

基于多特征参量的 ϕ -OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究

张 颜¹ 娄淑琴¹ 梁 生^{2*} 王 鹏¹

¹北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

²北京交通大学理学院, 北京 100044

摘要 针对目前相位敏感光时域反射计(ϕ -OTDR)分布式光纤扰动传感系统难以对扰动事件进行有效判别的问题, 提出一种基于多特征参量的扰动模式识别方法。作为识别依据的多特征参量包括平方差、短时过电平率、短时傅里叶变换以及扰动持续时间, 对以上特征参量利用加权平均型综合评判函数进行模式识别, 可以有效识别出应力破坏(敲击)、攀爬、浇水(模拟下雨环境)以及轻度碾压(模拟非破坏性人为扰动)四种扰动模式。对60组共240个实验样本进行识别, 对以上四种扰动事件的识别率分别达到91.2%, 88.3%, 90%和86.7%。该方法克服了现有单一特征参量识别模式受限的问题, 提高了扰动事件识别的准确性。

关键词 传感器; 分布式光纤扰动传感系统; ϕ -OTDR; 多特征参量; 模式识别

中图分类号 TP212 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1105005

Study of Pattern Recognition Based on Multi-Characteristic Parameters for ϕ -OTDR Distributed Optical Fiber Sensing System

Zhang Yan¹ Lou Shuqin¹ Liang Sheng² Wang Peng¹

¹School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract In view of the present phase sensitive optical time-domain reflectometer (ϕ -OTDR) distributed optical fiber sensing system is difficult to distinguish the disturbance effectively. A disturbance modes recognition method based on multi-parameters is presented. A weighted average synthetic evaluation function is used for characteristic parameters pattern recognition including square difference, short time level crossing rate, short time Fourier transform and duration of the disturbance. By the proposed method, four disturbance modes including stress damage (breaking), climbing, watering (simulate rain environment) and mild crushing (simulate harmless artificial disturbance) are effectively recognized. The recognition rate of disturbance pattern recognition is realized as 91.2%, 88.3%, 90% and 86.7%, respectively, for the corresponding four disturbance modes by analyzing the statistics of 60 groups of 240 samples. The proposed method breaks though the limitation of disturbance modes recognized by current single-characteristic parameter method and improves the reliability of disturbance pattern recognition.

Key words sensors; fiber distributed disturbance sensing system; ϕ -OTDR; multi-characteristic parameter; pattern recognition

OCIS codes 060.2370; 290.5870; 070.5010

1 引 言

分布式光纤扰动传感系统以其灵敏度高、结构简单、无需外场供电、检测距离长等诸多优势在周界安

收稿日期: 2015-05-12; 收到修改稿日期: 2015-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61177082, 61205074)

作者简介: 张 颜(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 13120044@bjtu.edu.cn

导师简介: 娄淑琴(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤传感、特种光纤等方面的研究。E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: shliang@bjtu.edu.cn

防、油气管道、通信光缆监测等诸多领域中获得了广泛的应用^[1-6]。其中,基于相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)的光纤分布式传感系统具有结构简单(只占用一根光纤)、可对同一时刻多个扰动位置同时定位、分辨率高及定位精度稳定等多种优势已成为目前分布式光纤扰动传感研究领域新的热点^[7-15]。

φ -OTDR由Tarlor等^[7]于1993年首次提出,与传统光时域反射计(OTDR)相比,主要区别在于注入光纤中的光是强相干的,因此输出信号为后向瑞利散射光相干干涉光强。目前,关于如何提高 φ -OTDR系统定位精度和增加传感长度等方面的研究报道较多^[8-15],而对于扰动事件模式分析和识别的研究相对较少。2014年,Tan等^[16]以信号强度为识别依据在埋地环境下对人工挖掘、车辆经过以及挖掘机挖掘三种模式进行了识别研究。2014年,Zhu等^[17]以短时过电平率(LCR)为识别依据在埋墙环境下对攀爬、踢以及浇水三种模式进行了识别研究。到目前为止,对于 φ -OTDR扰动信号的模式分析和识别研究仍主要以单一特征参量为识别依据,方式简单,但较易受到干扰,在复杂环境中应用的识别可靠性较低。

