

基于弱光栅阵列低成本大长周界系统及其报警机制

陶鑫^{1,2*}, 江山^{1,2}, 宋珂^{2,3}

¹武汉邮电科学研究院, 湖北 武汉 430070;

²武汉烽理光电技术有限公司, 湖北 武汉 430070;

³武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 基于弱光栅阵列技术和相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)设计了一种低成本大长周界安防系统。系统利用光栅位置和时分复用技术实现对振动点的定位,依据光栅反射的回光与其两侧光纤的背向瑞利散射光相干涉的原理,解调得到的振动信号信噪比约为 30 dB。使用光栅间距为 5 m 的光缆进行频率为 10~90 Hz 的振动解调测试,解调结果显示,系统具有优秀的频率响应特性。同时,对周界安防报警系统的报警算法进行了测试,测试结果表明,该系统的误报率在 10%以内,漏报率为 0。此系统探测长度可达 50 km,远长于现有的光纤周界产品,而且解调方式简单、成本较低,具有广阔的应用前景。

关键词 光通信; 弱光栅阵列; 干涉; 信噪比; 低成本; 大长周界

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0406001

Low-Cost and Long-Perimeter System Based on Weak Grating Array and Its Alarm Mechanism

Tao Xin^{1,2*}, Jiang Shan^{1,2}, Song Ke^{2,3}

¹Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan, Hubei 430070, China;

²Wuhan Fengli Optoelectronic Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430070, China;

³National Engineering Laboratory for Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract In this study, we design a low-cost and long-perimeter security system using the weak grating array technology and phase-sensitive optical time domain reflectometer. The developed system uses the grating positions and the time-division multiplexing technique to precisely locate the external vibration points. The signal-to-noise ratio of the demodulated vibration signal is approximately 30 dB according to the principle of interference between the reflected light of the grating and the back Rayleigh scattering light of the two sides of the fiber. Herein, we use a fiber optic cable with a 5-m grating spacing to demodulate the vibration having a frequency of 10~90 Hz, and the demodulated results prove the excellent frequency response characteristics of the system. Meanwhile, the alarm algorithm of the proposed perimeter security alarm system is verified. The test results prove that the false alarm rate of the system is less than 10% and that the missing alarm rate is 0. The developed system has a maximum detection length of 50 km, which is considerably larger than those of the existing optical fiber perimeter products, and the demodulation method is simple and cheap; therefore, it has a broad application potential.

Key words optical communications; weak grating array; interference; signal to noise ratio; low cost; big long perimeter

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 260.3160

1 引 言

武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室研

究基于弱光栅(WFBG)阵列的传感技术已经十余年,在线制备弱光栅阵列技术已趋于成熟,实验室目前可以在一条光纤上刻写上万个弱光栅,且在基于

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-11-05; 录用日期: 2019-11-28

基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFB439)、湖北省科技支撑计划项目(2014BEC059)

* E-mail: tr1052127268@qq.com

弱光栅阵列的传感技术及其解调技术方面均处于国内领先的水平。基于弱光栅阵列的传感系统以其与生俱来的高灵敏度等优势,使得系统的解调及数据处理更为简单,解调系统成本更低,也使得低成本、大范围、高精度、高动态范围的分布式测量变为现实。目前,基于弱光栅阵列的测温系统在武汉烽理光电有限公司的研发推广下已被大范围应用,振动测量系统也趋于成熟,正在部分项目上试使用,基于弱光栅阵列的周界系统就是应用之一。

1993年,Taylor等提出相位敏感的光时域反射(Φ -OTDR)技术,利用后向瑞利散射光之间的干涉,使得传感系统的灵敏度比传统OTDR系统更高,传感系统的空间分辨率为400 m,信噪比(SNR)约为3.3 dB^[1]。2018年,武汉烽理光电技术有限公司在 Φ -OTDR的基础上,利用弱光栅阵列作为传感单元,研发出了光栅DAS(distributed acoustic sensing)系统,能用于还原声音。

随着经济社会的大发展和智慧城市建设的逐步推进,人们对公共安全越发重视,安防产品的需求大幅度增加^[2]。目前,市场上基于光纤传感的周界安防产品有着盲区多、施工麻烦、误报漏报率较高、价格较贵等缺点。现有产品主要分为两大类:一类是以光纤光栅为代表的周界安防系统,将振动信号施加于光纤布拉格光栅(FBG)传感器上,相应FBG的中心波长发生偏移,通过检测对应FBG反射光的中心波长的变化,还原出施加给传感器的振动信号,然后进行分析、识别、报警处理等操作^[3-5];另一类是基于 Φ -OTDR的分布式光纤振动传感系统,该系统使用的是窄带光源,振动施加于传感光纤造成光纤折射率变化,进而使得传感光纤两侧的两束瑞利散射回光的光程差发生变化,于是相邻传感段的后向瑞利散射光的干涉强度也随之发生变化,根据干涉后的光,利用光电转换和解调算法还原出振源信号^[6-7],最后进行报警分析。

