

单模-多模-单模光纤结构在安防系统的实验研究

游赐天^{1,2}, 陈沛超^{1,2}, 丁攀峰^{1,2*}

¹华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

²福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 基于模间干涉原理,将单模-多模-单模(SMS)光纤结构运用于光纤安防系统中。以多模光纤为传感光纤,结合小波变换处理,实现对外界振动入侵事件的探测。理论分析了多模光纤的模间干涉原理,并分别将两路传感光纤置于围栏和铺设在地面上,对几种振动入侵事件进行实验分析。研究表明:该结构型传感器能够快速有效地探测到振动入侵信号,在光纤安防领域中具有较好的可行性。该结构型传感系统由于其结构简单、成本低廉等优点,在光纤安防系统中具有重要意义。

关键词 光纤光学; 模间干涉; 振动传感; 单模-多模-单模型光纤结构; 光纤安防

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060603

Experimental Research on Single Mode-Multimode-Single Mode Fiber Structure in Security System

You Citian^{1,2}, Chen Peichao^{1,2}, Ding Panfeng^{1,2}

¹ College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

² Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract Based on the principle of inter mode interference, we apply the single mode-multimode-single mode (SMS) optical fiber structure to the optical fiber security system. In the system, multimode optical fiber is used as sensing fiber, and wavelet transform is used to realize the detection of external vibration signals. The theory of intermodal interference of multimode optical fiber is analyzed. The sensing optical fiber is arranged in the fence and laid on the ground, respectively. Several vibration invasive events are analyzed in experiment. The experimental results show that the sensing system of this structure can detect the vibration invasive signal quickly and effectively, and it has good feasibility in the field of security in optical fiber. The structure sensing system maintains the advantages of simple structure, low-cost, which has very important significance in optical fiber security systems.

Key words fiber optics; intermodal interference; vibrating sensor; single mode-multimode-single mode optical fiber structure; optical fiber security

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 280.4788

1 引言

近年来,光纤传感技术由于其高灵敏度、定位精确及抗电磁干扰等优点受到人们的广泛重视,已成为传感领域研究的热点。它可实现机场、边境、基地、港口等特殊地点的周界监控报警^[1],实现油田、

油气管道的安全监控^[2],实现对政府、银行、博物馆、军事基地等地点的光缆进行安全监控^[3-5]。

目前,应用于光纤安防领域的传感技术主要有基于光纤光栅(FBG)型^[6-9]、光时域反射(OTDR)型^[10]、萨格纳克(Sagnac)型^[11]、迈克耳孙(Michelson)干涉型^[12]、马赫-曾德尔(M-Z)干涉

收稿日期: 2017-11-22; 收到修改稿日期: 2017-12-14

基金项目: 中央高校培育型科技创新人才资助项目(ZQN-PY306);福建省自然科学基金对外合作项目(2015I0005)

作者简介: 游赐天(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: youcitian@163.com

导师简介: 丁攀峰(1980—),男,博士,教授,主要从事光束传输及光纤应用技术方面的研究。

E-mail: dingpanfeng@163.com(通信联系人)

型^[13-14]等。2003年,胡志新等^[15]设计了一套基于 Sagnac 光纤干涉原理的管道泄漏监控定位系统。该系统在 5 km 的监测距离内达到了 0.9 m 的定位精度。2007年,陈伟民等^[16]设计了一种将马赫-曾德尔干涉仪和互相关算法相结合的光纤传感系统,该系统在 20 km 的安防区域中,能够达到 149 m 的定位精度。2012年,董小鹏等^[17]设计了一种基于波分复用技术的多防区周界安防系统,每个防区用不同中心波长的 FBG 作为反射装置,该系统可在多防区同时、独立地监测入侵事件。2015年,贺锋涛等^[18]利用多模光纤设计了一套基于激光散斑的应力传感系统,该系统可通过散斑图像的变化来实现应力传感,从而判断入侵事件是否发生。但是该系统结构复杂、响应速度较慢,在实际应用中具有一定的局限性。2016年,郑潜等^[19]设计了一种地波微振动传感器,该设备在有效半径为 25 m 的监控区域内能够有效地甄别车辆信号和挖掘信号。但是该设备结构较为复杂,成本高,在实际中的应用具有一定的局限性。

