

激光与光电子学进展

相敏光时域反射仪土壤振动传播特性

王鸣¹, 封皓¹, 沙洲^{1*}, 杜立普²¹天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;²宁夏回族自治区水利工程建设中心, 宁夏 银川 750004

摘要 相敏光时域反射仪(φ -OTDR)广泛应用于管道安全预警、光缆断点查找、清管器定位跟踪等场景,其传感光缆多埋于地下,土壤性质、传输距离、光缆结构等均对信号特征有所影响。本文研究了振动信号在土壤中的传播特性,探究了光缆结构、土壤湿度、传输距离等非事件因素对系统信号特征的影响。此外,从特征频段能量变化趋势的角度,研究了真实冲击振动与非事件性信号波动的区别,并由此提出了一种外部冲击振动的判别方法。

关键词 光纤光学与光通信; 分布式光纤传感; 土壤振动; 传播特性; 特殊频段; 频域判断法

中图分类号 060.2300

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221585

Characteristics of Soil Vibration Propagation Based on Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometers

Wang Ming¹, Feng Hao¹, Sha Zhou^{1*}, Du Lipu²

¹State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Ningxia Hui Autonomous Region Water Conservancy Engineering Construction Center, Yinchuan 750004, Ningxia, China

Abstract Phase sensitive optical time domain reflectometers (φ -OTDRs) have been widely employed in pipeline safety early warning systems, optical cable break-point searches, mechanical pipeline pig (PIG) positing and tracking, and other fields. The sensing optical cables of φ -OTDRs are mostly buried underground so that the soil characteristics, transmission distances, and optical cable structures all have considerable effects on the signal characteristics. This study considered the propagation characteristics of vibration signals in soils and explored the effects of non-event factors such as optical cable structures, soil moisture, and transmission distances on the signal characteristics of systems. In addition, in terms of energy change trends in characteristic frequency bands, the difference between real shock vibration and non-event signal fluctuations was investigated. A proposed method to judge external shock vibration is derived from the results.

Key words fiber optics and optical communication; distributed optical fiber sensing; soil vibration; propagation characteristics; special frequency band; frequency domain judgment method

1 引言

分布式光纤传感器凭借空间利用率高、监测范围广、灵敏度高、可自动化在线监测^[1-2]等优点成为近年来的研究热点,广泛运用于振动监测、管道维护、清管器(PIG)定位跟踪等领域。其中,相敏光时域反射仪(φ -OTDR)成为近年来工程应用的热点之一。相比于传统的光时域反射仪(OTDR), φ -OTDR使用窄线宽

光脉冲作为探测光,接收多束后向瑞利散射光的干涉结果^[3-4],从原理上提高了其抗干扰能力。

工程应用中传感光缆常常埋于地下,土壤特性的多样化导致了响应信号的差异;同时,不同结构的光缆也会对系统性能造成影响;振动信号随距离的衰减特性决定了光缆的铺设深度。基于此,本文开展了相关系列实验,从时域角度发掘土壤中振动信号的传输特性^[5-6]。改变土壤含水状态,研究土壤湿度对振动传播

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-05-25; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(62005191,61873183)、广西自动检测技术及仪器重点实验室开放基金(YQ21205)

通信作者: *shazhou@tju.edu.cn

的影响;串联两种光缆,对比光缆结构引起的灵敏度差异;选取不同的实验地点,分析信号强度随距离的衰减特性。综合探讨了土壤中振动信号的传播规律,为 φ -OTDR 的性能优化与工程应用提供了重要的参考价值。

此外,传统的 φ -OTDR 对外部扰动的判断以时域信号的响应脉冲作为基本依据,而实际采集到的时域信号往往包含噪声干扰,存在脉冲杂乱、应力残余、特征脉冲模糊等情况,依托时域脉冲的时域判断法存在误判率与漏判率高的缺陷。基于此,本文分析了振动信号在频域中的传输特性,对比不同状态下响应信号的关键频域参数,提出了一种利用响应信号频域特性来判断外部扰动存在的方法,并设计实验以验证其可行性、优越性、可靠性。所提出的频域判断法通过与传统的时域判断法相结合,可进一步提高 φ -OTDR 的传感性能,大大减少对外部扰动状态的错判、漏判。

2 理论及实验

2.1 φ -OTDR 原理

φ -OTDR 基于光时域反射原理^[7-9],当光纤所在的物理场发生变化时,光脉冲与光纤作用产生的后向瑞利散射光反映相应物理量的改变^[10-11],其结构如图 1 所示。

光纤的弯曲、扭转、断裂等都会造成测量光相位的改变^[12]。设传感光纤总长度为 L ,则输出端测量光的相位延迟^[13-14]可表示为

$$\phi = 2\pi \frac{nL}{\lambda_0} = \beta L, \quad (1)$$

式中: λ_0 为测量光标准波长(一般指中心波长); β 为测量光在光纤中的传播常数; n 为测量光所在介质的折射率。进一步对式(1)求微分,即

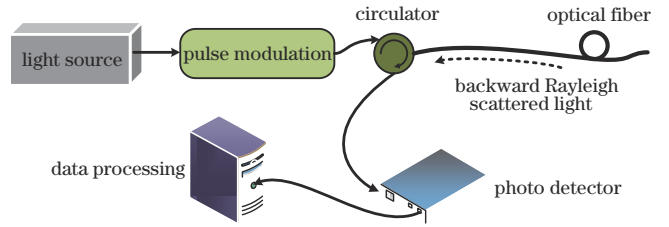


图 1 φ -OTDR 系统原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of φ -OTDR system

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial d} \Delta d, \quad (2)$$

