

文章编号 1004-924X(2015)02-0334-08

基于图像处理的光纤预警系统模式识别

孙 茜, 封 皓*, 曾周末

(天津大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)光纤预警系统对一维信号进行模式识别产生的误报和较低的识别效率,提出基于形态学方法提取时空二维信号特征,并利用相关向量机(RVM)分类器对事件进行分类识别的方法。首先,将 Φ -OTDR采集到的时空二维信号当作图像,根据信号在图像上的特征采用图像处理的方法对不同入侵事件信号进行阈值分割。然后,基于本文提出的特征提取方法,利用不同事件区域在幅值、面积、形状以及区域间隔上的差别提取不同信号特征。最后,利用相关向量机分类器对不同事件信号进行识别并采用“一对一”的多分类策略。对3种管道安全事件进行了实验。实验结果表明,本文提出方法的识别精度能够达到97.8%,而算法时间不到1s。与传统模式识别方法相比,提出的算法大幅度地改善了系统性能,且简便易行,能够满足 Φ -OTDR光纤预警系统在线实时监测的要求。

关键词:光纤光学;光学时域反射计(OTDR);光纤预警系统;模式识别;形态学;特征提取

中图分类号:TN973;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0334

Recognition of optical fiber pre-warning system based on image processing

SUN Qian, FENG Hao*, ZENG Zhou-mo

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: fhlele@tju.edu.cn

Abstract: To reduce the time-consuming and misinformation of one dimensional signal recognition by the pre-warning system in a Phase-sensitivity Optical Time-domain Reflectometer(Φ -OTDR), a new method to acquire two dimension signals by the Φ -OTDR pre-warning system and to recognize events based on Relative Vector Machine(RVM) classifier was proposed. Firstly, the spatial and temporal two dimension signal was taken as an image and the image processing method was used for the threshold segmentation of different events according to the image characteristics. Then, the proposed feature extraction method based on morphology was used to extract different signal features by using the amplitude, area, shape and internal of region as feature vectors. Finally, the RVM classifiers and "one to one" strategy were used for multi-class recognition. The experiments on three pipeline safety events show that the feature extraction method proposed in this paper greatly improves the recognition accuracy with less computation time, the accuracy has been reached to 97.8% and the computing time is less than 1 s. As compared with traditional methods, the algorithm has better performance, thus is very suitable for the pre-warning system online monitoring of Φ -OTDRs.

收稿日期:2014-08-19;修订日期:2014-09-29.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61304244)

Key words: fiber optics; Optical Time-domain Reflectometer (OTDR); optical fiber pre-warning system; pattern recognition; morphology; feature extraction

1 引 言

基于相干瑞利散射技术的分布式光纤预警系统,通过检测从光纤各部分散射回来的后向散射光的光强来获得并定位外界振动信号。其中相位敏感光时域反射计(Phase-sensitive Optical Time Domine Reflectometer, Φ -OTDR)光纤预警系统以普通单模光纤作为光传输和传感载体,可实现长距离实时监测和精确定位。该系统便于铺设,抗电磁干扰能力强,易于工程化,常应用在工程结构的安全检测、光纤周界防护、油气管道安全预警等领域^[1-5]。在光纤预警系统中,振动信号的分类识别至关重要。若产生误报,不但会造成人力物力的浪费,严重的还会延误处理时间甚至危及生命财产安全。因此如何准确识别入侵事件种类,及时报警,减少误报,避免不必要的资源浪费一直是光纤预警系统研究的重点问题。

Φ -OTDR 采集到的振动信号以时-空域二维矩阵的形式输出^[6]。传统的信号处理方法首先定位事件信号在空域上的所在位置,然后提取该位置的时域信号^[7],对一维时域信号进行特征提取,完成分类识别。由于这种方法需要先进行定位,如多点定位,不仅运算量极大,而且耗时很长。除此之外,它对定位精度的要求非常高,一旦定位错误,则不能正确识别出事件种类,容易产生误报。因此光纤预警系统急需一种高效、准确的模式识别方法。

Φ -OTDR 采集到的二维信号在图像上显现出了明显的特征,不同事件在视觉上存在着较大的差异,因此利用图像处理能够识别出不同事件类型^[8]。本文基于形态学对时空二维信号进行特征提取,并利用相关向量机(Relative Vector Machine, RVM)分类器对事件进行了分类识别。该方法直接处理二维信号,无需定位信号,提高了算法的效率,避免了定位误差对识别精度的影响。

