

光缆结构对相位敏感光时域反射仪传感性能的影响

桂婕,沙洲,封皓*,芮小博

(天津大学精密仪器与光电子工程学院,天津 300072)

摘要:为探究光缆结构对相位敏感光时域反射仪传感性能的影响,以玻璃纤维增强塑料(GFRP)单芯光缆、螺旋铠装光缆、钢丝铠装光缆和层绞式复合光缆等4种典型结构光缆为研究对象,分析了应变在光缆各层结构间的传递过程。通过数值仿真和振动实验,研究了不同光缆的振动响应特性随频率、幅值的变化趋势。实验结果表明:层绞式复合光缆紧套光纤对振动信号的频率响应和幅值响应均表现出良好的传感性能,钢丝铠装光缆与GFRP单芯光缆对高频信号不敏感。

关键词:光缆结构;相位敏感光时域反射仪;光纤传感;振动

中图分类号:TH744 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0034-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.006

Influence of optical cable structure on the sensing performance of Φ -OTDR

GUI Jie, SHA Zhou, FENG Hao*, RUI Xiaobo

(School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To investigate the influence of optical cable structure on the sensing performance of phase-sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR), four typical optical cables, namely glass fiber reinforced plastic (GFRP) single-core optical cable, spiral armored optical cable, steel wire armored optical cable, and stranded composite optical cable, were taken as research objects. The transfer process of strain between different layers of the optical cables was analyzed. Through numerical simulation and vibration experiments, the variation trends of vibration response characteristics of different optical cables with frequency and amplitude were studied. The experimental results show that the tight-buffered fiber of the stranded composite optical cable exhibits good sensing performance in both frequency response and amplitude response to vibration signals, while the steel wire armored optical cable and the GFRP single-core optical cable are insensitive to high-frequency signals.

Key words: optical cable structure, phase-sensitive optical time-domain reflectometer, optical fiber sensing, vibration

0 引言

相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)是一种典型的分布式光纤振动传感技术,其利用光纤中的后向瑞利散射相位变化来实现对外部扰动信号的监测,被广泛应用于长距离多点振动监测定位领域^[1]。

收稿日期:2025-01-18。

基金项目:天津市计量科技项目(2024TJMT010)资助。

作者简介:桂婕(1999—),女,硕士研究生。就读于天津大学精密仪器与光电子工程学院测控技术与仪器专业,主要研究方向为分布式光纤传感。参与项目有:分布式振动传感光缆关键指标测试方法与装置研究(2024TJMT010);分布式光纤振动传感系统性能影响因素研究;基于电磁感应原理的预应力钢管混凝土管断丝检测研究。



***通信作者:**封皓(1983—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤传感技术、管道泄漏检测等。

目前,针对影响 Φ -OTDR传感性能因素的研究,大多集中在脉冲宽度和重复频率^[2]、光纤均匀性^[3]、相干衰落^[4]、光源稳定性^[5]以及解调算法^[6]等方面,而关于光缆结构对其传感性能影响的研究仍较为匮乏。经文献调研发现,目前许多关于 Φ -OTDR的研究工作是在实验室环境中开展,且通常使用裸露光纤。但在实际工程应用中,为了保障系统具有更长的使用寿命,避免光纤遭受外部环境的破坏,必须使用光缆来构建系统。此外,光缆的结构特性对 Φ -OTDR的传感性能具有显著影响。具体地,光缆的材料组成、几何尺寸、制造工艺以及成缆方式等都会影响系统对外界扰动信号的响应,进而影响 Φ -OTDR的探测距离^[7]、空间分辨率^[8]、信噪比(SNR)以及频率响应范围^[9]等关键性能指标。

在设计和部署 Φ -OTDR 系统时,选用合适的光缆结构对于确保系统达到预期的传感性能至关重要。基于 Φ -OTDR 系统,本文通过接入不同类型的光缆,研究4种典型结构光缆对系统传感性能的影响。为量化评估结果,实验采用可重复的激励方式,分析系统灵敏度、SNR 随振源频率和强度变化的特性,对比不同光缆结构组合在相同振动激励下的响应差异。

1 传感原理

1.1 Φ -OTDR 系统传感原理

本文采用的相干型 Φ -OTDR 系统结构如图1所示。激光从光源发出后经分光比为10:90的耦合器1分为本振光(占比10%)和探测光(占比90%),声光调制器(AOM)将探测光转变为脉冲光并引入一个频移,脉冲光被掺铒光纤放大器(EDFA)放大后经环形器(CIR)进入传感光纤。传感光纤中返回的后向瑞利散射光携带了外界信息,该散射光再经 CIR 进入分光比50:50的耦合器2与本振光叠加产生拍频信号,平衡探测器(BPD)将光信号转为电信号,最后经数据采集卡(DAC)传送至上位机。BPD输出的电信号^[10]可表示为

$$i(t) = 2\gamma E_s(t) E_L(t) \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (1)$$

