

doi: 10.3788/gzxb20144305.0506005

# 一种基于光纤布喇格光栅振动传感器的光纤围栏入侵监测系统及其模式识别

谢鑫, 吴慧娟, 饶云江

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

**摘 要:** 基于高灵敏度光纤布喇格光栅振动传感器, 提出了一种光纤围栏入侵监测系统及其模式识别方法. 该方法通过具有自适应动态阈值的时域统计特征提取算法对异常事件信号进行特征提取, 将特征矢量输入到一个基于三层 BP 神经网络而设计的分类器中对目标事件进行识别和分类. 通过仿真目标信号和实际采样数据进行测试, 对系统的报警识别率进行了验证, 结果表明: 对于仿真信号, 系统的平均正确识别率达到了 100%; 对于实际采样数据, 系统的平均正确识别率可以达到 96.83%.

**关键词:** 信号处理; 光纤传感器; 模式识别; 入侵检测; 光纤布喇格光栅; 准分布式光纤围栏; 事件分类  
**中图分类号:** TP212.14      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1004-4213(2014)05-0506005-6

## A Fiber-optical Perimeter Intrusion Detection System Based on the Fiber Bragg Grating Vibration Sensors and its Identification Method

XIE Xin, WU Hui-juan, RAO Yun-jiang

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** A fiber-optical perimeter intrusion detection system based on high-sensitivity FBG vibrating sensors with intelligent identification function was proposed. Stasitical features with an adaptive dynamic threshold were extracted in the time domain first. By inputting the extracted features into a three-layer Back-Propagation Artificial Neural Network classifier, the type of the event can be descerned and determined. The simulated signals and acquired data in the test field were both tested to validate the effectiveness of the proposed system and its identification method. The results show that the average identification rate of the system for the simulation signals can be up to 100%, and that for the actually acquired signals, the average identification rate of the system achieves 96.83%.

**Key words:** Signal processing; Fiber optic sensors; Pattern recognition; Intrusion detection; Fiber Bragg Grating (FBG); Quasi-distributed fiber-optical fence; Event classification

**OCIS Codes:** 060.2370; 060.3735; 070.5010; 100.4996

## 0 引言

安全问题涉及人们工作和生活的各个领域, 是关乎国计民生的重大问题. 学校周边、居民小区、军事区域、机场、大型变电站、储油基地等重要区域都需要切实有效的安全防范设施<sup>[1-2]</sup>. 传统的基于电学传感器的安防系统无法应用于易燃易爆、高温、强电磁干扰等恶

劣环境中<sup>[3]</sup>, 而光纤传感器具有抗电磁干扰、电绝缘性能好、耐腐蚀等优点, 使其特别适用于如油库、变电站、易燃易爆场所等恶劣环境.

近年来, 国内外针对光纤围栏传感原理的研究主要有三个方面: 利用后向散射光的光时域反射 (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)<sup>[4]</sup> 技术、马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, M-Z) 干涉<sup>[5]</sup> 及光纤布喇

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61290312) 和中央高校基本科研业务费专项基金 (No. ZYGX2011J010) 资助

第一作者: 谢鑫 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感信息获取与处理. Email: bfcxpkq@163.com

通讯作者: 吴慧娟 (1980-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为传感信息获取与处理. Email: hjwu@uestc.edu.cn

导师: 饶云江 (1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: yjrao@uestc.edu.cn

