

# 激光与光电子学进展

## 分布式光纤声波传感及其地震波检测应用

王照勇<sup>1,2\*\*\*</sup>, 卢斌<sup>1,2</sup>, 叶蕾<sup>1,2</sup>, 应康<sup>1,2</sup>, 孙延光<sup>1,2</sup>, 程楠<sup>3</sup>, 鲁湛<sup>1,2</sup>, 叶青<sup>1,2\*\*</sup>, 蔡海文<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所中国科学院量子光学重点实验室, 上海 201800

**摘要** 分布式光纤声波传感(DAS)技术以独特的动态在线监测、大范围密集测量、方便布设免维护等优势,获得了周界安防、结构健康、交通运输、油气勘探、海洋水声等多领域专家学者的广泛关注。同时,DAS技术可以方便地通过标准通信光缆或专用光缆形成大规模探测阵列,满足地球物理与自然灾害预测等领域的地震波检测需求,有望得到更广泛的应用。以新兴的地震波检测应用为切入点,结合调研情况,对DAS技术的基本传感原理、技术发展历程、地震波应用进展等进行论述,并分析DAS在地震波检测方向所面临的关键技术难题和未来发展趋势。

**关键词** 光纤光学; 瑞利散射; 分布式光纤声波传感; 地震波检测; 地球物理; 油气勘探

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306006

## Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing and Its Application to Seismic Wave Monitoring

Wang Zhaoyong<sup>1,2\*\*\*</sup>, Lu Bin<sup>1,2</sup>, Ye Lei<sup>1,2</sup>, Ying Kang<sup>1,2</sup>, Sun Yanguang<sup>1,2</sup>, Cheng Nan<sup>3</sup>,  
Lu Zhan<sup>1,2</sup>, Ye Qing<sup>1,2\*\*</sup>, Cai Haiwen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai

Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Centre of Materials Science and Optoelectronics Engineering,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** Distributed optical fiber acoustic sensing (DAS) technology provides unique advantages such as dynamic online monitoring, long-haul dense measurement, convenient installation, and maintenance-free operation. Hence, it has attracted extensive research attention in various fields, including perimeter security, structural health monitoring, transportation, oil and gas exploration, and submarine acoustics. Combined with standard communication optical cables or dedicated optical cables, DAS can conveniently form large-scale detection arrays, meet the requirements of seismic wave monitoring for geophysics and natural disaster detection, and achieve applicability in diverse fields. This paper is focused on the emerging seismic wave monitoring application of DAS. In particular, the basic sensing principles, technology development, and application progress of DAS-based seismic wave monitoring are discussed. In addition, the key technical problems and future development trends of DAS for seismic wave detection are analyzed.

收稿日期: 2021-04-02; 修回日期: 2021-04-27; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1522901)、国家自然科学基金(61905262, 61805260, 61805265, 61905260)、上海市自然科学基金(18ZR1444600)、上海市科技委员会(18DZ1201303)、中科院青促会(YIPA2021244)

通信作者: \*hwcai@siom.ac.cn; \*\*yeqing@siom.ac.cn; \*\*\*wzhy0101@siom.ac.cn

**Key words** fiber optics; Rayleigh scattering; distributed optical fiber acoustic sensing; seismic wave detection; geophysics; oil & gas resource exploration

**OCIS codes** 060.2370; 060.2310; 290.5825; 290.5870

## 1 引言

地震波检测是一种获取近地表水文信息、了解重大地质灾害过程与机理、探明地下油气储层位置与储量等的关键手段。通过检测并分析地震波在地质中的传输演化规律,可以反演得到近地表地质结构状况与时移变化趋势,进而为地球物理相关研究提供重要的数据支撑。现有主流地震波检测手段为点式电学探测器,受限于其固有的技术瓶颈,阻碍了在相关领域的进一步发展。一方面,现有手段通常需要野外长期单独供电和通信,布设与维护难度大;另一方面,探测阵列对探测器组网的时钟同步精度提出了极高的要求;再者,受限于复用技术的能力,探测器的组网规模难以提升,不利于高精度的地层结构分析。开发新一代地震波检测技术,已经成为地球物理领域飞速发展所面临的一项重要任务。

分布式光纤声波传感(DAS)技术是一种利用激光在光纤中的后向瑞利散射来获取沿线环境物理量变化的先进感知技术<sup>[1]</sup>,具有环境适应性强、传感范围大、信道间光速同步、时空分辨精度高等优势,为地震波检测突破现有点式电学探测器布设难度大、组网规模受限等固有瓶颈提供了可能。近期研究表明,DAS技术可以直接利用全球海量的冗余通信光缆,实现地震波检测并构建全球监测网络,有望为人类地球活动方式带来重大变革。目前,DAS技术历经几十年发展,已经在周界安防<sup>[2-5]</sup>、管线泄露检测<sup>[6-8]</sup>、轨道交通安全检测<sup>[9-12]</sup>、油气资源勘探<sup>[13-15]</sup>等诸多领域得到了广泛应用,但是在地震波检测的应用尚处于初步阶段,还有诸多重要问题亟待解决,吸引着越来越多研究学者的关注。

## 2 DAS 传感原理

DAS是通过激光在光纤中的后向瑞利散射,对光纤沿线环境物理量(温度、振动、应变、声音等)进行空间连续、实时动态感知的。根据弹光效应和胡克定律,外界扰动变化会改变光纤长度和折射率,调制光波传输的光程和时延,进而导致接收端的光波相位发生变化与散射光干涉图样发生变化。以应变检测为例,弹性系数为 $\eta$ ,弹光系数为 $\xi$ ,忽略二阶小量的情况下,光纤轴向应变 $\epsilon_z$ 在光纤段 $\Delta l$ 上产生的光程差为 $\Delta z_{\text{path}} \approx \epsilon_z n_0 \Delta l (\xi + \eta)$ ,其中 $n_0$ 为纤芯折射率。光程差变化引起的光波时延表示为 $\Delta \tau = \Delta z_{\text{path}} / c = \epsilon_z n_0 \Delta l (\xi + \eta) / c$ ,其中 $c$ 为光波的真空中速度。显然,光波时延与外界扰动近似呈线性映射关系,通过解调光波时延即可线性重建扰动波形。

