

# 光学学报

## 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术

张旭苹<sup>1,2</sup>, 丁哲文<sup>1</sup>, 洪瑞<sup>1</sup>, 陈晓红<sup>1</sup>, 梁蕾<sup>1</sup>, 张驰<sup>1</sup>, 王峰<sup>1</sup>, 邹宁睦<sup>1\*</sup>, 张益昕<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>南京大学深圳研究院, 广东 深圳 581000

**摘要** 由于散射光的相位变化对外部扰动极其敏感, 相位敏感光时域反射 ( $\Phi$ -OTDR) 技术具有高响应速度、超高灵敏等特点。相比现有的其他分布式光纤传感技术,  $\Phi$ -OTDR 技术在环境适应性及光缆布设的便捷性方面有明显的优势。本文介绍  $\Phi$ -OTDR 系统的原理、结构、性能及应用情况, 并对其发展趋势进行展望。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤传感; 相位敏感光时域反射仪; 扰动监测; 声波监测

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0106004

## Phase Sensitive Optical Time-Domain Reflective Distributed Optical Fiber Sensing Technology

Zhang Xuping<sup>1,2</sup>, Ding Zhewen<sup>1</sup>, Hong Rui<sup>1</sup>, Chen Xiaohong<sup>1</sup>, Liang Lei<sup>1</sup>,  
Zhang Chi<sup>1</sup>, Wang Feng<sup>1</sup>, Zou Ningmu<sup>1\*</sup>, Zhang Yixin<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Intelligent Optical Sensing and Manipulation, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

<sup>2</sup>Shenzhen Research Institute, Nanjing University, Shenzhen, Guangdong 581000, China

**Abstract** Since the phase change of the scattered light is extremely sensitive to external disturbances, the phase sensitive optical time-domain reflectometer ( $\Phi$ -OTDR) technology has the characteristics of high response speed and ultra-high sensitivity. Compared with other existing distributed optical fiber sensing technologies,  $\Phi$ -OTDR technology has obvious advantages in environmental adaptability and convenience of optical cable layout. This article introduces the principle, structure, performance, and application of the  $\Phi$ -OTDR system, and looks forward to its development trend.

**Key words** fiber optics; distributed optical fiber sensing; phase sensitive optical time-domain reflectometer; disturbance monitoring; acoustic monitoring

**OCIS codes** 060.2370; 060.2380; 290.5825; 040.2840

### 1 引言

分布式光纤传感技术是一种将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, 可以实现长达上百千米、高密度的温度、应变、声波等连续分布式测量<sup>[1]</sup>。其中, 相位敏感光时域反射计 ( $\Phi$ -OTDR) 除了具备一般分布式光纤传感技术的优点

外, 还兼具灵敏度高、响应速度快的特点。因此, 自 1993 年 Taylor 等提出以来,  $\Phi$ -OTDR 技术就受到了广泛的关注<sup>[2]</sup>。

另外, 因为可以通过介质传播的振动信号实现对目标状态的感测, 所以传感光缆无需与被监测对象紧密接触, 而且  $\Phi$ -OTDR 系统还能够监测到与传感光缆有一定垂直距离的事件。这些优点大大降低

收稿日期: 2020-08-10; 修回日期: 2020-09-21; 录用日期: 2020-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(61627816, 61975076)、江苏省重点研发计划(BE2018047)、智能电网保护和运行控制国家重点实验室资助项目、中央高校基本科研业务费专项资金(021314380173)、内蒙古自治区关键技术攻关计划(2019GG374)

\* E-mail: nz86@cornell.edu; \*\* E-mail: zyixin@nju.edu.cn

了  $\Phi$ -OTDR 在工程应用中的推广难度。因此,  $\Phi$ -OTDR 近些年发展势头强劲, 不仅在原理和系统软硬件技术上取得了巨大的进展, 其应用推广也迅速发展, 已在诸多领域如周界安防、地震波探测、电力传输线监测、水下缆线监测等广泛应用。

本文在介绍  $\Phi$ -OTDR 系统的基本工作原理基础上, 对该技术的研究和应用进展进行较为全面的介绍, 并对其发展趋势进行展望。

## 2 $\Phi$ -OTDR 的工作原理和系统结构

$\Phi$ -OTDR 通过探测传感光纤中背向瑞利散射光的相位变化来感知外界扰动信息。瑞利散射源于光纤中折射率的不均匀起伏, 这些起伏在光纤中形成一个个位置随机的“散射点”<sup>[3]</sup>。探测脉冲沿光纤传输时, 遇到随机的散射点后会向各个方向产生瑞利散射光, 其中只有满足全反射的后向散射光才有可能返回入射端, 这些散射光被称为背向瑞利散射光。

如图 1 所示, 由于脉冲光和背向瑞利散射光的传输方向相反, 脉冲光前部在光纤中产生的瑞利散射光会在向后传输过程中与脉冲光后面部分产生的瑞利散射光叠加。其中,  $R_a$  和  $R_b$  分别为脉冲光在光纤截面 a、b 处产生的瑞利背向散射信号 (RBS)。所以, 在长度为  $W/2$  的光纤内, 任意时刻返回的散射光都是由脉冲光不同部分产生的所有散射点的背向散射光的叠加。  $W$  表示为

$$W = v_g \tau = \frac{c\tau}{n}, \quad (1)$$

式中:  $v_g$  为群速度;  $\tau$  为脉冲宽度;  $c$  为真空中的光速;  $n$  为光纤折射率。

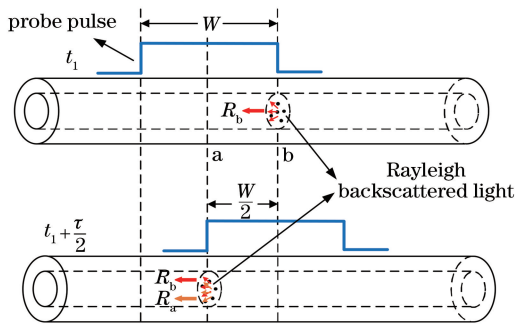


图 1 脉冲范围内散射光的叠加

Fig. 1 Superposition of scattered light in pulse range

$\Phi$ -OTDR 利用瑞利散射光之间的相干效应进行传感。为了使散射光之间发生干涉, 需要光源有很窄的线宽, 通常小于 10 kHz, 其相干长度远大于脉冲宽度, 因此在空间分辨率长度上叠加在一起的

瑞利散射光之间会形成干涉。由于干涉效应, 背向瑞利散射光强度发生变化, 当某一段光纤受到扰动后, 会引起相应位置光程的变化, 从而实现对外界扰动事件的监测和定位。

$\Phi$ -OTDR 利用瑞利散射光相位变化信息的方式有两种: 一种是利用干涉效应引起的散射信号强度变化, 称为分布式振动传感器 (DVS); 另一种是解调出散射信号的相位变化, 称为分布式声波传感器 (DAS)。

DVS 通常采用直接探测的系统结构, 其原理结构如图 2(a) 所示。窄线宽激光器 (NLL) 发出的连续光经声光调制器 (AOM) 被调制为脉冲光, 再由掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后, 通过光环行器 (cir) 进入传感光纤。脉冲光在光纤中传输时产生的背向瑞利散射光再次经环形器到达光电探测器 (PD), 由数据采集卡 (DAQ) 采集数据后传输到数据处理系统中进行数据处理。脉冲发生器在给调制器提供调制信号的同时, 还给 DAQ 提供同步触发信号。相对而言, DVS 系统结构简单, 成本较低, 一般直接对受扰动位置处随时间变化的强度信号进行时频变换。但因为背向散射光由光纤中大量随机分布的散射点产生的散射信号叠加而成, 所以光纤受到的扰动大小与散射信号强度的变化没有线性关系, 常被用于对扰动信号进行定性测量。

光纤受扰动后, 相应位置光程会发生变化, 从而导致受扰动的光纤段两端产生的瑞利散射光相位差发生变化。理论上, 受扰动的光纤段两端产生的瑞利散射光相位差与扰动存在线性关系, 所以可以通过解调该相位差的变化实现对扰动幅度的定量测量。这就是 DAS 的传感原理。DAS 系统结构主要有外差相干探测、三端口耦合器探测、相位生成载波 (PGC) 3 种, 分别如图 2(b)~(d) 所示。

在图 2(b) 中, NLL 发出的连续光被耦合器 1 (OC1) 分成两束光: 上路光被 AOM 调制成脉冲光, 并产生  $\Delta\nu$  的频移, 脉冲光经 EDFA 放大后, 经环形器注入到传感光纤, 光纤中产生的背向瑞利散射光再经环形器进入分光比为 50/50 的耦合器 2; 下路光作为参考光, 直接进入耦合器 2。两路光耦合后被平衡探测器 (BPD) 接收, 最后由 DAQ 采集数据。AOM 的调制信号与 DAQ 的调制信号同步, 仍由脉冲发生器提供。在图 2(c) 中, DAS 结构前端与 DVS 相同, 在散射光接收端部分, 采用三端口耦合器对信号进行探测。采用此探测结构, 再结合专门的信号处理方法, 即可实现对扰动引起的相位变化

