

用于光纤围栏入侵告警的频谱分析快速模式识别

王照勇^{1,2} 潘政清¹ 叶青¹ 蔡海文^{1*} 瞿荣辉¹ 方祖捷¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 相位敏感光时域反射计(ϕ -OTDR)在光纤围栏等动态传感领域具有重要的应用,快速、有效地对入侵信号分类识别有着十分重要的意义。基于频谱分析提出了一种称为频谱欧氏距离法(EDFS)的快速模式识别方法。该方法通过短时平移差分法和短时能量法对 ϕ -OTDR的解调信号进行提取,确定待分析数据段;对数据段进行归一化和快速傅里叶变换,获得信号的频谱特征;计算信号频谱与预先生成的模板之间的欧氏距离对入侵信号进行分类、识别。采用三种入侵信号对该方法的有效性和实时性进行了实验验证。结果表明,该模式识别方法可以有效识别扰动信号,识别时间小于传统的动态时域规划模式识别方法耗时的1/10。同时,该方法所需训练样本较少,对环境噪声有一定程度的抑制作用。

关键词 传感器;模式识别与特征提取;傅里叶变换;相位敏感光时域反射计

中图分类号 TN212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0405010

Fast Pattern Recognition Based on Frequency Spectrum Analysis Used for Intrusion Alarming in Optical Fiber Fence

Wang Zhaoyong^{1,2} Pan Zhengqing¹ Ye Qing¹ Cai Haiwen¹ Qu Ronghui¹ Fang Zujie¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Phase sensitive optical time domain reflectometer (ϕ -OTDR) becomes more and more important in intrusion alarming and other dynamic sensing fields. Meanwhile, it makes much sense to classify the intrusion fast and effectively. Therefore, a fast pattern recognition method based on frequency spectrum is presented and experimentally verified. The proposed method is named EDFs, short for Euclidean distance of fast Fourier transform (FFT) frequency spectrum of the detected signals. The signal is abstracted by short-time shifted delta(SSD) and short-time energy, and the features are obtained from the abstracted signal after normalization and FFT transformation. The euclidean distance of the spectra between features and models is used to classify the intrusion. The effectivity and instantaneity are verified by three typical intrusion disturbances. It is shown experimentally that intrusions can be recognized clearly in a period less than one tenth of that by conventional dynamic time warping (DTW). The method needs fewer training models than other recognition methods, such as the neural network, and has a merit of mitigating influence of environmental noises.

Key words sensors; pattern recognition and feature extraction; Fourier transform; ϕ -OTDR

OCIS codes 060.2370; 070.5010; 070.2590

1 引 言

与基于散射强度检测的常规光时域反射仪(OTDR)相比,相位敏感光时域反射仪不仅可以检测光纤瑞利

收稿日期: 2014-12-12; 收到修改稿日期: 2015-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61475165, 61405227)、国家863计划(2012AA041203)、上海市优秀技术带头人(13XD1425400)

作者简介: 王照勇(1988—),男,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: wzhy010111@126.com

导师简介: 瞿荣辉(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电子器件及光通信方面的研究。E-mail: rhqu@siom.ac.cn

*通信联系人。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

散射回波的强度,而且可以检测回波的相位波动,具有更高的灵敏度和探测动态信号的能力^[1-9]。近年来, ϕ -OTDR 光纤围栏在周界安防方面,受到了越来越广泛的关注。从 ϕ -OTDR 探测到的大量复杂信号中判断光纤沿线发生了怎样的扰动,怎样性质的入侵,这是周界安防实际应用关注的目标。因此,对探测到的扰动信号进行初步的识别非常重要,以便快速、准确地做出响应。

在语音识别领域很早就开始发展模式识别技术^[10]。动态时间规划(DTW)^[11]、神经网络、模糊算法等算法被用于模式识别领域,显示了各自优点和适用范围。过零率(ZCR)被用于打击声波的模式识别和分类^[12]。最近,在光纤振动传感的模式识别方面,文献[13]提出了过阈值率(LCR)算法,演示了振动信号识别的效果。ZCR 和 LCR 算法主要用于信号的初步提取,简单地作为模式识别的判据识别率较低。DTW 算法是语音识别中简单有效、较为经典的一种算法,采用动态规划的思想解决发音长短不一的匹配问题。其匹配度通常采用欧氏距离进行评价,技术上较简单,识别率较高,但是该算法运算量大,运算时间较长。