根据解调方式,DAS可以分为定性解调和定量解调两类。前者又称为分布式光纤振动传感技术,即DVS,它是利用后向干涉图样的幅度变化来反映外界扰动的,这一方式只能定性判断扰动事件的有无,难以准确复现扰动信号的波形。后者则为狭义的DAS技术,大多通过解调单色光脉冲的散射相位信息或调谐光波的散射频率信息,获取光波时延信息,线性重建外界扰动变化。最具代表性的两类DAS技术是相位敏感光时域反射计( $\Phi$ -OTDR)<sup>[16]</sup>和光频域反射计(OFDR)<sup>[17]</sup>,如图1所示。 $\Phi$ -OTDR是通过发射单频光脉冲来获取光纤沿线物理量变化和实现事件定位的,具有传感距离长(几十至上百千米)、响应带宽高等优势。OFDR则以啁啾脉冲为探针,传感距离通常较小,但是定位精度非常高,可达毫米量级。随着技术的发展,国内外同行专家也提出了多种衍生技术,如TGD-OFDR<sup>[18]</sup>、啁啾脉冲DAS<sup>[19]</sup>、双脉冲 $\Phi$ -OTDR<sup>[20-21]</sup>等,均取得了不错的效果。

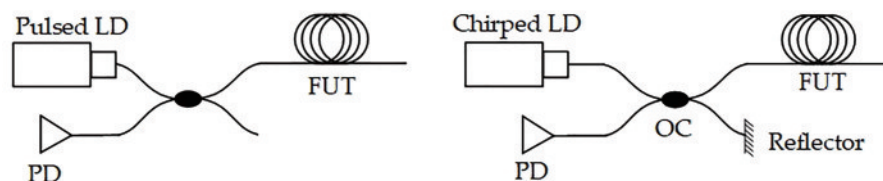


图1  $\Phi$ -OTDR和OFDR原理框图<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Principle schemes of  $\Phi$ -OTDR and OFDR<sup>[22]</sup>

### 3 技术发展历程

DAS,特别是 $\Phi$ -OTDR技术,发展历程大致可以分为定性检测、定量测量、立体探测3个阶段。

1) 定性检测阶段。该阶段主要通过幅度解调获取散射光干涉图样的变化,来定性反映光纤沿线扰动事件的发生与否。1993年,Taylor等<sup>[16]</sup>首次提出了利用相干窄线宽激光的后向瑞利散射进行分布式入侵探测的思想。这一时期的DAS只能进行定性探测,还不能实现扰动波形的定量测量,被称为DVS,重点应用于周界安防、管线泄露检测等领域。

2) 定量测量阶段。DAS已经可以利用数字相干相位解调<sup>[23]</sup>、相位生成载波技术<sup>[24]</sup>、基于 $3\times 3$ 耦合器的相位解调技术<sup>[9, 25]</sup>、正交IQ解调<sup>[26-28]</sup>等方法,线性重建外界扰动的实时波形。多种定量解调方法各具特色:IQ解调结构简单,灵敏度和信噪比(SNR)高<sup>[29-30]</sup>;数字相干相位解调方法在数字域实现,方便灵活;相位生成载波技术可以解决相干探测工作点随机漂移问题; $3\times 3$ 耦合器解调方法可以避免相干探测引起的额外信号衰落等。在这一阶段,DAS的性能指标得到了快速的发展,响应带宽<sup>[31-33]</sup>、空间分辨率<sup>[34-37]</sup>、系统SNR<sup>[38-41]</sup>、灵敏度<sup>[42-45]</sup>等得以优化和提升。结合先进的数据处理方法<sup>[46-48]</sup>,DAS能够更为准确地实现事件识别与分类,极大推动了DAS在入侵检测<sup>[4, 48]</sup>、管线安全<sup>[46]</sup>等领域的大规模应用落地进程,并拓展了铁路沿线安全检测、声音侦听<sup>[49-50]</sup>、电缆局放检测<sup>[51]</sup>、结构健康监测<sup>[52]</sup>、油气资源勘探<sup>[13-15]</sup>等新兴应用。

3) 立体探测阶段。不同于常规点式探测技术思想,DAS的空间连续感知数据得到更高维度的利用,分布式立体定位<sup>[53]</sup>和多维探测能力得以实现,应用范围得到更大程度的拓展。时空多维传感数据的特征提取方法<sup>[12, 54]</sup>标志着这一阶段的开始。立体探测DAS技术已经逐步可以满足近地表地层分析<sup>[55-56]</sup>、海洋水声探测<sup>[57]</sup>、地震探测<sup>[58]</sup>等领域的需求,正在蓬勃发展。