2 Φ -OTDR 光纤预警信号特征

本文以光纤预警管道入侵事件为例,对 Φ -OTDR 光纤预警系统的模式识别方法进行了研究。3 种典型的管道入侵事件为大车压过管道沿线,人工挖掘管道周围土壤以及人沿管线走动。试验在大港-枣庄成品油管道展开。系统采用的传感光缆为 2006 年建设该成品油管道时与管道同沟敷设的 GYTA 六芯单模通讯光缆,位于管道正上方约 30 cm,与地面垂直距离约为 1.5 m。选取其中一段约为 20 km 的光缆进行实验,脉冲重复频率为 500 Hz,空域采样率为 50 MHz。系统所得空域信号即背向散射曲线呈锯齿状,表示光强随距离上下起伏变化,提取连续数次光脉冲所返回的多条散射曲线中相同位置处的采样点,连续形成该点的时域信号。图 1 为 Φ -OTDR 光纤预警系统采集到的 3 种入侵管道安全事件产生的信号滤波后在时域 Φ -空域上的二维信号。

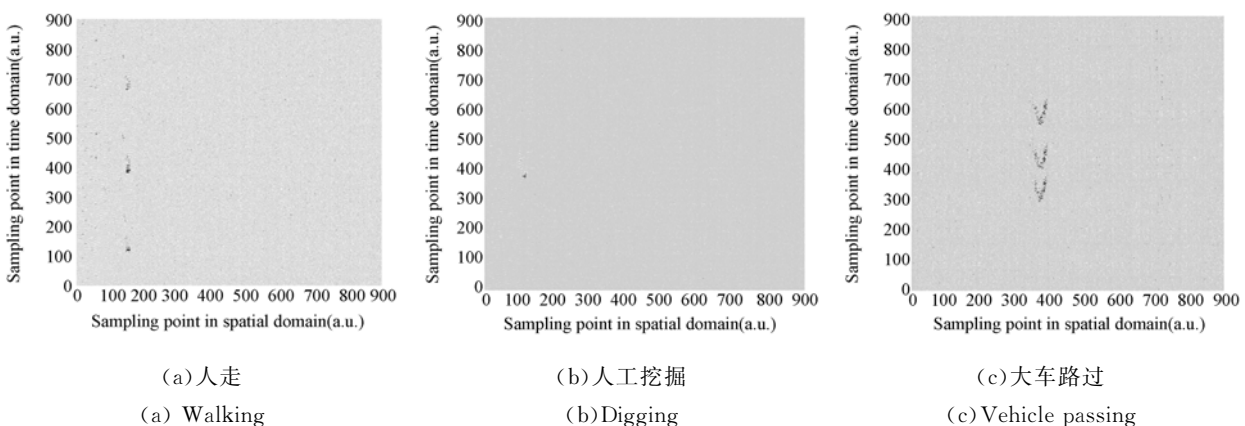


图 1 3 种事件的二维信号时空图

Fig. 1 Two dimensional signals for three events

为了能够清晰地显示区域特征,选取了 900×900 的方阵。图 1(a)为人沿管道走动的事件信号,图 1(b)为人工挖掘事件的信号,图 1(c)为大车沿管道行驶压过减速杠时的信号。不同的安全事件中,作用于光纤上方地面的激振力在时域上的变化以及它产生的波在空域上的传播均是一个复杂过程。本文将 3 种类型的事件均理想化为点源。根据弹性半空间理论^[9],弹性波沿土壤表面和土壤内部传播,其衰减的速度与振源的性质、激振频率、振源能量以及离振源的距离等因素有关。激振频率越大衰减越快,振动事件的能量越大衰减越慢。入侵事件作用于土壤后,波沿土壤传播到达光纤,并沿光纤左右方向传播。受波在土壤中传播速度的影响,在瞬时作用力下二维平面内波沿两个方向传播并逐渐衰减的过程如图 2 所示。