本文通过对 φ -OTDR系统信号多个特性进行分析,变单一特征参量为多特征参量作为识别依据,利用移动差分方法突出扰动信号特征,对实际应用中的应力破坏(敲击)、攀爬、浇水(模拟下雨环境)和轻度碾压(模拟非破坏性人为扰动)四种扰动信号进行分析,克服了单一特征参量目标识别易受到干扰及识别事件有限的缺点,提高了扰动事件识别的准确性。

2 实验系统及原理

φ -OTDR工作原理如图1所示。超窄线宽激光器作为光源发出的激光经声光调制器调制为光脉冲,光脉冲通过环形器注入传感光纤。传感光纤中后向瑞利散射光在脉冲宽度内发生干涉,干涉光强通过环形器被探测器检测,经放大后进入数据采集卡进行采集。

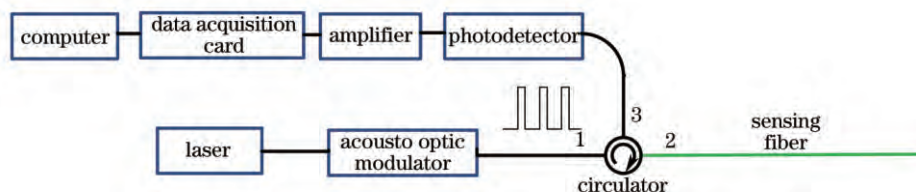


图1 φ -OTDR原理示意图

Fig.1 Principle schematic diagram of φ -OTDR

当有扰动作用在传感光纤上时,由于弹光效应的影响,受到扰动位置的光相位产生变化,引起对应位置后向散射光的相位变化,与脉冲宽度内散射光的干涉光强也会发生相应变化。将 φ -OTDR在不同时刻的后向瑞利散射光干涉光强曲线做差,差值曲线上光干涉信号发生剧烈变化的位置,则对应扰动发生的位置。

对扰动信号进行模式识别,首先需要建立 φ -OTDR的光信号传输数学模型,分析有扰动作用在传感光纤上时的光强变化。只考虑单模光纤中的一重后向瑞利散射,将光纤中的后向瑞利散射看成一维脉冲响应模型^[18]。脉宽为 W 的相干光波在 $t=0$ 时刻注入到传感光纤中,忽略偏振态影响,得到静态状态下后向瑞利散射的波函数为^[19]

$$y(t) = \sum_{k=1}^N E_k(t - \tau_k) \alpha(\tau_k) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_k}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{W}\right), \quad (1)$$

式中 t 为时间, $E_k(t)$ 为激光器光信号的波函数, W 为经过声光调制器调制后的脉冲宽度, α 为光纤衰减常数, c 为真空中的光速, n 为光纤的折射率, N 为散射体总数, τ_k 和 $\alpha(\tau_k)$ 分别为第 k 个散射体的时间延迟和幅值因子, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{W}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{t}{W} \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (2)$$

当有扰动作用在传感光纤上时,得到的后向瑞利散射的波函数为

$$y'(t) = \sum_{k=1}^M E_s(t - \tau_k) \alpha(\tau_k) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_k}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{W}\right) + \sum_{k=M+1}^N E_s(t - \tau_k) \alpha(\tau_k) \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_k}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_k}{W}\right) \exp\left\{j\left[f\left(t - \frac{2nz_k}{c} + \frac{nz_d}{c}\right) + f\left(t - \frac{nz_d}{c}\right)\right]\right\}, \quad (3)$$

式中第一项为扰动位置前的后向瑞利散射波的波函数,第二项为扰动位置后的后向瑞利散射波的波函数。 M 为扰动位置之前散射体的个数, z_k 为第 k 个散射体距离传感光纤输入端的距离, z_d 为扰动发生的位置, $f(t)$ 为因为扰动而引入的相位变化。忽略激光光源的频率漂移,后向散射光的光强可以表示为

