

基于迈克耳孙干涉和模式识别的全光纤周界安防系统

杨江¹ 赵健¹ 杨春妮² 赵春柳¹

(¹ 中国计量学院光电技术研究所, 浙江 杭州 310018; ² 国家工程机械质量监督检验中心, 北京 102100)

摘要 基于光纤迈克耳孙干涉仪和神经网络模式识别算法, 设计并实现了一种新的防区型全光纤周界安防系统。采用偏振不敏感光纤迈克耳孙干涉仪作为周界入侵探测系统(PIDS)的振动传感器, 降低了双折射效应导致的信号衰落, 分析了传感光纤与物理围栏宿主材料间的应力应变关系对干涉信号相位变化的影响, 并使用穿越统计(LC)和模式识别(PR)技术实现噪声抑制、行为分析和报警判决。实验证明, 系统可以对入侵和干扰行为的原始干涉信号进行 LC 分析和特征提取, 最小响应时间为 0.5 s, 通过神经网络训练生成行为模式, 并可通过动态均值算法(DMA)有效抑制雨致噪声和其他环境噪声。实现了低成本、高可靠性和高实用性的全光纤周界安防系统。

关键词 光纤光学; 光纤干涉仪; 周界安防; 穿越统计; 模式识别; 噪声抑制

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1105005

All-Fiber Perimeter Security System Based on Michelson Interferometer and Pattern Recognition

Yang Jiang¹ Zhao Jian¹ Yang Chunni² Zhao Chunliu¹

(¹ Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)
(² China National Construction Machinery Quality Supervision Testing Center, Beijing 102100, China)

Abstract A new multi-area perimeter security system based on optical fiber Michelson interferometer and pattern recognition technique is proposed and demonstrated. The polarization-insensitive optical fiber Michelson interferometer is used as the vibration sensor for perimeter intrusion detection system (PIDS) which reduces the polarization-induced fading. Strain measurement of fiber bonding on host material is analyzed. Noise suppression, behavior analysis and alarm judgement are realized by using level crossing (LC) method and pattern recognition (PR) technique. The experiment results show that the system is able to analyze the original signal with LC method and extract the feature values with response time less than 0.5 s. Behavior pattern is generated through neural network training. Rain-induced noise and other environmental noise are eliminated by dynamic means algorithm (DMA). So the all-fiber perimeter security system with low cost, high reliability and high practicability is realized.

Key words fiber optics; optical fiber interferometer; perimeter security; level crossing; pattern recognition; noise suppression

OCIS codes 060.2370; 120.3180; 120.7280; 120.5060

1 引言

自 1995 年, I. R. Hawkes 和 Griffiths 首次提出将光纤传感用于扰动探测已有近 20 年^[1]。随着光纤振动传感和人工智能的发展, 全光纤周界安防系统作为新型周界入侵探测技术, 在基础设施、军工基地、能源场所和金融中心等领域的周界安防体系中, 发挥着

重要作用^[2]。目前已经报道的模型, 大多使用干涉仪检测振动导致的相位变化, 其中 Sagnac、Mach-Zehnder(MZ)和迈克耳孙干涉仪被广泛用作传感器的核心结构^[3]。在基于干涉仪结构的传感器中, 通常使用双干涉仪对振动进行定位^[4], 比如 Sagnac-Sagnac、Sagnac-MZ、Sagnac-Michelson、MZ-MZ 等。另

收稿日期: 2014-04-22; **收到修改稿日期:** 2014-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61108058)、浙江省国际科技合作专项项目(2013C24018)

作者简介: 杨江(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: reymoo@hotmail.com

导师简介: 赵春柳(1973—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感、光纤通信器件和光子晶体光纤等方面的研究。E-mail: zhchunliu@hotmail.com (通信联系人)

外,基于相干光时域反射仪(COTDR)^[5]和偏振光时域反射仪(POTDR)以及布里渊(Brillouin)散射技术的传感器,在振动探测领域也具有广阔的发展前景。

