

定位型超远程全光纤周界安防系统

杨斌 皋魏 席刚 仝芳轩 周正仙

(上海华魏光纤传感技术有限公司, 上海 201103)

摘要 基于 Φ -光时域反射计提出了一种超远程定位型全光纤周界安防系统方案。该传感器利用 Φ -光时域反射计的干涉机理,从光纤中不同部分反射回来的瑞利散射光发生干涉,同时采用在分布式光纤传感器的多段传感光缆之间嵌入多级光中继放大传感装置。利用中继放大传感装置的增益克服了光纤损耗,增强了光纤中自发瑞利散射光的强度,传感光缆分段进行测量。当在多段传感光缆之间引入 N 个远程光中继放大传感装置进行级联时,可实现分布式光纤传感器的 $N \times L$ (L 为每段传感光纤长度)超远程监测。

关键词 传感器;安防系统;超远程; Φ -光时域反射计;光中继传感技术

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.050603

Located Super Remote Full Optical Fiber Boundary Safety Guarding System

Yang Bin Gao Wei Xi Gang Tong Fangxuan Zhou Zhengxian

(Shanghai BOOM Fiber Sensing Technology Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract A located super remote all optical fiber boundary safety guarding system solution based on Φ -optical time domain interference technology is proposed. Utilizing the interference mechanism of Φ -optical time domain reflectometer, the intervention occurs in the Rayleigh scattering lights, which are reflected from the different parts of optical fiber. Meanwhile, the multi-stage optical repeating amplification sensing device is embedded among the multi-section sensing optical cables of the distributed optical fiber sensor, utilizing the gain of repeating amplification sensing device to overcome the optical fiber loss and to enhance the intensity of spontaneous Rayleigh scattering lights in optical fiber, and measuring the sensing optical cable by sections and time sharing. When N remote optical repeating amplification sensing devices being introduced among the multi-section sensing optical cables are cascaded, the system can bring the $N \times L$ (L is the length of each section sensing optical fiber) super remote monitoring of distributed optical fiber sensor.

Key words sensors; safety guarding system; super remote; Φ -optical time domain interference technology; optical repeating sensing technology

OCIS codes 060.0060; 280.0280; 290.0290

1 引言

定位型全光纤周界安防系统具有抗电磁干扰、电绝缘性好、耐腐蚀、灵敏度高以及可以实现大范围监测等诸多优点,且传感光纤都埋藏于地下,具有很好的隐蔽性,可广泛应用于监测和保护国境、军事基地、发电厂、核设施及监狱等,已经成为目前研究的热点^[1~8]。使用脉冲激光器或连续光激光器作为光源的定位型全光纤周界安防系统已被证明可以用来检测并定位拉伸或加热引起的相位扰动^[5]。使用半导体脉冲激光器作为光源的定位型全光纤周界安防系统被用于检测由温度快速变化引起的光相位变化。由环形激光器与声光调制器组成的定位型全光纤周界安防系统用于检测由光纤受到扰动引起的光相位扰动。由光纤激光器与光电调制器组成的系统,采用三级放大,定位精度为20 m,测量范围为100 km。

本文提出的定位型全光纤周界安防系统采用基于光时域反射计(OTDR)结构,利用 Φ -光时域反射计的

收稿日期: 2010-12-10; **收到修改稿日期**: 2011-01-13

基金项目: 上海市科学技术委员会(09HX1189300)资助课题。

作者简介: 杨斌(1977—),男,工程师,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。E-mail: dubjwh@126.com