的测量。

目前,最常用的 DAS 相位信息解调方法有 4 种:正交(IQ)相位解调、Hilbert 变换相位解调、基于  $3 \times 3$  耦合器的相位解调及 PGC 相位解调。

IQ 相位解调主要用于外差相干探测结构,BPD 输出的拍频信号分别与正交的数字本振信号相乘,得到的两个结果经过低通滤波器滤去二倍频项和噪声后相除并取反正切,即得出缠绕的相位信息<sup>[4]</sup>。基于 Hilbert 变换的相位解调是对信号进行 Hilbert 变换后,与原信号相除并取反正切,再经低通滤波器

后得到缠绕的相位信息。基于  $3 \times 3$  耦合器的相位解调是通过引入两臂之间存在  $120^\circ$  相位差的  $3 \times 3$  耦合器并结合干涉结构来实现相位解调的。基于 PGC 的相位解调如图 2(d)所示,通过引入非平衡的迈克耳孙型干涉仪(MI)和 PGC 调制解调法来实现。PGC 微分交叉(PGC-DCM)算法和 PGC 正切(PGC-Arctan)法是应用最广泛的两种标准 PGC 算法。IQ 相位解调、Hilbert 变换相位解调及 PGC-Arctan 相位解调得到的结果为缠绕的相位,最后还需要通过相位解缠绕算法恢复真实的相位。

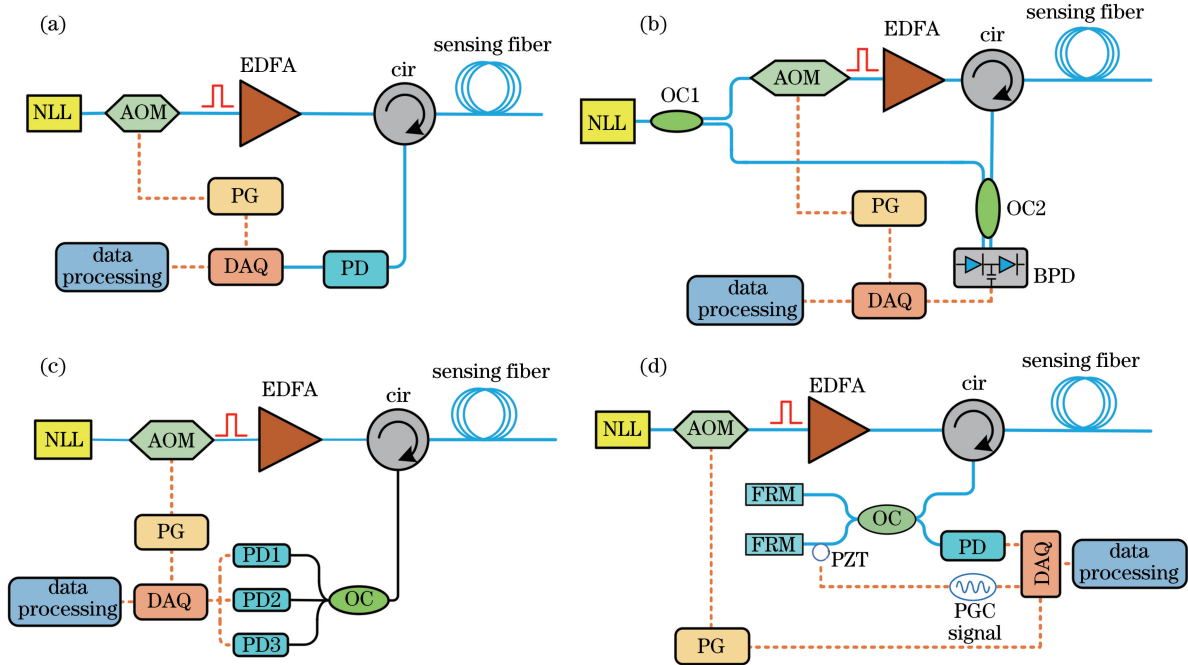


图 2  $\Phi$ -OTDR 系统的基本结构。(a)基于直接探测的结构;(b)基于外差相干探测的结构;(c)基于三端口耦合器探测的结构;(d)基于 PGC 探测的结构

Fig. 2 Basic structure of  $\Phi$ -OTDR system. (a) Structure based on direct detection; (b) structure based on heterodyne coherent detection; (c) structure based on three-port coupler detection; (d) structure based on PGC detection

这 4 种解调方法各有优劣,需要根据实际需求进行选择。IQ 解调结构较为简单、信噪比(SNR)和灵敏度较高,但只能用于外差相干探测;Hilbert 变换解调可以用于直接探测和零差相干探测,但由于慢变噪声项在低通滤波时无法消除,所以在抗噪声的能力上要比 IQ 解调逊色很多;基于  $3 \times 3$  耦合器的解调适用于直接探测光路,受偏振噪声影响较小,但对器件一致性要求较高;PGC 解调同样可适用于直接探测光路,但对调制器工作点的稳定性要求较高。

### 3 $\Phi$ -OTDR 的性能指标

分布式光纤传感技术的性能指标可以分为光学

系统与信号处理两部分。其中光学系统的性能指标主要包括探测距离、空间分辨率、测频范围、信噪比、融合系统(多参量测量)等。而信号处理部分的性能指标则通常指模式识别的学习效率与时间判别的准确率。

#### 3.1 探测距离与空间分辨率

探测距离指系统的探测长度,空间分辨率指分辨两个相邻事件的能力,两者分别影响着定位精度和事件识别的准确性。

因为探测距离与探测光能量的大小呈正比,提高探测距离的主要方法是增大探测光的能量。而探测光的能量是探测光峰值功率与脉冲宽度的乘积,所以可通过增加探测光峰值功率和脉冲宽度实现探



测光能量的提升。然而,探测光峰值功率受自相位调制、受激布里渊散射、受激拉曼散射等非线性效应的限制<sup>[1]</sup>,提高范围有限。因此,通过提升探测光脉冲宽度来增大探测光能量是工程上更为常用的手段。

探测光脉冲宽度  $\tau$  决定了空间分辨率  $R_s$  的大小,两者存在的关系为

$$R_s = \frac{c\tau}{2n} \quad (2)$$

可见,空间分辨率与脉冲宽度呈反比,即高空间分辨率与长探测距离难以同时实现。

分布式放大技术和复用技术是目前实现长探测距离  $\Phi$ -OTDR 的有效方法,常用拉曼光纤放大器(FRA)和布里渊光纤放大器(FBA)实现。相比集中式放大技术常用的 EDFA,它们具有更低的噪声系数、更均匀的增益分布,为实现超长探测距离的  $\Phi$ -OTDR 提供可能。目前的探测距离可以达到 130 km 以上<sup>[5-7]</sup>。

复用技术能够解决单一频点受制于非线性阈值的问题,提高  $\Phi$ -OTDR 的探测光能量、延长探测距离。如 Fu 等<sup>[8]</sup>将复用技术和分布式放大技术结合,同时采用基于波长、频率、时间的复用技术和混合分布式放大技术,探测距离达 150.62 km; Zhang 等<sup>[9]</sup>通过引入迭代预失真和三载波脉冲,降低了相干衰落噪声,探测距离达 80 km。也有对  $\Phi$ -OTDR 传感光路结构和系统结构进行改造的工作。如张春熹等<sup>[10]</sup>通过改进  $\Phi$ -OTDR 系统的传感光路结构来减小受激布里渊散射的影响; Uyar 等<sup>[11]</sup>通过使用级联的双声光调制器来增大消光比、最小化相干噪声,同时采用双光电探测器来避免近端探测出现的饱和问题,增大系统的动态范围,探测距离达 102.7 km。

常通过使用窄宽度的光脉冲或引入扫频脉冲压缩机制来实现高空间分辨率。Qin 等<sup>[12]</sup>利用脉宽为 5 ns 的探测光脉冲,在超过 1 km 的探测距离上实现了 50 cm 的空间分辨率。Zou 等<sup>[13-14]</sup>采用基于频率调制的脉冲压缩技术,空间分辨率不再受脉宽限制,在 5.4 km 的探测距离上实现了 47 cm 的空间分辨率,并利用线性调频(LFM)脉冲方法将空间分辨率提高到了 10 cm。Lu 等<sup>[15]</sup>将 LFM 脉冲作为探测光,采用匹配滤波器压缩探测器处理过的脉冲宽度,在 19.8 km 的传感距离内实现 30 cm 的亚米级空间分辨率。卢斌等<sup>[16]</sup>通过电光调制器(EOM)产生高扫频范围的脉冲调制来压缩脉宽,实

现了 10 cm 的空间分辨率。

总体而言,分布式放大技术、复用技术、脉冲压缩技术仍将是未来一段时间内实现长距离、高空间分辨率  $\Phi$ -OTDR 系统最为有效的方法。

### 3.2 测频范围

从管道泄露破裂、设备放电到地震、桥梁舞动等, $\Phi$ -OTDR 监测的目标振动信号频率高频段可达数十 kHz,低频段会低至 Hz 到亚 Hz。为此,要求  $\Phi$ -OTDR 的测频范围尽量宽。