基于FBG波长解调的振动探测系统使用的是强光栅,解调系统的一个通道只能携带几十个(一般20个左右)传感器,通过调节相邻传感器的间距来调节系统覆盖范围,一般监控范围只有几百米。而基于 Φ -OTDR的周界系统的信噪比较低,当探测长度达到几千米时信噪比急剧下降且误报率增大,并且这种系统的结构复杂、成本高昂。本文针对上述现有产品的缺陷,结合弱光栅阵列技术和 Φ -OTDR技术,设计并搭建了一套基于弱光栅阵列的周界系统,并对其进行频率特性测试和安防功能验证。此

系统相对于高灵敏度的 Φ -OTDR系统而言解调更简单,成本大幅降低,相比其他周界系统具有覆盖范围广、布设简单、扩展性强、实时性高、智能识别率高和便携性强等优点,且能多点同时监控。

2 低成本周界系统

2.1 低成本周界系统原理

基于弱光栅阵列的周界系统主要利用的是光栅的反射光强于后向瑞利散射光的特性。武汉理工大学光纤传感中心和武汉烽理光电技术有限公司联合研发的基于光栅阵列的DAS系统的信噪比高达80 dB,理论上可达上百分贝。将如此高灵敏度的系统用作周界产品,一来成本过高,二来信号容易满量程使得周界系统报警误报率较高。基于以上考虑,本课题组设计了一种灵敏度相对DAS系统更低的周界产品。图1是光栅阵列传感单元示意图,光栅在拉制光纤之前就已经刻写上去,图中 K 表示第 K 个光栅, Λ 表示光栅的栅格周期。图2(a)和图2(b)分别是基于光栅阵列的DAS系统原理图和低成本周界系统原理图,图中FRM为法拉第旋光镜。如图2(a)所示,窄线宽光源(线宽小于3 kHz)发射连续光经FPGA(field-programmable gate array)的脉冲调制模块作用后以脉冲光的形式注入EDFA(erbium doped fiber amplifier),然后进入环形器C1,环形器C1的一端接有光栅阵列,传感光纤光栅阵列的回光(即信号光)从C1的out端口输出,信号光从C1输出后通过一个8 nm滤波器再次进入环形器C2,最后注入干涉光路后被三个光电探测器(PD)转换成电压信号^[8-9]。信号最后经由采集卡AD(模数)转换成数字信号,通过usb3.0上传到工控机进行解调和模式识别处理。

图3(a)和图3(b)分别是基于光栅阵列的DAS系统干涉原理示意图和低成本周界系统干涉原理示意图。如图3(a)所示,基于弱光栅阵列的DAS系统是相邻两个光栅回光进行干涉,从而解调出振动造成的相位变化。如图3(b)所示,低成本周界系统是弱光栅反射光与光栅前后散射点的背向瑞利散射光进行干涉,从而解调并还原出传感区的振动情况。为了方便理解,将WFBG前后的传感区域简化成 $A \sim N$ 共14个散射点,每个散射点散射回来的脉冲强度比弱光栅的反射光光强弱15 dB左右。取光栅反射脉冲光的中点到达光电探测器的时间为 T_0 时刻,与此同时环形器中有 $B \sim M$ 共12个散射点散射回来的脉冲光,其中散射点 B 的脉冲