$$p'(t) = \langle |y'(t)|^2 \rangle = \sum_{i=1}^N |E_s(t)|^2 \alpha^2(\tau_i) \exp\left(-2\alpha \frac{c\tau_i}{n}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{W}\right) + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M |E_s(t)|^2 \alpha(\tau_i) \alpha(\tau_j) \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i + \tau_j)}{n}\right] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j}{W}\right) \cos[(\omega_s + \omega_A)(\tau_j - \tau_i)] + 2 \sum_{i=M+1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N |E_s(t)|^2 \alpha(\tau_i) \alpha(\tau_j) \exp\left[-\alpha \frac{c(\tau_i + \tau_j)}{n}\right] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j}{W}\right) \cos\left[(\omega_s + \omega_A)(\tau_j - \tau_i) + f\left(\tau - \tau_i + \frac{nz_d}{c}\right) - f\left(\tau - \tau_j + \frac{nz_d}{c}\right)\right] \quad (4)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 为时间平均, $|E_s(t)|^2$ 为输入光波的功率, ω_s 为注入脉冲的频率, ω_A 为声光调制器引入的频移。可以看到由于 $f(t)$ 的影响,同一位置在不同的时间点的后向散射光强会有较大变化。因此,选取扰动位置不同时间点的后向散射值进行差分,对差分曲线进行分析。选取了四种特征参量作为多特征参量的参量输入:平方差、短时过电平率(LCR)、短时傅里叶变换(STFT)频谱值以及扰动持续时间。

3 多特征参量模式识别

传统的模式识别往往利用单一特征变量,这种识别算法简单,但极易受到干扰,从而使得识别结果的准确性降低^[20]。一般而言,某一目标有反映其不同属性的多个参量。多参量模式识别的过程是:首先获取、处理反映目标不同属性的原始测量数据;从获得数据中抽取准确反映目标属性的特征不变量,然后再将这些不同的特征不变量组成一个特征向量,最后再利用这个包含了丰富、全面信息的目标特征向量和目标库中标准目录相应的特征向量进行匹配计算,根据计算结果,最终确定目标类型。多特征目标参量克服了单特征参量目标识别的缺点,提高了扰动事件识别的准确性。

3.1 特征参量提取

选取的目标参量包括四种:平方差、短时过电平率、短时傅里叶变换以及扰动持续时间。

平方差反映组内个体间的离散程度^[21]。平方差算法的优点主要在于运算简单,相对于信号的频率信息其更突出信号的波动大小,反映扰动信号的起伏大小。在 φ -OTDR 光纤分布式传感器中,后向瑞利散射信号的起伏大小可以有效反映出扰动的瞬时强度,从而识别出突发的高强度扰动(应力破坏等)。

过电平率是指信号在某一电平附近变化时穿过该电平的次数,是一种基本的提取信号频率-时间的方法,反映单位时间内信号在某一电平附近扰动的频率^[22],可以得到

$$L_{\text{cr}} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \Psi(I(n) \geq a)}{N}, \quad (5)$$

式中 $I(n)$ 为输入信号点的幅度, a 为设定的电平阈值, Ψ 为指示函数,当括号内条件成立时值为1,否则为0。短时过电平率与传感信号的短时平均频率以及短时相位变化成正相关,因此,可以用短时平均过零率作为信号的特征。

短时傅里叶变换是一种常用的信号时频分析方法,其基本思想是将信号傅里叶变换的积分区间局部化,是同时保留信号时域信息和频域信息的有效工具。通过对传感信号进行短时傅里叶变换可以有效分析出传感信号在不同扰动时间区域内的频率信息,从而将高频扰动和低频扰动进行区分。在处理 φ -OTDR 光纤分布式传感器的信号时,选取 Hamming 窗对信号进行分段^[23]

$$X[m, k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot \text{hamming}[n - k] \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} mn\right), \quad (6)$$

式中扰动持续时间为扰动作用在传感光纤上的持续时间,体现了扰动信号的时域特性,通过对扰动持续时间的分析可以有效区分瞬时作用和长时作用^[24]。

3.2 多特征参数的模糊评价矩阵

提取 φ -OTDR 光纤分布式传感器模式识别的多个特征参数构成模糊因素集 $X=(S_D, L_{CR}, S_{TFT}, D_{UR})$,其中 S_D 表示平方差, L_{CR} 表示短时过电平率, S_{TFT} 表示短时傅立叶变换, D_{UR} 表示扰动持续时间;根据模糊数据理论,建立模糊因素变量 X 对应模糊辨识对象集 A 的模糊隶属函数^[25]与模糊评判矩阵。

为了讨论问题的一般化,设模式识别的对象有 n 类: A_1, A_2, \dots, A_n ; 每类的特征集 X 有 m 个特征参数。因此,模糊因素变量 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 对应模糊识别对象集 $A=\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 的模糊隶属函数分别为 $\{\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x), \dots, \mu_{A_n}(x)\}$, 假设特征参量是正态分布模糊集,测量值 X 的第 j 个指标对识别对象 A_i 的隶属函数为

$$\mu_{A_i}(x_j) = \exp\left[-\left(\frac{x_j - \bar{x}_{ij}}{\sigma_{ij}}\right)^2\right], \quad (7)$$