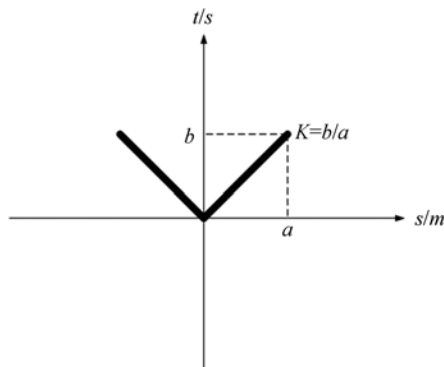


图 2 土壤中波沿光纤传播衰减示意图

Fig. 2 Propagation of waves along fiber in soils

图中斜率 K 表示波在土壤中的传播速度。不同入侵事件对于土壤的作用力不同,频率不同,作用时间也不同,因此造成了 3 种振动信号在土壤中能量的衰减过程也不同。所有类型的振动信号经土壤传播到达光纤后均呈 v 型,但只有在在大车压过减速时杠碰撞能量大,作用时间短,产生较为明显如图 2 所示的 V 型图像;而其他两种事件与土壤的作用过程相对缓慢,能量较小,信号形成的 v 型两翼非常弱。这种振动在时域上可看作多个微弱振动呈现先增大后减小的趋势,如图 3 所示,多个 V 在时域上连缀起来就呈现为类似圆的形状。

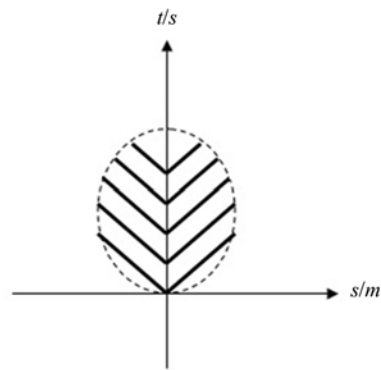


图 3 微弱振动形成波在土壤中的传播示意图

Fig. 3 Propagation of waves generated from weak vibration in soil

根据人走动和铁锹挖掘能量的不同,以及其信号在时域上的不同变化,两种事件在图像上的特征区域大小和形状都有差别。根据不同事件在图像上的不同特征,利用图像处理技术分割图像,再利用本文提出的基于形态学的特征提取方法进行模式识别,就能够识别出不同的事件类型。

3 基于形态学的特征提取方法

3.1 图像预处理

在进行特征提取之前要先分割图像,将特征区域与背景区分开。从图 1 中可以看出,事件特征区域的幅值与背景幅值之间的差异比较大,因此选择阈值分割法能够满足要求。将原二维信号图像转化为灰度图像后进行阈值分割,阈值计算采用 Ostu 法^[10]。分割后的图像如图 4 所示。由于原始二维信号时域上的零点在图像下方,而在进行图像分割操作时, MATLAB 自动将时域零点放到了图像上方,因此图像呈上下颠倒,但不影响模式识别结果。

从图 4 中可以看出,分割后的图像除了特征区域外还存在一些噪点,采用中值滤波法可以去掉噪点。除了噪点外一些特征区域还存在孔洞,这些孔洞会影响后续特征提取的效果,因此利用图像膨胀的方法填充孔洞。然后将不同区域进行标记,标记后的图像如图 5 所示,不同颜色即为标记完成的区域(彩图见期刊电子版)。