收稿日期: 2013-07-23; 录用日期: 2013-11-06

<http://www.photon.ac.cn>

格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 准分布式传感技术<sup>[6]</sup>. OTDR 和 M-Z 干涉技术主要应用于监测范围达几十至上百公里的长距离分布式安防系统, 且其定位准确度较低, 易受环境的干扰, 不适用于短距离小范围监测区域的安防系统. 澳大利亚的未来光纤技术 (Future Fiber Technologies, FFT) 公司提出了一种基于过阈值点统计算法的光纤围栏入侵监测系统, 可以有效地消除风、雨等自然环境对系统的干扰. 该系统采用 M-Z 干涉技术作为传感机理, 能够实现几十公里以上范围的监测, 但该系统定位准确度低, 且实际应用中系统误报偏高. 而基于 FBG 传感器的准分布式光纤围栏安防系统的灵敏度高、定位准确度高, 且抗干扰能力强, 非常适合于小区、大型设施、机场等几十公里以内的中小型区域的安防监控系统. 但是现有的基于 FBG 传感原理的光纤围栏系统仅能实现对入侵的告警, 无法对入侵事件进行具体目标识别<sup>[7-9]</sup>, 无法消除强风、暴雨等对系统造成的干扰, 具有较高的误报率. 因此本文提出了一种新的基于 FBG 振动传感器的光纤围栏入侵监测系统及其模式识别算法, 可以实现对事件的智能识别, 在实际应用中能够抑制自然环境因素引起的误报, 保持系统较高的识别正确率.

## 1 基于 FBG 振动传感器的高灵敏光纤围栏入侵监测系统

基于 FBG 振动传感器的高灵敏光纤围栏入侵监测系统主要包含三个部分: 传感光缆、波长解调仪、信号处理终端等<sup>[10]</sup>, 系统结构如图 1. 其中, 传感光缆中串联有多个 FBG 振动传感器, 用于感知围栏的振动状态<sup>[11]</sup>. 波长解调设备与 FBG 振动传感光缆相连接, 支持多通道扫描, 用于将振动信号转换为传感器的波长变化信号, 并对入侵事件的信号进行模数转换. 最后, 信号处理终端装置对波长解调仪输出的采样信号进行处理, 对入侵事件类型进行识别, 并决定是否报警.

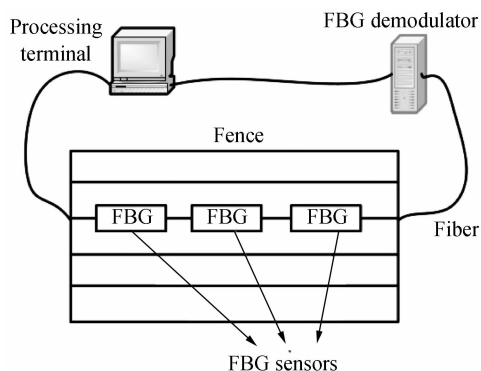


图 1 入侵监测系统结构

Fig. 1 Structure of intrusion detection system

高灵敏度光纤围栏入侵监测系统的信号处理主要流程为: 系统首先根据信号能量的大小, 设定一个动态

阈值参量, 然后将采样信号每按一定的数目进行分段, 并在每段中根据设置的阈值参量统计信号的过阈值点特性<sup>[12]</sup>, 根据在各个段中信号的过阈值点特性, 采用一种特征提取算法从信号中提取得到一组特征值. 将此组特征值作为一组输入参量, 将其输入到一个基于 BP 神经网络而设计的分类器中进行判决输出, 并根据输出的结果来确定是否为某种典型事件, 并根据事件类型决定是否报警.

## 2 时域统计特征提取

### 2.1 采样信号预处理

在解调设备将实时采样得到的信号送入到信号处理终端设备后, 处理终端每次选取 4 s 的信号进行采样得到采样信号  $a$ , 则信号  $a$  共有 1 000 个样值点 (系统采样频率为 250 Hz). 首先对采样信号  $a$  进行去均值操作, 即将采样信号的每个样值点都减去采样信号  $a$  的均值, 然后确定一个动态阈值参量 TH, 其具体可表达为

$$TH = \frac{\sum(\text{abs}(a))}{\text{length}(a)} * (1 - \frac{\sum(\text{abs}(a))}{\text{length}(a)})^5 \quad (1)$$

式中,  $\text{abs}()$  表示取绝对值操作,  $\sum()$  表示进行求和操作,  $\text{length}(a)$  表示采样信号  $a$  的样值点的个数, 本系统中为 1 000. 阈值 TH 设定为略高于一般噪音电平的一个数值且可自动调整, 式(1)中的表述为大量实验后得到的经验公式.

