引用本文：李香芹. 基于微弯曲光纤和光时域反射技术的实时车辆入侵检测系统[J]. 光通信技术，2025，49(6)：85-88.

基于微弯曲光纤和光时域反射技术的实时车辆入侵检测系统

李香芹
（江西科技学院 智能工程学院，南昌 330098）

摘要：为提升重要区域周界安防系统的实时检测能力并降低误报率，设计了一种基于微弯曲光纤与光时域反射技术的车辆入侵实时检测系统。该系统通过结构简化的微弯传感器感知外界压力引起的光信号衰减，结合光时域反射技术实现入侵事件的定位与识别，并采用分区阈值判断与归一化相关分析优化信号处理。实验结果表明，在700 m传感范围内，系统对质量为1 030 kg、速度为60 km/h的车辆入侵的检测成功率达99.2%，并适用于最高200 km/h的高速车辆场景，具备响应快、成本低、无需复杂算法的优势。

关键词：光纤传感；周界安防；车辆入侵；实时检测
中图分类号：TN29　**文献标志码：**A　**文章编号：**1002-5561(2025)06-0085-04
DOI：10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.016

Real-time vehicle intrusion detection system based on micro-bend optical fiber and optical time domain reflectometry technology

LI Xiangqin
（Artificial Intelligence Department of Jiangxi Institute of Technology, Nanchang 330098, China）

Abstract: To enhance the real-time detection capability and reduce the false alarm rate of the perimeter security system in key areas, a real-time vehicle intrusion detection system based on micro-bending optical fiber and optical time-domain reflectometry technology is designed. The system senses the attenuation of optical signals caused by external pressure through structurally simplified micro-bend sensors, combines optical time-domain reflectometry technology to achieve the localization and identification of intrusion events, and optimizes signal processing through partitioned threshold judgment and normalized correlation analysis. Experimental results indicate that within a 700 m sensing range, the system achieves a 99.2% detection success rate for vehicle intrusions with a mass of 1 030 kg and a speed of 60 km/h, and is suitable for high-speed vehicle scenarios up to 200 km/h, offering advantages such as fast response, low cost, and no need for complex algorithms.

Key words: fiber optic sensing, perimeter security, vehicle intrusion, real-time detection

0 引言

重要区域的周界安防系统作为第一道防线，对国家安全、公共安全及企业财产与人员保护具有关键作用。在复杂环境下实现高效周界监控，及时准确地检测与响应入侵行为，已成为安防领域的重要研究方向之一[1-3]。

在光纤传感周界安防方面，已有多种技术方案被提出。例如，朱程辉等人[4]基于双迈克尔逊干涉结构构建分布式光纤振动传感系统，在4 km范围内实现±51 m的定位精度；HONG X B等人[5]采用萨格纳克型光纤振动传感结构，并结合傅里叶变换算法，在41 km传感链路上将定位误差控制在100 m以内；WANG H等人[6]利用全相位滤波方法提取振动信号特征，平均识别率达到96.92%，显示出信号处理技术在提升识别准确率方面的潜力。

尽管上述系统在探测性能上表现良好，但其实现通常依赖复杂的光路结构与高成本器件。例如，为保障频率稳定性，系统常需使用热绝缘封装的高稳定窄线宽激光源，显著增加了成本与设计复杂度。此外，

收稿日期：2024-11-25。
基金项目：江西省教育厅科技项目(GJJ202018)资助；南昌市社会科学十四五规划项目(GL202418)资助；2024年创新创业训练计划项目(编号202410846013)资助。

作者简介：李香芹(1985—)，女，江西南昌人，硕士，副教授，主要研究方向为光电检测技术与智能车辆动力学及控制。主持省部级课题2项，发表学术论文10余篇，获实用新型专利授权10余项，发明专利2项。



为降低误报率并进行目标分类,此类系统还需引入多级滤波、模式识别等复杂信号处理流程。尽管其对环境振动极为敏感,有助于实现高灵敏度检测,但也容易因非入侵性振动引发误报。