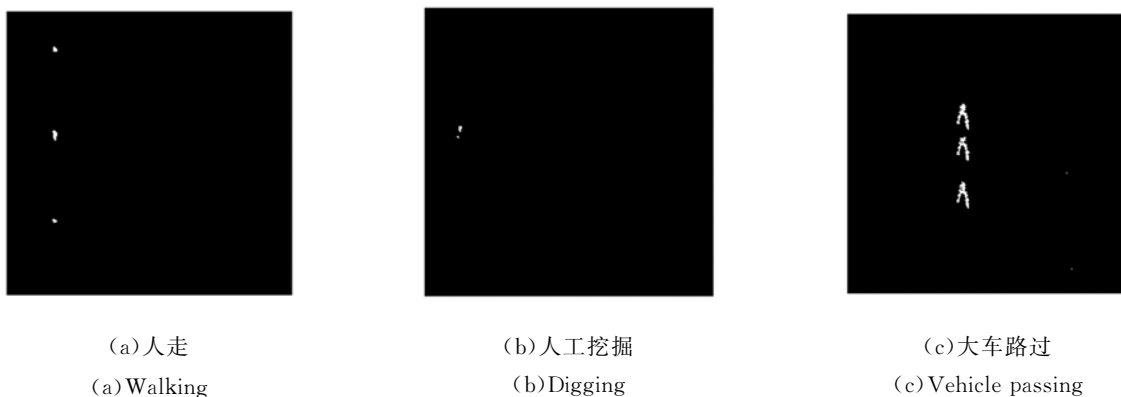


图 4 3 种事件阈值分割后的图像

Fig. 4 Images after threshold segmentation for three events

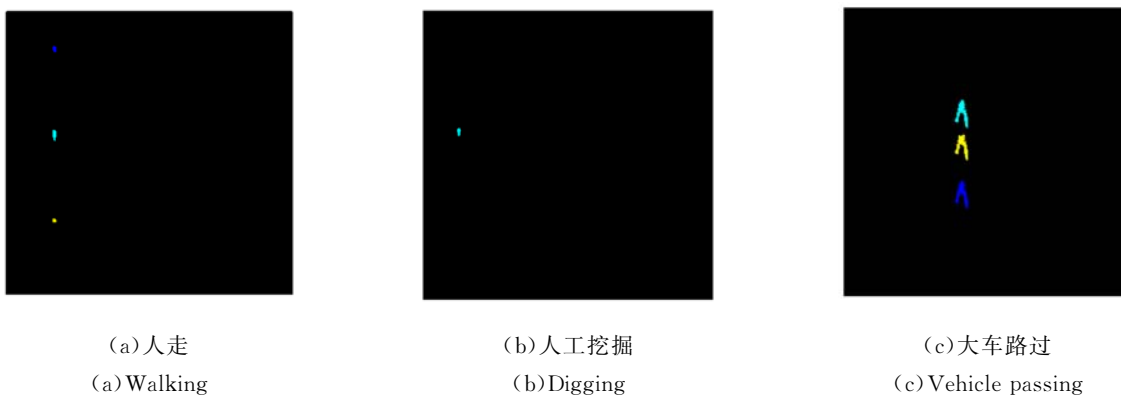


图 5 3 种事件标记后图像

Fig. 5 Images for events labeled in different colors

3.2 特征提取

不同的工况需要设定不同的空域和时域采样率,因此时空图像中显示的事件区域个数及特征可能会不同。为了便于统一处理,本文针对每个图像中各个事件的区域进行特征提取,同时获得了更多的特征样本。

首先,因为 3 种事件的作用力不同,获得的二维振动信号的振幅不同,因此将不同标记区域的原始信号振幅作为特征向量中的一个特征值。其次,不同入侵事件的能量不同,在图像上所占区域的像素数也存在很大差别,因此利用区域像素数作为特征向量中的另一个特征值。

除此之外,在相同的采样率下,不同事件点在时域上的间隔是不同的。本文中二维信号在时域上的采样频率为 500 Hz,人走路两个步伐间隔约为 0.5 s,大车行驶前后轮压过减速带的时间间

隔约为 0.25 s,人工挖掘受人为操作的限制,动作间隔要远大于 0.5 s,因此,事件区域在时域上的间隔,即图像中区域间的距离能够很好地表征不同事件之间的差异。在计算区域距离时采用最小距离法,如图 6 所示。

首先计算各个区域的质心,质心用 $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 表示,其中 n 表示区域的个数。然后针对每个质心计算与它相邻的质心的距离并求最小距离。

$$d_{\min i} = \min(|c_i - c_{i-1}|, |c_i - c_{i+1}|), i \in (2, \dots, n-1). \quad (1)$$

如果图像中仅有一个特征区域,无法获得质心间距离时,则赋予该特征区域一个较大的距离值。

从图像中还观察到不同事件的区域形状也存在着差异,这是因为大车行驶过程中能量比较大,

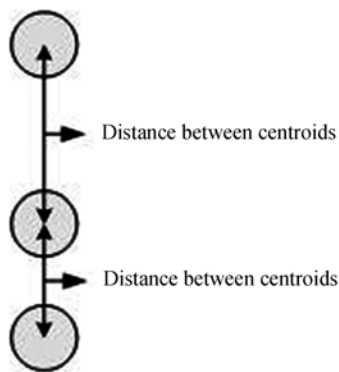


图 6 区域质心间的距离
Fig. 6 Intervals of centroids

振动波在空域上向两边传播,随着时间的推移,就形成了图中的人字形;而其他两类事件能量较小,人沿管线走动的时候由于脚与地面的作用力较为均匀,所以事件区域更接近于规则的圆形;铁锹在挖土的过程中,作用力变化比较大,因此区域形状