式中: γ 为光/电变换的比例常数, $E_L(t)$ 、 $E_s(t)$ 分别为本振光、后向瑞利散射光, $\Delta\omega$ 为 AOM 向探测光引入的频移量, $\Delta\varphi$ 为外界扰动信号作用在传感光纤上时,引起光纤内部光的相位变化量,该变化量包含了外界扰动信号的特征信息,有 $\Delta\omega = \omega_s - \omega_L$, $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_L$, ω_s 、 ω_L 分别为后向瑞利散射光和本振光的角频率, φ_s 、 φ_L 分别为后向瑞利散射光和本振光的相位。

1.2 信号解调算法

对 $i(t)$ 采样得到离散数字信号 $S(n)$, 令 $F_n = E_L(n) E_s(n)$, 则

$$S(n) \propto 2\gamma F_n \cos(\Delta\omega_n t + \Delta\varphi_n) \quad (2)$$

式中: F_n 为信号的幅值; $\Delta\omega_n$ 是数字角频率, 设 DAC 的

采样率为 f_{DAC} , 则有 $\Delta\omega_n = \frac{\Delta\omega}{f_{\text{DAC}}}$; $\Delta\varphi_n$ 是 $\Delta\varphi$ 对应的相位, $n = 1, 2, 3, 4, \dots, N$; N 是 DAC 的采样点数。

对数字信号 $S(n)$ 进行数字正交解调, 算法原理如图2所示。将 $S(n)$ 分别与同频正交信号 $\sin(\Delta\omega_n n)$ 、 $\cos(\Delta\omega_n n)$ 相乘, 使用低通滤波去除和频信号, 可得到信号的幅值 F_n 和相位 $\Delta\varphi_n$ 分别为

$$F_n \propto \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (3)$$

$$\Delta\varphi_n = \arctan\left(\frac{I}{Q}\right) + 2m\pi, \quad m \in Z \quad (4)$$

式中: I 、 Q 分别为 $S(n)$ 与同频正交信号相乘后经低通滤波所得的同相分量与正交分量^[18], m 为整数。

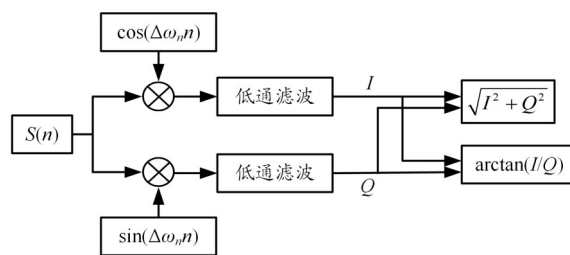


图2 数字正交解调算法原理图

2 光缆结构

2.1 光缆结构对信号传递的影响

外界信号并非直接作用于光纤,而是经由光缆的多层构件传递至光纤。2种典型光缆结构图如图3所示。光缆通常由外护套、加强件、缓冲层和光纤4个部分组成。其中,外护套作为光缆的最外层,可防止外部环境对光缆造成直接损伤,并借助其自身的弹性和厚度来缓解瞬时冲击力;加强件是光缆的骨架,当光缆受到弯曲或压缩时起到主要的支撑作用,依靠自身的弹性和刚性吸收并分散外力,从而保护内部光纤;缓冲层则能够吸收部分机械变形,将外界压力均匀分散至光缆内部,防止光纤承受过大的集中应力。由此可见,实际到达光纤的信号是经各构件调制后的信号,而非原始的外界信号。

在外界信号传递至光纤的过程中,光缆结构对该信号的影响可使用一种应变传递模型解释^[15]。多层光缆结构图如图4所示。图中, R 为光缆径向位置, x 为光缆轴向位置。具有多层包覆结构的光缆粘附在被监测物体上,将被监测物体发生的应变 $\varepsilon_{\text{original}}$ 作为原始外界信号, 设 $\varepsilon_{\text{original}}$ 使