基于 Sagnac 干涉仪的传感器,位置分辨率依赖于振动信号的频率,较难做到商业化。MZ-MZ 结构是使用较为广泛的技术,并且涌现出很多基于此结构的商业产品,然而 MZ 输出信号不仅与振动有关,还受参考信号与传感信号的偏振态影响^[6],通常加入偏振控制器(PC)来抑制光纤双折射效应导致的 MZ 信号变化,但在产品化过程中,如何设计高速响应 PC,是双 MZ 结构的主要问题。偏振光时域反射仪对激光器低频率漂移与超窄线宽的要求,也限制了该结构传感器的应用^[7-8]。

在长距离周界的光纤干涉臂中,要克服由环境温度和其他因素引起的偏振、随机相位漂移,使得系统的整体结构复杂,硬件成本不菲,且前端的信号处理、噪声抑制都需要额外的资源^[9],对于复杂的行为模式,亟需高级算法从时域、频域或者相关分析等底层数据中提取特征,实现行为分析和报警判决。本文针对以上问题,提出了一种基于迈克耳孙干涉和模式识别的防区型全光纤周界安防系统,采用基于法拉第旋转镜(FRM)的光纤迈克耳孙干涉仪,有效解决了偏振衰落和双折射效应引起的信号畸变,利用穿越统计(LC)分析和模式识别(PR)技术实现噪声抑制、行为分析和报警判决。实验证明,系统能够对单个或复合行为进行分析和特征提取,并从噪声环境中识别出有效信号。

2 工作原理

2.1 振动干涉信号的相位特性

在传统低双折射的干涉型光纤传感器中,干涉臂偏振态随机波动直接导致输出条纹对比度的变化,并且使干涉信号强度降低。这种偏振诱导衰落现象是直接制约干涉型光纤传感器实用化的重要因素。Kersey 等^[10]提出使用 FRM 抑制双折射效应带来的信号漂移,在参考臂与传感臂末端使用 45° 法拉第旋转镜,入射光波通过法拉第旋转镜的反射作用,偏振态发生 90° 旋转,前向传输路径与反向传输路径中双折射效应发生抵消,由此导致的偏振衰落现象得以有效抑制。因此,使用基于 FRM 的光纤迈克耳孙干涉仪,无论是参考臂还是传感臂,由光纤材料特性和外界环境引起的双折射效应变化,都能够有效得以抑制。

振动信号受宿主材料(比如围栏、墙体或土壤层

等)应变传递的影响,光电二极管(PIN-PD)信号强度为

$$I = (E_1 + E_2)^2 = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi), \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 是传感臂中信号光波的强度, $\Delta\varphi$ 是两者相位差。根据光纤应变理论,忽略温度变化对光纤的影响,应变引起的相位差是

$$\Delta\varphi = n \frac{2\pi L}{\lambda} \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 [(1-\nu)P_{12} - \nu P_{11}] \right\} \epsilon_3, \quad (2)$$

式中 $\epsilon_3 = \Delta L/L$, L 是振动长度, ΔL 是轴向形变, n 是有效折射率, λ 是入射波长, P_{11} 、 P_{12} 是普克尔(Pockel)常数, ν 是泊松比。将(1)、(2)式结合得相位变化 $\Delta\varphi$ 与应变 ϵ_3 成正比,从(1)式中计算出 $\Delta\varphi$,从中分析环境对宿主介质的力学作用^[11]。

2.2 穿越统计特征分析与模式识别

由于宿主材料的力学特性决定信号的频率范围在低频段(小于 10 kHz),采用时域分析在硬件资源、动态响应和计算复杂度等都具有独特优势。采用的 LC 算法,能够形成探测与分类误报的依据,并鉴别同时发生的入侵与误报事件。一般地,LC 定义为通过给定阈值的一系列正向穿越点,即

$$D_{LC} = \sum_{n=1}^{N-1} f\{[x(n) \geq x_{\text{thresh}}] \& [x(n-1) < x_{\text{thresh}}]\}, \quad (3)$$

式中 x 是长度为 N 的信号, x_{thresh} 是水平阈值,指示函数 f 当表达式为真时等于 1,反之则为 0。如图 1 所示,干涉信号在扰动行为的触发下发生振荡与波动,横轴为采样时间,纵轴为光电探测器(PD)电压信号,噪声限阈值是(3)式中的 x_{thresh} 值,数据块为单个 LC 统计的最小周期,当干涉信号发生一次正向穿越即电压 V 大于 x_{thresh} 时,该数模块中的 LC 计数增加。因此,根据(3)式可提取到指定时间周期内的 D_{LC} 最小值、最大值、平均值、标准偏差和累加值等。这些特征的任意组合可以用来决定特定干扰事件的

