

## 光纤传感与红外视频的复合入侵监控系统设计

安建昌<sup>1,2</sup>, 江俊峰<sup>1</sup>, 徐中原<sup>1</sup>, 朱万山<sup>1</sup>, 王 进<sup>1</sup>, 刘铁根<sup>1</sup>, 刘 琨<sup>1\*</sup>

- (1. 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;
2. 天津市滨海新区公安局天津港分局, 天津 300456)

**摘要:** 针对机场、油库等特定区域的高识别率、低误报率入侵事件监控需求, 提出了一种基于光纤传感与红外视频的目标识别方法。其中, 光纤传感部分采用基于 MCSVM 的非对称双马赫-曾德尔干涉仪 (ADMZI) 分布式光纤振动传感器, 将 EMD(经验模式分解)、将峰度特征与 MCSVM 相结合以提高识别率; 红外识别部分将灰度差值图像通过小波变换提高清晰度。两者经过模式对比算法, 实现入侵事件判定。搭建系统做现场实验, 结果表明: 该方法能够识别四种常见的入侵事件 (爬越围栏、敲击电缆、剪断围栏、摇动围栏), 平均识别率在 92.5% 以上, 误报率 0.9%, 相对传统单一传感器方案, 该方法在漏报率和虚警率等系统性能上都有较大的改善, 能够满足实际应用要求。

**关键词:** 入侵事件监测; 光纤振动传感; 红外识别; 复合技术

**中图分类号:** TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190446

## Design of composite intrusion detection system based on optical fiber sensor and infrared video

An Jianchang<sup>1,2</sup>, Jiang Junfeng<sup>1</sup>, Xu Zhongyuan<sup>1</sup>, Zhu Wanshan<sup>1</sup>, Wang Jin<sup>1</sup>, Liu Tiegeng<sup>1</sup>, Liu Kun<sup>1\*</sup>

- (1. Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Port Branch of Tianjin Binhai New District Public Security Bureau, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** To meet the requirements of intrusion detection with high recognition rate and low false alarm rate in specific areas such as airports and oil depots, a target recognition method based on optical fiber sensing and infrared video was proposed. Among them, the distributed optical fiber vibration sensor based on MCSVM ADMZI (asymmetric dual Mach-Zehnder interferometer) was used in the optical fiber sensing part, which combined the empirical mode decomposition (EMD) and the kurtosis feature with the MCSVM to improve the recognition rate. The infrared recognition part improved the clarity of the gray difference image through the wavelet transform. The intrusion detection was realized by pattern comparison algorithm. The field experiment results show that this method can identify four common intrusion events (climbing fence, tapping cable, cutting fence, shaking fence). The average recognition rate is over 92.5%, and the false alarm rate is 0.9%. Compared with the traditional single sensor scheme, this method has a great improvement in the system performance such as

收稿日期: 2020-01-08; 修订日期: 2020-02-16

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: 安建昌 (1983-), 男, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: 55608869@qq.com

导师简介: 江俊峰 (1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: jiangjfxu@tju.edu.cn

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

false alarm rate and false alarm rate, and can meet the practical application requirements.

**Key words:** intrusion event monitoring; optical fiber vibration sensor; infrared recognition; composite technology

## 0 引言

如今,基础设施诸如机场、油田的安防系统建设成为了关乎国家安全和社会稳定的热点话题。如何提高系统的监测能力,降低误报率是入侵检测系统的研究难题。

近年来,分布式光纤振动传感器因具有快速检测反应、灵敏度高、结构简单、抗电磁干扰能力强的优点,被广泛应用于检测和定位扰动事件<sup>[1-4]</sup>。为了解决识别率低、误报率高,入侵事件种类有限等问题,人们进行了许多尝试。Vries 等人的一项研究提出了一种基于声学的入侵方法<sup>[5]</sup>。该系统采用了一种具有频域特征的神经网络分类器,能够检测爬、剪、跳等入侵行为。然而,当入侵者和周围环境产生的信噪比质量下降时,系统性能下降。Yousefi 等人的另一项研究是基于三轴加速度计和精简指令集 (RISC) 微处理器的围栏入侵检测系统<sup>[6]</sup>。该系统能够通过两个带通滤波器,根据信号能量的变化,识别出缺口是由强风引起的震动造成的,还是由爬上围栏的人造成的。但是,该方法只能区分两种指定的类型,而不能区分具有相似性的事件。