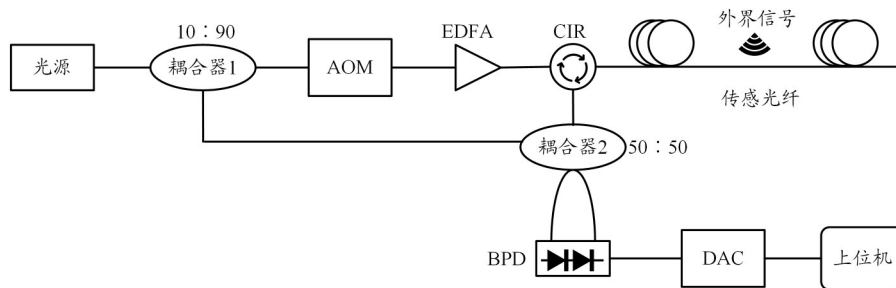


图1 相干型 Φ -OTDR 系统结构图

桂婳,沙洲,封皓,等:光缆结构对相位敏感光时域反射仪传感性能的影响

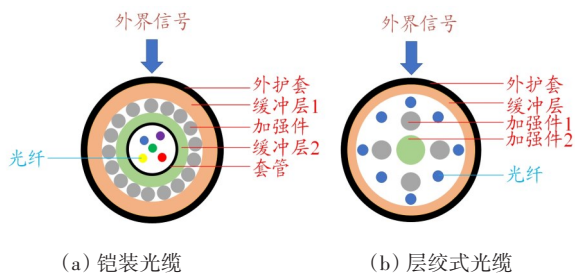


图3 光缆结构图

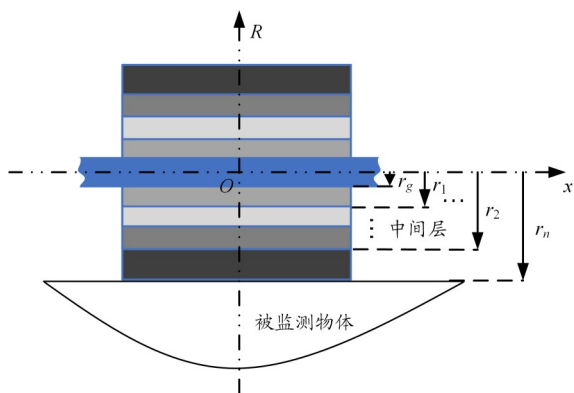


图4 多层光缆结构图

光纤发生的应变为 $\varepsilon_{\text{fiber}}$, 则光缆受外界信号作用的区域处有 $\varepsilon_{\text{fiber}} = \bar{\alpha} \varepsilon_{\text{original}}$ 。 $\bar{\alpha}$ 是应变传递率, 定义如下:

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{\sinh\left(k \frac{L}{2}\right)}{k \frac{L}{2} \cosh\left(k \frac{L}{2}\right)} \quad (5)$$

式中: k 是应变滞后参数, L 是受到外界信号作用的光纤长度。

$$k^2 = \frac{2}{r_g^2 E_g \left[\sum_{i=2}^n \frac{1}{G_i} \ln\left(\frac{r_i}{r_{i-1}}\right) + \frac{1}{G_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_g}\right) \right]} \quad (6)$$

式中: r_i 、 G_i 分别是第 i 层包覆层的剪切模量和外半径, r_g 、 E_g 分别是光纤的半径和杨氏模量。在上述公式中, 光缆的各包覆层从光纤开始由内向外依次编号, 与光纤直接接触的为第 1 层包覆层, 最外层为第 n 层包覆层, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。由此可知, 光纤所感知的信号是经各包覆层厚度与弹性模量调制后的结果。

上述应变传递模型的成立需要 3 个假设条件:

1) 模型中的所有材料都保持弹性, 只有光缆最外层材料承受信号并均匀应变, 光纤和中间包层不直接承受任何外部载荷; 2) 光纤各部位力学性能相同; 3) 各层界面之间应变连续, 所有界面之间的结合是完美的, 不存在脱粘现象。

2.2 4 种典型光缆的结构特征

光缆的常用构件包括光纤油膏、钢丝、钢管、芳纶、聚乙烯 (Polyethylene, 简称 PE) 包层等。这些构件具有不同的力学特性, 会对振动信号产生吸收或衰减作用, 从而导致光纤所监测到的信号与原始外界信号之间存在相位、幅值等差异。为探究这些差异对不同光缆传感性能的影响, 本文结合图 3 的铠装光缆、层绞式光缆两大核心结构类型, 同时选取基础型单芯光缆作为对照, 选取玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 单芯光缆、螺旋铠装光缆、钢丝铠装光缆和层绞式复合光缆^[16-17]这 4 种常见的光缆进行分析。

GFRP 单芯光缆的结构如图 5 所示, 其内部仅含一根单模光纤, 外护套采用 GFRP 材料。GFRP 杨氏模量通常为 20~80 GPa, 具有质量轻、强度高、耐腐蚀等特点。该光缆结构简单, 硬度高、抗拉强度大, 且应变线性拟合度良好。由于外界信号穿过 GFRP 包层后即可直接作用于光纤, 不会受到过多中间构件的影响, 因此 GFRP 单芯光缆是一种具有代表性的单芯光缆。