在  $\Phi$ -OTDR 中,可探测的频率上限  $f_{\max}$  取决于探测光脉冲的重复周期  $T_R$ ,而脉冲重复周期又受传感光纤长度的限制,表达式<sup>[1]</sup>为

$$f_{\max} = \frac{1}{2T_R} \leq \frac{c}{4nL} \quad (3)$$

式中: $L$  为传感光纤的长度。可见,探测脉冲重复周期越小,系统可测得的频率就越高,但同时系统的传感距离变短,即系统可测得的最高频率与传感距离、脉冲重复周期存在制约关系。而系统可测得的最低频率则往往受限于激光器本身的频率漂移<sup>[17]</sup>。光源频漂引起的曲线畸变一般是缓慢变化的,当光纤上的扰动事件也是低频的、缓变的振动信号时,光源频漂导致的曲线畸变将严重恶化系统的原始信噪比,从而导致系统难以检测到低频扰动事件。因此,如果  $\Phi$ -OTDR 想要获得更宽的频率测量范围,一方面要使系统的传感距离变短,另一方面则需要使用高稳定性的激光源,这无疑会大大增加系统的成本。

为了克服上述制约条件,近年来研究者们进行了多种尝试。2014 年, Pan 等<sup>[18]</sup>提出一种采用频分复用(FDM)的高采样率多脉冲  $\Phi$ -OTDR,通过在单个周期内等间距注入频移不同的  $m$  个脉冲,实现了采样率  $m$  倍的提升,从而将测频范围上限提高到原来的  $m$  倍。在 4 频点复用条件下,该结构在 10 km 长度上实现了 20 kHz 的测量带宽,相较理论极限值,提高了 4 倍。2015 年, He 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于波分复用(WDM)的方式,通过将不同波长的两个脉冲以 0.75  $\mu$ s 的时间延迟注入到 3024 m 长的传感光纤中,实现了 0~30 kHz 的频率响应范围。2017 年, Iida 等<sup>[20]</sup>同样使用 FDM 的方式,在 5 km 的光纤上实现了 80 kHz 的频率响应,同时具有 20 m 的空间分辨率。在频/波分复用扩频的结构中,背向散射信号往往由单个测量间隔内的不同频率(或波长)承载,因此需要使用时分复用(TDM)方法对采样的迹线进行重组,从而在传感光纤上的每个传感点处获得更高的有效采样率,以克服频率响

应范围和传感长度之间的相互限制。

除了频分复用的方式,研究者们也采用了融合系统的思路,利用干涉型传感系统具有频率响应范围宽的特点,实现  $\Phi$ -OTDR 系统的扩频。2015 年,何茜<sup>[21]</sup>提出了两种基于  $\Phi$ -OTDR 与马赫-曾德尔干涉仪(MZI)融合的分布式光纤振动传感系统。一种系统将调制光脉冲作为探测光,其中窄脉冲光信号为  $\Phi$ -OTDR 子系统的探测光,准连续背景光为 MZI 的探测光,利用 5 ns 窄脉冲宽度和 100 MSa/s 的采样率,在 1.064 km 传感光纤上实现了 5 m 的空间分辨率和 10 Hz~3 MHz 的频率响应范围。另一种系统采用 TDM 技术,分别从传感光纤两端注入脉冲宽度为 50 ns 的窄脉冲和 980  $\mu$ s 的宽脉冲,在 1.115 km 传感光纤中实现了 5 m 的空间分辨率,最高 6.3 MHz 的频率响应。

2016 年,He 等<sup>[22]</sup>将  $\Phi$ -OTDR 与 MZI 融合,利用 FDM 技术,在 3 km 的传感光纤上实现了 10 m 的空间分辨率,并在保证信号信噪比的前提下,将可探测振动频率提高到了 40 kHz。2017 年,本课题组<sup>[23]</sup>提出了一种融合单端测振系统,该系统将  $\Phi$ -OTDR 和 MZI 融合,分别得到振动的位置信息和振动波形,利用 RBS 与干涉信号的不同载波频率,通过数字信号处理将两者分离。该系统在不损失信噪比的前提下,在 6.35 km 的光纤上实现了 1.2 MHz 的频率响应和 10 m 的空间分辨率,其测频范围理论上仅受限于数据采集设备的采样频率。2018 年,本课题组<sup>[24]</sup>又提出了一种基于分布式反馈干涉仪(DFI)结构的  $\Phi$ -OTDR 融合系统。该系统将一对不同波长的窄线宽激光器作为光源,与密集波分复用器的两个通道相对应,使  $\Phi$ -OTDR 和 DFI 可以同步工作,互不影响,在 2.16 km 的传感光纤上获得了 10 m 的空间分辨率和 1 MHz 的频率响应。2018 年,Zhao 等<sup>[25]</sup>则利用多芯光纤,完全规避了  $\Phi$ -OTDR 与 MZI 融合系统中的串扰,在 2.42 km 的光纤上实现了 1 m 的空间分辨率和 0~12 kHz 的测频范围。

除了提升测频范围的上限,研究者们也在抑制  $\Phi$ -OTDR 系统中的低频扰动噪声方面进行了各种尝试和努力。2015 年,张晞等<sup>[26]</sup>提出一种频谱分析结合选取特征频段的定位算法,通过选取合适的特征频段,对影响系统定位的激光器频漂进行误差抑制。实验结果表明该算法可以提升系统定位性能并改善信噪比。同年,本课题组<sup>[27]</sup>提出一种基于主动光频扫描法补偿激光器频漂的  $\Phi$ -OTDR 系统。通

过光源的主动频率扫描技术和  $\Phi$ -OTDR 曲线的互相关运算,可以精确地求解出光源频率漂移的大小和方向,并剔除激光器频漂对相位解调结果的影响。2019 年,本课题组<sup>[28]</sup>提出一种二次微分方法来补偿  $\Phi$ -OTDR 中激光频率漂移的影响。它将传感光纤上两点之间的差分信号作为参考信号,然后从主信号中减去参考信号以获得最终结果。在实验中,激光频率漂移引起的信号波动降低了 95% 以上,在 6 km 的传感光纤上以 10 m 的空间分辨率检测到了 0.1 Hz 的振动。此外,本课题组<sup>[29]</sup>还提出一种使用辅助 MZI 来补偿频率漂移影响的方法。在这种方法中,通过辅助 MZI 的信号来连续监视频率漂移,然后校正从传感路径获得的信号,在实验中,以 10 m 的空间分辨率检测 6 km 传感光纤上频率为 0.1 Hz 的振动。2020 年,Zinsou 等<sup>[30]</sup>则提出一种自适应脉冲周期法来消除光源频漂的影响。实验结果表明,该方法无需使用波长扫描等方式,通过直接获取干扰区域中具有良好信噪比的强度信号,就可以测量低频振动,并可捕获到最低 0.1 Hz 的振动信号。

### 3.3 信噪比

影响  $\Phi$ -OTDR 系统 SNR 的噪声来源主要包括光纤局部双折射变化引起的偏振相关噪声(PRN)、背向散射光的相干衰落噪声、光纤应变与干涉强度非线性对应关系引起的测量失真等。这些噪声的存在降低了系统的灵敏度,从而限制了  $\Phi$ -OTDR 传感系统的整体传感性能,导致入侵检测系统时发生漏报与误报,或引发振动信号重构结果的失真。此外,传感光纤所处环境的背景噪声也会影响系统对目标事件的灵敏度。

近年来,研究者们针对某一特定噪声类型,分别从传感光纤、接收技术、调制技术、软件算法等方面着手研究,以尝试获得更高的灵敏度。通过改变传感光纤的结构或类型,从而直接提升背向散射信号质量,是  $\Phi$ -OTDR 中 SNR 提升的一种重要手段。如利用保偏光纤(PMF)<sup>[31]</sup>消除偏振衰落,利用少模光纤<sup>[32]</sup>激发准单模光提升信噪比。基于超弱光纤布拉格光栅(UWFBG)阵列的双光脉冲自外差  $\Phi$ -OTDR 系统利用 UWFBG 组成的光栅阵列<sup>[33]</sup>,通过使用复合双探针脉冲(CDPP)来消除 UWFBG 反射光偏振衰落<sup>[34]</sup>。