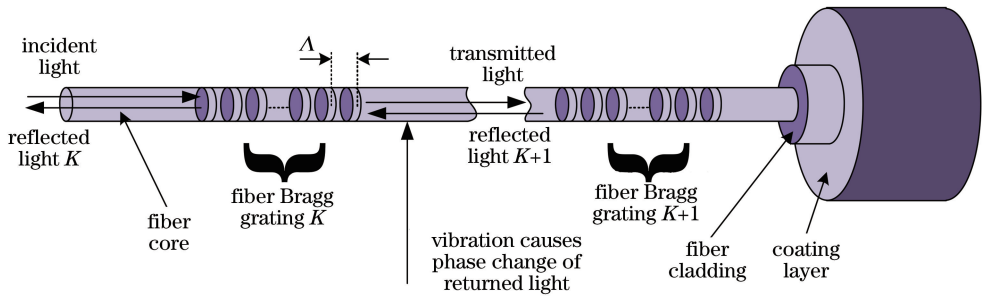


图 1 光栅阵列传感单元示意图

Fig. 1 Schematic of sensor unit of grating array

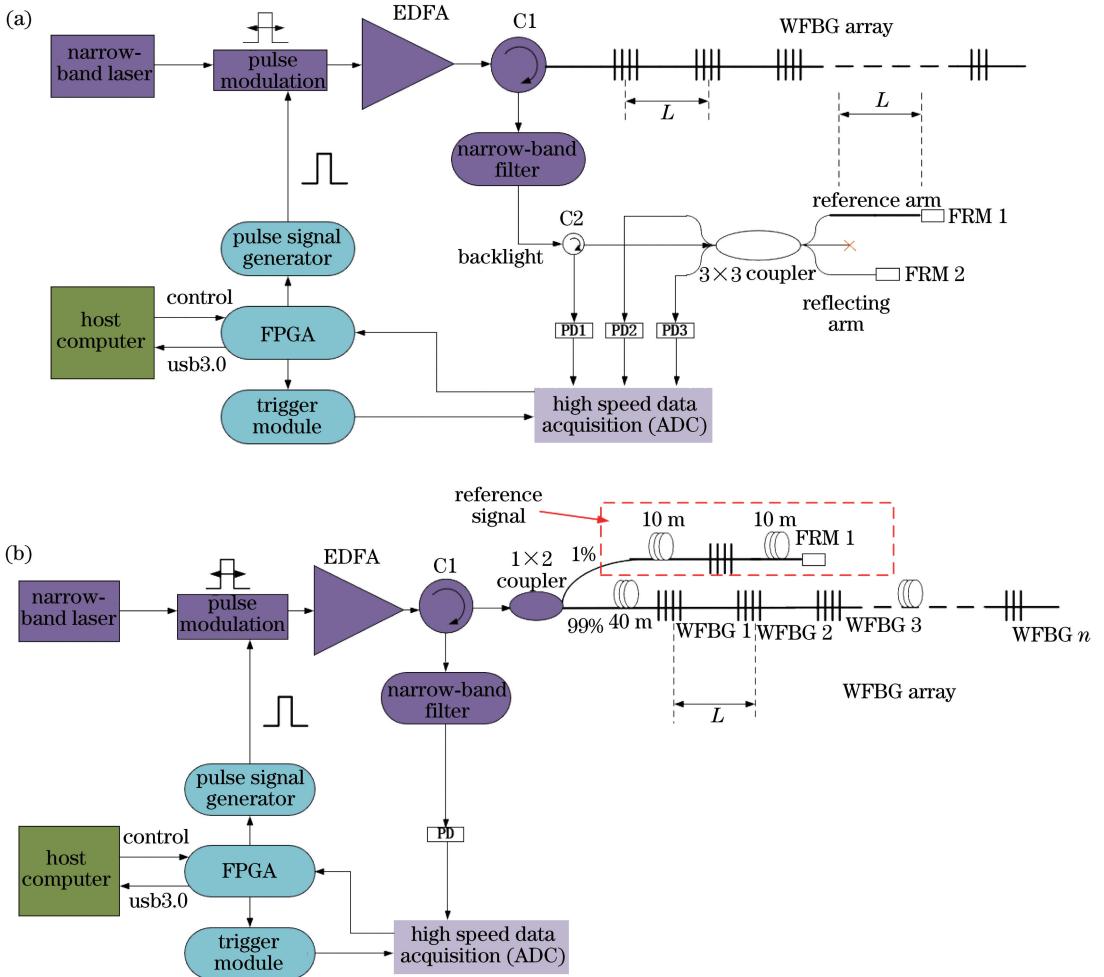


图 2 系统原理图。(a)基于光栅阵列的 DAS 系统;(b)低成本周界系统

Fig. 2 System schematics. (a) DAS system with grating array; (b) low-cost perimeter system

回光是下降沿到达, M 的脉冲回光是上升沿到达。所以, AB 段光纤受到的振动在 T_0 时刻是反映不出来的。当 BC 段光纤受到振动干扰时, 散射点 $C \sim M$ 的背向散射光和光栅反射光的光程均发生相同的变化(都增加或减少), 从而使得 $C \sim M$ 的背向散射光及光栅的反射光叠加后再与 B 点回光的干涉的强度发生变化; 同理, FG 段发生振动时, R_f 和 R_b 的光程差发生变化(记 $G \sim M$ 点和光栅的回光叠加

后的光场为 R_f , $B \sim F$ 点的回光叠加后的光场为 R_b), 使得两者到达光电探测器时的干涉光强度发生变化。

由图 3(b)可知, T_0 时刻到达光电探测器的光强是 $B \sim M$ 点及光栅的回光共同干涉的结果。 BC 段受到干扰, $C \sim M$ 点及光栅的回光相位发生变化; FG 段受到干扰, $G \sim M$ 点及光栅的回光相位发生变化; LM 段受到干扰时, 只有 M 的回光相位发生

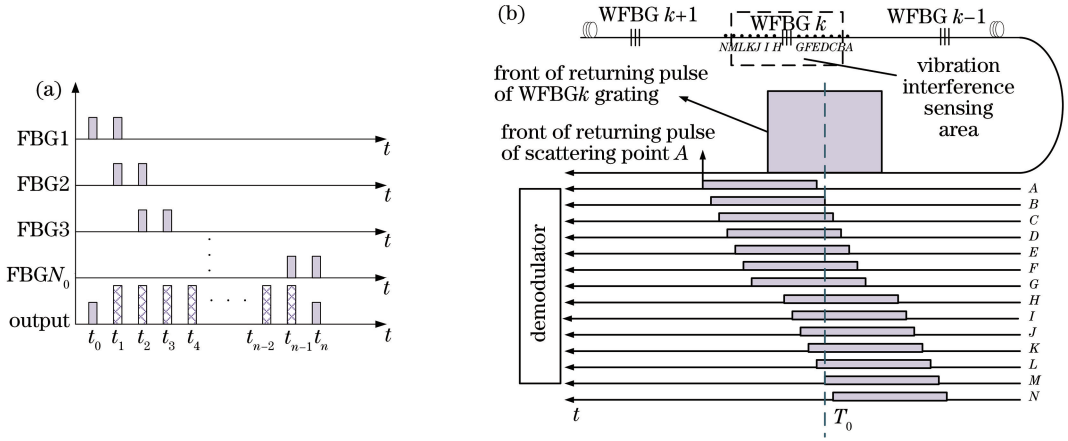


图 3 系统干涉原理图。(a) DAS 系统；(b)低成本周界系统

Fig. 3 Interference principles of systems. (a) DAS system; (b) low-cost perimeter system