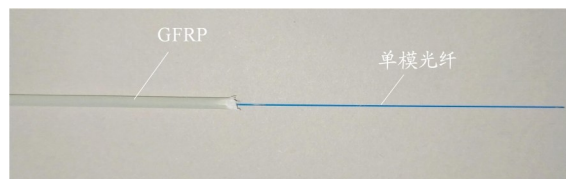


图5 GFRP 单芯光缆

螺旋铠装光缆属于中心束管式光缆, 其内部结构复杂, 包含多种构件, 因此外界信号在作用于光纤之前会受到多重干扰。螺旋铠装光缆结构如图 6 所示, 其外壳为具有防水、防腐蚀功能的 PE 护套, 内部设有不锈钢编织网和螺旋钢管以增强光缆的机械强度, 编织网与钢管之间还包覆一层芳纶, 进一步提升了光缆的抗压性与抗拉性。螺旋钢管内封装有 2 根 PE 紧套单模光纤。



图6 螺旋铠装光缆

钢丝铠装光缆同样属于中心束管式光缆, 其结构如图 7 所示。最外层为 PE 护套, 内部设有一层不锈钢丝绞合层作为铠装。钢丝层下方为 1 根聚四氟乙烯 (PTFE) 管, 管内填充油膏, 4 根单模裸光纤置于油膏之

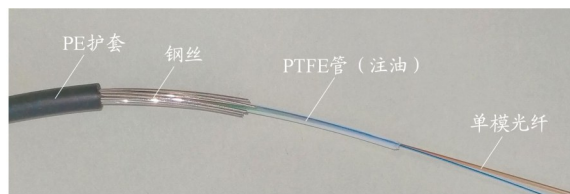


图7 钢丝铠装光缆

中。油脂的作用在于填充光纤间的空隙,能够有效减轻外力挤压光纤时造成的变形和损伤,从而提升光缆的整体耐压能力。

层绞式复合光缆与前3种光缆的结构不同,其中心位置并非光纤,而是加强件,多根装有光纤束的套管围绕加强件分布。这种结构导致光缆内部构件数量较多,光纤位置不对称,使得应力分布与应变传递更加复杂。本文选用的层绞式复合光缆结构如图8所示。最外层为PE护套,其内包覆一层芳纶;芳纶下方设有2根紧套单模光纤和2根注油PTFE管,每根PTFE管中均有2根单模光纤。光缆中心为加强件,由1根GFRP和2束芳纶组成,外部包裹黑色PE护套,以提升光缆的强度和抗拉性。所有光纤均围绕中心加强件排列分布。

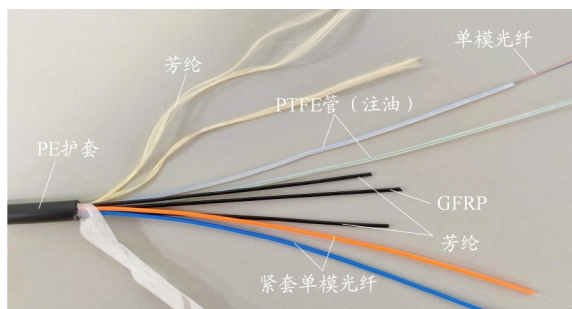


图8 层绞式复合光缆

3 光缆应变仿真分析

光缆的结构特性直接影响光纤的应变响应,进而决定 $\Delta\varphi$ 的变化。为探究不同结构光缆的内部应变情况,本文基于上述4种光缆构建仿真模型,分析在外界信号作用下时各光缆截面的应力分布,以及光缆中光纤的应变。采用COMSOL软件中的固体力学模块进行仿真建模。为保证模型收敛、降低求解难度并减少计算时间,在保留各光缆结构特征的前提下对模型进行了适当简化。仿真中,在光缆表面的某一区域施加具有指定振幅和频率的位移作为外界振动信号,使光缆产生形变,由此得到各光缆截面的应力分布,如图9所示。可以看出,GFRP单芯光缆外壳承担主要形变,表现出较高的应力,整体光缆截面应力分布较为均