在DAS发展历程中,国内外科研学者们开展了一系列研究,攻克了多项关键问题和技术瓶颈,包括分布式定量测量、深度智能识别、分布式立体定位、空间多维探测等。

#### 3.1 数字相干相位解调

在DVS阶段,外界扰动对光波时延的调制体现在后向散射的干涉图样变化上,通过对光波强度的时间差分,可以分辨外界扰动。由于这一方式难以

准确获得扰动波形,不同扰动事件的特征差异被掩盖,仅能依靠强度的时频变化来实现分类识别,应用效果较差。

为了准确获取扰动波形,实现更为稳定可靠的应用,上海光学精密机械研究所团队于2011年率先提出了数字相干相位解调方法<sup>[23]</sup>,国际上首次实现了扰动信号的分布式多点同步定量测量。根据DAS传感原理<sup>[59]</sup>可知,外界扰动与光波时延近似呈线性映射关系,而光波时延直接调制的相位信息 $\varphi = 2\pi c\Delta\tau/\lambda$ ,通过获得后向瑞利散射的相位变化即可重建扰动波形,其中 $\lambda$ 为光波波长。数字相干相位解调方法是在数字域对外差相干探测的信号波形进行相位解调的,表达式<sup>[23]</sup>为

$$\phi = \text{angle}\left(\int I_{\text{BPD}} \times e^{-j\Delta\omega t_z} dt_z\right) + 2k\pi, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{BPD}}$ 为外差探测信号,由双平衡探测器得到; $\text{angle}(\cdot)$ 表示求取输入量的相位。对光纤段 $\Delta l$ 前后相位进行空间差分,即可线性重建光纤段附近的外界扰动。

#### 3.2 分布式深度智能识别

DAS原始探测数据的现实意义通常不大,应用领域关注更多的是探测数据中隐含的事件信息,如入侵的发生时间、位置、类型等。传统DVS/DAS数据处理方法可以实现扰动事件有无的二分类判断,难以提供更为丰富、有效的事件信息,不利于长距离监测的高效告警管理和事件快速处置。支持向量机<sup>[4, 60]</sup>、高斯混合模型<sup>[61]</sup>、卷积网络<sup>[62]</sup>、深度神经网络<sup>[47, 63]</sup>等多分类方法逐步被引入到DAS中,很大程度上解决了特定应用场景的多分类事件识别问题。然而,常规方法依赖于点式探测器思想,仅利用单信道探测数据,鲁棒性较差,既有参数/模型通常难以在不同环境、不同场合发挥作用,导致DAS应用技术难度较大,不利于大规模应用落地。

上海光学精密机械研究所团队利用DAS的独特空间连续感知特性,进行扰动事件的特性表征与样本构建,并先后结合动态频率空间图像分析(DFSI)<sup>[64]</sup>、多维综合分析(MDCA)<sup>[12]</sup>、双路径深度网络(DPN)<sup>[54]</sup>等方法,如图2(a)所示,以异于常规点式探测思想的方式,挖掘分布感知数据的时间空间多维信息,实现了DAS在车辆定位、列车安全检测等领域的实际应用。2018年,Cedilnik等<sup>[65]</sup>利用DAS的分布式感知特性,通过铁轨视图方法提取列车与铁轨特性,解决了铁轨健康在线检测问题,如图2(b)所示。

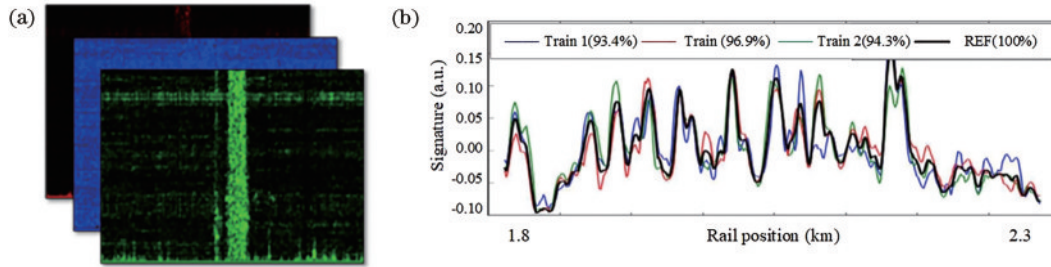


图2 DAS空间密集采样数据的信息挖掘。(a)扰动事件多维三通道样本<sup>[54]</sup>; (b)铁轨视图分析<sup>[65]</sup>

Fig. 2 Information mining of DAS spatially dense data. (a) Three channel multi-dimension samples of disturbance event<sup>[54]</sup>; (b) rail view analysis<sup>[65]</sup>

### 3.3 分布式立体定位

DAS是通过获取光波在光纤中的往返飞行时间,来实现扰动源定位的。受限于传感光纤的一维空间结构,扰动源定位被局限在光纤轴向一维坐标上,扰动源与光纤的横向位置关系却难以获知。多维空间定位能力的缺失,很大程度上限制了DAS的应用范围,如地震震源定位、入侵危险等级划分、多股道列车跟踪等。多维空间定位面临诸多难题,如扰动源信号的初始状态(幅度、相位等)及其在传输耦合过程中的特性变化(衰减快慢、传输速度等)都会直接影响DAS定量解调信息,实际应用中这两者又难以提前预知,故通过解调信息难以直接反演扰动源信号在传

耦合过程中所历经的距离与时延,以及扰动源到光纤的横向距离和方位。如何在未知扰动源初始状态或传输过程的情况下实现分布式立体定位,成为DAS立体探测阶段亟需解决的重要问题。

2018年,Shpalensky等<sup>[66]</sup>基于点式探测思想,利用多普勒频移效应,实现了移动目标的二维定位,然而这一方法不适用于慢速或静止目标的多维定位。2019年,上海光学精密机械研究所团队<sup>[53]</sup>提出了基于阵列信号处理的分布式空间定位方法,实现了单个和多个扰动源的二维、三维定位,如图3所示。此外,OptaSense Inc.<sup>[67]</sup>、Silixa<sup>[68]</sup>、上海理工大学<sup>[69]</sup>等国内外研究团队也分别报道了他们的立体定位工作。