针对现有系统在结构复杂度、成本与误报率之间难以兼顾的问题,本文提出一种基于微弯光纤和光时域反射技术的实时车辆入侵检测系统,有效区分车辆入侵与各类环境干扰,抑制虚假警报。

1 系统基本原理和传感器设计

本文提出的系统结合了光纤微弯曲效应与光时域反射技术,通过监测外界压力引起的光纤微弯曲变化来实现传感功能。当外界压力作用于传感器时,光纤会产生周期性微弯曲,从而导致光信号衰减。通过分析反射信号的时域特性,可确定外界干扰的位置。

系统结构如图1所示,主要包括光源(中心波长为1 550 nm)、脉冲发生器、光纤环形器、微弯曲光纤(传感器)、光电探测器及示波器。实验所用光纤数值孔径为0.11,纤芯折射率为1.468。采用SM908D-5.8-125光纤,其在1 550 nm波长下的衰减小于5 dB/km,散射系数约为80 dB/km。

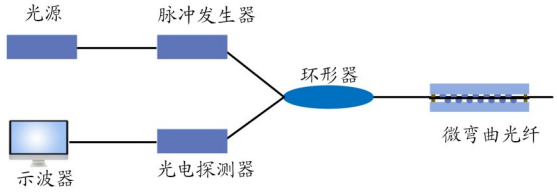


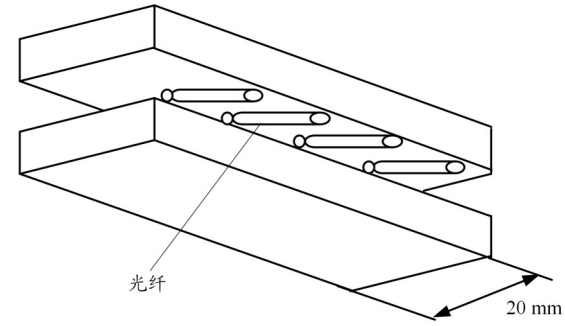
图1 实验系统结构示意图

图2为所设计的传感器结构。该传感器采用聚氨酯材料,尺寸为2 000 mm(长)×20 mm(宽)×2.25 mm(厚),机械周期为2 mm。传感器上下两端设有弹性介质,以缓冲外力,防止光纤受损,并可根据检测车辆质量进行调节。实验验证表明,该结构在承受汽车等重载时仍能保持光纤完好。此外,传感器表面采用橡胶涂层保护,避免灰尘积聚并延长使用寿命。

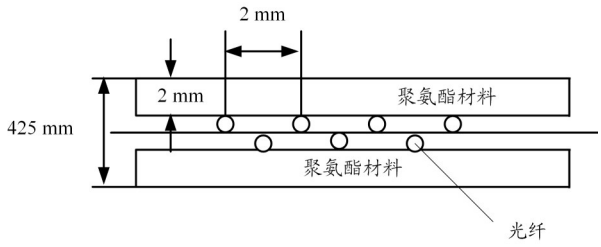
光纤微弯曲损耗主要由导模耦合至辐射模引起。在阶跃折射率光纤中,相邻模式的波数差可表示为

$$K_{m+1}-K_m=\frac{2\sqrt{\Delta}}{r_c}\frac{m}{M}=\pm\frac{2\pi}{\Lambda} \tag{1}$$

其中,$\Delta=(n_c-n_{cl})/n_c$,n_c是纤芯折射率,n_{cl}是包层折射率,r_c是纤芯半径,Λ是传感器的机械周期,m是模式,M是模式的数量。当机械周期被设计为能够促使最高导模与第一辐射模耦合时,传感器的灵敏度达到最



