

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.240100.

光纤光缆技术与应用

王龙生,谢欣,姚猛,等.分布式光纤声波传感及其进展研究[J].光通信研究,2025(5):240100.

Wang L S, Xie X, Yao M, et al. Distributed Optical Fiber Acoustic Wave Sensing and Its Progress[J]. Study on Optical Communications, 2025(5): 240100.

分布式光纤声波传感及其进展研究

王龙生¹, 谢欣², 姚猛², 邹辉²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 通信信号研究所, 北京 100081;

2. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023)

摘要: 分布式光纤传感技术以光纤作为传感传输媒介, 通过在光纤沿线位置获取声波振幅和相位并进行处理得到其相应信息, 具有体积小、灵敏度高、本征绝缘、抗电磁干扰和可多路复用等明显优势, 因此在声波探测领域得到了广泛应用。文章首先概述了分布式光纤声波传感(DAS)系统的结构及其解调方法, 对空间分辨率与传感距离、响应频率和信噪比提升层面发展进程进行了论述。接着介绍了 DAS 系统在周界安全、地震波探测、铁路监测和电力监测应用领域的发展。最后, 对 DAS 系统的未来进行展望, 首先需要注意在保持优良信噪比的情况下尽可能延长距离以及提高精度; 其次, 需要解决不同场景下应用的适应性问题, 以确保工作时具有良好的稳定性; 最后, 需要探索光纤传感与其他学科多领域结合的方法。

关键词: 分布式光纤声波传感; 瑞利散射; 光电探测; 相位解调

中图分类号: TN929

文献标志码: A

Distributed Optical Fiber Acoustic Wave Sensing and Its Progress

WANG Longsheng¹, XIE Xin², YAO Meng², ZOU Hui²

(1. Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Distributed optical fiber sensing technology uses optical fiber as the sensing transmission medium to obtain sound wave amplitude and phase along the optical fiber and process the corresponding information. It has obvious advantages such as small size, high sensitivity, intrinsic insulation, anti-electromagnetic interference and multiplexing, so it is widely used in the field of acoustic detection. In this paper, the structure and demodulation method of Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing (DAS) system are summarized, and the development process of spatial resolution and sensing distance, response frequency and signal-to-noise ratio are discussed. Then, the development of DAS system in the fields of perimeter security, seismic wave detection, railway monitoring and power monitoring is summarized. Finally, future prospects for DAS are discussed: first, extending range while preserving high signal-to-noise ratio and improving accuracy; second, tailoring the system to diverse scenarios to guarantee operational stability; and third, exploring interdisciplinary integration of fiber-optic sensing with other fields.

Key words: DAS; Rayleigh scattering; photoelectric detection; phase demodulation

0 引言

分布式光纤声波传感(Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing, DAS)使用相位光时域反射法(Phase Optical Time Domain Reflectometry, φ -OTDR), 光纤声波传感器利用相位调制光谱技术以提高传感器的灵活性和通用性^[1], 该技术通过测量背向散射光的参数确定光纤的振动频率, 从而达到声音检测的目的。

基于 φ -OTDR 的 DAS 可分为 3 个阶段。第 1 阶段, 为了通过后向散射光的干涉图样中的振幅变化来获取振动信息, Taylor 等人于 1993 年提出^[2]

了 φ -OTDR。但由于振动与振幅变化之间存在非单调关系, 仅能进行定性检测, 而无法重建振动波形。并且与传统光时域反射(Optical Time Domain Reflectometry, OTDR)技术相比, φ -OTDR 需注入光纤的光具有高度的相干性, 并要求光源的线宽小、频率漂移小。在这一时期, φ -OTDR 通常被称为分布式振动传感(Distributed Vibration Sensing, DVS)技术。

2011 年, PAN 等人^[3]提出结合相干检测与数字域傅里叶积分, 可在 φ -OTDR 中实现高信噪比和高灵敏度, 并可同时进行幅度和相位的定量测量。此后, 研究者们提出了一系列定量解调方法, 包括 3×3 耦合器(Optical Couple, OC)解调、相位生成载波

收稿日期: 2024-05-21; 修回日期: 2024-07-15; 纸质出版日期: 2025-10-10

作者简介: 王龙生(1988-), 男, 广西桂林人。副研究员, 主要从事铁路通信方面的研究。

通信作者: 邹辉, 教授, 博士。E-mail: huizou@njupt.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

(Phase Generated Carrier, PGC)、同相正交(In-Phase and Quadrature, IQ)解调等,标志着第2阶段的开始。在这一阶段,定量的 φ -OTDR逐渐演化为DAS。

在第3阶段,DAS被开发出一系列新的检测能力,尤其是多维定位^[4]、多分量测量和模式识别。尽管第3阶段刚刚开始,但DAS的高密度空间采样特性^[5]与对采样信息分析的能力引起了广泛关注,与传统的点传感技术相比显示出了天然的优势。

本文将从基于 φ -OTDR的DAS系统的结构及解调方法、技术发展、应用发展和未来展望4个方面进行阐述。

1 结构与解调方法

φ -OTDR是基于瑞利散射光的相干效应进行的传感技术,光纤中散射的频移分布图如图1所示,图中, f_0 为入射光频率。瑞利散射源自光纤介质的不均匀性,导致光纤内部形成随机分布的“散射点”。当受到外部扰动时,光纤发生形变^[6],其折射率、纤芯和长度发生变化,这些变化通过干涉效应导致光纤中散射体空间位置改变,进而改变沿光纤反向传播的背向瑞利散射光相位,从而实现对外部事件的监测和定位^[7]。