式中, $\Delta\phi$ 包括应变效应引起的光纤长度变化、弹光效应引起的纤芯折射率变化、泊松效应引起的光纤直径变化^[15-16]。

基于上述原理, φ -OTDR 可以实现对外部扰动信号的传感。

2.2 实验准备

实验中使用自研 φ -OTDR 机箱实现振动传感及数据传输,机箱内激光器以 20 mW 光功率输出 1550 nm 窄线宽连续光,声光调制器(AOM)以 1 kHz 重复频率输出脉宽为 100 ns 的脉冲信号,将连续光调制为光脉冲,掺铒光纤放大器(EDFA)对光脉冲做 23 dB 功率放大,再经环形器 1(CIR1)与光纤布拉格光栅 1(FBG1)以滤除光源自发噪声。所用 FBG 的中心波长为 1550.05 nm,反射率为 99%,3 dB 带宽可达 0.13 nm。测量光通过 CIR2 进入传感光纤,后向瑞利散射光反向传输至 CIR2,经 CIR3 和 FBG2 再次去噪。完成光电转换后,数据采集卡(DAC)以 50 MHz 的采样率进行数据采集。其光路结构如图 2 所示。

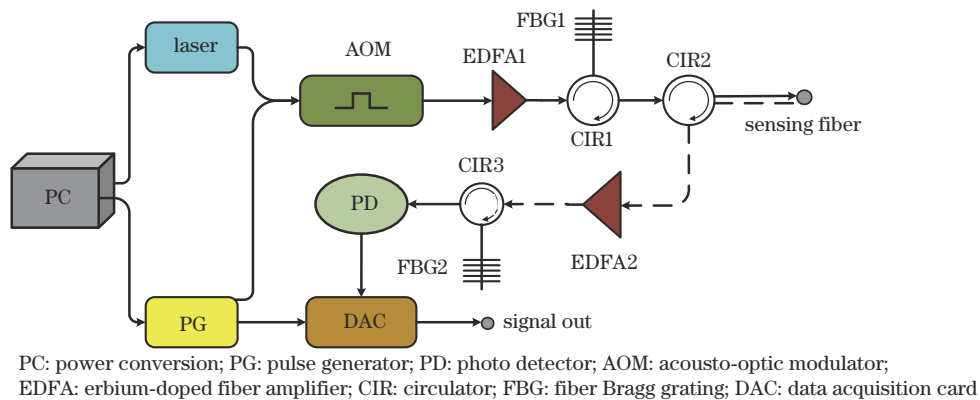


图 2 φ -OTDR 集成系统内部结构示意图
PC: power conversion; PG: pulse generator; PD: photo detector; AOM: acousto-optic modulator; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; CIR: circulator; FBG: fiber Bragg grating; DAC: data acquisition card

图 2 φ -OTDR 集成系统内部结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of internal structure of φ -OTDR integrated system

就光纤预警系统面临的入侵信号而言,一类是挖掘、敲击、开凿等瞬时、能量分散的信号,另一类是电钻、风镐、砂轮等持续性、能量分布集中的信号。实验中使用直径为 12 cm 的铁质小球(约 1.2 kg)自由落下以模拟瞬时激励,确保以相同的接触面积撞击土层,从

0.8 m 和 0.3 m 两个高度落下,以模拟不同强度的撞击信号。此外,使用铁锹模拟挖掘入侵信号,使用一台 20 kW 的电动机满功率输出作用于地面以模拟持续性振动源。对实验采集数据均进行 20~200 Hz 的带通滤波处理。

振动传输距离是光缆响应强度的关键因素,工程中通常将传感光缆埋于地下 1~6 m 深处。本文实验将传感光缆埋于土层 0.45 m 深处,土壤环境由沙土和部分黏土组成,整体颗粒度小于 0.02 mm。沿土层边缘刻度线在水平方向 0.5~7 m 的范围内,以 0.5 m 为

一个分度开展实验;营造含水量不同的土壤环境,以研究土壤湿度及密度对振动传播的影响,具体参数如表 1 所示;串联两种光缆,以比较光缆结构引起的信号差异。上述所有场景都对土壤做压实处理。

表 1 不同土壤环境的含水量与密度

Table 1 Water content and density of different soil environments

Soil environment	Humidity 1	Humidity 2	Humidity 3	Humidity 4	Humidity 5
Water content / %	0.05	5.60	9.45	16.42	20.68
Density / (g·cm ⁻³)	2.42	2.48	2.52	2.57	2.64

除振动传输距离及土壤自身特性之外,光缆结构也是影响响应强度的要素之一。尽管现有的传感光缆普遍使用高材料模量、多芯传输、金属芯填充的结构,这种结构不仅保证了光缆的强度,还提升了光缆的传感性能。然而在某些特定场景如面对阀井、镇墩等不可穿越或需要绕行的障碍物时,这种光缆则呈现出弯曲半径大、柔性差的缺点,另一种单芯或少芯、非金

属芯填充的光缆则可以较好地发挥作用,但这种光缆在灵敏度、强度等指标上又存在不足。针对上述两种结构,分别选取了 GYTA53 光缆与 GJA 光缆,通过比较相同实验场景下各自的响应信号来分析其传感特点。实验所得性能差异将为工程中光缆的选择与光缆布局提供实验示例。