变化。从而可知：越往两边，回光相位发生相对变化的点的数量越少；越往中间，回光相位发生相对变化的点的数量越多。即越靠近光栅点，系统对振动灵敏程度越强，越远离光栅点，对振动灵敏程度越低。

当脉冲宽度为 $Q\Delta L$ (Q 为一个传感区域的近似散射点总和) 时，只考虑瑞利散射，则距离环形器 $m\Delta L$ 处的干涉结果为^[10-11]

$$E_R(m\Delta L) =$$

$$E_0 \sum_{k=m}^{m+Q+1} [p_k r_k \exp(j\theta_k + j\varphi_k) \exp(-ak\Delta L)], \quad (1)$$

式中： ΔL 为两个光栅间距； E_0 为干涉后光强的幅值； p_k 、 r_k 和 φ_k 分别为第 k 个背向散射光的偏振态、反射率和初始相位，三者均是随机变量； a 为单个散射点的背向散射光的强度； m 为第 m 个光栅； θ_k 为振动引起的第 k 个背向散射点的相位变化。只考虑光栅反射光时，到达环形器的光栅阵列的反射光的光场可表示为^[12]

$$R_{\text{FBG}}(t) =$$

$$\sum_{m=1}^Q \{E_0 R_m \exp[j(\omega t + 2n_{\text{eff}} k_0 L_m)]\} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right), \quad (2)$$

式中： R_m 为第 m 个光栅的反射率； ω 为光的频率； t 为时间； n_{eff} 为纤芯有效折射率； k_0 为真空中波数； L_m 为第 m 个光栅与环形器的距离； W 为脉宽； τ_m 为第 m 个光栅回光相对于第一个光栅回光的时延； $\text{rect}(\ast)$ 为矩形函数，当 $0 \leq [(t - \tau_m)/W] \leq 1$ 时， $\text{rect}\left(\frac{t - \tau_m}{W}\right) = 1$ 。

则可知在 T_0 时刻，传感区域回光的干涉结果为

$$E_b = E_R + E_{\text{FBG}} = E_0 \sum_{k=1}^Q \{R_k \exp[j(\theta_k + \varphi_k)]\} + E_0 R_{\text{FBG}} \exp[j(\theta_{\text{FBG}} + \varphi_{\text{FBG}})], \quad (3)$$

式中： E_R 为瑞利散射部分光场； E_{FBG} 为光栅部分光场； R_k 为瑞利散射部分与相位无关的定值部分（假设每个瑞利散射点的反射率、偏振态及折射率都一样）； R_{FBG} 为光栅反射部分与相位无关量相乘得到的定值； φ_k 、 θ_{FBG} 分别为散射点、光栅的回光的原始相位； θ_k 、 φ_{FBG} 分别为振动造成的散射点和光栅的回光的相位变化量。

则瞬时功率 P_b 也即 T_0 时刻光电探测器的输出电流为

$$I_{\text{PD}} = R_D E_0^2 \left\{ \sum_k^Q (p_k^2 \gamma_k^2) + 2 \sum_{k=1}^Q \sum_{l=k+1}^Q [p_l p_k \gamma_l \gamma_k \cos(\varphi_{lk} + \phi_{lk})] \right\}, \quad (4)$$

式中： R_D 为光电探测器的响应度； φ_{lk} 为因振动造成的第 l 和第 k 个散射点回光的相位差； p_k 为第 k 个散射点的偏振态； γ_k 为第 k 个后向瑞利散射光的幅值。将 E_{FBG} 视为瑞利散射回光的一部分，只不过比单个瑞利散射强，即当式中 $k = \frac{M}{2}$ 时，背向瑞利散射光被光栅反射光代替，则相当于在基于光纤的 Φ -OTDR 系统中每隔 5 m 加个反射镜，所以此系统的信噪比比传统 Φ -OTDR 强得多。

2.2 系统参数设定

注入弱光栅阵列的一束脉冲，在遇见每个光栅都会反射一部分回来，光栅间距基本恒定，所以返回来的脉冲时间间隔基本恒定。对于 5 m 间距的光栅阵列光纤，返回来的两束脉冲时间间隔为 50 ns。要使系统解调更容易，传感特性更好，就需要两个光