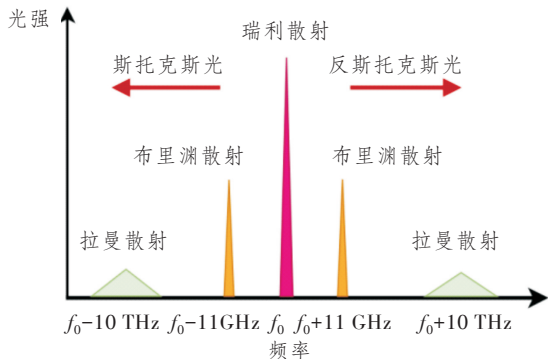


图1 光纤中散射的频移分布图

Figure 1 The frequency shift distribution of scattering in optical fibers

φ -OTDR有两个研究方向,分别为DVS和DAS。DVS专注于对分布式振动信息的感知,DAS技术是在DVS的基础上^[8]为特定的振动监测需求而进一步发展来的。DVS采用直接探测结构^[9],其基本结构如图2所示。直接探测结构在窄线宽激光器基础上,运用声光调制器将其连续光调制为脉冲光。脉冲光经掺铒放大器放大后再由光环行器端口输入至光纤中。光环行器将光纤中产生的背向瑞利散射光传回光电探测器^[10],数据采集卡由脉冲发生器提供同步触发信号,将采集的数据传输至数据处理系统^[11]。

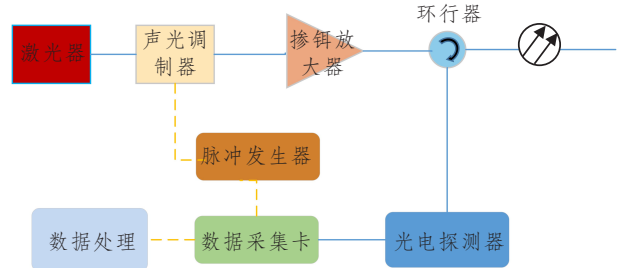


图2 φ -OTDR基于直接探测的基本结构图

Figure 2 The structure of φ -OTDR based on direct detection scheme

直接探测结构的DAS系统相位处理可以采用基于PGC解调或 3×3 OC解调的方法。DAS系统依据PGC解调技术运作,即运用迈克尔逊干涉仪(Michelson Interferometer, MI)型非对称干涉仪与相位载波生成技术结合的方式来完成相位的解调工作^[12],其构造如图3所示。整个系统主要由4部分组成:传感信号的生成、PGC调制过程、传感信号的采集以及信号的处理和展示。后向散射光含有扰动信息,该散射光进入由两片法拉第旋转镜组成的MI型非对称干涉仪,进行PGC调制。接着,所产生的光干涉信号由光电探测器转换为电信号。该信号通过数据收集系统发送到计算机进行深入分析和结果展示。经MI型干涉仪与PGC调制的光,在光电探测器的检测下,干涉信号被检测出,该信号采用贝塞尔函数进行展开,并经信号采集器送至计算机进行解调。基于PGC解调法^[13]的解调流程如图4所示。经过拓展的光干涉信号会依次与载波信号的一阶和二阶频率混合,然后经低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)处理,获得两个正交的正弦波与余弦波信号。通过差分合成、交替相乘、相减以及积分等多步骤处理后,能够提取出含扰动信息的有效信号。最后用高通滤波器(High Pass Filter, HPL)除去不需要的相位干扰,得到清晰的解调信号。

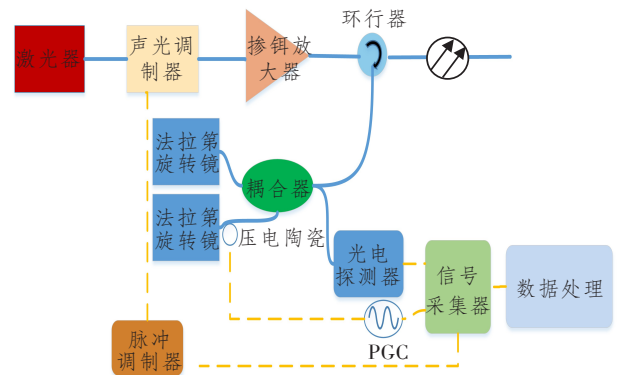
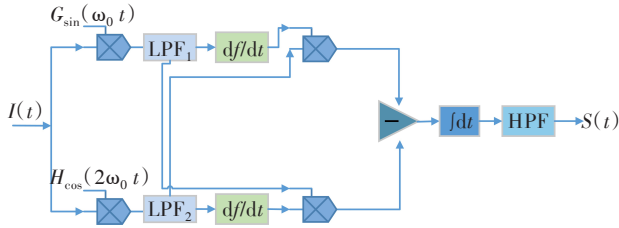


图3 基于PGC探测的结构

Figure 3 Structure based on PGC detection



注： $I(t)$ 为光干涉信号； $G_{\sin}(w_0 t)$ 和 $H_{\cos}(2w_0 t)$ 为参考信号； $S(t)$ 为解调信号； d/dt 为低通滤波后的信号 f 的微分处理。

图 4 基于 PGC 解调法的解调流程图

Figure 4 Demodulation flow chart based on PGC demodulation method

基于 3×3 OC 的 DAS 系统结构前端与 DVS 系统相同。采用 3 端口 OC 在散射光接收端对信号进行探测。通过引入两臂之间存在 120° 相位差的 3×3 OC 并结合干涉结构来实现相位解调^[14]。按照干涉结构的不同可以分为基于 3×3 OC 的 MI 型和马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometer, MZI) 型, 其中 MI 型结构与基于 PGC 解调法的系统结构类似, 基于 3×3 OC 的 MZI 型 DAS 系统图 5 所示。承载干扰数据的后向瑞利散射光首先被 OC 导引至迈克尔逊-马赫-曾德尔干涉仪 (Michelson-Mach-Zehnder, MMZ) 内以形成干涉效应的信号, 并由光电探测器转换形成 3 组相位相差 120° 的电信号。这 3 组电信号经数据采集器收集处理后输入计算机, 以便进行解调分析并展现结果^[15]。图 6 所示为基于 3×3 OC 的解调技术步骤。该流程是将 3 个信号 ($I_1 \sim I_3$) 合并后乘以 $-\frac{1}{3}$, 3 路原始信号分别与此信号相加得到去除直流分量的 3 路信号 a 、 b 和 c , 对 a 、 b 和 c 进行微分处理分别得到 d 、 e 和 f 等 3 路信号, 接着将 a 与 $(e-f)$ 相乘、 b 与 $(f-d)$ 相乘、 c 与 $(d-e)$ 相乘并将三者相加得到 M 。之后将得到的结果 M 与 3 路去直流信号平方和 N 的 $\sqrt{3}$ 倍相除以消除干扰项, 最后通过积分过程和带通滤波器 (Band Pass Filter, BPF) 的作用获得最终待解调的