但特种光纤成本高、损耗大,且某些特种光纤难以与单模或多模光纤进行熔接。而改进传感系统的结构,不仅可以兼容传统的传感光缆与布设方案,甚

至可以直接利用存量巨大的既有通信光缆。如 2016 年, Fernandez-Ruiz 等<sup>[35]</sup>分析了具有不同调制形状的探测脉冲的背向散射功率曲线。结果发现, 矩形脉冲对传感距离和灵敏度最不利, 而高斯或三角形脉冲则可以使曲线强度沿传感距离平滑地减小, 这是因为高斯或三角形包络脉冲减小了调制不稳定性的影响, 并抑制了 Fermi-Pasta-Ulam 的重复出现, 这使得具有相同脉冲峰值功率和标称空间分辨率的传感系统的传感距离和灵敏度得以提高。同年, Muanenda 等<sup>[36]</sup>利用循环脉冲编码来增强  $\Phi$ -OTDR 的性能, 这可与高度相干且稳定的外腔激光器和单脉冲  $\Phi$ -OTDR 相媲美。Alekseev 等<sup>[37]</sup>将光源相干性和脉冲宽度确定时的最小平均噪声估计作为低噪声光电组件的标准, 从而降低了整个系统的固有噪声水平。本课题组<sup>[17]</sup>提出一种基于正交偏振态脉冲的方法来抑制偏振相关噪声, 通过引入具有正交偏振态的探测光脉冲对 (OSPP), RBS 信号强度对探测光脉冲偏振态的敏感性可以被彻底消除。2018 年, Fernandez-Ruiz 等<sup>[38]</sup>从灵敏度的角度对啁啾脉冲  $\Phi$ -OTDR 的性能进行了完整的分析。2019 年, 本课题组<sup>[39]</sup>提出了一种  $\Phi$ -OTDR 系统中连续相干衰落的抑制方法。2019 年, Li 等<sup>[40]</sup>分析和证明了激光线宽对外差检测  $\Phi$ -OTDR 的影响。Chen 等<sup>[41]</sup>则提出了一种基于啁啾脉冲的  $\Phi$ -OTDR 系统, 以避免衰落问题的影响。

与通过系统结构优化提升 SNR 的方法相比, 通过算法优化提升 SNR 的优势在于不需增加器件, 因此大大减少了成本。2012 年, Qin 等<sup>[12]</sup>将小波去噪应用到  $\Phi$ -OTDR 的数据处理中。2013 年, Zhu 等<sup>[42]</sup>把 RBS 曲线组成的瀑布图转换为灰度图。2014 年, Li 等<sup>[43]</sup>发现振动区域的高频分量比非振动区域多。2015 年, Yue 等<sup>[44]</sup>对光纤在不同位置处的时域信号进行一维傅里叶变换。2017 年, He 等<sup>[45]</sup>在  $\Phi$ -OTDR 中引入自适应二维双边滤波算法。本课题组<sup>[46]</sup>在 2019 年提出一种具有多空间分辨率 (MSR) 分析特性的  $\Phi$ -OTDR 传感系统。通过理论分析和实验, 揭示了空间分辨率 (SR)、SNR 与振动区域长度之间的定性关系, 结果表明, 选择合适的 SR 来分析振动事件可以有效地提高传感系统的 SNR, 该方案可以在一次测量中以最佳 SNR 恢复不同干扰范围的振动事件, 同时保持相同的可检测频率范围。该组<sup>[47]</sup>针对不同长度的干扰区域, 提出了一种多尺度匹配滤波方法, 该方法可以选择合适的滤波尺度, 最终获得最佳的 SNR。实验结果表明,

与传统方法相比, 多尺度匹配滤波方法即使在强烈的噪声影响下也可以将 SNR 提高到 6 dB 以上, 并以 0.49 m 的定位误差实现最低定位精度。

### 3.4 多参量测量

在工程应用中, 仅仅依靠振动这一单一参量往往无法准确全面地评估被监测对象的状态, 从而难以降低误报和漏报现象, 限制了  $\Phi$ -OTDR 的应用推广。因此, 以  $\Phi$ -OTDR 的动态监测为主, 辅以温度、应变等静态监测的多参量检测融合系统逐渐成为一个在分布式光纤传感技术中新的发展趋势。

2015 年, 本课题组<sup>[48]</sup>提出了一种基于  $\Phi$ -OTDR 的应变和振动同步监测系统。该系统通过比较不同频率激光下的信号模式来检测光纤的应变, 获得了具有较高分辨率的光纤应变检测结果, 同时利用相同频率的光脉冲信号, 以较快的响应速度检测光纤的振动。同年, 本课题组<sup>[49]</sup>提出了一种基于  $\Phi$ -OTDR 与光纤布拉格光栅 (FBG) 相结合的振动与温度同步监测系统。该系统将具有低反射率的高斯型光纤光栅对作为边缘滤波器, 将波长的变化线性地转换为反射强度的变化, 实现了传感距离为 20.4 km、空间分辨率为 10 m 的振动传感, 并能明显区分频率为 81 Hz 的扰动事件, 同时获得了分辨率高于 0.12 °C 的多点温度传感。2016 年, 本课题组<sup>[50]</sup>在布里渊光时域分析仪 (BOTDA) 的基础上利用扫频布里渊增益谱和斜率辅助实现了在 10.6 km 长的光纤末端同时测量一个温度事件和两个频率分别为 7.00 Hz 和 10.00 Hz 的多振动事件。同年, Zhang 等<sup>[51]</sup>提出了基于脉冲调制的  $\Phi$ -OTDR 融合系统, 实现了振动、温度及应变的同时测量。

上述基于布里渊散射的  $\Phi$ -OTDR 融合方法虽然在一定程度上能够实现振动与应变、振动与温度-应变的同时监测, 但也存在一些问题, 如瑞利信号与布里渊信号的波长接近不易分离、系统结构较为复杂等。因此, 将瑞利散射与拉曼散射相结合也得到了深入的研究。2015 年, 周进<sup>[52]</sup>利用声光调制器连续产生的高、低功率探测光脉冲, 对高功率脉冲光产生的拉曼散射进行温度解调, 对低功率脉冲光产生的瑞利散射进行振动解调。2019 年, 本课题组<sup>[53]</sup>提出了一种  $\Phi$ -OTDR 和拉曼光时域反射技术 (ROTDR) 相结合的分布式光纤传感系统, 该系统在真正意义上实现了多参量同步监测。2016 年, 本课题组<sup>[54]</sup>通过引入扫频方法, 提出了一种基于  $\Phi$ -OTDR 和 OTDR 相结合的光纤损耗与外部振动同步测量系统。2013 年, 本课题组<sup>[55]</sup>提出了一种



BOTDA 与 COTDR 融合系统,该系统可以同步实现应变、温度与损耗的同步测量。2018 年,本课题组对该方案进行进一步的改进,又提出了一种基于  $\Phi$ -OTDR 和 COTDR 的海缆监测用融合系统,该系统利用外差相干探测及扫频技术,实现了空间分辨率为 100 m、传感距离为 74 km 的海缆损耗与扰动同步监测,实现了对 5~100 Hz 低频扰动事件的监测。

综上,基于不同散射机制的多参量融合系统能够实现振动与应变、振动与温度-应变、振动与损耗的同步监测,对全面评估被监测事件具有重要的作用,在分布式多参量传感测量中有着比较广泛的应用前景。

### 3.5 模式识别

$\Phi$ -OTDR 技术虽然已经逐渐成熟,但目前其误报率与漏报率均较高的问题依然没有得到有效解决,成为制约其工程应用推广的瓶颈。仅仅通过从振动信号中提取包括短时能量比、短时水平穿越率、振动持续时间、功率谱能量比在内的时/频域信号,进而进行简单的参数筛选式分类,并不能得到较高的准确性与抗噪性。由于监测现场的工作环境、光缆种类、敷设方式、样本数量等存在差异,很难获得通用的高性能分类器。随着各种机器学习算法的开发及应用,一些算法可以自发地从大量数据中总结规则,并自适应地调整及优化自身的参数,在短时间内达到较高的事件识别准确性<sup>[6,56-58]</sup>。

过滤自然条件中的随机背景以增强信号的信噪比,可以大大提高后续分类器的学习效率和分类准确度。如 Ölçer 等<sup>[56]</sup>提出了一种对  $\Phi$ -OTDR 信号进行时间自适应处理而最大化信噪比的算法,并通过实验室实验和现场测试证明,该算法在不降低系统带宽,且无需在硬件中使用额外的光放大器的情况下,可以实现超过 10 dB 的信噪比。Qu 等<sup>[57]</sup>使用基于恒定误报率(CFAR)及背景均匀性的自适应 CFAR(BHA-CFAR)方法来检测振动信号,这种新的检测方法可以适应任何背景环境,并且具有良好的检测能力。

同时,一些机器学习算法可以对由振动信号变换成的频谱图进行特征提取和分类。Jia 等<sup>[58]</sup>通过基于近类别支持向量机(NC-SVM)的事件识别方法,光纤长度为 25 km 的  $\Phi$ -OTDR 系统可以有效地识别出 5 种干扰事件。Sun 等<sup>[59]</sup>从时空域信号的形态特征中获得特征向量,计算散布矩阵后进行特征选择,并使用相关向量机(RVM)对  $\Phi$ -OTDR 系

统在线振动的监测信号进行了分类识别。Shi 等<sup>[60]</sup>将来自  $\Phi$ -OTDR 的时空数据矩阵作为卷积神经网络(CNN)的输入,并将简单的带通滤波和灰度转换作为预处理,建立了一种优化的网络结构。该网络具有体积小、训练速度快、分类精度高的特点。Liehr 等<sup>[61]</sup>使用人工神经网络(ANN)进行原始测量数据插值和信号偏移计算,并用合成数据训练 ANN,以改善应变噪声和传感器响应的线性度,从而能精确测量分布式光纤在地下的运动情况,并改善光纤传感数据分类及数据插值的可靠性。张颜等<sup>[62]</sup>提出了一种基于多参数的扰动模式识别方法,该方法有效地识别了 4 种破坏模式。Aktas 等<sup>[63]</sup>提出了一种基于深度学习的  $\Phi$ -OTDR 事件分类方法,该方法可以实现 40 km 外 6 种典型事件 93% 以上的分类精度。