栅的反射脉冲不互相叠加,即脉宽宽度不能太大,但是脉宽宽度太小又会影响传感系统的空间分辨率和灵敏度,太窄的脉宽会达到采集卡的极限,量化误差就会非常严重,这里采集卡的采样频率为250 MHz,要保证至少一个脉宽有4个对应的AD值,则脉宽应不小于16 ns。所以脉冲宽度 W 满足

$$16 \text{ ns} < W < 2\Delta L n_{\text{eff}}/C, \quad (5)$$

式中: n_{eff} 为光纤有效折射率; C 为真空中的光速。

在大部分周界安防应用场合,环境噪声集中在100 Hz 以内,入侵造成的振动信号频率一般在100~300 Hz,所以1 kHz 的采样频率基本能够满足安防功能,即采集卡的脉冲周期为1 ms。因此为了保证最后一个传感光栅的反射光能到光电探测器,系统最大探测长度 $L \leq \frac{T \cdot C}{2 \cdot R \cdot n_{\text{eff}}}$,其中 R 为数据处理时累加次数, T 为脉冲周期。在 $R=1$ 的时候, $L=100 \text{ km}$,即系统理论能探测长达100 km 的距离,能满足绝大部分场合对于监控的需要。解调仪为2通道输出且 $R=4$ 时,两个通道均能探测25 km,即累加次数为4时双通道解调仪表也能探测近50 km 的距离。

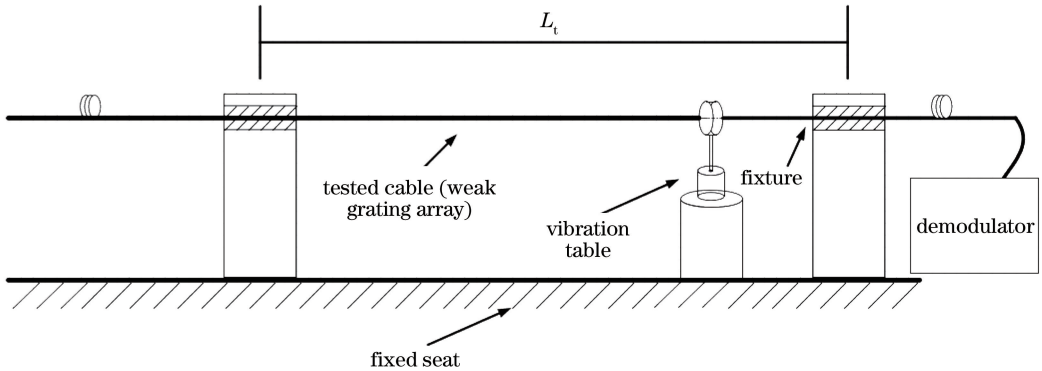


图4 频率响应测试试验台示意图

Fig. 4 Schematic of frequency response test bench

图5到图10为振动频率分别为10、20、50、60、80、90 Hz 情况下系统解调出来的原始波形及其傅里叶变换(FFT)频谱图。

为了验证解调系统的线性度,将振动台的可调驱动电压分别设置为1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 mV,并在不同驱动电压下均进行10~90 Hz 扫频振动,对解调结果进行归一化处理,取10、50、90 Hz 时的响应作图并观察系统解调的信号强度的线性度,结果如图11所示。由图11可以看出系统解调的线性结果较好,需要注意的是,这种振动实验会产生驻波,所以振动台的夹具最好在光缆的光

此次实验所用光栅的反射率为万分之三左右,回光经EDFA放大后,再通过光电探测器转化为电压信号,电信号的幅值刚好适应采集卡的输入量程。因为采用的是5 m 间距的光栅阵列光缆,故传感的空间分辨率为5 m。当脉宽设置为10 ns 时,每个光栅左右各1 m(共2 m)的区域为振动传感区域;当脉宽为20 ns 时,振动传感区域共为4 m。

3 周界系统响应测试及实验结果

3.1 系统频率响应测试

频率响应是系统的关键性能指标,也是振动探测、安防报警及模式识别的基础,良好的频率响应特性有利于更好、更真实地还原振动信号,系统的应用场合也会更加广泛。

为了测试解调系统的频率响应特性,将光缆拉直置于振动台并用夹具固定,解调仪置于振动台首端,频率响应测试试验台示意图如图4所示,其中 L_1 为20 m。振动台的振动频率设置为10~90 Hz,驱动电压设置为1.5 mV,观察不同频率、相同幅度下系统解调出来的频谱图,并观察相同频率、不同幅度下系统响应的线性度。

栅处,不然采集的数据会因波节的变化而产生奇异点。

3.2 周界安防响应测试

为了测试该低成本大范围长距离周界系统对实际环境的探测能力,在室外搭建了一个实验环境,如图12所示。将弱光栅阵列光缆置于墙体下端,使用走线卡将探测光缆与墙体紧贴并固定,测试墙体长度为15 m,约有三个传感光栅在测试墙体段,敲击处距振动光缆的垂直距离为2 m,实验时人为敲击墙体顶端4下,模拟正常人攀爬的力度,观察周界系统的响应。图13是墙体敲击实验时系统探测的信

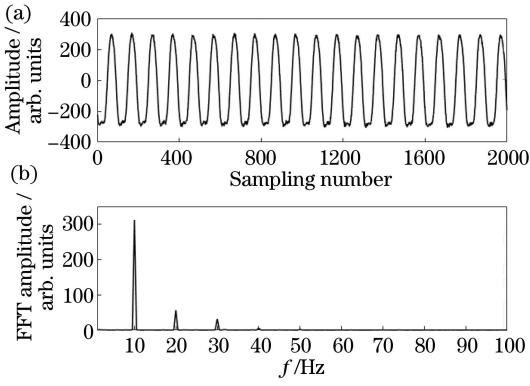


图 5 系统对 10 Hz 振动解调效果。

(a)原始波形;(b) FFT 频谱

Fig. 5 Demodulation effect of the system on 10 Hz vibration.

