

激光与光电子学进展

基于相位敏感光时域反射计的语音与脚步振动信号监测系统研究

孙文达, 郑晶*, 孙远

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 基于分布式光纤传感技术在周界安防领域广阔的应用前景,对振动信号在单模光纤上的调制机理和解调原理进行了详细的推导和分析,构建了一套基于相位敏感光时域反射计的分布式声波传感器(DAS)系统,设计了完整的压电陶瓷振动信号检测实验和语音与脚步信号检测实验,通过移动差分求和与正交解调算法实现振动信号的强度解调和相位解调。在语音检测实验中采用铁质半封闭空心圆柱体提高了光纤对声波的灵敏度,对原始语音和复现语音做了平均主观意见值调研来验证语音信号的质量,在时域和频域对 DAS 系统采集的脚步信号进行了分析和解释,同时将单个脚步信号的相关特征进行提取说明。实验证明,本系统能在传输距离为 2 km 时实现复杂的语音和脚步信号检测,空间分辨率可达 2.2 m,能较好地用于周界安防中的语音与脚步监测。

关键词 分布式光纤传感; φ -OTDR; 正交解调; 平均主观意见值; 周界安防

中图分类号 TN29 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP222964

Voice and Footstep Signal Monitoring System Based on Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer

Sun Wenda, Zheng Jing*, Sun Yuan

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China

Abstract Based on the broad application prospect of distributed optical fiber sensing technology in the field of perimeter security, the modulation mechanism and demodulation principle of vibration signals on single-mode optical fiber are deduced and analyzed in detail, and a set of distributed acoustic sensor (DAS) system based on phase sensitive time domain reflectometer is constructed. A complete piezoelectric ceramic vibration signal detection experiment and voice and footstep signal detection experiment are designed. The intensity and phase demodulation of vibration signals are realized by moving difference summation and orthogonal demodulation algorithm. In the voice detection experiment, the sensitivity of optical fiber to sound waves is improved by using an iron semi-closed hollow cylinder. The subjective mean opinion value survey of the original voice and the repeated voice is made to verify the quality of the speech signal. The footstep signals collected by DAS system are analyzed and interpreted in the time domain and frequency domain, and the relevant features of the single-step signal is extracted and explained. The experiments prove that this system can realize complex voice and footstep signal detection in the transmission distance of 2 km, and the spatial resolution can reach 2.2 m, which can be well applied to voice and footstep monitoring in the perimeter security.

Key words distributed optical fiber sensing; φ -OTDR; orthogonal demodulation; mean opinion score; perimeter security

1 引言

分布式光纤传感技术作为光纤传感技术的一个重要分支,相比于传统的电学传感技术,具有抗电磁干

扰、防雷击、耐腐蚀、体积小、可实现大范围时空分布式监测和高隐蔽性等优点^[1-4]。在周界安防领域,随着人们安全意识的提高以及科学技术的发展,红外对射、电子围栏和静电感应电缆等传统安防技术的弊端逐渐显

收稿日期: 2022-11-03; 修回日期: 2022-12-21; 录用日期: 2022-12-29; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3090302)、中央高校基本科研业务费(2021JCCXDC02)

通信作者: *zhengjing8628@163.com

现,分布式光纤传感技术在该领域展现出巨大的应用价值和前景^[5]。

分布光纤传感技术被提出以来,国内外学者对其在周界安防的应用做了大量的研究工作:2007年, Juarez等^[6]利用相位敏感光时域反射计(φ -OTDR),以步行者和附近道路上的行驶车辆为测试对象,对沙漠地区的入侵信号进行实时检测和定位,充分验证了分布式光纤传感技术在该领域的可行性;2013年,李玉等^[7]提出了一种将分布式光纤传感技术定位功能和视频监控相结合的新思路,实现了入侵事件的快速定位和精准摄录;2015年,中国电子科技集团50所研发出一种空间分辨率可达10 m的基于 φ -OTDR的分布式栅栏周边入侵监测系统^[8],提高了安防监控精度;2020年,陶鑫等^[9]结合弱光栅阵列技术和 φ -OTDR设计了一种低成本大长周界安防系统,推动着分布式光纤传感技术在公共安全中的进一步应用。

由于大部分周界安防系统的研究对象是人类活动,而人类产生的声波和脚步振动会对光纤产生压力并改变光纤的折射率和长度,因此说话声和脚步声都可以通过分布式光纤传感技术采集。基于人工智能识别技术即可从采集的信号中提取代表不同人员的特殊信息^[10-11],可以实现精准的安防监控,因此基于分布式