除光纤振动传感器外,基于微波、红外线监控因其由于具有较好的隐蔽性和出色的夜视功能被广泛研究。但容易受强电磁场、环境热源等外部因素干扰,监控准确性降低,故应用范围受到了较大的限制<sup>[7-9]</sup>。

单一的识别手段抗干扰能力和灵敏度难以均衡,算法及以硬件要求高,存在着很大的漏报警和误报警的风险,这不仅增大了监控人员的工作负担,也增加了被监控区域的不安全性<sup>[10-12]</sup>。文中结合光纤传感与红外识别的自身优点,分别进行特征描述和模式识别的算法优化,将入侵目标特征提取并比对输出,以提高系统性能指标。

## 1 检测原理

### 1.1 ADMZI 原理及特征提取

ADMZI 分布式红外光纤振动传感器原理如图 1 所示。波长  $\lambda_1$  的连续窄线宽光源通过环形器 1 和

PC1 后由耦合器 1 分成两束,然后传播到被测光纤的两个端口。当 FUT 发生振动时,两束光之间会产生相位差。当光束被同一振动同时调制时,由于位置不同,仍然存在相位差。两束光在耦合 2 处发生干涉,干涉光通过 PC 2、环形器 2 和 DWDM 2 后被 PD2 接收。DWDM2 是对光源 2 引起的后向散射光进行滤波,保证了干涉光的高信噪比。同样波长的  $\lambda_2$  的操作除了光束传播方向相反。其中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  均接近 1 550 nm,且  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 。该系统具有定位和识别功能,由计算机实现。

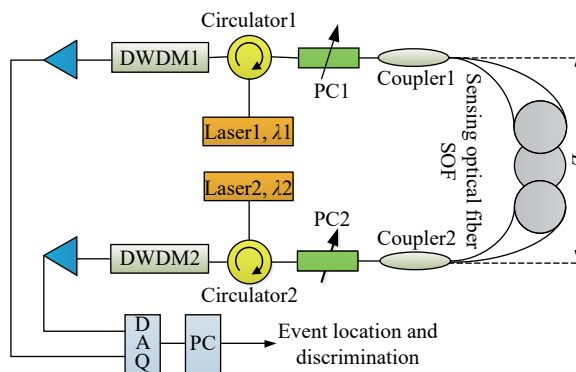


图 1 ADMZI 振动传感器原理图

Fig.1 Schematic of ADMZI vibration sensor.

图 1 中, Laser1, Laser2 分别为连续波窄线宽激光光束,波长分别为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ; DAQ 为数据采集卡; Coupler1, Coupler2 均是 3 dB 光纤耦合器; PC1、PC2 为偏振控制器; Circulator1, Circulator2 为光纤环形器; DWDM1 DWDM2 为密集波分复用器; PD2, PD2 为光电探测器;  $L$  为 SOF 的长度。

对于事件识别,特征提取是不可避免的,选择合适的特征参数是分类成功的关键。该方法将入侵信号通过 EMD 分解为 IMFS,分别表示不同的平稳信号特征尺度。每个 IMF 都具有较小的变化和时间特征。峰度特征描述了振动信号的分布,对脉冲信号的微小变化和时间性高度敏感。振动信号的特征向量采用峰度特征。具体提取过程如下。

第一步:计算所有 IMFS 的峰度特征并进行标准化。

$$T_i = \frac{1}{n} \times \sum_{k=1}^n c_{ik}^4 \quad (1)$$

$$T_i' = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^N T_i} \quad (2)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  个 IMF 的峰度特征;  $k$  为离散点在分量中的位置;  $n$  为有限整数;  $i$  为 IMFS 的个数。

第二步: 选择包含信号主要特征的  $j$  归一化峰度特征, 表示为  $T = [T1, T2, \dots, Tj]$ 。这些特性将用于对入侵事件进行分类。如图 2 所示。

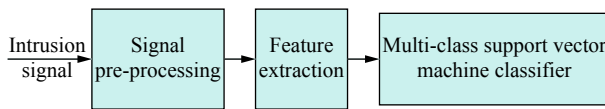


图 2 事件判别方法的算法框架

Fig.2 Algorithmic framework of event discrimination method

### 1.2 红外目标识别

红外目标识别主要利用红外摄像机采集到的视频图像信息进行入侵事件监控: 首先将红外图像进行灰度化处理, 经数字采集系统转化成数字量数据, 经过上位机对帧图像数据进行优化处理, 并采用特征提取算法进行分析, 结合行为类数据库对处理结果进行判定, 确定是否有如入侵事件发生。其红外目标识别的工作流程如图 3 所示。

