CN 51-1346/O4 ISSN 1003-501X (印刷版) ISSN 2094-4019 (网络版)

光电工程
Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

Φ-OTDR系统的数字信号处理及应用

张驰，邹宁睦，宋金玉，佟帅，姚媛媛，丁哲文，王峰，张益昕，张旭苹

引用本文:

张驰，邹宁睦，宋金玉，等. Φ-OTDR系统的数字信号处理及应用[J]. 光电工程，2023， **50**(2): 220088.

Zhang C, Zou N M, Song J Y, et al. Digital signal processing and application of Φ-OTDR system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220088.

https://doi.org/10.12086/oee.2023.220088

收稿日期: 2022-05-19; 修改日期: 2022-09-16; 录用日期: 2022-09-16

相关论文

Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry

Shuaiqi Liu, Feihong Yu, Rui Hong, Weijie Xu, Liyang Shao, Feng Wang

Opto-Electronic Advances 2022, **5**(3): 200078 doi: 10.29026/oea.2022.200078

Ultra-high resolution strain sensor network assisted with an LS-SVM based hysteresis model

Tao Liu, Hao Li, Tao He, Cunzheng Fan, Zhijun Yan, Deming Liu, Qizhen Sun

Opto-Electronic Advances 2021, **4**(5): 200037 doi: 10.29026/oea.2021.200037

前向受激布里渊散射光纤传感研究进展

李天夫，巴德欣，周登望，任玉丽，陈超，张洪英，董永康

光电工程 2022, **49**(9): 220021 doi: 10.12086/oee.2022.220021

基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究

张博智，刘柯，刘琨，江俊峰，张曼，刘铁根

光电工程 2023, **50**(2): 220205 doi: 10.12086/oee.2023.220205

更多相关论文见光电期刊集群网站

OEE 光电工程 Opto-Electronic Engineering

http://cn.oejournal.org/oee

OE_Journal Website

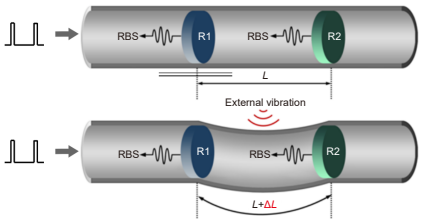
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程

Review

2023 年, 第 50 卷, 第 2 期

DOI: 10.12086/oee.2023.220088

Φ-OTDR 系统的数字信号处理及应用



张 驰[1,2], 邹宁睦[4], 宋金玉[1,2], 佟 帅[1,2], 姚媛媛[1,2], 丁哲文[1], 王 峰[1,2], 张益昕[1,2,3*], 张旭苹[1,2,3*]

[1]南京大学智能光传感与调控技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210093;
[2]南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023;
[3]南京大学深圳研究院, 广东 深圳 581000;
[4]德克萨斯州立大学工学院, 德克萨斯州圣马科斯 78666, 美国

摘要：相位敏感光时域反射 (Φ-OTDR) 传感系统具有高动态响应、高灵敏等特点，在大型工程结构健康监测领域具有巨大的应用潜力。而 Φ-OTDR 系统仪器化水平和工程应用很大程度上取决于数字信号处理 (DSP) 技术。本文对比分析了近年来 Φ-OTDR 系统在信号的量化、解调、抑噪以及模式识别上主要的数字信号处理方法和技术，并通过架空输电线路状态监测、埋地电缆外破预警两个应用实例，阐述了工程应用中数字信号处理与行业背景知识相结合的重要性和方法，并对 Φ-OTDR 系统中数字信号处理方法的发展现状和趋势进行了总结与展望。

关键词：相位敏感光时域反射 (Φ-OTDR)；外差相干探测；数字信号处理 (DSP)；输电线健康监测

中图分类号：TP212　　**文献标志码：**A

张驰，邹宁睦，宋金玉，等. Φ-OTDR 系统的数字信号处理及应用 [J]. 光电工程，2023，**50**(2): 220088
Zhang C, Zou N M, Song J Y, et al. Digital signal processing and application of Φ-OTDR system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220088

Digital signal processing and application of Φ-OTDR system

Zhang Chi[1,2], Zou Ningmu[4], Song Jinyu[1,2], Tong Shuai[1,2], Yao Yuanyuan[1,2], Ding Zhewen[1], Wang Feng[1,2], Zhang Yixin[1,2,3*], Zhang Xuping[1,2,3*]

[1]Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;
[2]College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;
[3]Shenzhen Research Institute, Nanjing University, Shenzhen, Guangdong 581000, China;
[4]Ingram School of Engineering, Texas State University, San Marcos, TX 78666, USA

Abstract: The phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ-OTDR) sensing system has the characteristics of high dynamic response and high sensitivity, and has great potential in the field of large-scale engineering structural health monitoring. The instrumentation level and engineering application of Φ-OTDR systems depend to a large extent on digital signal processing (DSP) technology. This paper compares and analyzes the main digital

收稿日期：2022-05-19；修回日期：2022-09-16；录用日期：2022-09-16
基金项目：国家自然科学基金资助项目 (U2001601，62175100，61975076)；内蒙古自治区关键技术攻关计划项目 (2019GG374)；中央高校基本科研业务费 (0213-14380202)；深圳市科技创新基金资助 (YFJGJS1.0)。
*通信作者：张益昕，zyixin@nju.edu.cn；张旭苹，xpzhang@nju.edu.cn。
版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

signal processing methods and technologies of Φ-OTDR systems in signal quantization, demodulation, noise suppression, and pattern recognition in recent years. The importance and method of combining digital signal processing with industry background knowledge in engineering applications are expounded, and the development status and trend of the digital signal processing methods in Φ-OTDR systems are summarized and prospected.

Keywords: phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ-OTDR); heterodyne coherent detection; digital signal processing (DSP); power line health monitoring

1 引 言

分布式光纤传感技术是一种以光纤同时作为传输媒介和敏感元件的连续分布式传感技术[1]。其中，相位敏感光时域反射计 (phase-sensitive optical time-domain reflectometer，Φ-OTDR) 能够对光纤上任意位置的振动事件进行定位，并高保真地重构其幅度、相位和频率等矢量信息[2]。由于 Φ-OTDR 探测灵敏度高、响应速度快的特点非常适用于微弱扰动事件的动态检测，自 1993 年被 Taylor[3] 等人提出后，其机理研究与工程应用方面发展迅速。研究者们在降低 Φ-OTDR 系统噪声[4-9]、优化相位信息解调精度[10]、扩大系统频率响应范围[11-15]、提升振动信号重构保真度[16-17]、拓展工程应用范围[18-25] 等方面都取得了卓越的成就。

传统的 Φ-OTDR 通常分为直接探测和相干探测两种类型。由于直接探测型 Φ-OTDR 探测距离短、信噪比较低，而采用零差相干探测又易受到低频噪声干扰，普适性较差，因此高性能 Φ-OTDR 通常选择外差相干探测结构[26-28]。在相位信息获取上，可以分为模拟、数字两条技术路线。其中模拟方法尽可能采用模拟电路在硬件上完成对信号的解调，其优点是能降低后续数据处理的计算压力，从而可以选用轻量级的处理器实现仪器功能[29]。但模拟电路设计完成后，其结构可调整的余地非常有限，难以灵活地升级扩展功能以适应复杂的应用场景。并且模拟电路的级联不可避免地带来原始信噪比的恶化，想要获得高性能、高一致性的仪器，设计难度较高。而采取高速模数转换器 (analogue to digital converter，ADC) 结合数字信号处理 (digital signal processing，DSP) 提供了另一条设计思路。一方面，由于仪器的大部分功能依托于数字信号处理算法，可以根据监测对象的区别进行解调方法优选和测量参数的自适应，增强了仪器的灵活性、可靠性；另一方面，由于模拟信号在前端完成了数字化，规避了多级模拟器件级联带来的信噪比恶化问题。随着高性能 ADC 与嵌入式处理器的不断涌现，偏重于数字信号处理实现分布式光纤传感系统功能的设计路线逐渐成为主流和趋势[30-32]。

采用数字化方案后，传统的信号解调、噪声抑制、特征提取与模式识别等功能均高度依赖于数模转换后的数字信号处理。对于 Φ-OTDR 系统而言，数字信号处理的任务主要包括以下三个方面：第一，精准高效地完成对瑞利背向散射光相位信息的解调。这首先需要了解相位差与声场信号关系，其次需要合理设定 Φ-OTDR 系统在数模转换中的核心参数从而快速准确地获得 RBS 信号，最终需要选取合适的解调方法解调。第二，分析并抑制传感系统自身的各类本底噪声。由于传感系统自身各类本底噪声是不可避免的，对其分析并抑制，是提高系统信噪比的关键。激光器中心频率漂移、光纤局部双折射变化以及光纤应变与干涉强度的非线性对应关系[33]，都会给系统引入相应的噪声。众多噪声种类中，系统内部带来的相干衰落会引起系统信噪比继续恶化[34]，随机形成探测盲区；外部环境造成的偏振相关噪声则会影响 Φ-OTDR 系统对多个扰动事件的感知能力。第三，快速选取可靠的特征提取与模式识别策略从而提高系统重构扰动事件的准确性、智能性。工程应用中，不同的光缆敷设方法、不尽相同的监测对象以及实时变化的背景噪声，导致振动事件难以被精确的数学模型描述。特别是，当 Φ-OTDR 用于新场景时，需要能够基于行业知识快速建立对应的分析模型，并尽量减少其中的人工参与程度。因此迫切需要高效、可靠的对象特征提取方法、模式识别算法、机器学习策略。

针对上述问题，本文对近年来 Φ-OTDR 系统在光电信号的数字化、相位信息的解调、系统噪声的抑制以及探测对象的模式识别上主要的数字信号处理方法和技术进行总结归纳，并通过架空输电线路状态监测及埋地电缆外破预警两个应用案例，说明工程应用方案设计中的数字信号处理技巧。

2 光电探测信号的数字化与相位解调

2.1 相位差与声场信号的关系

在外部声场的作用下，光纤的长度、折射率、芯径会随之发生变化，从而影响该位置的 RBS 的相位，如图 1 所示。选择外部声场扰动区前后的两部分光纤作为参考区 R1 和 R2。则这两个参考区域产生的 RBS 电场表示为

$$\begin{cases} E_{\mathrm{R1}} = E_1 \cos(\omega t + \varphi_0) \\ E_{\mathrm{R2}} = E_2 \cos\left[\omega t + \varphi_0 + \dfrac{4\pi n}{\lambda}(L + \Delta L)\right] \end{cases}, \tag{1}$$

其中：E_1 和 E_2 为两个区域内的 RBS 信号电场强度，ω 为入射光的角频率，φ_0 是初始相位，入射光的波长为 λ，L 是两参考区域内之间的光程差，ΔL 是声场引起的光程变化，n 为光纤芯的折射率。两个参考区域的相位差可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n}{\lambda}\Delta L \ . \tag{2}$$

可以看到，ΔL 与两参考区域的相位差$\Delta\varphi$ 呈线性关系。而式 (1)、式 (2) 的光信号需要转换成电信号才能进行解调。在进行外差相干探测时，由于载波的频率 ω 远超过平衡光电探测器 (balanced photodetector, BPD) 的响应带宽，因而式 (1) 会变成中频信号形式：

$$I_{\mathrm{out}}(t) \propto E_{\mathrm{A}} E_{\mathrm{B}} \sin(\Delta\omega t + \varphi(t) - \varphi_0) \ , \tag{3}$$