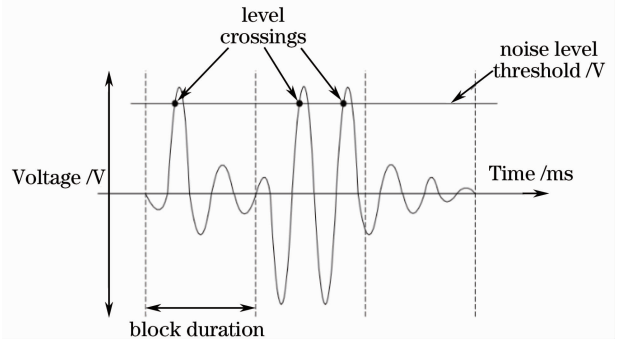


图 1 LC 统计的基本参数

Fig. 1 Basic parameters used in LC method

固定阈值,对于外界环境的动态变化以及噪声信号的叠加,将根据 x_{thresh} 值动态调整提取 LC 数据,假设环境中同时存在暴雨和入侵行为时,振动信号幅值为两种信号叠加,通过调整 x_{thresh} 至暴雨信号水平,可提取入侵行为的 LC 数据,即自适应阈值——动态均值算法过滤干扰行为。

基于 LC 分析的模式识别算法是对 LC 特征值进行数据加工,采用神经网络算法得到高级特征值,通过采集的样本生成行为模式,与模式库进行匹配,另外还加入自学习功能生成模式数据库。算法主要模块和工作流程如图 2 所示。数据采集获得原始干

涉信号作 LC 分析,动态均值算法将前一段时间 t 内的 LC 数据求平均值,以此过滤 LC 数据中的背景噪声,信号分割将 LC 分布进行窗口分割,特征提取将单个行为包含的若干窗口 LC 分布的特征值,比如均值、均方差、主峰值、次峰值和穿越次数等进行统计提取,神经网络训练将模型库特征与提取的特征进行拟合运算,对本次样本进行归类或者建立新模型,数据预测将后续采集数据与模型库对比,若匹配成功则进入现场验证,反之进入自学习循环,若现场验证符合预测,输出报警状态并联动报警设备,反之再次进入自学习循环。

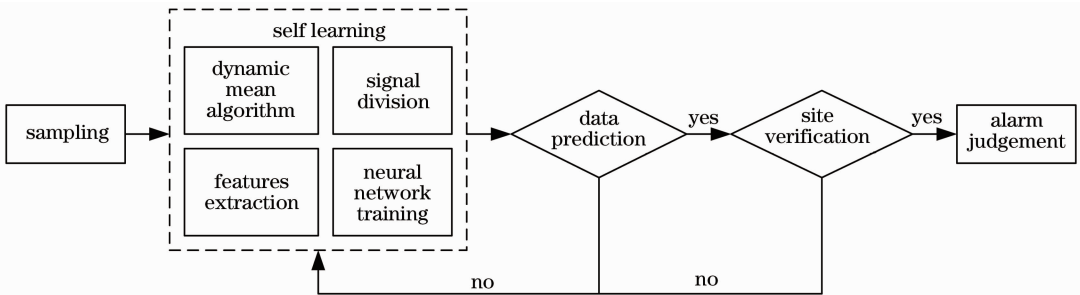


图 2 基于 LC 统计的模式识别算法

Fig. 2 Pattern recognition algorithm based on LC method

3 实验结果与讨论

如图 3 所示,实验采用 TI TMS320F28335 数字信号处理器(DSP)作为控制核心,实现数据通信、人机交互、逻辑控制和模式识别;采用 Altera Cyclone II 240 kb 现场可编程门阵列(FPGA),作为预处理单元,完成穿越统计;使用蝶形分布式反馈激光器(DFB-LD)作为窄线宽相干激光器,中心波长为 1550 nm;使用光电二极管作为光电探测单元,响应度为 1 mA/mW。干涉信号经 PD、电流-电压(I-V)转换电