本文将单模-多模-单模(SMS)光纤结构运用于光纤安防系统中,以多模光纤(MMF)为传感光纤,当振动事件作用于多模光纤时,光纤中不同模式间的相位发生变化,输出端发生模间干涉现象,从而对入侵事件做出判断。实验证明该系统可以有效地探测振动入侵信号。这种系统由于结构简单,成本低廉,在光纤安防领域中有着较为重要意义。

2 理论分析

SMS 光纤结构如图 1 所示,光源发出的光束先经过一段单模光纤(SMF)传输,当光束从单模光纤进入多模光纤中时,将会在多模光纤中激发出多个模式的光束,多模光纤中传输的各个模式的光束在多模光纤与单模光纤的熔接处发生模式耦合而形成干涉效应。当外界扰动作用于光纤上时,这些模式之间的相位差会发生变化,输出光束中携带着这些扰动信号,通过后期的解调便可以从单模光纤输出的干涉信号中获取所需的信号。

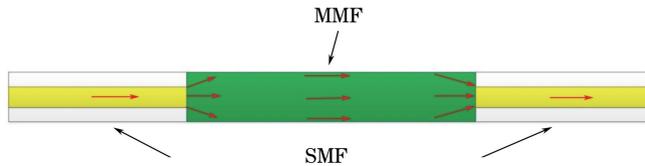


图 1 SMS 光纤结构示意图

Fig. 1 Schematic of the SMS optical fiber structure

光束从单模进入多模光纤时,会激发出多个 LP_{0m} 模式。假定输入端光场分布为 $E(r, 0)$ 、 LP_{0m} 模的光场分布为 $E_m(r)$,在不考虑多模光纤中的少量辐射时,可得^[20]

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^M c_m E_m(r), \quad (1)$$

式中: c_m 为模式的激励系数,它可以用 $E(r, 0)$ 和 $E_m(r)$ 的积分形式表示为

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r, 0) E_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} E_m(r) E_m(r) r dr}. \quad (2)$$

在多模光纤中,被激励起的 LP_{0m} 模式数为 $M \approx V/\pi$, 其中,

$$V = (2\pi/\lambda) \times a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}, \quad (3)$$

式中: λ 为空气中自由空间光波长; a 为多模光纤的纤芯直径; n_{co} 、 n_{cl} 分别为纤芯模和包层模的折射率。光束在多模光纤中传输距离为 z 时的场分布可表示为

$$E(r, z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z), \quad (4)$$

式中: β_m 为光纤本征模的传播常数。

在多模光纤与单模光纤的熔接处,多模光纤中传导的基模及激发出的各种高阶模式在此处发生干涉。以光纤中的基模作为参考模式,第 m 阶高阶模的场分布为 $E_m(r, z)$,基模与高阶模之间的相对相位差可记为 $\Delta\varphi_m$,取基模的相位 $\varphi_0 = 0$ 。若多模光纤中被激励起的高阶模有 M 个,则在多模-单模熔接处输出端面区域检测到的干涉光功率可以表示为^[21]

$$P = \iint_s \left| \sum_{m=0}^M \mathbf{E}_m(r, z) \exp(i\Delta\varphi_m) \right|^2 ds = \sum_{m=0}^M \iint_s |\mathbf{E}_m|^2 ds + 2 \sum_{m=0}^M \sum_{n=m+1}^M \iint_s [\mathbf{E}_m \mathbf{E}_n \cdot \cos(\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_n)]. \quad (5)$$

在只考虑一阶高阶模的情况下,(5)式可以近似为

$$P = \sum_{m=0}^1 \iint_s |\mathbf{E}_m|^2 ds + 2 \iint_s \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_1 ds \cos(\Delta\varphi_1) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi_1), \quad (6)$$

式中: I_1 、 I_2 分别表示基模和一阶高阶模的光强;两光束之间的相位差 $\Delta\varphi_1$,在此处可以表示为

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi(n_{co} - n_{cl})}{\lambda}L, \quad (7)$$

式中: L 为传感光纤的长度。

当光纤上发生扰动时,光纤产生微弯形变。对于多模光纤,振动会使得光纤中传播模式的相位发生变化,从而引起光纤中各个干涉模式之间的相位差发生变化,不同模式之间的光束在多模-单模熔接处发生模间干涉,这种干涉信号间接地反映了光纤受振动信号变化的频率和幅度。