实验场地及相关实验元件如图 3 所示。

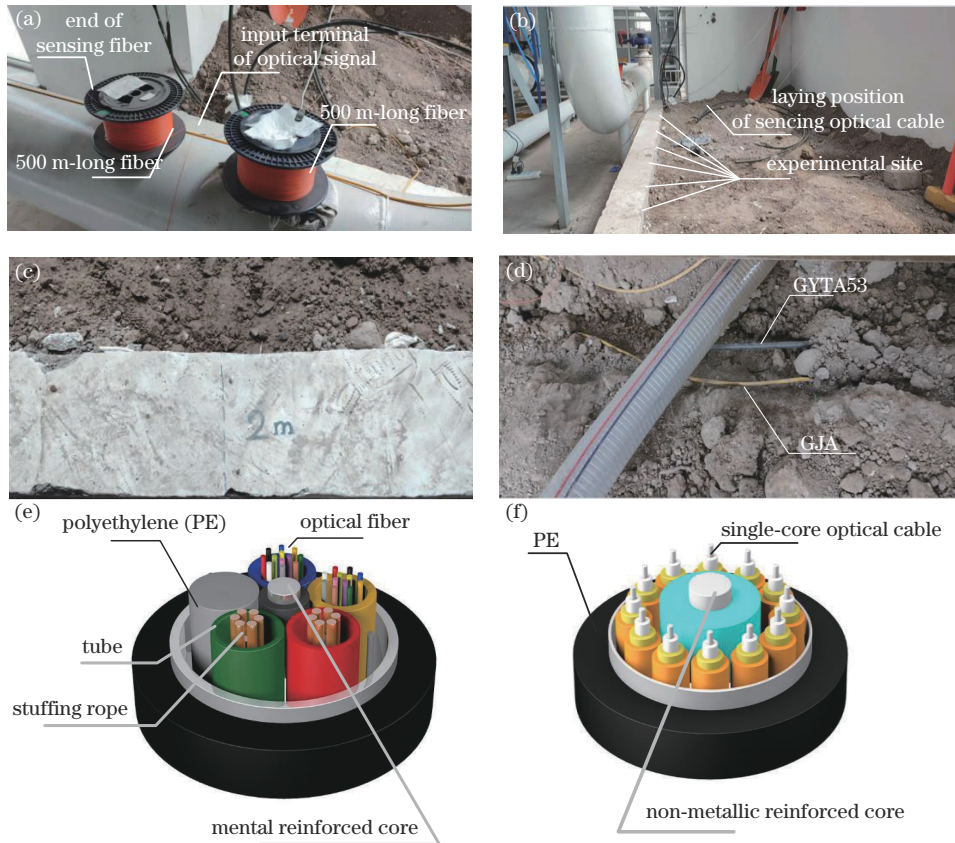


图 3 实验场地。(a)实验光路图;(b)传感光缆位置与实验地点;(c)边缘辅助定位标记;(d)光缆;(e) GYTA53 光缆内部结构;(f) GJA 光缆内部结构
Fig. 3 Experimental site. (a) Experimental optical path; (b) position of sensing optical cable and experiment; (c) edge auxiliary positioning mark; (d) optical fiber; (e) internal structure of GYTA53 optical cable; (f) internal structure of GJA optical cable

实验开始前对系统进行标定。土层中光缆呈伸直状态,分别敲击土层中光缆始端与末端,通过光缆上的米标计算实际光缆长度,同时观察瑞利散射曲线反射峰与时空图上特征图块的位置,对距离进行标定;在同

一位置对土层持续施加三种不同强度的振动信号,观察输出端的脉冲幅值与时空图特征图块的形态,对系统传感性能进行标定。

通过上述实验准备,探究了光缆结构、土壤湿度、

传感距离等因素对振动信号传播特性的影响。下面具体阐述实验及结论。

3 传播特性

3.1 时域特性

3.1.1 光缆结构与传感距离

振动信号作用下,串联的两条光缆同步响应,但 GYTA53 的响应幅值远高于 GJA,存在明显的灵敏度差异。其原因在于光缆结构的不同。GYTA53 将 250 μm 光纤套入高模量材料制成的松套管,光缆中心以金属加强芯填充;GJA 使用 900 μm 的单芯光缆作为子单元,以非金属加强芯填充保护。该现象表明,具有高模量材料、多芯光纤、金属加强芯结构的光缆具有更高的灵敏度。四种入侵信号各选取 1 组响应曲线比较光缆间响应差异,如图 4 所示。

在某些特殊的场景下,当需要使用 GJA 类结构的光缆时,应考虑其灵敏度低的特点,综合考虑光缆布局,使其尽可能靠近可能的振动发生位置。基于灵敏度间的差异,后续仅考虑 GYTA53 的响应信号。

接下来分析距离因素。在数据预处理环节,依据时域曲线脉冲(图 4)对全部实验数据进行分类,分为静止状态和扰动状态,对扰动状态下的各组数据计算其峰值-均值比(简称“峰均比”),用以衡量灵敏度和信

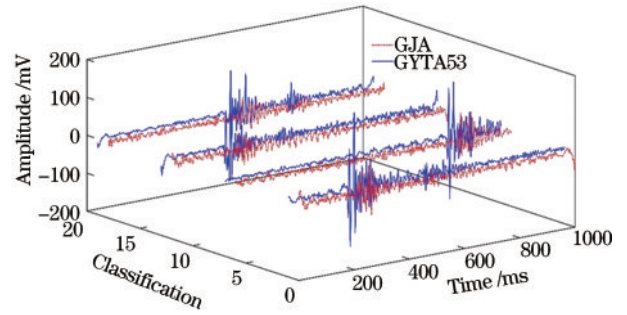


图 4 振动信号作用下的响应信号对比。

Fig. 4 Comparison of response signals under action of vibration signals

噪比^[17]。峰均比定义为

$$k_i = \frac{\max(\{|x_i|\})}{\sum\{|x_i|\}}, \quad (3)$$

式中: k_i 表示当前工况下第 i 组曲线的峰均比; x_i 为当前工况下第 i 组数据,是对响应曲线的采样。根据式(4)对当前工况各组 k_i 计算其均值 \bar{k} ,作为所在工况的典型值:

$$\bar{k} = \frac{\sum k_i}{n}, \quad (4)$$

整理后各工况下峰均比 \bar{k} 的典型值如图 5 所示(图中 PAR 为曲线的峰均比)。

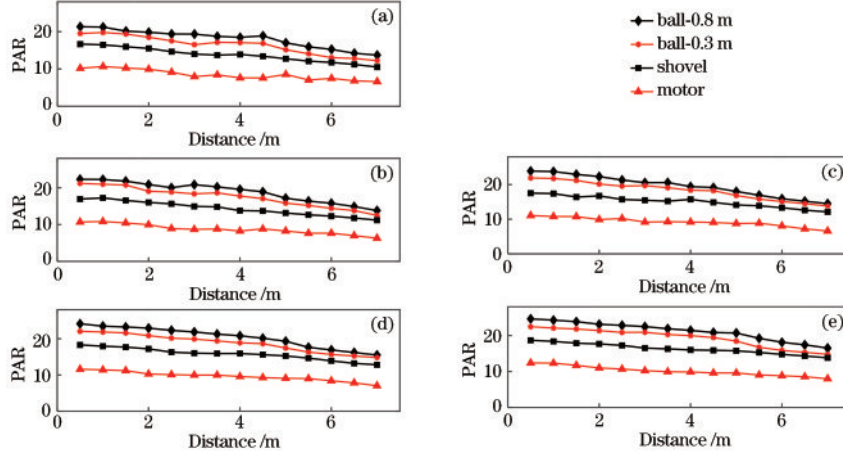


图 5 灵敏度随传感距离的变化情况。(a)湿度 1;(b)湿度 2;(c)湿度 3;(d)湿度 4;(e)湿度 5

Fig. 5 Variation of sensitivity with sensing distance. (a) Humidity 1; (b) humidity 2; (c) humidity 3; (d) humidity 4; (e) humidity 5

