激光,2016,27(12):1328-1333.
[16] 李凯彦,赵兴群,孙小菡,等.一种用于光纤链路振动信号模式识别的规整化复合特征提取方法[J].物理学报,2015,64(5):243-249.