干涉机理,从光纤中不同部分反射回来的瑞利散射光发生干涉,实验证明这种系统比常规的光时域反射计系统灵敏度高很多。

2 定位型超远程全光纤周界安防系统

2.1 系统结构

定位型超远程全光纤周界安防系统是在现有 Φ -光时域反射计的基础上提出的,其结构如图 1 所示。主要由光纤激光器、电光调制器、光纤放大器、光纤环形器、带通滤波器、光电转换器、模拟/数字(A/D)信号采集器、计算机、光中继传感模块及传感光缆等组成。光纤激光器发出的超窄线宽激光,经电光调制器调制后,连续光被调制成一定频率和脉冲宽度的脉冲光;调制后的脉冲激光被光纤放大器放大,经环形器后,注入传感光缆中。脉冲光在传感光缆中会发生瑞利散射现象,产生的背向瑞利散射光经环形器后,被光电转换器转换为电信号后,进入信号处理器进行数据处理;处理后的数据被信号采集器采集,并送入计算机进行进一步分析。系统根据分析结果,确定是否有非法入侵事件的发生。

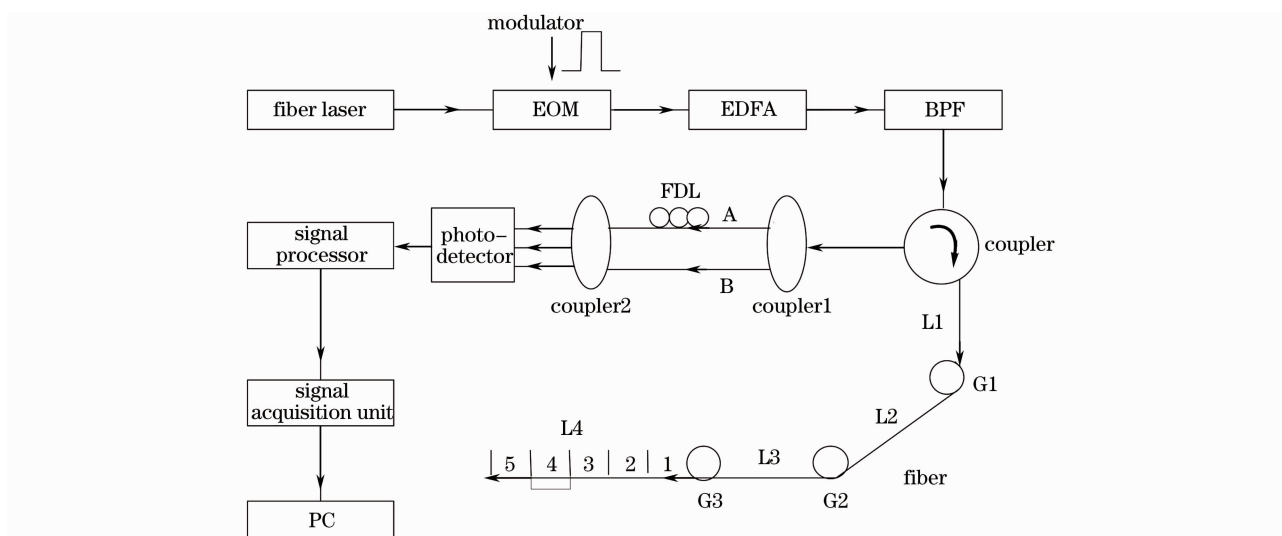


图 1 定位型超远程全光纤周界安防系统结构图

Fig. 1 Configuration for the phase-sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) hyper-remote system

其特征在于:传感光纤的连接处嵌入集成光中继传感模块,可以在多段传感光纤间嵌入 N 个集成光中继传感模块(G),实现光中继放大传输的 N 级级联,真正实现全光纤周界安防系统 $N \times L$ 距离(L 为每段传感光纤的长度)的超远程测量。

光纤激光器发出的超窄线宽激光,经电光调制器调制后,连续光被调制成一定频率和脉冲宽度的脉冲光;调制后的脉冲激光被光纤放大器放大,并由带通滤波器滤波,经环形器后,注入传感光缆中。脉冲光在传感光缆中会发生瑞利散射现象,产生的背向瑞利散射光经环形器后,进入 1×2 光纤耦合器 1 中;耦合器 1 将返回的背向瑞利散射光分成光强相同的两路光,进入马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪的两臂,两臂的臂长不同;两臂的光进入 1×3 光纤耦合器 2,并在此发生干涉。干涉后的信号光分成 3 路光强相等,相位相差 $2\pi/3$ 的光。这 3 路光分别被光电转换器转换为电信号后,进入信号处理器进行数据处理;处理后的数据被信号采集器采集,并送入计算机进行进一步分析。系统根据分析结果,确定是否有非法振动事件的发生。

