

· 光学设计 ·

新型智能光纤周界报警系统

王 贇, 张 旭

(北京市公安局警卫局, 北京 100006)

摘要: 详细介绍了新型智能光纤周界报警系统的软硬件设计, 阐述了相关硬件组成和元器件选型与设计要点。系统采用光纤振动传感、无线组网以及移动终端等多项技术, 打造一种新型智能化周界防控系统。文中对光纤微弱振动检测算法设计流程、仿真结果和实验效果进行了详细描述。结果表明, 系统能够很好的对入侵目标进行探测报警, 满足设计要求。

关键词: 振动光纤; 周界报警; 无线组网; 移动终端

中图分类号: TN247, TN29, TN99

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-02-0013-07

A New Intelligent Optical Fiber Circumference Alarm System

WANG Yun, ZHANG Xu

(Guard Bureau of Beijing Municipal Public Security Bureau, Beijing 100006, China)

Abstract: The software and hardware design of a new intelligent optical fiber circumference alarm system is introduced in detail. The composition of the related hardware, the main points of selection and design of components are presented. The optical fiber vibration sensing, wireless networking, mobile terminals and other technologies are adopted to create a new intelligent circumference prevention and control system. The design process, simulation and experimental results of the optical fiber weak vibration detection algorithm are described in detail. The results show that the system can detect and alarm the intrusion targets well and meet the design requirements.

Key words: vibration fiber; circumference alarm; wireless networking; mobile terminal

住地作为重要安保活动场所, 安保要求等级高。大型活动中, 安保现场监控呈现监控点多、分布广, 现场多个安保单位及流动人员往来复杂的特点, 住地周界的防控难度加大^[1-2]。为更加高效地利用有限的安保资源, 迫切需要建设高度信息化、智能化并能快速部署新型周界防控系统, 对各住地进行高效、高置信度、大范围的自动化周界防控^[3]。随着技术进步和安防事业的整体发展, 周界防护系统技术也在不断更新, 当今的周界防护报警系统主要包括: 红外探测周界报警系统^[4]、脉冲电子围栏周界报警系统^[5]、振动光缆周界报警系统^[6]、泄露电缆周界报警系统^[7]、张力式围栏周界报警系统^[8]、智能视频分析周界报警系统^[9]等。其中振动光缆周界防控

技术以虚警率低、可靠性高、探测精度高、无源驱动易于布控和相对低廉的成本受到业内的青睐^[10], 但传统的光纤周界报警系统智能化程度低, 难以满足新型装备需求, 需要研制一套对住地周界防控状态进行智能感知, 对越界、翻墙等行为自动报警并显示相关信息, 为工作人员决策作出技术支撑的高度智能化安保系统。

1 系统组成与设计

周界报警系统由前端探测单元、报警单元、传输单元、智能算法处理单元、综合显控单元组成, 组成示意图如图1所示。

收稿日期: 2018-03-30

基金项目: 公安智能监控开放基金(J101230K3047)

作者简介: 王贇(1984-) 男, 北京人, 本科, 助理工程师, 主要从事计算机与信息技术方面研究。

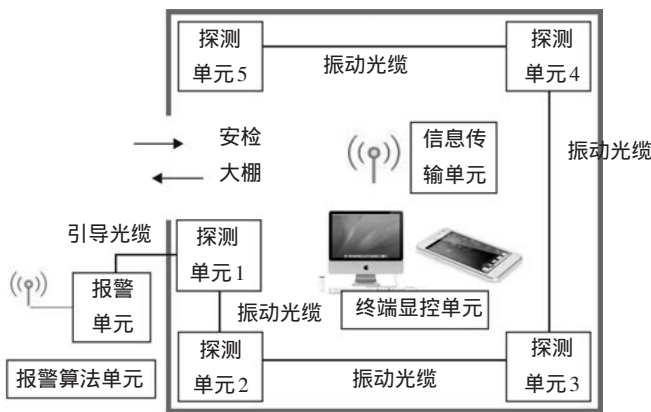


图1 系统组成原理图

振动光纤周界系统主要基于“光纤干涉仪”原理。前端探测单元为检测微弱振动,采用两芯单模光纤构成平衡光纤干涉仪,当光纤受到外界干扰时,干涉光的输出波形改变,并产生干涉图像。报警单元光探测器可检测这一波形变化,通过软件分析变化的波形特性,从而达到“入侵模式识别”效果。无线传输单元将报警单元的报警开关信号传输至固定或移动终端单元,从而完成最终报警结果的汇报。