(a) 侧面图



(b) 正面图

图2 基于微弯曲光纤的传感器结构示意图

优,对应的临界周期可表示为

$$\Lambda_c=\frac{\pi r_c}{\sqrt{\Delta}} \tag{2}$$

在该方案中,光纤微弯曲引起的光功率衰减可用于检测入侵,而反射光的时延信息则用于定位。

根据系统光纤的纤芯折射率及式(2),可计算出Δ=0.002 7,$\Lambda_c\approx 2$ mm,与传感器设计周期一致。

2 实验结果与分析

为验证所提出系统的可行性与可靠性,本文在不同场景下进行了多组实验,并对系统的检测能力、识别精度、重复性及响应时间进行了详细分析。

2.1 入侵检测与区域识别

实验将700 m传感光纤分为两部分(200 m与500 m),并使用长度为2 m的微弯光纤作为传感器。首先,采集无入侵状态下的背向散射信号作为参考信号,并设定每30 min更新一次以消除环境变化的影响。系统通过比较测量信号与参考信号的幅度差异,判断是否发生入侵并定位具体区域。

无入侵情况下4个监测区域(A、B、C、D)的背向散射信号如图3所示。第一个脉冲为光纤连接器反射,后续脉冲依次对应各区域末端反射。可以看出,各脉冲幅度保持稳定,表明系统处于正常状态。图4为区域D发生入侵时的散射信号,可见该区域末端反射脉

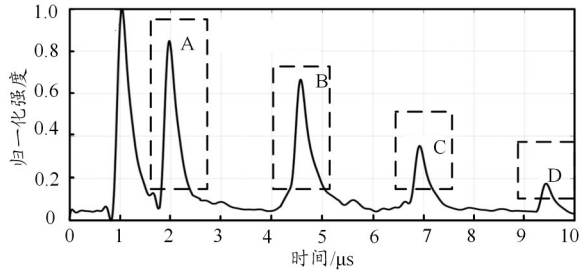


图3 无干扰时系统的散射信号

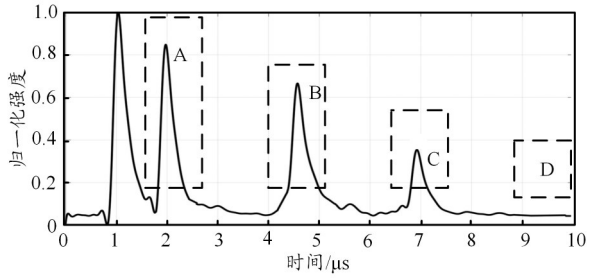


图4 区域D被侵入时的散射信号

冲幅度显著下降(与图3相比),系统据此判定该区域被入侵。

2.2 信号处理与识别率优化

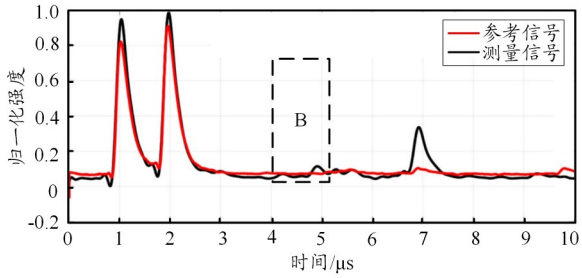
为进一步提高识别准确性,采用归一化处理与互相关分析相结合的方法。首先对参考信号与测量信号进行归一化,再通过互相关计算确定时间滞后,实现信号对齐,最后通过差值信号识别入侵区域。

当一辆质量为1 030 kg、速度为60 km/h的车辆侵入区域B时,其信号对比图如图5所示。从图5(a)可以看出,测量信号中该区域末端反射脉冲的强度明显减弱。图5(b)展示了测量信号与参考信号的差值,其中可见显著峰值,表明入侵事件已被成功检测。

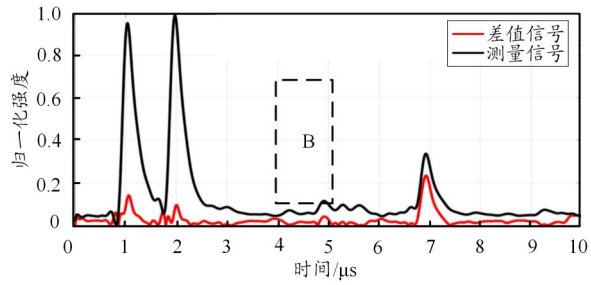
在100次实验中,系统识别成功率约为80%。为提高系统性能,后续实验将光纤划分为4个独立区域(长度分别为200、300、200、250 m),并采用分区阈值判断法。通过提取各区域末端反射脉冲强度,并与参考信号比较,若低于预设阈值则判定为入侵。该方法有效避免了噪声干扰,在100次观测中实现零漏检,并准确定位所有入侵分区。