光纤传感技术的语音与脚步信号采集研究对该技术在周界安防领域的发展有积极的推动作用。

2 系统工作原理

2.1 系统结构

在分布式声波传感器(DAS)系统中,超窄激光光源(coherent laser)发出波长为1550 nm的连续光,3 dB光纤耦合器1(coupler 1)将该连续光分为光功率比为10:90的2组连续光,其中,光功率占比为90%的连续光输入到光调制器(AOM),光功率占比为10%的连续光作为本振光进入光纤耦合器2(coupler 2)。采集卡发出的电脉冲经光调制器驱动(AOMD)放大后输入AOM,AOM把连续光调制成与电脉冲频率一致的脉冲光,脉冲光经脉冲放大器(EDFA)放大后再从环形器(CIR)进入光纤。光纤中反射回来的瑞利散射光通过环形器进入分光比为50:50的3 dB光纤耦合器2并与本振光发生干涉产生拍频信号,平衡探测器(BPD)将拍频信号转换成电信号,数据采集卡(DAQ)对电信号进行模数转换,然后通过高速串行计算机扩展总线将数据保存至PC机。基于 φ -OTDR的语音与脚步信号检测系统结构如图1所示。

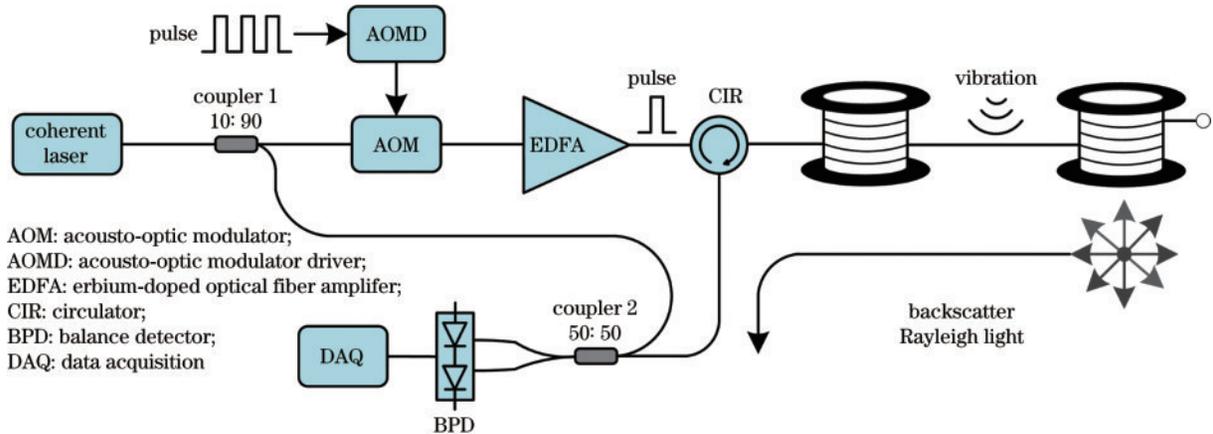


图1 基于 φ -OTDR的语音与脚步信号检测系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of voice and footstep signal detection system based on φ -OTDR

2.2 信号调制原理

振动信号作用在光纤上时,会导致光纤的折射率、直径和长度发生改变,在光纤中传播的光波相位随之变化。设光波沿光纤传播长度为 L 的距离,光波的相位 Φ ^[12]为

$$\Phi = \frac{2n\pi L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: n 为光纤折射率; λ 为光波波长。当光纤的长度和折射率在振动信号的作用下发生改变时,光波相位的变化量为

$$\Delta\Phi = \frac{2n\pi}{\lambda} \cdot \Delta L + \frac{2L\pi}{\lambda} \cdot \Delta n, \quad (2)$$

式中: ΔL 和 Δn 分别为光纤长度的变化量和光纤折射

率的变化量。由式(2)可知,光波相位的变化量由 ΔL 和 Δn 决定,根据弹光效应^[13-14]

$$\Delta n = \frac{n^3 F}{2E} [(1-\mu)p_{11} + (1-3\mu)p_{12}], \quad (3)$$

$$\Delta L = \frac{2L\mu F}{E}, \quad (4)$$

式中: F 为振动波对光纤产生的压力; E 为光纤的杨氏模量; μ 为光纤泊松比; p_{11} 和 p_{12} 为弹光系数矩阵分量。将式(3)和式(4)代入式(2)可得光波相位变化量

$$\Delta\Phi = \frac{\pi L P}{\lambda E} [n^3(1-\mu)p_{11} + n^3(1-3\mu)p_{12} + 4n\mu], \quad (5)$$

因此作用在光纤上的振动波可以被调制成光波的相位变化量。

3 信号解调原理

将输入到耦合器 2 的后向瑞利散射光和本振光电场分量分别为 E_s 和 E_L ^[15], 表示为

$$\begin{cases} E_s = E_{s0} \exp[j(\omega_s t + \varphi_s)] \\ E_L = E_{L0} \exp[j(\omega_L t + \varphi_L)] \end{cases}, \quad (6)$$