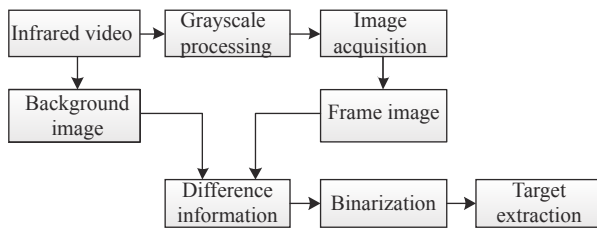


图 3 红外目标识别工作流程

Fig.3 Workflow of infrared target recognition

在红外摄像机的可视范围内, 一旦有人体目标闯入, 读取的图像的灰度差值和背景图像会有较大变化:

$$DIF_{gr} = \sum_{i=m}^n |CUR_{gr}(i) - BAC_{gr}(i)| \quad (3)$$

式中:  $CUR_{gr}$  为监控图像当前灰度信息;  $BAC_{gr}$  为背景灰度信息;  $DIF_{gr}$  为灰度差值信息。

先对差值图像进行小波分解, 然后用巴特沃斯低

通滤波器对水平和垂直方向高频子带的噪声进行处理, 最后进行小波图像的重构。阶巴特沃斯低通滤波器低通模平方函数如下式:

$$|H(u, v)|^2 = \frac{1}{1 + \{D_0/D(u, v)\}^{2n}} \quad (4)$$

由上式可知, 阶巴特沃斯低通滤波器传递函数的一个重要特性是连续衰减的, 而理想的低通滤波器传递函数为陡峭, 边缘不明显连续。采用阶巴特沃斯低通滤波器处理噪声, 降低了图像边缘的模糊度, 灰度剧烈变化处不会产生震荡, 从而保证了识别信号的质量。

### 1.3 MCSVM 分类器

支持向量机 (SVM) 分类是基于决策超平面的思想, 在输入空间或高维特征空间中确定决策边界<sup>[13-15]</sup>。SVM 由一组带标记的训练数据集构造线性的函数。这个超平面会把正样本和负样本分开。线性分隔符通常构造为从超平面到最近的负、正样本的最大距离。直观上, 这使得训练数据的分类接近但不等于测试数据。不同类型的入侵信号具有不同的特征向量, 可以作为 RBF 的输入。RBF 可以根据 IMFS 的不同特点进行综合分析。

对于多类分类问题, 由于输出可以是多个类, 并且必须划分为互斥类, 因此问题变得更加复杂。MCSVM 通常是通过结合多个二进制支持向量机来实现的。文中使用有向无环图 (DAG) 来获得 MCSVM。在训练阶段, 构造  $M \times (M-1)/2$  个二值分类器。在识别阶段, 采用有根二进制有向无环图, 包括  $M$  个节点和  $M \times (M-1)/2$  个节点。对于一个测试样本, 二进制决策函数的求值从根节点开始; 然后, 它向左或向右移动取决于输出值。

## 2 系统方案

复合入侵检测系统工作流程如图 4 所示。

监控系统传感器由光纤振动传感器和红外摄像机两部分总组成, 各自采集的入侵信号经过信号预处理后进行复合识别以判定信号类别。此外监控系统还有可见光摄像机作为辅助手段, 入侵触发后进行显示存储 (也可设置为实时显示)。

(1) 采集信号的预处理。将光纤振动传感器采集信号利用 EMD 算法, 根据信号的局部特征时间尺度,

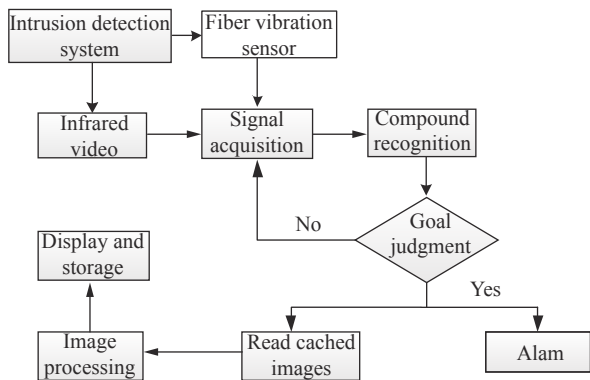


图 4 复合监控系统工作流程

Fig.4 Workflow of compound monitoring system

将所有信号分解成 IMFS 集合。EMD 算法是一种无先验主观准则选择的自适应时域分解方法,适用于非线性非平稳过程。红外图像信号经过小波变换降低噪声,提高清晰度。

