

埋式光纤入侵监测系统研究

李淑娟^{1,2}, 王 昌^{1,2*}, 张发祥^{1,2}, 孙志慧^{1,2}, 闵 力^{1,2}, 王 蒙^{1,2}, 刘小会^{1,2}

¹山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014;

²山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014

摘要 埋式入侵监测系统具有隐蔽性强、受自然因素影响小、误报率低、识别概率高等特点,在入侵监测中具有重要作用。介绍了将光纤传感用于入侵监测的主要技术方案,阐述了光纤分布式振动传感(DVS)系统和光纤布拉格光栅(FBG)振动传感系统的工作原理。对这两种系统进行了人员入侵监测实验。结果表明,DVS系统的有效探测范围可达到10~15 m,空间分辨率约为20 m;FBG振动传感系统的最大有效探测距离超过75 m。对比和评估了这两种系统的关键性能,展望了埋式光纤入侵监测系统的应用方向。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 分布式; 埋式

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.010604

Buried Optical Fiber Intrusion Monitoring System

Li Shujuan^{1,2}, Wang Chang^{1,2}, Zhang Faxiang^{1,2}, Sun Zhihui^{1,2},
Min Li^{1,2}, Wang Meng^{1,2}, Liu Xiaohui^{1,2}

¹Shandong Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology, Jinan, Shandong 250014, China;

²Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China

Abstract A buried intrusion monitoring system has the characteristics of strong concealment, little affected by natural factors, low false alarm rate and high identify probability, and plays an important role in intrusion monitoring. The main technical scheme for security intrusion monitoring based on fiber sensing is introduced. The working principles of the fiber distributed vibration sensing (DVS) system and the fiber Bragg grating (FBG) vibration sensing system are described. Personnel invasion monitoring experiments for the two systems are carried out. The results demonstrate that the maximum effective detection range of the DVS system is 10–15 m, and the spatial resolution is about 20 m. The maximum effective detection distance of the FBG vibration sensing system is beyond 75 m. The key performances of the two systems are compared and evaluated, and the application of buried fiber intrusion monitoring system is also discussed.

Key words fiber optics; fiber grating; distributed; buried

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 120.3180; 120.7280

1 引言

国防区域、机场、大型变电站等重要区域需要有效的安全防范设备,以切实保障区域安全。光纤传感器具有抗电磁干扰、不需要供电、耐腐蚀、可靠性高、可实现分布式或准分布式长期监测等优点,特别适用于入侵监测系统。目前,光纤入侵监测系统主要采用光纤分布式传感(DVS)技术和基于光纤布拉格光栅(FBG)的准分布式传感技术^[1-2]。

光纤分布式传感技术主要包括干涉型探测技术^[1-6]和光时域反射(OTDR)技术^[7-8]。传统的光纤分布式传感技术主要用于监测从几公里至百公里的长距离分布式安防系统,一般结合隔离网布放,定位准确度较

收稿日期: 2016-08-31; 收到修改稿日期: 2016-10-18; 网络出版日期: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61605102, 61307101, 61205083)、山东省自然科学基金(ZR2013FL029)、山东省科技发展计划(2014GGX103005, 2016GGx103041)

作者简介: 李淑娟(1980—),女,硕士,助理研究员,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: sdlshj@126.com

* 通信联系人。E-mail: wang960100@163.com

低,并且该传感技术不能完全检测目标的频率、相位等信息,易受环境的干扰,误报率偏高,较难识别目标。近年来,新型光纤分布式声波/振动传感系统采用相位敏感的光时域反射(ϕ -OTDR)技术^[7-11],具有比传统OTDR技术更高的灵敏度,并且能够得到外界信号频率、相位和振幅的完整信息。该系统结合合理的布放方式,可减少天气等环境因素的干扰,从而减少误报,提高目标识别率。

基于FBG的准分布式入侵监测系统主要包括基于FBG传感器的光纤围栏系统^[12-13]和地面布放的FBG振动传感系统^[14-16]。基于FBG传感器的光纤围栏系统采用挂网监测方式,灵敏度较低,难以消除强风、暴雨等自然环境因素对系统的干扰,具有较高的误报率,且易被入侵者发现和破坏。地面布放的FBG振动传感系统将具有高灵敏度的FBG振动传感器^[17-19]作为探测单元,探测距离远,可采集到目标振动信号的幅度、频率、相位等信息,隐蔽性强,受强风、暴雨等自然环境因素的影响较小,易实现低误报率和高识别率。