式中 $x_j, \bar{x}_{ij}, \sigma_{ij}$ 分别为测量值的第 j 个指标、辨识对象的第 j 个指标的均值和平方差。从而获得特征参数的模糊因素集 X 与识别的模糊识别对象集 A 的多特征参数、多目标的模糊评价矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times m}$:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & \cdots & & \\ \vdots & & & \\ r_{n1} & \cdots & & r_{nm} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $r_{ij}=\mu_{A_i}(x_j)$ 为测量值 X 的第 j 个指标对辨识对象 A_i 的隶属函数。

根据模糊评判矩阵 R , 采用模糊推理的相应标准与方法进行推理判决,可推断得到测量值 X 归属于某一识别对象。

3.3 多特征参数的模糊属性评价模型

测量值 X 归属于某一识别对象是依据模糊属性评判准则,并计算出评判函数来作出推断。采用加权平均型综合评判模型进行模糊属性评判。

加权平均型综合评判函数由归一化模糊评判矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times m}$, 归一化权向量 $W=(w_j)_{1 \times m}$ 构成:

$$D_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot r_{ij}. \quad (9)$$

采用最大隶属原则判决:若 $D_k = \max_{1 \leq i \leq n} \{D_i\}$, 则 $X \in A_k$ 。加权平均型综合评判模型能充分利用各个信息参与决策。对于权向量来说,认为进行模式识别的四个特征参量($S_D, L_{CR}, S_{TFT}, D_{UR}$)权向量相同。

4 实验结果及讨论

实验系统如图 1 所示,采用标准单模光纤作为传感光纤。线宽为 10 kHz 的超窄线宽半导体激光器作为光源发出 1550 nm 波长的激光,经过声光调制器调制为脉冲宽度约为 486 ns 的脉冲信号(空间分辨率 50 m)后再进行放大,传感光纤总长 25.05 km。由探测器接收传感光纤传回的后向散射信号。探测器接收到的信号经过放大后进入信号处理模块进行处理,信号处理模块包括信号采集和信号处理两部分,信号采集部分接



图 2 内场模块实际照片

Fig.2 Actual photo of infield module

收探测器检测的信号(采集卡采样频率为4 MHz),在上位计算机中使用LabVIEW软件进行阈值判断确定报警并将报警信息显示在界面软件上,将得到的报警位置的波形变化进行分析,最终得到扰动信号的模式,内场模块实际照片如图2所示。

当无外界扰动时得到归一化后向瑞利散射光强 $p(t)$ 如图3(a)所示。归一化后向瑞利散射光强随着传感光纤长度的增加而逐渐衰减,尾端的强反射为非涅耳反射。在传感光纤900 m处进行扰动,得到的归一化后向瑞利散射光强 $p'(t)$ 如图3(b)所示。可以看到当有扰动作用在传感光纤上的时候,对应位置点的后向瑞利散射光强有明显变化,将 $p(t)$ 和 $p'(t)$ 进行差值计算,得到曲线如图3(c)所示。将得到的 Δp 做均值处理,为了提高定位准确性,同时采用了移动差分^[26-27]的方法。移动差分的主要思想是将每一时刻的后向瑞利散射曲线与指定时间间隔前的后向瑞利散射曲线做差分处理,以此来突出不同时刻后向瑞利散射曲线中波动强烈的部分,即外界扰动造成的波动。在实验中,时间间隔选为0.4 ms(采集卡采集一次完整瑞利散射曲线的时间)。两种方法得到结果如图3(d)所示。