1.1 前端探测单元

前端探测单元由振动光缆和光路分束器等组成。前端探测单元以无源方式进行敷设和工作。振动传感光缆采用通信级单模光缆。振动传感光缆作为入侵探测器,负责报警信号的探测和传输。它能够将防护区域内的微小机械振动(即侵入者带来的微小振动)的光信号传到报警处理单元。振动传感光缆为无源方式,能够安装于铁丝网、护栏等周界防护体上。防止非法入侵人员翻越墙体进入,可将扣网安装在围墙顶部,以增加振动的强度和感应面积。

光路分束器在多防区系统内,以四防区为例,一个报警单元会接收4个前端探测单元(连接单元)的光信号。因此,光信号每经过一个防区连接单元即需进行一次分路,采用光纤分束器可以对该信号进行多次光分束,形成多个防区。

1.2 报警单元

报警单元包括激光器和报警器。激光器主要探测光源,将光信号导入光纤在振动光纤内传播。

报警器将两路相干光信号进行光电转换,对信号进行处理并输出开关量报警信号。

激光器选用1 550 nm外调制激光发射机为网络提供光源。温控尾纤激光器,采用量子阱结构的DFB激光器,内置半导体制冷器,标准封装工艺实现蝶形(butterfly)尾纤式封装,结构紧凑,体积小;半导体制冷器高精度温度控制下,激光器功率高稳定、波长高稳定的优势,使得激光器在光纤传感器领域得到广泛应用,1 550 nm尾纤激光器如图2所示。

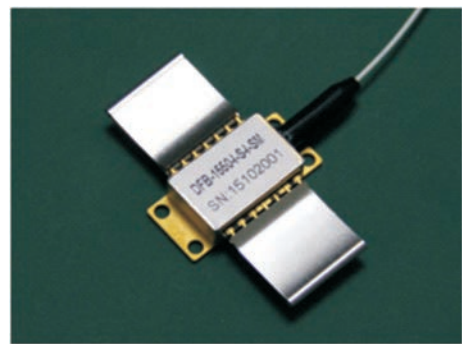


图2 1 550 nm尾纤激光器

报警器基于高性能DSP处理板,接收相干光信号并通过光电PIN管进行光电转换,对转换后的电信号进行模数转换,进行抗干扰滤波和算法设计,最后输出开关量的报警信号。报警器基于信号处理电路板,该板包括光电转换、模数转换和DSP设计等。

1.3 传输单元

传输单元包括无线网桥、无线WIFI等。无线网桥:将报警单元与机房固定终端进行组网;无线WIFI实现固定终端报警结果与移动终端间的信息组网。信息传输单元通过无线传输方式将控制区内的各信息节点连接组网,完成信息的互联互通。传输单元实现区域内的全覆盖,手持移动终端在区域任意位置通过用户身份验证后均能进入周界防控移动终端进行态势预览。

为与移动端终端进行通信,需将固定端与移动端进行组网。结合无线网桥技术,将固定端终端与报警单元连接,无线路由器再与报警单元连接,从而实现固定终端、移动终端和报警单元间的信息组网与互联互通,如图3所示。

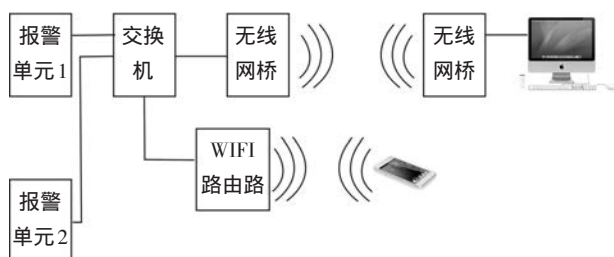


图3 无线组网方案

1.4 智能算法单元

越界智能检测算法等。根据相干探测原理,对相干信号进行算法解析,运用检测算法获取越界检测结果。

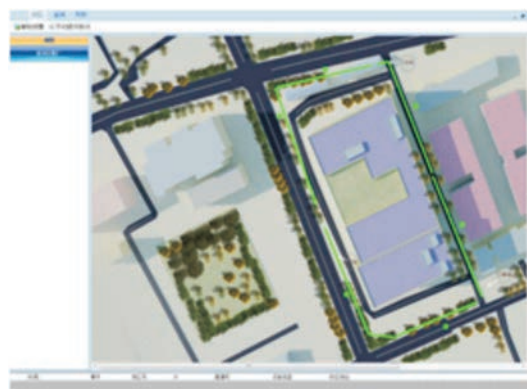
在光纤振动信号检测系统中,检测长距离的光纤振动信号,反射回的光信号都有大量的振动杂波和噪声,导致振动检测信号的虚警率较高。光纤振动信号可视为多路一维时间序列,并具有混沌时间序列的特点,诸如初始敏感和非线性等特征。因此,可引入混沌时间序列的分析方法来获取光纤振动特征,减少虚警和噪声。该算法根据估计各个频带下振动前、中、后功率谱密度变化情况,可提取光纤振动特征,根据谱分析得到光纤振动的能量变化,并根据不同种类如人的翻越,风的振动,鸟的落下等所产生光纤振动能量谱分布不同,能够有效区分光纤振动原因,减小虚警和误报。