目前大多数  $\Phi$ -OTDR 的事件模式分类算法仍是基于振动信号频谱图的监督学习方法,这些方法需要大量已标记的事件数据作为训练集,且在标记分类完成之后,算法并不能对标签类型以外的事件及一些偶发事件进行检测后的识别。近年来,随着一些基于非监督学习的聚类方法,例如生成对抗网络(GAN)、强化学习算法的广泛应用<sup>[64-65]</sup>, $\Phi$ -OTDR 的模式识别算法将会向动态化、智能化、普适化发展。

## 4 $\Phi$ -OTDR 的应用

目前为止, $\Phi$ -OTDR 已经在区域安全防范、大型设备的结构健康监测、地质资源勘探等多个领域得到应用,主要的应用包括周界安防、地震波探测、输电线路监测、水下线缆监测等。

### 4.1 周界安防

与现有的光电类周界安防系统相比, $\Phi$ -OTDR 作为入侵探测器具有无可比拟的优势。常见的有形周界安防技术有张力网、振动电缆、静电感应电缆、高压脉冲电网(电子围栏)等。无形周界安防技术如红外对射、激光对射、微波对射、地理泄露电缆、液压埋地探测等,它们大都无法对入侵事件进行精确定位,难以进行大范围布设,同时隐蔽性差,容易遭受破坏,且需要供电。而  $\Phi$ -OTDR 将布设路径上的光纤全部转换为敏感元件,这些敏感元件相当于成千上万个点传感器,从而  $\Phi$ -OTDR 能够以低廉的单元监测成本进行大范围监测,同时具有单端无源等优点<sup>[1]</sup>。由于  $\Phi$ -OTDR 对振动信号十分敏感,作为入侵探测器时,除了要能识别走路、攀爬、触摸、挖掘等

侵入行为并报警,还需要对非危害性环境干扰如雷鸣、鞭炮、汽车鸣响、雨声等进行识别。

$\Phi$ -OTDR 在周界安防上的应用早在十几年前就引起了人们的关注。2007 年, Juarez 等<sup>[64]</sup>报道了  $\Phi$ -OTDR 在沙漠地形中的野外监测和入侵者定位, 其能监测到光缆附近步行的行人和行驶的车辆。2014 年, Peng 等<sup>[5]</sup>将  $\Phi$ -OTDR 应用于管道安全监控。2015 年, Yu 等<sup>[66]</sup>报道了一种基于  $\Phi$ -OTDR 的分布式栅栏周边入侵监测系统, 其空间分辨率为 10 m。2019 年, 王鹏飞等<sup>[67]</sup>通过时间-空间二维分析来获得振动信号的典型特征, 进而实现了对煤层气输送管道危险源的实时监测。

为了更好地满足周界安防的应用需求, 研究者们对  $\Phi$ -OTDR 系统的软硬件结构也进行了改进, 以降低系统的成本、误报率及环境噪声干扰等。2009 年, Luo 等<sup>[68]</sup>设计了一种基于高灵敏传感光缆和低成本半导体激光器 (DFB) 的新型  $\Phi$ -OTDR 光纤分布式入侵监测系统。2011 年, Wu 等<sup>[69]</sup>提出了一种综合判决方法来降低  $\Phi$ -OTDR 系统的误报率, 这种综合判决方法主要适用于混有随机噪声的信号, 能显著降低误报率, 可使系统在不间断实验中的误报率为每 24 h 不超过 1 次。2015 年, 王照勇等<sup>[70]</sup>提出了一种应用于  $\Phi$ -OTDR 入侵监测系统快速预警的模式识别方法——频谱欧氏距离法 (EDFS)。该方法利用信号快速傅里叶变换 (FFT) 频谱的欧氏距离对扰动信号进行识别, 与动态时间规划 (DTW) 相比, 不存在动态时间规划过程, 处理速度更快。2016 年, Qu 等<sup>[57]</sup>使用恒定误报率方法来监测入侵, 并提出一种背景均匀性自适应恒定误报率方法来监测振动信号。2018 年, Zhong 等<sup>[71]</sup>提出了一种通过将不同脉宽的光脉冲注入到传感光纤来减小  $\Phi$ -OTDR 误报率的脉冲宽度复用方法。该方法将在不同脉冲宽度下获取的数据视为不同传感器的输出, 然后利用多传感器数据融合算法处理这些数据。

作为一种灵敏度极高的传感系统,  $\Phi$ -OTDR 在周界安防上的应用近几年发展迅速, 尤其随着模式识别等人工智能算法的引入, 系统在保持灵敏度不变的情况下, 有效降低了误报率, 极大地促进了本技术的工程应用推广。但是, 如何在保证功能不受影响的前提下降低系统的成本, 仍是工程应用中面临的主要问题之一。

## 4.2 地震波探测

地震波探测作为研究地球内部结构最为有效的

方法, 被广泛运用于地震监测预警和地质资源勘探等领域。相比于传统的地震检波器,  $\Phi$ -OTDR 数据采集成本低、布设简便, 并且有着更高的空间分辨率, 迅速成为极具吸引力的地震探测技术, 被应用于地面主动源地震数据采集和背景噪声成像研究中<sup>[72-74]</sup>。

专门铺设传感光缆时涉及地层的开挖与回填, 工程大、成本高、周期长, 因此近年来基于  $\Phi$ -OTDR 的地震探测应用开始尝试直接利用既有地理通信光缆作为记录地震波信息的检波器检测线, 以获得长距离的连续地表应变, 这有望解决目前地震探测中数据采集成本高、覆盖范围有限、不宜在城市开展实施等问题<sup>[75]</sup>。例如英国防务公司开发的 OptaSense 系统<sup>[76]</sup>可以直接利用既有通信光缆感知近场微地震, 为地质构造反演、入侵警戒、道路交通状况监测等应用提供完整的解决方案。2017 年, Lindsey 等<sup>[77]</sup>利用聚氯乙烯 (PVC) 地理线缆管道中的冗余光缆, 并结合 Silixa 公司的 iDAS 系统, 观测到了数次天然地震, 得到了与标准地震仪可比拟的数据。2019 年, Ajo-Franklin 等<sup>[78]</sup>利用通信光缆记录的背景噪声数据, 反演得到了地下结构, 确定了地下水位置, 利用相同的光缆还记录到了区域地震和远震信号。同年, Zhu 等<sup>[79]</sup>利用地理光缆记录到了雷暴引发的强地面震动, 并用其估算了近地表速度结构。

在地震探测方面, 国内研究则起步较晚。自 2017 年开始, Yu 等<sup>[80]</sup>尝试将基于大规模光栅阵列的特种光缆与  $\Phi$ -OTDR 结合, 提升了井下监测的灵敏度。张敏等<sup>[81]</sup>利用欧美油服公司的  $\Phi$ -OTDR 设备, 于 2017 年到 2018 年在新疆开展了天然气页岩压裂监测, 并尝试对压裂过程进行了反演。2018 年, Wang 等<sup>[82]</sup>采用 Silixa 公司的 iDAS 系统, 在美国加利福尼亚州成功监测到了 ML4.3 级地震, 并对其与传统地震检波器阵列获得的数据进行了对比, 在记录地震的 P 波和 S 波地面运动时, 两个阵列都显示出非常相似的波形轨迹。2019 年, 吕鹏举等<sup>[83]</sup>采用包括  $\Phi$ -OTDR 在内的多种国内外设备对油井动态状况进行监测。同年, Yu 等<sup>[80]</sup>使用 20 km 长光缆记录的远震数据反演获得了地下速度结构, 证明了基于  $\Phi$ -OTDR 的地震监测系统对深部壳幔结构的探测能力。

上述研究多采用国外设备, 而国外主要  $\Phi$ -OTDR 生产厂家均不向我国销售仪器, 仅提供测试服务, 这不仅使核心设备受制于人, 而且还存在涉及国家安全的地震数据外泄风险。近年来, 国内一些



高校与科研院所已经开始着手研制具备知识产权的国产地震探测用  $\Phi$ -OTDR 设备。施斌<sup>[84]</sup>利用南京法艾博光电科技有限公司研制的  $\Phi$ -OTDR 设备开展了大量的地震检测实验,并逐渐反馈完善了  $\Phi$ -OTDR 设备的硬件设计与软件功能。李彦鹏<sup>[85]</sup>研制出了针对油气勘探应用的  $\Phi$ -OTDR 设备,结合特制的井下传感光缆,已经在国内多个油田尝试开展垂直地震测深(VSP)实验,设备在一定程度上具备了测量地震波的可能性。

利用  $\Phi$ -OTDR 进行地震波探测是当前地震科学极具前景的研究方向,其高密度、低成本的优势可大幅改善地下结构,尤其是复杂结构的成像分辨率。如何在不依赖进口极端性能器件的前提下,采用既有通信光缆网络进行地震波监测,突破现有  $\Phi$ -OTDR 地震感测系统性能极限,仍将是本领域研究人员在未来一段时间内需要面对和解决的问题。