综合分析上述几种光纤入侵监测系统的应用特点,地面埋设布放传感器的方式隐蔽性强,受自然因素的影响较小,误报率低,识别率高,具有明显优势。对新型DVS系统和地面布放的FBG振动传感系统进行了研究,介绍了系统的工作原理,设计了埋地式入侵监测方案,在人员入侵进行监测实验中比较了这两种传感系统。

2 基本原理

2.1 光纤分布式振动传感系统

ϕ -OTDR技术是一种基于光纤背向瑞利散射光相干技术的新型时域反射检测技术。基于 ϕ -OTDR技术的DVS系统可检测加载在光纤上的扰动,具有灵敏度高、定位精确等优点,其基本原理如图1所示。图中EOM为电光调制器,EDFA为掺铒光纤放大器,PD为光电探测器。当一束窄线宽脉冲激光入射到光纤中时,光纤不同位置的散射光发生干涉。在光纤某处施加振动信号时,光纤的折射率和应变随振动信号的交替作用发生变化,该处所对应的瑞利散射光相位也随时间发生变化,从而导致干涉光强度发生变化。通过检测光纤上不同位置相干散射光的强度随时间的变化,便可检测到外界的扰动。根据散射光返回的时间即可定位光纤上振动信号的位置。

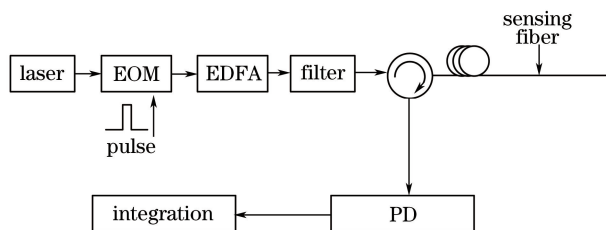


图1 基于 ϕ -OTDR技术的DVS原理示意图

Fig. 1 Schematic of DVS principle based on ϕ -OTDR technology

DVS系统主要通过检测光纤上不同位置相干散射光的强度随时间的变化来检测外界振动对光纤的扰动。该系统采用先进的光电探测技术,探测光纤上不同位置相干散射光的瞬时相位或频率信息,从而还原外界扰动的幅度、频率、相位等信息。

2.2 FBG振动传感系统

FBG振动传感系统以FBG为敏感元件。利用FBG的波长调制原理,高灵敏度FBG振动传感器的敏感结构将振动信号转化为对FBG轴向应变的调制信号,从而改变反射光的中心波长,通过解调波长还原振动信号。高灵敏度FBG振动传感器的敏感结构如图2所示。光纤光栅的波长变化量与轴向应变成正比,通过

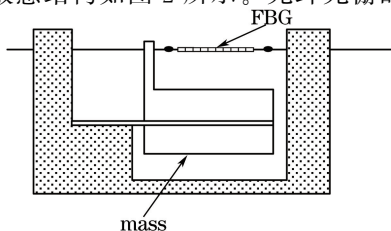


图2 FBG振动传感器的敏感结构示意图

Fig. 2 Diagram of sensitive structure of FBG vibration sensor

波长解调技术检测光纤光栅的波长变化量,从而可以得到外界振动加速度。

为探测微弱的波长变化,采用基于 Michelson 干涉仪的干涉式波长解调技术,基本原理如图 3 所示。图中 ASE 为光源。光纤光栅的反射光经过 Michelson 干涉仪分为两路,两路光经过两种不同长度的光路后形成干涉,干涉光强可表示为

$$I = I_0 [1 + k \cos(\Delta\varphi + \varphi_0)], \quad (1)$$

式中 I_0 为反射光光强, k 为干涉条纹的可见度, $\Delta\varphi$ 为 Michelson 干涉仪两臂信号的相位差, φ_0 为初始相位。利用 Michelson 干涉仪将光纤光栅的波长变化量转化为相位变化量,则相位变化量可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi nd}{\lambda^2} \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中 n 为光纤折射率, d 为干涉仪两臂的长度差, λ 为 FBG 的中心波长, $\Delta\lambda$ 为 FBG 的波长变化量。通过光电探测器探测光强,采用高分辨率相位检测技术检测相位变化,并由(2)式求解波长变化量。