结合图 4 与图 5 可得出以下结论:

1) GYTA53 上响应信号的灵敏度和信噪比都远高于 GJA,即具有高模量材料、多芯光纤、金属加强芯结构的光缆具有更高的灵敏度。

2) 整体上响应信号的灵敏度随传感距离的增加呈下降态势,但在 0.5~7 m 的范围内并未出现显著的衰减。工程中应尽量避免光缆的铺设深度超过这一区间。

3.1.2 土壤湿度

本小节分析土壤湿度及密度因素。对 3.1.1 节中数据按信号种类重新整理后如图 6 所示。

显然,响应信号的灵敏度随距离的变化趋势与 3.1.1 节中结论一致。土壤中蕴含的水分有利于提升土壤自身的压实度,夯实后土壤的密度相比于松散土壤有所增加^[18-19]。因此在一定湿度范围内,土壤湿度和夯实程度的增加有利于系统灵敏度的提升。

3.2 频域特性

3.2.1 频段能量占比

实验中发现,静止状况下信号能量主要分布在 20~70 Hz 区间,振动信号作用下,80 Hz 附近频段内的能量迅速增加。这一现象如图 7 所示。

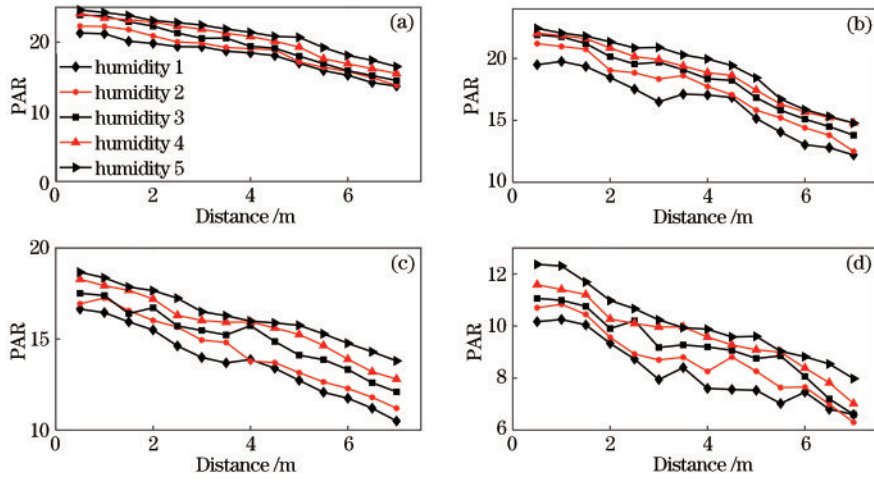


图 6 不同湿度间的灵敏度对比。(a)小球-0.8 m;(b)小球-0.3 m;(c)挖掘;(d)电机
Fig. 6 Sensitivity comparison among different humidities. (a) Ball-0.8 m; (b) ball-0.3 m; (c) shovel; (d) motor

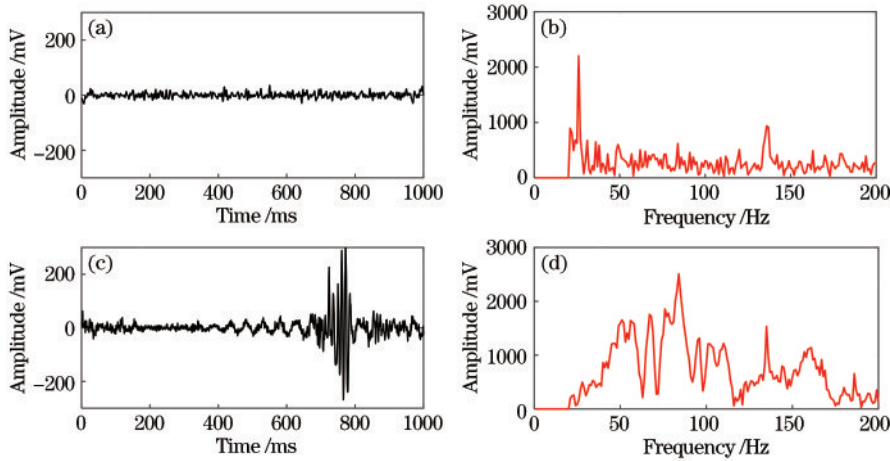


图 7 GYTA53 响应信号曲线。(a)时域-静止;(b)频域-静止;(c)时域-扰动;(d)频域-扰动
Fig. 7 Curves of response signal of GYTA53. (a) Time domain-static state; (b) frequency domain-static state; (c) time domain-impact state; (d) frequency domain-impact state

选取干燥土壤距光缆 1 m 处 GYTA53 上相邻的静止点和振动点,在 20~200 Hz 频段内,以 20 Hz 为间隔,按照下式计算各频段能量占全频段能量的比例,定义参数 r :

$$r_{i-i+20} = \frac{\sum_{i=20}^{i+20} U_i}{\sum_{i=20}^{200} U_i} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: r_{i-i+20} 表示 $i-i+20$ Hz 的能量占比; U_i 表示傅里叶谱上频率点 f_i 对应的增益。