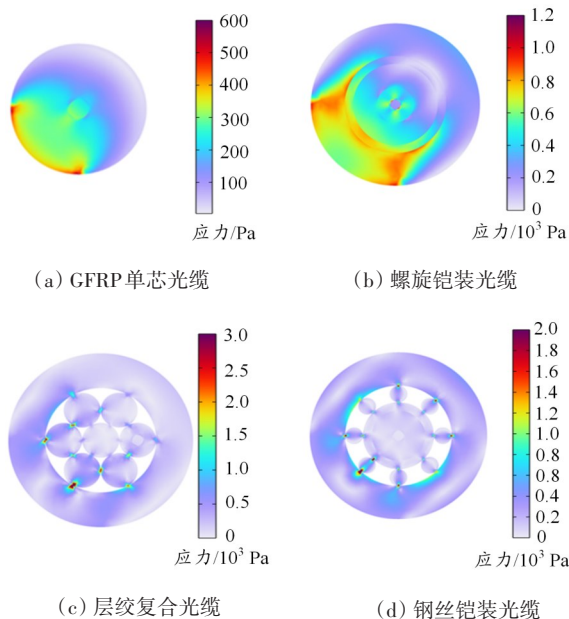


图9 不同光缆截面应力分布图

匀,无明显集中。螺旋铠装光缆的高应力主要分布在铠装层区域,且由于各层光缆构件材质特性差异的影响,应力强度在该光缆的不同结构层之间存在明显分层。层绞复合光缆的应力分布则呈现明显的不均匀,高应力多集中在加强件区域。钢丝铠装光缆与层绞复合光缆的应力分布情况相似,高应力集中在钢丝层区域,而内部光纤区域的应力相对较低,表明外界振动信号对这2种光缆内部光纤的影响较小。

在振动信号振幅为0.1 mm时,频率从20 Hz增大到300 Hz过程中,4种结构的光缆内光纤应变峰值的变化曲线如图10所示。可以看出,随着频率的增加,各光缆的光纤应变均未出现明显变化,数值保持稳定。以GFRP光缆为例,仅在细节上观察到极微小的下降趋势,且该现象在4种光缆中普遍存在。

在100 Hz振动信号作用下,振幅从0.1 mm增大至1 mm过程中,4种结构的光缆内光纤应变峰值的变化曲线如图11所示。可以看出,各光缆的应变均随振幅

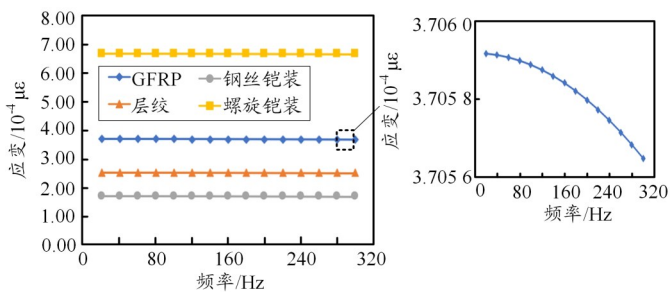


图10 应变-频率曲线

桂婕,沙洲,封皓,等:光缆结构对相位敏感光时域反射仪传感性能的影响

增大而增大,且呈现出良好的线性关系。在相同振幅下,不同光缆的应变响应存在显著差异:螺旋铠装光缆的光纤应变最大,GFRP单芯光缆次之,层绞复合光缆和钢丝铠装光缆的光纤应变相对较小。通过仿真计算得出,螺旋铠装光缆、GFRP单芯光缆、层绞式复合光缆及钢丝铠装光缆的应变传递率依次为61.18%、33.87%、23.29%和15.71%,其数值大小与各曲线所反映的应变响应趋势具有一致性。

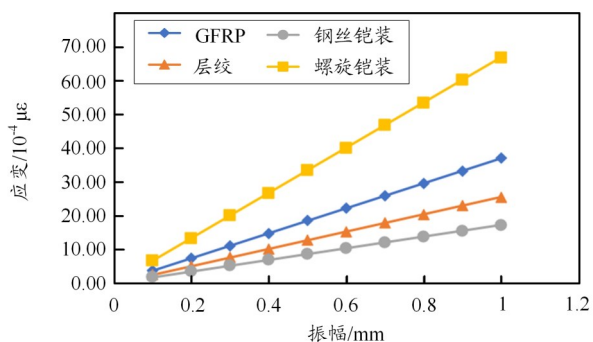


图11 应变-振幅曲线

4 实验结果与分析

4.1 实验装置

实验装置如图12所示。实验采用实验室自制的Φ-OTDR模块,其内部集成了图1中的系统器件,模块外部接入待测光缆。光源为波长1550 nm的窄线宽单频光纤激光器,其输出光谱线宽小于3 kHz,具有超低的频率噪声和强度噪声,边模抑制比大于55 dB,波长稳定性为-10~10 pm。信号发生器输出的电信号经功率放大器放大后驱动模态激振器,使其产生频率与输入信号相同、振幅与电压成正比的周期振动。激振器的振动部件上安装有一根铁质横杆,4种长度均为1 m的待测光缆平行固定于横杆上。为实现在同一系统中对多根光缆的同时监测并区分各段光缆的信号,各光缆中的光纤之间使用250 m的普通单模光纤串