式中: E_{s0} 、 E_{L0} 分别为 E_s 和 E_L 的振幅; ω_s 和 ω_L 分别为 E_s 和 E_L 的频率; φ_s 和 φ_L 分别为 E_s 和 E_L 的相位。同时假设耦合器内分光镜的反射率(R)和透射率(T)^[16]为

$$\begin{cases} R = R_0 \exp(j\varphi_R) \\ T = T_0 \exp(j\varphi_T) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: R_0 和 T_0 为反射系数和透射系数, 此设计中 $T_0 = R_0 = \sqrt{2}/2$; φ_R 和 φ_T 为反射和透射带来的相位变化。耦合器的输出光 E_a 和 E_b 可表示为

$$\begin{cases} E_a = E_{sR} + E_{LT} = E_s R + E_L T \\ E_b = E_{sT} + E_{LR} = E_s T + E_L R \end{cases}, \quad (8)$$

式中: E_{sR} 为信号光的反射光; E_{LT} 为本振光的透射光; E_{sT} 为信号光的透射光; E_{LR} 为本振光的反射光。根据平方检波和基尔霍夫电流定律可得出 BDP 内 2 个雪崩二极管的光电流差^[17]

$$\Delta i = 2\alpha E_{s0} E_{L0} \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi), \quad (9)$$

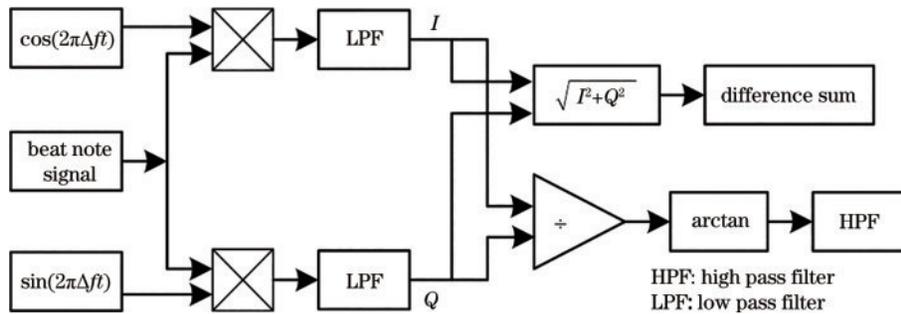


图 2 数字正交解调结构图

Fig. 2 Digital orthogonal demodulation structure diagram

4 实验测试

为了验证 DAS 系统采集语音与脚步信号的准确性与可靠性, 设计了压电陶瓷 (PZT) 振动信号实验、语音信号采集复现实验和脚步信号采集实验, 系统中的光学器件参数如表 1 所示。其中光脉冲宽度和采集卡采样率可调节, 在上述实验中分别固定为 30 ns 和 1 GHz。

DAS 系统的上限频率 f_{\max} 由脉冲重复周期 T_R 和光传播 2 倍长度 (L) 传感光纤的时间决定^[5], 表示为

$$f_{\max} = \frac{1}{2T_R} \leq \frac{c}{4nL}, \quad (13)$$

式中: c 为真空中光的传播速度; n 为传感光纤的折射率。按照实验中 2 km 的传感距离可计算出系统的 $f_{\max} = 25$ kHz。DAS 系统的下限频率 f_{\min} 则主要由激光

式中: α 为探测器的响应度; $\Delta\omega = \omega_s - \omega_L$; $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_L$ 。BPD 输出的电信号和光电流差成正比, 因而 DAQ 采集到的数字信号 $S(n)$ 可表示为

$$S(n) \propto 2\alpha E_{s0}(n) E_{L0}(n) \cos(\Delta\omega_n n + \Delta\varphi_n), \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (10)$$

式中: $\Delta\omega_n$ 为 $\Delta\omega$ 对应的数字角频率; $\Delta\varphi_n$ 为 $\Delta\varphi$ 对应的相位; N 为 DAQ 每次采样的点数。采用数字正交 (I/Q) 解调对采集的数字信号解调, 将 $S(n)$ 和正交的同频信号相乘可得到信号 I 和 Q :

$$\begin{cases} I = S(n) \times \cos(\Delta\omega_n n) = \alpha E_{s0}(n) E_{L0}(n) \cdot [\cos(2\Delta\omega_n n + \Delta\varphi_n) - \cos\Delta\varphi_n] \\ Q = S(n) \times \sin(\Delta\omega_n n) = \alpha E_{s0}(n) E_{L0}(n) \cdot [\sin(2\Delta\omega_n n + \Delta\varphi_n) + \sin\Delta\varphi_n] \end{cases}. \quad (11)$$