(2) 入侵信号判定。利用 MCSVM 分类器将特征向量分类为不同的事件相关类别。两种判定信号经过互相关算法,通过预设阈值判定事件是否有效。

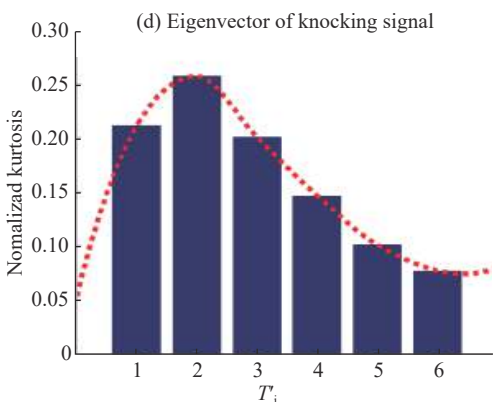
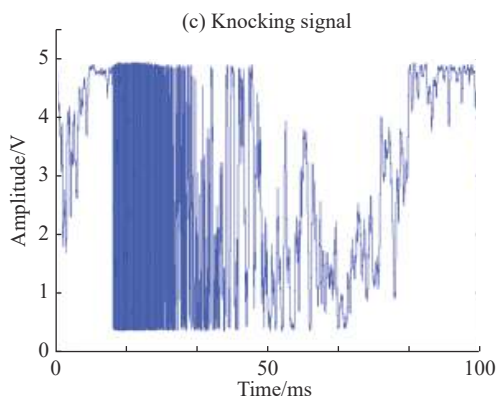
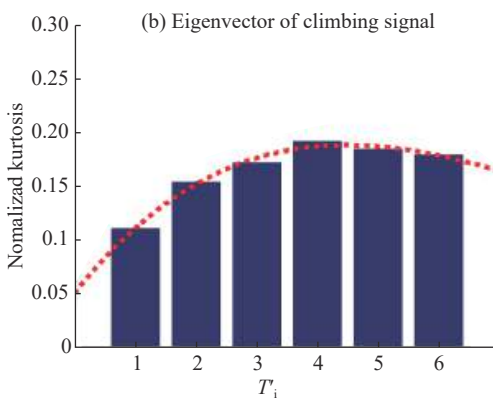
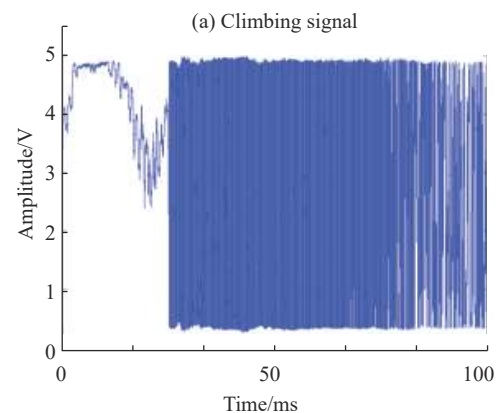
(3) 输出与报警。将复合判定结果读入缓存图像,联动声光报警器报警。

### 3 实验分析

实验设置如图 5 所示。激光光源为 1 550 nm 分布反馈激光器,强度 3.5 mW。外围围栏上的传感电缆总长为 2.25 km,采用单模光纤。红外监控采用 4 mm 无畸变摄像头,像素大小  $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ ,采样速率 30 帧/s。在基于 ADMZI 的分布式振动传感器上,通过攀爬、敲击、切割和摆动围栏四类入侵事件进行实验,得到 480 组数据,图 5 给出了四种情况下的入侵信号及其特征向量。

将光纤振动信号进行 IMFS 分解及 EMD 的预处理,然后利用峰度特征向量通过 MCSVM 对事件进行分类解析。将 SVM 结果与红外灰度差值图像像素解析结果进行匹配分析,监控图像输出入侵目标识别结果,如图 6 所示。

图 6(a) 中为人为攀爬动作,红外监控比光纤系统能够更为直观准确地识别,并通过矩形框框选入侵目标;图 6(b) 为较大型动物闯入监控区域时(文中为鸟类),红外监控会发生较高概率的误报,如图 b(1) 所示;而复合识别方式由于具有多传感器模式识别对比机制,能够很好地杜绝这类误报的发生,如图 b(2) 所示。