其中：$\Delta\omega$ 是声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 引入的频移，E_{A} 是与光纤位置相关的 RBS 信号光场强；E_{B} 是本振光的场强表示；$\varphi(t)$ 是散射点的相位。此中频信号是载波加载的调相信号。因此，对载波上的相位变化进行解调可以获得通过$\Delta\varphi$，从而定量地对声场进行测量[35]。

2.2 数模转换中的核心参数设定

外差相干型 Φ-OTDR 通常采用 AOM 提供探测光与参考光间的频率差异，并对光源输出的连续光进行高消光比的幅度调制[36]。在满足 BPD 带宽的前提下，AOM 工作频率越高其调制后的光脉冲上升/下降沿通常也就越陡峭，从而获得更好的空间分辨率。且较高的中频可以有效规避 BPD 输出的低频噪声。提高光电转换后的信噪比。然而更高的中频选择意味着模数转换中更大的数据采集压力。按照奈奎斯特采样定律，ADC 采样率至少要达到信号最高频率分量的两倍，才能保证对信号的重建不发生混叠。而根据工程经验，实用的数据采集过程中，ADC 通常要保证 4~5 倍过采样率，才能较好地还原信号。ADC 采样率 f_{s} 应当满足：

$$f_{\mathrm{s}} \geq N\left(f + \frac{B}{2}\right) = N\left(f + \frac{1}{2\tau}\right) \ , \tag{4}$$

其中：Φ-OTDR 系统中频为 f，空间分辨率为 τ，调相信号带宽近似表示为 B=1/τ。N 为过采样倍数。设中频为 200 MHz，脉冲宽度为 50 ns，N 为 5 时，f_{s} 应大于等于 1100 MHz，高速高精度的 ADC 芯片会造成仪器成本激增。同时高采样率下会造成高量化位数的 ADC 选型困难。

ADC 量化位数直接影响采样精度，在 Φ-OTDR 系统中体现为系统能区分的最小相位变化。有效位数为 n 的数采系统，在仅考虑量化噪声的情况下，其信

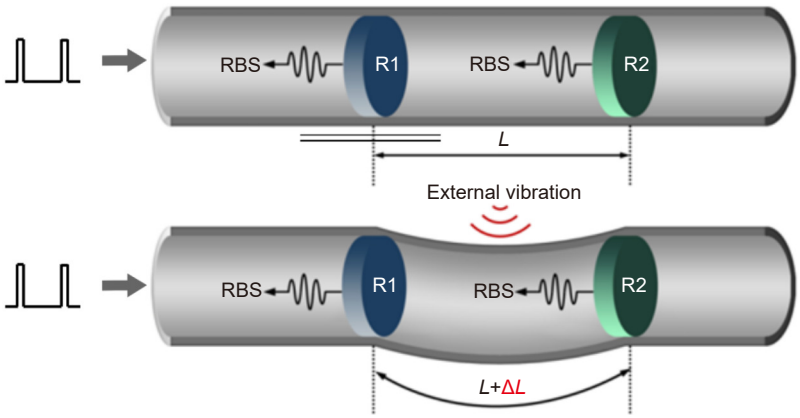


图 1 外部声场对光纤影响示意图

Fig. 1 Influence of an external sound field on the optical fiberl fiber

噪比为可表示为：SNR(dB)=(6.02×bit)+1.76。通常，Φ-OTDR 系统所需最小量化信噪比可表示为

$$\mathrm{SNR} = 2\alpha L + S + M \ , \tag{5}$$

其中：L 为探测光纤长度，α 为光纤损耗率，S 为系统为适应不同分辨率下 RBS 入纤功率变化而预留的增益调解余量[37]，M 为保证相位解调精度必须保留的 SNR 余量[38]。设用于测量衰减率为 0.2 dB/km 的 50 km 光纤的 Φ-OTDR 系统，S 和 M 分别为 10 dB、20 dB，则 SNR 为 50 dB，从而 ADC 有效量化位数约等于 8.3 bit。考虑到 ADC 标称位数和实际有效位数通常存在 1.5~2 bit 的差异，选择 ADC 芯片的标称位数应为 10~12 bit。

为了解决上述制约关系，2019 年 Jiang[39] 使用采样率低于拍频信号的 ADC 采集正交耦合器输出的信号，并只对振动位置附近数据做解调从而实现了低成本 Φ-OTDR 系统的搭建，但文章并未阐述欠采样设定的理论依据。2020 年，本课题组[36] 首次明确指出可以根据带通抽样定理，合理配置 ADC 参数，在不损失性能前提下，降低采样率和后续信号处理压力。使用 250 MHz/s 的数据采集卡对 200 MHz 的中频信号进行欠采样。由于量化过程的周期延拓，模数转换的结果等效于用 250 MHz 采样率采集 50 MHz 的中频信号。由式 (3) 可知，Φ-OTDR 系统关注的是相位变化而非载波频率，因此这种欠采样设定在不影响传感系统功能的同时，大大减轻了 ADC 选型的难度与后续数据处理的压力。但需注意的是，这一策略得以实施的前提是 ADC 芯片的模拟输入带宽仍须保证大于外差中频信号的最大频率分量，否则量化后的信号将出现畸变。2021 年，马杰等人[40] 用 5 kHz~200 MHz 的采样率对带宽为 10 kHz、中心频率为 80 MHz 的中频信号采集并解调，发现当采样率为中频信号带宽两倍以上时，振动信号解调误差率可以稳定在 0.3% 以下，达到较好的解调效果。

2.3 相位解调的数字化实现方案

外差相干探测型 Φ-OTDR 相位解调通常使用希尔伯特变换[41-42]、IQ 解调[43-44] 等方法。

2.3.1 希尔伯特变换解调

希尔伯特变换流程图如图 2 所示，结合式 (3) 对中频信号利用希尔伯特变换得到与原信号正交的另一路信号：

$$\begin{cases} I \propto E_{\mathrm{A}} E_{\mathrm{B}} \cos\left(\Delta\omega t + \varphi(t) - \varphi_0\right) \\ H(I) \propto E_{\mathrm{A}} E_{\mathrm{B}} \sin\left(\Delta\omega t + \varphi(t) - \varphi_0\right) \end{cases} , \tag{6}$$

由式 (6) 可以得到光纤上任意位置 RBS 相位：

$$\left(\varphi(t) - \varphi_0\right) \propto \arctan\frac{H(I)}{I} + 2k\pi - \Delta\omega t \ , \tag{7}$$

其中：k 为整数。根据式 (7) 解调得到的相位值通常存在相位缠绕问题，若其实际值超过$[-\pi,\pi]$，此时通过反正切函数求解会将其翻折到$[-\pi,\pi]$内，使得相位曲线出现突变。所以在求取相位后应再利用相位解缠绕算法[45] 恢复原始相位值。

希尔伯特变换优点在于其结构简单，信号本身经过希尔伯特滤波器构造出一路正交信号从而解调出载波和相位。然而希尔伯特滤波器阶数是无穷的，而应用中有限的数字滤波器长度导致 $H(I)$ 信号的幅值存在误差影响信号正交性，产生正交噪声[46]。滤波器阶数太小会增大正交噪声，阶数太大又会导致运算量增大。同时，当调相信号代表的声场扰动频率越低时，则滤波器对信号覆盖率越低，从而希尔伯特变换后的信号正交性越差。

2.3.2 IQ 解调

IQ 解调的流程图如图 3 所示。IQ 解调是根据中频信号的载波频率构造两路同频的正交信号模拟本振信号 L_{I}、L_{Q}：

$$\begin{cases} L_{\mathrm{I}} = \cos\left(\Delta\omega t\right) \\ L_{\mathrm{Q}} = \sin\left(\Delta\omega t\right) \end{cases} , \tag{8}$$

与式 (3) 与分别相乘得到：

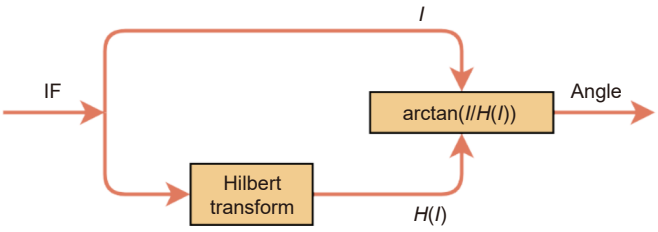


图 2 希尔伯特变换解调流程

Fig. 2 Hilbert transform demodulation process

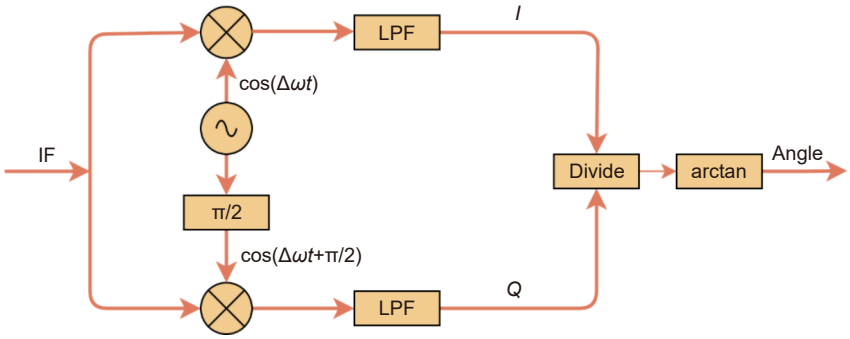


图 3 IQ 解调流程图

Fig. 3 IQ demodulation flow chart

$$\begin{cases} I' = I_{\text{out}}(t)\cdot L_{\text{I}} \propto \dfrac{1}{2}E_{\text{A}}E_{\text{B}}\cos(\varphi(t)-\varphi_0) \\ \quad +\dfrac{1}{2}E_{\text{A}}E_{\text{B}}\cos(2\Delta\omega t+\varphi(t)-\varphi_0) \\ Q' = I_{\text{out}}(t)\cdot L_{\text{Q}} \propto \dfrac{1}{2}E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin(\varphi(t)-\varphi_0) \\ \quad -\dfrac{1}{2}E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin(2\Delta\omega t-\varphi(t)+\varphi_0) \end{cases} . \tag{9}$$

通过低通滤波器 (low-pas filter，LPF) 滤除 $2\Delta\omega$ 高频分量，输出 I、Q 得到两路信号：

$$\begin{cases} I \propto E_{\text{A}}E_{\text{B}}\cos(\varphi(t)-\varphi_0) \\ Q \propto E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin(\varphi(t)-\varphi_0) \end{cases} . \tag{10}$$

由式 (10) 可以得到光纤上任意位置 RBS 相位：

$$(\varphi(t)-\varphi_0) \propto \arctan\frac{Q}{I}+2k\pi . \tag{11}$$

得到的 RBS 相位仍然需要经过解缠绕恢复到初始相位值。与希尔伯特变换不同的是，IQ 解调通过构造两路正交的本振信号先与原信号相乘分离出高于载波频段的信号并经过低通滤波器滤除，在解缠绕前只得到含有相位信息的信号，在抗噪能力上强于希尔伯特变换。但中频信号分别需要与两路信号相乘并做低通滤波，处理步骤多导致系统的实时运算压力更大。