当多模光纤受到外界振动时,振动信号使得光纤内的应力发生变化,进而导致两个模式之间的相位差发生变化。变化后的相位 $\Delta\varphi$ 可以表示为

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = [2\pi(n_{co} - n_{cl})L]/\lambda + \gamma \cdot F(t), \quad (8)$$

式中: γ 为与光纤材料相关的常数; $F(t)$ 为振动所引发的光纤应力变化值。将输出光功率进行放大滤波等处理后,便可得到相应的振动信号。

3 实验研究

3.1 系统结构

图2为搭建的光纤传感系统结构图。包括分布反馈式(DFB)激光光源,3 dB耦合器,SMS光纤结构,光电探测器PD1和PD2,Cyclone型现场可编程门阵列(FPGA)系列芯片及计算机系统。其中,DFB激光光源的中心波长为1550 nm,输出光功率为10 mW;

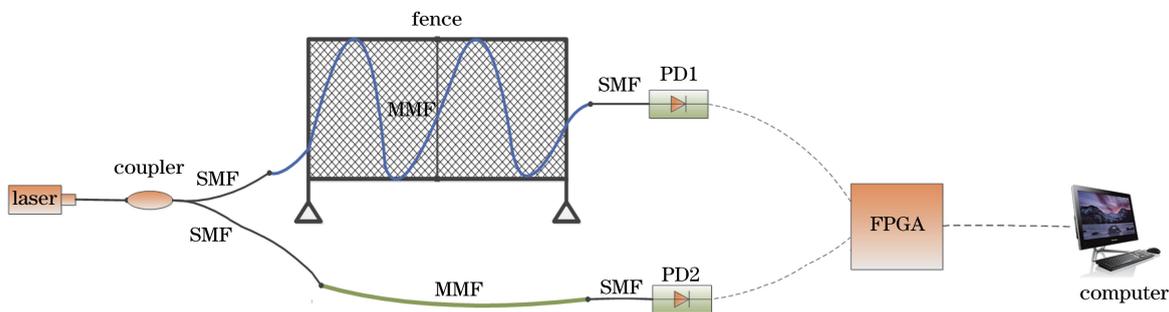


图2 系统传感原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the sensing system

3.2 系统传感测试

为了测试系统的可行性,实验获取振动信号进行分析。系统的采样频率为200 kHz,图中横坐标表示采集数据点的采样点数,即系统每秒采集200000个数据点。获取的振动干涉信号如图3所示,从图3可以看出,系统接收的原始信号可分为两部分:没有振动时的无扰动信号和有振动时的扰动信号,其中无扰动时系统接收的只有一些幅度相对

SMS光纤结构由G652单模光纤和62.5/125多模光纤构成;光电探测器PD的响应度为0.9 mA/mW。光路中的损耗主要包括:光源与3 dB耦合器之间的插入损耗为0.2 dB,3 dB耦合器输出端插入损耗分别为0.2 dB和0.23 dB,耦合器的附加损耗为0.05 dB;SMS光纤结构采用南京吉隆KL-510型光纤熔接机进行熔接,两路SMS光纤结构的熔接损耗分别为0.02 dB、0.05 dB及0.03 dB、0.03 dB;最后单模光纤和PD1、PD2处的插入损耗为0.21 dB和0.24 dB。两部分传感光纤分别固定于围栏、铺设在地面上,构成两个不同防区,并且在实验中这两部分的多模光纤长度均为10 m,系统中两部分传感光纤在不同防区内相互独立,互不干扰。

将传感光纤放置于工作环境中。激光器发出的光经过3 dB耦合器后分别进入两个不同防区。当有外界振动事件作用于安防区域时,振动信号会使得光纤结构发生一定的变化,进而导致光纤中传播模式的相位发生变化,而在多模-单模光纤熔接处发生干涉,引起干涉信号的变化。携带振动信息的光信号经过PD转化为电信号后传入FPGA模块中,在FPGA模块中两个通道同时对信号进行信号放大和模数(AD)转换处理,然后再将采集处理后的信号以data数据形式通过USB接口传输至计算机,计算机所采集到的信号经过MATLAB软件进行小波变换处理,通过对处理后的信号进行分析便可得出外界振动信号的变化情况。

较弱且较为平稳的噪声信号;而当有振动事件作用于多模光纤上时,系统接收到的信号为振动所引发的干涉信号,且振动信号的波动非常迅速,具有较大的幅度。对于系统识别振动信号来说,无外界扰动作用时的信号为无用信号,而有振动作用时的扰动信号包含大量入侵信息,为需要提取的有用部分。同时,原始信号中包含大量噪声,不便于后期处理和分析。所以,需要对原始信号进行降噪处理,以获取