根据光时域反射原理,当脉冲光脉冲宽度为 τ 时,系统所能分辨的最小空间分辨率为 $\Delta L = c\tau/2$,且当脉冲光的周期 $T > 2L/c$ 时,两个独立的光脉冲在传感光缆上任一点产生的背向散射光到达环形器时不会重叠,其中 c 为光纤中的光速。系统中干涉仪两臂的臂长差控制在 ΔL 附近。当系统开始工作时,令传感光缆沿线 ΔL 长度为一个防区,如图 1 所示,在一段距离内,分别有 5 个防区。设当防区 3 中有事件发生时,外界振动引起防区 3 区域内光纤发生应变,导致折射率和长度发生变化,引起传输的光波相位发生变化。这 5 个防区内传输的光,分别会发生瑞利散射现象,其背向散射光分别经环形器后进入耦合器 1,并被分成独立的两路光,其中 A 臂比 B 臂长 ΔL 。

由图 1 可知,防区 2 经 A 臂到达耦合器 2 的光 O_{2A} 与防区 3 经 B 臂到达耦合器 2 的光 O_{3B} 所需时间相同;同理还有防区 3 经 A 臂和防区 4 经 B 臂到达耦合器 2 的光 O_{3A} 和 O_{4B} ,即这两组光分别会发生干涉现象。对于光 O_{2A} 和 O_{3B} ,光 O_{2A} 没有受到外界振动的影响,相位没有发生变化,而光 O_{3B} 受到了外界振动导致的相位变化;同时,光 O_{3A} 和 O_{4B} 同时受到外界振动的影响,但光 O_{4B} 在防区 3 经历一个来回,由于外界振动导致的相位变化是光 O_{3A} 的两倍。因此,这两组光的相位差都随外界振动的变化而变化。由于干涉仪两臂的臂长差为 ΔL ,防区 3 产生的背向散射光 O_{3A} 和 O_{3B} 只与 O_{4B} 和 O_{2A} 同时到达耦合器 2,发生干涉。

对于防区 4、5 中产生的背向散射光, O_{4A} 和 O_{5B} , 所受到防区 3 中振动的影响相同(在防区 3 中都有一个来回的过程),在耦合器 2 处发生干涉时,外界的影响相互消除;对于防区 1 和防区 2 所产生的背向散射光, O_{2B} 和 O_{1A} , 都没有达到防区 3,都没有受到外界振动的影响。

对于 O_{3A} 和 O_{4B} , 设其光场振动幅度分别为

$$E_{3A} = E_0 \cos[\omega t + s(t_3) + \varphi_3], \quad (1)$$

$$E_{4B} = E_0 \cos[\omega t + s(t_4) + \varphi_4], \quad (2)$$

式中 $s(t_3)$ 、 $s(t_4)$ 分别为两束光受外界振动影响导致的相位变化, φ_3 、 φ_4 分别为两束光的初始相位。

两束光干涉后的光强为

$$I = I_0 \cos[\phi(t) + \Delta\varphi], \quad (3)$$

式中 $\phi(t) = s(t_3) - s(t_4)$, 为两束光受外界振动影响导致的相位变化的差值; $\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_4$, 为两束光初始相位之差, 为常数。干涉后的激光经耦合器 2 后被分为 3 束强度相同、相位依次相差 $2\pi/3$ 的光, 分别被光电探测器 D_1 、 D_2 和 D_3 探测, 将光强转换成电压信号, 分别为

$$V_1 = V_0 \cos[\phi(t) + \Delta\varphi], \quad (4)$$

$$V_2 = V_0 \cos\left[\phi(t) + \Delta\varphi + \frac{2}{3}\pi\right], \quad (5)$$

$$V_3 = V_0 \cos\left[\phi(t) + \Delta\varphi + \frac{4}{3}\pi\right]. \quad (6)$$