1.5 综合显控单元

综合显控单元是人机界面交互部分,一方面实现对图像的实时显示,用于工作人员对现场态势的感知;另一方面实现工作人员对系统各种工作状态的配置。综合显控单元包括显示区和控制区。

显示区通过SDK开发包提供的图像输入函数,并调用相机自带的解码包,从而获取高清视频数据,并将该数据进行规定格式的显示与存储,具有实时视频存储、抓图功能。按照用户的使用需求,本次增加了全屏显示、报警框一键取消等功能。

控制区设置了多种功能区,包括相机控制、报警区控制、报警检测阈值控制等。与前端通讯部分采用标准网络协议,通过SDK的功能函数将通讯数据打包通过网络进行传输至后端显控终端。Windows版本综合显控单元初步效果如图4a所示,Android版本显控终端效果如图4b所示。



(a) Windows版本



(b) Android版本

图4 综合显控初步效果

2 微弱光纤信号处理算法

在光纤振动信号检测系统中,检测长距离的光纤振动信号,反射回的光信号都有大量的振动杂波和噪声,导致振动检测信号的虚警率较高。同时,虽然波动幅值与振动行为的发生存在一定的相关性,但由于系统的布设防区长度为变化量,以及不可避免的光纤熔接产生的噪声,都可能导致波动幅值的范围变化,因而无法采用固定阈值进行翻越振动等特征识别方法。

在此,光纤振动信号可视为多路一维时间序列,并具有混沌时间序列的特点,诸如初始敏感和非线性等特征。因此,可引入混沌时间序列的分析方法来获取光纤振动特征(例如表征能量的相对功率谱密度),减少虚警和噪声。

2.1 算法原理

在10 min的实验过程中,记录一路光纤信号。从信号中提取3段长度为2 s的数据(振动前图5a,振动中图5b,振动后图5c,对应两千个采

样点)进行分析。使用0.5~48 Hz的带通滤波器处理数据,并通过小波变换提取信号四个子频带(δ :0~4 Hz, θ :4~8 Hz, α :8~15 Hz, β :15~30 Hz),以 θ 频带为例,如图5所示。

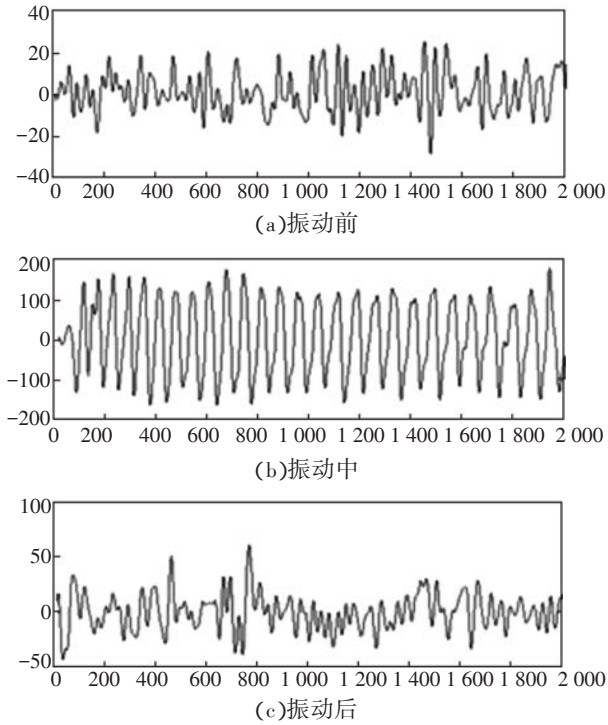


图5 θ 频带下,振动前、振动中、振动后三种状态信号

从采集的信号中可以明显看出: θ 频带下光纤振动前后信号有一定的随机非线性,并且幅值基本在0~50的范围内;而光纤振动中信号幅值急剧增强,幅值上升到150~200范围内,呈现出一定的周期性,其复杂性明显降低,对应光纤发生振动,可判定为有人或物接触光纤。