路、带通滤波电路(BPF)和隔离放大电路(AMP)进入 FPGA 完成预处理,使用 NI 公司的数据采集卡和 LabVIEW 数据采集器(DAQ)进行数据采集。设置采样频率为 10 kHz,数据块为 100 点,单个样本包含 20 个数模块,LC 统计的最低样本数量为 2,经 DSP 运算和处理,输出报警状态的最小响应时间为 0.5 s。系统按照 16 防区配置,负载(LD)最高输出功率为 10 mW,PD 最小响应光强为 0.1 mW,单防区最大长度为 1.5 km。

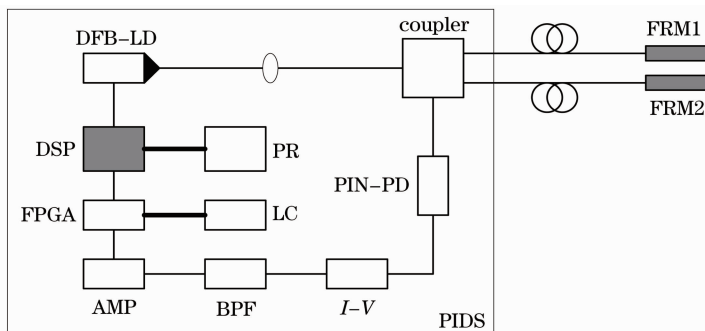


图 3 系统架构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of system architecture

3.1 攀爬和敲击行为的 LC 分析

实验中,将传感光纤敷设在室外高度为 1.5 m 的围网上,光纤呈 U 形排列且窗格宽度为 300 mm,

高度为 500 mm,系统采样频率为 10 kHz,带通滤波器频率范围是 5~20 kHz。实验人员攀爬围网时,干涉信号如图 4 所示。在 0~0.5 s 时,系统处于静

默状态,外界环境无扰动,只有系统内部的电路噪声和光纤折射率的随机蠕变;0.5 s时,开始攀爬,2.2 s时,身体落地离开围网。另一组实验人员敲击围网,干涉信号如图5所示。在0~0.3 s时,系统处于静默状态,外界环境无扰动;0.3 s时,开始敲击,每次敲击间隔0.7 s,3 s内共敲击4次。

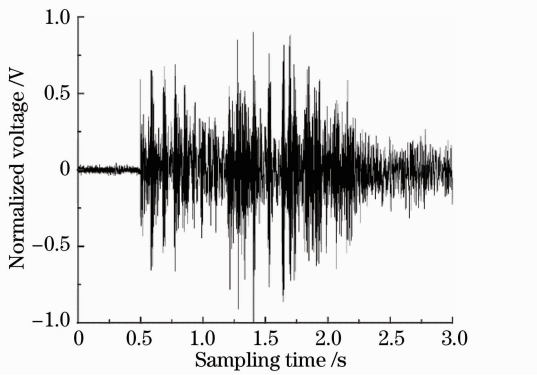


图4 攀爬行为的原始干涉信号

Fig. 4 Climbing behavior's original interference signal

对干涉信号进行LC分析,由于两组实验都是在稳定的室外环境中进行,没有风雨和其他干扰行为,动态均值算法的初始均值设为0,对原始干涉信号波形不作变换;信号分割窗口均设为0.5 ms,分别得到攀爬行为的LC分布和敲击行为的LC分布,如图6和7所示。