3 路电压信号分别经微分得

$$V'_1 = -V_0 \cdot \phi'(t) \cdot \sin[\phi(t) + \Delta\varphi], \quad (7)$$

$$V'_2 = -V_0 \cdot \phi'(t) \cdot \sin\left[\phi(t) + \Delta\varphi + \frac{2}{3}\pi\right], \quad (8)$$

$$V'_3 = -V_0 \cdot \phi'(t) \cdot \sin\left[\phi(t) + \Delta\varphi + \frac{4}{3}\pi\right]. \quad (9)$$

经差分放大器和乘法器后得

$$e_1(t) = V'_3 \times (V'_2 - V'_1) = -V_0 \cdot \phi'(t) \cdot \cos^2\left[\phi(t) - \frac{4}{3}\pi\right]. \quad (10)$$

同理可得

$$e_2(t) = V'_1 \times (V'_3 - V'_2) = -V_0 \cdot \phi'(t) \cdot \cos^2\phi(t), \quad (11)$$

$$e_3(t) = V'_2 \times (V'_1 - V'_3) = -V_0 \cdot \phi'(t) \cdot \cos^2\left[\phi(t) - \frac{2}{3}\pi\right]. \quad (12)$$

作加法得

$$e(t) = e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = -\frac{3}{2}V_0 \cdot \phi'(t). \quad (13)$$

经积分得

$$S(t) = K_0 \phi(t). \quad (14)$$

由(14)式即可得到外界振动影响导致的光纤相位变化, 当有事件发生时, 会对传感光缆监控区域进行报警。在脉冲发出后 t 时刻, 系统收到报警信号, 则非法入侵事件地点距控制中心距离为

$$D = ct/2. \quad (15)$$

2.2 信号检测原理

光波在光纤中传输时会发生背向散射现象, 包括布里渊散射、拉曼散射和瑞利散射, 其中瑞利散射光强

度最大且不改变散射光的波长。光纤的背向散射是由于介质不均匀而引起的散射光中,会有一部分光沿着光路传输的相反方向传回发送端。光时域反射仪就是利用光纤中背向散射光的强度具有一定规律的原理来进行测量的。基于 OTDR 技术的全光纤周界安防系统由于直接对瑞利散射光进行强度测量,测量灵敏度比较低,不易于探测小信号振动。但由于使用时域反射技术,系统定位精度高^[8]。

定位型全光纤周界安防系统与常规光时域反射计一样,光脉冲从光纤的一端注入,用光探测器探测后向瑞利散射光。不同的是注入光纤中的光是高度相干的,因此该传感系统的输出就是脉冲宽度区域内反射回来的瑞利散射光相干干涉的结果。定位型全光纤周界安防系统通过测量注入脉冲与接收到的信号之间的时间延迟得到扰动的位置。当光纤线路上由于入侵而发生扰动时,由于弹光效应,光纤相应位置的折射率将发生变化,这将导致该处光相位发生变化,由于干涉作用,相位的变化将引起后向散射光光强发生变化。通过探测器探测后向瑞利散射光,并且将定位型全光纤周界安防系统不同时刻的后向瑞利散射曲线相减来检测这种效应,相减的曲线上光强发生变化的时间位置同入侵导致相位扰动的位置(相对注入脉冲那一端的距离)相对应。该系统的定位精度 P 与注入光纤的光脉冲宽度 ΔT 有关,且有 $P = c\Delta T/(2n)$,其中 n 为传输介质折射率。

与常规光时域反射计相比, Φ -光时域反射计需要极窄的线宽及极小的频率漂移。窄线宽是 Φ -光时域反射计系统的关键,是系统能够响应光相位变化的基本条件,且线宽越窄,干涉作用就越明显,系统的灵敏度就越高。极小的频率漂移非常重要,因为频率漂移会导致 Φ -光时域反射计后向散射曲线发生抖动,使入侵引起的后向散射曲线的变化被淹没,严重影响系统的性能。