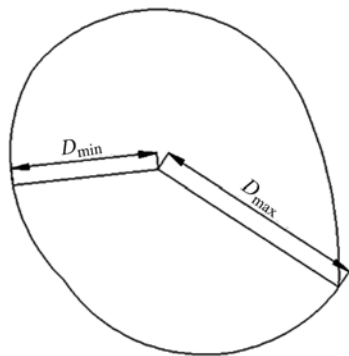


图 7 区域形状
Fig. 7 Shape of area

较为不规则。综上所述,本文利用形状特征来增加特征的多样性。如图 7 所示,首先求每个区域的边界,然后根据式(2)计算边界所有点到质心的距离。

$$D_{ik} = |b_{ik} - c_i|, k \in (1, \dots, K), \quad (2)$$

式中: K 为每个区域边界点的个数,求每个区域边界点到质心的最大距离 D_{max} 和最小距离 D_{min} ,再计算每个区域的形状系数 S 为:

$$S_i = |D_{max} - D_{min}|. \quad (3)$$

为了说明本文提出的特征提取方法在 Φ -OTDR 光纤预警系统模式识别上的优越性,利用区域描绘子法进行了比较实验。区域描绘子种类很多,根据本文安全事件区域的特征选择其中最为相关的 6 个,包括区域凸壳像素数,与区域有着相同二阶矩的椭圆偏心率、椭圆长轴和椭圆短轴,与区域有着相同面积的圆的直径, Euler Number 为区域中的对象数减去这些对象的孔洞数。

每种事件类型采集 50 个特征区域并计算每个区域的特征向量,3 个事件类型一共为 150 个样本。3 种事件的特征向量平均值如表 1 所示。因为人工挖掘在图像中仅有一个特征区域,为了明显区别其他两类事件,在计算质心距离时赋予人工挖掘一个较大的值 1000。区域描绘子特征值如表 2 所示。

表 1 3 种事件 4 个特征的平均特征值

Tab. 1 Mean values of 4 features of three events

Event type	Amplitude	area	Centroid interval	Shape
Walking	10.287 1	245	271.373	8.104 1
Digging	12.663 4	205	1 000	14.601 0
Vehicle passing	8.508 4	1 461	118.032 6	46.745 2

表 2 区域描绘子特征平均值

Tab. 2 Mean values of region descriptor

Event type	Conves area	Eccentricity	Major axis length	Minor axis length	Equiv diameter	Euler number
Walking	279	0.757 4	24.484 3	12.981 2	17.319 2	1
Digging	224	0.875 1	25.914 5	10.640 7	16.155 9	1
Vehicle passing	2413	0.911 8	84.034 8	40.503 1	43.128 7	-1

4 分类器设计

光纤预警系统采集到的威胁管道安全事件的振动信号是非平稳、随机性的,并且通过以上分析

可知,采集到的数据样本量较小。RVM 是基于贝叶斯框架构建的学习机,不受 Mercer 定理的限制,可以构建任意的核函数,比支持向量机(SVM)更加稀疏,因此测试时间较短,识别精度高,适用于光纤预警系统的在线检测^[11-13]。

首先定义向量 $\mathbf{x} \in R^n$ 为光纤预警系统采集到信号特征的模式输入, $\mathbf{t} = [t_1, t_2, t_3]^T$ 为 3 类目标向量。RVM 的分类模型为:

$$y(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \sum_{i=1}^N \omega_i K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + \omega_0 = \Phi \mathbf{w}, \quad (4)$$

式中: N 是数据长度; \mathbf{w} 为权值向量, $\mathbf{w} = [\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_N]^T$; Φ 为 $N \times (N+1)$ 的矩阵, $\Phi = [\phi(\mathbf{x}_1), \phi(\mathbf{x}_2), \dots, \phi(\mathbf{x}_N)]^T$; $K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ 是核函数。整个数据集的似然函数为:

$$P(\mathbf{t} | \mathbf{w}) = \prod_{i=1}^N \sigma[y(\mathbf{x}_i, \mathbf{w})]^{t_i} \{1 - \sigma[y(\mathbf{x}_i, \mathbf{w})]\}^{1-t_i}. \quad (5)$$

