

光纤周界安防系统的高准确度事件识别方法

李志辰, 刘 琨, 江俊峰, 马鹏飞, 李鹏程, 刘铁根

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室
天津大学光纤传感研究所, 天津 300072)

摘 要: 在双马赫曾德光纤周界安防系统中, 如何准确高效地实现模式识别仍是一项有待解决的难题。对此提出了一种基于短时傅里叶变换(STFT)与奇异值分解的模式识别方法, 实现了三种不同事件类型的准确识别。该方法包含三个步骤: 首先, 通过对干涉信号进行短时傅里叶变换得到时频信息, 根据时频信息找到事件端点并进行滤波; 其次, 对时频信息进行奇异值分解, 根据奇异值的物理意义, 由不同行为的奇异值的特点定义特征向量; 最后, 用支持向量机的方法进行事件分类。为验证方法有效性, 搭建了 2 km 长的围栏系统进行实验验证。进行了攀爬围栏、敲击光缆、晃动围栏三种不同入侵模式下共 360 组实验, 每种入侵行为各 120 组得到了良好的识别结果 (三种事件识别率均在 90% 以上), 提高了系统的信号处理速度, 有较高的实际应用价值。

关键词: 模式识别; 短时傅里叶变换; 奇异值分解; 光纤传感; 信号分析

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0922002

A high-accuracy event discrimination method in optical fiber perimeter security system

Li Zhichen, Liu Kun, Jiang Junfeng, Ma Pengfei, Li Pengcheng, Liu Tiegeng

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In the dual Mach-Zehnder perimeter security system, it is difficult to achieve pattern recognition accurately and efficiently. To solve this problem, a pattern recognition method based on short-time Fourier transform (STFT) and singular value decomposition was proposed. In order to realize the accurate distinction of three different events, the method consisted of three steps. Firstly, the time-frequency information was obtained by the short-time Fourier transform of the interference signal, finding the event endpoint and filtering the signal according to the information; And then, the singular value of the time-frequency information was got. The characteristic vectors were defined by the characteristic of singular value, according to the physical meaning of the singular value. Finally, SVM was used to classify the events. In order to verify the effectiveness of the method, a fence system of 2 km long for experiment was built. 360 sets of interference signal data of three events (climbing the fence, knocking the cable, and waggling the fence) were collected, each event had 120 sets of data. The result of

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61475114, 61405139, 61227011, 61378043, 61505138); 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)

作者简介: 李志辰(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: dt_lzhch@qq.com

导师简介: 刘琨(1981-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: beiyangkl@tju.edu.cn

experiments demonstrates that the proposed scheme can discriminate three common invasive events with a high recognition rate. The recognition rates of the three events were all above 90%. The scheme also improve signal processing speed of the system, which has high application value.

Key words: pattern recognition; short-time Fourier transform; singular value decomposition; fiber sensing; signal analysis

0 引言

光纤技术的发展使光纤传感逐渐实用化、工业化。安防领域中,光纤传感可对振动、压力^[1]、温度^[2]、声音^[3]、位移、应变等参量进行测量,且具有灵敏度高、抗电磁干扰行强、价格较低等明显优势。双马赫曾德(DMZI)传感器近年来发展迅速,其被广泛应用于周界安防、油气管道泄露探测等诸多领域^[4-7]。双马赫曾德传感器具有精度高、响应速度快、低损耗与环境适应性强等优势。其在入侵事件定位、报警、端点检测方面开发出多种实用技术。然而对于 DMZI 光纤周界安防系统来说,入侵事件识别仍是一项有待深入研究的课题。人们期待找到一种可以实现高效与准确兼顾的模式识别手段。

最早的模式识别方法划分事件种类的手段单一,且经常使用简单的信号强度等参量作为划分依据,易受外界环境因素干扰,复杂环境下准确率与可靠性均较低。目前常见的模式识别方法是从光纤干涉信号中提取易区分的特征向量,然后送入分类器进行事件分类^[8]。其中处理信号的方式主要包括傅里叶变换、小波分解、经验模态分解等方法,常见的物理统计量有能量、均值、方差、峭度、过零率等。参考文献[9]利用小波能量信息熵作为特征向量区分敲击、攀爬、大风与环境噪声。参考文献[10]利用平方差、短时过零率、扰动持续时间等多特征参量对应力破坏、攀爬、浇水、轻度碾压进行了识别。参考文献[11]利用经验模态分解与峭度信息结合的方式实现了四种信号分类。然而很多识别方法将环境噪声单独视为一种入侵事件模式,并不符合实际工程要求,且对多事件的识别准确率有待提高。