采用功率谱分析方法分别从能量角度对单导光纤信号进行分析^[11-12],具体过程如图6所示。

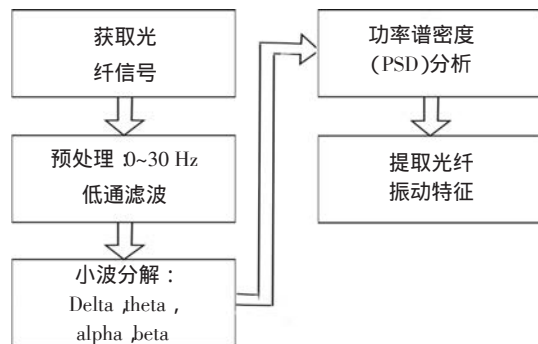


图6 文中所采用分析方法流程图

采用线性自回归(autoregressive, AR)模型估计法来估计光纤信号的功率谱密度。在AR模型中,假设给定信号 $x(n)$ 为一个白噪声输入序列 $u(n)$ 激励线性系统 $H(z)$ 得到的输出序列,根据已知的 $x(n)$ 可以估计 $H(z)$ 的参数,最后由 $H(z)$ 的参数估计 $x(n)$ 的功率谱。AR模型可由下式表示

$$x(n) = -\sum_{k=1}^p a_k x(n-k) + u(n) \quad (1)$$

其中, $u(n)$ 是白噪声序列; p 是AR模型的阶数; a_k 为模型参数。线性系统的传递函数可以表示为

$$H(z) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (2)$$

在估计相应参数后,序列 $x(n)$ 的功率谱密度计算如下

$$P_{AR}(f) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-j2\pi fk} \right|^2} \quad (3)$$

模型参数 $\hat{\alpha}_k$ 由Burg算法估计得到,其基本原理是使前向预测与后向预测的均方误差之和最小,因此基于AR-Burg算法的功率谱密度可表示为

$$\hat{P}_{BURG}(f) = \frac{\hat{\sigma}_p^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p \hat{a}_k e^{-j2\pi fk} \right|^2} \quad (4)$$

其中, $\hat{\sigma}_p^2$ 是最小的预测均方误差之和。其中, $\hat{\sigma}_p^2$ 是最小二乘误差值(前向误差与后向误差之和的最小值); p 是AR模型的阶数,该参数的选取至关重要。 p 可以通过赤池信息准则(AIC)确定为 $p=10$ 。其中赤池信息准则可以简单地表述为下式

$$AIC(p) = N \lg(\hat{\sigma}^2) + 2p \quad (5)$$

其中, $\hat{\sigma}^2$ 是在阶数 p 和时间序列 $x(n)$ 的长度为 N 时的误差方差估计值。每个频率点处的相对PSD值可以通过下式计算

$$\text{relative PSD}(f) = \frac{PSD(f)}{\sum_{f=f_L}^{f=f_H} PSD(f)} \quad (6)$$

其中, $[f_L, f_H]$ 是功率谱的频带考虑范围。简单起见,相对功率谱密度PSD简称为 $PSD_r(f)$ 。归一化之后,所有频段内各点的相对PSD的总和为1,即 $\sum_{f=f_L}^{f=f_H} PSD_r(f) = 1$ 。

该算法可根据估计各个频带下振动前、中、后

相对功率谱密度(PSD)密度变化情况,可提取光纤振动特征,根据谱分析得到光线振动的能量变化,并根据不同种类如人的翻越,风的振动,鸟的落下等所产生光纤振动能量谱分布不同,能够有效区分光纤振动原因,减小虚警和误报。

同时,根据已知翻越振动等时间序列的特性,计算测试序列与已知序列的相似程度,从而判断其是否具有已知的某一特征。文中所采用衡量相似程度的特征为同步似然(synchronization likelihood)^[13-15]。

在同步似然中,时间序列在形态上的相似代表时间序列经过相空间重构后的轨迹上的点之间的紧密程度。根据混沌理论,轨迹的重构需要首先选取延迟时间(T)和嵌入维数(d)。对于长度为 R 的第 k 列时间序列进行相空间重构,得到下式

$$X_{k,n} = (x_{k,n}, x_{k,n+T}, \dots, x_{k,n+(d-1)T}) \quad (7)$$

其中, $x_{k,n}$ 为第 k 列时间序列上的第 n 个点, $k=1,2,\dots,M$, M 为相互耦合的时间序列数量。每条轨迹包含 $N=R-(d-1)T$ 个状态。根据Takens嵌入定理,相空间重构的嵌入维数大于其最小嵌入维数。在光纤振动时间序列信号的同步似然研究中,对于所有序列,延迟时间 T 和嵌入维数 d 取相同的值,以比较其状态的相似性。根据先验知识,由于信号的最小嵌入维数大多处于 9 ± 3 范围内,嵌入维数 d 通常选为大于15的值,以保证每列时间序列重构到 d 维空间时避免损失信息。