便于分析的有效信号。

为此,通过 Sym 小波对原始信号进行降噪处理, Sym 小波具有很好的对称性,适合对含噪信号进行处理。对于实验中获取的信号,通过大量实验发现,使用 Sym11 有着较好的效果。利用 MATLAB 对原始信号进行 Sym 小波处理,提取低频信号,获的图 4 所示的降噪信号。通过处理后的信号可以看出,小波变换能够很好地对信号滤波,并且经过小波变换处理后的信号没有失真,可以满足后续对信号的处理及分析。

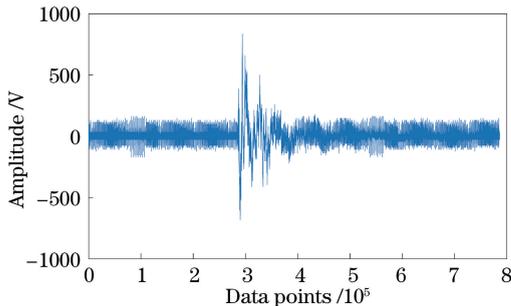


图 3 外界扰动时系统干涉信号

Fig. 3 System interference signal under external disturbance

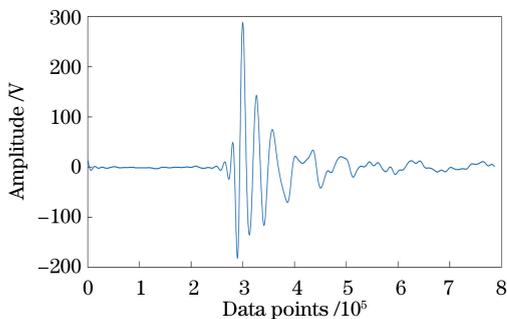


图 4 小波变换处理后的干涉信号

Fig. 4 Interference signal after wavelet transform

3.3 入侵事件测试

为了进一步测试系统的性能,分别对固定于围栏和铺设在地面上的两部分传感光纤进行入侵事件测试。

对于围栏周界安防部分,将传感光纤通过扎带固定于 1.2 m 高的电焊网围栏上。当振动事件作用于围栏上时,会带动传感光纤发生振动,使得系统接收到干涉信号。图 5 为利用工具敲击围栏时,系统接收到的干涉信号。由图可以看出,当敲击围栏时系统接收到的干涉信号强度瞬间变大,但是持续时间相对较短,敲击过后干涉波形会逐渐趋于平静。

而当人为摇晃围栏时,系统接收到如图 6 所示的干涉信号。可以看出,摇晃围栏时干涉信号幅度

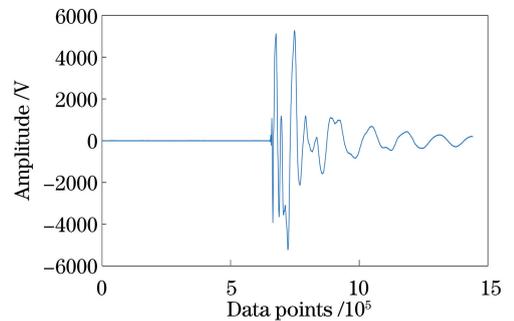


图 5 敲击围栏干涉信号

Fig. 5 Interference signal after knocking fence

在短时间内逐渐增强,并且摇晃信号的持续的时间相对较长。

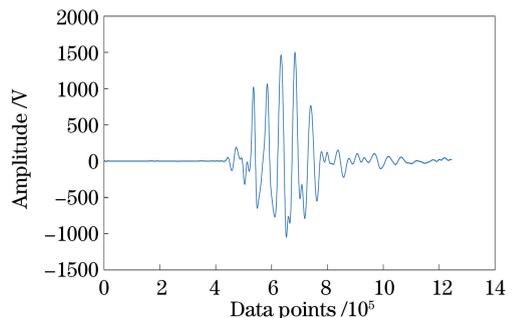


图 6 摇晃围栏干涉信号

Fig. 6 Interference signal after waggling fence

通过对比图 5、图 6 可以看出,在围栏系统中,敲击信号的持续时间较短、能量较为集中,系统探测到的瞬时能量值较大;而摇晃信号相对于敲击信号有着较长的持续时间,并且其干涉波形强度变化相对于敲击时有一定的缓变过程。所以,对围栏系统来说,根据接收到干涉信号幅度便可以判断是否有扰动的发生,同时在结合振动信号所持续的时间长短便可判断是否有入侵事件发生。