光纤围栏在周界安防中的应用要求对入侵信号快速判断,快速响应,发展一种适用于安防系统的快速模式识别方法是当务之急。本文提出一种基于探测信号的傅里叶频谱,在频域计算信号与模板之间欧氏距离的方法,称之为频谱欧氏距离法(EDFS)。对这一方法进行了实验验证,用所构建的 ϕ -OTDR 系统,探测在安装在实验墙上的一段光纤上施加的四种扰动信号:模拟爬墙的踢墙、踹墙和近旁跑步,以及环境的自然风。并对获取的信号进行了EDFS处理。

2 EDFS 算法

实验系统为本课题组提出的数字相干解调 ϕ -OTDR 系统。该系统具有较高的灵敏度,可以实现分布式动态探测^[5-6,14]。该系统将散射回波光信号与本地振荡激光做相关检测,获得拍频信号及其时域波形,探测光纤长度可达数十公里。沿线的扰动和入侵往往发生在若干局部的位置上。通过 ϕ -OTDR 系统的重复脉冲扫描,可以获得扰动随时间变化的动态数据。对某个扰动位置上获取的时域扰动信号进行分析处理,采用所建立的模式识别算法判别扰动的类型。提出的EDFS快速模式识别算法主要包括以下步骤。

2.1 数据提取

由于光纤瑞利散射光很弱,解调得到的相位信息中难免会叠加上多种噪声。而且,通常的入侵扰动在时间上具有断续发生的特点。因此,有必要对信号进行初步处理,提取出有用的信息,以加快处理的速度。EDFS 方法中采用短时能量 E 和短时平移差分 D (SSD)作为信号选取的判据。在计算这两个参数之前,首先将截取待分析的时域信号 $x(n)$ 划分为长度为 N 的数据帧。 N 的选取根据 OTDR 系统的光脉冲重复频率和扰动的特征确定。 N 越小,其运算时间越长。但 N 也不宜过大,其最大值应不超过扰动信号的长度,否则,其处理效果将难以确保。图 1 为一组时域数据及其处理格式示意图。

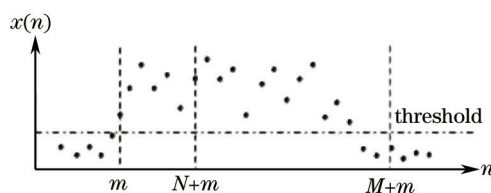


图 1 时域数据及其处理说明

Fig.1 Time series and its processing illustration

对每帧计算短时能量和平移差分为

$$E_m = \sum_{n=m}^{m+N-1} x^2(n), \quad (1)$$

$$D_m = \sum_{n=m}^{m+N-1} |x(n) - x(n-1)|, \quad (2)$$

为了保证选取数据的连续性,数据帧设置为前后重叠,重叠长度通常为帧长度的 1/2 或者 1/3。即(1)~(2)式中 $m = 1, N/2, N, \dots$ 或 $m = 1, 2N/3, 4N/3, \dots$ 。

短时能量是该帧信号强度的反映,频移差分是数据波动幅度的反映。从频谱分析的角度,前者代表扰

动的强度,后者反映扰动的起伏程度。两个参数计算的结果进行“求或”操作,即满足其中一个大于阈值时将该帧数据提取出来,进行后续分析。两者综合,避免数据的无谓丢失。两参数的阈值根据模板训练确定。

若相邻的若干帧数据的短时能量 E 和短时平移差分 D 均满足条件,则将其对应的原始数据取出(重叠部分不重复提取)进行后续处理。为了便于统一比较,提取的数据段的长度设为固定值 M 。 M 值不小于有效扰动信号的最大长度,根据模板训练确定。其余不满足 E 和 D 阈值条件的信号则不进行后续处理。如果所有数据均不满足条件,表明该时间段的扰动很小,有待系统继续监测。

ϕ -OTDR 光纤围栏主要关注的入侵,一般具有冲击性和突发性的动态特性,而不是持续性的扰动。对获取的数据作分时段处理,并选取上述两个参数作为数据提取的判据,适合于这一类入侵的告警。

2.2 快速傅里叶变换提取频域特征

提出的 EDFs 的关键,是通过快速傅里叶变换(FFT)从选取的 M 个数据提取频谱特征。为了在计算欧氏距离时有一个一致的、可比较的幅度标准,在做傅里叶变换前要将上述提取的数据作归一化,即将各数据除以 M 个数据中的最大值,并归一化到 $[-1,1]$ 区间。