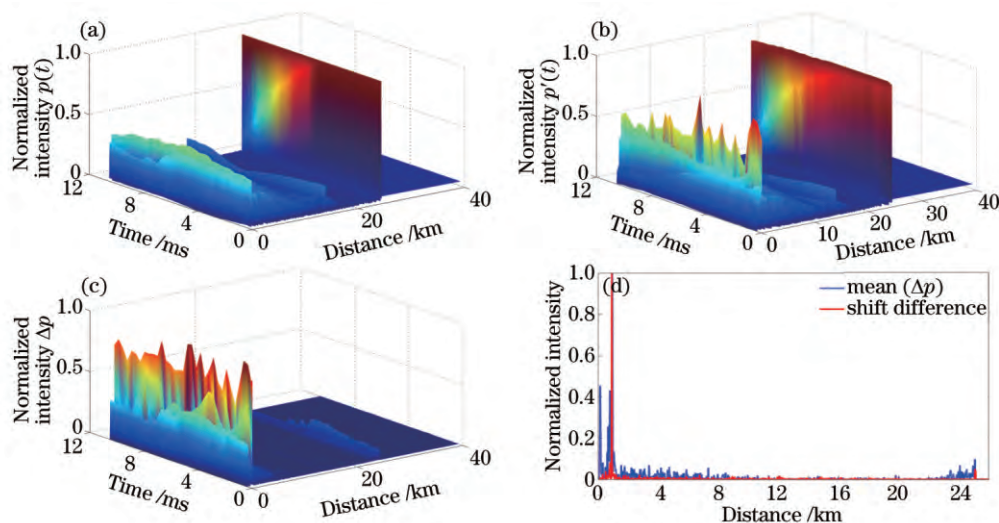


图3 归一化 φ -OTDR分布式光纤扰动传感器输出及其处理结果。(a)无扰动;(b)扰动在900 m处;(c)有扰动与无扰动的差值;(d)分别使用差值直接平均与移动差分处理后的结果

Fig.3 Normalized output of φ -OTDR distributed optical fiber sensing system and its processing result. (a) No disturbance; (b) disturbance at 900 m; (c) difference between disturbance and no disturbance; (d) processing result by using direct average and shift difference respectively

由图3(d)可以看到900 m扰动点的归一化光强差值要明显高于其他区域(移动差分方法比差值直接平均法更明显),可以通过这一特征进行扰动定位。分别在900、6500、21500 m位置处进行扰动,扰动模式分别为应力破坏(敲击)、攀爬、浇水(模拟下雨环境)以及轻度碾压(模拟非破坏性人为扰动)四类。在三个扰动位置各进行20次实验,得到240个样本,得到原始扰动波形(以900 m处为例)如图4所示。

将原始输出波形进行移动差分(归一化输出差分),得到结果如图5所示。

分别对四种扰动模式的归一化差分做平方差、短时过电平率以及短时傅里叶变换处理,得到结果如图6所示。

应力破坏导致的扰动属于瞬时作用,持续时间短、强度高、短时波动大、短时频率集中;攀爬导致的扰动信号强度中等、持续时间长,波动适中、频率平均;浇水(模拟下雨环境)导致的扰动信号强度较弱、持续时间长、频率较低;轻度碾压(模拟非破坏性人为扰动)导致的扰动信号强度最弱、持续时间短、波动小、短时频率集中。在900、6500、21500 m三个扰动位置共选取15组样本得到特征参量作为目标库,如表1所示,其中 x 和 σ 分别对应(7)式中的均值和平方差。

根据多特征参量模式识别理论,将待识别数据分别提取平方差、短时过电平率、短时傅里叶变换以及扰动持续时间4种特征值,利用表1中的目标库通过(7)式分别得到待识别扰动信号分别对于4种候选扰动模式的隶属函数,每一个待识别扰动信号有16个隶属函数值(4种扰动模式,每种扰动模式中有4种对应不同特