对于地面铺设部分,将传感光纤以蛇形方式铺设在地面,这样可以更大限度地扩大安防区域,并且能够确保入侵者进入安防区域时能够踩到传感光纤。当有人入侵防护区域时,传感光纤发生振动,使得系统接收到干涉信号。当一个体重 55 kg 的成年人单脚踩踏传感光纤时,系统接收到如图 7 所示的干涉信号。由图 7 可以看出,当有人踩踏光纤时,光纤受到的压力会突然变大,系统可以迅速地探测到干涉信号,当人不在有后续行动时信号又会归于平静。

同样的,当人行走进入安防区域时,系统所接收到的干涉信号如图 8 所示。通过图 8 可以看出,当人走进安防区域时,系统会连续地探测到振动信号。对比行走信号和踩踏光纤所产生的干涉信号可以看

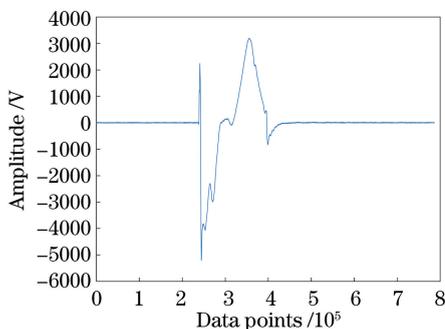


图7 踩踏光纤时的干涉信号

Fig. 7 Interference signal after treading optical fiber

出,行走时接收到的信号之间有一定时间间隔,这在一定程度上可以反映出人行走时两脚踩踏光纤的时间差,即能够在一定程度上反映出有人为入侵进入安防区域。

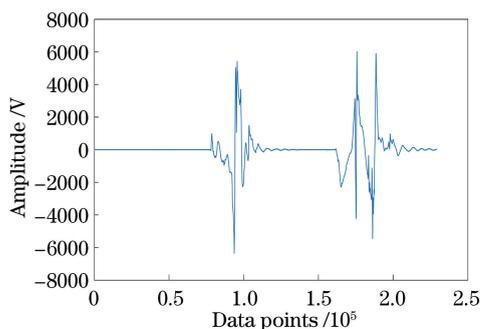


图8 行走时的干涉信号

Fig. 8 Interference signal after walking

通过以上分析可知,在安防系统中,通过设置合适的阈值便可对入侵事件进行有效的预警。同时,将围栏系统和地面铺设系统相结合可以构成一个相对完善的安防系统。当有入侵事件发生时,系统可以很容易地探测到干涉信号,通过对干涉信号的判断便可以大致判断是否有入侵事件发生。

4 结 论

基于多模光纤的模间干涉原理,将单模-多模-单模光纤结构运用于光纤安防系统中。以多模光纤作为传感光纤,当有振动应力作用于传感光纤时,其相位发生变化,进而发生模间干涉现象,在输出端的单模光纤中输出干涉信号,后经过小波变化处理便可以对入侵事件做出判断。实验结果表明:该结构的传感器能够有效地感知振动入侵信号。同时,分别将两路传感光纤置于围栏和铺设于地面,对敲击、摇晃、踩踏以及行走4种入侵事件进行实验分析,实验验证了该传感器在安防系统中的可行性。这种结构的光纤传感系统具有结构简单、成本低廉、灵敏度