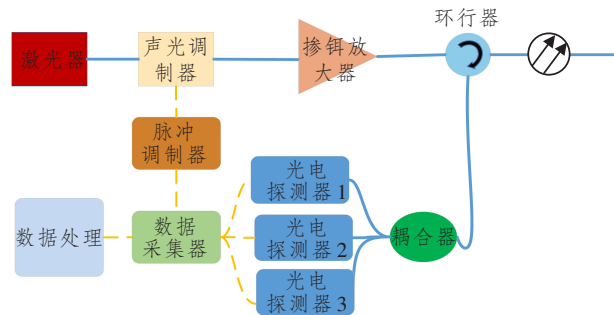


图 5 基于 3 端口 OC 探测的结构

Figure 5 Structure based on three-port OC detection

信号。

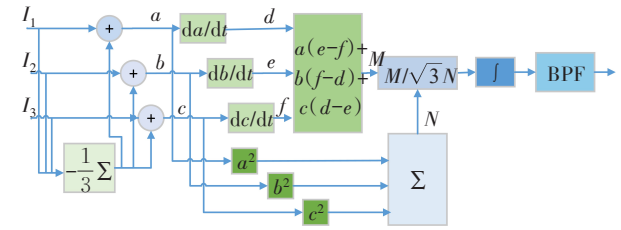


图 6 基于 3×3 耦合解调法的解调流程图

Figure 6 Demodulation flow chart based on the 3×3 coupling demodulation method

目前 DAS 系统通常采用外差相干型探测结构, 如图 7 所示。采用窄线宽激光器产生的窄线宽激光, 经 $90:10$ 的耦合器将其发射出的激光分成 90% 和 10% 两路, 分别作为探测光和参考光。探测光在声光调制器的作用下, 调制成脉冲光经过掺铒放大器后产生探测光脉冲。探测光脉冲经环形器注入光纤, 返回的后向瑞利散射光与参考光在 3 dB OC 中干涉, 平衡探测器将输入的两路光转换成电信号输出。数据采集器采集由模/数转换器把模拟信号转换成的数字域数据^[16], 之后进行信号分析与处理。外差相干探测结构的信号处理使用 IQ 相位解调法^[17], 解调流程如图 8 所示。平衡探测器输出的拍频信号分别与正交的数字本振信号相乘, 通过 LPF 滤去二倍频项和噪声后相除。最终通过获取反正切来确定缠绕的相位信息。通常在得到缠绕的信息后进行时间和空间解缠绕, 从时间和空间两个角度得到其相位信息。

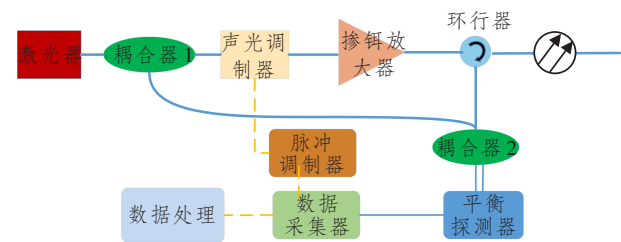
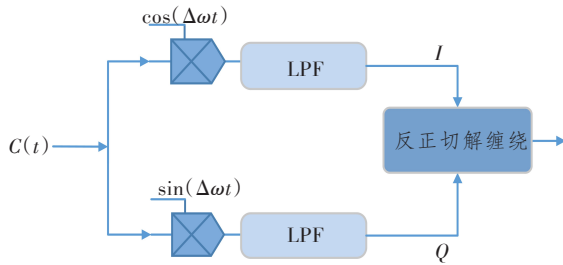


图 7 基于外差相干探测的结构

Figure 7 Structure based on heterodyne coherence detection

稳定性方面, PGC 解调法易受光源功率和调制器件的稳定性影响; 基于 3×3 光 OC 的解调法易受环境影响; 数字相干 IQ 解调法易受相位噪声和偏振噪声的影响。系统性能方面, PGC 技术的解调方式具备广阔的动态检测区间、较高的感应灵敏度、良好的线性响应特性以及优秀的信噪比; 而基于 3×3 OC 的解调技术也展现出广泛的动态量程、较快的响应速度以及免除了调制部件的需求; IQ 解调技术展现出了结构的简洁性以及较优的信噪比和较高的



注： $C(t)$ 为平衡探测器输出的拍频信号； $\cos(\Delta\omega t)$ 和 $\sin(\Delta\omega t)$ 为正交的数字本振信号； I 和 Q 分别为同相和正交信号。

图 8 IQ 解调法的流程图

Figure 8 Flow chart of IQ demodulation method

灵敏度。因此,当确定 DAS 系统采用的方案时,需要结合实际探测场景及应用分析所需的性能标准考量成本及稳定性。

2 性能研究进展

DAS 技术由光学系统和信号处理两个关键方面决定有效性和可行性。本小节将介绍光学系统方面的主要性能指标,包括空间分辨率、传感距离、响应频率和应变分辨率^[18]的发展历程。

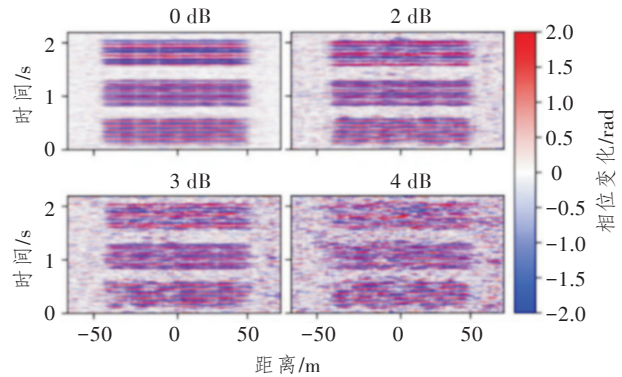
2.1 空间分辨率与传感距离

DAS 系统的空间分辨率是指光纤位置上能够分辨的最小距离,用来评估系统定位精度^[19]。探测距离与探测光能量之间存在正比关系,为提高探测距离可以通过调整探测光的峰值功率和脉冲宽度来实现。空间分辨率与脉冲宽度成反比关系,这意味着在追求高空间分辨率的情况下,实现长探测距离变得更加困难。