(a) Time domain; (b) FFT spectrum

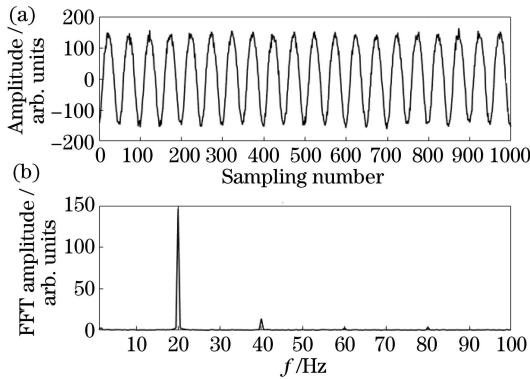


图 6 系统对 20 Hz 振动解调效果。

(a)原始波形;(b) FFT 频谱

Fig. 6 Demodulation effect of the system on 20 Hz vibration.

(a) Time domain; (b) FFT spectrum

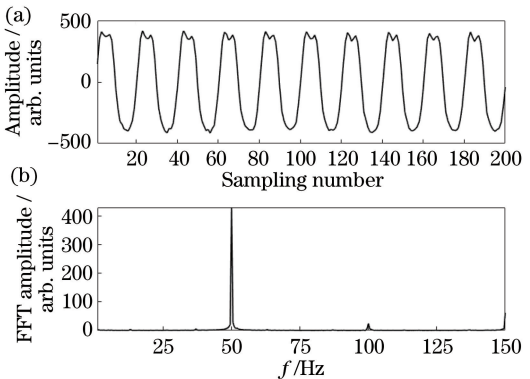


图 7 系统对 50 Hz 振动解调效果。

(a)原始波形;(b) FFT 频谱

Fig. 7 Demodulation effect the system on 50 Hz vibration.

(a) Time domain; (b) FFT spectrum

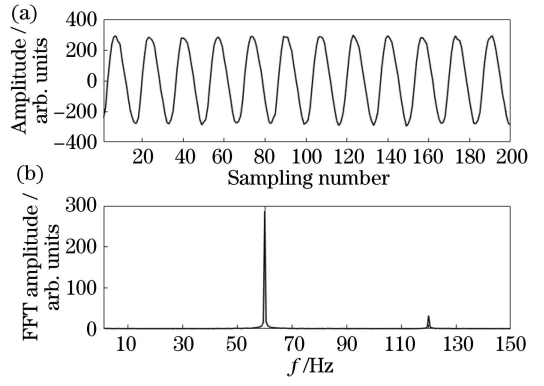


图 8 系统对 60 Hz 振动解调效果。

(a)原始波形;(b) FFT 频谱

Fig. 8 Demodulation effect of the system on 60 Hz vibration.

(a) Time domain; (b) FFT spectrum

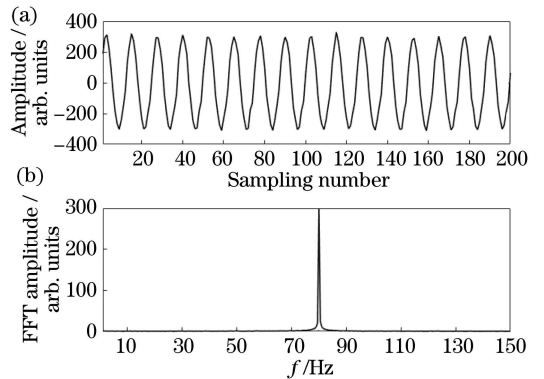


图 9 系统对 80 Hz 振动解调效果。

(a)原始波形;(b) FFT 频谱

Fig. 9 Demodulation effect of the system on 80 Hz vibration.

(a) Time domain; (b) FFT spectrum

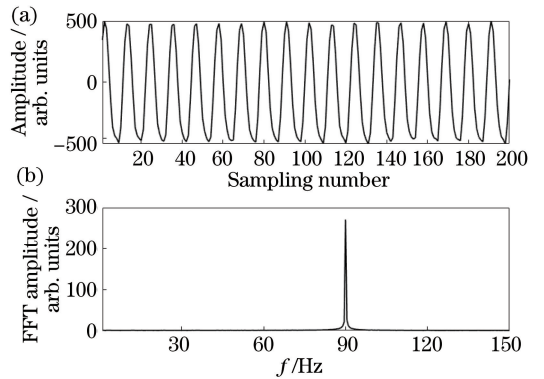


图 10 系统对 90 Hz 振动解调效果。

(a)原始波形;(b) FFT 频谱

Fig. 10 Effect of the system on 90 Hz vibration demodulation.