### 4.3 输电线路监测

从“十五”期间启动“西电东送”工程开始,我国电网高速发展,输电线路逐步形成北、中、南三大通道,输电线路总长度超过了 196 万千米,电网规模和输送容量已跃居世界首位<sup>[86]</sup>。输电导线是电网系统的核心,输电线路覆盖面积广,支撑杆塔多,传输距离长,线路所经地理、地貌、周围环境及气象等条件复杂,面临多种恶劣条件的考验。例如城区的地理线路常常受到线路改造、市政施工的破坏,野外的架空输电线路容易遭受大雨、雷电、暴风雪、覆冰等自然灾害破坏和盗窃等人为破坏。一旦输电线路发生故障,将会造成巨大的经济损失。因此,建立全天候实时在线全覆盖输电线路智能健康监测和故障诊断系统对电网的安全具有重要意义。

分布式光纤传感技术具有抗电磁干扰、对恶劣环境容忍度高等优点,特别适合于电力传输线路的健康监测。随着光纤复合架空地线(OPGW)、光纤复合相线(OPPC)、地理光电复合缆作为输电线路被广泛应用,分布式光纤传感技术不需要铺设专用的传感光纤,具备广泛应用的条件,极大地降低了施工成本。

2017 年,本课题组<sup>[87]</sup>报道了一种包含  $\Phi$ -OTDR 技术在内的多参量光时域反射传感系统。该系统在内蒙古武川 500 kV 变电站连续运行 1 年多时间,通过采集大量 OPGW 光缆的振动频谱,并根据不同天气情况进行对比分析,建立了频谱与被测线路振动状态的数据库。2018 年,谢凯等<sup>[88]</sup>对河南尖山 4 km 长的输电线路进行了为期 2 年多的监

测,期间,利用  $\Phi$ -OTDR 技术对 9 个杆塔及放置在杆塔上的 OPGW 进行了实时监测。2020 年,本课题组<sup>[89]</sup>提出了一种具有低误报率的  $\Phi$ -OTDR 性能增强方法,并将其成功应用于江苏省沭阳 110 kV 输电线路。对线路进行了为期 1 年的安全监测,期间多次预警可能会损毁电缆的破坏性施工。通过衰落抑制技术,在不增加任何硬件前提下, $\Phi$ -OTDR 的误报率从 4.81% 下降到 0.15%,同时还保证了低漏报率。2020 年开始,电力系统所属单位也开始进行基于  $\Phi$ -OTDR 技术的输电线路监测应用研究。徐涛等<sup>[90-91]</sup>采用基于  $\Phi$ -OTDR 的技术对地理线缆进行监测,成功捕捉了线路重点区域人工施加的机械振动信号并发出了警告。

近年来,随着泛在电力物联网概念的提出和推广,输电线路的全天候实时监测将越来越重要。

### 4.4 水下线缆监测

水下线缆包括水下电力电缆、水下通信光缆、近年来出现的光电复合海底电缆。作为全球能源互联网实现跨海互联的重要通道,水下线缆在国家间和区域间互联互通、岛屿供电及通信传输、海上风力发电等领域发挥着巨大的作用。随着电网国际化的实施,海上石油平台和海上风力发电大规模的开发利用,海岛经济的迅速发展,水下线缆数量急剧增加。仅海底光缆,目前全球就已累计投资 500 亿美元,总长度超过 140 万千米,可绕地球 35 圈。根据 TeleGeography 最新发布的市场报告,预计到 2021 年,国际带宽使用量将超过 2500 Tbit/s<sup>[92]</sup>,新建海缆项目年投资额约为 25 亿美元,新建海缆项目每年总长度约为 10.4 万千米。

然而,水下线缆所处环境恶劣,受到海水长期侵蚀冲刷、微生物腐蚀等因素影响,线缆容易故障。此外,随着我国海洋开发活动的不断增加,水下线缆的运行受捕捞作业、货船抛锚等破坏情况影响<sup>[93]</sup>。近年来,国内外水下线缆事故引发的严重社会问题时有发生,严重影响了跨海互联智能电网和信息通信网络的安全稳定运行<sup>[94-95]</sup>。如福建平潭海底电缆锚害导致的全岛停电,舟山浯屿岛海底电缆磨损导致的缆体损坏,台湾海域发生地震造成的缆体断裂等。 $\Phi$ -OTDR 具有响应快(毫秒乃至亚毫秒量级)和灵敏度高(纳应变)的优点,是用来监测水下线缆动态扰动事件和健康状态的理想方式。

2013 年,美国 Paulsson 公司发布了一种光纤地震传感器系统<sup>[96]</sup>。该系统在光纤沿线布设多个 FBG 作为参考点,使两两参考点之间形成干涉,该技术源

自数十年前美国海军实验室的水下监听项目,可以看作是  $\Phi$ -OTDR 技术用于水下物体监测的最初尝试。2019 年, Masoudi 等<sup>[97]</sup>为评估海底电缆机械应力监测的可行性,研制了一种便携分布式振动传感器,该传感器能够监测到 10 km 海底电缆上频率低至 0.1 Hz 的动态扰动事件,空间分辨率为 1 m。

相比国外,国内研究海缆监测系统的单位很少。其中苏州光格设备有限公司<sup>[98]</sup>研制的海缆综合在线监测系统,利用  $\Phi$ -OTDR 技术实现了海缆的扰动监测,可测量距离在百千米左右。2016 年,董向华<sup>[99]</sup>利用传统  $\Phi$ -OTDR 技术实现了海缆扰动分布式监测系统,该系统可对船只落锚振动和挂缆拖曳所引起的海缆扰动进行预警和定位,使海缆免遭破坏。2014 年,本课题组<sup>[43]</sup>提出了一种基于  $\Phi$ -OTDR 的增强型海缆损耗与扰动同步监测系统,该系统是第一个能够兼容海缆级联中继的测振系统。同年,又提出了一种用于损耗与扰动事件同步监测的增强型 COTDR 方法<sup>[43]</sup>,该方法通过设计多频探测脉冲机制,在时分复用的同时实现频分复用。一方面提升了 COTDR 曲线的探测动态范围,增加了可监测距离;另一方面,通过对获得的具有多个频率的中频信号进行独立测量,扩大了系统的探测频率范围。当有  $N$  个频率的探测脉冲时,系统的探测频率范围能够提升  $N$  倍。

近年来,随着三沙市的成立,我国海洋事业进入新的发展时期,中国水下线缆行业也因此得到了快速发展。将水下线缆光纤作为传感元件,以  $\Phi$ -OTDR 为代表技术的水下线缆动态监测和故障诊断预警系统对维护和保障水下线缆传输和通信系统的安全有着极其重要的战略意义,未来有望逐渐成为海洋监测应用的标配。其中,1000 km 级别的水下线缆监测是研究重点,单跨长距离覆盖范围、级联中继超长距离覆盖范围将是必须解决的技术难点。

## 5 展 望

目前, $\Phi$ -OTDR 技术在传感原理、性能、应用等方面的研究取得了巨大的突破。国外厂商出于技术保密和独占的考虑,长期以来均不向我国销售  $\Phi$ -OTDR 仪器,仅提供测试服务。但这促进了国产设备的研发,近年不断有国产  $\Phi$ -OTDR 设备问世,这些设备在传感距离、空间分辨率、测频范围、灵敏度等核心指标上与国外已无明显差距,说明国内在  $\Phi$ -OTDR 技术的研究上与国外先进水平已经没有代差。但是在产业应用上,要真正解决用户的痛点和

难点,还缺乏工程经验、特征数据积累及信号处理能力。

随着逆全球化趋势愈演愈烈,国内  $\Phi$ -OTDR 厂商将更难获得顶级性能的核心光电器件,一方面国产  $\Phi$ -OTDR 设备将面临技术封锁和价格垄断风险;另一方面会促使国产器件厂商加速技术升级改进,设备厂商可通过系统工程降低对单个器件性能参数的需求。目前来看,在无源器件及光电探测器、调制器等有源器件方面,国内厂商的产品已经可以代替国外产品。对于  $\Phi$ -OTDR 系统中最为核心的窄线宽光源,目前国产器件在相位噪声、频率稳定性等核心参数上与国际最顶尖产品仍存在 1~2 个数量级的差别。这种性能上的差异在短期内会对地震波探测、水声监听等具有高灵敏度需求的应用形成卡脖子环节,显著提升仪器设计难度。但对于周界安防、输电线路监测等应用,国产器件基本已经满足  $\Phi$ -OTDR 整机的设计需求,且从市场份额来看,这部分中低端应用反而占据了大头。近年来由于国产器件厂商的崛起,一些审时度势的国外厂商也已经相应地调整了对应产品的价格,以提升市场竞争力。当今全球范围内,只有中国仍处于大型基础设施的高速建设时期,随着新基建的推进, $\Phi$ -OTDR 技术在中国的应用前景非常好,因此在未来的产业化进程中,国内关于  $\Phi$ -OTDR 技术的科研、生产与应用单位将面临一个机遇与挑战并存的局面。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X P. Fully distributed optical fiber 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] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847 [P/OL]. 1993-03-16 [2020-08-09]. <https://patents.justia.com/patent/5194847>.
- [3] Cummins H Z, Gammon R W. Rayleigh and Brillouin scattering in benzene: depolarization factors [J]. Applied Physics Letters, 1965, 6(8): 171-173.
- [4] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent  $\Phi$ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858.
- [5] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity  $\Phi$ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [6] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long phase-