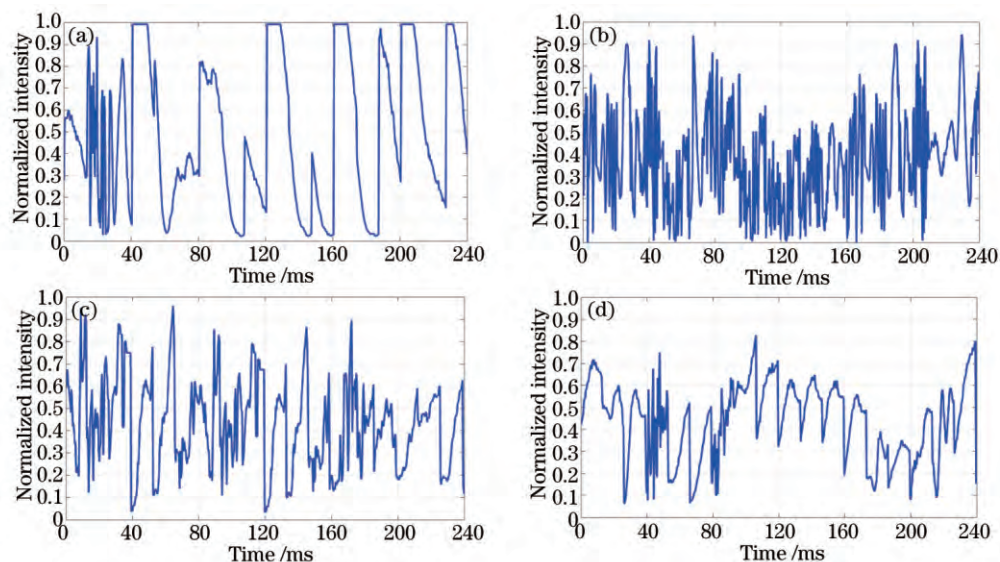


图4 900 m处4种扰动模式归一化输出。(a) 应力破坏(敲打); (b) 攀爬; (c) 浇水; (d) 轻度碾压

Fig.4 Normalized output of four perturbed model at 900 m. (a) Stress damage (breaking); (b) climbing; (c) watering; (d) mild crushing

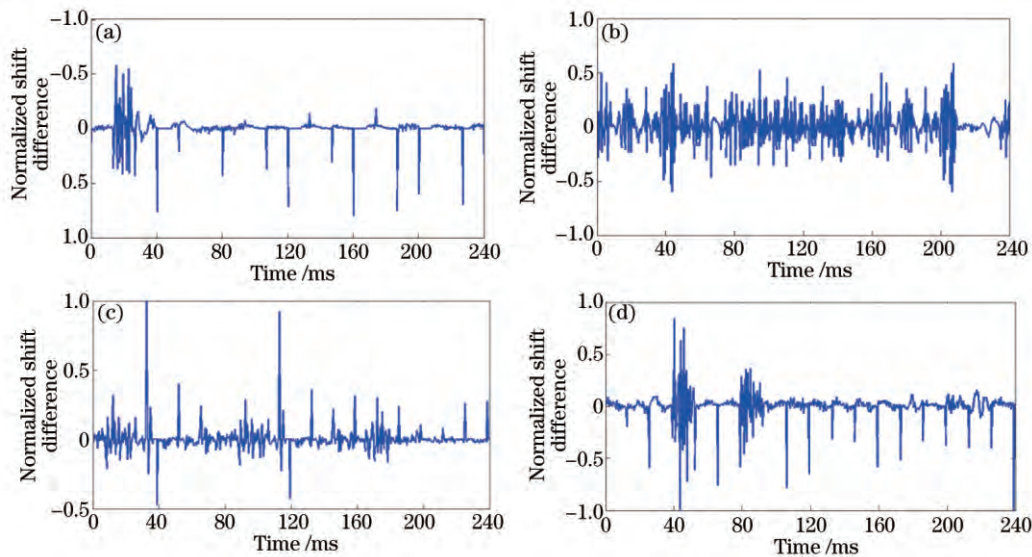


图5 900 m处四种扰动模式归一化输出差分。(a) 应力破坏(敲打); (b) 攀爬; (c) 浇水; (d) 轻度碾压

Fig.5 Normalized output difference of four perturbed model at 900 m. (a) Stress damage (breaking); (b) climbing; (c) watering; (d) mild crushing

征参量的隶属函数),这16个隶属函数值构成了待识别信号的多目标的模糊评价矩阵,如(8)式所示。根据(9)式计算出待识别扰动信号对于4种候选扰动模式的评价函数值,其中最大的评价函数值对应的候选扰动模式即为扰动模式识别结果。

表1 不同扰动模式的特征参量

Table 1 Characteristic parameters of different disturbance patterns

| Vibration pattern | Characteristic parameter | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | S_D | | L_{CR} | | S_{TFT} | | D_{UR} | |
| | \bar{x}_{sd} | σ_{sd} | \bar{x}_{LCR} | σ_{LCR} | \bar{x}_{STFT} | σ_{STFT} | \bar{x}_{Dur} | σ_{Dur} |
| Breaking | 0.08 | 0.02 | 0.2 | 0.05 | 4 | 1 | 15 | 15 |
| Climbing | 0.05 | 0.02 | 0.4 | 0.2 | 3.5 | 1.5 | 220 | 20 |
| Watering | 0.02 | 0.01 | 0.1 | 0.1 | 1.5 | 0.5 | 220 | 20 |
| Crushing | 0.005 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 4 | 1 | 15 | 15 |