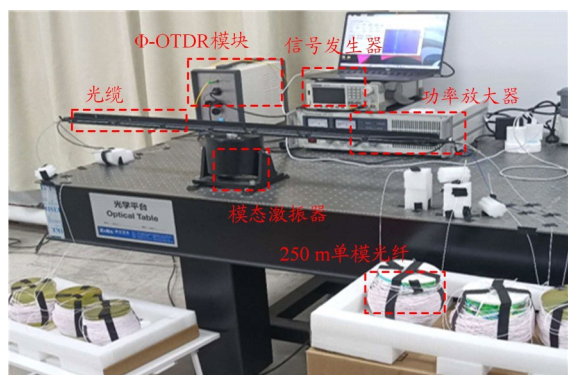


图12 实验装置实物图

联。上位机负责控制实验模块并进行信号解调。

4.2 光缆结构对系统频率响应的影响

实验中,信号发生器输出正弦信号驱动激振器产生稳定的机械振动。在振幅固定的条件下,频率从20~200 Hz(以20 Hz为步长)逐次变化,每个频率点采集一组数据。由于层绞式复合光缆中包含2种不同包覆形式的光纤(PE材料紧套和光纤油膏包裹),因此实验共采集5根光纤的数据。为便于叙述并突出光缆结构特征,后文提及这5根光纤时均使用其名称缩写,如表1所示。在频率变化过程中,5根光纤对振动信号响应的SNR变化曲线,如图13所示。可以看出,各光缆的SNR与频率之间未呈现明显的数学关系,数值整体保持平稳,只在一定范围内波动,且随频率增大表现出轻微的下落趋势,这与仿真结果相符。对比不同光缆的响应可知:层绞紧套和层绞注油的SNR处于较高水平;螺旋铠装紧套的SNR略低于前两者;钢丝铠装注油和GFRP的SNR整体偏低,且随频率增大下降趋势更为明显。

表1 光缆名称缩写

序号	光缆全称	名称缩写
1	层绞式复合光缆紧套光纤	层绞紧套
2	层绞式复合光缆注油光纤	层绞注油
3	螺旋铠装光缆紧套光纤	螺旋铠装紧套
4	钢丝铠装光缆注油光纤	钢丝铠装注油
5	GFRP单芯光纤	GFRP

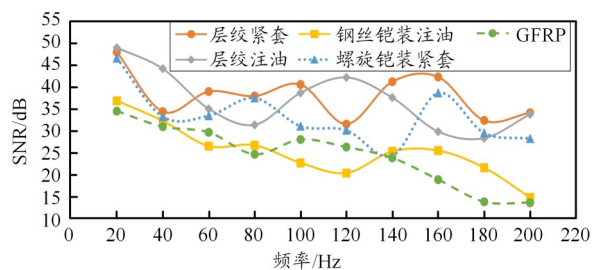


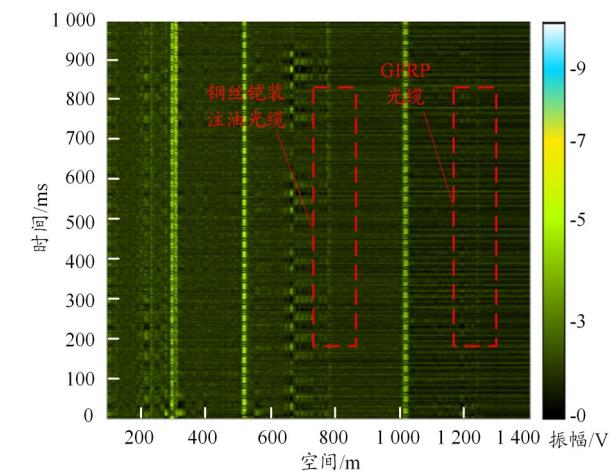
图13 不同光缆在20~200 Hz振动频率下的响应SNR变化曲线

钢丝铠装光缆SNR偏低的原因可归结为2点:一是紧密的钢丝层质地坚硬,使光缆整体形变困难,仿真结果也印证了这一点;二是内部光纤被具有阻尼特性的油膏包裹,导致信号能量耗散、振幅衰减^[9]。因此,相同振动条件下,该光缆的应变传递率较低,光纤形变量较小,SNR随之偏低。

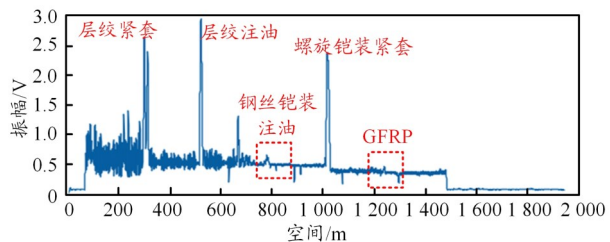
仿真中,GFRP的形变量相对于其它光缆处于较高水平;但在实验中,其SNR却明显偏低。这一差异

主要与光缆和铁质横杆间的机械耦合有关。Reinsch T 等人^[20]的研究表明,光缆与周围介质的耦合质量取决于接触点数与接触面积——接触点数越多,接触表面积越大,耦合质量越高。相比其它3种光缆,GFRP 光缆质量更轻、直径更细,其与铁质横杆的接触点数与接触面积远小于其它光缆,导致耦合效果较差,SNR 偏低。而仿真模型基于理想状态,未考虑耦合不佳的问题,因此仿真结果与实际实验之间存在差异。