从式 (11) 中可以看出, $S(n)$ 和正交的同频信号相乘后, 产生了和频信号和差频信号, 通过低通滤波将和频信号滤除, 最终可求得 $S(n)$ 信号的振幅和相位^[18]

$$\begin{cases} E_{s0}(n) E_{L0}(n) \propto \sqrt{I^2 + Q^2} \\ \Delta\varphi_n = -\arctan(Q/I) + 2k\pi, \quad k \in \mathbb{Z} \end{cases}. \quad (12)$$

图 2 为数字正交解调结构图。图中 Δf 为数字信号 $S(n)$ 中 $\Delta\omega_n$ 对应的频率, t 为时间。

表 1 光学器件性能指标

Table 1 Optical device performance index

Device performance index	Index parameter	Remark
Wavelength of laser /nm	1550	—
Laser output linewidth /kHz	3	—
Output optical power of the laser /dBm	13	—
AOM center frequency /MHz	200	—
Optical pulse width /ns	30	Adjustable
BPD bandwidth /MHz	0-200	—
Sampling rate of the acquisition card /GHz	1	Adjustable

器的频漂决定, 光源的频漂会导致后向瑞利曲线畸变影响信噪比。在现有的系统中, 激光器的频漂还未进行校正, 数据处理时需要进行 5 Hz 的高通滤波, 因此 DAS 系统的频率测量范围为 5 Hz~25 kHz, 在条件允

许的前提下可通过更换高稳定性的光源和缩短传感光纤长度获得更宽的频率测量范围。

DAS 系统的传感距离会受到入射脉冲光的光强限制,当传感距离超过一定长度后,脉冲光的功率不足导致散射粒子产生的后向散射光不能被检测到,此时应该通过 EDFA 或者拉曼光纤放大器(RFA)来增大脉冲光的功率,结合应用背景考虑在该系统中利用 EDFA 来提高脉冲光的功率。实验测试得出 DAS 系统对语音和脚步信号的传感距离为 2 km。

4.1 PZT 振动信号实验

将一个由外部信号源驱动的 PZT 连接到两段长度约为 1 km 的单模光纤中间,总长度约为 2 km。通过信号发生器将频率为 100 Hz、幅值为 2 V 的正弦波信号输入 PZT,DAS 系统的脉冲帧频设置为 2 kHz,对采集的信号进行差分求和定位,如图 3 所示,振动位置在 977.9 m 处,可计算出此时的信噪比^[19]为

$$R_{SN} = 10\lg(A_s/A_n), \quad (14)$$

式中: A_s 和 A_n 分别为振动信号最大振幅和背景噪声的均方根值。因为对结果做了归一化处理,所以 977.9 m 处的信号 $A_s=1$,求取 A_n 时应该去掉有信号的部分,最终取前后 900 m 的 A_n 归一化值 0.0493 进行计算,可得 $R_{SN}=13.07$ dB。

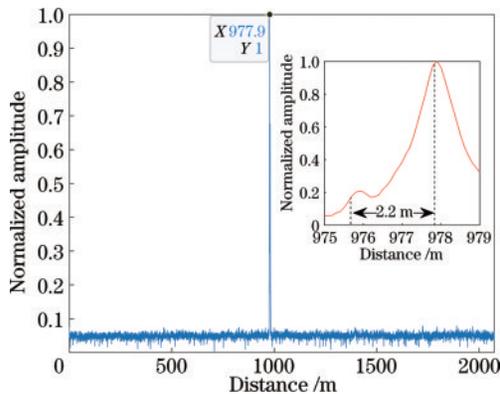


图 3 差分求和定位图

Fig. 3 Differential summation location map

图 4 为 I/Q 解调后的信号图和对应的频谱图,数据解调后经过 5~1000 Hz 的带通滤波器滤除超窄激光光源频漂所产生的低频信号和其他光学器件中的高频噪声,从图 4 中可以看出,信号波形十分近似标准正弦波形且频谱正常,但是由于干涉衰落的影响,波形有轻微的畸变。

4.2 语音信号采集与复现实验

由于测试中声波的传播介质是空气,其能量的衰减远大于声波在固体介质上的传播,且在光纤上产生的应变较小,甚至不能使带有聚氯乙烯(PVC)涂覆层的单模光纤产生可检测到的最小应变。针对该问题,在实验中将 3 m 长的光纤以螺旋绕制的方式缠绕在高度为 14 cm、直径为 8.5 cm 的铁质半封闭空心圆