- sensitive OTDR with hybrid distributed amplification [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5866-5869.
- [7] Song M P, Zhu W J, Xia Q L, et al. 151-km single-end phase-sensitive optical time-domain reflectometer assisted by optical repeater[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(2): 1-4.
- [8] Fu Y, Wang Z N, Zhu R C, et al. Ultra-long-distance hybrid BOTDA/ $\Phi$ -OTDR [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(4): 976-984.
- [9] Zhang J D, Wu H T, Zheng H, et al. 80 km fading free phase-sensitive reflectometry based on multi-carrier NLFM pulse without distributed amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4748-4754.
- [10] Zhang C X, Zhong X, Li L J, et al. Long-distance intrusion sensor based on phase sensitivity optical time domain reflectometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 742-746.  
张春熹, 钟翔, 李立京, 等. 基于相位敏感光时域反射计的长距离入侵探测系统[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 742-746.
- [11] Uyar F, Onat T, Unal C, et al. A direct detection fiber optic distributed acoustic sensor with a mean SNR of 7.3 dB at 102.7 km [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1-8.
- [12] Qin Z G, Chen L, Bao X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 542-544.
- [13] Zou W W, Yang S, Long X, et al. Optical pulse compression reflectometry: proposal and proof-of-concept experiment [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 512-522.
- [14] Zou W W, Yang S, Long X, et al. Optical pulse compression reflectometry with 10 cm spatial resolution based on pulsed linear frequency modulation [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: W31.5.
- [15] Lu B, Pan Z Q, Wang Z Y, et al. High spatial resolution phase-sensitive optical time domain reflectometer with a frequency-swept pulse [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 391-394.
- [16] Lu B, Wang Z Y, Zheng H R, et al. High spatial resolution and long distance distributed optical fiber vibration sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1015001.  
卢斌, 王照勇, 郑汉荣, 等. 高空间分辨率长距离分布式光纤振动传感系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1015001.
- [17] 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 Physica Sinica*, 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.
- [18] Pan Z Q, Wang Z Y, Ye Q, et al. High sampling rate multi-pulse phase-sensitive OTDR employing frequency division multiplexing [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91576X.
- [19] He Q, Zhu T, Zhou J, et al. Frequency response enhancement by periodical nonuniform sampling in distributed sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(20): 2158-2161.
- [20] Iida D, Toge K, Manabe T. Distributed measurement of acoustic vibration location with frequency multiplexed phase-OTDR [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36(7): 19-25.
- [21] He X. Study on the fiber optical distributed wide-frequency vibration sensing based on  $\Phi$ -OTDR [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.  
何茜. 基于  $\Phi$ -OTDR 的光纤分布式宽频振动传感技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [22] He H J, Shao L Y, Li Z L, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response based on frequency division multiplexing [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 20-22, 2016, Anaheim, California. Washington, D. C.: OSA, 2016: M2D.1.
- [23] Zhang Y X, Xia L, Cao C Q, et al. A hybrid single-end-access MZI and  $\Phi$ -OTDR vibration sensing system with high frequency response [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 176-181.
- [24] Shan Y Y, Dong J Y, Zeng J, et al. A broadband distributed vibration sensing system assisted by a distributed feedback interferometer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-10.
- [25] Zhao Z, Tang M, Wang L, et al. Distributed vibration sensor based on space-division multiplexed reflectometer and interferometer in multicore fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5764-5772.
- [26] Zhang X, Cao Q Y, Li Q, et al. Laser frequency drift noise reduction in fiber-optic system based on  $\varphi$ -OTDR through a novel location algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2150-2155.  
张晞, 曹巧媛, 李勤, 等. 一种新型的光纤相位 OTDR 系统频漂误差抑制算法的研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2150-2155.



- [27] Zhu F, Zhang X P, Xia L, et al. Active compensation method for light source frequency drifting in  $\Phi$ -OTDR sensing system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(24): 2523-2526.
- [28] Yuan Q, Wang F, Liu T, et al. Compensating for influence of laser-frequency-drift in phase-sensitive OTDR with twice differential method [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3664-3671.
- [29] Yuan Q, Wang F, Liu T, et al. Using an auxiliary Mach-Zehnder interferometer to compensate for the influence of laser-frequency-drift in  $\Phi$ -OTDR [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 1943-1953.
- [30] Zinsou R, Wang Y, Liu X, et al. Adaptive pulse period method for low-frequency vibration sensing with intensity-based phase-sensitive OTDR systems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 41838-41846.
- [31] Qin Z G, Zhu T, Chen L, et al. High sensitivity distributed vibration sensor based on polarization-maintaining configurations of phase-OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15): 1091-1093.
- [32] Mao Y, Ashry I, Alias M S, et al. Investigating the performance of a few-mode fiber for distributed acoustic sensing [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-10.
- [33] Wang C, Shang Y, Liu X H, et al. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29038-29046.
- [34] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based  $\Phi$ -OTDR using a composite double probe pulse approach [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [35] Fernandez-Ruiz M R, Martins H F, Pastor-Graells J, et al. Phase-sensitive OTDR probe pulse shapes robust against modulation-instability fading [J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5756-5759.
- [36] Muanenda Y, Oton C J, Faralli S, et al. A cost-effective distributed acoustic sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection phase-OTDR [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1943-1954.
- [37] Alekseev A E, Tezadov Y A, Potapov V T. Intensity noise limit in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer with a semiconductor laser source [J]. Laser Physics, 2017, 27(5): 055101.
- [38] Fernandez-Ruiz M R, Martins H F, Costa L, et al. Steady-sensitivity distributed acoustic sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5690-5696.
- [39] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for  $\Phi$ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [40] Li J, Zhang Z T, Gan J L, et al. Influence of laser linewidth on phase-OTDR system based on heterodyne detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2641-2647.
- [41] Chen D, Liu Q W, Wang Y F, et al. Fiber-optic distributed acoustic sensor based on a chirped pulse and a non-matched filter [J]. Optics Express, 2019, 27(20): 29415-29423.
- [42] Zhu T, Xiao X H, He Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in  $\Phi$ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [43] Li Q, Zhang C X, Li L J, et al. Signal-to-noise ratio enhancement of phase-sensitive optical time-domain reflectometry based on power spectrum analysis [J]. Optical Engineering, 2014, 53(2): 5690-5696.
- [44] Yue H M, Zhang B, Wu Y X, et al. Simultaneous and signal-to-noise ratio enhancement extraction of vibration location and frequency information in phase-sensitive optical time domain reflectometry distributed sensing system [J]. Optical Engineering, 2015, 54(4): 47101-47108.
- [45] 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 Journal, 2017, 9(3): 1-10.
- [46] 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]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 56114-56122.
- [47] 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, 2018, 19(1): 83-93.
- [48] Zhou L, Wang F, Wang X I, et al. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [49] Zhang X P, Xia L, Zhang Y X, et al. A new designed FBG and  $\Phi$ -OTDR hybrid system for vibration and temperature sensing [C] // 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), July 3-5, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE Press, 2015.

- [50] Hu J H, Xia L, Yang L, et al. Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (12): 13610-13620.
- [51] Zhang J D, Zhu T, Zhou H, et al. High spatial resolution distributed fiber system for multi-parameter sensing based on modulated pulses [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27482.
- [52] Zhou J. Research on the key techniques of multiple parameters of the distributed optical sensing system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.  
周进. 多参数分布式光纤传感系统关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [53] Zhang Y X, Cai Y S, Xiong F, et al. A hybrid distributed optical fibre sensor for acoustic and temperature fields reconstruction [J]. *Optics Communications*, 2019, 435: 134-139.
- [54] Zhang X P, Qiao W Y, Sun Z H, et al. A distributed optical fiber sensing system for synchronous vibration and loss measurement [J]. *Optoelectronics Letters*, 2016, 12(5): 375-378.
- [55] Zhang X P, Hu J H, Zhang Y X. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(2): 1954-1959.
- [56] Ölçer I, Öncü A. Adaptive temporal matched filtering for noise suppression in fiber optic distributed acoustic sensing [J]. *Sensors*, 2017, 17 (6): 1288-1315.
- [57] Qu H Q, Pang L P, Zheng T, et al. Vibration detection method for optical fibre pre-warning system [J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(6): 692-698.
- [58] Jia H Z, Liang S, Lou S Q, et al. A  $k$ -nearest neighbor algorithm-based near category support vector machine method for event identification of  $\varphi$ -OTDR [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(10): 3683-3689.
- [59] Sun Q, Feng H, Yan X Y, et al. Recognition of a phase-sensitivity OTDR sensing system based on morphologic feature extraction [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15(7): 15179-15197.
- [60] Shi Y, Wang Y Y, Zhao L, et al. An event recognition method for  $\Phi$ -OTDR sensing system based on deep learning [J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3421-3430.
- [61] Liehr S, Jäger L A, Karapanagiotis C, et al. Real-time dynamic strain sensing in optical fibers using artificial neural networks [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7405-7425.
- [62] Zhang Y, Lou S Q, Liang S, et al. Study of pattern recognition based on multi-characteristic parameters for  $\varphi$ -OTDR distributed optical fiber sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (11): 1105005.  
张颜, 娄淑琴, 梁生, 等. 基于多特征参量的  $\varphi$ -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.
- [63] Aktas M, Akgun T, Demircin M U, et al. Deep learning based threat classification in distributed acoustic sensing systems [C] // 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), May 15-18, 2017, Antalya, Turkey. New York: IEEE Press, 2017.
- [64] Juarez J C, Taylor H F. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 1968-1971.
- [65] Sifta R, Munster P, Sysel P, et al. Distributed fiber-optic sensor for detection and localization of acoustic vibrations [J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2015, 22(1): 111-118.
- [66] 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.
- [67] Wang P F, Dong Q, Liu X, et al. Coalbed methane transport pipeline intrusion detection system based on  $\Phi$ -OTDR [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(1): 144-149.  
王鹏飞, 董齐, 刘昕, 等. 基于  $\Phi$ -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.
- [68] Luo J, Rao Y, Yue J, et al. Highly sensitive distributed optical fiber intrusion monitoring system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6): 1123-1128.
- [69] Wu X, Wu H, Rao Y, et al. Low misstatement rate distributed optical fiber fence intrusion detection system by variety of wavelet decomposition method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1692-1696.
- [70] 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]. *Chinese Journal of 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.
- [71] Zhong X, Gao X C, Deng H X, et al. Pulse-width multiplexing  $\phi$ -OTDR for nuisance-alarm rate reduction [J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3509-3521.