当振动信号激励频率超过 100 Hz 后,钢丝铠装注油光缆及 GFRP 光缆的传感性能表现出显著的不稳定性,其响应信号的 SNR 等关键指标呈现出间歇性的动态变化。在信号质量差的情况下,时空图中难以观察到相应的信号图像,如图 14(a)所示(200 Hz 振动频率下的时空图)。图中,绿色条纹是各光缆的传感信号,从左至右依次为:层绞紧套、层绞注油、钢丝铠装注油、螺旋铠装紧套、GFRP。钢丝铠装注油和 GFRP 的 SNR 过低(低至 5~9 dB),图中对应的信号图像缺失,其平均振幅-空间波形图中也无法观察到明显的扰动波形,如图 14(b)所示。与之相反,振幅-空间波形图中的层绞紧套、层绞注油和螺旋铠装紧套在高频区的



(a) 时空图

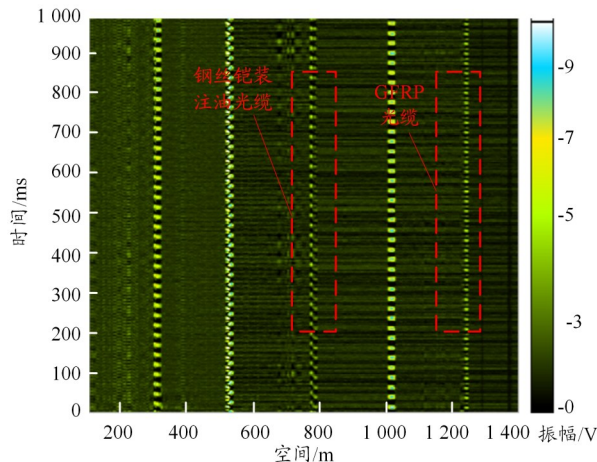


(b) 平均振幅-空间波形图

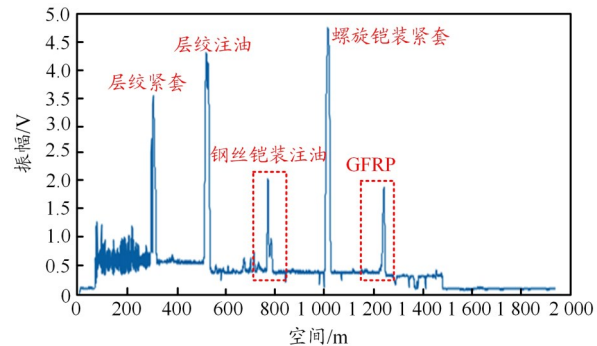
图 14 振动信号频率为 200 Hz 时, 5 根光缆的时空图和平均振幅-空间波形图

响应信号质量仍然良好,表现出更为稳定的传感性能。

当振动信号频率为 40 Hz 时,5 根光缆响应信号的时空图和平均振幅-空间波形图如图 15 所示。可以看出,在低频振动信号下,2 张图中钢丝铠装注油和 GFRP 这 2 种光缆均有明显响应信号。



(a) 时空图



(b) 平均振幅-空间波形图

图 15 振动信号频率为 40 Hz 时, 5 根光缆的时空图和平均振幅-空间波形图

据此可知,在 Φ -OTDR 系统中,钢丝铠装注油光缆和 GFRP 光缆仅适用于 100 Hz 以下低频振动信号的监测,即这 2 种光缆对高频信号不敏感,因此可一定程度上隔离高频噪声的干扰,适用于存在高频噪声环境中的低频信号监测。相比之下,层绞紧套、层绞注油和螺旋铠装紧套这 3 种光缆在高频信号下仍能保持较高的 SNR,传感性能更为稳定。

4.3 光缆结构对系统幅值响应的影响

在幅值响应实验中,信号发生器输出正弦信号驱动激振器产生频率恒定为 20 Hz 的机械振动。由于激振器输出信号的峰峰值与信号发生器输入电压的峰

桂婕,沙洲,封皓,等:光缆结构对相位敏感光时域反射仪传感性能的影响

峰值呈线性正相关,因此设置信号发生器输出电压峰值从0.5~2 V以0.5 V为步长变化,逐点采集数据。各光缆在20 Hz下的信号强度如图16所示。可以看出,仅层绞紧套所测得的信号强度随外界扰动信号振幅增大而显著增大,呈现出良好的正相关性。而其它光缆的信号强度随振幅变化无明显规律,响应曲线趋于平缓,表明这些光缆对振幅变化的敏感性较低。因此,层绞紧套在对外界信号振幅变化的监测中表现出显著优势。