3 定位原理

Φ -光时域反射计的典型结构如图 2 所示。激光器发出的光经过脉冲发生器调制后,产生所需宽度的光脉冲(通常为 10~400 ns),经耦合器后入射到待测光纤,光纤中的后向散射光和非涅耳反射光经耦合器后进入光电探测器,光电探测器把接收到的光信号转换成电信号,进入主机进行数据处理。

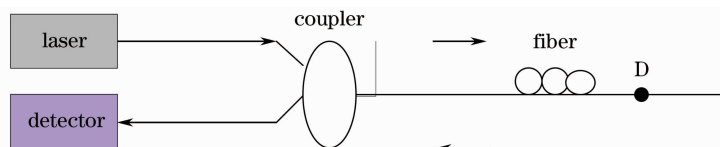


图 2 光时域反射技术原理图

Fig. 2 Principle of the optical time domain reflectometer system

脉冲激光器输出的脉冲光波,传输至事件点 D,经瑞利散射后,背向散射光在激光器脉冲输出 t 时刻后被探测器接收,令事件点 D 至探测器的距离为 Z ,则

$$Z = vt/2 = ct/(2n), \quad (16)$$

式中 v 为光在光纤中的传输速度, n 为光纤有效折射率。图 2 中,设光脉冲持续时间为 Δt ,则在 t 时刻,检测到的后向散射光为 $[Z, Z + (v\Delta t)/2]$ 这段光纤后向散射的总能量。所以,OTDR 的空间分辨率为

$$\Delta Z = v\Delta t/2. \quad (17)$$

这样,不同时间测量的反射光强度就对应着整个传感光纤不同位置的散射。因此,可以通过测量后向散射的时间函数来获取不同距离的后向散射信息。

4 先进的软件算法设计

定位型超远程全光纤周界安防系统能够测量光纤周围任何的振动、扰动、颤噪和声音信号,因此在大量的振动信息中提取有用的信号数据是非常关键的技术。定位型超远程全光纤周界安防系统的传感光缆由于入侵而发生扰动时,由于弹光效应,光纤相应位置的折射率将发生变化,导致该处光相位发生变化。由于干涉作用,相位的变化将引起后向散射光光强发生变化,后向散射光相干光信号时频上的变化与传感光缆感受的振动变化相对应,即其振动频率与幅度会发生相应变化,因而采用时频分布对其进行检测是可行的。