φ -OTDR 中使用线性啁啾探针脉冲以简单且非常稳健的方式进行高分辨率、定量应变变化测量。2018 年, Xiong 等人^[20]将线性啁啾脉冲与共泵浦一阶分布式拉曼放大相结合,在 100 km 传感距离下实现了 8.2 m 空间分辨率的动态应变定量测量。尽管在光纤传输末端拉曼放大效果减弱,但在 100 km 光纤传输末端的相位信息仍能够成功解调。

2021 年, Waagaard^[21]等人通过对具有长线性调频脉冲和相干检测的光纤的瑞利反向散射进行研究,实现了在标准单模光纤中长达 148 km 范围内持续的实时相位解调,其测量的时间响应如图 9 所示,在低损耗的光纤传感器(Optical Fiber Sensor, OFS) Tera Wave SCUBA125 光纤中更是实现了长达 171 km 测量范围的突破,为 φ -OTDR 技术在高分辨率和长距离监测方面的未来发展提供了引人注

目的方向;2020 年, Yan^[22]等人利用前向传输、相干检测和频移光延迟线,在两根光纤的远端采用由声光调制器和延时光纤构成的频移光延迟线,相干检测用于反演振动引起的相位波动和频移光延迟线产生的中频信号,实验在 615 km 的感应范围内对于频率大于 1 kHz 的振动能获得小于 125 m 的空间分辨率。



注:压电陶瓷模拟器放在 147 km 的光纤外,以 12、30 和 60 Hz 的频率序列调制,其额外的可变光衰减器衰减为 0、2、3 和 4 dB。

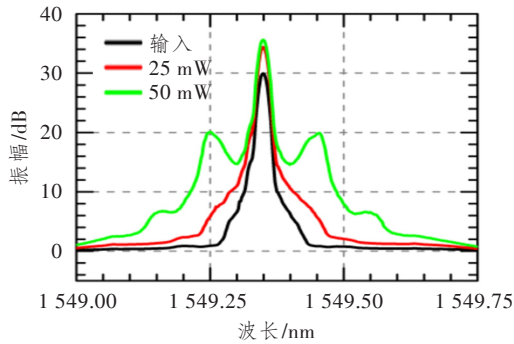
图 9 测量的时间响应^[21]

Figure 9 Measured time response^[21]

2022 年,胡杨等人针对分布式拉曼光纤放大器(Distributed Raman Fiber Amplifier, DRFA)增益受光纤链路性能影响较大的问题,理论分析了光纤链路中接头损耗对拉曼增益控制的影响^[23];同年, Gao 等人^[24]提出将一种基于压缩感知的光纤传感信号处理方法应用于 φ -OTDR 系统,利用稀疏阵列和观测阵列构建感知矩阵,建立压缩感知的数学模型,然后设计重构算法,利用少量采样值完成振动信号的精确重构,使得空间分辨率最佳达到 9 m。

2023 年,王甫涵等人研究探头脉冲在传感光纤中可能遭受的光学非线性效应^[25];此外 Pastor 等人对光纤中非线性进行理论模拟,其研究表明,在脉冲峰值功率为 25 mW 或更低时,脉冲在瞬时频率分布中其形状不会发生潜在失真,最终在 75 km 时实现了 10 m 的空间分辨率,将 φ -OTDR 的最大传感范围从先前的 11 km 增加到了 75 km^[26],如图 10 所示;2023 年, Li 等人^[27]提出了一种基于正交频分复用和非线性调频脉冲调制序列的创新 φ -OTDR 技术,该技术通过调制光脉冲的频率和相位来优化空间分辨率和感应距离,在 16.3 km 光纤上实现了 11 m 的空间分辨率;2024 年, Wang 等人^[28]提出了一种具有差分脉宽序列的高空间分辨 φ -OTDR 系统,利用相同脉冲重复率和不同脉冲宽度得到的时域波形减法,使得米级的等效脉冲

可以实现厘米级的空间分辨率传感,该方案在实验中获得了 0.55 m 的空间分辨率。



注:参考脉冲频谱以黑色表示。

图 10 沿光纤待测件(75 km)脉冲传播后的测量频谱^[26]

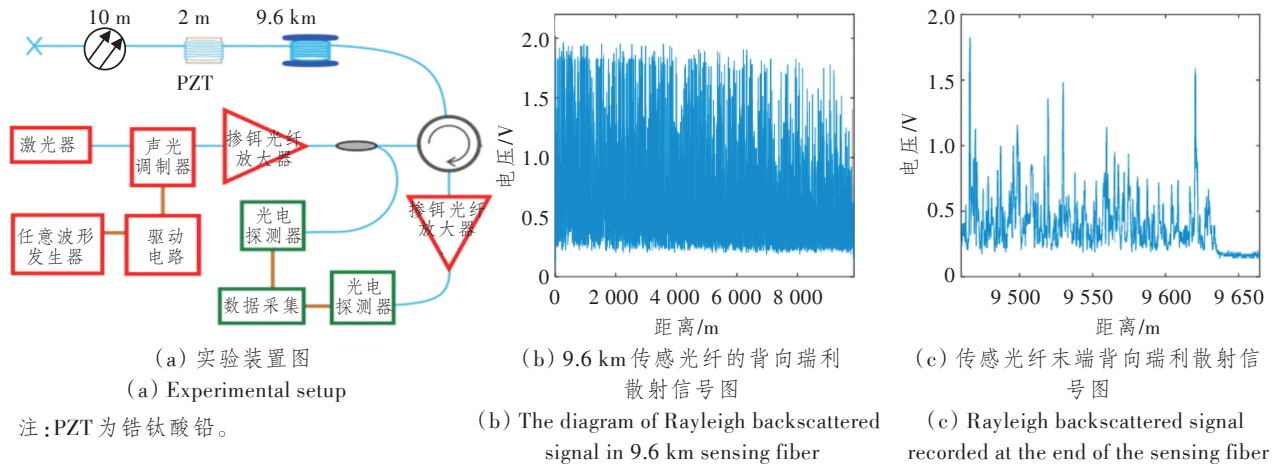
Figure 10 Measured spectra of pulse after propagation along the fiber under test (75 km)^[26]