对于周界安防系统的干涉信号,其时频信息包含了信号多方面特征,通过对时频信息的挖掘实现事件分类是可行的。基于此,文中将短时傅里叶变换与奇异值分解结合,提取特征向量,然后利用 SVM

方法进行事件分类。在时频分析过程中进行了信号的频段选取与时间选取,降低外界噪声因素的干扰,提高了系统适应环境的能力。对攀爬围栏、敲击光缆、晃动围栏三种入侵行为进行了野外环境试验,得到较高的事件识别率,三类事件平均识别率达到 96.9%。同时该方法的思想也可继续用于双马赫曾德光纤周界安防系统的其他模块中。

1 方法原理

1.1 DMZI 传感系统

双马赫-曾德型光纤传感系统原理如图 1 示。光源发出的窄线宽光经 3 dB 耦合器 C1 分为两束,两束光在光路中按相反的方向传播。顺时针方向(CW)上,光信号经环形器 C2 到达耦合器 C4 并在此分为两路。两路光在耦合器 C5 处发生干涉,干涉信号被光电探测器 PD2 接收。相似的,沿逆时针方向(CCW)传播的光信号路径为 C1-C3-C5-C4-C2-PD1。 P 为入侵事件的发生点。最后由数据采集卡(DAQ)采集信号,送入终端(IPC)进行处理。

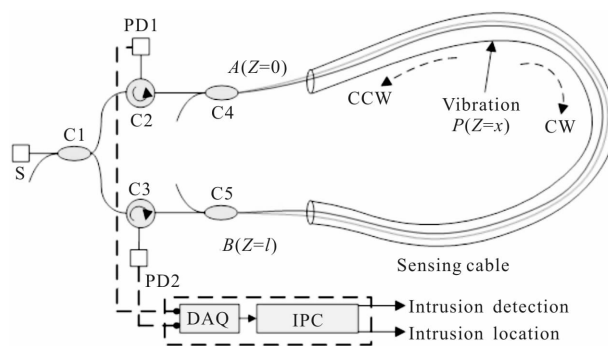


图 1 DMZI 系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of DMZI system

1.2 时频变换

短时傅里叶变换为一种加窗变换,对信号 $x(t)$,其短时傅里叶变换为^[12]:

$$S_f(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w'(\tau-t)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (1)$$

式中： $w(t)$ 为窗函数，其时间尺度内信号被认为是平稳的。对一个特定的时刻 t ； $S_f(t, f)$ 可被视为该时刻的频谱信息。在实际应用过程中，信号一般并非连续的，因此将公式(1)离散化^[13]：

$$S_f(t, f)|_{t=m\Delta t, f=\frac{n}{n\Delta t}} = S_f(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t - m\Delta t)e^{-j2\pi kn/n} \quad (2)$$

式中： Δt 为采样间隔； N 为总采样点数； $m, n=0, 1, 2, \dots, N-1$ ；

短时傅里叶变换效果取决于窗函数的选择。利用窗函数对原信号进行截断会扩展原信号频域的能量分布，造成能量泄漏，这种误差无法消除，只能通过选择合适的窗函数降低误差带来的影响。泄漏与窗函数频域旁瓣有关，旁瓣越低，能量越集中于主瓣，结果越接近真实频谱。同时对主瓣宽度来讲，根据测不准原理，窄窗口时域分辨率高，频域分辨率低，宽窗口时域分辨率低，频域分辨率高。窗口大小的选择取决于需要在多大的频率或时间精度内对信号进行分析。几种常见窗函数的时域与频域波形如图 2 所示。