归一化后的信号进行快速傅里叶变换,表达式为

$$F(k) = \sum_{n=1}^M x(n) \exp \frac{-j2\pi kn}{M}, \quad (3)$$

式中 M 为提取后时间序列的长度。频谱数据序列 $k=[1, \dots, M]$ 。经过快速傅里叶变换后的信号幅度作为入侵信号的特征信号。经实验观察,所关注信号的频谱特征相对稳定,相同种类信号的频谱特征基本一致,并且扰动个体差异以及噪声引入的影响较小。因此,将其作为特征信号,不仅可以区别不同种类的信号,而且利于消除环境噪声、个体入侵差异(如力度等)的影响。

2.3 模板训练

为了便于后续的信号识别,需要预先训练所需类别的模板。人为引入多个相同种类的扰动信息,将信号经过 2.1、2.2 节处理,获得该类扰动的特征信息。具体训练次数因所关注扰动的特征而异。挑选出几组最能体现该类扰动特征的特征信息,进行平均,得到最终的该类扰动的特征,并保存为参考模板。

2.4 频域欧氏距离计算

将待识别扰动的频谱,与有关模板的频谱进行对比。采用信号频谱与模板频谱的欧氏距离作为符合度的判决依据。频谱欧氏距离的计算公式为

$$d_E = \left\{ \sum_{k=1}^M [F_{\text{signal}}(k) - F_{\text{model}}(k)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

式中 F_{signal} 和 F_{model} 分别为信号频谱和模板的频谱, M 为频谱序列的长度。不同模板将给出不同的欧氏距离数值,将其与设定的阈值进行比较,即可实现扰动信号的快速识别。

3 实验结果及讨论

工作搭建了 ϕ -OTDR 系统,对上述的 EDFs 模式识别算法进行了实验验证。实验系统如图 2 所示,与文献[5-6,14-15]中描述的系统一致。分布式反馈(DFB)光纤激光器的输出分为两路,一路经声光调制器(AOM)移频,并调制为 100 ns 光脉冲;经光纤放大器(EDFA)放大后注入传感光纤。光纤的瑞利散射回波与光源的另外一路在 3 dB 耦合器上干涉叠加。用一个双平衡光电探测器(DB-PD)接收耦合器的两路干涉输出,得到拍频信号。经数据采集卡(DAQ)进入计算机进行计算分析。长约 5 m 的一段传感光纤固定在实验墙上,距离

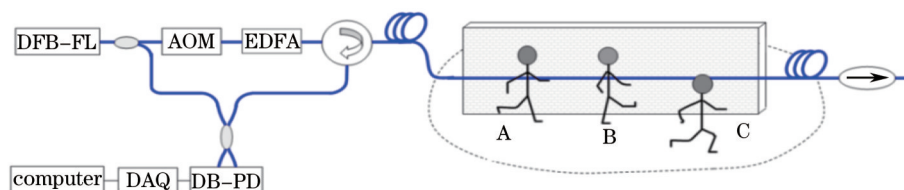


图 2 ϕ -OTDR 信号模式识别的实验系统, A: 踢墙; B: 踹墙; C: 原地跑

Fig.2 Experimental setup for pattern recognition of ϕ -OTDR sensor signals, A: heeling; B: toeing; C: running

地面 0.9 m, 距 OTDR 端机的光纤距离约为 4.3 km。实验系统实物图如图 3 所示, (a) 为 ϕ -OTDR 系统, (b) 为实验墙以及用胶带固定的传感光缆。

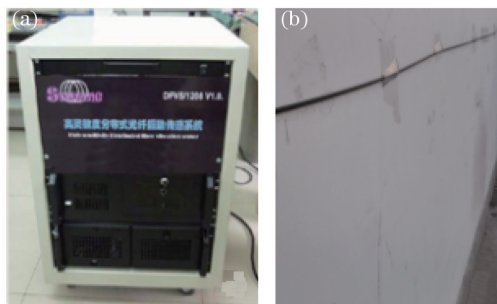


图 3 实验系统照片。(a) ϕ -OTDR 系统实物图; (b) 实验墙及光缆

Fig.3 Photos of experimental system. (a) ϕ -OTDR system equipment; (b) wall and the sensing cable

对固定在墙上的光纤人为加入几种扰动:(A)踢墙(模拟爬墙);(B)踹墙;(C)原地跑。图 4(a)是扰动位置处 4800 次脉冲扫描的时间序列。利用短时能量和短时平移差分进行处理, 结果如图 4(b)所示。在扰动处获取三种扰动信号以及自然风的时间序列, 并进行数据提取和归一化, 如图 5(a)所示。图 5(b)为上述时间序列的快速傅里叶变换频谱。