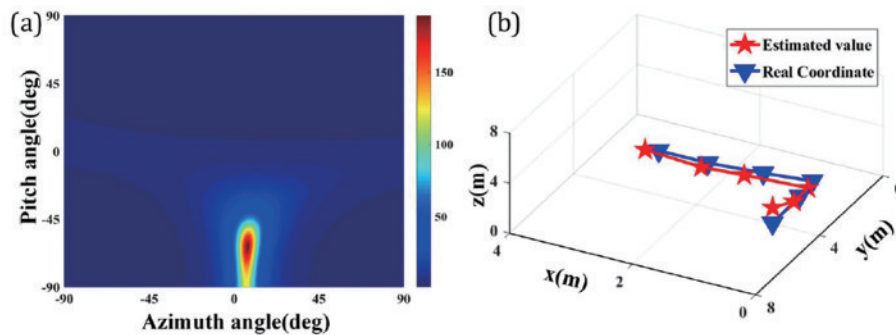


图3 三维空间定位<sup>[53]</sup>。(a)空间谱分布; (b)多点定位结果

Fig. 3 3D spatial localization<sup>[53]</sup>. (a) Spatial spectrum distribution; (b) multi-point localization results

### 3.4 空间多维探测

受限于光纤传感的物理机制,主流DAS的探测能力还存在单分量敏感和多源混叠两大问题:1)由于光纤径向灵敏度远低于轴向灵敏度<sup>[70]</sup>,仅能进行光纤轴向的单分量测量,难以实现径向分量测量与三分量测量,不利于地震波信号的准确还原和分析;2)各信道探测数据是光纤应变对周边所有扰动的综合响应,微弱目标信号极易被较强的宽带环境噪声所淹没,邻近的多个目标信号会相互混叠。解决这两大重要问题,全面提升空间多维探测能力,

是DAS立体探测阶段的重要内容。

针对单分量敏感问题,美国Colorado矿业学院相关团队<sup>[71]</sup>于2018年提出复合螺旋线光纤结构方法,该方法解决了外界扰动矢量信号的多分量同步探测问题。几种典型的光纤构型如图4所示。这一思想在理论仿真中得到了很好的验证,但受限于空间分辨率等技术难题,尚未得到实验验证。此外,由于需要特定的光纤构型或复杂的现场布设,这一方案适用于小范围地震波检测应用,但难以满足长距离检测应用的需求。

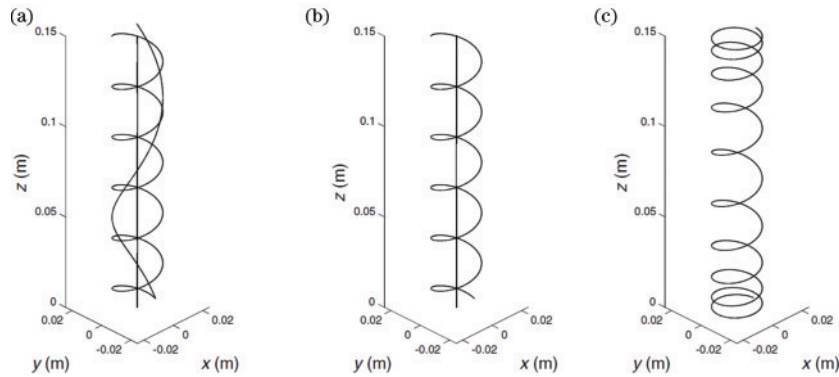


图 4 复合螺旋线光纤结构<sup>[71]</sup>。(a)双螺旋与直光纤;(b)单螺旋与直光纤;(c)啁啾螺旋光纤

Fig. 4 Composite helical fiber structures<sup>[71]</sup>. (a) Double helical and straight fibers; (b) single helical and straight fibers; (c) chirp helical fiber

针对多源混叠问题,上海光学精密机械研究所团队<sup>[72]</sup>在分布式数据挖掘的前期基础上,首次提出分布式定向侦听方法。该方法通过在数字域构建信源方位性增益,解决了目标信号与环境噪声、多个目标信号之间的信号混叠问题。实验中,两个同频不同相的

声源信号被放置于邻近光纤的不同方位。如图 5(a)和(d)所示,在 DAS 的定量测量数据中,声源信号被噪声淹没。针对各个声源的方位,对同一数据进行多源混叠抑制处理,可以同时分别获得各个声源的数据,且相位差异与实际情况吻合,如图 5 所示。