2.3.3 特殊采样率下的 IQ 解调

为了解决 IQ 解调运算速率慢的问题，邹宁睦等人[47]首次提出了一种适用于 Φ-OTDR 系统的特殊采样率 IQ 解调方法，指出：在采样率 f_{s} 和中频信号 f_{c} 呈现特殊倍数差异时，存在简化的相位解调算法来减少运算量。当 f_{s} 为 f_{c} 的 4 倍时，构造的同频正交本振信号 L_{I} 和 L_{Q} 退化成固定的四元矩阵：

$$\begin{cases} L_{\text{I}} = \cos\left(2\pi n\dfrac{f_{\text{c}}}{f_{\text{s}}}\right) \\ \quad = \cos\left(\dfrac{\pi}{2}n\right) = (1,0,-1,0,\cdots) \\ L_{\text{Q}} = \cos\left(2\pi n\dfrac{f_{\text{c}}}{f_{\text{s}}}+\dfrac{\pi}{2}\right) \\ \quad = \sin\left(\dfrac{\pi}{2}n\right) = (0,1,0,-1,\cdots) \end{cases} . \tag{12}$$

在任意的一个数据采集周期内，采集到 BPD 输出相位差为 π/2 的 4 个采样点如图 4 所示。

这四个采样点 X=[X_1, X_2, X_3, X_4] 可表示为

$$\begin{cases} X_1 \propto E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin(\Delta\omega t+\varphi(t_1)-\varphi_0) \\ X_2 \propto E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin\left(\Delta\omega t+\varphi(t_1)+\dfrac{\pi}{2}-\varphi_0\right) \\ X_3 \propto E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin(\Delta\omega t+\varphi(t_1)+\pi-\varphi_0) \\ X_4 \propto E_{\text{A}}E_{\text{B}}\sin\left(\Delta\omega t+\varphi(t_1)+\dfrac{3\pi}{2}-\varphi_0\right) \end{cases} . \tag{13}$$

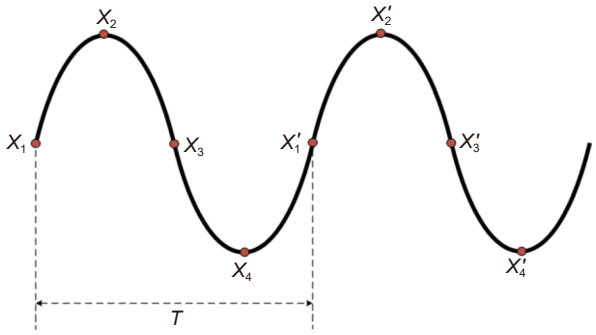


图 4 采样周期与采样点的关系

Fig. 4 Relationship between sampling period and sampling point

与式 (12) 的本振信号相乘可以得到 I、Q 两路输出：

$$\begin{cases} I = X \cdot L_I \\ \quad = X_3 - X_1 \\ \quad \propto 2E_{\mathrm{A}}E_{\mathrm{B}}\cos\left(\Delta\omega t + \varphi(t_1) - \varphi_0 + \dfrac{\pi}{2}\right) \\ Q = X \cdot L_Q \\ \quad = X_4 - X_2 \\ \quad \propto -2E_{\mathrm{A}}E_{\mathrm{B}}\sin\left(\Delta\omega t + \varphi(t_1) - \varphi_0 + \dfrac{\pi}{2}\right) \end{cases} . \quad (14)$$

由式 (14) 同样可以得到式 (11) 所示的光纤上任意位置 RBS 相位。

设使用 160 Msps 的 ADC，脉冲宽度为 50 ns，则单位空间分辨率内采样点数为 8。若按 2.3.2 中解调算法，8 个点需要进行 16 次乘法运算后再做 16 次加法和 1 次除法运算才能得到该空间分辨率内所有点的相位信息。在特殊采样率设定下 8 个点只需要 4 次减法运算及 1 次除法运算就能得到空间内所有点的相位信息，并且处理器分配给 IQ 解调算法的内存也会减少至少一半。因此，采用特殊采样率下的 IQ 解调方法，可以大幅度减小 Φ-OTDR 系统的实时运算压力，对于应用中降成本、增强系统适应性有重要作用。

3 声场信号的预处理

3.1 系统噪声抑制

Φ-OTDR 系统噪声多为持续存在的加性噪声，其中包含电子器件中自由电子的热运动产生的热噪声、电子器件内部载流子的起伏变化所引起的散弹噪声和器件振动产生的低频周期性噪声，环境中的随机噪声和低频周期性振动信号噪声，系统内器件的时钟不同源导致的非锁相噪声等。2018 年，本课题组[48] 通过引入语音信号处理中的谱减法来去除宽带系统噪声，调节过减因子和增益补偿因子选取范围来提升至少 20 dB 的信噪比。同年，熊兴隆等人[49] 提出了一种基于自适应噪声完备经验模态分解的小波信息熵阈值去噪算法，通过将 Φ-OTDR 采集的信号分解为不同的固有模态函数 (IMF)，并利用连续均方误差准则确定含噪声较多的高频 IMF 分量，利用小波信息熵阈值去噪算法去噪后与低频 IMF 分量重构，比起单种方法去噪能成功将信噪比再提升 3 dB。2020 年，Ju 等人[50] 提出一种基于优化双脉冲外差检测的 Φ-OTDR，在通过增加双探测脉冲的空间间隔提高灵敏度同时仅使用一个 AOM 对双脉冲移频从而消除脉冲不同源带来的抖动，保证了较低噪声水平。2021 年，本课题组[51] 基于锁相结构的 Φ-OTDR，通过统一 AOM 中的射频驱动源和外部调制信号的振荡源时钟，得到相互同源无抖动的载波信号、调制信号和数据采集触发信号，从而使得能够在相位解调前对中频信号做滑动平均来降低系统本底噪声。

3.2 相干衰落噪声抑制

由于光纤中散射点的位置和散射率都是随机分布的， RBS 相干叠加产生的散射光功率存在较大的随机波动，这就形成了相干衰落噪声[52-54]。衰落区域内 RBS 信号强度过低甚至淹没在噪声中会导致解调出的相位出现较大误差，从而导致扰动信号的解调失败或解调出假扰动的情况。

有效地识别出受到衰落噪声影响的区域并在相位解调时将其剔除，是消除衰落噪声影响，并降低 Φ-OTDR 系统误报率的一种重要方法。2013 年，Pan 等人[55] 利用不同频率的探测脉冲光具有不同的衰落波形这一特性，以幅度大小作为判断相位解调正确与否的依据，有效鉴别并排除了由相干衰落导致的误报警。2015 年，Wu 等人[56] 提出多尺度小波分解与重构来判别振动事件与噪声干扰，将误报率控制在 2% 以下。2016 年，Pang 等人[57] 通过计算报警点前后的相位差变化实现了对相干衰落引起的虚假相位报警点的排除。2020 年，本课题组[58] 提出幅度动态评估的方法，将由于相干衰落噪声导致的虚假误报率从 4.81% 降低至 0.15%。然而，识别相干衰落区域并剔除的方法导致衰落区域丧失了探测能力，将探测盲区变成了探测死区。

因此对衰落噪声进行抑制是提高 Φ-OTDR 系统探测性能的另一个重要方法。2016 年，Hartog 等人[59] 通过实验和仿真分析得出在最优情况下叠加 M 组不同频率的信号能够实现解调信号信噪比近 M 倍的提升。随后又指出小波分解与重构能够大幅度降低相干衰落噪声的影响并提高系统的线性度[60]。同年，He 等人[5] 引入自适应二维双边滤波算法，对于 27.6 km 的传感光纤在不损失空间分辨率的前提下将信噪比提高 14 dB。2020 年，该课题组[6] 通过在数字域进行相移变换互补幅度信号，使得差分相位的标准偏差降低到 0.0224。2019 年，本课题组[8] 提出利用三种不同频率信号进行实时优选的策略，率先在不牺牲空间分辨率的前提下实现了对相干衰落的抑制，该方案能够在不改变系统结构的情形下，实现外界扰动信息的连续实时准确重构，将衰落引起的解调结果失真率抑

制到 1.15%。2021 年，本课题组[61]首次提出通过多芯光纤空分复用的方式，实现了一种基于频谱相似度的优选策略，将解调结果的失真率从平均 9.4%降低到 2%以下，提高现有 Φ-OTDR 对衰落噪声的抑制能力。

3.3 偏振相关噪声抑制

光在光纤中传输时，由于双折射现象会导致其偏振态发生随机变化，导致相干探测中本振光和探测光的偏振态难以保持一致，由此产生偏振衰落[33]。2005 年，Juarez 等人[62]提取出瑞利信号的两个正交偏振分量，以减少偏振衰落带来的扰动事件误判概率。2012 年，Qin 等人[63]提出将小波去噪法应用到数据处理中，实现了对偏振噪声的抑制。2013 年，An 等人[4]提出基于琼斯矩阵的双光束干涉 Φ-OTDR 抑制偏振衰落噪声方案，在检测长度为 5 km、空间分辨率为 20 m 时，信噪比达到 9.5 dB。2016 年，本课题组[9]通过正交偏振态脉冲对方法来实现偏振衰落噪声的抑制，实现了 11.2 dB 的最大噪声抑制比和 4.9 dB 的平均噪声抑制比。2020 年，孙延玺等人[64]提出将采集到的 P 态和 S 态光解调出相位后合并求取相位标准差，一定程度上抑制了偏振衰落对系统造成的影响。2021 年，本课题组进一步提出幅度最优选择算法[65]，首次实现了中频信号解调过程中在 P 态和 S 态的实时优选，能够有效抑制偏振衰落噪声对传感系统的影响。

3.4 多空间分辨率分析

空间分辨率并非越高越好。相关研究证明，传感系统的信噪比与系统空间分辨率设定密切相关，在环境噪声中，通过对多空间分辨率分析能够找到理论上的鉴相最优解，也能够提高系统信噪比。

2016 年，Dean 等人[66]指出空间分辨率与标距长度成正比，而信噪比与其成反比，当标距长度为地震波波长的$1/\sqrt{3}$时能够得到最好的信噪比。2019 年本课题组[7]指出信噪比随着空间分辨率的增大呈现出先增大后减小的趋势，并且在空间分辨率等于振动事件长度时取得最大值，当空间分辨率进一步增长时，系统的信噪比开始不断恶化。但是在实际环境中的扰动事件往往作用范围不一且无法预知。传统 Φ-OTDR 参数单一的测量设置显然无法满足对目标信号观测时的自适应优化。针对这一问题，本课题组提出了基于多空间分辨率分析的 Φ-OTDR 传感系统性能优化的信号处理方法，设计了基于三脉冲频分复用的 Φ-OTDR 系统，依托多空间分辨率分析方法，在不降低系统频率响应范围的前提下，实现空间分辨率与振动作用长度的最佳选择，使得系统的信噪比性能逼近理论极限。同年，本课题组又针对振动事件定位问题，首次提出了 Φ-OTDR 传感系统中的多尺度匹配滤波方法[67]，针对不同的振动区域，通过变换滤波器尺度，评估各个尺度的信噪比，最终确定最佳尺度使系统获得最佳信噪比，该方法在初始信噪比为 7.92 dB 时仍能将信号提升 6 dB 左右，使得系统能够在强噪声干扰下也能够以较低的时间消耗获得最低的定位不确定度和最好的定位信噪比。