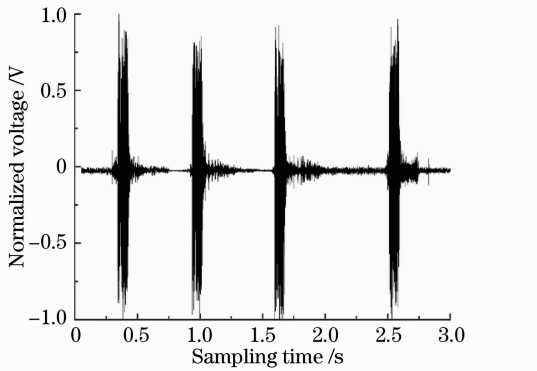


图5 敲击行为的原始干涉信号

Fig. 5 Knocking behavior's original interference signal

对攀爬和敲击行为的LC分布进行特征提取,结果如表1所示,信号面积是单个行为LC分布的时域积分,上升穿越最大时间是单个行为LC穿越的最大时间,LC穿越比例是原始干涉信号中,满足LC穿越的信号比例,周期是单次行为的持续时间,平均值是整个采样时间的LC平均值。由表1可以看出,攀爬和敲击行为的信号面积特征较接近,偏差约为6%,其余偏差均为20%以上,后续采用神经网络训练输出对应行为的模式特征,并添加至模式数

据库,作为数据预测的依据。

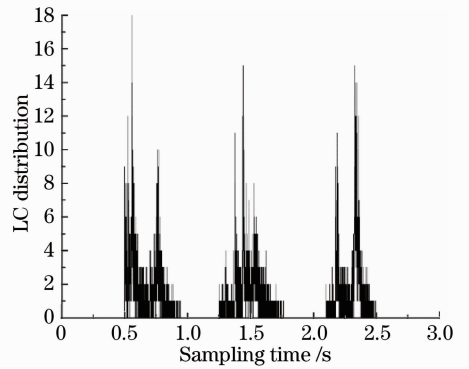


图6 攀爬行为干涉信号的LC统计分布

Fig. 6 LC distribution diagram of climbing behavior's interference signal

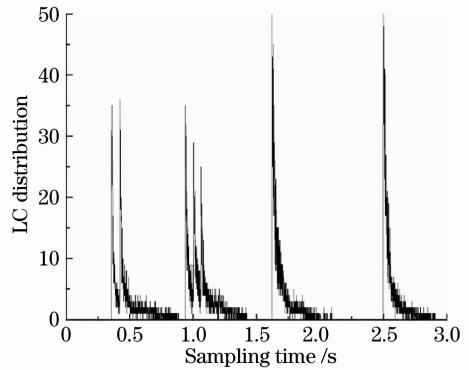


图7 敲击行为干涉信号的LC统计分布

Fig. 7 LC distribution diagram of knocking behavior's interference signal

表1 攀爬和敲击行为的LC特征值比较

Table 1 Comparison of LC features between climbing and knocking behavior

Behavior type	Climb	Knock
Signal area	3440	3220
Max duration of LC crossing /ms	11	4
Ratio of LC crossing /%	5.5	4
Duration /ms	780	312
Average value /ms	5.23	7.82

3.2 风雨环境入侵行为的特征提取

实验中,使用一大面积工业风扇作为风雨干扰的模拟源,覆盖区域约为1.5 m×1.5 m。敲击围网,传感光纤在响应干扰源作受迫振动的同时,也会响应其他干扰或入侵行为,产生新的振动模式并与之前的特征叠加,风雨干扰作为一种持续时间长、强度分布均匀的干扰行为,可以通过计算其LC均值作为动态均值算法(DMA)的抑制参数,过滤风雨干扰信号,使得攀爬或敲击等行为的LC特征得以有效提取。图8为信号中包含模拟风雨噪声信号和敲

击信号,但在时域分布中无法有效识别,应用动态均值算法作为阈值可以将风雨干扰信号的 LC 特征进行抑制,如图 9 所示,可以明显识别发生在 1.75~1.85 s 的敲击行为,对干涉信号的 LC 分布进行特征提取,结果如表 2 所示。

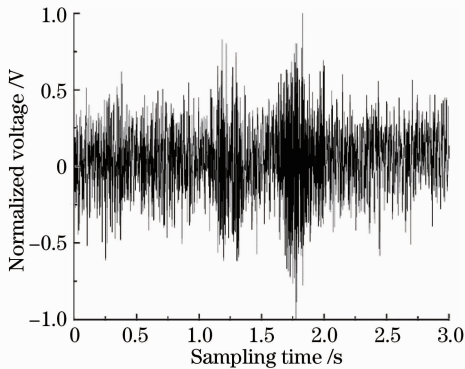


图 8 模拟风雨环境中敲击行为的原始干涉信号

Fig. 8 Knocking behavior's original interference signal in simulation wind and rain environment