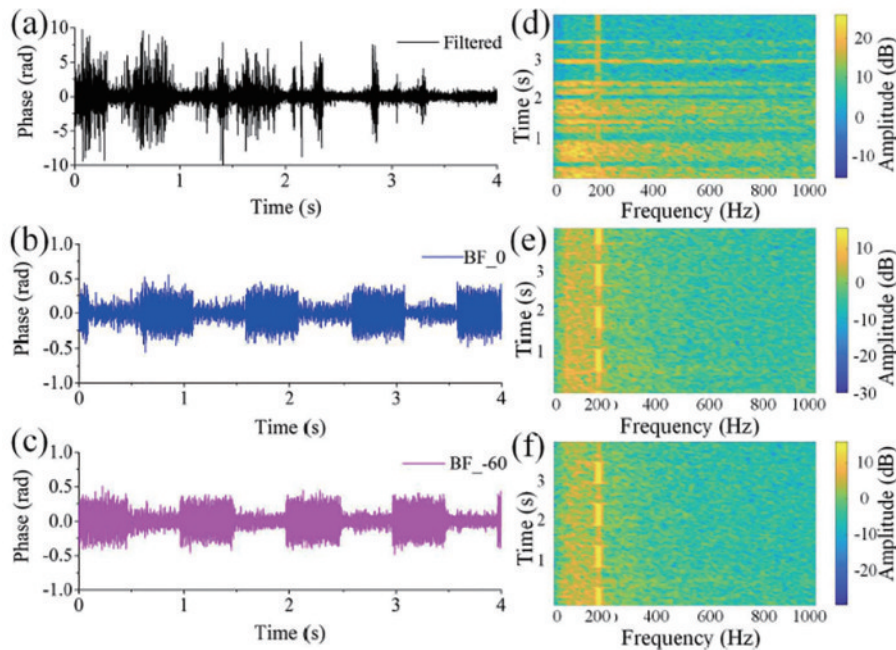


图 5 多源混叠抑制<sup>[72]</sup>。(a)定量解调数据与定向侦听在不同角度的结果;(b) 0°;(c) 60°;(d)~(f)相应的语谱图

Fig. 5 Multi-source aliasing suppression<sup>[72]</sup>. (a) Quantitative demodulation data and processed results of directional listening at different azimuths; (b) 0°; (c) 60°; (d)~(f) the corresponding spectrograms

## 4 地震波监测应用进展

DAS 利用光波瑞利散射效应将光纤转换为成千上万个光速时钟同步的传感单元,可以实现长距离扰动信号的空间密集探测,并能够在数字域灵活构建各类探测阵列,很好地弥补了地震波检测领域

现有手段的技术缺陷,近年来得到了油气资源勘探、碳存储与监测、自然灾害探测、近地表地层分析等领域专家的密切关注和跟进研究,发展前景广阔。

### 4.1 油气资源勘探

油气资源勘探通常是通过井下的地震波检测设

备获取震动波形的垂直地震剖面(VSP)来实现的。由于常规设备昂贵、部署效率低、井下设备易被掩埋<sup>[13]</sup>等问题,油气资源勘探和开采成本较高。作为一种新型的地震波监测手段,DAS具有一系列不可替代的优势:1) DAS可以有效获取光纤沿线所有位置的扰动,从而实现地震波的空间密集采样;2) 作为一种远程监测手段,解调主机可放置于室内,只需将相对廉价的光缆置于检测井内即可,重复使用率高,综合成本低;3) 传感光缆可以永久留存,在油气开采的钻井、完井、生产等全生命周期中发挥着重要作用。在国内外研究学者的共同努力下,DAS已经在资源勘探领域得到了广泛而深入的发展。2012年起,Silixa公司、Schlumberger公司、Halliburton公司、美国Colorado矿业学院、Apache公司先后报道了他们利用DAS在海基自喷井VSP<sup>[13-14]</sup>、光缆耦合技术<sup>[73]</sup>、标距长度优化<sup>[74]</sup>、VSP数据质量评估<sup>[75]</sup>、多分量VSP检测<sup>[71]</sup>、压裂开采时移VSP<sup>[15]</sup>等方面的研究工作,均取得了不错的效果,某一工作结果如图6所示。国内的相

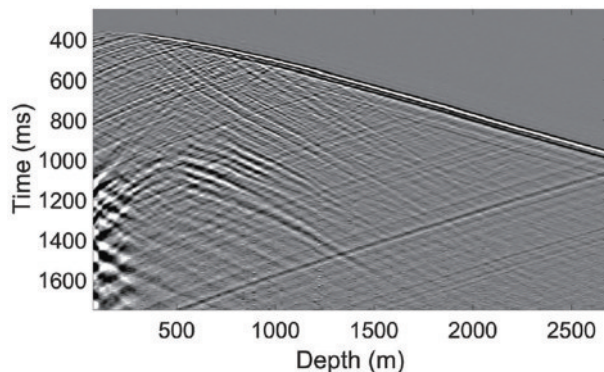


图6 主动震源P波的DAS响应  
(偏移信号源762 m,8次扫描)<sup>[75]</sup>

Fig. 6 DAS response of active P-wave source

关研究则以DAS同行与中石油、中石化等能源公司的联合攻关为主,比如中油奥博公司、上海朴牛等。

目前,基于DAS的油气资源勘探技术趋于成熟,已经进入商业推广和运营阶段。如何降低DAS设备的操作技术门槛,如何实现便捷的地震波多分量测量,可能将成为这一应用方向的发展重点。

#### 4.2 碳存储与监测

随着全球气候变暖的加剧,二氧化碳温室气体排放限制愈加严格,碳存储作为一种控制空气温室气体含量的有效手段,正在成为相关领域的工作热点。碳存储手段通过加压将二氧化碳或其混合物注入地层中,来实现减少碳排放的目的。然而,如何有效监测注入过程压力与地震波变化,全天候监测二氧化碳泄漏情况,是该领域亟待解决的重要难题。

2016年,加拿大卡尔顿大学团队<sup>[76]</sup>在Aquistore碳存储工程中利用DAS监测二氧化碳注入过程中的地震波变化,实现了二氧化碳羽流的可视化。这一研究证实了DAS在碳存储监测应用的可行性。美国劳伦斯-伯克利国家实验室(LBNL)团队<sup>[77-79]</sup>提出了模块钻井监测概念,并报道了Alabama碳存储的研究工作;与澳大利亚Curtin大学相关团队在CO<sub>2</sub>CRC Otway工程中利用注入井中的传感光缆开展联合研究,并于2019年实现了3D VSP,如图7所示。目前,这一应用方向的研究报道较少,但随着全球对气候变暖的愈加重视,尤其是国内提出了碳达峰、碳中和的宏观愿景,DAS必将在碳存储领域发挥重要作用。毫无疑问,想要准确可靠的碳存储监测,需要进一步发展高灵敏高精度的DAS探测技术、分布式阵列信号处理与高精度地震波反演方法等。