对于每一列时间序列,通过与参考状态即时间窗 $W_{w_1}^{w_2}(k,n)$ 的中心状态($X_{k,n}$)相比较而得到时间序列中的状态之间的相似性。时间窗 $W_{w_1}^{w_2}(k,n)$ 包含两种不同的对称状态序列: $[X_{k,n-w_2}, \dots, X_{k,n-w_1}]$ 和 $[X_{k,n+w_1}, \dots, X_{k,n+w_2}]$,如图7所示。

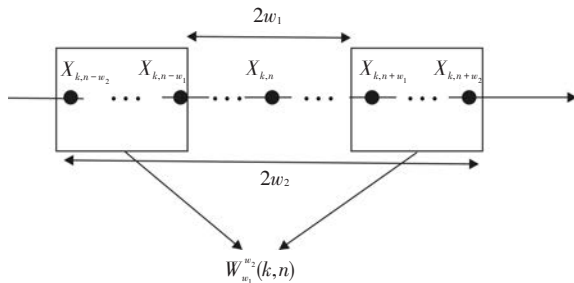


图7 在参考状态($X_{k,n}$)两侧的对称时间窗 $W_{w_1}^{w_2}(k,n)$

定义窗中某一状态 $X_{k,m}$ 与参考状态 $X_{k,n}$ 的距离小于距离 $\varepsilon_{k,n}$ 的概率为

$$P_{k,n}^{\varepsilon_{k,n}} = \frac{1}{2(w_2 - w_1)} \sum_{\substack{m=1 \\ w_1 < |n-m| < w_2}}^N \Theta(\varepsilon_{k,n} - |X_{k,n} - X_{k,m}|) \quad (8)$$

其中, N 代表每一条重构轨迹的状态数量; Θ 是Heaviside阶跃函数;符号 $| \cdot |$ 表示欧几里得距离。对于第 $..$ 列时间序列,令 $P_{k,n}^{\varepsilon_{k,n}} = P_{\text{ref}}$ 即可得到 $\varepsilon_{k,n}$ 。 P_{ref} 远小于1,文中取 $P_{\text{ref}} = 0.05$ 。欧氏距离小于 $\varepsilon_{k,n}$ 且包含状态 $X_{k,m}$ 和 $X_{k,n}$ 的时间序列的列数可通过下式计算

$$H_{n,m} = \sum_{k=1}^M \Theta(\varepsilon_{k,n} - |X_{k,n} - X_{k,m}|) \quad (9)$$

由此可以得到,第 k 列时间序列与其他 $..$ 列时间序列关于相应状态对 $..$ 的同步似然系数的定义如下

$$S_{k,n,m} = \frac{H_{n,m} - 1}{M - 1} \Theta(\varepsilon_{k,n} - |X_{k,n} - X_{k,m}|) \quad (10)$$

第 k 列时间序列在窗 $W_{w_1}^{w_2}(k,n)$ 内的同步似然系数的定义如下

$$S_{k,n} = \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ w_1 < |n-m| < w_2}}^N S_{k,n,m}}{\sum_{\substack{m=1 \\ w_1 < |n-m| < w_2}}^N \Theta(\varepsilon_{k,n} - |X_{k,n} - X_{k,m}|)} \quad (11)$$

当计算两列时间序列之间的同步似然值时 $M=2$ 。简化式(8)~式(10),可得时间序列 a 与时间序列 b 之间的同步似然值为

$$S_{a,n} = S_{b,n} = \frac{1}{2P_{\text{ref}}(w_2 - w_1)} \cdot \sum_{\substack{m=1 \\ w_1 < |n-m| < w_2}}^N \Theta(\varepsilon_{a,n} - |X_{a,n} - X_{a,m}|) \times \Theta(\varepsilon_{b,n} - |X_{b,n} - X_{b,m}|) \quad (12)$$

文中,设置滑动时间窗以固定步长,50%的重复率在整列时间序列上进行滑动。对于两列时间序列,先求取滑动窗内的SL值,滑动窗之间求平均之后即可得到两列时间序列之间的总体SL值。

2.2 实验分析

以翻越振动为例,其具体分析过程是首先通过采集含有翻越振动正样本组与噪声负样本对照组各五组实验数据,每组获取的测试时间序列数据数

量为120,其采样频率为1 024,每条数据对应时间长度为2 s。采用0~32 Hz的带通有限长单位冲激响应数字滤波器(FIR)进行滤波去除伪迹。最后通过小波分解与重构的方法提取四个子频带(δ :0~4 Hz, θ :4~8 Hz, α :8~15 Hz, β :15~30 Hz)。