4 特征提取与模式识别

4.1 特征提取

Φ-OTDR 系统虽然具有灵敏度高，感知距离长等优点，但同时也使得系统探测结果中包含了大量复杂多变的背景噪声。此外应用中还普遍存在监测对象所受扰动耦合到光纤上的方式复杂，数据量大，分析数据所需的专业性高等困难。因此需要针对不同场景有效提取出信号各类特征来提高数据处理效率。

Φ-OTDR 系统解调出的信号表现为光纤上各个位置的 RBS 相位在同一时刻其幅度有所不同。对一定时长的信号在时域上的变化进行统计，可作为时域特征提取的依据。2007 年，饶云江等人[68]通过信号分割，提取边缘、峰值、长度、幅度、周期等获得信号变化情况，从而判断出人奔跑、车行驶及人车联合行进的模式。2015 年，张颜等人[69]提出了多特征参量有效识别出应力破坏、攀爬、浇水以及轻度碾压四种扰动模式，作为识别依据的多特征参量包括平方差、短时过电平率以及扰动持续时间。通常，时域特征计算简易，但存在较大的误差性，从而作为初级判别依据来快速筛选数据的同时不提高漏报率。对筛选后的信息进一步结合其他特征做筛选则可有效降低 Φ-OTDR 系统的误报率。2019 年，Wu[70]提出了一种基于隐马尔可夫模型 (HMM) 的动态时间序列识别与知识挖掘方法来应对 Φ-OTDR 测得振动信号非线性和非平稳性的问题，有效地提升了地埋管道沿线常遭遇事件判断的准确率、召回率等参数。2020 年，Zhang 等人[71]对 Φ-OTDR 测得振动信号进行降噪处理后进行独立相关，对相关后的数据使用盲源分离中的 FastICA 算法过滤噪声从而达到对振动信号的分离。

不同激励源所引发的振动往往有其特有的模式。从时域上直接观察难以对其量化，因而需要从信号频域上提取相应特征来进一步区分。2016 年，Papp 等人[72] 将 FFT 频谱划分为 10 个频带，使用 10 个频带的归一化系数之和作为特征，可以使用 SVM 从背景噪声的原始数据中提取列车位置，实现列车跟踪功能。邹东伯等人[73] 借鉴语音信号的处理方式，提出了基于梅尔倒谱系数的识别算法，用于平稳信号的频域特征提取。同年，Tejedor 等人[74] 在特征提取时采用短时间快速傅里叶变换计算每帧(任何给定时间的信号窗口) 的频带能量，用作基本特征向量分量，并对其做归一化处理来完成快变信号的频域特征提取。2018 年，本课题组[48] 通过引入过滤法从时域和 8 频段频域特征选取对应扰动事件最优的特征组合，解决了单一类型特征作为识别依据算法中的鲁棒性差、分类准确率低的问题。2020 年，为了得到扰动信号的频域特征，Hu 等人[75] 提出了一种集成了自适应噪声、Kullback-Leibler 散度和相邻二进制自适应移动模式的完全集成经验模态分解方法来分析三种典型事件和背景噪声特征，与基于小波的时频域分析方法和径向基函数方法对比，该方法判断精度达到 94.03%，平均效率高了 20.0%。

RBS 相位信息的时域特征提取和频域特征提取通常是从单一时间维度来提取信号在空间上的特征或从单一空间维度来提取信号在时间上的特征。从时空二维角度来观察信号时，便可对信号做形态特征提取。2014 年 Parker[76] 等人研究提取点震源引发振动随着时空变化的 V 字线准确地匹配了声波在特定土壤中随着距离的衰减函数。2018 年，Ajo-Franklin 等人[77] 将埋地光缆接收到的噪声经过色散分析，通过对比实测数据和模型的多峰频散曲线、横波速度剖面反演曲线，验证了 Φ -OTDR 系统在地震波监测上的可靠性。2020 年，本课题组[78] 从工程车辆行驶、落石、人为夯筑、挖土机挖掘等不同事件提取出扰动的平均取面积、周长、致密性、连通域个数和欧拉数等形态特征，使事件识别准确率超过 97%。

不论是时域特征、频域特征或是形态特征都能在不同的角度体现数据自身的特性可用于后续的分类识别。具有较好差异度的特征是识别正确率的关键所在，因此结合不同的实验场景和扰动类型需要选择不同类型的数据特征，多个不同类型特征的有效组合也能进一步提升分类正确率。

4.2 分类模型

在提取信号的特征后，数据仍可能包含复杂环境噪声和人为的干扰，从而需选择适当的分类器用于模式识别。分类器可按其建立方法的不同分为两大类：有监督学习型和无监督学习型[79]。有监督学习型是指通过已知的训练样本和标签得到一个最优模型，再将此模型应用于未知样本得到其对应的输出结果。无监督学习型则是去掉人为标定的标签，从样本集中寻找规律进行建模分析。在工程应用中，为保证模型建立的准确性，使其具有较强的判别能力，通常需要对样本数据进行充分了解，因此常选用有监督学习的分类器进行训练[16]，主要包含以下三种类型：距离法[25]、支持向量机[80] 以及神经网络[81]。

4.2.1 距离法

常用的欧氏距离法是指人为设定若干特征参数，对待区分事件的样本特征进行提取与平均后，作为预先训练所需类别的模板，采用信号的特征向量与模板的欧氏距离作为符合度的判决依据。2013 年，Xu 等人[82] 提出了一种思路：对在实验室获得的样本进行训练，建立模板后将样本拉伸到均匀的时间尺度，通过计算待识别样本和训练的标准样本累积欧氏距离作为模式区分基础，最终识别准确率达 87.5%。2015 年，王照勇等人[25] 基于频谱分析提出了一种称为频谱欧氏距离法 (EDFS) 的快速模式识别方法，通过 FFT 变换得到的频谱，计算信号频谱与预先生成的模板之间的欧氏距离对入侵信号进行分类、识别。该方法通过相似性来确定分类结果，但运算量过于庞大，对系统的响应效率有较大影响。

4.2.2 支持向量机

距离法只适用于低维特征的分类，而支持向量机 (support vector machines，SVM) 是使用核函数将特征向量映射到高维空间，通过寻找最大间隔划分数据集，令非线性数据在高维空间中线性可分[83]。2017 年，张俊楠等人[80] 使用优化后的二叉树结构 SVM 用于 Φ-OTDR 系统的扰动信号特征分类，共设计四个分类器对三种扰动踩压、浇水和敲击进行识别，最终正确的扰动识别率在 96% 以上。SVM 的分类结果依赖于核函数的选择，且常规 SVM 只能解决二分类问题，当数据集的样本量较少时，可以选择合适的核函数达到较好的分类效果，但在海量数据的情况下，核函数映射维度非常高，其运算量会过载。2021 年，Liu[84] 等人引入基于滞后算子的最小二乘支持向量机

(LS-SVM) 模型有效地补偿了 0.1 Hz 以下的相位数据。0.01 Hz 振动信号信噪比较补偿前提高了 24 dB。

4.2.3 神经网络

SVM 与神经网络都源自于感知机，不同的是神经网络通过多个感知机的组合来解决分类问题[65]，在面对多类非线性数据时，神经网络具有较好的表现力。通过设定输入层、隐藏层以及输出层的神经元参数，得到数据集的最终分类结果。2014 年，Xin 等人[85]用基于 BP 神经网络的分类器对光纤围栏入侵监测系统的扰动事件进行识别分类，将具有自适应动态阈值的时域统计特征作为特征向量输入到三层 BP 神经网络，得到分类结果，平均正确识别率可以达到 96.83%。2020 年，Lou 等人[86]提出了一种基于多分支的长短时记忆卷积神经网络 (MLSTM-CNN) 的神经网络模型，通过利用多分支层和可学习的 LSTM 层自动提取不同时间尺度上的特征，然后将特征放入可学习的 CNN 层中进行识别干扰信号，可以有效识别出水、爬、敲、压等四种干扰事件，识别率可达 95.7%。2021 年，Jiang 等人 [87] 使用数值模拟来为给定的声学信号生成相应的噪声差分相位信号。之后用生成的声学信号和噪声以及一些真实的噪声数据来训练一个端到端的卷积中性网络来增强声学信号。增强后的振动信号的平均信噪比 (SNR) 从 13.4 dB 提高到 42.8 dB，而语音信号的平均尺度不变，信噪比 (SI-SDR) 改善了 7.7 dB。该方法很好地抑制激光频率漂移、激光相位噪声和干扰衰落引起的噪声和信号失真。

4.2.4 融合分类器

2015 年，Fang 等人[88]提出一种结合 SVM 的卷积神经网络 (CNN) 分类方法，通过将 CNN 中的 softmax 层替换为多类 SVM，增强了分类器的性能用于对不同类型的振动事件分类识别。首先，将利用频谱减法后得到的信号经过短时傅里叶变换转为频谱图，再将频谱图输入到 CNN 进行自动特征提取和分类。最后，实验表明该方法对于 4 种不同振动事件的识别率均在 90% 以上。但该方法的局限性在于过于依赖参数的调整。随着模式识别技术的不断发展，神经网络其自身的算法也在不断深化，同时也可结合其他分类器的优势构建深层的神经网络，其应用领域逐渐扩展，更适用于解决多分类问题。

2017 年，为了避免 BP 神经网络造成的过拟合现象，曲洪权[89]等人提出一种改进的 SVM 算法，依据扰动危害程度和发生概率的不同，使用样本先验信息调节超平面阈值进行分类，在 400 组数据的情况下，SVM 的识别准确率明显优于 BP 神经网络。2019 年，Wu 等人[90]提出使用 1-D CNN 代替 2-D CNN 来进行特征提取以省去其他数据转换过程，并使用 SVM 替换 softrmax 层来优化分类，在对 5 类石油管道典型事件保持高识别率前提下优化了网络结构提升了效率。2020 年，为了自动获取数据特征，Yi 等人[91]采用将信号的瀑布图直接转换为灰度图像作为特征输入到 CNN，最后使用 SVM 进行分类，8 种事件的分类准确率达到 94. 71%，CNN+ SVM 策略表现效果优于单独使用 CNN，准确率提高了 2.04%。

综上所述，无论是传统分类方法如距离法、支持向量机等，还是深度学习的方法，在不同情况下都具有一定的优势。传统分类方法在扰动类型较为单一的情况下分类效果较好，而深度学习的方法对多分类情况有较好的表现力。在数据量不同的条件下，传统分类算法的计算量随数据量的增加而逐渐复杂，因此更加适用于量较小的数据集；深度学习往往不需要人工设计特征提取的方式，适用于特征不明显的数据集。但其运算量较大，且需要对网络结构和参数进行优化，还易产生过拟合现象。考虑到各自优势的不同，将传统分类方式与深度学习相结合的策略，如将 CNN 与 SVM 相结合，汲取了不同分类方式的优点，其最终的识别准确率比单一分类方式的要高。表 1 总结了本章节中所介绍的 Φ-OTDR 系统特征提取和模式识别方法。