(a) Time domain; (b) FFT spectrum

号的时域图,可以看出,系统解调后的信号中有着频率极低的信号。经截止频率为 2 Hz 的高通滤波后的信号如图 14 所示。滤波后的信号就可以进行归一化等处理。图 15 是原始信号的短时傅里叶变换

(STFT)频谱图,当有敲击冲击时 STFT 频谱图上的高频段就比较明显。

取一根 2.4 km 的光缆,根据光缆上的米标取 7 个试验段(对应米标分别为 200, 500, 800, 1100,

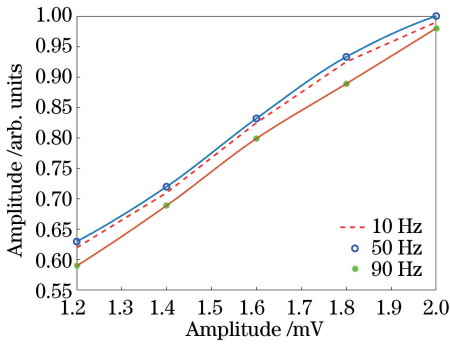


图 11 系统线性度测试结果

Fig. 11 System linearity test results

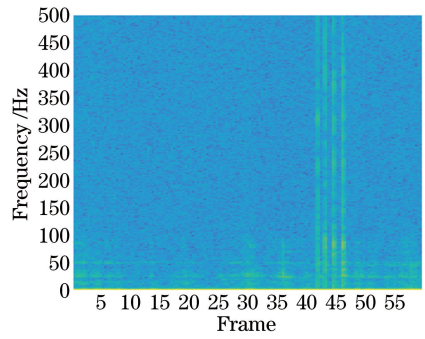


图 15 敲击信号的 STFT 频谱图

Fig. 15 STFT spectrum of knock signal

表 1 系统对不同长度传感光缆解调的信噪比

Table 1 SNR of system demodulation for sensing cables with different lengths

Group of experiment	Logo of length /m	SNR /dB
1	200	30.51
2	500	30.54
3	800	29.98
4	1100	29.52
5	1400	29.29
6	1700	27.46
7	2000	25.85

更一般地,为了模拟实际应用场景,将测试光缆进行挂网安装,实验场景如图 16 所示,测试结果也显示此系统满足大长周界安防使用条件,且系统信噪比高。



hanging treatment

图 16 周界振动光缆挂网实验示意图

Fig. 16 Schematic of girth-vibration fiber optic cable hanging network experiment

3.3 系统报警方案

本文所设计的系统作为一款低成本大长周界安防产品,可满足多种场合需求,如大院挂网、墙体紧贴、地下埋敷等,对应的数据处理方式、计算复杂度以及报警逻辑均有所区别。以挂网型为例,由于探测系统的灵敏度较大,在这种安装方式下噪声对其影响也比较大,在大风大雨天气下人为破坏的振动信号会淹没在环境噪声中,于是就需要利用盲信号分析、模式识别、神经网络等技术对信号进行智能提取和识别,以降低系统误报率^[13-15]。具体数据处理流程如图 17 所示。



knock on the edge of the wall vibration fiber optic cable

图 12 墙体测试环境示意图。(a)认为敲击的地方;
(b)实验光缆敷设的地方

Fig. 12 Schematics of wall test environment. (a) Place where people knock; (b) place where optical cable is laid

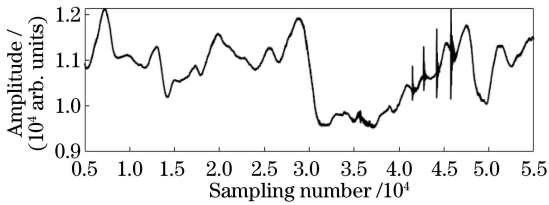


图 13 敲击原始信号的时域图

Fig. 13 Time domain diagram of original knock signal

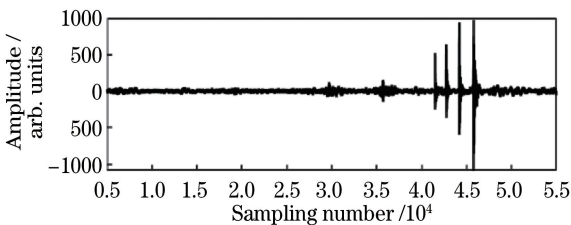


图 14 敲击信号经高通滤波后的时域图

Fig. 14 Time domain diagram of knock signal after high-pass filtering

1400, 1700, 2000 m), 将米标前后 10 m 的光缆作如图 12 的场景布置,每段测试光缆均进行 30 次(记为一组)敲击实验,分析信噪比并取平均值,结果如表 1 所示。从表 1 可以看出系统信噪比一般在 30 dB 左右,沿光缆远离解调系统信噪比会有少许降低,但是对信号处理而言已经足够大。