2.2 频率响应

频率响应反映了系统对外部干扰响应的频率范围,频率响应越高,系统的应用范围越广,可以有效地检测更多种类的信号。但是,光脉冲检测之间的

时间间隔不能小于光在光纤中的往返时间,因此系统的频率响应受到感应范围的限制。

2016年,He等人^[29]提出了一种基于频分复用的相敏光时域反射仪与MZI相结合的方案,通过向传感光纤注入多频脉冲来提高一个周期内的采样率,实现了3 km上10 m的空间分辨率和40 kHz的最高频率响应;2017年,Zhang等人^[30]利用窄脉冲产生光时域参考信号,并在连续波生成时通过光纤的前端进行注入,通过在光纤的后端设计快反镜,使得连续波回传到光纤的前端,与参考光产生干涉以此构成MZI来获取可达1.2 MHz频率响应;同年,Zhang等人^[31]提出了一种通过随机调制光脉冲间隔来打破 φ -OTDR系统的频率响应范围限制的方法,对长传感光纤中的每个振动点进行随机采样,检测稀疏宽带频率振动信号,在9.6 km的感应范围内,以10 kHz的最大采样率可以清晰识别高达MHz的共振振动信号和1.153 MHz的单频振动信号,实验装置及9.6 km感应范围内背向瑞利散射信号如图11所示。



注:PZT为锆钛酸铅。

图 11 实验装置及信息图^[31]

Figure 11 The diagrams of experimental setup and signal^[31]

2.3 应变分辨率

φ -OTDR系统中应变分辨率是指能够分辨和测量的最小应变变化量,通常作为动态应变测量的检测指标。高精度的应变分辨率可以对通过微小形变判断健康程度的应用场景起到至关重要的作用。应变分辨率可以用光学结构和信号处理的方法进行提升。

2017年,Masoudi等人^[32]改进了光学排列结构,将单个窄光纤光栅分别放置于放大探测脉冲的功率放大器和前置放大器之后,降低功率放大器和前置放大器的自发辐射噪声,并安排与一种改进的信号处理方法相结合,使得应变分辨率达到了40 $\mu\epsilon$;

2019年,Marcon等人^[33]提出了基于光频域反射的分布式光纤声波传感数据分析算法,实现了数十千赫兹的高声学带宽和厘米级的高空间分辨率;2020年,Zhang等人^[34]提出了一种基于调频脉冲和频率询问的方法,将频率梳调制到每个询问脉冲中,改变了传统的逐个扫描载波频率的方式,在10 km的传感距离下,该系统在20 kHz的频率下,应变分辨率达到了130 $\mu\epsilon$;同年,Wang等人^[35]提出了基于随机光纤光栅阵列和多频数据库解调方法的高性能应变延迟测量分布式传感系统,通过激光初始频率的变化来补偿大应变变化引起的时域轨迹畸变,在单模

光纤中嵌入较大随机折射率变化的随机光纤光栅提供稳定的反射,该系统成功地实现了峰值为 $12.5 \mu\epsilon$ 的应变分辨率;2021年,Qian等人^[36]提出了一种啁啾脉冲转换算法,通过对相干 φ -OTDR 中接收信号的啁啾因子进行卷积,将正常探测脉冲转换为等效啁啾探测脉冲,利用该算法对啁啾脉冲进行了瑞利干涉图解调,使得应变分辨率达到了 $56 \mu\epsilon$;2023年,Lin等人^[37]提出了基于频率扫描 φ -OTDR 的超高应变分辨率动态应变传感,应变分辨率可达 $6.8 \times 10^{-3} \mu\epsilon$ 。

3 应用研究进展

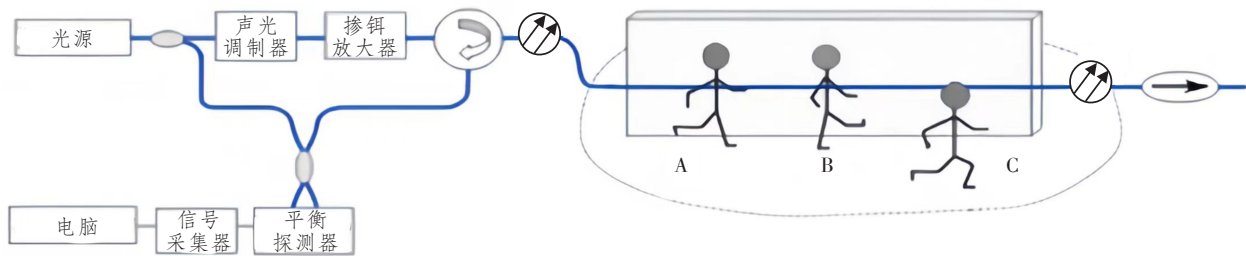
DAS 在各个领域的应用日益广泛,其性能的提升是为了更好地应用于实际。随着其性能研究的不断进步和数据处理算法的不断优化,DAS 技术已成为解决许多监测问题的有效工具。本小节将对 DAS 技术在周界安全、地震波探测、铁路监测和电

力监测等方面展现出的巨大潜力和优势进行介绍。

3.1 周界安全

DAS 可以对重点区域的安全,包括国界、大型会展场地和机场等进行检测。传统的周界安全监测技术多采用红外感应器、微波雷达系统和视频监控系统,但均存在监测盲区,无法连续性监控。DAS 系统可以实现对长达数十千米的光纤线路进行全方位监测,并实时地监测和分析入侵信号,快速准确地响应潜在的安全威胁。

2015年,Wang等人^[38]开发了基于频谱分析的快速模式识别方法,其系统方案如图12所示。利用解调幅值定位扰动,通过短时能量和短时移差提取有效信号,对有效信号进行频域变换并归一化提取特征向量,重复进行入侵测试构成参考模型。最后,通过将检测信号的特征向量与参考模型中的参考特征向量进行匹配实现在线模式识别。



注:A为踢墙;B为踹墙;C为原地跑。

图12 φ -OTDR 信号模式识别的实验系统^[38]

Figure 12 Experimental setup for pattern recognition of φ -OTDR signals^[38]