在训练样本数据充足的情况下，使用上述这些模式识别方法大都可以取得不错的识别效果。然而，大多数情况下，Φ-OTDR 系统所获取的信号大部分为背景噪声，而系统需要预警的事件出现频率低，从而难以获得足够的训练样本。训练数据的缺乏会导致深度学习网络的过拟合，从而降低这种数据驱动的模式识别方法的分类准确率。当小类的训练样本稀少时，基于深度学习类的识别方法会因为缺少必要的信息而对小类表现出较差的分类性能。因此，Φ-OTDR 技术需要结合数字信号处理技巧及行业知识，形成针对不同场景的工程应用技术方案，从而提高系统工作效率。

5 工程应用技术方案及案例

5.1 架空输电线状态监测

架空输电线路作为长距离输电设备的重要组成部分，常受到覆冰及大幅度舞动的威胁。如图 5 所示，

表 1 Φ-OTDR 系统中的特征提取、分类模型及事件识别

Table 1 Feature extraction, classification model and event recognition in Φ-OTDR

特征提取方法	提取特征种类	分类模型	事件识别	年份	参考文献
小波变换	时域特征+频域特征	距离法	人奔跑、车行驶及人车联合行进	2007	[68]
自适应动态阈值	时域特征	BP神经网络	光纤围栏入侵	2014	[85]
自动提取	频域特征	融合分类器	入侵事件	2015	[88]
多特征参量	频域特征	距离法	应力破坏、攀爬、浇水以及轻度碾压	2015	[69]
STFT	频域特征	EDFS	踢墙、踹墙及原地跑	2015	[25]
归一化系数	频域特征	SVM	列车跟踪	2016	[72]
基于梅尔倒谱系数	频域特征	距离法	入侵、大雨	2016	[73]
STFT	频域特征	距离法	管道威胁监测	2016	[74]
多特征参量	频域特征+时域特征	SVM	踩压、浇水及敲击	2017	[80]
多特征参量	频域特征+时域特征	SVM	行走、镐刨及挖掘机作业	2017	[89]
过滤法	形态特征	融合分类器	挖掘机施工、人员走动及木棒夯击	2018	[48]
短时单元多域特征提取	时域特征+频率特征	HMM	地埋管道沿线5中事件	2019	[70]
分帧处理时域信号+小波变换	时域特征+频域特征+形态特征	1-D CNN+SVM	数种石油管道典型事件	2019	[90]
去噪分帧	时域特征	FastICA	有无噪声干扰的对比事件	2020	[71]
自适应方法	频域特征+时域特征	融合分类器	挖掘、敲击、人员走动及背景噪声	2020	[75]
多特征参量	形态特征	SVM	工程车辆行驶、落石、人为夯筑及挖土机挖掘	2020	[78]
多分支层和可学习的LSTM层	时域特征	MLSTM-CNN	水、爬、敲、压	2020	[86]
卷积	形态特征	CNN+ SVM	8 种事件	2020	[91]
数值模拟	时域特征	端到端的卷积中性网络	PZT振动、管道敲击和语音	2021	[87]

图 5 架空输电线缆覆冰图

Fig. 5 Icing diagram of overhead power transmission line

当线路因覆冰增重时，有更大的风险遭受输电线断裂、线路短路甚至杆塔倒塌的威胁。因此，非常有必要对架空输电线进行实时监测，以防止故障的发生。目前，架空线的状态监测主要通过点传感器来实现。不过点传感器通常安装方式复杂，成本高昂，并且其中的电类传感器使用寿命有限且易受干扰。随着光电复合架空地线 (OPGW) 的使用为分布式光纤传感 (DOFS) 监测架空输电线提供了条件。其中研究较为广泛的是基于布里渊光时域反射仪 (BOTDR) 的架空线状态监测技术。尽管研究人员已经证明了其可行性，但仍有一些不足之处需要克服。首先，架空线中的光纤一般有 0.6%~0.7% 的余长，且光缆中填充的纤膏会使光纤难以耦合到应力[92]。故而只有当架空线所受应力大于某一阈值时，BOTDR 才能测量到架空线的应变变化。此外，BOTDR 的单次采集通常需要数十分钟，而架空线在此期间的承力状态受到舞动的影响是不断变化的。受此影响，BOTDR 得到的测量结果通常并不精确。针对传统 DOFS 在架空输电线监测中的局限

性，本课题组在积累和分析了大量的现场实测数据后，率先于 2019 年提出了一种基于 Φ-OTDR 的输电线路状态在线监测方案[93-94]。通过架空输电线振动时的受力分析，结合 Φ-OTDR 的定量解调原理，得到了架空输电线弧垂、舞动与覆冰及 Φ-OTDR 解调数据间的关系。

架空输电线的简化弧垂模型如图 6 所示，观察每一跨即两相邻杆塔间架空输电线，缆线受自重影响下垂呈弧形。当输电线上有覆冰时，其自重会增长从而引发两跨之间线缆长度发生改变，从而导致线缆弧垂发生变化。

架空输电线的弧垂 h 可以表示为

$$h=\sqrt{\frac{3l}{8}\Delta L+h_0^2}=\sqrt{\frac{3\lambda l}{32\pi n}(\varphi'_{S_0}-\varphi_{S_0})+h_0^2}\ , \tag{15}$$

其中：l 为跨距，ΔL 为架空输电线的长度变化量，h_0 为初始弧垂，n 为光纤纤芯折射率，λ 是入射光波长，φ_{S_0}是由初始光纤长度下相位差曲线的水平位置，φ'_{S_0} 是光纤长度变化后相位差曲线的水平位置。类似地，利用架空输电线振动引起的相位差曲线起伏，就可以实现对架空输电线舞动幅度的估计，架空输电线最低点相对其平衡位置的位移 G 可以表示为

$$G=\sqrt{\frac{3\lambda l}{32\pi n}\Delta\varphi_{\mathrm{v}}+h_0^2}-h_0\ , \tag{16}$$

其中：$\Delta\varphi_{\mathrm{v}}$ 是由振动引入的相位差。此时，在微风激励的前提下，G 代表了架空输电线舞动时的最大幅度。因为架空输电线的固有振动频率会随着架空输电线质量的变化而变化，因此经推导得到架空输电线覆冰厚度可表示为

$$d=\sqrt{\frac{m_0(f_0^2-f_{\mathrm{ice}}^2)}{\pi\rho_{\mathrm{ice}}f_{\mathrm{ice}}^2}+r_0^2}-r_0\ , \tag{17}$$

其中：d 为覆冰厚度，m_0 为架空输电线初始单位长度质量，m_{ice} 为单位长度架空输电线的覆冰质量，r_0 为架空输电线初始半径，ρ_{ice} 为冰的密度 (0.92 g/cm^3)，f_0 为初始振动特征峰频率，f_{ice} 为覆冰后振动特征峰频率。

上述原理通过实验得到了验证。弧垂估计结果如图 7(a) 所示，修正后的弧垂估计相对误差不超过 5.8%。舞动幅度监测结果如图 7(b) 所示，加速度计和 Φ-OTDR 得到的位移吻合良好。覆冰厚度估计结果如图 7(c) 所示，估算值与实际值吻合较好，在亚毫

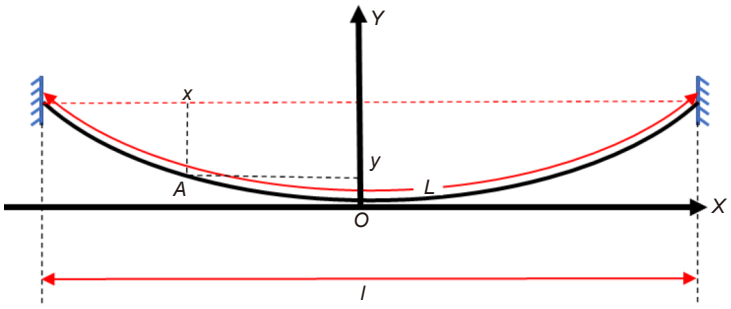


图 6　架空输电线缆弧垂模型

Fig. 6　Sag model of overhead transmission line

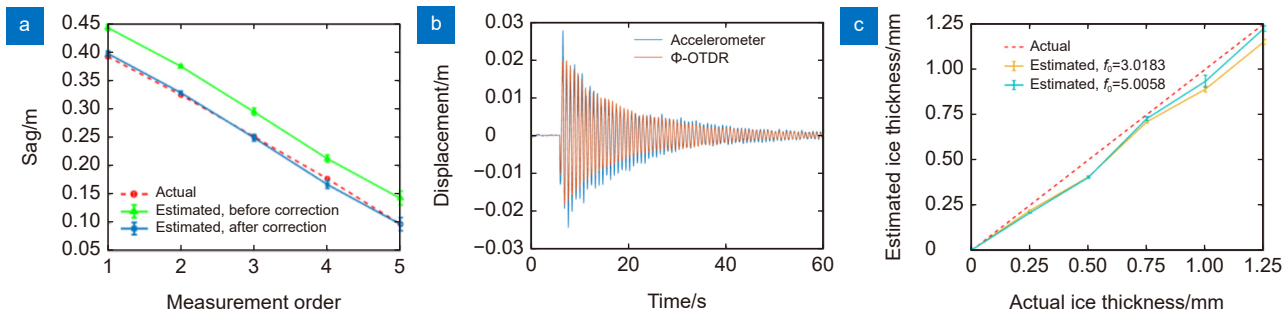


图 7　(a) 弧垂的实测值与估计值对比；(b) 振动时架空输电线最低点相对平衡位置的位移；(c) 覆冰厚度估计

Fig. 7　(a) Comparison between measured value and estimated value of sag; (b) Displacement of relative equilibrium position at the lowest point of overhead transmission line during vibration; (c) Ice thickness estimation

米尺度上绝对偏差不大于 10.84%，说明该方法可以在覆冰初期就实现预警。

该研究首次建立了架空输电线弧垂及其振动位移与 Φ-OTDR 测得相位之间的定量关系，同时将覆冰厚度与输电线振动频率相联系。与基于静态应变测量的输电线路监控系统相比，基于 Φ-OTDR 的方案可以更快速，准确地估算出覆冰厚度，并可以提供更多的状态信息，例如弧垂和振动位移，这是其他传感器难以进行测量的。该研究为输电线的日常检查和维护提供了一种新的技术手段，并为研究高压架空输电线路服役期间的损伤演化规律、失效机理以及寿命评估提供技术支撑和切实有效的方法，对推动 Φ-OTDR 更好地走向输电线覆冰监测工程化应用具有重要意义。

5.2 埋地电缆外破事件预警

埋地电缆有增强城市电网可靠性、提高土地利用价值、美化城市环境等重要作用。然而埋地输电线因外破发生结构损伤时 (如图 8)，会引发大范围的停电事故。因此有必要对埋地电缆可能遭遇的外破事件进行早期预警。

考虑到地埋电缆往往采用光电复合缆，通常 Φ-OTDR 系统可通过埋地电缆中通信光纤提供振动源沿线的一维轴向位置，巡线人员根据振动出现的位置有选择地进行现场查看，从而提升巡线效率。但是，并非所有被 Φ-OTDR 感知到的振动源都具有威胁性。对埋地电缆而言，振动源不同的移动方向，移动速度以及到埋地电缆的垂直距离，都对应了不同的威胁等级。因此，振动源的二维位置对于外部威胁的识别和预警具有重要的参考价值。本课题组联合内蒙古电力勘测设计院于 2021 年首次提出了一种基于 Φ-OTDR 和既有地下光缆的通用的地面振动源位置估计方法[95]，期望为管道和光缆外部损坏的早期预警提供新的选择。