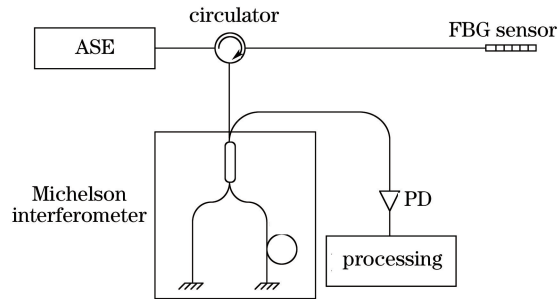


图 3 基于 Michelson 干涉仪的干涉式波长解调示意图

Fig. 3 Schematic of interferometric wavelength demodulation based on Michelson interferometer

利用波分复用和空分复用技术可将 FBG 振动传感器组成多路阵列。利用 8 路波分与 2 路空分的复用技术设计的 16 路 FBG 振动传感网络系统示意图如图 4 所示,该系统包括光学模块、传输光缆、2 条 8 路 FBG 振动传感器阵列以及信号处理系统。光学模块包含光源、Michelson 干涉仪、波分复用器和光电探测器,光学模块为整个系统提供光源。光源通过传输光缆与振动传感器连接,8 路 FBG 振动传感器阵列中的每个传感器采用不同波长的 FBG,FBG 的返回信号通过 Michelson 干涉仪转换为干涉信号,再通过波分复用器将不同通道的传感器的光信号分离并被光电探测器采集,最终转变为电信号。信号处理模块采集光学模块中光电探测器输出的电信号,并将其数字化,通过处理数字信号得到光强中包含的相位信息,从而还原传感器的振动信号。

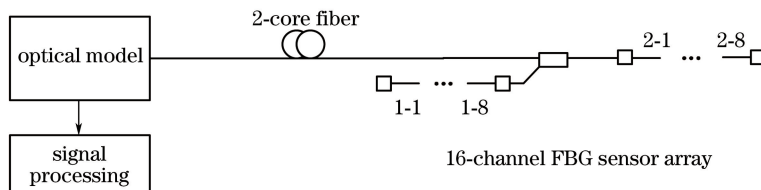


图 4 16 路 FBG 振动传感网络系统示意图

Fig. 4 Diagram of 16-channel FBG vibration sensing network system

3 现场实验与分析

针对传感器在埋地式光纤入侵监测方面的应用,研制了 DVS 系统和 FBG 振动传感系统,设计了这两种传感系统的埋设方案,进行了人员入侵监测实验,并比较和评价了这两种传感系统。

3.1 系统布放

实验区域为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的平坦地面,周围无主要公路和施工噪声源,无树木,土质为沙土。DVS 系统将光缆作为监测介质,由于 DVS 系统具有分布式监测的特点,光缆的任何部分都可以作为传感单元。针对 DVS 系统的传感特点,采取光缆整体埋设的方案,即在实验区域开挖一条长为 100 m 、宽为 50 cm 的埋设

沟,埋入长为 100 m 的 GYTB53-4B1 监测光缆。为使光缆与土地较好地耦合,光缆需埋设到一定深度,在光缆表面覆土,并将土踩实。测试中,光缆的埋设深度为 50 cm。光缆头部与 DVS 主机的光缆熔接连接,对光缆尾部光纤进行弯曲处理,以消除端面反射的影响。

FBG 振动传感系统为多路单点传感器构成的系统,将每个传感器埋入深度为 30 cm 的坑中,并用土覆盖。为保证传感器与地面较好地耦合,传感器在埋设时加装 20 cm 长的尾锥,并将其插入土中。传感器之间的间距为 50 m,以一条线的形式排列。传感器间的传输光缆用土覆盖,以避免光缆被风吹动后产生虚假信号。

3.2 人员入侵测试

对人员入侵后 DVS 系统的监测性能进行测试,测试方案示意图如图 5 所示。一名体重为 70 kg 的成年男子模拟入侵人员,在距离埋设光缆为 10 m 的位置处,入侵人员沿平行于光缆的方向(图 5 中虚线箭头标示的方向)以 5 km/h 的速度行走,该过程中 DVS 监测系统实时记录探测到的步行信号。