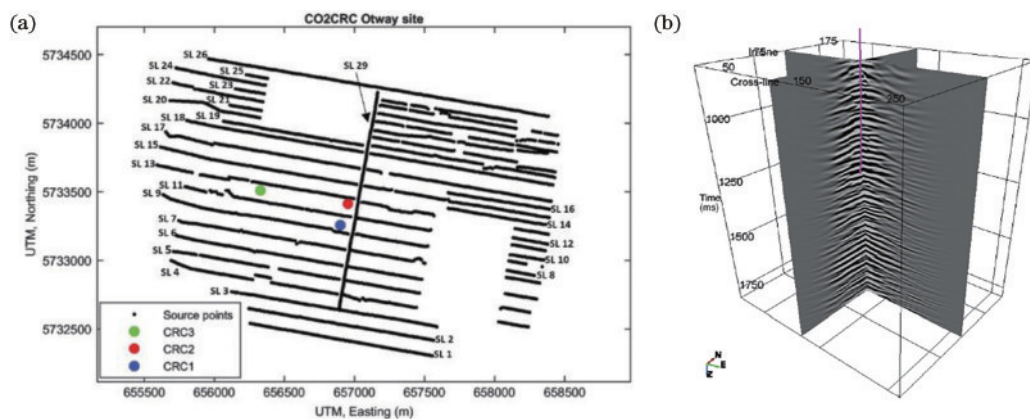


图7 碳存储监测。(a) CO<sub>2</sub>CRC Otway工程<sup>[78]</sup>; (b) 3D VSP视图<sup>[79]</sup>

Fig. 7 Monitoring for carbon storage. (a) CO<sub>2</sub>CRC Otway project<sup>[78]</sup>; (b) 3D VSP view<sup>[79]</sup>

### 4.3 自然灾害探测

地震、海啸、山体崩塌等自然地质灾害对人们的生产生活带来了巨大的危害,研究自然灾害的形成机制和演化规律,掌握灾害的预报方法,一直是相关领域专家的研究重点。然而,现有监测手段多采用点式探测器,时钟同步精度要求高,大规模组网技术难度大,难以实现高精度检测;需要户外供电,布设难度大,不利于大范围应用。这些因素为人类深入认知地质灾害带来了极大的阻碍。DAS 作为一种空间连续感知的远程探测技术,可以有效弥补现有手段的不足,有望为自然灾害探测和预警提供新的手段。

近年来,国内外学者开展了一系列相关研究。2017年,瑞士苏黎世联邦理工学院团队<sup>[80]</sup>利用 DAS

对浅层滑坡的声发射信号进行监测,验证了浅层滑坡和快速板块位移的预报可行性。2018年,德国 GFZ 地球科学研究中心<sup>[56]</sup>通过 DAS 询问陆地通信光缆状态,获得了远距离地震在不同位置的震动信号,并初步实现了断层破坏区成像。2019年,美国加州大学团队<sup>[57]</sup>利用海底通信光缆发现了多处未知海底断层,并实现了海洋潮汐、微震动等有效监测。2020年,Walter等<sup>[81]</sup>在阿尔卑斯山冰川上利用 DAS 进行岩崩与冰震监测,如图 8 所示。多项研究表明,DAS 可以通过冗余通信光缆或专用光缆,构建全球范围的地震波检测网络,实现地质灾害的检测和预报。但是,基于 DAS 的大规模监测网络构建需要发展高效的光缆定标方法,解决既有通信光缆走向多变的地理坐标映射难题,实现多系统探测数据的灵活阵列化。

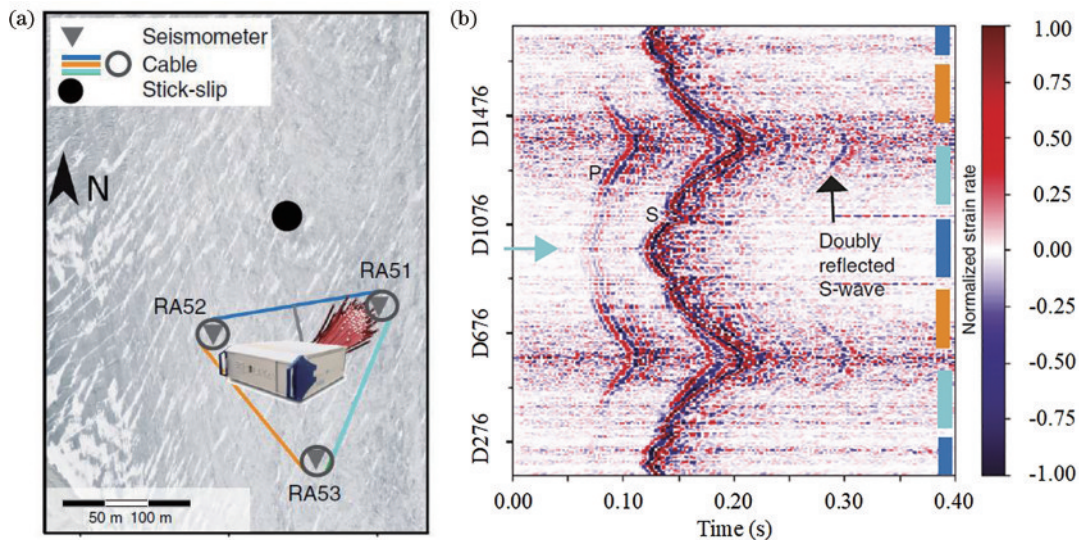


图 8 岩崩与冰震检测<sup>[81]</sup>。(a)现场布设;(b)地震波 DAS 数据图

Fig. 8 Rock fall and glacier quake monitoring<sup>[81]</sup>. (a) Field layout; (b) seismic wave view from DAS