如图 9 所示，x 轴上的红点代表间隔相等的等效传感单元 (equivalent sensing unit，ESU)。第 i 个 ESU 的位置为 $[x_i, y_i, z_i]$，振源的位置为 $[x_s, y_s, z_s]$。

根据空间中两点间的距离公式，可推得振动信号到达的不同 ESU 时的到达时间差为

$$\begin{aligned}\Delta t_i &= \frac{\sqrt{(x_i-x_s)^2+y_s^2+z_0^2}-\sqrt{y_s^2+z_0^2}}{v}\\ &= f(x_i,[x_s,y_s])\ ,\end{aligned} \tag{18}$$

其中：v 为振动的传播速度，Δt_i 是变量 x_i 的函数，而

图 8　地埋电缆外破事故现场

Fig. 8　Accident site of external damage of buried cable

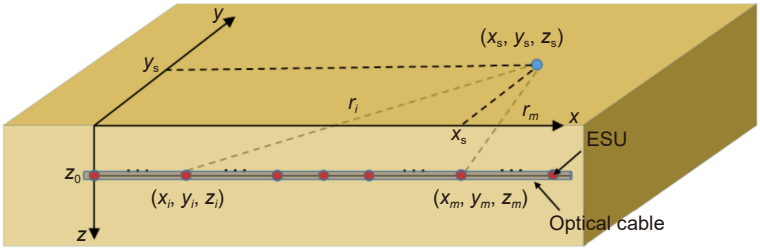


图 9　到达时间差 (TDOA) 原理图

Fig. 9　Schematic diagram of TDOA

未知参量 x_s，y_s 恰好满足用最小二乘法估计常数的适用条件

$$\min_{[x_s,y_s]}\|F(\boldsymbol{X},[x_s,y_s])-\Delta\boldsymbol{T}\|_2^2 = \min_{[x_s,y_s]}\sum_i^N(f(x_i,[x_s,y_s])-\Delta t_i)^2, \quad (19)$$

其中：$X=[x_1, x_2, \cdots, x_N]^T$。由于 Φ-OTDR 可以提供足够多的 ESU 来捕获振动信号，所以等式 (19) 是超定的，因此使用信任区域反射法对其进行求解即可得到振源的位置。我们进行了外场试验对该定位方法进行了验证。如图 10 所示。其中图 10(a) 是估计结果的二维高斯分布，图 10(b) 是估计结果置信区间等高线图。

估计结果的误差直方图如图 11 所示。从图 11(a) 中的单阵列估计误差直方图可以看出，随着振动源远离光缆，估计误差增加。当偏移量在 30 m 以内时，估计误差小于 5 m，当偏移量大于 40 m 时，估计误差已超过 10 m。在垂直距离较大的情况下，为了获得较高的定位精度，可以使用排列方向正交的光缆同时进行定位。估计误差如图 11(b) 所示。使用单个阵列的估计误差均大于 10 m，而联合估计误差基本都小于 5 m。

该方法在垂直偏移距 30 m 以内，可以实现米量级的定位精度。通过两个垂直排布的光缆阵列，有效定位范围可以达到 60 m 以上。相较于其他基于 Φ-OTDR 的振源定位技术如到达角 (angle of arrival，AOA)、接收信号强度 (received signal strength，RSS)、到达时间 (time of arrival，TOA) 技术[96-98]，TDOA 不要求单音振源，不需要知道振源激发准确时刻[99] 且具有高定位精度，因此该方法非常适用于城市既有地下电力光缆，可以实现对地面设备的运动轨迹追踪，为埋地输电线路上外破事件的早期预警提供了新的选择。

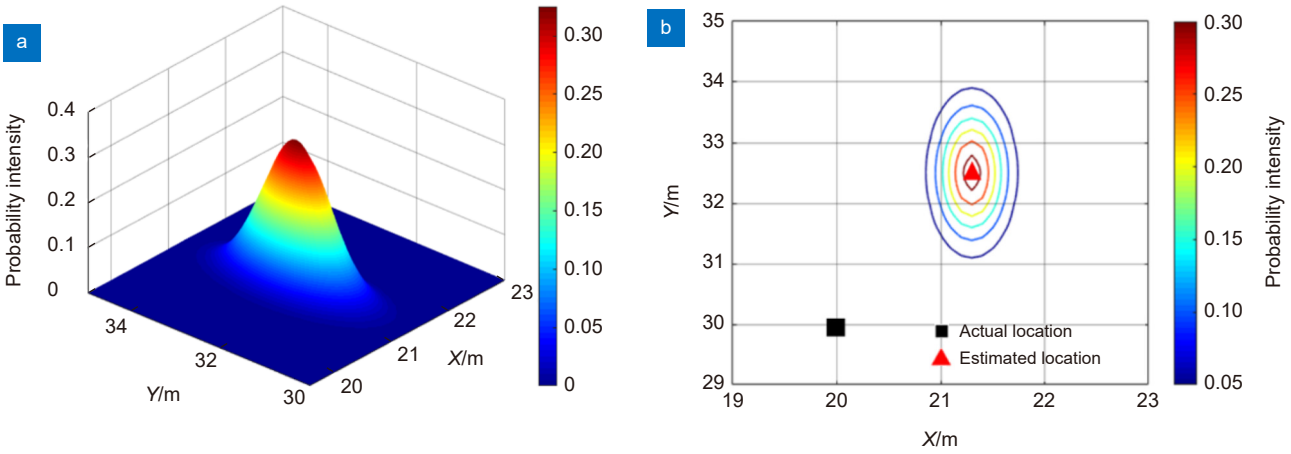


图 10　外场实验。(a) 置信区间的二维高斯分布；(b) 置信区间的等高线图

Fig. 10　Outfield experiment. (a) Two dimensional Gaussian distribution of confidence interval; (b) Contour plot of confidence interval

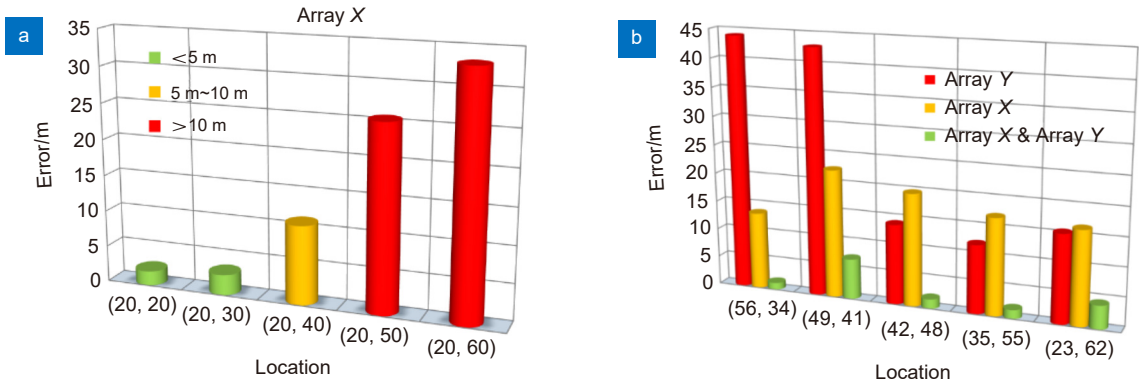


图 11　位置估计误差。(a) 单阵列；(b) 垂直正交阵列

Fig. 11　Position estimation error. (a) Single array; (b) Vertical orthogonal array

6 总结和展望

本文总结了 Φ-OTDR 在仪器化及应用中从声场信号的量化、器件核心参数设定、相位解调方法到信号的预处理去噪、探测对象的模式识别及工程应用案例设计过程中的一系列数字化优化方法。通过数字信号处理算法不仅能够提高传感系统的灵敏性、可靠性、准确性、稳定性，从而实现仪器的升级，而且新的硬件结构设计往往也需要对应的数字信号处理算法配合，才能更好地提升仪器的性能。随着科技不断发展，高性能 ADC 与嵌入式处理器为提升 Φ-OTDR 系统设计中的数字化比重提供了可靠的条件。对 Φ-OTDR 传感系统中的数字信号处理及其工程应用方法开展进一步的研究，必将有助于提高该类传感系统在集成化、智能化等方面达到更高的水平。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Zhang X P. *Fully Distributed Fiber Optic Sensing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2013 .
张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[2] Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(1): 0106004.
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.

[3] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US07/737449[P]. 1993-03-16.

[4] An Y, Feng X, Li J, et al. Two-beam phase-sensitive optical time domain reflectometer based on Jones matrix modeling[J]. *Opt Eng*, 2013, **52**(9): 094102.

[5] He H J, Shao L Y, Li H C, et al. SNR enhancement in phase-sensitive OTDR with adaptive 2-D bilateral filtering algorithm[J]. *IEEE Photonics J*, 2017, **9**(3): 6802610.

[6] He H J, Yan L S, Qian H, et al. Suppression of the interference fading in phase-sensitive OTDR with phase-shift transform[J]. *J Lightw Technol*, 2021, **39**(1): 295−302.

[7] Shan Y Y, Ji W B, Wang Q, et al. Performance optimization for phase-sensitive OTDR sensing system based on multi-spatial resolution analysis[J]. *Sensors*, 2019, **19**(1): 83.

[8] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for Φ-OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies[J]. *J Lightw Technol*, 2019, **37**(14): 3602−3610.

[9] Zhang Y X, Xu Y M, Shan Y Y, et al. Polarization dependence of phase-sensitive optical time-domain reflectometry and its suppression method based on orthogonal-state of polarization pulse pair[J]. *Opt Eng*, 2016, **55**(7): 074109.

[10] Shan Y Y. The key technology research of distributed optical fiber vibration sensor based on Φ-OTDR[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
单媛媛. 基于Φ-OTDR的分布式光纤振动传感系统关键技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.

[11] Awwad E, Dorize C, Guerrier S, et al. Detection-localization-identification of vibrations over long distance SSMF with coherent Δϕ -OTDR[J]. *J Lightw Technol*, 2020, **38**(12): 3089−3095.

[12] LI H, Fan C Z, Liu T, et al. Time-slot multiplexing based bandwidth enhancement for fiber distributed acoustic sensing[J]. *Sci China Inf Sci*, 2022, **65**(1): 119303.

[13] Iida D, Toge K, Manabe T. High-frequency distributed acoustic sensing faster than repetition limit with frequency-multiplexed phase-OTDR[C]//*Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2016.

[14] Li S, Qin Z G, Liu Z J, et al. Long-distance Φ-OTDR with a flexible frequency response based on time division multiplexing[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(21): 32833−32841.

[15] Liu S Q, Yu F H, Hong R, et al. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electron Adv*, 2022, **5**(3): 200078.

[16] Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ-OTDR[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(13): 1306003.
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.

[17] Wang B Z, Ba D X, Chu Q, et al. High-sensitivity distributed dynamic strain sensing by combining Rayleigh and Brillouin scattering[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(12): 200013.

[18] Hu Z C. Φ-OTDR sensing technology application in railway safety monitoring[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2021.001637.
胡洲畅. Φ-OTDR传感技术在铁路安全监测中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2021.001637.

[19] Zhang L N, Ren Y L, Lin R B, et al. Distributed acoustic sensing system and its application for seismological studies[J]. *Prog Geophys*, 2020, **35**(1): 65−71.
张丽娜, 任亚玲, 林融冰, 等. 分布式光纤声波传感器及其在天然地震学研究中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, **35**(1): 65−71.