周期与频率是信号波动快慢的度量,不同入侵事件各自都具有明确的频率成分。全光纤周界安防系统

采用了特征提取及分类算法解决了周界安全振动信号的识别问题。特征提取及分类算法功能是根据分类模型进行新振动数据的分类和判断,工作流程如图 3 所示。

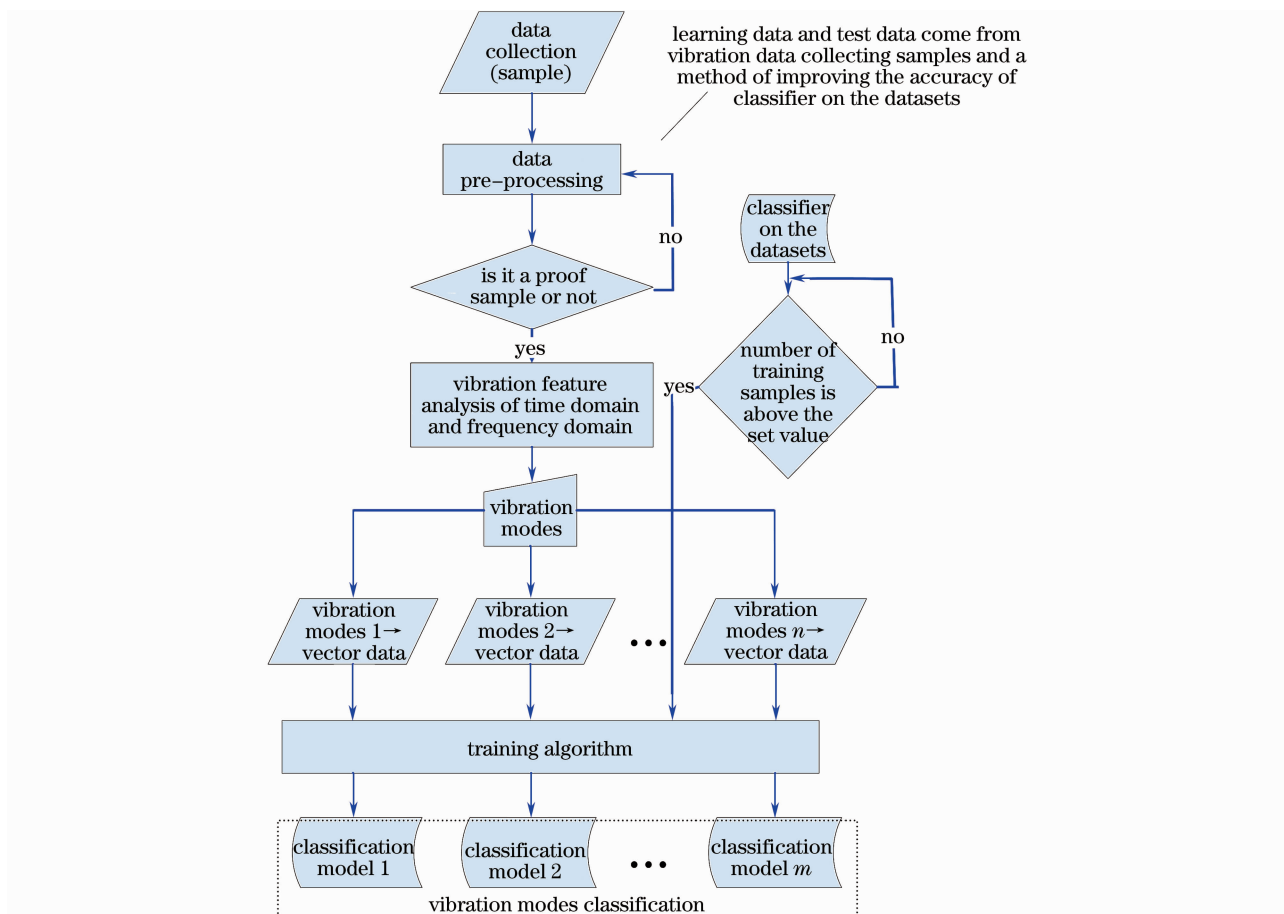


图 3 特征提取及分类算法工作流程图

Fig. 3 Flow diagram of the system feature extraction and the design of classifier scheduler algorithm

5 实验与分析

光纤激光器的工作波长为 1550 nm,适合于长距离传输,传感光缆注入的光脉冲周期为 1.25 ms 的脉冲信号,光脉冲重复周期需满足大于光脉冲在光纤中传播的往返时间(1.25 ms 重复周期的脉冲信号对于待测光纤长度小于 125 km 都能满足条件),以避免光脉冲在光纤中发生混叠,影响系统工作。光脉冲的宽度为 200 ns,对应于 20 m 的定位精度。将嵌入光中继传感装置的定位型超远程全光纤周界安防系统的 100 km 传感光缆埋入 1 m 深的沙土下,在传感光纤中级联 4 级集成光中继放大光模块,将传感光纤分段(每段 25 km)进行测量。

入侵者走在一段 20 m 光缆(防区 539)上面或附近产生的压力(振动)导致光纤中瑞利散射光相位发生变化,由于干涉作用,光相位变化将引起光强度的变化,通过实时将当前时刻防区 1 的定位型全光纤周界安防系统后向瑞利散射信号与其前一时刻的后向瑞利散射信号连续相减检测这种干涉效应来定位入侵位置。测试结果如图 4 所示,瑞利曲线图中是级联 3 级集成光中继放大光模块的 4 段 25 km 传感光纤中分别探测的瑞利散射信号,探测传感光缆大于 100 km;振动波形图中是设置为防区 539 的一段 20 m 光缆受到入侵时产生的振动波形。从以上实验数据可以看出,该全光纤周界安防系统的探测精度很高,探测传感光缆达 100 km,空间分辨率达 20 m。