四种类型入侵信号在静止状态与振动状态下的能量分布如图 8 所示。

由图 8 可知,在多种扰动信号作用下,能量集中分布区域均发生了显著的偏移,且主要变化频段相同, r_{20-40} 和 r_{40-60} 明显减少, r_{70-90} 显著增加。下面就这一能量特性展开分析。

3.2.2 扰动作用下的特殊频段

考虑图 8 中的能量分布,本节仅分析 20~40 Hz、

40~60 Hz、70~90 Hz 这三个频段。为进一步说明频段间能量的增减关系,按照下式定义频段间能量的比值为参数 s :

$$s_{i/j} = \frac{r_{i-i+20}}{r_{j-j+20}} = \frac{\sum_{k=i}^{i+20} U_k}{\sum_{k=j}^{j+20} U_k} \quad (6)$$

选取土壤干燥状况下 1、2、3、4、5 m 处挖掘信号引起 GYTA53 的响应信号,分别计算各组数据不同状态下的 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$,并计算所在工况下各参数均值作为典型值。统计结果如图 9 所示。

显然,在振动信号作用下,响应信号的 $s_{70/40}$ 与 $s_{70/20}$ 都大于静止状况下的值。

进一步扩大数据范围以得出一般性结论,选择所有土壤条件下 1、2、3、4、5 m 处所有数据,包含各类扰动激励引起的响应信号,计算相应的 r_{20-40} 、 r_{40-60} 、 r_{70-90} 、 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$,统计其一般特性。如图 10 所示。

图 10 包含实验所涉及的大多数数据,由此可以得

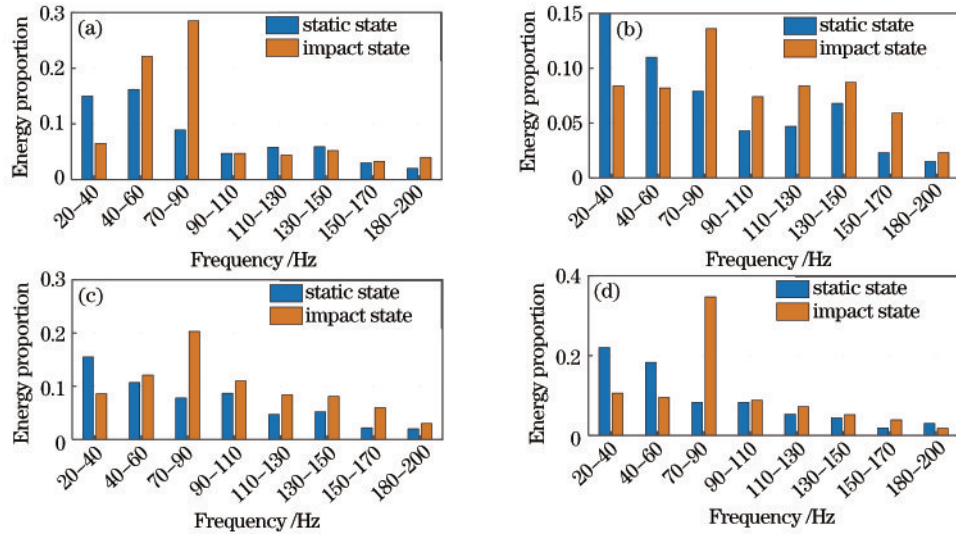


图 8 两种状态下各频段能量分布。(a)小球-0.8 m; (b)小球-0.3 m; (c)挖掘; (d)电机

Fig. 8 Energy distribution of each frequency band under two states. (a) Ball-0.8 m; (b) ball-0.3 m; (c) shovel; (d) motor

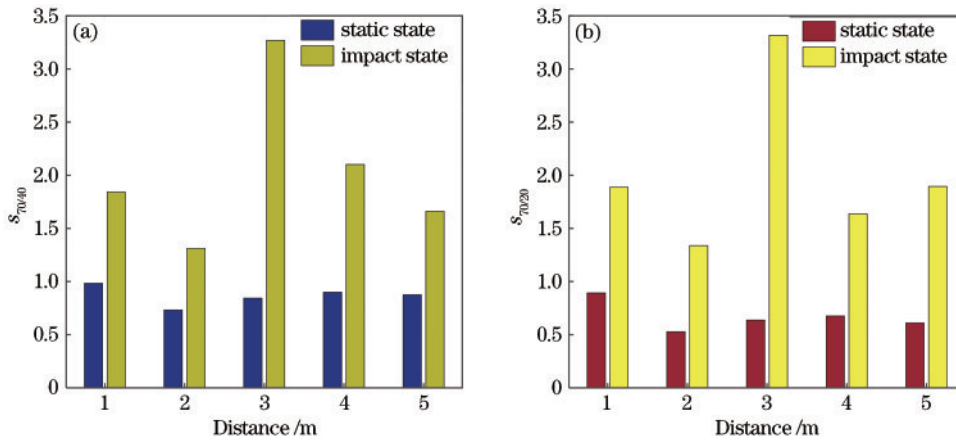


图 9 两种状态下 $s_{70/40}$ 与 $s_{70/20}$ 的分布图。(a) $s_{70/40}$; (b) $s_{70/20}$

Fig. 9 Distribution graphs of $s_{70/40}$ and $s_{70/20}$ under two states. (a) $s_{70/40}$; (b) $s_{70/20}$