2022年,Yan等人^[39]提出了一种基于深度神经网络算法的识别方案,建立100组卷积神经网络(Convolutional Neural Network,CNN)(100 G-Net)模型,充分利用样本的振动信息进行特征提取和分类。研究表明,所提算法的平均训练识别准确率不仅能达到99.6%,而且泛化能力优于典型的CNN;2020年,Sahin等人^[40]基于DAS系统以无监督的方式学习该区域的活动密度,使用威胁指标对活动进行评分,并采用新颖的动态阈值方法为活动分配级别;为了区分人类入侵事件和辨别野外的动物活动,2023年He等人^[41]将双阶段识别网络应用于DAS系统,在预识别阶段,利用决策树分类器通过时间能量和频谱信息对目标事件进行分类,在子识别阶段,通过时频分析与反向传播(Back Propagation,BP)神经网络的结合进一步区分目标事件,判别结果实现了97.6%的高平均识别准确率和仅0.253s的快速响应时间。

3.2 地震波探测

DAS 可对全球地表地震活动进行连续、实时的监测,对于获得对全球层析成像分析的新见解和识别导致潜在危险情况的地震模式具有重要意义。DAS 系统相比于传统地震波监测使用的地震仪和地震台系统,可以利用已部署的地下通信网或与现有的通信网络共享进行监测,覆盖范围广,远远优于传统地震台布设的有限范围。无需单独布设和维护,成本和操作复杂度较低。

2019年,Marra等人^[42]提出将现有的电信光缆与最先进的频率计量技术相结合,应用于海底光纤网络,通过实验,研究者探测到了从75~535km不等的陆地和海底之间的地震活动;2019年,Lindsey等人^[43]在横跨加利福尼亚近海大陆架的蒙特雷加速研究系统科学电缆内使用了背向散射激光脉冲和基于 φ -OTDR 的 DAS 系统对光学信号进行多路复用,创建了一个10000个组件、20km长的地震

阵列,每 10 m 解析一次海底应变场,确定多个海底断层带,并且微震波段的 DAS 振幅跟踪了北太平洋风暴周期期间的海况动态;2023 年,Yin 等人^[44]提出了一项基于 DAS 的海上地震预警系统,充分利用海底光缆构建了 8 960 个通道的地震阵列,进行 100 Hz 下采样,并应用 $[0.05, 20.00]$ Hz 的 BPF 来抑制海洋噪声,研究表明,与陆上地震台站相比,单一的 50 km 海上 DAS 阵列可以将系统的警戒时间缩短 3 s,而多个 DAS 阵列延伸至沿海海沟能够均匀地将俯冲带的警戒时间缩短 5 s 以上。

3.3 铁路监测

DAS 具有以超高灵敏度来延长检测距离的潜力,其为弥补现有监测技术的不足,为列车定位、速度和铁轨安全监控提供了理想的解决方案^[45]。传统的铁轨安全监测采用人工巡查,耗时耗力,DAS 系统能够实时监测铁路线路的情况,可分辨入侵行为和记录列车位置及速度。同时,能够记录和存储大量的监测数据,并通过数据分析和算法识别出潜在的问题且能够提前发现潜在问题。2014 年,Peng 等人^[46]利用埋在两条平行铁路附近的长传感电缆 ϕ -OTDR 对列车产生的振动信号进行检测,采用小波去噪技术来提高振动信号的信噪比,并利用归一化滑动方差精确计算时空振动瀑布图的边缘,如图 13 所示,在 10.2 km 的测量范围内实时获取了相邻两列车运行的相对位置和速度。

2020 年,Milne 等人^[47]提出了一种确定轨道挠度和每轨枕端载荷的新方法,能够通过单个传感系统对轨道性能进行全面评估;2020 年,Wiesmeyr 等人^[48]提出了一种基于 1 s 无延迟信号运行的实时列车跟踪算法,该算法基于两个主要步骤,即振动检测和物体跟踪,在两个测试站点对其性能进行了评估,其中一个位于带有标准电缆沟的隧道中,另一个位于电缆直接连接到轨道的开放轨道上,对于这两个评估的轨迹,在超过 98% 的情况下都达到了准确的轨迹,短距离位置误差约为 40 m;2023 年,Rahman 等人^[49]通过高吨位环路收集的 DAS 数据对铁路的结构健康状况进行监测,还探索使用一种称为长期记忆和门控循环单元(Gated Recurrent Unit, GRU)的深度学习模型来识别和分类不同的铁路状况的方案,所提出的模型基于 GRU 架构,在识别训练位置方面取得了 80% 的准确率,优于长期记忆模型的 66%,正常位置预测 90% 的准确率,优于长期记忆模型的 76%。

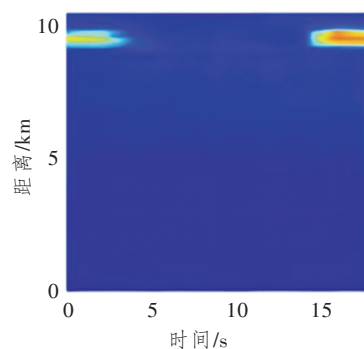


图 13 模拟列车启动、停止和重启过程的振动瀑布^[46]

Figure 13 A vibrating waterfall simulating the process of starting, stopping and restarting of a train^[46]

3.4 电力监测

DAS 系统可以提高电力系统的安全稳定性和运行效率,在电力监测领域意义重大。DAS 系统能够对电缆和变压器进行全面实时监测,相较于定期进行点检或周期性检测,能够覆盖更广泛的区域,并实现对整个电缆或变压器表面的连续监测。DAS 技术与神经网络相结合可以直接判断故障原因,降低人工检查电缆或变压器故障而导致的维修成本和停电损失。

2021 年,Kye 等人^[50]提出了基于多通道 DAS 解调仪和光学旋转开关的光纤监控系统,此系统使用单个脉冲发生器和光接收器监测多根光纤,其监测过程分为一维和二维 CNN,其检验准确率分别为 94.5% 和 98.2%;2022 年,金会会等人^[51]设计光纤螺旋方式,使用外部激振器激发了圆柱桶径向振动,采取了先利用解调幅值进行振动定位,后利用解调相位进行信号还原的技术路线,实现了绕组模拟振动的检测从而获得振动位置,并对相位进行空间域和时间域的两次相位解缠绕和空间阈差分得到信号还原结果;2023 年,董贯雷等人^[52]提出了一种新的人工神经网络模型,在 DAS 系统上采用用于类不平衡数据的过采样方法增加故障数据集的数量,然后将数据输入模型中,实现了故障的检测准确率达到 100%,此次研究能够模拟有载变压器的故障情况,准确地预测变压器的运行情况,同时标志着 DAS 系统首次被应用于有载调压开关的监测,为未来的研究开辟了更多的可能性。