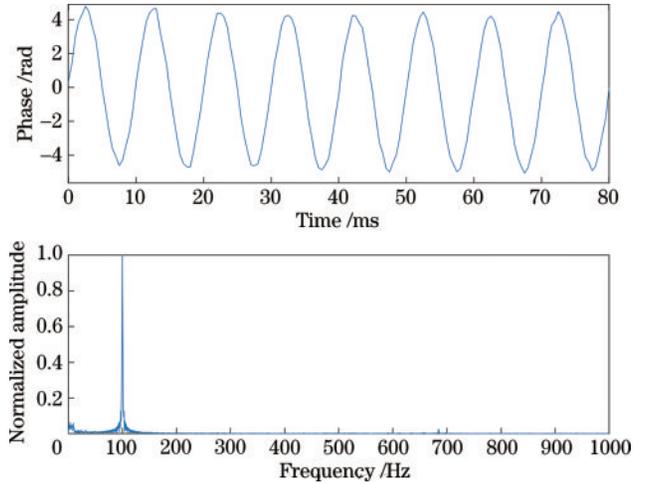


图 4 正弦信号时域图和频域图

Fig. 4 Time domain and frequency domain diagrams of sinusoidal signals

柱体上来减少声波能量的衰减,增加光纤对声波的灵敏度。将扬声器作为实验声源放置在圆柱体中心正前方 10 cm 的位置,DAS 系统的脉冲帧频设置为 10 kHz,光纤总长约为 2 km,测试点位于光纤中点处,测试音频为音频网站的高质量(HQ)音频,包括窄带信号(人声)和宽带信号(音乐),扬声器采用 SONY 公司型号为 SRS-XB12 的蓝牙音箱。

人声原始信号和人声复现信号如图 5 和图 6 所示。从图中可以看出,DAS 系统采集的人声信号和原始信号在时域上有较高的一致性。对原始信号和复现信号进行快速傅里叶变换(FFT)可知,两段音频信号的能量主要集中在 0~1000 Hz,能量波峰均处于 329 Hz。由于 BPD 在采集数据时引入了一定的工频干扰,复现信号的频谱分析中出现了 50 Hz 的干扰信号,另外,人声信号的原始采样率为 48 kHz,实验中采用 10 kHz 的采样率致使中间有些频率信息丢失,但是在整体的频

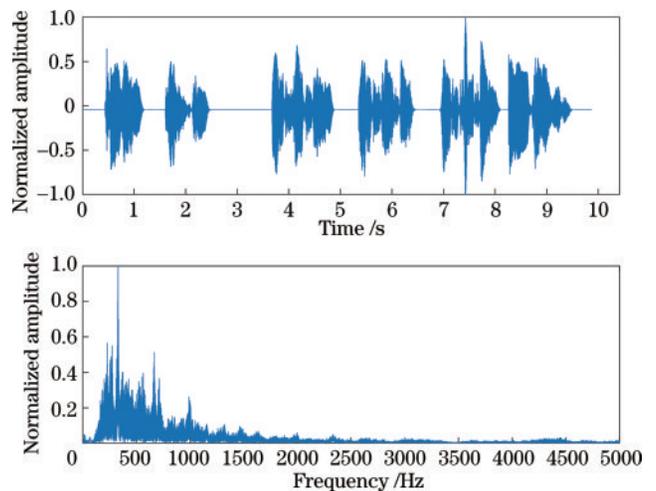


图 5 人声原始信号时域图和频域图

Fig. 5 Time domain and frequency domain diagrams of original human voice signal

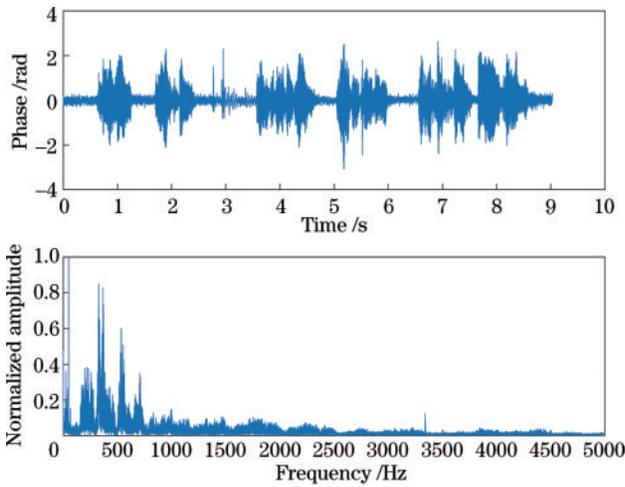


图 6 人声复现信号时域图和频域图

Fig. 6 Time domain and frequency domain diagrams of human voice reproduction signal