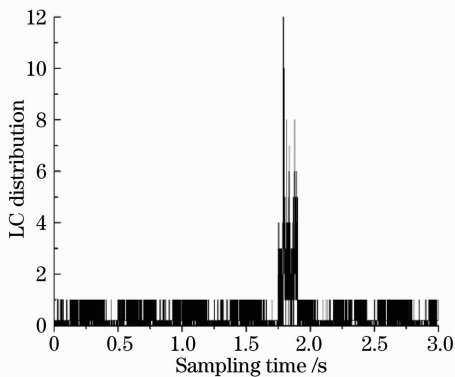


图 9 模拟风雨环境中敲击行为干涉信号的 LC 统计分布
Fig. 9 LC Distribution diagram of knocking behavior's interference signal in simulation wind and rain environment

表 2 模拟风雨环境中敲击行为的 LC 特征值

Table 2 Knocking behavior's LC features in simulation wind and rain environment

Behavior type	Knock under wind
Signal area	2425
Max duration of LC crossing /ms	5
Ratio of LC crossing /%	5
Duration /ms	64
Average value	2.46

4 结 论

基于迈克耳孙干涉和模式识别的全光纤周界安防系统,可以根据使用要求扩展防区的数量和长度,引入时域分析和模式识别进行入侵行为分析,并输

出报警状态。实验证明,系统能够识别入侵行为和干扰行为的信号特征并作为判决,对于噪声环境中的有效信号提取也能通过动态阈值算法实现。误报率高的问题仍然制约该技术的产业化,未来研究应着眼于系统内部的噪声抑制和灵敏度反馈控制,同时在信号处理与模式分析中,引入更具稳健性的智能算法,比如神经网络、小波分析等,但同时也会增加产品的硬件成本和开发难度,如何提高产品灵敏度并且降低产品误报率,将是未来该技术的主要难题。

参 考 文 献

- 1 M Szustakowski, W Ciurapinski, N Palka, *et al.*. Recent development of fiber optic sensors for perimeter security[C]. Security Technology, 2001 IEEE 35th International Carnahan Conference on, 2001. 142-148.
- 2 Dong Xiaopeng, Zheng Junda. Multi-area perimeter sensing system based on optical fiber wavelength division multiplexing technology[J]. Chinese J 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.
- 3 Kuang Wu, Zhang Min, Wang Liwei, *et al.*. Data acquisition method for digital phase generated carrier demodulation system of optical fiber interferometers[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1086-1090. 匡武,张敏,王利威,等. 光纤干涉仪数字相位生成载波解调系统数据采集单元设计[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1086-1090.
- 4 Sun Zhifeng, Liu Deming, Liu Hairong, *et al.*. Distributed fiber vibration sensing network perimeter [J]. Study on Optical Communications, 2010, 36(4): 23-24. 孙志峰,刘德明,刘海荣,等. 分布式光纤振动传感网络周界[J]. 光通信研究, 2010, 36(4): 23-24.
- 5 Lu Yuelan, Zhu Tao, Chen Liang, *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(22): 3243-3249.
- 6 A D Kersey, M J Marrone, A Dandridge, *et al.*. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control[J]. J Lightwave Technol, 1988, 6(10): 1599-1609.
- 7 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.
- 8 Yang Bin, Gao Wei, Xi Gang, *et al.*. Located super remote full optical fiber boundary safety guarding system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 50(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, 50(5): 050603.
- 9 Peng Long, Zou Qilin, Zhang Min, *et al.*. Developments in and applications of fiber perimeter detection sensors [J]. Laser Journal, 2007, 28(4): 1-3. 彭龙,邹琪琳,张敏,等. 光纤周界探测技术原理及研究现状[J]. 激光杂志, 2007, 28(4): 1-3.
- 10 A D Kersey, M J Marrone, M A Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. Electron Lett, 1991, 27(6): 518-520.
- 11 Jiang Lihui, Yang Ruoyu. Identification technique for the intrusion of airport enclosure based on double Mach-Zehnder interferometer [J]. Journal of Computers, 2012, 7(6): 1453-1459.

栏目编辑: 王晓琰