图 6 为 DVS 系统的探测信号强度随入侵人员行进时间和位置的变化。横坐标为埋设的长度为 100 m 光缆的位置坐标,0 m 表示埋设光缆的头部,100 m 表示埋设光缆的尾部;纵坐标为入侵人员的行进时间,0 s 表示刚发生的事件,7 s 表示 7 s 之前发生的事件。黑白图的颜色表示对应位置和对应时刻探测到信号的相对强度,黑色为本底噪声的信号强度,图片中的亮度与信号的相对强度成正比。图 6 中的亮带为入侵人员行走每一步后实验中监测到的信号,亮带的中心即为入侵人员所处的位置,亮带的中心位置由 62 m 移动至约 72 m,入侵人员行进了 15 步,因此共采集到 15 次振动信号。由图 6 中亮带的宽度可知,每次探测到的振动信号的覆盖范围约等于亮带的宽度。因此,若沿光缆方向同时存在两个入侵信号,且两个入侵信号的间隔小于 20 m,则 DVS 系统探测到的这两个入侵信号强度图中的亮带会交叠,显示为一个信号,无法有效分辨,因此得出该 DVS 系统的空间分辨率约为 20 m。

为评估系统的最大探测距离,使入侵人员与埋设光缆的距离增大至 15 m,重复上述测试过程,系统无法探测到有效振动信号,表明该测量距离超出了系统的有效探测距离。因此,系统对入侵人员行走的探测范围可达到 10~15 m。

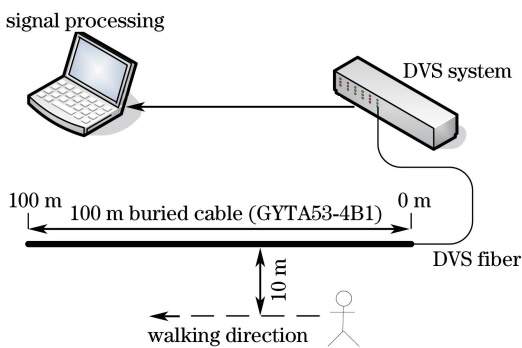


图 5 DVS 系统对人员入侵的测试方案示意图

Fig. 5 Diagram of personnel invasion testing scheme by DVS system

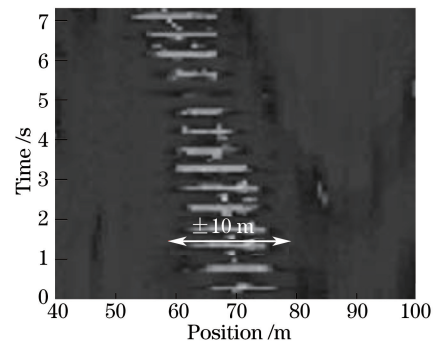


图 6 DVS 系统的探测信号强度随入侵人员行进时间和位置的变化

Fig. 6 Variation in detection signal intensity obtained from DVS system with traveling time and position of invasive personnel

研究入侵人员对 FBG 振动传感系统监测性能的影响的实验装置示意图如图 7 所示。入侵人员的初始位置为距离 1 号 FBG 振动传感器 100 m 的位置处,入侵人员沿距离传感器阵列 10 m 的直线(如图 5 中虚线箭头标示的方向)以 5 km/h 的步速正常行进。图 8 为 2 号 FBG 振动传感器监测到的数据,横坐标为入侵人员的行走时间,纵坐标为信号振动幅度。图 8 中的信号为人员逐渐靠近传感器过程中采集到的信号,信号幅度随着入侵人员的靠近而逐渐增大,在 59 s 左右信号幅度达到最大,表明入侵人员此时正位于距离 2 号传感器最近的位置。当系统监测到有效信号时,入侵人员与传感器的距离超过 75 m,因此判定单个光纤振动传感器的有效探测距离大于 75 m,预警时间超过 50 s。