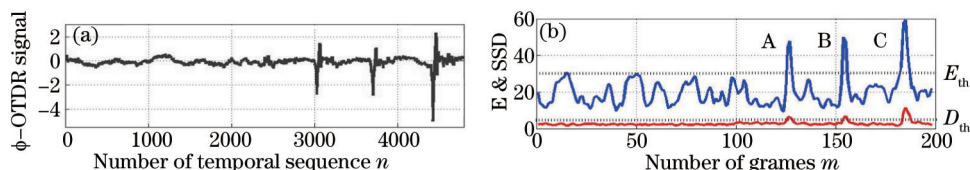


图 4 (a) 扰动位置带有三个扰动信号的 ϕ -OTDR 时间序列信号; (b) 短时能量(蓝)和短时平移差分(红), 以及它们的阈值 E_{th} 和 D_{th}

Fig.4 (a) ϕ -OTDR signals in temporal sequence at a certain position with three disturbances; (b) signal energy (blue) and SSD (red) versus frame number with their threshold E_{th} and D_{th}

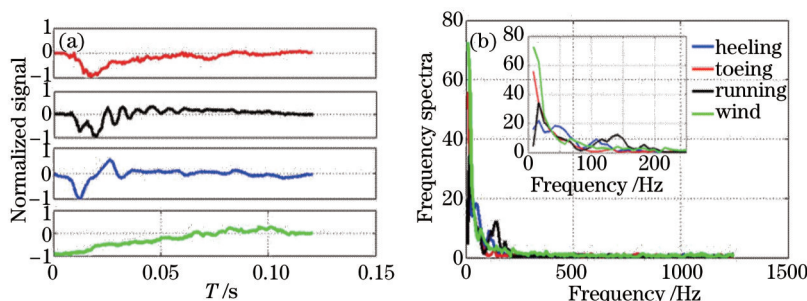


图 5 (a) 踢墙、踹墙、跑以及风的典型信号; (b) 典型信号的频谱

Fig.5 (a) Typical signals of heeling, toeing, running and natural wind; (b) their frequency spectrum

实验中将 EDFs 方法和同样采用欧氏距离为依据的经典 DTW 在识别率、运算速度等方面进行了对比。DTW 模式识别方法中的信号提取部分与 EDFs 方法保持一致。模式识别部分直接对时域信号进行动态规划, 而不做快速傅里叶变换。

实验结果如图 6 所示。(a1)、(b1)、(c1)为利用 DTW 方法, 入侵信号分别与踢墙、踹墙、原地跑模板的欧氏距离; (a2)、(b2)、(c2)为利用 EDFs 方法, 入侵信号分别与踢墙、踹墙、原地跑模板的欧氏距离。不同类型的数据点表示不同的扰动信号种类-踢墙、踹墙、跑步类以及环境风。多个同类型数据点为多次相同种类扰动信号获得的处理结果, 横坐标为实验序号。图中可以看出 EDFs 的判断更为清晰、准确。比如, 对于跑步类的信号, EDFs 的阈值为 1000, 所有跑步实验的数据均正确识别; DTW 方法中两点出现了误判, 而这种误判不是通过调整阈值可以解决的。对于踢墙、踹墙类的扰动, EDFs 算法的效果同样好于 DTW。

光纤入侵检测系统在实际应用中极易受到自然风的影响。为此, 研究了风的特征, 如图 5、6 所示。可以看出, 通常情况下风的频率比入侵信号的频率低, 利用频谱分析更容易消除环境噪声的影响。EDFs 是基于短时间频谱分析的, 更容易消除低频噪声的干扰, 白噪声的影响也会有所减小。

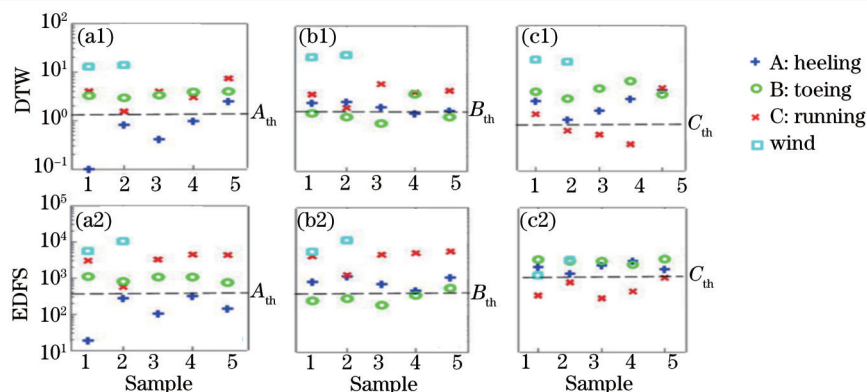


图6 模式识别结果: (a1)、(b1)、(c1)—DTW; (a2)、(b2)、(c2)—EDFS; A_{th} 、 B_{th} 、 C_{th} —踢墙、踹墙、跑的阈值