分别对四个子频带下的翻越振动和噪声样本数据进行相对功率谱密度计算,所得到的统计结

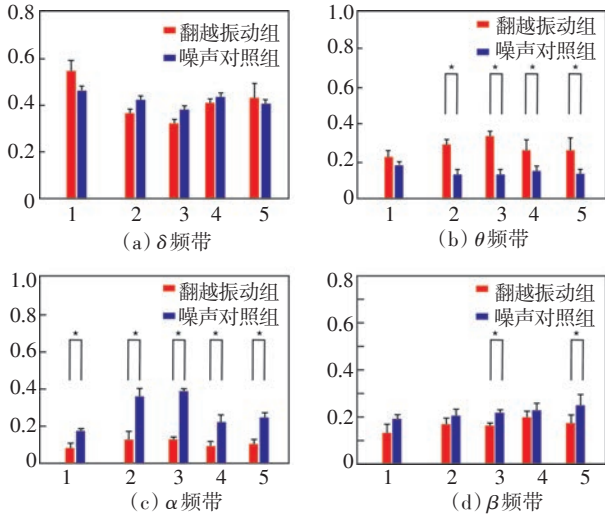


图8 翻越振动组与噪声对照组相对PSD计算

果如柱状图8所示。

横轴表示5组实验数据,纵轴表示相对功率谱密度的平均值。

实验结果显示,翻越振动组与对照组在5组实验中,低频带范围即 δ 、 θ 频带能量相对增大,而在高频带相对减小,说明翻越振动的特点是更多出现偏向于低频带。而统计结果表明,翻越振动组与对照组在 θ 频带显著增大,而 α 频带则显著减小,表1中 θ

表1 在四个子频带下,噪声对照组和翻越振动组相对PSD的显著性分析结果

频带	F 值	P 值
Delta(δ)	0.353 9	0.555 4
Theta(θ)	17.800 2	1.466 6e-004
Alpha(α)	39.134 8	2.539 0e-007
Beta(β)	3.124 6	0.085 1

与 α 频带的 p 值远小于0.01也证实了这一点。

分别对上述两个显著子频带下的翻越振动和噪声样本数据进行同步似然度计算,所得到的统计

计结果如表2、表3所示。表2为5组翻越振动数据间对应SL值,表3为5组翻越振动、噪声数据间对应

表2 5组翻越振动数据间对应SL值(两位有效数字)

实验组	振动1	振动2	振动3	振动4	振动5
振动1	0.99	0.65	0.78	0.59	0.77
振动2	0.65	0.99	0.85	0.88	0.76
振动3	0.78	0.85	0.99	0.66	0.85
振动4	0.59	0.88	0.66	0.99	0.76
振动5	0.77	0.76	0.85	0.76	0.99

表3 5组翻越振动、噪声数据间对应SL值(两位有效数字)

实验组	振动1	振动2	振动3	振动4	振动5
噪声1	0.00	0.21	0.12	0.22	0.10
噪声2	0.21	0.00	0.13	0.18	0.26
噪声3	0.12	0.13	0.32	0.26	0.16
噪声4	0.22	0.18	0.26	0.29	0.15
噪声5	0.10	0.26	0.16	0.15	0.19

SL值。

结果显示,翻越振动组内SL值不低于0.5,相似程度较高,翻越振动组与噪声样本组SL值不高于0.4,相似程度较低。依据该实验结果,可设置阈值为0.45左右,进而可对翻越振动与噪声进行区分。

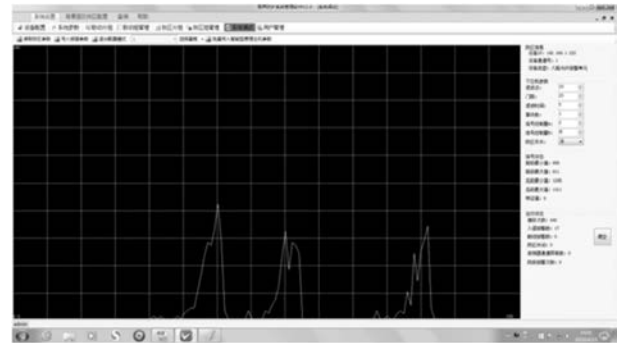


图9 光纤振动信号处理软件效果

系统软件算法处理效果如图9所示。

可根据实际应用配置门限阈值等参数进行振动检测,识别翻越行为。

3 系统测试

系统经设计、加工、集成后,对真实环境进行测试和实验验证。产品测试环境如下:对某重大活动的一场地进行周界报警系统建设,包括北面、东面

和南面以及西面外围周界的防护,其中北面以及西面是绿隔,不破坏现场建筑,实现无线网络覆盖,实现固定终端服务器与移动终端相结合方式,显示监控现场三维地图。

周界长度分布:东侧长度 180 m,北侧长度 120 m,南侧长度 200 m,西侧 180 m,共计 680 m。现场非连续点 6 个,分别为北侧 2 个、东门 2 个、南侧 2 个,使用基本报警单元 8 个,划分为 5 个防区,施工