### 2.2 过阈值点特征统计

对采样信号  $a$  进行分段, 每隔  $\text{length}(a)/N$  个点划分一个区域  $Q$ , 由此可得到  $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$  共  $N$  ( $N$  可根据实际需要自行设定, 本系统中  $N$  设定为 50) 个区域, 并分别在各个区域内按照式(2)统计其过阈值特性.

$$LC = \sum_{n=0}^{M-1} \Gamma\{(a(n) \geq TH) \& (a(n-1) < TH)\} \quad (2)$$

式中,  $M = \text{length}(a)$ ,  $\Gamma\{u\}$  为函数, 当  $u$  为真时,  $\Gamma\{u\} = 1$ , 当  $u$  为假时,  $\Gamma\{u\} = 0$ <sup>[13]</sup>.

### 2.3 模式特征矢量提取

根据 2.2 节所述方法得到的采样信号  $a$  各个区域  $Q$  中的 LC<sup>[14]</sup> 的数值, 并据此确定采样信号  $a$  的一组特征值  $p_1, p_2, p_3$ , 并将其作为分类器的一组输入参量. 其中,  $p_1$  为信号  $a$  的各段 LC 数值总和,  $p_2$  为信号  $a$  有效信号区域的长度, 有效信号区域的定义如下: 根据式(2)所述的 LC 计算方法在信号  $a$  的各区域内分别计算此区域内的 LC 数值, 从区域  $Q_1$  开始依次逐区域判断各区域对应的 LC 数值是否不小于 2, 将检测到的第一个数值不小于 2 的区域定义为起始区域 (这里数值 2 的设定是根据实际的实验情况而选取的, 一般情况下无事件发生的区域的 LC 为 0, 但有时小幅度的干扰会

造成某区域 LC 为 1 的情况,故将 2 作为起始区域的判断标准),起始区域确定后,在其后各区域依次逐区域判断是否有连续 4 个区域的 LC 数值全为 0 的情况出现,若有,则将 4 个连零区域的前一个区域选为结束区域.有效信号区域即为起始区域到结束区域的范围,有效信号区域的长度则定义为结束区域与起始区域的编号的差值.

$p_3$  为有效区域内信号的能量.其计算方式为:信号有效区域内各个样值点的幅值的平方和(此时信号  $a$  已做过去均值处理).

### 3 构建基于 BP 神经网络的分类器

#### 3.1 分类器设计

系统所设计分类器为一个具有输入层、隐藏层和输出层三层网络结构的 BP 神经网络,其结构如图 2 所示.其中,输入层有三个神经元,对应三个将要输入的特征值  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ ,隐藏层有五个神经元,输出层有两个神经元分别对应两个输出  $t_1$ 、 $t_2$ .将提取自信号  $a$  的一组特征  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  输入到网络的输入层,分类器的两个输出  $t_1$ 、 $t_2$  的组合正好可以代表 4 种不同的事件.输入层、隐藏层、输出层的每一层各神经元负责接收来自上一层的输入信息,并将输出传递给下一层的各个神经元.每个神经元的功能可用式  $Y = F(W * X + b)$  来表示,其中,  $Y$  为神经元的输出向量,  $X$  为神经元的输入向量,  $W$  为权重矩阵,  $b$  为偏置参数,  $F$  为神经元的激

活函数.对于隐藏层,所有五个神经元的激活函数均为  $\text{tansig}()$ ,其表达式为  $\text{tansig}(n) = 2 / (1 + \exp(-2 * n)) - 1$ .对于输出层,所有两个神经元的激活函数均为  $\text{purelin}()$ ,其表达式为  $\text{purelin}(n) = n$ .

#### 3.2 分类器训练

首先,给各个典型事件预先设定目标输出值 ( $t_1$ 、 $t_2$ ),然后,采用之前所述的特征提取方法对一些已知的典型事件的信号进行特征提取,并将这些特征值组成一个训练样本集<sup>[15]</sup>,用来训练网络分类器.每次将训练样本集中的一组特征参量(即  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ )输入到网络的输入层,根据每个神经元的数学表达式层层计算输出,直到得到神经网络输出层的输出 ( $e_1$ 、 $e_2$ ) 的值,将输出层的输出 ( $e_1$ 、 $e_2$ ) 与其所代表的典型事件所对应的 ( $t_1$ 、 $t_2$ ) 的值进行比较,计算得到均方误差,然后通过误差反向传播层层调整每层神经元的权重  $W$  和偏置  $b$ ,重复上述步骤,依次将训练样本集中的特征值组输入进网络中,对网络中各层神经元的权重  $W$  和偏置  $b$  进行迭代调整,直到使神经网络的输出 ( $e_1$ 、 $e_2$ ) 与目标值 ( $t_1$ 、 $t_2$ ) 的均方差最小.至此网络的训练过程完成.