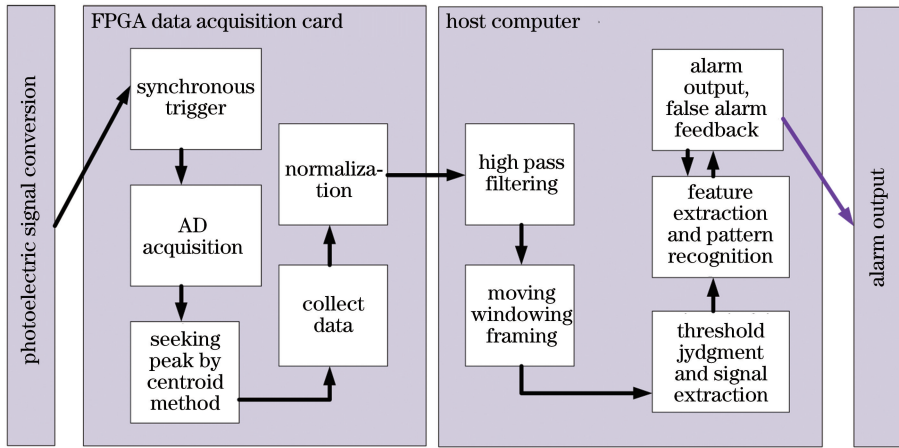


图 17 周界系统数据处理框图

Fig. 17 Data processing block diagram of perimeter system

为了验证系统算法软件的可靠性和报警功能，特对埋地的应用场景进行报警测试，统计漏报率和误报率，其中有人在周围走动和机器挖掘等行为即报警，风雨等不报警。统计结果如表 2 所示，包含 200 次人为主动干扰，分为淋水（模拟下雨）和正常环境两种场景，每种场景分两组，每组实验时间间隔 1 周。可以看出：4 组实验漏报率均为 0，淋水的时

候误报率更高一点，是因为淋水的冲击信号比较随机，有时候的原始信号相关特征与人行走类似。非淋水时的误报经分析是因为距实验场地几十米左右处有马路，当大型车辆经过时其部分振动信号也和人行走的信号类似。经过实地实验测试，系统无漏报、少漏报，满足相关指标要求，但是误报存在的问题需要通过继续优化算法来逐步解决。

表 2 系统报警统计

Table 2 Alarm statistics of the system

Group of the experiment	Experimental environment	Time of test	Non-response rate / %	False-alarm rate / %
1	Sprinkling water	50	0	6
2	Sprinkling water	50	0	8
3	Nothing	50	0	2
4	Nothing	50	0	2

4 结 论

本文设计并搭建了一款基于弱光栅阵列的大长周界系统，解调原理比 Φ -OTDR 系统更简单，且系统成本更低。选用光栅间隔为 5 m、长度为 2 km 的光缆进行频率响应实验，驱动频率为 10~90 Hz，结果显示本文系统具有较好的频率响应特性，且具有较好的线性度。进行了实际场景测试和处理，验证了系统具有较大信噪比和算法可靠性。此周界系统的采样频率为 1 kHz，满足绝大部分周界安防实际需求，而且在拉制光纤时就已将光栅刻入其中，能连续布防 50 km 长的区域，具有广阔应用前景。

参 考 文 献

[1] Wang D W, Feng H, Yang Y, et al. Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology

[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 830-837.

王大伟, 封皓, 杨洋, 等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 830-837.

[2] Sun H. Research on signal recognition technology in optical fiber security system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019: 1-2.

孙辉. 光纤安防系统中信号识别技术的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019: 1-2.

[3] Rao Y, Lobo Ribeiro A, Jackson D, et al. Simultaneous spatial, time and wavelength division multiplexed in-fibre grating sensing network [J]. Optics Communications, 1996, 125(1/2/3): 53-58.

[4] Ecke W, Latka I, Willsch R, et al. Fiber optic sensor network for spacecraft health monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 974-980.

- [5] Chen Z P, Hu M, Li B, et al. Intelligent perimeter security system based on FBGS array technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(10): 121-123, 136.
陈兆鹏, 胡明, 李斌, 等. 基于光纤 Bragg 光栅传感器阵列的智能周界安防系统[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(10): 121-123, 136.
- [6] Shi Y, Wang Y Y, Zhao L, et al. An event recognition method for Φ -OTDR sensing system based on deep learning[J]. Sensors, 2019, 19(15): 3421-3422.
- [7] Ye G Y, Jiang Y. Low-cost distributed fiber optic sensor for perimeter security [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(2): 90-93.
叶贯宇, 江毅. 一种低成本的分式光纤周界预警系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 90-93.
- [8] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, et al. Distributed vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210001.
刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的分式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210001.
- [9] Wang Y M, Gong J M, Dong B, et al. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2751-2756.
- [10] Li W, Zhang Y J. Enhanced phase sensitive optical time-domain reflectometer vibration sensing system based on weak grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0810001.
黎威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0810001.
- [11] Zhang L. Research of optical fiber sensing technology based on phase sensitive optical time domain reflectometer[D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2018: 10-11.
张良. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2018: 10-11.
- [12] Wang Y. Study on the optical fiber vibration sensing technology based on Φ -OTDR [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 26-27.
汪豫. 基于 Φ -OTDR 的光纤振动传感关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 26-27.
- [13] Ding S F, Su C Y, Yu J Z. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm [J]. Artificial Intelligence Review, 2011, 36(2): 153-162.
- [14] Yang J G. Research on signal to noise ratio enhancement and pattern recognition method of Φ -OTDR distributed optical fiber sensing system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 23-33.
杨经国. Φ -OTDR 分式光纤传感系统信噪比增强与模式识别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018: 23-33.
- [15] Chen P C, You C T, Ding P F. Pattern recognition of intrusion events in perimeter defense areas of optical fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1006001.
陈沛超, 游赐天, 丁攀峰. 光纤周界防区入侵事件的模式识别研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1006001.