高等优点,在光纤周界安防等领域具有较为广阔的应用前景。对于多事件同时发生的情形,该系统可以通过频谱特征进行识别,但实际中还存在误报等问题,后续会深入研究。

参 考 文 献

- [1] Liu K, He C, Liu T G, *et al.* An endpoint detection method for fiber perimeter security system [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(11): 2136-2140.
刘琨, 何畅, 刘铁根, 等. 一种用于光纤周界安防系统的端点检测方法 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25(11): 2136-2140.
- [2] Huang Y, Wang Q, Yang Q H, *et al.* Experimental analysis of distributed fiber optic underwater natural gas pipeline leakage detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110602.
黄悦, 王强, 杨其华, 等. 水下天然气管道分布式光纤泄漏检测系统实验分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110602.
- [3] Qu H, Zheng T, Bi F, *et al.* Vibration detection method for optical fibre pre-warning system [J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(6): 692-698.
- [4] Ren Z J, Cui K, Li J X, *et al.* Michelson-interferometer-based all-fiber optical perimeter security system by utilizing binary rectangular pulse phase modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1206004.
任仲杰, 崔珂, 李建欣, 等. 基于二元矩形脉冲相位调制的迈克尔逊干涉型全光纤周界安防系统 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1206004.
- [5] Lin Z H, Li C F, Liu J C. Optical fiber sensing technology and its application in military [J]. *Optical Communication Technology*, 2011, 35(7): 4-6.
林之华, 李朝锋, 刘甲春. 光纤传感技术及其军事应用 [J]. *光通信技术*, 2011, 35(7): 4-6.
- [6] Zhang C, Wang L X, Lin B, *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.
- [7] Pang X R, Wang D P. Oblique crack monitoring of concrete beam with macro FBG strain sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120603.
庞香润, 王大鹏. FBG宏应变传感器的混凝土梁斜

- 裂缝监测[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120603.
- [8] Leng J C, Liu Y, Zhou G Q, *et al.* Pipeline stress monitoring method based on fiber bragg grating sensors[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(1): 70-74.
冷建成, 刘扬, 周国强, 等. 基于光纤光栅传感的管道应力监测方法研究[J]. 压力容器, 2013, 30(1): 70-74.
- [9] Zhang Z L, Chen X J, Ye B, *et al.* Analysis of crosstalk in fiber grating sensor array caused by fiber-end reflection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120604.
张自丽, 陈小军, 叶博, 等. 端面反射引起的光纤光栅传感阵列的串扰分析[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120604.
- [10] Yang B, Gao W, Xi G, *et al.* Located super remote full optical fiber boundary safety guarding system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(5): 050603.
杨斌, 皋魏, 席刚, 等. 定位型超远程全光纤周界安防系统[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 050603.
- [11] Zhu C H, Wang J P, Li Q Y, *et al.* Recognition and localization of intrusion vibration signal based on time-frequency characteristics in optical fiber perimeter security [J]. Chinese Journal of 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.
- [12] Liu K, Chai T J, Liu T G, *et al.* Multi-area optical perimeter security system with quick invasion judgement 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.
- [13] 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.
- [14] Dong Z L, Feng G Y, Hu L L, *et al.* Measure the complex amplitude of laser mode by Mach-Zehnder point diffraction interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708008.
董哲良, 冯国英, 胡丽荔, 等. 基于马赫-曾德尔点衍射干涉仪的激光模式复振幅测量[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708008.
- [15] Hu Z X, Zhang G L, He J, *et al.* Leak detection on gas pipeline with the distributed fiber-optic sensing technology[J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(10): 48-49.
胡志新, 张桂莲, 何巨, 等. 利用分布式光纤传感技术检测天然气管道泄漏[J]. 传感器技术, 2003, 22(10): 48-49.
- [16] Chen W M, Wu J, Tan J, *et al.* Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2128-2132.
陈伟民, 吴俊, 谭靖, 等. 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2128-2132.
- [17] Dong X P, Zheng J D. Multi-area perimeter sensing system based on optical fiber wavelength division multiplexing technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0905007.
董小鹏, 郑俊达. 基于波分复用的光纤多防区周界传感系统[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905007.
- [18] He F T, Cao J F, Wang X L, *et al.* Stress sensing system based on laser speckle[J]. Infrared & Laser Engineering, 2015, 44(12): 3729-3733.
贺锋涛, 曹金凤, 王晓琳, 等. 基于激光散斑的应力传感系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3729-3733.
- [19] Zheng Q, Liu H. Designs and implementation of the underground motion wave detection perimeter security equipment based on optical fiber sensing[J]. Study on Optical Communications, 2016(4): 45-48.
郑潜, 刘海. 光纤地波周界安防设备设计与实现[J]. 光通信研究, 2016(4): 45-48.
- [20] Ren N K. Characteristic studies of sensing and demodulation based on MMF modal interference[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
任乃奎. 基于多模光纤模间干涉的传感与解调特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [21] Li Q, Huang Z J, Xu Y Q, *et al.* Optical fiber sensing system based on multimode interference of single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. Infrared & Laser Engineering, 2014, 43(5): 1630-1636.
李强, 黄泽铤, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的传感系统[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1630-1636.