域谱中两段信号仍然有较高的一致性。

音乐原始信号和音乐复现信号如图 7 和图 8 所示。相比于人声,音乐声中包含更多复杂的信号,从图 8 中可以看出,DAS 系统还原了音乐信号中 500 Hz 附近的主要信号,但是同样出现了其他频率信号丢失的现象,原因仍然是 DAS 采样频率低于原始采样频率。50 Hz 的工频干扰信号能量小于主频信号能量,无法明显看出。

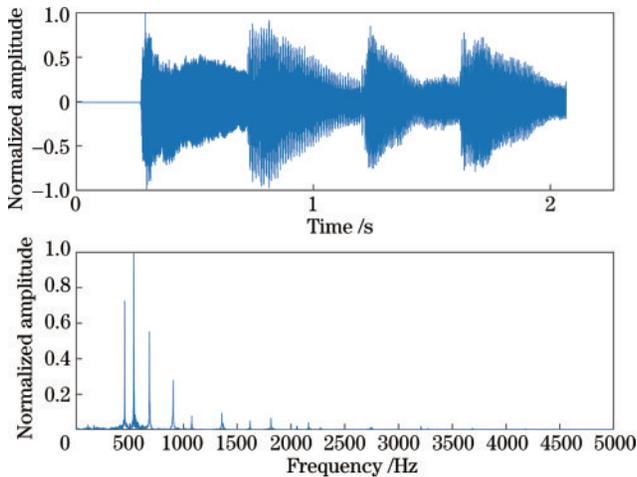


图 7 音乐原始信号时域图和频域图

Fig. 7 Time domain and frequency domain diagrams of music original signal

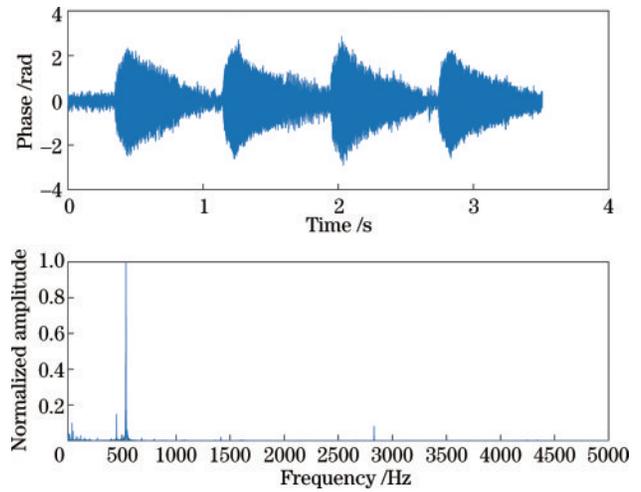


图 8 音乐复现信号时域图和频域图

Fig. 8 Time domain and frequency domain diagrams of music reproduction signal

为了定量分析信号的质量,利用平均主观意见(MOS)值来对信号进行评分。MOS 值测评按照《ITU-T P. 800》建议书标准,由 15 个人分别对原始信号和复现信号进行主观感觉对比得出 MOS 值的平均值。MOS 值测评标准如表 2 所示,音频级别分为 5 个等级,人声信号和音乐信号的 MOS 值测评如表 3 和表 4 所示,可以看出,人声信号和音乐信号 MOS 值的平均值分别为 3.72 和 3.44,根据表 2 的音频级别划分标准,证明 DAS 系统能够正常采集并复现语音信号。

表 2 MOS 值测评标准表

Table 2 MOS value evaluation standard

Audio level	MOS value	Evaluation criterion
Excellent	4.0-5.0	Good, good hearing, little delay, good communication
Good	3.5-4.0	Slightly poor, clear hearing, little delay, communication is not smooth, there is noise
Middle	3.0-3.5	It's okay, it's hard to hear, there's a delay, you can communicate
Bad	1.5-3.0	It's hard to hear, there's a lot of delay, communication needs to be repeated a lot
Inferior	0.0-1.5	Very poor, unintelligible, large delay, poor communication

表 3 人声信号 MOS 值测评表

Table 3 MOS value evaluation of human voice signal

Number of personnel	MOS value	Number of personnel	MOS value	Number of personnel	MOS value	Mean value
1	4.0	6	3.0	11	3.7	3.72
2	4.0	7	3.5	12	3.6	
3	4.1	8	4.0	13	3.6	
4	4.0	9	3.5	14	3.3	
5	3.7	10	3.8	15	4.0	

表4 音乐信号MOS值测评表
Table 4 MOS value evaluation of music signal

Number of personnel	MOS value	Number of personnel	MOS value	Number of personnel	MOS value	Mean value
1	3.5	6	3.0	11	3.4	3.44
2	3.5	7	3.7	12	3.5	
3	3.5	8	3.0	13	3.6	
4	3.5	9	4.0	14	2.8	
5	3.6	10	3.5	15	3.5	