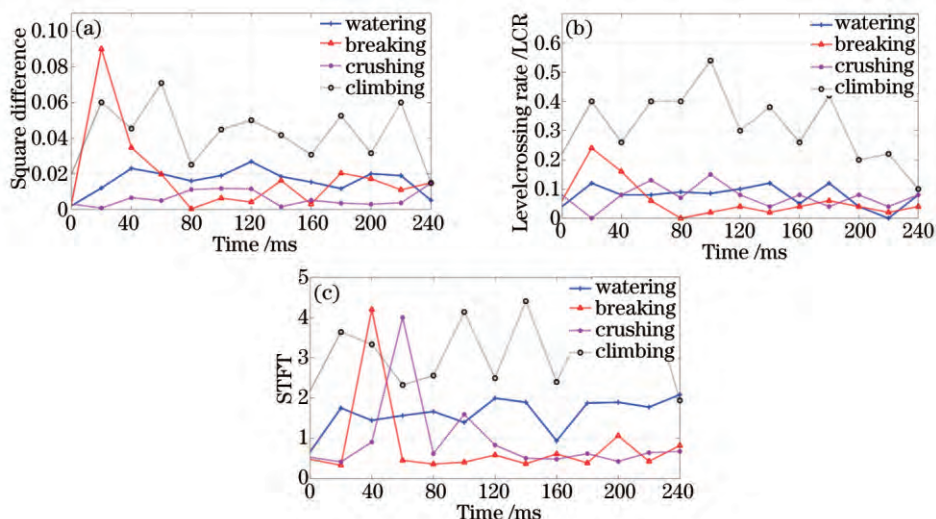


图 6 不同算法对归一化差分处理结果。(a) 平方差; (b) 短时过电平率; (c) 短时傅里叶变换

Fig.6 Normalized difference processing results of different algorithms. (a) Square difference; (b) LCR; (c) STFT

利用目标库对 60 组数据进行模式识别, 识别结果如表 2 所示, 表 2 中最后一栏表示识别率以外的样本被错误识别的事件种类。

表 2 识别结果

Table 2 Recognition results

| Vibration pattern | Sample number | Recognition number | Recognition rate/% | Recognition failed |
|-------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
| Breaking | 60 | 55 | 91.2 | crushing:5% watering:3.8% |
| Climbing | 60 | 53 | 88.3 | watering:8.3% crushing:3.4% |
| Watering | 60 | 54 | 90 | climbing:8.3% breaking:1.7% |
| Crushing | 60 | 52 | 86.7 | breaking:10% watering:3.3% |

通过表 1 可以看出, 使用单一特征参量进行识别识别模式受限(如短时过电平率无法区分浇水和轻度碾压; 短时傅里叶变换频谱值无法区分应力破坏和轻度碾压; 扰动持续时间无法区分应力破坏和轻度碾压、攀爬和浇水等), 多特征参量识别能够有效克服这一缺陷。通过表 2 可以看出, 使用多特征参量识别方法对应力破坏(敲击)、攀爬、浇水(模拟下雨环境)以及轻度碾压(模拟非破坏性人为扰动)四种扰动模式进行识别, 识别率分别达到了 91.2%, 88.3%, 90% 和 86.7%, 识别效果良好。

5 结 论

针对 φ -OTDR 分布式光纤扰动传感系统模式识别问题, 提出了一种基于多特征参量的事件扰动模式识别方法。将多特征参量包括平方差、短时过电平率、短时傅里叶变换以及扰动持续时间作为特征参量, 利用加权平均型综合评判函数进行模式识别, 有效识别出应力破坏(敲击)、攀爬、浇水(模拟下雨环境)以及轻度碾压(模拟非破坏性人为扰动)四种扰动模式, 识别率分别达到 91.2%, 88.3%, 90% 和 86.7%。所提出的多特征参量的事件模式识别方法, 克服了现有单一特征参量目标识别模式受限的问题, 有效提高了扰动事件目标识别结果的准确性, 为分布式光纤扰动传感系统的进一步推广应用提供理论指导和技术参考。