[20] Zhou X H, Chen W, Yang J F, et al. Application review of DAS technology in oil and gas geophysics[J]. *Prog Geophys*, 2021, **36**(1): 338−350.
周小慧, 陈伟, 杨江峰, 等. DAS技术在油气地球物理中的应用综述[J]. 地球物理学进展, 2021, **36**(1): 338−350.

[21] Wang P F, Dong Q, Liu X, et al. Coalbed methane transport pipeline intrusion detection system based on Φ-OTDR[J]. *Chin J Sens Actuat*, 2019, **32**(1): 144−149.
王鹏飞, 董齐, 刘昕, 等. 基于Φ-OTDR的煤层气管线外界入侵振动检测系统[J]. 传感技术学报, 2019, **32**(1): 144−149.

[22] Wu X W, Wu H J, Rao Y J, et al. Low misstatement rate distributed optical fiber fence intrusion detection system by variety of wavelet decomposition method[J]. *Acta Photonica Sin*, 2011, **40**(11): 1692−1696.
吴庶伟, 吴慧娟, 饶云江, 等. 基于多种小波分解方法综合判决的低误报率分布式光纤围栏入侵监测系统[J]. 光子学报, 2011, **40**(11): 1692−1696.

[23] Zhong X, Gao X C, Deng H X, et al. Pulse-width multiplexing ϕ-OTDR for nuisance-alarm rate reduction[J]. *Sensors*, 2018, **18**(10): 3509.

[24] 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.

[25] Wang Z Y, Pan Z Q, Ye Q, et al. Fast pattern recognition based on frequency spectrum analysis used for intrusion alarming in optical fiber fence[J]. *Chin J Lasers*, 2015, **42**(4): 0405010.
王照勇, 潘政清, 叶青, 等. 用于光纤围栏入侵告警的频谱分析快速模式识别[J]. 中国激光, 2015, **42**(4): 0405010.

[26] He Z Y, Liu Q W. Principles and applications of optical fiber distributed acoustic sensors[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(13): 1306001.
何祖源, 刘庆文. 光纤分布式声波传感器原理与应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58**(13): 1306001.

[27] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of *Φ*-OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2020, **57**(13): 130005.
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等. *Φ*-OTDR型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, **57**(13): 130005.

[28] Shi Y, Feng H, Zeng Z M. Research progress of distributed optical fiber sensors based on Φ-OTDR structure[J]. *Process Autom Instrum*, 2017, **38**(7): 70−74,79.
施羿, 封皓, 曾周末. Φ-OTDR型分布式全光纤传感器研究进展[J]. 自动化仪表, 2017, **38**(7): 70−74,79.

[29] Wen K, Wang R. Design and implementation of plug-in OTDR[J]. *Photon Technol*, 2003, **3**(2): 118−121.
文科, 王荣. 插卡式OTDR的设计与实现[J]. 飞通光电子技术, 2003, **3**(2): 118−121.

[30] 李辉, 李蔚, 张慧娟. 分布式光纤传感检测在DSP下的设计与实现[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. [2009-11-12]. http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200911-353.

[31] Wang G, Zhou W, Li J W. Digital signal processing techniques in the practical distributed fiber sensor system[J]. *Opt Commun Technol*, 2009, **33**(3): 18−19.
王刚, 周伟, 李进武. 分布式光纤传感系统的全数字信号处理[J]. 光通信技术, 2009, **33**(3): 18−19.

[32] Wu C P. DSP-based OTDR signal processing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.
吴晨平. 基于DSP的OTDR信号处理[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.

[33] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, et al. The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Acta Phys Sin*, 2017, **66**(7): 070707.
张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法[J]. 物理学报, 2017, **66**(7): 070707.

[34] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(24): 5648−5651.

[35] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. *Measurement*, 2016, **79**: 222−227.

[36] Zhang Y H. Research on key technologies of seismic exploration instrument based on distributed acoustic sensing[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020. https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnjiu.2020.000868.
张宇昊. 基于分布式声场传感的地震勘探仪关键技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2020. https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnjiu.2020.000868.

[37] Furukawa S, Tanaka T, Koyamada Y, et al. High dynamic range coherent OTDR for fault location in optical amplifier systems[C]//*Proceedings of the 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technolgy Conference*, 1994. https://doi.org/10.1109/IMTC.1994.352115.

[38] Haykin S S. *Communication Systems*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.

[39] Jiang F, Lu Z X, Cai F D, et al. Low computational cost distributed acoustic sensing using analog I/Q demodulation[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, **19**(17): 3753.

[40] Ma J, Li M, Lü H F, et al. Undersampling digital orthogonal demodulation method for heterodyne interference system[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(23): 2306002.
马杰, 黎敏, 吕海飞, 等. 欠采样下外差干涉系统数字正交解调法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, **58**(23): 2306002.

[41] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent Φ-OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(2): 853−858.

[42] Wu Y Q, Gan J L, Li Q Y, et al. Distributed fiber voice sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics J*, 2015, **7**(6): 6803810.

[43] Fan X Y, Yang G Y, Wang S, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from optical reflectometry[J]. *J Lightw Technol*, 2017, **35**(16): 3281−3288.

[44] Yang G Y, Fan X Y, Wang S, et al. Long-range distributed vibration sensing based on phase extraction from phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics J*, 2016, **8**(3): 6802412.

[45] Zhu F. Performance enhancement study of phase-sensitive optical time domain reflection sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
朱帆. 相位敏感型光时域反射传感系统性能增强研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.

[46] Lu C B. Based on Hilbert transformation single sideband modulation system design and realization[J]. *Electron Des Eng*, 2016, **24**(12): 138−140,145.
陆存波. 基于Hilbert变换的单边带调制系统设计与实现[J]. 电子设计工程, 2016, **24**(12): 138−140,145.

[47] Zou N M, Xiong F, Liang L, et al. A distributed fiber optic vibration sensing system and demodulation method: CN202110931428.8[P]. 2021-08-13.
邹宁睦, 熊菲, 梁蕾, 等. 一种分布式光纤振动传感系统和解调方法: CN202110931428.8[P]. 2021-08-13.

[48] Niu J H. Research on signal processing technology of Φ-OTDR sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
牛纪辉. 相位敏感型光时域反射传感系统的信号处理技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.

[49] Xiong X L, Wei Y X, Zhang W T, et al. De-noising algorithm of Φ-OTDR signal based on complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[J]. *Semicond Optoelectron*, 2018, **39**(4): 600−606.
熊兴隆, 魏永兴, 张琬童, 等. 基于自适应噪声完备经验模态分解的Φ-OTDR信号去噪算法[J]. 半导体光电, 2018, **39**(4): 600−606.

[50] Ju Z W, Yu Z J, Hou Q K, et al. Low-noise and high-sensitivity Φ-OTDR based on an optimized dual-pulse heterodyne detection scheme[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(7): 1864−1870.

[51] Zhang X P, Zheng Y Y, Zhang C, et al. A fading tolerant phase-sensitive optical time domain reflectometry based on phasing-locking structure[J]. *Electronics*, 2021, **10**(5): 535.

[52] Healey P. Fading in heterodyne OTDR[J]. *Electron Lett*, 1984, **20**(1): 30−32.

[53] Liokumovich L B, Ushakov N A, Kotov O I, et al. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions[J]. *J Lightw Technol*, 2015, **33**(17): 3660−3671.

[54] Park J, Lee W, Taylor H F. Fiber optic intrusion sensor with the

configuration of an optical time-domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, **3555**: 49−56.

[55] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Characteristics and explanations of interference fading of a ϕ -OTDR with a multi-frequency source[J]. *J Lightw Technol*, 2013, **31**(17): 2947−2954.

[56] Wu H J, Xiao S K, Li X Y, et al. Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ-OTDR)[J]. *J Lightw Technol*, 2015, **33**(15): 3156−3162.

[57] Pang F F, He M T, Liu H H, et al. A fading-discrimination method for distributed vibration sensor using coherent detection of φ-OTDR[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2016, **28**(23): 2752−2755.

[58] Zhang X P, Wang Q, Xiong F, et al. Performance enhancement method for phase-sensitive optical time-domain reflectometer system based on suppression of fading induced false alarms[J]. *Opt Eng*, 2020, **59**(4): 046101.

[59] Hartog A A, 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[C]//*Proceedings of the 78th EAGE Conference and Exhibition 2016*, 2016. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600685.

[60] 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]. *Geophys Prospect*, 2018, **66**(S1): 192−202.

[61] Zhang Y X, Liu J X, Xiong F, et al. A space-division multiplexing method for fading noise suppression in the Φ-OTDR system[J]. *Sensors*, 2021, **21**(5): 1694.

[62] Juarez J C, Taylor H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(24): 3284−3286.

[63] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2012, **24**(7): 542−544.

[64] Sun T X, Xu L H, Wang S, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing system based on polarization diversity technology[J]. *Opt Commun Technol*, 2020, **44**(8): 5−9.
孙廷玺, 徐龙海, 王升, 等. 基于偏振分集技术的分布式光纤声波传感系统[J]. 光通信技术, 2020, **44**(8): 5−9.

[65] Zhang X P, Chen X H, Liang L, et al. Enhanced C-OTDR-based online monitoring scheme for long-distance submarine cables[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, **41**(13): 1306001.
张旭苹, 陈晓红, 梁蕾, 等. 长距离海缆在线监测改进型C-OTDR系统[J]. 光学学报, 2021, **41**(13): 1306001.

[66] Dean T, Cuny T, Hartog A H. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing[J]. *Geophys Prospect*, 2017, **65**(1): 184−193.

[67] Zhang X P, Cao L, Shan Y Y, et al. Performance optimization for a phase-sensitive optical time-domain reflectometry based on multiscale matched filtering[J]. *Opt Eng*, 2019, **58**(5): 056114.

[68] Rao Y J, Wu M, Ran Z L, et al. A fiber-optic intrusion alarm system based on quasi-distributed fbg sensors[J]. *Chin J Sens Actuators*, 2007, **20**(5): 998−1002.
饶云江, 吴敏, 冉曾令, 等. 基于准分布式FBG传感器的光纤入侵报警系统[J]. 传感技术学报, 2007, **20**(5): 998−1002.

[69] Zhang Y, Lou S Q, Liang S, et al. Study of pattern recognition based on multi-characteristic parameters for φ-OTDR distributed optical fiber sensing system[J]. *Chin J Lasers*, 2015, **42**(11): 1105005.
张颜, 娄淑琴, 梁生, 等. 基于多特征参量的φ-OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(11): 1105005.

[70] Wu H J, Liu X R, Xiao Y, et al. A dynamic time sequence recognition and knowledge mining method based on the hidden markov models (HMMs) for pipeline safety monitoring with Φ-OTDR[J]. *J Lightw Technol*, 2019, **37**(19): 4991−5000.

[71] Zhang Y, Wang S, Hu Y Z. Research on noise reduction of Φ-OTDR signal based on blind source separation algorithm[J]. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 2020, **440**: 022074.

[72] Papp A, Wiesmeyr C, Litzenberger M, et al. A real-time algorithm for train position monitoring using optical time-domain reflectometry[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation*, 2016. https://doi.org/10.1109/ICIRT.2016.7588715.