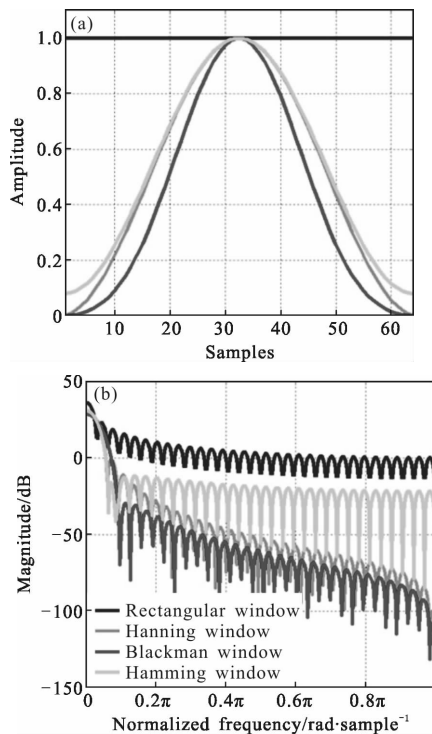


图 2 四种窗函数的时域与频域波形

Fig.2 Time domain and frequency domain waveforms of four window functions

其对同一入侵事件信号处理的结果如图 3 所示。

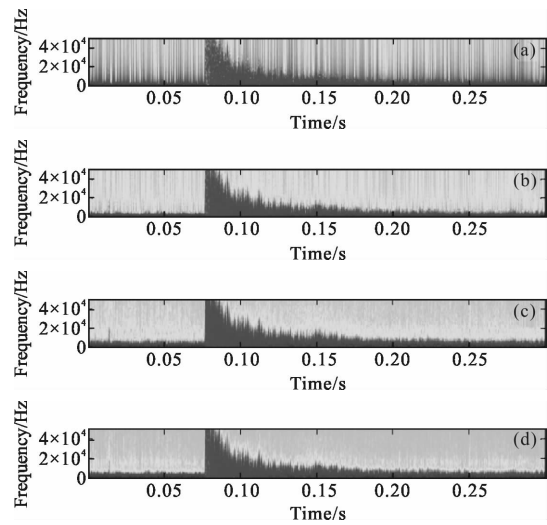


图 3 四种窗函数处理后入侵事件信号的时频谱。(a) 矩形窗，(b) 海明窗，(c) 汉宁窗，(d) 布莱克曼窗

Fig.3 Spectrogram of intrusion signal of four window functions with (a) rectangular window, (b) Hamming window, (c) Hanning window and (d) Blackman window

图 3 中，为更好发现幅度值的变化趋势，利于特征提取，文中将幅度值 $S_f(t, f)$ 取对数。由图可看出短时傅里叶变换可有效处理信号中包含的信息，图中可以清晰识别信号在入侵发生时的变化。四种窗函数处理的效果并不相同。如图 3(a)所示，矩形窗处理信号时造成了严重的频谱泄漏现象，且频谱间干扰已影响到正常信号识别。图 3(b)为海明窗的处理结果，其高频部分幅度分辨率低，导致信号的细节区分度不高。图 3(c)与图 3(d)分别为汉宁窗与布莱克曼窗的处理结果，二者都较好地完成了信号的时频转换。对信号特征的区分以幅度值为主要区分标准，在图中即为颜色的深浅。对比汉宁窗与布莱克曼窗的处理结果，发现布莱克曼窗的处理结果的对比度更好(如：入侵信号与平稳信号的分界更清晰)。文中窗函数的宽度为 64 数据点，窗函数的步进距离为 2 数据点。

1.3 奇异值分解

由参考文献[14]可知，对任意 $m \times n$ 阶矩阵 A ，必然存在正交(或酉)矩阵 U, V ，使得：

$$A = UDV^T \quad (3)$$

式中： U 为 $m \times n$ 阶矩阵； V 为 $n \times n$ 阶矩阵； $D = \begin{pmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ ，

$\Delta = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_\gamma)$, 且有 $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_\gamma$, 称 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_\gamma$ 为矩阵 A 的奇异值。

奇异值大小反映了相对应的正交分量在原信号中的比重, 前几个奇异值较大的分量即包含了信号的绝大部分有效信息。

1.4 支持向量机

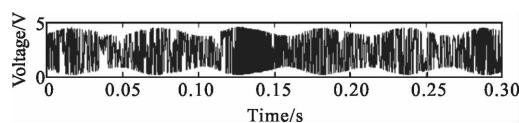
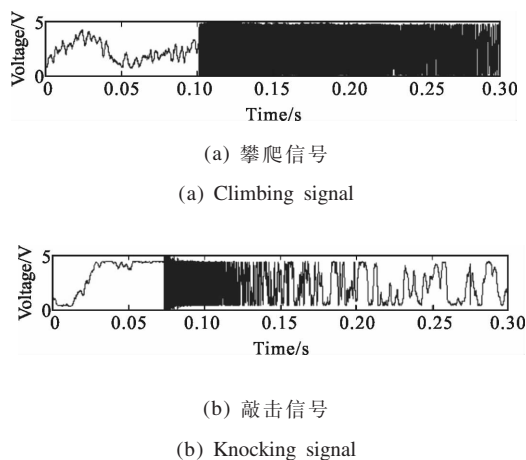
支持向量机(SVM)方法将数据映射到高维空间, 构造一个线性超平面以实现分类。其主要分为训练阶段与测试阶段。对于给定样本集 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$ (n 为训练向量个数), $y_i \in (-1, +1)$, 通过解决如下最优化问题:

$$\begin{cases} \min_{w,b,\zeta} 1/2\|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \\ y_i[(w \cdot x_i) + b] \geq 1 - \xi_i \end{cases} \quad (4)$$