4.3 脚步信号采集实验

在脚步信号采集实验中,将长度为 230 m 的自承式蝶形光缆沿直线布置在实验楼的水泥走廊上,利用纸胶带加强光纤测试点和水泥地之间的耦合,实验人员在测试点附近 20 cm 处来回走动作为振动源。由于脚步信号中能体现出行人腿部刚度差异的频带在 500 Hz 以下^[20],因此根据奈奎斯特定律可将 DAS 系统的脉冲帧频设置为 1 kHz。

DAS 系统检测到的脚步信号时域图和频域图如图 9 所示,时域图中第一个跺脚产生的高幅值信号为测试起始点,后面的信号为测试人员走动的脚步信号。从频域图中可以得到脚步信号的主频率在 30 Hz 左右,与实验人员行走的步频基本一致,但是信号的整体信噪比较低,主要原因是纤芯和包层、包层和地面之间的耦合并不是理想的刚性连接,脚步信号传输到纤芯的过程中能量衰减较大,所以在实际工程布设中常常将光纤埋入地下来改善耦合效果。为了证明采集信号的准确度,将单个脚步信号放大,如图 10 所示,图中信号脉冲串中的脉冲宽度基本为 30 ms,信号主要能量集中于脉冲串,信号上下包络呈现山峰状,整体符合脚步信号的特征^[21],因此该 DAS 系统可以实现脚步信号的采集。

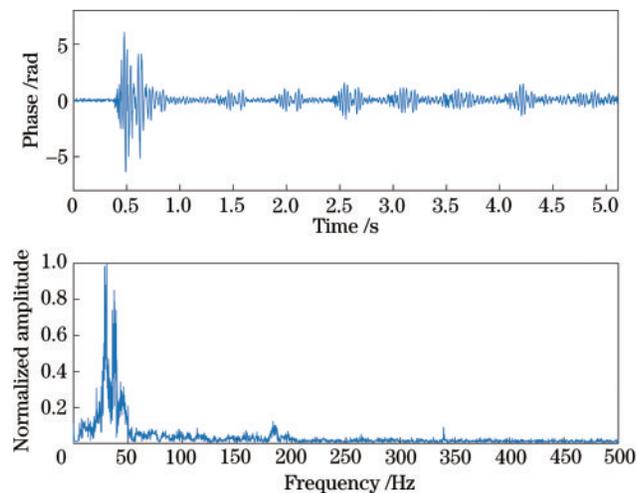


图9 脚步信号时域图和频域图

Fig. 9 Time domain and frequency domain diagrams of footstep signal

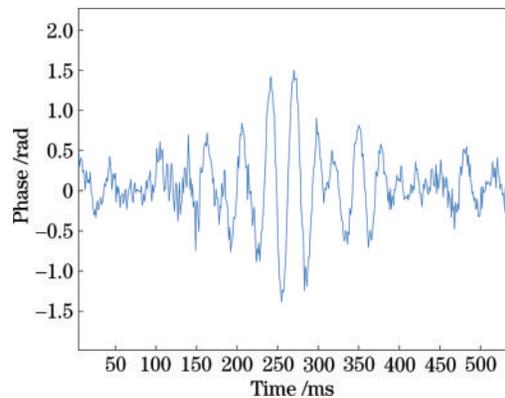


图10 单个脚步信号图

Fig. 10 Single footstep signal diagram

5 结 论

本文详细说明了相干探测系统的结构,介绍并推导了振动信号在分布式光纤传感技术中的调制机理和解调原理,构建并演示了一套基于 φ -OTDR 的 DAS 系统。将铁质半封闭空心圆柱体作为增敏材料解决了光纤对声波灵敏度低的问题,通过对 PZT 振动信号、语音信号和脚步信号的检测实验证明了该系统在传输距离为 2 km 时具有检测复杂振动信号的工作能力,对 φ -OTDR 在周界安防领域的实际工程应用以及后续的开发改进有积极的推动作用和参考价值。需要说明的一点是,在周界安防工程中出现的振动信号通常不会是单一的语音信号或者脚步信号,该 DAS 系统虽然能够对采集到的混合信号进行解调,但是从文中语音信号和脚步信号的分析可知,各种信号之间很可能有些同频率的成分混叠,简单的滤波处理不能实现信号的分离和识别,需要后期通过机器学习对各种信号的特征进行提取训练才能真正实现各类监测事件的灵活处理。

参 考 文 献

[1] 卜泽华,毛邦宁,司召鹏,等.基于小波包分解和SVM的 φ -OTDR 系统信号识别[J]. 光子学报, 2022, 51(11): 1106003.
Bu Z H, Mao B N, Si Z P, et al. Signal recognition of φ -OTDR system based on wavelet packet decomposition and SVM[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):