### 4 实验结果与分析

实验中拟对小动物、人为攀爬、长棍滑动、温度上升等 4 种事件进行分类.事件的分类判决条件为:当分类器的实际输出,与预先设定好的某一类典型事件的理想输出完全一致或误差在一个很小的范围内(此范围的大小可根据实际的测试情况设定,以保证不会产生误判且不会漏判)时,就将信号判别为此类入侵行为.如果与所有典型事件的理想输出均不接近,即判断为无入侵事件发生.

#### 4.1 仿真实验

分别模拟了小动物、人为攀爬、长棍滑动、温度上升 4 种典型事件的信号,其仿真信号波形如图 3.

图 3 中纵轴均表示当前信号的波长(由于是仿真信号,所以这里仅为相对量),横轴均表示采样点数目.实验针对小动物、人为攀爬、长棍滑动、温度上升 4 种典型事件每种事件均取 25 组特征样本共 100 组样本

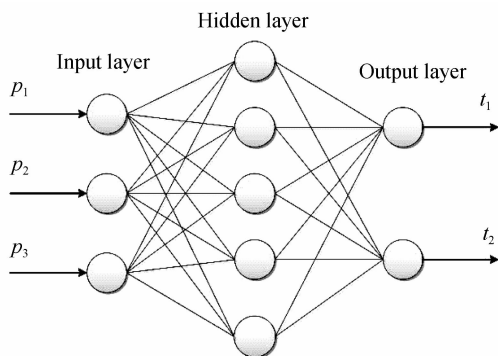
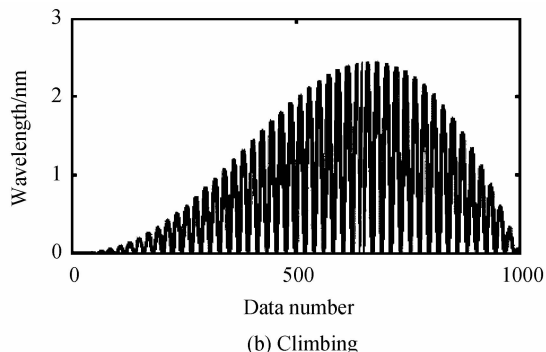
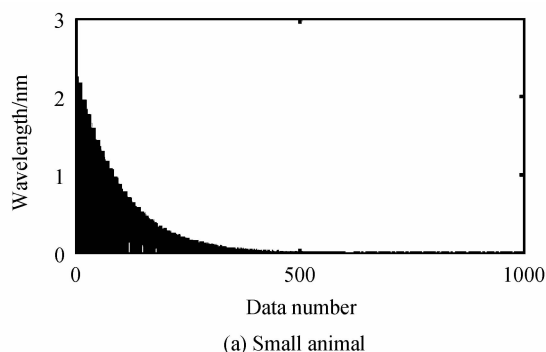