4 结束语

DVS 发展至 DAS,DAS 的解调方式从直接探测发展至外差相干探测,解调方式多样化,如 PGC

解调、3×3 OC 解调和 IQ 解调。对探测距离、探测精度和信噪比等性能的探索成果,已基本满足其在多种场景中的应用需求。在此基础上,DAS 逐渐与人工智能相结合。如今,DAS 已经进入数据处理多领域结合的时代,DAS 系统产生的数据量庞大,需要深入研究大量数据并将其应用于实际的工程管控与决策。将 DAS 系统与物联网技术相结合,可以实现对更广泛范围内的设备和系统进行实时监测和远程控制。DAS 系统未来可能会与人工智能、大数据分析和物联网等多个技术领域相结合,以实现更智能、更可靠的监测和控制功能。

参考文献:

- [1] Chen J, Xue C, Zheng Y, et al. Fiber-Optic Acoustic Sensor for Flexibility and Universality Applications Adopting Phase Modulation Spectroscopy [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 21631–21637.
- [2] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and Method for Fiber Optic Intrusion Sensing: USA, US5194847A[P]. 1993-03-16.
- [3] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, et al. Interference-Fading-free Phase-Demodulated OTDR System[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 842129.
- [4] Hartog A H, Liokumovich L B, Ushakov N A, et al. The Use of Multi-frequency Acquisition to Significantly Improve the Quality of Fibre-Optic-Distributed Vibration Sensing [J]. Geophysical Prospecting, 2018, 66(S1): 192–202.
- [5] Ma Y, Eaton D, Igonin N, et al. Machine Learning-assisted Processing Workflow for Multi-Fiber DAS Microseismic Data[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1096212.
- [6] Yao R, Li J, Zhang J, et al. Vibration Event Recognition Using SST-based Φ -OTDR System[J]. Sensors, 2023, 23(21): 8773.
- [7] 刘中华, 龚浩敏, 吴岩, 等. 相干光时域反射仪技术与应用[J]. 光通信研究, 2022(5): 43–48.
Liu Z H, Gong H M, Wu Y, et al. Principle and Application of the C-OTDR[J]. Study on Optical Communications, 2022(5): 43–48.
- [8] Bao X, Wang Y. Recent Advancements in Rayleigh Scattering-based Distributed Fiber Sensors[J]. Advanced Devices and Instrumentation, 2021(15): 8696571.
- [9] Liu S, Yu F, Hong R, et al. Advances in Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry [J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(3): 200078.
- [10] Xu T, Feng S, Li F, et al. Distributed Acoustic Sensing System based on Phase-Generated Carrier Demodulation Algorithm [EB/OL]. (2021-12-10) [2024-05-21]. <https://doi.org/10.1002/9781119521808.ch4>.
- [11] 张均伟, 蓝波, 黄嘉庚, 等. 基于分布式光纤传感的光缆防外破监测研究[J]. 光通信研究, 2022(5): 53–57.
Zhang J W, Lan B, Huang J G, et al. Monitoring and Early Warning System for Anti-Breakage of Optical Cable based on Distributed Optical Fiber Vibration Sensing[J]. Study on Optical Communications, 2022(5): 53–57.
- [12] 张旭莘, 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): 100–114.
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): 100–114.
- [13] Li Y, Wang Y, Xiao L, et al. Phase Demodulation Methods for Optical Fiber Vibration Sensing System: a Review [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(3): 1842–1866.
- [14] Shen X, Wu H, Zhu K, et al. Fast and Storage-Optimized Compressed Domain Vibration Detection and Classification for Distributed Acoustic Sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 42(1): 493–499.
- [15] Fan T, Li Q, Shao L, et al. Digital Phase Shift based Simulated Coherence Phase Demodulation Technology for Φ -OTDR[J]. Optics Communications, 2023, 546: 129746.
- [16] Shang Y, Sun M, Wang C, et al. Research Progress in Distributed Acoustic Sensing Techniques [J]. Sensors, 2022, 22(16): 6060.
- [17] Wu H, Wang Y, Liu X, et al. Smart Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing (sDAS) with Multitask Learning for Time-Efficient Ground Listening Applications [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 8511–8525.
- [18] Fernández-Ruiz MR, Soriano-Amat M, Durán V, et al. Time Expansion in Distributed Optical Fiber Sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3305–3315.
- [19] Chen P, Zhang T, Dong X. Direct Detection with High Spatial Resolution based on Distributed Vibration Sensor by Precise Signal Delay [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(1): 866–876.
- [20] Xiong J, Wang Z, Wu Y, et al. 100 km Dynamic