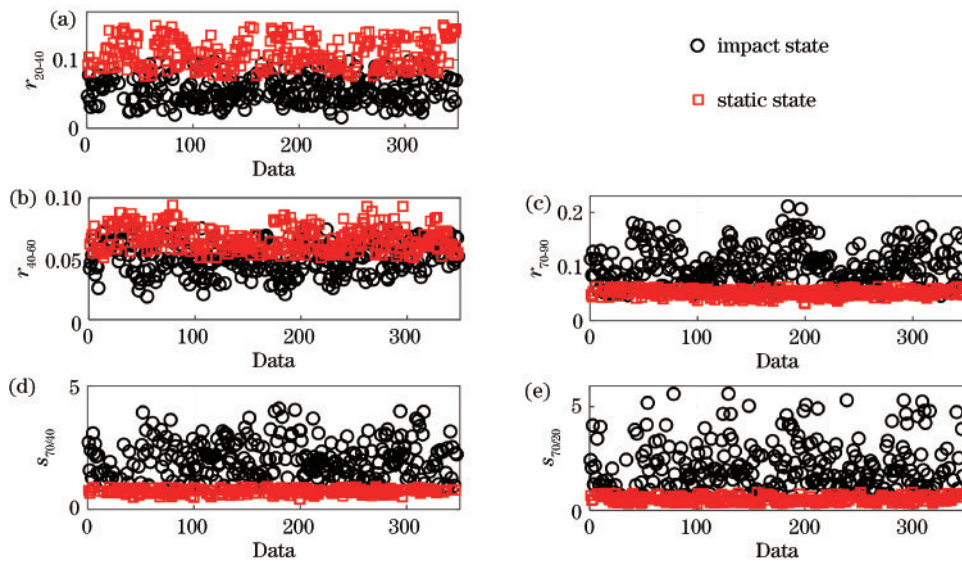


图 10 两种状态的参数分布。(a) r_{20-40} ; (b) r_{40-60} ; (c) r_{70-90} ; (d) $s_{70/40}$; (e) $s_{70/20}$

Fig. 10 Parameter distributions of two states. (a) r_{20-40} ; (b) r_{40-60} ; (c) r_{70-90} ; (d) $s_{70/40}$; (e) $s_{70/20}$

出以下一般性结论:

1) 如图 10(a)、10(b) 所示, 扰动信号作用下, 响应信号的 r_{20-40} 、 r_{40-60} 相比静止状况明显减小。

2) 如图 10(c) 所示, 扰动信号作用下, r_{70-90} 急剧增加, 增加程度随工况的不同而改变。

3) 如图 10(d)、10(e) 所示, 相比单频带参数 r , 静止状况下 $s_{70/40}$ 与 $s_{70/20}$ 的分布更为集中, 且两种状态下的区分度更加明显。

4 频域判断法

4.1 频域法的实验验证

由 3.2 中结论可知, 扰动信号作用下响应信号的 r_{20-40} 、 r_{40-60} 相比于静止状态明显减小, 同时 r_{70-90} 大大增加。因此, 可以利用这一特性判断扰动信号的存在。对于连续时域信号, 若 r_{20-40} 、 r_{40-60} 相对于之前时间点显著下降且 r_{70-90} 急剧升高, 则判断当前时间点存在扰动; 同时, $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 也可作为辅助判断依据。

设计实验以验证该方法。选取干燥土壤下距离光缆 1 m 处, 小球撞击土层 2 次, 两次撞击间隔不少于 5 s, 实验过程持续 15 s, 以 1 s 为间隔存储数据, 计算各项参数。时域曲线与频域参数的对应结果如图 11 所示。

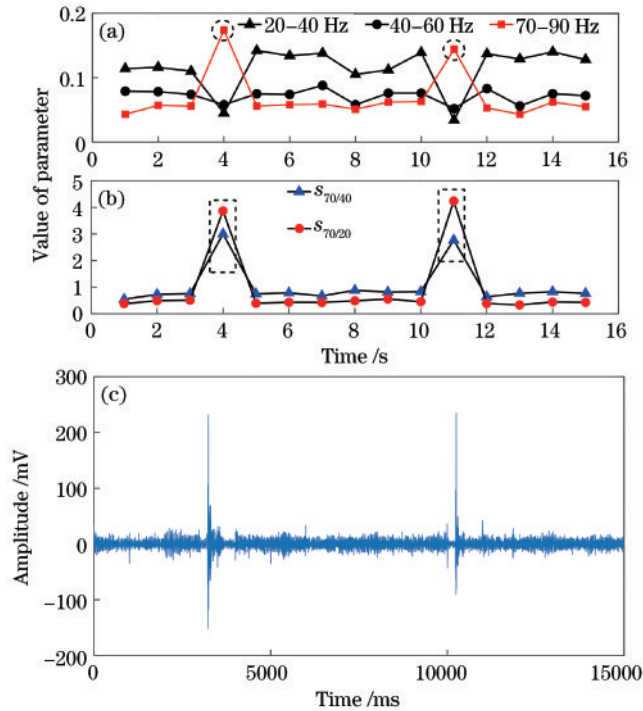


图 11 连续信号各参数变化情况。(a) r ; (b) s ; (c) 对应的时域曲线

Fig. 11 Changes of parameters of continuous signal. (a) r ; (b) s ; (c) corresponding time-domain curve

图 11 中分别用虚线圆与虚线矩形圈出了扰动点。对于连续性输入信号, 在振动信号作用下, 其频域特性具体表现为 r_{20-40} 、 r_{40-60} 的下降与 r_{70-90} 的急剧升高, 三者

缺一不可。图 11(a) 中只有 4 s 和 11 s 处满足这一条件。例如在 8 s、13 s、14 s 处, r_{20-40} 、 r_{40-60} 、 r_{70-90} 表现为同时降低或同时升高, 因此不能判断为扰动存在。图 11 中频域判断法的判断结果与图 11(c) 的时域曲线一致。

图 11(b) 中, 在振动信号作用下, $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 均大幅升高。相比参数 r_{20-40} 、 r_{40-60} 、 r_{70-90} 需要依赖之前时间内的数值, 参数 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 一方面可用于连续信号的辅助判断, 另一方面也可用于确定时间点信号的状态判断。

对于确定时间点的数据, 则通过比较所选时间点信号的 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 与静止状态下的 $s_{70/40static}$ 、 $s_{70/20static}$ 来判断。静止状态下, 能量主要集中在低频段, 此时 $r_{70-90} < r_{20-40}$ 且 $r_{70-90} < r_{40-60}$, 即 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 均小于 1; 如图 11(b) 所示, 在振动信号作用下, r_{70-90} 急剧上升, 此时 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 均大于 1。根据下式定义参数 T , 并定义其阈值为 T' :

$$T_1 = \frac{s_{70/40selected}}{s_{70/40static}}, T_2 = \frac{s_{70/20selected}}{s_{70/20static}}, \quad (7)$$