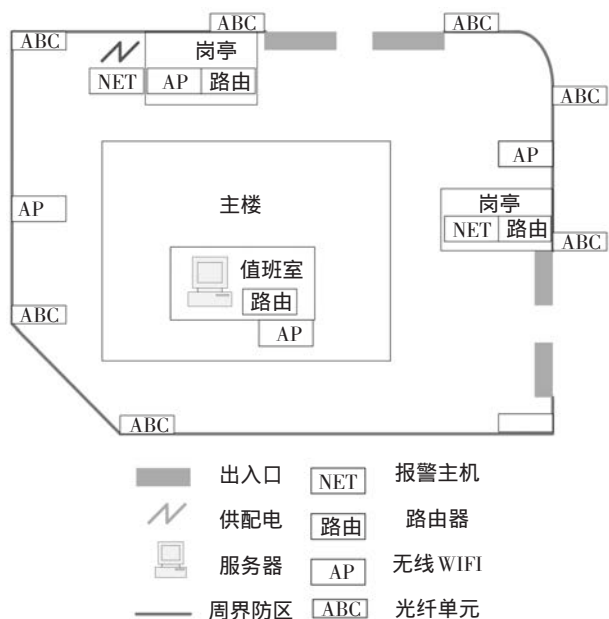


图 10 施工方案原理图

方案如图 10 所示。

服务器位于场地的某监控值班室内,其内部有供电插座解决系统供电,包括服务器主机和网络 AP、路由的供电,同时信号回传至值班室内。在周界的连接处使用 8 个基本报警单元。设计三维地图并画设防区,实现系统联调,防区布设效果如图 11

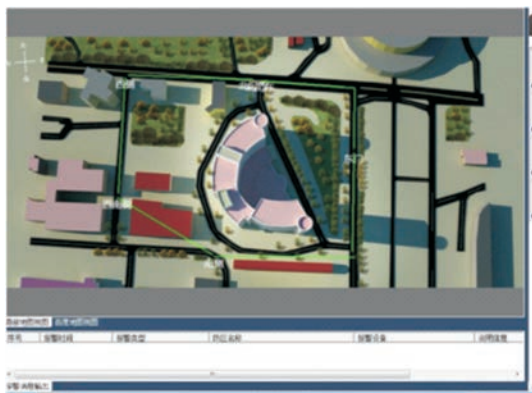


图 11 住地布防图

所示。

系统运行后,实现了周界无死角防控,主要区域实现无线网络覆盖过程,通过固定终端服务器和移动终端 PAD 可以查看周界防控的实时状态,安装

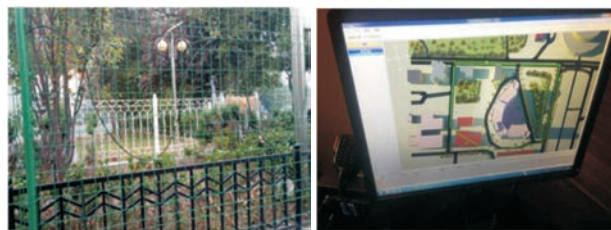


图 12 安装效果和终端使用

效果和终端使用如图 12 所示。

实验表明,系统设计正确、工作稳定,可应用于实际的安保维稳领域。

4 结 论

设计了一种新型智能光纤周界报警系统,详细阐述了系统的设计方案和软硬件设计流程。分析了基于微弱光纤信号的探测处理算法,从频率方面分析了信号处理原理与滤波设计,增强了抗干扰能力。该系统已在某大型安保活动中成功应用,取得了良好效果,其智能化程度高,探测灵敏、具有较高的抗干扰能力及广泛的应用前景。同时,可根据实际情况积累相关不同种类的振动信息,引入机器学习分类技术,进一步增进其算法的识别率与准确度。