图 2 3 层 BP 神经网络结构图

Fig. 2 A three layer feed-forward neural network architecture



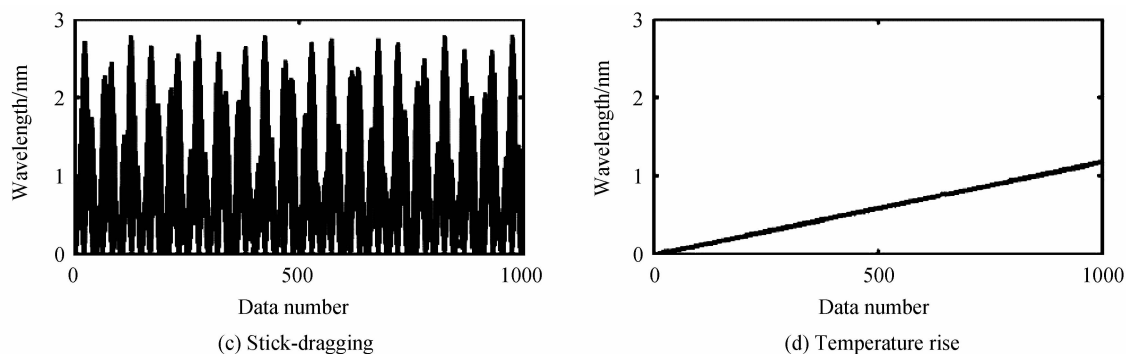


图3 4种事件的仿真信号波形图  
Fig.3 Waveforms of four simulated signals

来对分类器进行训练,然后每种事件再新选择25组特征样本共100组特征样本用来测试分类器的性能,其具体分类结果如表1所示,表中正确率的定义如下:

正确率=某事件被正确识别的数目/某事件参与测试的总数目×100%

表1 仿真信号下4种典型事件的识别正确率  
Table 1 Accuracy of four simulated typical events

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_N$	TN	IR	AIR
$P_1$	25	0	0	0	0	25	100%	100%
$P_2$	0	25	0	0	0	25	100%	
$P_3$	0	0	25	0	0	25	100%	
$P_4$	0	0	0	25	0	25	100%	

$P_1$ :小动物  $P_2$ :攀爬  $P_3$ :长棍滑动  $P_4$ :温度上升  
 $P_N$ :未识别 TN:总数 IR:正确率 AIR:平均正确率

由表1结果可知,4种仿真信号的正确识别率达到了100%,说明基于3层BP神经网络所设计的分类器的分类性能良好.

#### 4.2 实际采集数据实验

在现场实验中,通过采样数据来对分类器的性能进行测试和验证.测试环境为常温环境,实验所用围栏为高2.5 m的软质网状铁丝围栏,其具体形状如图4,传感光缆中所串联的振动传感器的间距为2 m,作用力的施加范围在传感器周围1 m范围内.从围栏采集的4种典型事件的实际信号波形如图5.

实验中针对小动物、人为攀爬、长棍滑动、温度上

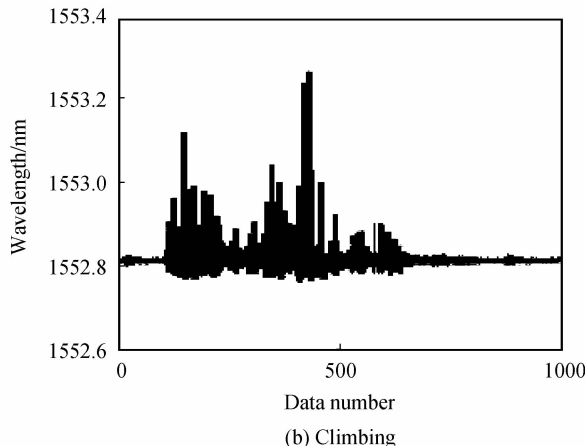
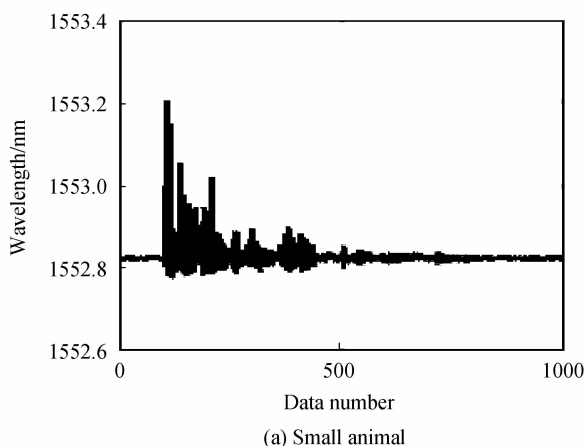


图4 现场实验所用围栏  
Fig.4 Fences used in actual experiments

升4种典型事件每种事件均取25组特征样本共100组样本来对分类器进行训练.然后上述每种事件依次分别选择26、24、23、21组特征样本共94组样本用来测试分类器的性能.其具体分类结果如表2.