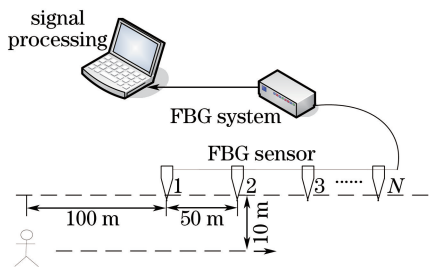


图7 FBG振动传感系统的实验装置示意图

Fig. 7 Diagram of experimental setup of FBG vibration sensing system

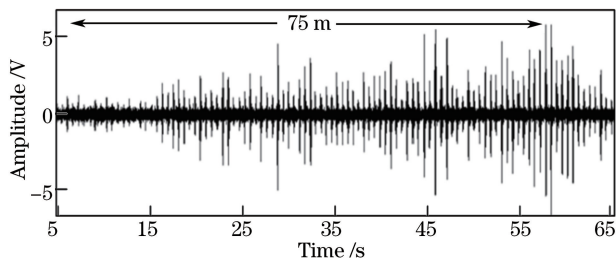


图8 2号FBG振动传感器的测试结果

Fig. 8 Testing results of number 2 FBG vibration sensor

3.3 分析与评价

1) 布放方式

DVS系统和FBG振动传感系统均采用地面埋设布放的方式,这种布放方式隐蔽性强、受自然因素的影响小,从而可以降低误报率和提高识别率。DVS系统需要将光缆整体埋设,因此需要挖一定深度的埋设沟,使光缆与土地较好地耦合,施工量较大;而FBG振动传感系统只需要将每个传感器埋放,传输光缆简单隐蔽即可,施工量相对较小。

2) 探测距离

根据对比实验,DVS系统的有效探测范围可达到10~15 m,FBG振动传感系统的有效探测距离超过75 m。对比实验表明,在相同土质下,FBG振动传感系统的探测距离远大于DVS系统的探测距离。

3) 定位精度

由于DVS系统具有分布式监测的特性,定位精度可以达到米量级。FBG振动传感系统依靠振动传感器定位,只能确定目标所处某个传感器的探测范围,需要将多个传感器相结合,才能进行更精确的定位。

4) 信号识别

由上述测试结果可知,DVS系统可探测到振动信号的相对强度和位置信息,FBG振动传感系统可探测到目标振动信号的完整波形,包含幅度、频率、相位信息。结合信号识别算法,这两种系统均能够对目标属性进行初步识别,其中,FBG振动传感系统探测到的信息更完整,有利于实现更低误报率、更高识别率的监测。

5) 系统复杂度

DVS系统以光缆本身作为监测介质,通过检测光纤上不同位置相干散射光的强度随时间的变化来检测外界扰动,系统的复杂度得到大幅降低。FBG振动传感系统相对复杂,由振动传感器构成阵列,后续还需要利用信号处理算法提取相位信息、还原振动信号。

4 结论

光纤传感器具有抗电磁干扰、不需要供电、耐腐蚀、可靠性高、可实现分布式或准分布式监测等优点,特别适用于入侵监测。DVS系统和FBG振动传感系统通过地面埋设布放,可实现长期隐蔽监测,具有受自然因素影响小、误报率低、识别率高的特点。DVS系统布放相对简单,定位精度高,系统复杂度低;FBG振动传感系统的探测距离远,探测信息完整,符合高识别率的监测要求。两种技术方案相结合,可实现高性能的入侵监测,在高档小区、监狱、重点军事区、核设施所在区域、机场、重点边防区域等安防领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Liang Yijun, Liu Zhihai, Yang Jun, *et al.* Optical fiber Sagnac interferometric sensor for measurement of feeble vibration[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(1): 118-122.

梁艺军, 刘志海, 杨 军, 等. 测量微弱振动的光纤 Sagnac 干涉传感器[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(1): 118-122.