参 考 文 献

- 1 Li X, Sun Q, Wo J, *et al.*. Hybrid TDM/WDM-based fiber-optic sensor network for perimeter intrusion detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1113-1120.
- 2 Shi Y, Feng H, An Y, *et al.*. Research on wavelet analysis for pipeline pre-warning system based on phase-sensitive optical time domain reflectometry[C]. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), International Conference on IEEE, 2014: 1177-1182.
- 3 Lee M, Taylor H F. Distributed fiber optic intrusion detection system with improved sensitivity[C]. Optical Fiber Sensors, 2006.
- 4 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.*. Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber

- Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405004.
- 5 Liu Jianxia. Research progress of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on φ -OTDR[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080021.
刘建霞. φ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080021.
- 6 Wang He, Sun Qizhen, Li Xiaolei, *et al.*. Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020004.
王 贺, 孙琪真, 李晓磊, 等. 干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020004.
- 7 Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: U. S. Patent, 5, 194, 847[P]. 1993-3-16.
- 8 Li Qin, Zhang Chunxi, Li Lijing, *et al.*. Influences of the frequency drift of the laser on location precision of the phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305003.
李 勤, 张春熹, 李立京, 等. 激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计扰动定位精度的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305003.
- 9 Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, *et al.*. Modulation instability-induced fading in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Opt Lett, 2013, 38(6): 872-874.
- 10 Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, *et al.*. Coherent noise reduction in high visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3631-3637.
- 11 Zhong X, Zhang C, Li L, *et al.*. Influences of laser source on phase-sensitivity optical time-domain reflectometer-based distributed intrusion sensor[J]. Appl Opt, 2014, 53(21): 4645-4650.
- 12 Rao Y J, Luo J, Ran Z L, *et al.*. Long-distance fiber-optic φ -OTDR intrusion sensing system[C]. 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2009: 750310.
- 13 Peng F, Wu H, Jia X H, *et al.*. Ultra-long high-sensitivity φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Opt Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- 14 Peng F. 128 km fully-distributed high-sensitivity fiber-optic intrusion sensor with 15 m spatial resolution[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2014: M3J. 4.
- 15 Wang Jie, Jia Xinhong, Rao Yunjiang, *et al.*. Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 044212.
王 杰, 贾新鸿, 饶云江, 等. 基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 044212.
- 16 Tan D, Tian X, Sun W, *et al.*. An oil and gas pipeline pre-warning system based on φ -OTDR[C]. International Conference on Optical Fiber Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2014: 91578 W.
- 17 Zhu H, Pan C, Sun X. Vibration pattern recognition and classification in OTDR based distributed optical-fiber vibration sensing system [C]. SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2014: 906205.
- 18 P Healey. Fading in heterodyne OTDR[J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 30-32.
- 19 Li Q, Zhang C, Li L, *et al.*. Localization mechanisms and location methods of the disturbance sensor based on phase-sensitive OTDR[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(9): 2099-2103.
- 20 Li Zhengdong, He Wuliang, Chen Xingwu. A method for target-recognition by a multisensory[J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(1): 14-15.
李正东, 何武良, 陈兴无. 一种利用多传感器进行目标识别的方法[J]. 传感器技术, 2001, 20(1): 14-15.
- 21 Williams J D. Moments of the ratio of the mean square successive difference to the mean square difference in samples from a normal universe[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1941, 12(2): 239-241.
- 22 Feng Gang, Duan Qichang, Zhang Congli. A parameter self-optimize method of multi-gate zero cross ratio startpoint detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(3): 525-527.
冯 刚, 段其昌, 张从力. 一种多门限过零率前端检测理论的参数自优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(3): 525-527.
- 23 Nuttall A H. Some windows with very good sidelobe behavior[J]. Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 1981, 29(1): 84-91.
- 24 Wang Siyuan, Lou Shuqin, Liang Sheng, *et al.*. Pattern recognition method of fiber distributed disturbance sensing system based on M-Z interferometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2613-2618.
王思远, 娄淑琴, 梁 生, 等. MZ干涉仪型光纤分布式扰动传感系统模式识别方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2613-2618.

25 Li Hongxing, Wang Peizhuang. Fuzzy Math[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985:116-128.

李洪兴, 汪培庄. 模糊数学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 116-128.

26 Lu Y, Zhu T, Chen L, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.

27 Qin Z, Zhu T, Chen L, *et al.*. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2011, 23(15): 1091-1093.

栏目编辑: 苏 岑