实验波形图 5~8 为所设防区 539 的相应一段 20 m 光缆受到不同事件入侵时产生的振动波形。软件中采用时域算法中所搜集的信号特征值包括信号幅度最大值、信号幅度最小值、信号有效振动时间、信号振动脉冲序列、信号振动剧烈程度、信号长时间振动程序、信号振动平缓参数等参数。软件以最优化的方式搜集

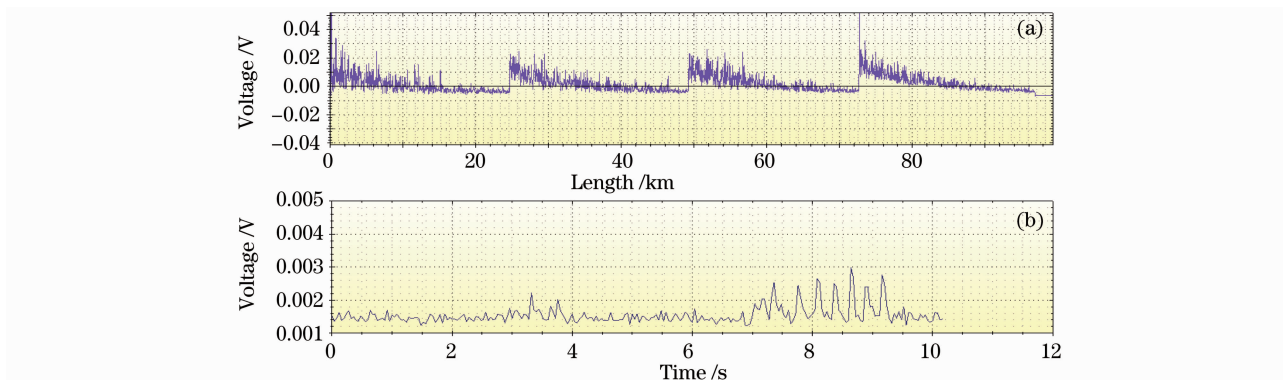


图4 测试曲线图。(a)瑞利曲线,(b)振动波形

Fig. 4 Test curves. (a) Rayleigh curve, (b) vibration curve

报警信号与干扰信号特征,形成信号特征库。当搜集到的信号特征与现有的特征库相冲突时,则在信号特征库中将其剔除。同时也可通过人工的干预来搜集信号,剔除信号特征库中的无用信号,有效地提取报警信号与干扰信号特征值。通过使用先进的模式识别技术,系统将能够智能分析事件特征,将上传的报警数据收入标准数据库,不断更新完善系统的数据库,提高报警事件判断的准确性。

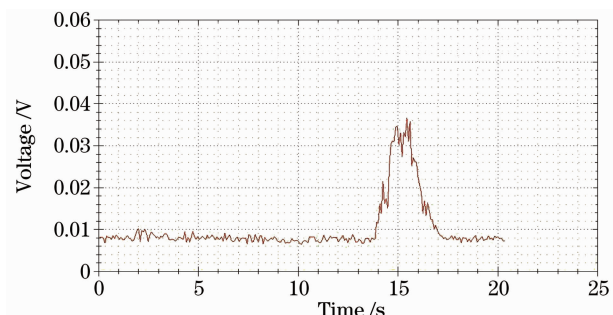


图5 单辆车通过振动图片

Fig. 5 Vibration waveform of one 50 m apart intrusions (one car on the cable apart) after processing