表2 实际信号下4种典型事件的识别正确率  
Table 2 Accuracy of four practical typical events

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_N$	TN	IR	AIR
$P_1$	26	0	0	0	0	26	100.00%	96.83%
$P_2$	0	22	0	0	2	24	91.67%	
$P_3$	0	0	22	0	1	23	95.65%	
$P_4$	0	0	0	21	0	21	100.00%	

$P_1$ :小动物  $P_2$ :攀爬  $P_3$ :长棍滑动  $P_4$ :温度上升  
 $P_N$ :未识别 TN:总数 IR:正确率 AIR:平均正确率

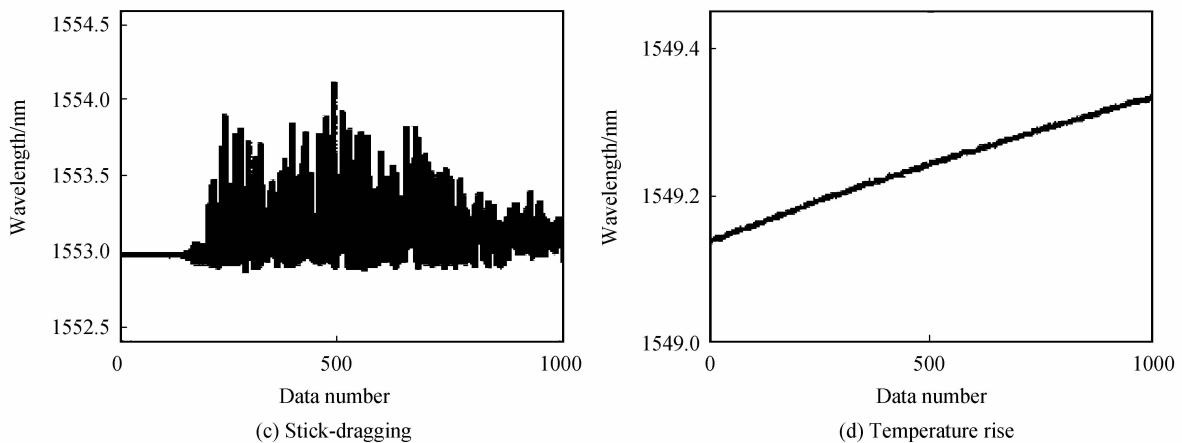


图5 4种事件的实际信号波形图  
Fig.5 Waveforms of four practical signals

从表2中实际采样数据的分类结果可以看出,小动物和温度上升这两种事件信号的正确识别率均达到了100%,系统对4种事件的平均正确识别率可以达到96.83%。动物和温度上升两种模式的信号波形在各自样本集之中时域特征差异不大,分类结果较好;而攀爬和长棍滑动两种模式的动作较为复杂,每次采样时波形的一致性较前两种模式低,相同事件下每次采样信号时域特征波动较大,导致个别事件分类错误。同时实验中人为攀爬模式为多人不同力量攀爬的事件信号集,攀爬信号在信号幅度、持续时间以及频率分量等方面均与小动物事件信号有较大差别,因此本方法对人为攀爬和小动物能够有效区分。另外,本实验中训练的分类器仅适用于本次试验的情况,针对不同形状或材料的围栏,需要根据实际的采样信号重新构建训练样本集来对分类器进行训练,以保证分类器可以适应不同形式的围栏。

## 5 结论

本文提出了一种基于FBG振动传感器的高性能的光纤围栏入侵监测系统及模式识别方法。通过一种时域统计特征提取算法和一个基于3层BP神经网络而设计的分类器,实现了一种高效率、高识别率以及智能化的光纤围栏入侵监测系统。此系统具有动态阈值,能够消除背景噪音等干扰的影响,大大提高了识别率,同时,该分类方法在保证高准确率的事件辨识的同时,相比快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)等频域分析方法大大减少了计算量,计算实时性能够满足实际应用要求,在中短距离范围内的安防系统中具有广泛的应用前景。

### 参考文献

[1] YOUSEFI A, DIBAZAR A A, BERGER T W. Intelligent fence intrusion detection system; detection of intentional fence breaching and recognition of fence climbing[C]. Boston: IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, 2008;