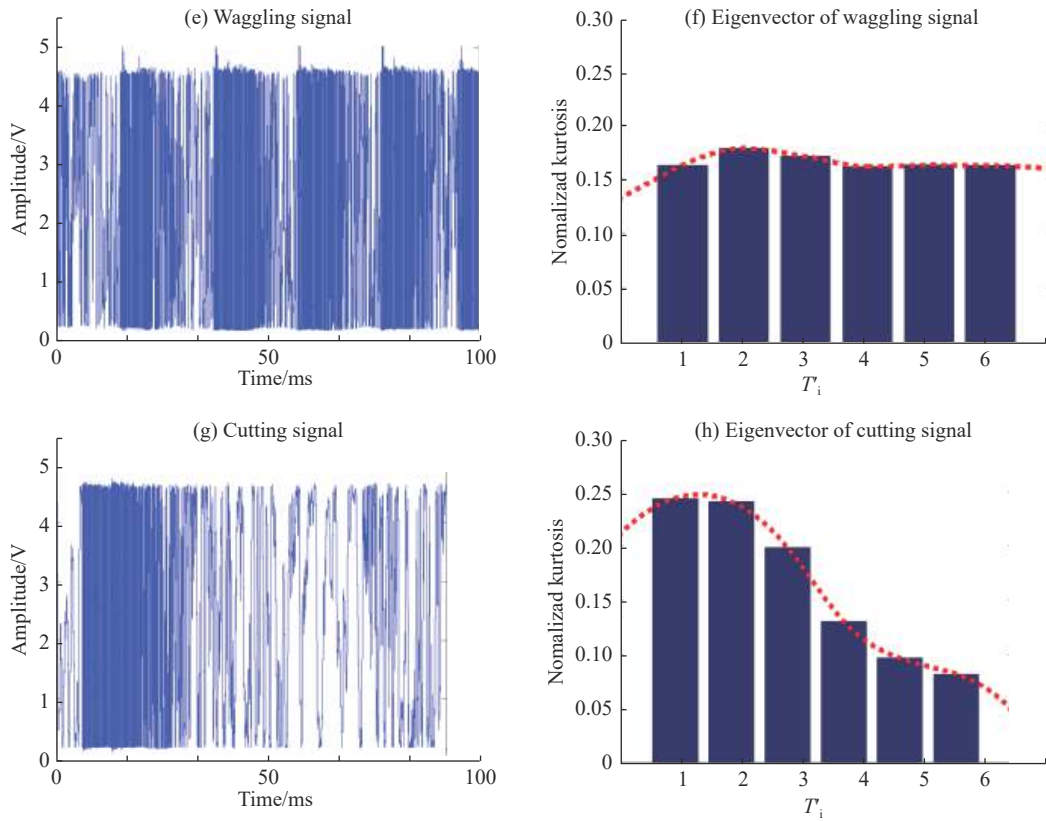


图 5 信号及其特征向量。(a) 攀爬, (b) 攀爬的特征向量, (c) 敲门, (d) 敲门的特征向量, (e) 摆动, (f) 摆动的特征向量, (g) 切割, (h) 切割的特征向量

Fig.5 Signals and their eigenvectors. (a) Climbing, (b) eigenvectors of climbing, (c) knocking, (d) eigenvectors of knocking, (e) wagging, (f) eigenvectors of wagging, (g) cutting, (h) eigenvectors of cutting



(a) 人为攀爬结果  
(a) Man-made climbing monitoring



(b1) 红外监控  
(b1) Infrared monitoring



(b2) 复合监控  
(b2) Combined monitoring

图 6 监控图像输出入侵目标识别结果

Fig.6 Intrusion target recognition results by monitoring image

为进一步验证,笔者进行了 120 次试验,其中 50 次试验用于训练。训练结束后,笔者也用这 50 次训练样本做了一个测试。四种情况的识别率均为 100%,证明了该方案的可行性。接下来的测试包括剩余的 70 次试验,以确定识别效率。复合检测与单一检测方法判别结果如表 1 所示。

由表 1 可知,三种对比方法中,复合入侵识别方

表 1 三种监控方案的实验结果对比

Tab.1 Comparisons among experimental results of three monitoring schemes

System scheme	Results of the proposed method				Results of the misinformation rate
	Climbing	Knocking	Wagging	Cutting	
Optical fiber testing	92.3%	90.9%	99.2%	91.6	2.5
Infrared monitoring	59.5%	54.3%	65.7%	62.9%	16.6%
Compound detection	95.8%	92.5%	99.8%	93.3%	0.9%