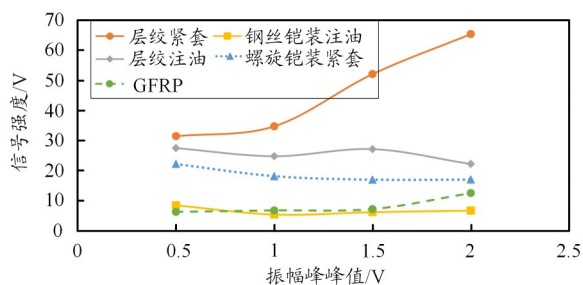


图16 不同光缆的幅值响应SNR变化曲线

5 结束语

本文探究了光缆结构对 Φ -OTDR系统性能的影响,阐述了 Φ -OTDR对振动信号的调制原理与解调方法,引入应变传递理论模型,并选取4种典型结构光缆(5种包覆方式),通过仿真与实验研究了其频率和幅值响应特性。研究结果表明:

1)频率响应方面:层绞紧套、层绞注油、螺旋铠装紧套这3种光缆的SNR在全频段均处于较高水平且数值相近,随频率增加未见显著变化,传感性能稳定,适用于关注目标信号频率的监测场景;而钢丝铠装注油和GFRP这2种光缆的SNR随频率增大而下降,适用于100 Hz以下的低频信号监测,具备一定的高频滤波功能。

2)幅值响应方面:仅层绞式复合光缆紧套光纤的信号强度与振动振幅呈显著正相关,表现出良好的线性关系;其余光缆的信号强度随振幅变化无明显规律。

综上所述,层绞式复合光缆紧套光纤在频率响应和幅值响应方面均表现出优异的传感性能,具有最高的灵敏度与最佳的线性度。本文研究结果可为 Φ -OTDR传感系统的光缆选型提供理论依据与实验参考。

参考文献:

[1] 张昕,申雅峰,薛景峰. 基于瑞利散射的分布式光纤传感器的研究现

状[J]. 光学仪器, 2015, 37(2): 184-188.

[2] 尹康. 基于FPGA的相位敏感光时域反射仪性能优化研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.

[3] 周锦喆. 基于相位调制光频梳的 Φ -OTDR系统传感性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.

[4] Zabihi M, Chen Yusheng, Zhou Tong, et al. Continuous fading suppression method for Φ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3602-3610.

[5] 李勤,张春熹,李立京,等. 激光器频率漂移对相位敏感光时域反射计扰动定位精度的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 116-123.

[6] 黄闽南,范佳铭,王一山,等. 基于时域曲线相关性鉴别的分布式光纤扰动定位算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2024(2): 93-97, 103.

[7] Shang Ying, Wang Chen, Ni Jia-sheng, et al. Discussion on the sensitivity of optical cables based on distributed acoustic sensing[J]. Optical Review, 2019, 26(6): 659-663.

[8] Spikes K T, Tisato N, Hess T E, et al. Comparison of geophone and surface-deployed distributed acoustic sensing seismic data[J]. Geophysics, 2019, 84(2): A25-A29.

[9] Xiao Chun, Long Junqiu, Jiang Lang, et al. Review of sensitivity-enhanced optical fiber and cable used in distributed acoustic fiber sensing [C]//2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 5-8, 2022, Shenzhen, China. Piscataway: IEEE, 2022: 359-363.

[10] 苑宏宇. 相位敏感光时域反射仪的性能提升技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.

[11] Butter C D, Hocker G B. Fiber optics strain gauge[J]. Applied Optics, 1978, 17(18): 2867-2869.

[12] 马国旗,曹丹平,尹教建,等. 分布式声传感井中地震信号检测数值模拟方法[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2): 311-320.

[13] 彭飞. 相位敏感型光时域反射仪及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

[14] 陈纲,廖理凡,郝伟. 晶体物理学基础[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007: 333-336, 471-474.

[15] Li Dongsheng, Li Hongnan, Ren Liang, et al. Strain transferring analysis of fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Engineering, 2006, 45(2): 024402.

[16] 张旭莘,张益昕,王亮,等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73.

[17] 黄晓炜,陈坚. 光缆结构与压扁冲击性能初探[J]. 现代传输, 2019, (6): 74-76.

[18] 孙文达,郑晶,孙远. 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[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(23): 109-115.

[19] Xiao Zhenlong, Jing Xingjian, Li Cheng. The transmissibility of vibration isolators with cubic nonlinear damping under both force and base excitations[J]. Journal of Sound and Vibration 2013, 332(5): 1335-1354.

[20] Reinsch T, Thurley T, Jousset P. On the mechanical coupling of a fiber optic cable used for distributed acoustic/vibration sensing applications—a theoretical consideration[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(12): 127003-127003.