620-625.  
[2] WU Xiu-wei, WU Hui-juan, RAO Yun-jiang, *et al.* A low false alarm rate distributed fiber fence intrusion detection system based on comprehensive judgment by variety of wavelet decomposition[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1692-1696.  
吴麻伟, 吴慧娟, 饶云江, 等. 基于多种小波分解方法综合判决的低误报率分布式光纤围栏入侵监测系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11):1692-1696.  
[3] JIANG Qi, RAO Yun-jiang, ZHENG De-hong. A fiber-optical intrusion alarm system based on quasi-distributed fiber Bragg grating sensors [C]. Chengdu: Optical Fiber Sensors Conference, 2008: 1-5.  
[4] LIU Bo, YANG Yi-fei, ZHANG Jian, *et al.* Experimental study of fiber optic fence system based on M-Z Interference [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1013-1017.  
刘波, 杨亦飞, 张键, 等. 基于M-Z干涉的光纤围栏系统实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):1013-1017.  
[5] LI Shan-shan, WU Hui-juan, LU Xiang-lin, *et al.* Smart oil field comprehensive monitoring system based on optical fiber sensing network technology [J]. *Security and Safety Technology*, 2011, **8**(8): 15-18.  
李姗姗, 吴慧娟, 卢祥林, 等. 基于光纤传感网技术的智能油田综合监测系统[J]. *安防科技*, 2011, **8**(8): 15-18.  
[6] RAO Yun-jiang, WU Min, RAN Zeng-ling, *et al.* Fiber optic intrusion alarm system based on the quasi-distributed FBG sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(5): 998-1002.  
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):998-1002.  
[7] WU Hui-juan, RAO Yun-jiang, TANG Cheng, *et al.* A novel FBG-based security fence enabling to detect extremely weak intrusion signals from nonequivalent sensor nodes[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, **167**(2): 548-555.  
[8] TATSUYA K, SHINOBU S, WATARU O, *et al.* Fiber-optic intrusion detection sensor for physical security system [C]. Ottawa: 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, 2011: 352-356.  
[9] AN Wen-juan, LIANG Man-gui. A new intrusion detection method based on SVM with minimum within-class scatter[J]. *Security and Communication Networks*, 2013, **6**(9): 1064-1074.  
[10] WU Hui-juan, LI Shan-shan, LU Xiang-lin, *et al.* A novel method for simultaneous intrusion detection and fire alarm in

- a single FBGbased fiber fence monitoring system configuration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1671-1676.
- 吴慧娟, 李姗姗, 卢祥林, 等. 一种新型光纤光栅围栏防火防入侵同步预警系统[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1671-1676.
- [11] WU Hui-juan, WANG Jie, WU Xiu-wei, *et al.* Real intrusion detection for distributed fiber fence in practical strong fluctuated noisy backgrounds [J]. *Sensor Letters*, 2012, **10**(7): 1557-1561.
- [12] MAHMOUD S S, KATSIFOLIS J. Elimination of rain-induced nuisance alarms in distributed fiber-optic perimeter intrusion detection systems[C]. Orlando: Fiber Optic Sensors and Applications VI, 2009: 401-411.
- [13] MAHMOUD S S, KATSIFOLIS J. Robust event classification for a fiber optic perimeter intrusion detection system using level crossing features and artificial neural networks[C]. Orlando: Fiber Optic Sensors and Applications VII, 2010: 801-812.
- [14] MAHMOUD S S, KATSIFOLIS J. Performance investigation of real-time fiber optic perimeter intrusion detection systems using event classification[C]. San Jose: IEEE International Carnahan Conference on Security Technology, 2010: 387-393.
- [15] WANG Gang, HUANG Xing-yuan, SHI Ming-zhi, *et al.* Research on pattern recognition for disturbance events of fiber fence[J]. *Optical Communication Technology*, 2011, **7**(4): 51-53.
- 王刚, 黄星元, 施明智, 等. 光纤围栏扰动事件模式识别研究 [J]. *光通信技术*, 2011, **7**(4): 51-53.