确定超平面。式中: $\zeta \geq 0$ 为松弛项; $C > 0$ 表示错误项的惩罚因子。SVM 是一种基于结构风险最小化思想的分类器, 它不仅能解决小样本的问题, 并且还有全局最优、泛化能力强等优点。因此文中选择 SVM 作为入侵模式识别分类器。

2 实验验证

为验证算法的稳定性与有效性, 文中进行了实验验证, 系统光路如图 1 所示, 系统传感光缆(单模)敷设于铁质围栏上, 围栏长度 2 km, 均处于野外环境中。激光源为分布反馈式(DFB)激光器, 其中心波长 1 550 nm, 光强为 3.5 mW。数据采集卡(DAQ)的采样频率为 10 MHz, 每帧信号采样时间为 300 ms。三种典型入侵行为为攀爬围栏, 敲击光缆、晃动围栏, 每种类型各进行了 120 组, 共 360 组的现场实验。三种入侵行为的原始信号如图 4 所示。



(c) 晃动信号

(c) Wagging signal

图 4 三种行为的原始信号

Fig.4 Original signals of three cases

对信号进行 100 倍降采样, 以滤除信号毛刺噪声与提高运算速度。将降采样后的信号进行短时傅里叶变换, 时频谱如图 5 所示。

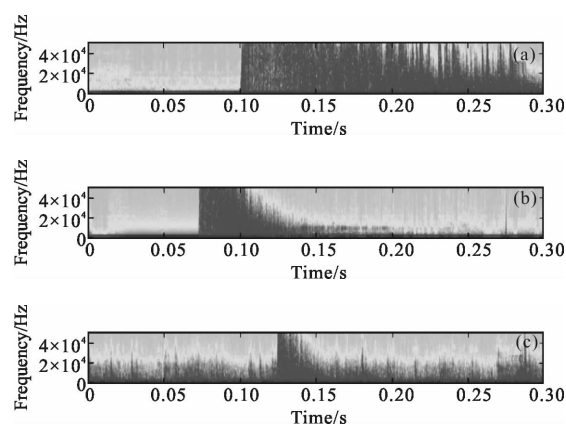


图 5 三种行为的时频谱

Fig.5 Spectrograms of three cases

攀爬信号在入侵事件发生后, 在较长时间内, 高频部分 ($>3 \times 10^4$ Hz) 分量的比重相对无扰时增大明显。而对敲击信号来说, 这一时间相对要短的多。而晃动围栏的动作使整个系统余震较强, 表现在时频信息中即为周期性的中高频部分 ($1 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$) 分量增大, 而 3×10^4 Hz 以上部分则增量比上两种行为都小。由时频信号可以看出, 入侵行为影响最大的频率部分为中高频 ($>0.8 \times 10^4$ Hz), 同时低频部分多为背景噪声及外界轻微扰动引发(如刮风、烈度较小的雨)。将低频部分滤除, 可提高计算速度及事件识别准确。

入侵行为的主要信息分布于事件开始前后的短时间内, 只需截取事件端点附近的数据进行处理即可得到事件的大部分信息。通过检测高频部分信号幅度的跳变沿, 寻找入侵事件的端点, 取事件开始前的 200 个数据点、事件开始后的 2800 个数据点, 对三种信号的二维时频矩阵 $S_r(t, f)$ 进行滤波操作, 处理完成后分别进行奇异值分解, 奇异值 μ_n 以向量形式从大到小排布, 并对所有奇异值归一化。奇异值

(前五个)大小如图 6 所示。

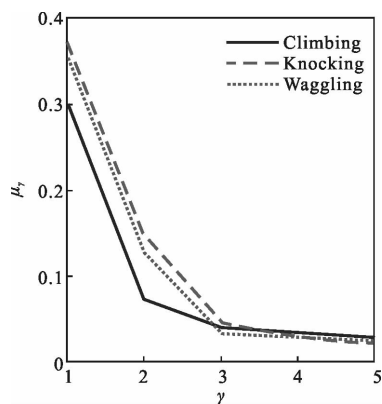


图 6 三种入侵行为奇异值

Fig.6 Singular value of three intrusion cases

由图 6 可以看出,对于三种事件来说,第一个奇异值所占比重极大,占有奇异值总和的 30% 以上,即信号绝大部分信息集中于其所对应的正交分量上。且三个不同事件间奇异值分布有一定间隔,利于进行事件识别。将不同事件前五个奇异值作为其特征向量用 SVM 进行分类,同时将文中提出的方法与 EMD 分解方法对比,结果如表 1 所示。文中提出的方法对三种事件识别率均在 90% 以上,且相比于 EMD 方法实现了更高的识别率。相对于其他方法,所提方法识别率更高的原因是实现了特定时间内对入侵行为敏感的频率段的主要成分分析并有效提取了易识别的特征信息。