2.3 系统重复性与可靠性验证

为评估系统的长期稳定性,本文进行了为期6周的重复性测试。实验设置保持不变,每周进行一次测量,并以区域D被60 km/h车辆入侵为测试条件,得到了6次测量的归一化信号对比结果如图6所示。可以看出,各次测量之间差异较小,表明系统具有良好的重复性。进一步计算各测量信号与参考信号的最大



(a) 参考信号与测量信号的对比图



(b) 差值信号与测量信号的对比图

图5 参考信号、测量信号与差值信号的对比图

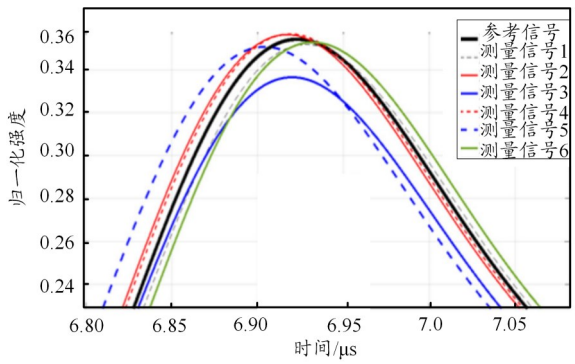


图6 区域D通过车速60 km/h时进行6次测量的实验结果

归一化互相关值,结果如表1所示。可以看出,6次测量的成功率为99.2%,证明系统在不同时间条件下仍保持高可靠性。信号幅值的微小波动主要源于激光二极管输出功率的浮动及光纤温度变化。

表1 根据最大归一化互相关值计算的成功检测率

信号类型	成功检测率
参考信号	1
测量信号1	0.997
测量信号2	0.987
测量信号3	0.991
测量信号4	0.985
测量信号5	0.995
测量信号6	0.989
平均匹配度	0.992

2.4 系统响应时间与高速适用性分析

根据系统各组件的参数，计算得到总上升时间约为10 ns。该时间包括光源、光纤色散及探测器响应时间。在700 m测试范围内，系统响应迅速，能够有效检测高速移动目标。以车辆速度为200 km/h、光纤直径为250 μm、变形器宽度为20 mm为例，车辆通过时间远大于系统上升时间，表明该系统适用于高速车辆的入侵检测。

3 结束语

本文提出并实验验证了一种基于微弯光纤和光时域反射技术的实时车辆入侵检测系统。该系统结构简单、成本低廉，无需复杂算法即可实现高灵敏度检测。实验结果表明，系统在700 m传感范围内对60 km/h行驶的车辆入侵检测成功率达99.2%，且具备响应速度快、抗干扰能力强等特点，能够适应高达200 km/h的高速车辆检测场景。

通过分区检测策略与改进的信号处理方法，系统有效降低了误报率，并展现出良好的重复性与可靠性。该方案在周界安防领域具有实际应用价值，为重要区域的实时监控提供了一种可行的技术手段。

参考文献:

[1] 卢学佳，安博文，陈元林，等. 基于现代谱估计的光纤周界安防系统模式识别[J]. 光通信技术，2017，41(5)：59-62.

[2] HE N Y, ZHU J. A weighted partial domain adaptation for acoustic scene classification and its application in fiber optic security system[J]. IEEE Access，2021, 9: 2244-2250.

[3] 余明. 基于分布式光纤传感的周界警戒系统关键技术及其设计[D]. 武汉：武汉工程大学，2017.

[4] 朱程辉，朱睿，王建平，等. 基于自适应EMD的光纤安防系统入侵信号识别[J]. 传感器与微系统，2020，39(4)：26-30.

[5] HONG X B, WU J, ZUO C, et al. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4333-4338.

[6] WANG H, SUN Q Z, LI X L, et al. Improved location algorithm for multiple intrusions in distributed Sagnac fiber sensing system[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7587-7597.