Fig.6 Results of pattern recognition. (a1), (b1), (c1): By means of DTW; (a2), (b2), (c2): by means of EDFs. A_{th} , B_{th} and C_{th} : thresholds given by models of heeling, toeing and running

此外,EDFS模式识别算法不仅有效,而且高效。实验显示,在相同条件下处理相同的数据,EDFS只需要0.11 s,而DTW算法需要5.05 s。

分析认为,常用的DTW方法是利用动态规划来解决信号提取时的长度不一致、起始相位不一致等匹配问题,动态规划相对耗时,从而导致DTW算法处理速度相对较慢。在EDFS方法中,将信号的频谱幅度作为特征信号,并固定数据长度 M ,消除了信号提取引入的匹配问题,并且不存在动态规划过程,处理速度相对较快。因此,EDFS的处理速度非常快。对于入侵预警而言,这一点是非常重要的。

EDFS方法具有处理速度快、对低频噪声不敏感等特点,非常适用于短促的冲击信号,实时入侵检测系统中通常待处理的扰动信号多为该类信号。但实验中的阈值是通过经验来设定,参考模板的训练次数需要依靠经验不断优化,在实际的工程应用中还需要更为深入的考虑和研究。

4 结 论

提出了一种应用于 ϕ -OTDR入侵检测系统快速预警的模式识别方法—EDFS。该方法是利用信号FFT频谱的欧氏距离对扰动信号进行识别的,与DTW相比,不存在动态时间规划过程,处理速度更快。结果表明,EDFS的处理时间小于DTW的1/10,并且识别率与之相近,甚至更高。此外,EDFS只需较少的训练模板,可以在一定程度上减弱环境噪声的影响。因此,该模式识别方法有利于 ϕ -OTDR在周界安防、管线保护等领域的应用。

参 考 文 献

- 1 K N Choi, J C Juarez, H F Taylor. Distributed fiber-optic pressure/seismic sensor for low-cost monitoring of long perimeters[C]. SPIE, 2003, 5090: 134-141.
- 2 Z Qin, T Zhu, L Chen, *et al.*. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(15): 1091-1093.
- 3 J C Juarez, E W Maier, K N Choi, *et al.*. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(6): 2081-2087.
- 4 Michael G Taylor. Phase estimation methods for optical coherent detection using digital signal processing[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(7): 901-914.
- 5 Z Pan, K Liang, Q Ye, *et al.*. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[C]. SPIE, 2011, 8311: 83110S.
- 6 Z Pan, K Liang, J Zhou, *et al.*. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[C]. SPIE, 2012, 8421: 842129.
- 7 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 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.
- 8 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchun, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706005.

- 安 阳, 封 皓, 张景川, 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.
- 9 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.
- 10 B Atal, L Rabiner. A pattern recognition approach to voiced-unvoiced-silence classification with applications to speech recognition [J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1976, 24(3): 201-212.
- 11 D Berndt, J Clifford. Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series[R]. AAAI-94 Workshop on Knowledge Discovery in Databases, 1994: 359-370.
- 12 F Gouyon, F Pachet, O Delerue. On the use of zero-crossing rate for an application of classification of percussive sounds[C]. Proc COST G-6, Conference on Digital Audio Effects, 2000: 1-6.
- 13 H Zhu, C Pan, X Sun. Vibration pattern recognition and classification in OTDR based distributed optical-fiber vibration sensing system[C]. SPIE, 2014, 9062: 906205.
- 14 J Zhou, Z Pan, Q Ye, *et al.*. Characteristics and explanations of interference fading of a phase-OTDR with a multi-frequency source [J]. J Lightwave Technol, 2013, 31(17): 2947-2954.
- 15 Zhou Jun, Pan Zhengqing, Ye Qing, *et al.*. Phase demodulation technology using a multi-frequency source discrimination of interference-fading induced false alarm in a ϕ -OTDR system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905003.
- 周 俊, 潘政清, 叶 青, 等. 基于多频率综合鉴别 ϕ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905003.

栏目编辑: 何卓铭