参考文献

- [1] 柴天娇.全光纤防区型智能周界监控技术研究[D].天津:天津大学,2016.
- [2] 罗克刚,陈曦.一种周界安全防护系统[P].北京:CN103794010A,2014-05-14.
- [3] 王珏.广域监控技术研究与应用[D].上海:复旦大学,2013.
- [4] 韦统安.基于泄漏电缆传感器的周界入侵探测技术[D].青岛:中国海洋大学,2012.
- [5] 张泉,张子敬.脉冲式电子围栏周界报警系统[J].科技视界,2012(8):137-138.
- [6] 井明川.高清监控网络传输方案设计创新[J].中国安防,2012(Z1):59-64.
- [7] 王建.分布式光纤振动传感系统设计(下载第4页)

计算结果同时以分页数据形式存储在 Excel 文件中。如图 4 所示。

路径长度(km)	观测高度10(ka)	10	20	30	40	50
10	64.21313685	65.65377	66.69732	67.57704	68.24958	
20	59.12258251	61.81698	63.76441	65.17837	66.22031	
30	56.14842383	59.95343	62.46146	64.12769	65.3478	
40	54.22750774	58.85208	61.65011	63.60752	64.96553	

图 4 Excel 文件中存储的各路径下平均透过率

4 结 论

从 HITRAN 2004 数据库中的谱线数据出发,通过基本物理过程的推算和编程计算,可得到不同大气条件下、不同路径和不同波段的光谱透过率数据,为红外探测或干扰系统的设计和仿真提供坚实的数据支持。除了大气之外,也可以用类似的方法计算飞机或导弹喷射的燃气团辐射^[10]。而且燃气辐射和大气衰减这两个模块可以串联使用,具有更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Gerard P Jellison, Herbert J Mitchell, David P Miller. Theory, modeling, and measurements of gas plumes[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5093.
 - [2] Robert J DiStasio, Jr Ronald G Resmini. Atmospheric compensation of thermal infrared hyperspectral imagery with the emissive empirical line method and the in-scene atmospheric compensation algorithms[J]. A Comparison, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010.
 - [3] Rothman L S, Jacquemart D, Barbe A, et al. The HITRAN2004 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer.
 - [4] 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 83-90.
 - [5] Schmutge Thomas, Andrew French, Jerry C Ritchie, et al. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79:189-198.
 - [6] Alan Gillespie, Shuichi Rokugawa, Tsuneo Matsunaga, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4).
 - [7] Filip Neele. Two-colour infrared missile warning sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5787.
 - [8] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 160-161.
 - [9] Pavan V, Royer A. Analysis of temperature emissivity separation (TES) algorithm applicability and sensitivity[J]. Remote Sensing, 2004, 25(1): 15-37.
 - [10] Alexeenko A A, Gimelshein N E, Levin D A. Modeling of flow and radiation in the atlas plume[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2002, 16(1): 1-3.
- (上接第 19 页)
- [8] 陈育智. 智能视频分析技术在周界报警系统中的应用[J]. 自动化仪表, 2009, 30(11): 14-18.
 - [9] 李佳. 被动红外探测技术在报警领域的应用[J]. 中国安防, 2009(7): 45-47.
 - [10] 樊治敏. 一种新型周界防入侵报警设施——张力式电子围栏[J]. 智能建筑与城市信息, 2007(11): 104-106.
 - [11] 张蓉竹, 蔡邦维, 杨春林, 等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 661-664.
 - [12] 申凡, 郑敏, 史东锋, 等. 一种基于互功率谱密度的频域模态识别法[J]. 振动工程学报, 2001, 14(3): 259-262.
 - [13] 邓戈燕, 张锋. 无线结构健康监测传感器网络中的时间序列同步算法[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1296-1300.
 - [14] 李蕾, 葛悉佑, 王静涛. 南极 IGS 基准站时间序列极大似然法分析[J]. 测绘科学, 2016, 41(7): 173-180.
 - [15] 刘珊. 针对 OFDM 系统最大似然同步算法的音频干扰研究[J]. 舰船电子对抗, 2015(1): 54-57.
- (上接第 23 页)
- [7] 王立国, 魏芳洁. 结合遗传算法和蚁群算法的高光谱图像波段选择[J]. 中国图像图形学报, 2013, 18(2).
 - [8] 张海涛, 孟祥羽, 陈虹宇, 等. 利于目标识别的高光谱影像波段选择方法[J]. 计算机科学, 2013, 40(10).
 - [9] 王金玲, 贺小军, 宋克非. 采用区域互信息的多光谱与全色图像融合算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8).
 - [10] 任晓东, 雷武虎, 谷雨, 等. 一种改进的高光谱图像波段选择方法[J]. 计算机科学, 2015, 42(11A).