[73] Zou D B, Liu H, Zhao L, et al. Research of signal recognition of distributed optical fiber vibration sensors[J]. *Laser Technol*, 2016, **40**(1): 86−89.
邹东伯, 刘海, 赵亮, 等. 分布式光纤振动传感信号识别的研究[J]. 激光技术, 2016, **40**(1): 86−89.

[74] Tejedor J, Martins H F, Piote D, et al. Toward prevention of pipeline integrity threats using a smart fiber-optic surveillance system[J]. *J Light Technol*, 2016, **34**(19): 4445−4453.

[75] Hu Y Z, Meng Z, Ai X B, et al. Performance enhancement of the location and recognition of a Φ-OTDR system using CEEMDAN-KL and AMNBP[J]. *Appl Sci*, 2020, **10**(9): 3047.

[76] Parker T, Shatalin S, Farhadiroushan M. Distributed acoustic sensing - a new tool for seismic applications[J]. *First Break*, 2014, **32**(2).

[77] Ajo-Franklin J B, Dou S, Lindsey N J, et al. Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection[J]. *Sci Rep*, 2019, **9**(1): 1328.

[78] Zhou T. Research on high performance pattern recognition algorithm in distributed fiber acoustic sensing system[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020. https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnjiu.2020.001052.
周桐. 分布式声场传感系统中高性能模式识别算法的研究[D]. 南京: 南京大学, 2020. https://doi.org/10.27235/d.cnki.gnjiu.2020.001052.

[79] Zhang R, Wang Y B. Research on machine learning with algorithm and development[J]. *J Commun Univ China (Sci Technol)*, 2016, **23**(2): 10−18,24.
张润, 王永滨. 机器学习及其算法和发展研究[J]. 中国传媒大学学报 (自然科学版), 2016, **23**(2): 10−18,24.

[80] Zhang J N, Lou S Q, Liang S. Study of pattern recognition based on SVM algorithm for φ-OTDR distributed optical fiber disturbance sensing system[J]. *Infrared Laser Eng*, 2017, **46**(4): 0422003.
张俊楠, 娄淑琴, 梁生. 基于SVM算法的φ-OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(4): 0422003.

[81] Qian N. On the momentum term in gradient descent learning algorithms[J]. *Neural Netw*, 1999, **12**(1): 145−151.

[82] Xu H Y, Zhang Z, Zhang X W. Signal recognition basing on optical fiber vibration sensor[J]. *Appl Mech Mater*, 2013, **347–350**: 743−747.

[83] Burges C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Min Knowl Disc*, 1998, **2**(2): 121−167.

[84] Liu T, Li H, He T, et al. Ultra-high resolution strain sensor network assisted with an LS-SVM based hysteresis model[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(5): 200037.

[85] Xie X, Wu H J, Rao Y J. A fiber-optical perimeter intrusion detection system based on the fiber bragg grating vibration sensors and its identification method[J]. *Acta Photonica Sin*,

2014, **43**(5): 0506005.
谢鑫, 吴慧娟, 饶云江. 一种基于光纤布喇格光栅振动传感器的光纤围栏入侵监测系统及其模式识别[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0506005.

[86] Wang Z D, Lou S Q, Wang X, et al. Multi-branch long short-time memory convolution neural network for event identification in fiber-optic distributed disturbance sensor based on φ-OTDR[J]. *Infrared Phys Technol*, 2020, **109**: 103414.

[87] Jiang F, Zhang Z H, Lu Z X, et al. High-fidelity acoustic signal enhancement for phase-OTDR using supervised learning[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(21): 33467−33480.

[88] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. *J Lightw Technol*, 2015, **33**(13): 2811−2816.

[89] Qu H Q, Xia Y, Bi F K. An improved SVM method to recognize harmful intrusion signal for optical fiber pre-warning system[J]. *J North China Univ Technol*, 2017, **29**(2): 33−38.
曲洪权, 夏雨, 毕福昆. 一种基于改进型SVM算法的光纤入侵信号识别研究[J]. 北方工业大学学报, 2017, **29**(2): 33−38.

[90] Wu H J, Chen J P, Liu X R, et al. One-dimensional CNN-based intelligent recognition of vibrations in pipeline monitoring with DAS[J]. *J Lightw Technol*, 2019, **37**(7): 4359−4366.

[91] Si Y, Wang Y Y, Wang L Y, et al. Multi-event classification for Φ-OTDR distributed optical fiber sensing system using deep learning and support vector machine[J]. *Optik*, 2020, **221**: 165373.

[92] Liu T, Feng X B, Liu B, et al. Optical fiber excess length control and life impact analysis for OPGW[J]. *Electric Power Inf Commun Technol*, 2017, **15**(9): 8−12.
刘涛, 冯学斌, 刘彬, 等. OPGW光纤余长控制及寿命影响分析[J]. 电力信息与通信技术, 2017, **15**(9): 8−12.

[93] Zhang Y X, Chen K N, Zhang X P, et al. An OPGW icing monitoring system and method based on phase-sensitive light time domain reflection system: CN110686626B[P]. 2021-03-19.
张益昕, 陈可楠, 张旭苹, 等. 一种基于相位敏感型光时域反射系统的OPGW覆冰监测系统及方法: CN110686626B.[P]. 2021-03-19.

[94] Ding Z W, Zhang X P, Zou N M, et al. Phi-OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. *J Lightw Technol*, 2021, **39**(15): 5163−5169.

[95] Ding Z W, Zou N M, Zhang C, et al. Self-optimized vibration localization based on distributed acoustic sensing and existing underground optical cables[J]. *J Lightw Technol*, 2022, **40**(3): 844−854.

[96] Kundu T. Acoustic source localization[J]. *Ultrasonics*, 2014, **54**(1): 25−38.

[97] Li X Y, Deng Z D, Rauchenstein L T, et al. Contributed Review: source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements[J]. *Rev Sci Instrum*, 2016, **87**(4): 041502.

[98] Patwari N, Ash J N, Kyperountas S, et al. Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks[J]. *IEEE Signal Proc Mag*, 2005, **22**(4): 54−69.

[99] Yang K, An J P, Bu X Y, et al. Constrained total least-squares location algorithm using time-difference-of-arrival measurements[J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 2010, **59**(3): 1558−1562.

作者简介

张驰 (1996-)，男，博士研究生在读，主要参与分布式光纤传感技术与工程应用结合相关的研究。

E-mail: DG21340017@smail.nju.edu.cn

【通信作者】张旭苹 (1962-)，女，博士，教授，主要研究领域为：分布式光纤传感原理与技术、光传感信号人工智能处理技术、海洋监测分布式水听系统、光纤传感技术在大型工程基础设施健康监测中的应用等。

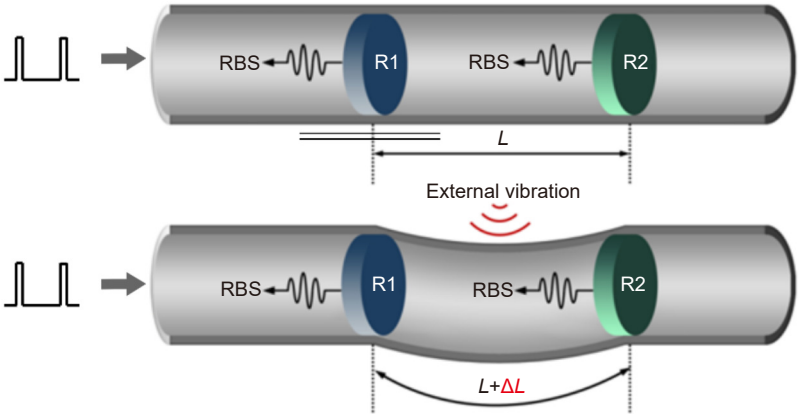
E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

【通信作者】张益昕 (1984-)，男，博士，副教授，主要从事分布式光纤传感系统的机理研究与仪器化设计，并开展相关技术的工程应用推广，具体包括：电力设施与装备全生命周期监测；工业故障的智能化诊断；油气管线在线状态监测；智慧交通；国防与军事应用等。

E-mail: zyixin@nju.edu.cn

Digital signal processing and application of Φ-OTDR system

Zhang Chi[1,2], Zou Ningmu[4], Song Jinyu[1,2], Tong Shuai[1,2], Yao Yuanyuan[1,2], Ding Zhewen[1], Wang Feng[1,2], Zhang Yixin[1,2,3*], Zhang Xuping[1,2,3*]



Influence of external sound field on optical fiber

Overview: The phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ-OTDR) sensing system has the characteristics of high dynamic response and high sensitivity, and has great application potential in the field of large-scale engineering structural health monitoring. The instrumentation level and engineering application of Φ-OTDR systems depend to a large extent on digital signal processing (DSP) technology. For the Φ-OTDR system, the tasks of digital signal processing mainly include three aspects. First, the demodulation of Rayleigh's backscattered light phase information should be completed accurately and efficiently. It is necessary to understand the relationship between the phase difference and the sound field signal. Then, it is necessary to reasonably set the core parameters of the Φ-OTDR system in the digital-to-analog conversion to obtain the RBS signal quickly and accurately. After that, it is necessary to select an appropriate demodulation method for demodulation. Second, all kinds of noise floor of the sensing system itself should be analyzed and suppressed. Since the noise floor of the sensing system itself is inevitable, analyzing and suppressing it is the key to improve the signal-to-noise ratio of the system. The drift of the laser center frequency, the local birefringence change of the fiber, and the nonlinear correspondence between the fiber strain and the interference intensity will all introduce corresponding noise to the system. Among the many types of noise, the coherent fading brought by the system will cause the system SNR to continue to deteriorate and randomly form detection blind spots; the polarization-related noise caused by the external environment will affect the Φ-OTDR system's ability to perceive multiple disturbance events. Third, reliable feature extraction and pattern recognition strategies should be quickly selected to improve the accuracy and intelligence of system reconstruction disturbance events. In engineering applications, various monitoring objects and time-varying background noise make it difficult to describe vibration events by accurate mathematical models. In particular, when Φ-OTDR is used in new scenarios, it needs to be able to quickly establish a corresponding analysis model based on industry knowledge, and minimize the degree of manual participation in it. Therefore, efficient and reliable object feature extraction methods, pattern recognition algorithms, and machine learning strategies are urgently needed. In view of the above problems, this paper summarizes the main digital signal processing methods and technologies of the Φ-OTDR system in recent years in the digitization of optoelectronic signals, the demodulation of phase information, the suppression of system noise, and the pattern recognition of detected objects. Two application cases of transmission line condition monitoring and buried cable breakage early warning illustrate the digital signal processing skills in the design of engineering application schemes.

Zhang C, Zou N M, Song J Y, et al. Digital signal processing and application of Φ-OTDR system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(2): 220088; DOI: 10.12086/oee.2023.220088

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2001601, 62175100, 61975076), Inner Mongolia Autonomous Region Key Technology Research Project (2019GG374), Fundamental Research Fees for Central Colleges and Universities (0213-14380202), and Shenzhen Science and Technology Innovation Fund (YFJGJS1.0).

[1]Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; [2]College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China; [3]Shenzhen Research Institute, Nanjing University, Shenzhen, Guangdong 581000, China; [4]Ingram School of Engineering, Texas State University, San Marcos, TX 78666, USA

* E-mail: zyixin@nju.edu.cn; xpzhang@nju.edu.cn