表 1 事件识别率

Tab.1 Event recognition rate

Event	Results of the proposed method	Results of the EMD method
Climbing	100%	90.8%
Knocking	90.8%	85.8%
Wagging	100%	99.2%

图 7 为 360 组数据的特征向量运算时间,由

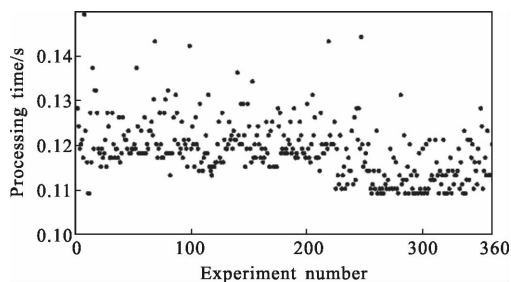


图 7 信号特征向量提取时间

Fig.7 Time of signal feature vector extraction

图中可看出,每帧运算时间普遍小于 0.150 s,平均运算时间为 0.119 s。SVM 平均分类时间 0.08 s。每帧信号的处理时间总共 0.199 s,远小于数据帧长 0.3 s,不会出现数据阻塞现象,处理速度优秀,符合实际工程需求。

3 结论

文中提出了将 STFT 与奇异值分解结合的事件识别方法,并将该方法应用于双马赫曾德光纤周界安防系统。该方法从时频信息提取的特征向量可准确反映不同入侵行为的区别。经实验验证,该方法对攀爬围栏、敲击光缆、晃动围栏的识别率分别为 100%、90.8%、100%,得到较好的识别结果,且处理速度优秀,有较高应用价值。同时该方法的思想可用于 DMZI 周界安防系统的其他环节。

参考文献:

- [1] Zhao Lin, Wang Jiqiang, Li Zhen. Optical fiber negative pressure wave pipeline leakage monitoring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0722002. (in Chinese)
- [2] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement [J]. *Chinese Optics*, 2017, 46(7): 129–134. (in Chinese)
- [3] Dong Jie. Measurement of underwater acoustic wave using optical distributed acoustic sensing based on space difference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2317–2323. (in Chinese)
- [4] Chen Q, Liu T, Liu K, et al. An improved positioning algorithm with high precision for dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 1954–1960.
- [5] Liu K, Tian M, Jiang J, et al. An improved positioning algorithm in a long-range asymmetric perimeter security system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(22): 5278–5283.
- [6] Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng. Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferometer using twin-core fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 1–9. (in Chinese)
- [7] Sun Q, Liu D, Liu H, et al. Distributed disturbance sensor based on a novel Mach-Zehnder interferometer with a fiber-loop [C]//SPIE, 2006, 6344: 63440K.

- [8] Zhang Junnan, Lou Shuqin, Liang Sheng. Study of pattern recognition based on SVM algorithm for φ -OTDR distributed optical fiber disturbance sensing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0422003. (in Chinese)
- [9] Li Yan, Liang Zhengtao, Li Lijing, et al. Pattern recognition of fiber-optic micro vibration sensor based on wavelet and SVM [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 42(11): 1105005. (in Chinese)
- [10] Zhang Yan, Lou Shuqin, Liang Sheng, et al. Study of pattern recognition based on multi-characteristic parameters for φ -OTDR distributed optical fiber sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1105005. (in Chinese)
- [11] Liu K, Tian M, Liu T, 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.
- [12] Audone B, Colombo R, Marziali I, et al. The short time Fourier transform and the spectrograms to characterize EMI emissions [C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility-Emc Europe. IEEE, 2016: 882-888.
- [13] Yeap Y M, Ukil A. Fault detection in HVDC system using Short Time Fourier Transform[C]//Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2016.
- [14] Lebrun M, Leclaire A. An implementation and detailed analysis of the K-SVD image denoising algorithm[J]. *Image Processing on Line*, 2012, 2(6): 96-133.