法相对于单一监测方式有更高的入侵识别率(实验数据为 100%)。对于爬越围栏、撞缆、晃动围栏、剪断围栏这四种具体入侵事件,文中方法的识别率分别达到 95.8%、92.5%、99.8%、93.3%。更为突出的一点,复合监测具有更低的虚警误报率(实验数据为 0.9%),上述结果验证了文中复合方法在具有高效的识别效率的同时,实现更低的误报率,能够更好的地应用在实际监控场合。

## 4 结 论

针对传统单一传感器周界安防系统的不足,设计并实现了一种基于光纤振动传感器和红外视频的复合周界防入侵系统。实验结果表明,该方法能够识别四种常见的入侵事件(爬越围栏、敲击电缆、剪断围栏、摇动围栏),平均识别率在 92.5% 以上,误报率 0.9%,相对传统单一传感器方案,该周界安防系统相比传统系统具有更好的适应性,误报率更低。

## 参考文献:

- [1] Qin Z, Zhu T, Chen L, 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.
- [2] Ding Z, Steve X, Liu T, et al. Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals [J]. *Opt Exp*, 2012, 20(27): 28319-28329.
- [3] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 629-635. (in Chinese)  
徐宁,戴明.分布式光纤温度压力传感器设计[J].中国光学,2015,8(4): 629-635.
- [4] Li Zhichen, Liu Kun, Jiang Junfeng, et al. High accuracy event recognition method for optical fiber perimeter security system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0922002. (in Chinese)  
李志辰,刘琨,江俊峰,等.光纤周界安防系统的高准确度事件识别方法[J].红外与激光工程,2018,47(9): 0922002.
- [5] de Vries J. A low cost fence impact classification system with neural networks[C]// Proceedings of 7th AFRICON Conference in Africa, 2004: 131-136.
- [6] Yousefi A, Member S, Dibazar A, et al. Intelligent fence intrusion detection system: Detection of intentional fence breaching and recognition of fence climbing[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, 2008: 620-625.
- [7] Willett R M, Marcia R F, Nichols J M. Compressed sensing for practical optical imaging systems: a tutorial [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(7): 072601.
- [8] Wang Junfeng, Sheng Dajun, Liu Zichang, et al. Research on application of high-speed railway perimeter intrusion detection system based on microwave array technology [J]. *China Railway*, 2019(2): 41-46. (in Chinese)  
王军锋,盛大军,刘子畅,等.基于微波阵列技术的高铁周界入侵探测系统应用研究[J].中国铁路,2019(2): 41-46.
- [9] He Yu, Wang Lingxue, Cai Yi, et al. Research progress and prospects of catadioptric perimetry system [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 681-698. (in Chinese)  
贺宇,王岭雪,蔡毅,等.折反射周视系统研究进展与展望[J].中国光学,2017,10(5): 681-698.
- [10] Yin Xiaochen, Fu Yanhui. Optical design of common aperture IR/ladar dual-mode imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 428-431. (in Chinese)  
殷笑尘,付彦辉.红外/激光共孔径双模导引头光学系统设计[J].红外与激光工程,2015,44(2): 428-431.
- [11] Cheng Xuanyue, Wu Ran, Yang Xinfeng, et al. Target recognition method based on infrared and laser fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0526003. (in Chinese)  
全选悦,吴冉,杨新锋,等.红外与激光融合目标识别方法[J].红外与激光工程,2018,47(5): 0526003.
- [12] Fan Youchen, Zhao Hongli, Sun Huayan, et al. Calculation of maximum range of active and passive laser rangedetection system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(s1): 86-92. (in Chinese)  
范友臣,赵红莉,孙海燕,等.主被动激光测距探测系统最大距离的计算[J].红外与激光工程,2015,44(s1): 86-92.
- [13] Zhang Junnan, Lou Shuqin, Liang Sheng. Study of pattern recognition based on SVM algorithm for  $\phi$ -OTDR distributed optical fiber disturbance sensing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0422003. (in Chinese)  
张俊楠,娄淑琴,梁生.基于SVM算法的 $\phi$ -OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J].红外与激光工程,2017,46(4): 0422003.
- [14] 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*, 2013, 32(2): 43-45, 49. (in Chinese)

- 李彦, 梁正桃, 李立京, 等. 基于小波和支持向量机的光纤微振动传感器模式识别[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(2): 43-45, 49.
- [15] Zhang Yan, Lou Shuqin, Liang Sheng, et al. Study of pattern recognition based on multi-characteristic parameters for  $\varphi$ -OTDR distributed optical fiber sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1105005. (in Chinese)
- 张颜, 娄淑琴, 梁生, 等. 基于多特征参量的 $\varphi$ -OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1105005.