### 4.4 近地表地层分析

地球近地表是现代建筑与重大设施的支撑基础,它的微弱变化会引起毁灭性灾难,如土壤松散会导致地面沉降与道路垮塌、地下水文变化会影响灌溉农业的正常生产、永久冻土融解会造成地上建筑物损害等。DAS 可以将既有埋地通信光缆转换为空间密集的探测器阵列,对主动震源或环境噪声的地震波传输演化过程进行全天候动态检测,进而反演获取近地表地层状况。

2017年起,美国 LBNL 实验室、加州大学、美国陆军寒区研究和工程实验室、斯坦福大学等<sup>[58]</sup>联合开展研究,利用 L 型光纤阵列,实现了基于交通噪声的近地表地震波检测与分析,取得了不错的效果。随后,他们利用既有通信光缆,分别研究了 DAS 在

相关环境噪声滤除<sup>[82]</sup>、近地表结构成像<sup>[83]</sup>、地下水位信息监测<sup>[83]</sup>等方面的应用可行性,如图 9 所示。

相较于常规地层分析手段,DAS 具有诸多优势,如无需野外供电,布设简单;覆盖范围大,且可永久性监测;利用既有通信光缆进行检测,无需检测区域所有者的许可或配合等。已经发展的分布式定量测量等核心技术为 DAS 在近地表地层分析的初步应用探索奠定了重要基础,但是要想有进一步的发展,需要探索新一代的 DAS 系列技术,如低频段高灵敏探测技术、高时空精度探测技术、分布式探测阵列处理与灾害预测技术等。随着探测能力的不断完善,DAS 必将在近地表地层分析和智慧城市方面发挥巨大的作用。

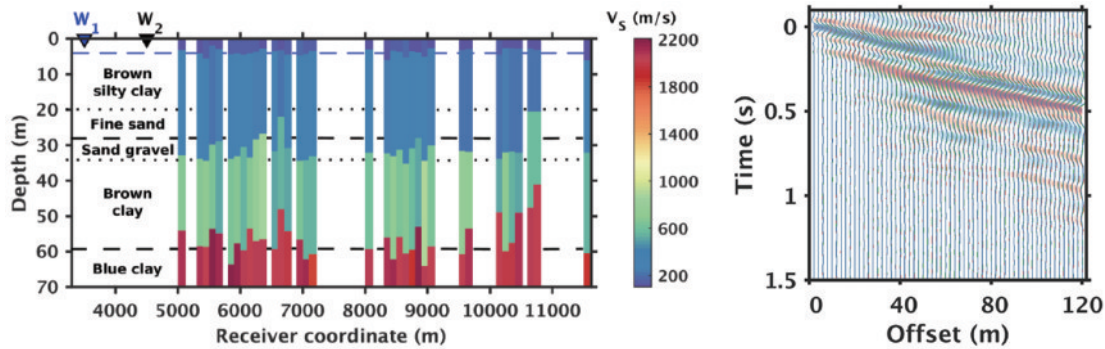


图9 近地表地层剪切波速度伪彩色成像与地下水位时移监测<sup>[83]</sup>

Fig. 9 Pseudo-color imaging of shear-wave velocity profiles and time-lapse monitoring of groundwater level<sup>[83]</sup>

## 5 可能的发展趋势

DAS在地震波检测领域的应用尚处于初步探索阶段,目前还存在一系列问题需要解决。首先,DAS低频灵敏度有待进一步优化。地震波的振动频段主要集中在200 Hz以下的低频段,最低可以达到mHz量级;而主流DAS为快速动态检测,受限于单频激光相位噪声和同步时钟精度的限制<sup>[84]</sup>,低频噪声较大,响应频段大多在10 Hz~100 kHz。在少数前沿研究报道中,DAS通过多次采样累积平均<sup>[57]</sup>与带通滤波技术<sup>[55]</sup>,可以检测到亚Hz频段的强烈地震信号,但仍然难以满足大规模应用的需要。有必要发展低相位噪声、高稳定性的单频激光光源技术或相位噪声补偿技术,结合时钟同源,优化DAS的低频段响应。其次,基于冗余通信光缆的大规模近地表地层分析需要高效实用的光缆定标方法。既有通信光缆的具体走向和光纤坐标通常较为模糊,敲击定标<sup>[56, 82]</sup>的现有方式难以满足大规模应用和城市化区域的要求,需要发展基于大数据分析的自适应定标方法<sup>[85]</sup>。最后,基于大规模密集探测的地球物理学机理尚不完善。现有地球物理学是在常规点式地震波探测的认知上进行构建的,地质灾害的详细成灾机理、演化过程等尚不明确,难以通过DAS数据获知地质演化状态。若要实现真正意义上的灾害预测,还需多领域专家的跨学科联合攻关。

## 6 结束语

DAS作为一种新兴的地震波检测手段,具有空间密集感知、长距离动态监测等不可替代的优势,已经在油气资源勘探、碳存储与监测、自然灾害探测、近地表地层分析等地球物理领域得到了初步应用。围绕DAS技术的传感物理机制、技术发展历

程、地震波应用进展等进行重点介绍,并对DAS技术可能面临的技术难题和发展方向进行了判断评述。有理由相信,DAS有望在自然灾害预测、智慧城市、全球变暖等人类广泛关注的领域发挥前所未有的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050001. 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050001.
- [2] 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.
- [3] Wu H J, Li X Y, Peng Z P, et al. A novel intrusion signal processing method for phase-sensitive optical time-domain reflectometry ( $\Phi$ -OTDR)[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91575O.
- [4] Huang J F, Xu T W, Feng S W, et al. Multiple disturbance detection and intrusion recognition in distributed acoustic sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10849: 108490E.
- [5] 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.
- [6] Tejedor J, Martins H F, Piote D, et al. Toward prevention of pipeline integrity threats using a smart fiber-optic surveillance system[J]. Journal of Lightwave