- 1106003.
- [2] 樊卓杨, 吴超, 王霞. 光纤传感技术在电力设备监测领域的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(10): 1-12.
Fan Z Y, Wu C, Wang X. Research progress of optical fiber sensing technology in power equipment monitoring [J]. Insulating Materials, 2021, 54(10): 1-12.
- [3] 陈学义, 董凤忠, 张晓磊, 等. 基于相干后向瑞利散射的分布式光纤传感系统[J]. 光电子·激光, 2013, 24(9): 1779-1783.
Chen X Y, Dong F Z, Zhang X L, et al. Distributed optical fiber system based on coherent Rayleigh back-scattering[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(9): 1779-1783.
- [4] 王林, 何俊, 李芳, 等. 用于探测极低频信号的光纤传感器相位生成载波解调方法[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405001.
Wang L, He J, Li F, et al. Ultra low frequency phase generated carrier demodulation technique for fiber sensors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(4): 0405001.
- [5] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.
Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.
- [6] Juarez J C, Taylor H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters[J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1968-1971.
- [7] 李玉, 刘铁根, 王绍俊, 等. 全光纤分布式视频联动长距离周界安防监控系统[J]. 光电子·激光, 2013, 24(9): 1752-1757.
Li Y, Liu T G, Wang S J, et al. All fiber distributed long-distance perimeter security monitoring system with video linkage function[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(9): 1752-1757.
- [8] Yu X H, Zhou D L, Lu B, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed fence-perimeter intrusion detection[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9679: 96790S.
- [9] 陶鑫, 江山, 宋珂. 基于弱光栅阵列低成本大长周界系统及其报警机制[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0406001.
Tao X, Jiang S, Song K. Low-cost and long-perimeter system based on weak grating array and its alarm mechanism[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0406001.
- [10] 孙文达, 郑晶, 沈帅帅, 等. 三分量低噪声微震连续采集节点仪设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 87-92.
Sun W D, Zheng J, Shen S S, et al. Design of three-component low noise continuous microseismic acquisition node[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(4): 87-92.
- [11] 邹瑛珂, 贾云飞, 刘素芸. 一种基于改进 EMD 分解人车地震动信号识别算法[J]. 中国测试, 2022, 48(4): 85-94.
Zou Y K, Jia Y F, Liu S Y. Improved EMD decomposition based recognition algorithm for pedestrian and vehicle ground motion signals[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(4): 85-94.
- [12] 唐琴, 郭娟, 陶建华. 太赫兹技术在分布式光纤传感信息自动上传中的应用[J]. 激光杂志, 2021, 42(8): 146-150.
Tang Q, Guo J, Tao J H. Application of terahertz technology in automatic upload of distributed optical fiber sensing information[J]. Laser Journal, 2021, 42(8): 146-150.
- [13] 严少诚. 微光纤定向耦合器的传感应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
Yan S C. The characteristics and applications of fiber sensors based on microfiber couplers[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- [14] 李承前. 用于空间电荷高速探测的弹性波椭圆偏测量系统与取样传感器研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Li C Q. Development of elastic wave ellipsometry measurement system and sampling sensor for high-speed detection of space charge[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [15] 吴聪. 自由空间光通信高灵敏度平衡探测器特性的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Wu C. Research on the characteristics of high sensitivity balanced detector in free space optical communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [16] 代永红, 艾勇, 肖伟, 等. 高速相干光通信平衡探测器研究[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0125002.
Dai Y H, Ai Y, Xiao W, et al. The research of balance detector for high-speed coherence optical communications [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0125002.
- [17] 熊大明, 董雷. 用于 DVS 系统的平衡探测器的设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(7): 181-184.
Xiong D M, Dong L. Design of balanced detector for DVS system[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(7): 181-184.
- [18] 王旭, 刘珉含, 于森, 等. 相位敏感光时域反射系统数字正交解调算法分析及改进研究[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1210002.
Wang X, Liu M H, Yu M, et al. Analysis and improvement for digital quadrature demodulation algorithm on phase-sensitive optical time-domain reflectometric system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1210002.
- [19] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [20] 房玉杰, 张松, 刘晋, 等. 脚步声识别技术研究进展[J]. 刑事技术, 2021, 46(1): 81-86.
Fang Y J, Zhang S, Liu J, et al. Footstep acoustic recognition: research and progress[J]. Forensic Science and Technology, 2021, 46(1): 81-86.
- [21] 孔飞. 基于多通道传感器的人员脚步信号的探测与跟踪[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
Kong F. Detection and tracking of footsteps signal based on multi-channel sensors[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.