式中: $s_{70/40selected}$ 与 $s_{70/20selected}$ 分别表示所选时间点响应信号的相应参数值; $s_{70/40static}$ 、 $s_{70/20static}$ 分别为系统的静态参数。结合图 10(d)、10(e)、11(b) 可知, 静止状态下 $s_{70/40}$ 、 $s_{70/20}$ 分布在一个较窄的区间内, 因此可以选择区间上限值作为各自典型值。为了更合理地确定本文所涉及光学系统的阈值 T_1' 和 T_2' , 选取三种土壤状况 (humidity 1、humidity 2、humidity 3) 下 1、2、3 m 处共 9 组数据, 分别计算其 T_1 和 T_2 的值, 如图 12 所示。

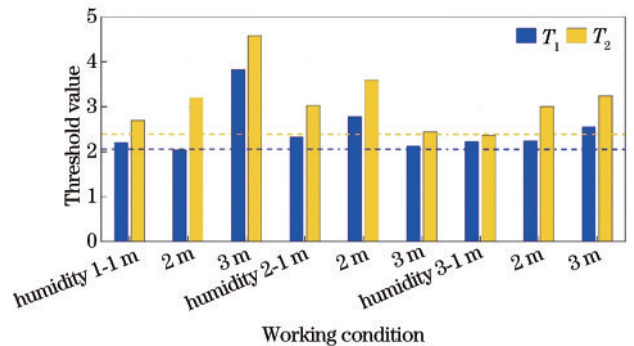


图 12 各工况下 T_1 和 T_2 的值

Fig. 12 Values of T_1 and T_2 under different working conditions

各工况下 T_1 和 T_2 的典型值均大于 2, 即阈值 T_1' 和 T_2' 应当大于 2, 不确定因子 k 选择 1.5, 阈值 $T_1' = kT_{1min} = 3$ 和 $T_2' = kT_{2min} = 3$ 可以满足本文所涉及光学系统的需求。

当本文提出的频域判断法运用于其他光学系统时, 通过标定静止状况下系统 $s_{70/40static}$ 、 $s_{70/20static}$ 的值, 结合上述参考阈值 T_1' 和 T_2' , 即可满足使用需求。

4.2 频域法优点验证

4.1 节中提出了判断扰动存在的频域法。传统的时域判断法将信号脉冲作为依据, 具有直观、便捷、实时的

优点。但是,由于应力残余、噪声等因素的影响,工程应用中采集到的时域信号往往不能呈现出理想状态,图 13

为实验过程中截取的响应信号波形,对于这些波形,利用传统的时域判断法容易发生错判或漏判的情况。

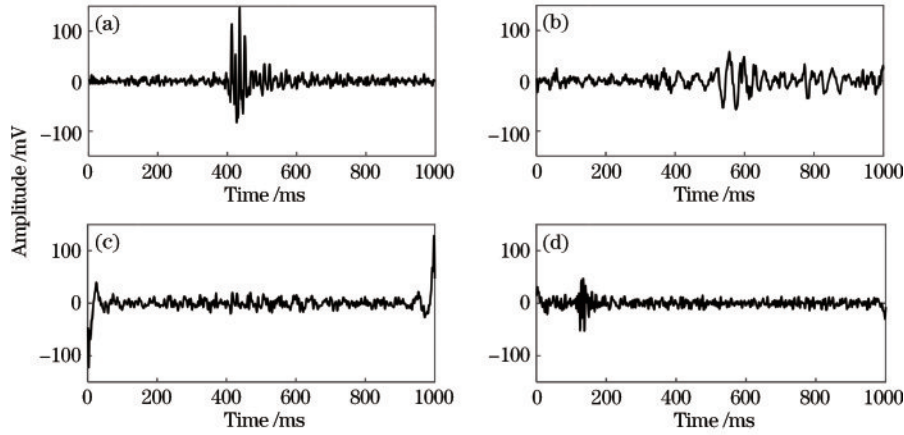


图 13 疑似振动点信号示例。(a)振动点信号;(b)、(c)、(d)非振动点信号

Fig. 13 Example of suspected vibration point signal. (a) Vibration point signal; (b), (c), (d) non-vibration point signals

相比时域判断法,本文提出的频域判断法所依据的标准更为多样,且不同状态间各参数的变化更加显著。本小节设计实验比较了所述频域判断法相比于时域判断法的优越性。

采用多种激励方式产生振动,包括小球撞击、挖掘、电机振动,以 1 s 为时间间隔对数据进行分割,该次

实验共包含 30 组数据,对每组数据分别用两种方法判断其是否属于振动点,若判断结果与实验记录一致,则判断正确,记为“1”;反之,则判断错误,记为“0”。

由表 2 与表 3 可知,频域判断法的正确率高于时域判断法,同时具有更低的误报率。

表 2 土壤干燥状况下 1 m 处两种方法的判断结果

Table 2 Judgment results of two methods at a distance of 1 m under dry soil conditions

Data number	Actual record	Time domain	Frequency domain	Data number	Actual record	Time domain	Frequency domain
1	0	0	0	16	1	1	1
2	0	0	0	17	0	0	0
3	1	1	0	18	0	0	0
4	0	1	0	19	1	1	0
5	1	1	1	20	0	1	0
6	0	1	0	21	0	0	0
7	0	0	0	22	1	1	1
8	1	1	1	23	0	1	0
9	0	0	0	24	0	0	0
10	0	0	0	25	0	0	0
11	1	0	1	26	1	1	1
12	0	0	0	27	0	0	0
13	0	0	0	28	0	0	0
14	1	1	1	29	1	1	1
15	0	1	0	30	0	0	0

表 3 表 2 实验结果汇总

Table 3 Summary of experimental results in Table 2

Time domain-correct rate	Time domain-error rate	Frequency domain-correct rate	Frequency domain-error rate
80%	20%	93.30%	6.67%