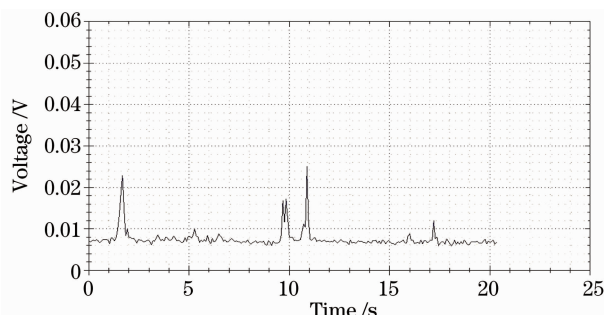


图6 多辆车同时间不同位置通过振动波形图片

Fig. 6 Vibration waveform of one 50 m apart intrusions (cars on the cable apart) after processing

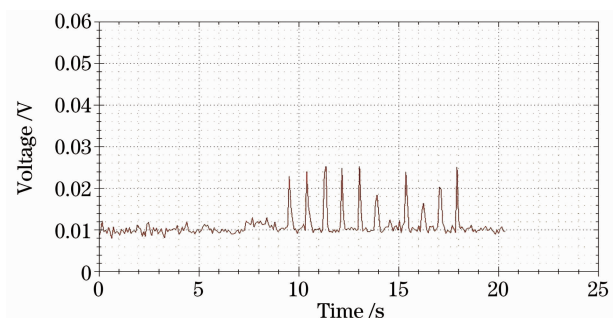


图7 人连续踩踏通过光缆振动波形图片

Fig. 7 Vibration waveform of one 50 m apart intrusions (tread on cable) after processing

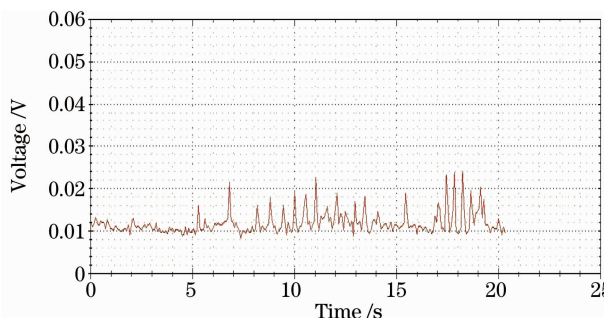


图8 挖掘光缆振动波形图片

Fig. 8 Vibration waveform of one 50 m apart intrusions (excavating machinery on cable) after processing

6 结 论

设计了一种定位型超远程全光纤周界安防系统。传感光缆埋设于室外,入侵者走在光缆上面或附近产生的压力(振动)会导致光纤中瑞利散射光相位发生变化,由于干涉作用,光相位变化将引起光强度的变化。通过实时将当前时刻的后向瑞利散射信号与其前一时刻的后向瑞利散射信号连续相减来定位入侵位置。在分布式光纤传感器的多段传感光缆之间嵌入多级光中继放大传感装置,利用中继放大传感装置的增益克服了光纤损耗,增强了光纤中自发瑞利散射光的强度,传感光缆可以分段分时进行测量。当在多段传感光缆之

间引入 N 个远程光中继放大传感装置进行级联时,可实现分布式光纤传感器的 $N \times L$ 超远程监测。

参 考 文 献

- 1 Song Muping, Chen Xiang. Real-time wavelet transform based coherent detecting Brillouin optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2818~2821
宋牟平, 陈翔. 基于实时小波变换信号处理的相干检测布里渊光时域反射计[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2818~2821
- 2 Peter Gysel, Roland K. Staubli. Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(4): 561~567
- 3 Ziyi Zhang, Xiaoyi Bao. Continuous and damped vibration detection based on fiber diversity detection sensor by Rayleigh backscattering[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(7): 832~838
- 4 Song Muping, Bao Chong, Qiu Chao *et al.*. A distributed optical-fiber sensor combined Brillouin optical time-domain analyzer with Brillouin optical time-domain reflectometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 650~654
宋牟平, 鲍翀, 裘超等. 结合布里渊光时域分析和光时域反射计的分布式光纤传感器[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 650~654
- 5 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127
杭利军, 何存富, 吴斌等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 123~127
- 6 Kurashimat, Tatedam, Koyamaday. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 7 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical timedomain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electric optical modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1053~1056
宋牟平, 赵斌, 章献民. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1053~1056
- 8 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. 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. 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