为避免过拟合,确保模型的稀疏性,用稀疏贝叶斯方法对权值向量 \mathbf{w} 赋予零均值高斯先验分布,即:

$$p(\mathbf{w} | \boldsymbol{\alpha}) = \prod_{i=0}^N N(\mathbf{w}_i | 0, \alpha_i^{-1}) = \prod_{i=0}^N \sqrt{\frac{\alpha_i}{2\pi}} \exp\left(-\frac{\alpha_i}{2} \mathbf{w}_i^2\right). \quad (6)$$

通过求 α_i 的最大后验概率来估计最大后验权值,从而输出 RVM 模型,由于篇幅所限,具体的求解过程请参考文献[8],这里不再赘述。

本文选择较为常用且效果较好的高斯核函数,核函数的半径一般设定在 $0 \sim 1$ [14]。通过实验分析可知,针对管道入侵事件的识别,核半径取不同值时识别准确率差别不大,取 0.6 左右时,识别准确率最高。在多分类决策选择时,选择分类精度最高的“一对一”多分类决策[15],因此本文中需要 3 个 RVM 分类器。

分类器设计完成后,在应用分类器进行模式识别之前,要对分类器进行性能评价。由于本文采用 3 个分类器进行安全事件的识别,若分别评价每个分类器,不仅耗时过多,而且没有意义,因此本文将 3 个分类器作为一个整体来进行性能评价,并选择 5-折交叉验证的方法对准确率进行评价。分别从每个事件 100 个样本中选择出 20 个作为测试样本,5 次交叉验证得到的准确率如图 8 所示。

图中 MFE 是在特征选择后利用本文提出的形态学特征提取方法得到的识别准确率, RDFE 是利用区域描绘子的特征进行分类识别的准确率。可以看出,本文提出的特征选择方法对于光纤预警安全事件分类识别的准确率很高,均达到

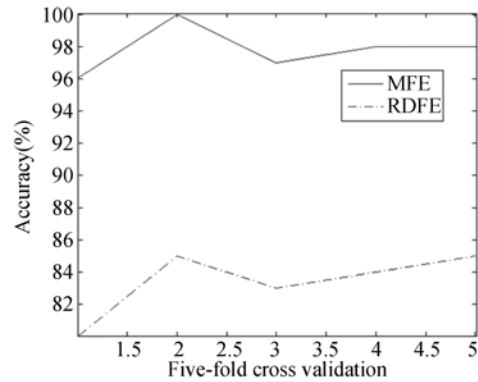


图 8 分类识别准确率

Fig. 8 Accuracy of five-fold cross validation

了 95% 以上。选择其中一次交叉验证的结果分析每种事件的分类准确率,结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,3 种事件的识别准确率都能够达到 95% 以上,其中人工挖掘在识别过程中出现了错误,这主要是因为信号采集过程中人工挖掘信号中混入了人走动的信号。在方法测试时由于测试信号所属的类别是已知的,所以出现识别错误;而在应用本文方法进行在线识别时,在不知道被识别对象属于哪类时可以准确地区分出这些干扰信号,并避免误分。

表 3 3 种事件的分类识别结果

Tab. 3 Recognition results of three events

Sample model	Walking	Digging	Vehicle passing
Sample size	20	20	20
Walking	20	1	0
Digging	0	19	0
Vehicle passing	0	0	20
Accuracy (%)	100	95	100

传统的光纤预警模式识别方法首先利用差分方法对二维信号在空域上定位入侵事件发生的位置,提取该位置的时域信号,然后利用小波处理方法提取信号特征[16],再利用分类器对事件进行识别。这种方法在定位环节不仅耗费时间而且容易受到噪声的干扰,产生定位误差,影响识别准确率。这里对本文方法、一维信号模式识别方法以及区域描绘子方法进行了比较,每种方法的平均准确率以及分类器的识别速度如表 4 所示。

ODR 是基于一维信号的传统模式识别方法, RDFE 是使用所有区域描绘子的特征提取方法, MFE 是本文提出的方法。从表 4 中可以看出, 与一维信号模式识别方法相比, 本文中基于形态学的方法大幅提高了识别精度, 运算效率也明显提高, 能够满足光纤预警实时监测的需求。

表 4 不同方法的平均准确率和识别速度对比

Tab. 4 Performance comparison among different methods

Method	Average precision (%)	Recognition efficiency/s
ODR	80	10.526
RDFE	85.4	2.169
MFE	97.8	0.7028

参考文献:

- [1] KUANG K S C, AKMALUDDIN, CANTWELL W J. Crack detection and vertical deflection monitoring in concrete beams, using plastic optical fibre sensors [J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, 14 (2): 205-216.
- [2] 李川, 刘江, 庄君刚, 等. 基于背向 Brillouin 散射监测混凝土应变[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 325-330.
LI CH, LIU J, ZHUANG J G, *et al.*. Strain detection of concrete structures based on Brillouin backscattering[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (2): 325-330. (in Chinese)
- [3] HAO J Z, DONG B, VARGHESE P. An armored-cable-based fiber Bragg grating sensor array for perimeter fence intrusion detection[J]. *SPIE*, 2011, 8332: 83320B-1-9.
- [4] TANIMOLA F, HILL D. Distributed fibre optic sensors for pipeline protection[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2009, 1(4-5): 134-143.
- [5] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [6] 安阳, 封浩, 冯欣, 等. 基于双光束干涉的相位敏感光时域反射计[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706005.
AN Y, FENG H, FENG X, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706005. (in Chinese)
- [7] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 519-531.
WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7 (4): 519-531. (in Chinese)
- [8] 朱明, 杨航, 贺柏根, 等. 联合梯度预测与导引滤波的图像运动模糊复原[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 850-855.
ZHU M, YANG H, HE B G, *et al.*. Image motion blurring restoration of joint gradient prediction and guided filter[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 850-855. (in Chinese)
- [9] ANYAEGBUMAM A J. Complete stresses and displacements in a cross-anisotropic half-space caused by a surface vertical point load[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2014, 14(2): 171-181.
- [10] 韩廷祥, 张志胜, 郝飞, 等. 灰度序列图像中基于纹理特征的移动阴影检测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2931-2942.
HAN Y X, ZHANG ZH S, HAO F, *et al.*. Shadow detection based on texture feature in gray sequence images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21

5 结论

传统的一维信号处理方法将时-空二维信号在空域上一维一维的扫描, 若发现振动信号位置再进行后续处理以及模式识别, 运算量巨大, 需要采用高速计算机才能满足光纤预警系统实时监测识别的需求。本文提出基于形态学的特征提取方法, 利用 RVM 分类器识别入侵事件, 并以光纤预警管道入侵事件为例验证了方法的可行性和优越性。实验结果表明, 本文方法的识别准确率为 97.8%; 相较传统的一维信号处理方法, 本文方法不仅提高了识别准确率, 而且效率更高, 完全满足光纤预警系统的在线检测需求。

- (11):2931-2942. (in Chinese)
- [11] TIPPING M E. Sparse bayesian learning and the relevance vector machine[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2001, 1(3): 211-244.
- [12] ZIO E, MAIO F D. Fatigue crack growth estimation by relevance vector machine[J]. *Expert Systems with Application*, 2012, 39(12): 10681-10692.
- [13] 董起,田联房.最速上升关联向量机高光谱影像分类[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1398-1405.
DONG CH, TIAN L F. Hyperspectral image classification by steepest ascent relevance vector machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1398-1405. (in Chinese)
- [14] ZHONG S P, CHEN D Y, XU Q F. Optimizing the Gaussian kernel function with the formulated kernel target alignment criterion for two-class pattern classification[J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(7): 2045-2054.
- [15] SCHWENKER F. Hierarchical support vector machines for multi-class pattern recognition [C]. *Fourth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems & Allied Technologies*, Brighton: DBLP, 2000, 2: 561-565.
- [16] 冯欣,曾周末,封浩,等.基于小波信息熵的分布式振动传感系统的扰动评价方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 116005.
FENG X, ZENG ZH M, FENG H, et al.. A method for evaluating the disturbance in distributed vibration sensor based on wavelet information entropy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 116005. (in Chinese)

作者简介:



孙 茜(1984—),女,天津人,博士研究生,2008年,2010年于东北大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光纤传感,信号处理以及模式识别。E-mail: sunqiansohu@126.com

通讯作者:



封 皓(1983—),男,河北衡水人,博士,讲师,2006年,2011年于天津大学分别获得学士、博士学位,主要从事无损管道检测技术,测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: fhlele@tju.edu.cn

导师简介:



曾周末(1962—),男,湖南人,教授,博士生导师,1982年,1985年于华中工学院分别获得学士、硕士学位,1993年于天津大学获得博士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院院长,主要从事检测技术及仪器、系统集成与智能化、微电子机械系统等方面的研究。E-mail: zhmzeng@tju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)