- Strain Sensing via CP- Φ -OTDR[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Hangzhou, China: IEEE, 2018: 8596057.
- [21] Waagaard O H, Rønnekleiv E, Haukanes A, et al. Real-Time Low Noise Distributed Acoustic Sensing in 171 km Low Loss Fiber [J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(2): 688.
- [22] Yan Y, Khan F N, Zhou B, et al. Forward Transmission based Ultra - Long Distributed Vibration Sensing with Wide Frequency Response [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 39(7): 2241–2249.
- [23] 胡杨, 付成鹏, 陈俊, 等. 集成OTDR分布式拉曼放大器自动增益控制方法[J]. *光通信研究*, 2022(4): 52–57.
- Hu Y, Fu C P, Chen J, et al. Automatic Gain Control Method and Implementation of Distributed Raman Fiber Amplifier [J]. *Study on Optical Communications*, 2022(4): 52–57.
- [24] Gao X, Hu W, Dou Z, et al. A Method on Vibration Positioning of Φ -OTDR System based on Compressed Sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(16): 16422–16429.
- [25] 王甫涵, 郝祥勇, 蔡轶, 等. 全光数据中心互联的混合放大技术研究[J]. *光通信研究*, 2023(3): 6–9.
- Wang F H, Hao X Y, Cai Y, et al. Research on Hybrid Amplification Technology of All-Optical Data Center Interconnection [J]. *Study on Optical Communications*, 2023(3): 6–9.
- [26] Pastor-Graells J, Nuño J, Fernández-Ruiz M R, et al. Chirped-Pulse Phase-Sensitive Reflectometer Assisted by First - Order Raman Amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4677–4683.
- [27] Li J, Wang Y, Liu X, et al. SNR Improvement for Φ -OTDR with Sparse Representation Denoising Method [J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 76: 103231.
- [28] Wang M, Qu J, Qu S, et al. High Spatial-Resolved Φ -OTDR System based on Differential Pulse Width Sequence Technique [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(6): 373–376.
- [29] He H, Shao L Y, Li Z, et al. Distributed Vibration Sensing with High Frequency Response based on Frequency Division Multiplexing [C]//Optical Fiber Communication Conference. Anaheim, California, USA: OSA, 2016: M2D. 1.
- [30] Zhang Y, Xia L, Cao C, et al. A Hybrid Single-end-Access MZI and Φ -OTDR Vibration Sensing System with High Frequency Response [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 176–181.
- [31] Zhang J, Zhu T, Zheng H, et al. Breaking through the Bandwidth Barrier in Distributed Fiber Vibration Sensing by Sub - Nyquist Randomized Sampling [C]//2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS). Jeju, Korea: IEEE, 2017: 7961014.
- [32] Masoudi A, Newson T P. High Spatial Resolution Distributed Optical Fiber Dynamic Strain Sensor with Enhanced Frequency and Strain Resolution [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 290–293.
- [33] Marcon L, Galtarossa A, Palmieri L. High-Frequency High-Resolution Distributed Acoustic Sensing by Optical Frequency Domain Reflectometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13923.
- [34] Zhang J, Wu H, Huang J, et al. Large Dynamic Strain Sensing for φ -OTDR with Frequency Modulation Pulse and Frequency Interrogation [C]//Optical Fiber Sensors Conference 2020 Special Edition. Washington, DC, USA: Optica Publishing Group, 2021: T3. 79.
- [35] Wang Y, Lu P, Mihailov S, et al. Strain Measurement Range Enhanced Chirped Pulse Φ -OTDR for Distributed Static and Dynamic Strain Measurement based on Random Fiber Grating Array [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 6110–6113.
- [36] Qian H, Luo B, He H, et al. Distributed Dynamic Strain Sensing in Coherent Φ -OTDR with a Pulse Conversion Algorithm [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1668–1671.
- [37] Lin Z, He H, Zhao Z, et al. High-Resolution Dynamic Strain Sensing Using Frequency - Scanning Φ -OTDR with Frequency Comb Pulse [C]//2023 Conference on Lasers and Electro - Optics (CLEO). San Jose, CA, USA: IEEE, 2023: 10258865.
- [38] Wang Z, Pan Z, Ye Q, et al. Fast Pattern Recognition based on Frequency Spectrum Analysis Used for Intrusion Alarming in Optical Fiber Fence [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405010.
- [39] Yan S, Shang Y, Wang C, et al. Mixed Intrusion Events Recognition based on Group Convolutional Neural Networks in DAS System [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(1): 678–684.
- [40] Sahin O, Demircin M U, Gevrekci M. Machine Learning based Automatic Threat Level Assessment in Fiber-optic Distributed Acoustic Sensing (DAS) Intrusion Detection Systems [C]//Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi - Domain Operations Applications II. Online Only, USA: SPIE, 2020: 87.
- [41] He T, Sun Q, Zhang S, et al. A Dual-Stage-Recognition Network for Distributed Optical Fiber Sensing Pe-

- rimeter Security System [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4331–4340.
- [42] Marra G, Clivati C, Luckett R, et al. Ultrastable Laser Interferometry for Earthquake Detection with Terrestrial and Submarine Cables[J]. *Science*, 2018, 361(6401): 486–490.
- [43] Lindsey N J, Craig Dawe T, Ajo-Franklin J B. Illuminating Seafloor Faults and Ocean Dynamics with Dark Fiber Distributed Acoustic Sensing[J]. *Science*, 2019, 366(6469): 1103–1107.
- [44] Yin J, Soto M A, Ramírez J, et al. Real-data Testing of Distributed Acoustic Sensing for Offshore Earthquake Early Warning[J]. *The Seismic Record*, 2023, 3(4): 269–277.
- [45] Tan M, Hu Q, Wu Y, et al. Decision-making Method for High-Speed Rail Early Warning System in Complex Earthquake Situations [J]. *Transportation Safety and Environment*, 2024, 6(3): tdad034.
- [46] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-Time Position and Speed Monitoring of Trains Using Phase-Sensitive OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2055–2057.
- [47] Milne D, Masoudi A, Ferro E, et al. An Analysis of Railway Track Behaviour based on Distributed Optical Fibre Acoustic Sensing [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106769.
- [48] Wiesmeyr C, Litzenger M, Waser M, et al. Real-time Train Tracking from Distributed Acoustic Sensing Data[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(2): 448.
- [49] Rahman M A, Taheri H, Kim J. Deep Learning Model for Railroad Structural Health Monitoring *via* Distributed Acoustic Sensing[C]//2023 26th ACIS International Winter Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD-Winter). Taiyuan, China: IEEE, 2023: 10223971.
- [50] Kye M, Lee S M, Choi K M, et al. A Surveillance System of Fiber-Optic Cables with Multi-Channel DAS and CNN [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(15): 753–756.
- [51] 金会会. 基于 φ -OTDR的变压器绕组振动三维成像技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
Jin H H. Research on 3D Imaging Technology of Transformer Winding Vibration based on φ -OTDR[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2022.
- [52] 董贯雷, 姜晓东, 孙鹏, 等. 基于分布式光纤传感系统的有载变压器故障检测技术研究[J]. *山东科学*, 2023, 36(5): 52–59.
Dong G L, Jiang X D, Sun P, et al. On-Load Transformer Fault Detection based on Distributed Optical Fiber Sensing System[J]. *Shandong Science*, 2023, 36(5): 52–59.