在土壤环境为湿度 1、湿度 2、湿度 3 的条件下,在 1~5 m 范围内共设置 16 种工况,重复上述实验,分别

将实际激励次数、时域判断法和频域判断法得到的结

果记录在表 4 中。可知在振动信号作用下,时域判断法和频域判断法都可以做出正确的判断;但是当振动信号结束后,时

表 4 多种工况下判断结果比较

Table 4 Comparison of judgment results under various working conditions

Working condition	Record times	Time domain	Frequency domain	Working condition	Record times	Time domain	Frequency domain
1	10	12	10	9	20	24	20
2	12	14	12	10	20	22	20
3	12	13	12	11	20	25	20
4	12	10	11	12	20	26	20
5	12	12	12	13	20	20	20
6	14	18	14	14	20	23	21
7	20	23	20	15	20	24	20
8	20	18	20	16	20	22	20

域判断法往往存在误判的情况,导致判断的冲击次数大于实际次数的情况;相比之下,频域判断法的准确度更高,其判断结果与实验记录基本吻合。

5 结 论

本文开展相关实验,研究了光缆结构、土壤湿度、传感距离等重要因素对土壤中振动信号传播特性的影响,为进一步提升 φ -OTDR的性能提供了重要的参考价值,主要结论如下:

- 1) 高弹性模量、多纤芯结构、金属填充芯的光缆具备更高的灵敏度与信噪比。
- 2) 实际应用中应根据光缆特性选取最佳铺设位置。
- 3) 一定范围内,土壤湿度的增加与夯实程度的增加有利于提升灵敏度与信噪比。

在实验基础上分析了扰动信号作用下响应信号的频域特性,基于该特性提出了一种判断外部扰动状态的频域判断法,相比时域判断法,本文提出的频域判断法的判断标准更加多样化且更加严格,具有更高的可行性、优越性与可靠性。

相比现有研究方案,本文的主要优势体现在:

- 1) 所设变量模拟真实情况,为 φ -OTDR的工程应用提供了重要的参考价值。
- 2) 所述频域判断法基于所有实验数据,属于一般性结论,并得到了实验验证。
- 3) 内容涉及时域与频域,综合研究了振动信号在土壤中的传播特性,在研究内容与研究方法上具有创新性。

参 考 文 献

- [1] Yoon S, Yu M, Kim E, et al. Strain transfer function of distributed optical fiber sensors and back-calculation of the base strain field[J]. Sensors, 2021, 21(10): 3365.
- [2] Zhang Q H, Sun Y Y, Zhang Z L, et al. Strain transfer in distributed fiber optic sensor with optical frequency domain reflectometry technology[J]. Optical Engineering, 2019, 58(02): 027109.

- [3] 钟镇, 张旭莘, 邹宁睦. 相位光时域反射仪中声信号测量范围的提升[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306023. Zhong Z, Zhang X P, Zou N M. Enhancement of measurable range for acoustic signal in phase optical time domain reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306023.
- [4] 杨洋, 沙洲, 封皓, 等. 输水管道预警与泄漏定位中 Φ -OTDR技术信号处理法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040607. Yang Y, Sha Z, Feng H, et al. Signal processing method of Φ -OTDR technology in early warning and leakage positioning of water pipelines[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040607.
- [5] Zhao Z Y, Wu H, Hu J H, et al. Interference fading suppression in φ -OTDR using space-division multiplexed probes[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15452-15462.
- [6] Sagues M, Pineiro E, Cerri E, et al. Two-wavelength phase-sensitive OTDR sensor using perfect periodic correlation codes for measurement range enhancement, noise reduction and fading compensation[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6021-6035.
- [7] 李钊, 秦增光, 刘兆军, 等. 基于全变分辅助的相敏光时域反射技术[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1706001. Li Z, Qin Z G, Liu Z J, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometry assisted by total variation techniques[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1706001.
- [8] He Q, Liu R, Wang Z Q, et al. The detection of non-Gaussian vibration with improved sensing performance in Φ -OTDR[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126215.
- [9] Rao Y J, Wang Z N, Wu H J, et al. Recent advances in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR)[J]. Photonic Sensors, 2021, 11(1): 1-30.
- [10] Taranov M A, Gorshkov B G, Alekseev A E, et al. Distributed strain and temperature sensing over 100 km using tunable-wavelength OTDR based on MEMS filters [J]. Applied Optics, 2021, 60(11): 3049-3054.
- [11] 吴慧娟, 刘欣雨, 饶云江. 基于 Φ -OTDR的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(13): 1306003. Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ -OTDR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13):

- 1306003.
- [12] Malakzadeh A, Pashaie R, Mansoursamaei M. 150 km φ -OTDR sensor based on erbium and Raman amplifiers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(6): 326.
- [13] Liaw S K, Liao C W, Tsai M H, et al. Hybrid fiber-optic sensing integrating Brillouin optical time-domain analysis and fiber Bragg grating for long-range two-parameter measurement[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4224.
- [14] Zhan Y G, Song Z K, Sun Z Y, et al. A distributed optical fiber sensor system for intrusion detection and location based on the phase-sensitive OTDR with remote pump EDFA[J]. *Optik*, 2021, 225: 165020.
- [15] Wang S L, Liu F, Liu B. Research on application of deep convolutional network in high-speed railway track inspection based on distributed fiber acoustic sensing[J]. *Optics Communications*, 2021, 492: 126981.
- [16] Pakarzadeh H, Torkian S, Amiri I S. Phase-sensitive inverse four-wave mixing in optical fibres[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(7): 569-576.
- [17] Ren Z J, Cui K, Sun Y F. Pipeline anti-vandalism monitoring system based on time division multiplexing interferometric fiber optic sensor array[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62: 102470.
- [18] Cheng Q, Tang C S, Xu D, et al. Water infiltration in a cracked soil considering effect of drying-wetting cycles[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 593: 125640.
- [19] Zamanian M, Payan M, Memarian S, et al. Impact of bedding plane direction and type of plastic microparticles on stiffness of inherently anisotropic gap-graded soils: index, wave propagation and micromechanical-based interpretations[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 150: 106924.