- [72] Daley T M, Freifeld B M, Ajo-Franklin J, et al. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring [J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(6): 699-706.
- [73] Dou S, Lindsey N, Wagner A M, et al. Distributed acoustic sensing for seismic monitoring of the near surface: a traffic-noise interferometry case study [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11620.
- [74] Nørgaard Madsen K, Thompson M, Parker T, et al. A VSP field trial using distributed acoustic sensing in a producing well in the North Sea [J]. *First Break*, 2013, 31(1993): 51-56.
- [75] Papp B, Donno D, Martin J E, et al. A study of the geophysical response of distributed fibre optic acoustic sensors through laboratory-scale experiments [J]. *Geophysical Prospecting*, 2017, 65 (5): 1186-1204.
- [76] Duckworth G L, Ku E M. OptaSense distributed acoustic and seismic sensing using COTS fiber optic cables for infrastructure protection and counter terrorism [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8711: 87110G.
- [77] Lindsey N J, Martin E R, Dreger D S, et al. Fiber-optic network observations of earthquake wavefields [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44 (23): 11792-11799.
- [78] 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]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 1328.
- [79] Zhu T Y, Stensrud D J. Characterizing thunder-induced ground motions using fiber-optic distributed acoustic sensing array [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124 (23): 12810-12823.
- [80] Yu C Q, Zhan Z W, Lindsey N J, et al. The potential of DAS in teleseismic studies: insights from the goldstone experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1320-1328.
- [81] Zhang M, Liu F, Xie B, et al. Development and field experiment of downhole optical fiber microseismic monitoring system [C]//China Optical Fiber Sensing Conference and Industrialization Forum(OFS-China), April 27-29, 2019, Wu Han, China. Beijing: Chinese Society for Optical Engineering, 2019.  
张敏, 刘飞, 谢斌. 井下光纤微地震监测系统研制及现场实验 [C]//中国光纤传感学术会议暨产业化论坛(OFS-China), 4月27日-29日, 2019, 武汉, 中国. 北京: 中国光学工程学会, 2019.
- [82] Wang H F, Zeng X F, Miller D E, et al. Ground motion response to an ML4.3 earthquake using co-located distributed acoustic sensing and seismometer arrays [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(3): 2020-2036.
- [83] Lü P J. Requirements for downhole dynamic monitoring and application status of optical fiber detection [C]//China Optical Fiber Sensing Conference and Industrialization Forum(OFS-China), April 27-29, 2019, Wu Han, China. Beijing: Chinese Society for Optical Engineering, 2019.  
吕鹏举. 井下动态监测需求及光纤探测应用现状 [C]//中国光纤传感学术会议暨产业化论坛(OFS-China), 4月27日-29日, 2019, 武汉, 中国. 北京: 中国光学工程学会, 2019.
- [84] Shi B. Distributed optical fiber sensing technology and its application in geological and geotechnical engineering monitoring [C] // China Optical Fiber Sensing Conference and Industrialization Forum (OFS-China), April 27-29, 2019, Wu Han, China. Beijing: Chinese Society for Optical Engineering, 2019.  
施斌. 分布式光纤感测技术及其在地质岩土工程监测中的应用 [C]//中国光纤传感学术会议暨产业化论坛(OFS-China), 4月27日-29日, 2019, 武汉, 中国. 北京: 中国光学工程学会, 2019.
- [85] Li Y P. Application of DAS system in the field of oilfield exploration [C]//China Optical Fiber Sensing Conference and Industrialization Forum(OFS-China), April 27-29, 2019, Wu Han, China. Beijing: Chinese Society for Optical Engineering, 2019.  
李彦鹏. DAS系统在油田勘探领域的应用 [C]//中国光纤传感学术会议暨产业化论坛(OFS-China), 4月27日-29日, 2019, 武汉, 中国. 北京: 中国光学工程学会, 2019.
- [86] Chai Q, Luo Y, Ren J, et al. Review on fiber-optic sensing in health monitoring of power grids [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(7): 072007.
- [87] Zhang X P, Wu J L, Shan Y Y, et al. On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology [J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37(4): 221-229.  
张旭苹, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测 [J]. *光电子技术*, 2017, 37(4): 221-229.
- [88] Xie K, Zhang H Y, Zhao Y S, et al. Structural health monitoring of power transmission system based on optical fiber sensor under transmission line galloping [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070606.  
谢凯, 张洪英, 赵衍双, 等. 导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究 [J]. *激光与光电子学进*



- 展, 2018, 55(7): 070606.
- [89] 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]. Optical Engineering, 2020, 59(4): 046101.
- [90] Xu T. Application of high-voltage cable external protection monitoring and warning system based on distributed optical fiber vibration sensing [J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(6): 30-33.  
徐涛. 基于分布式光纤振动传感的高压电缆防外破监测预警系统应用[J]. 东北电力技术, 2020, 41(6): 30-33.
- [91] Wu J L, Ji W, Ye X Y, et al. Application of  $\Phi$ -OTDR technology in power system optical cable monitoring[J]. Digital Communication World, 2020(6): 203-204, 212.  
吴建灵, 季伟, 叶向阳, 等.  $\Phi$ -OTDR 技术在电力系统光缆监测中的应用[J]. 数字通信世界, 2020(6): 203-204, 212.
- [92] Xu J T. Global submarine optical cable market insights and development trends [C]//Global Fiber Optic Cable Conference, November 18-20, 2019, Shanghai, China. Shanghai: APC, 2019.  
许剑涛. 全球海底光缆市场洞察及发展趋势[C]//全球光纤光缆大会, 11月18日-20日, 2019, 上海, 中国. 上海: APC, 2019.
- [93] Wu F L, Xu J, Zheng X L, et al. Research and application of optical fiber sensing technology in the submarine cable monitoring [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(3): 72-76.  
吴飞龙, 徐杰, 郑小莉, 等. 光纤传感技术在海底电缆监测中的研究及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(3): 72-76.
- [94] Wu F L, Yang L F. First application of optical fiber composite technology in 110 kV submarine cable in China[J]. Electric Power, 2011, 44(2): 27-30.  
吴飞龙, 杨力帆. 光电复合技术在我国 110 kV 海底电缆中的首次应用[J]. 中国电力, 2011, 44(2): 27-30.
- [95] Zhang R Y, Xu Z F. Pay attention to the security of communication-sudden submarine cable failures reflect deep-seated problems: reasonable layout and vigorous promotion of .cn domain names are the key [J]. World Telecommunications, 2009, 22(9): 35-38.  
张若英, 徐志发. 突发海缆故障折射深层次问题: 合理布局及大力推广.cn 域名是关键[J]. 世界电信, 2009, 22(9): 35-38.
- [96] Paulsson B N P, Toko J L, Thornburg J A, et al. Development of 300 °C fiber optic seismic sensors for geothermal reservoir imaging and monitoring [J]. Transactions Geothermal Resources Council, 2013, 37: 1043-1049.
- [97] Masoudi A, Pilgrim J A, Newson T P, et al. Subsea cable condition monitoring with distributed optical fiber vibration sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1352-1358.
- [98] 500 kV marine cable monitoring system in Zhoushan, Zhejiang. <http://zj.people.com.cn/n2/2019/0602/c186327-33002885.html>.  
浙江舟山 500 kV 海缆监测系统. <http://zj.people.com.cn/n2/2019/0602/c186327-33002885.html>.
- [99] Dong X H. Research on the submarine optical cable disturbance monitoring system based on  $\varphi$ -OTDR technology[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2016(3): 32-33, 38.  
董向华. 基于  $\varphi$ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2016(3): 32-33, 38.