- [2] Zhou Zhengxian, Xiao Shilin, Tong Fangxuan. A positioning fiber-optic vibration sensor based on M-Z interference principle[J]. Study on Optical Communications, 2009, 35(5): 67-70.
周正仙, 肖石林, 仝芳轩. 基于 M-Z 干涉原理的定位式光纤振动传感器[J]. 光通信研究, 2009, 35(5): 67-70.
- [3] Yang Jiang, Zhao Jian, Yang Chunni, *et al.* All-fiber perimeter security system based on Michelson interferometer and pattern recognition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105005.
杨江, 赵健, 杨春妮, 等. 基于迈克耳孙干涉和模式识别的全光纤周界安防系统[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105005.
- [4] Liu Kun, Chai Tianjiao, Liu Tiegeng, *et al.* Multi-area optical perimeter security system with quick invasion judgment algorithm[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(2): 288-294.
刘琨, 柴天娇, 刘铁根, 等. 多防区光纤周界安防系统及入侵快速判定算法[J]. 光电子·激光, 2015, 26(2): 288-294.
- [5] Wang He, Sun Qizhen, Li Xiaolei, *et al.* Progress in optical fiber interferometer based distributed vibration sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020004.
王贺, 孙琪真, 李晓磊, 等. 干涉型分布式光纤振动传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020004.
- [6] Zhu Chenghui, Wang Jianping, Li Qiyue, *et al.* Recognition and localization of intrusion vibration signal based on time-frequency characteristics in optical fiber perimeter security[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0610001.
朱程辉, 王建平, 李奇越, 等. 基于时频特征的光纤周界入侵振动信号识别与定位[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0610001.
- [7] Zhu Yan, Dai Zhiyong, Zhang Xiaoxia, *et al.* Developments of distributed optical fiber vibration sensor[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(10): 1072-1075.
朱燕, 代志勇, 张晓霞, 等. 分布式光纤振动传感技术及发展动态[J]. 红外与激光, 2011, 41(10): 1072-1075.
- [8] Yang Bin, Gao Wei, Xi Gang. Key technologies for ϕ -OTDR-based distributed fiber-optic sensing systems[J]. Study on Optical Communications, 2012, 38(4): 19-22.
杨斌, 皋魏, 席刚. ϕ -OTDR 分布式光纤传感系统的关键技术研究[J]. 光通信研究, 2012, 38(4): 19-22.
- [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] Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling, *et al.* Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.
谢孔利, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
- [11] Lin Wentai, Liang Sheng, Lou Shuqin, *et al.* A novel fiber-optic distributed disturbance sensor system with low false alarm rate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1845-1848.
林文台, 梁生, 娄淑琴, 等. 一种低误报率的新型光纤分布式振动传感系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1845-1848.
- [12] Zhang Cui, Wang Lixin, Lin Bin, *et al.* Study on FBG vibration sensor used for perimeter security[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(4): 566-569.
张翠, 王立新, 林斌, 等. 用于周界安防的光纤光栅振动传感器的研究[J]. 半导体光电, 2012, 33(4): 566-569.
- [13] Xie Xin, Wu Huijuan, Rao Yunjiang. A fiber-optical perimeter intrusion detection system based on the fiber Bragg grating vibration sensors and its identification method[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 0506005.
谢鑫, 吴慧娟, 饶云江. 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[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 0506005.
- [14] Li Huifang, Yin Xinda, Liu Jian, *et al.* Intrusion signal recognition basing on optical fiber Bragg grating vibration sensor[J]. Optical Communication Technology, 2012(2): 12-14.
李惠芳, 印新达, 刘简, 等. 基于光纤光栅传感系统的入侵信号识别[J]. 光通信技术, 2012(2): 12-14.
- [15] Wang Meng, Sun Zhihui, Zhang Faxiang, *et al.* Study on fiber Bragg grating vibration sensor system used for

perimeter security[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2016, 37(3): 427-429, 435.

王 蒙, 孙志慧, 张发祥, 等. 用于周界安防的光纤光栅振动传感系统研究[J]. *半导体光电*, 2016, 37(3): 427-429, 435.

- [16] Rao Yunjiang, Wu Min, Ran Zengling, *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.

- [17] Li Hongcai, Liu Chuntong, Zhang Zhili. An FBG vibration sensor used in perimeter intrusion monitoring system[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(10): 1902-1907.

李洪才, 刘春桐, 张志利. 一种用于周界入侵监测的 FBG 振动传感器[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(10): 1902-1907.

- [18] Zhang Faxiang, Zhang Xiaolei, Wang Lujie, *et al.* Study on FBG micro-seismic geophone with high sensitivity and broad bandwidth[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(6): 1086-1091.

张发祥, 张晓磊, 王路杰, 等. 高灵敏度大带宽光纤光栅微地震检波器研究[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(6): 1086-1091.

- [19] Wang J Y, Hu B X, Li W, *et al.* Design and application of fiber Bragg grating (FBG) geophone for higher sensitivity and wider frequency range[J]. *Measurement*, 2016, 79: 228-235.