- Technology, 2016, 34(19): 4445-4453.
- [7] Stajanca P, Chruscicki S, Homann T, et al. Detection of leak-induced pipeline vibrations using fiber: optic distributed acoustic sensing[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2841-2859.
- [8] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(2): E355.
- [9] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204.
- [10] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [11] Ferguson R J, McDonald M A D, Basto D J. Take the *Eh?* train: distributed acoustic sensing (DAS) of commuter trains in a Canadian city[J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 183: 104201.
- [12] Wang Z Y, Lu B, Zheng H R, et al. Novel railway-subgrade vibration monitoring technology using phase-sensitive OTDR[C]//2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), April 24-28, 2017, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2017.
- [13] Mateeva A, Lopez J, Potters H, et al. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling[J]. Geophysical Prospecting, 2014, 62(4): 679-692.
- [14] Miller D, Parker T, Kashikar S, et al. Vertical seismic profiling using a fibre-optic cable as a distributed acoustic sensor[C]//74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012, June 4-7, 2012, Copenhagen, Denmark. Netherlands: EAGE Publications BV, 2012.
- [15] Byerley G, Monk D, Aaron P, et al. Time-lapse seismic monitoring of individual hydraulic frac stages using a downhole DAS array[J]. The Leading Edge, 2018, 37(11): 802-810.
- [16] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-03-16.
- [17] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [18] Liu Q W, Fan X Y, He Z Y. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25988-25995.
- [19] Pastor-Graells J, Martins H F, Garcia-Ruiz A, et al. Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13121-13133.
- [20] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, et al. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 842129.
- [21] He X G, Liu F, Qin M Z, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with heterodyne demodulation[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103235Q.
- [22] Wang Z Y, Lu B, Ye Q, et al. Recent progress in distributed fiber acoustic sensing with  $\Phi$ -OTDR[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6594-6620.
- [23] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011.
- [24] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2811-2816.
- [25] Wang C, Wang C, Shang Y, et al. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry[J]. Optics Communications, 2015, 346: 172-177.
- [26] 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.
- [27] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Stable dynamic phase demodulation in a DAS based on double-pulse  $\Phi$ -OTDR using homodyne demodulation and direct detection[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10654: 106540B.
- [28] Sheng Q H, Yu Z, Lu B, et al. Real-time phase-sensitive optical time-domain reflectometry signal processing system based on heterogeneous accelerated computing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104002.
- 盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的  $\Phi$ -OTDR 实时信号处理系统[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104002.

- [29] Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 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.
- [30] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130005.  
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等.  $\Phi$ -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.
- [31] Wang Z, Pan Z, Fang Z, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [32] Zhang J D, Zhu T, Zheng H, et al. Breaking through the bandwidth barrier in distributed fiber vibration sensing by sub-Nyquist randomized sampling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103238H.
- [33] Song M P, Zhuang S W, Wang Y X. High-frequency vibration detection of phase-sensitive optical time-domain reflectometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0506001.  
宋牟平, 庄守望, 王轶轩. 相位敏感光时域反射计的高频振动检测[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0506001.
- [34] Lu B, Zheng H R, Wang Z Y, et al. High spatial resolution  $\Phi$ -OTDR with long sensing distance[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: ThE25.
- [35] Chen D, Liu Q W, He Z Y. 108-km distributed acoustic sensor with  $220\text{-}\mu\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$  strain resolution and 5-m spatial resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4462-4468.
- [36] Feng S W, Xu T W, Huang J F, et al. Sub-meter spatial resolution phase-sensitive optical time-domain reflectometry system using double interferometers[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1899-1907.
- [37] Masoudi A, Newson T P. High spatial resolution distributed optical fiber dynamic strain sensor with enhanced frequency and strain resolution[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 290-293.
- [38] Gu J F, Lu B, Yang J Q, et al. High SNR  $\Phi$ -OTDR based on frequency and wavelength diversity with differential vector aggregation method[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 1-12.
- [39] Pastor-Graells J, Cortés L R, Martins H F, et al. 20 dB SNR enhancement in phase-sensitive OTDR using pulse stretching and recompression[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103230R.
- [40] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, et al. Distributed vibration sensing over 125 km with enhanced SNR using phi-OTDR over a URFL cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2628-2632.
- [41] Gu J F, Lu B, Yang J Q, et al. Distributed acoustic sensing based on a multi-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0706003.  
顾金凤, 卢斌, 杨竣淇, 等. 多芯光纤分布式声传感[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0706003.
- [42] Eyal A, Gabai H, Shpatz I. Distributed acoustic sensing: How to make the best out of the Rayleigh-backscattered energy? [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103230I.
- [43] Costa L, Martins H F, Martín-López S, et al. Fully distributed optical fiber strain sensor with  $10\text{-}12\ \epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$  sensitivity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4487-4495.
- [44] Reinsch T, Thurley T, Jousset P. On the mechanical coupling of a fiber optic cable used for distributed acoustic/vibration sensing applications: a theoretical consideration[J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(12): 127003.
- [45] Yan A D, Huang S, Li S, et al. Distributed optical fiber sensors with ultrafast laser enhanced Rayleigh backscattering profiles for real-time monitoring of solid oxide fuel cell operations[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 9360.
- [46] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. A Gaussian Mixture Model-Hidden Markov Model (GMM-HMM)-based fiber optic surveillance system for pipeline integrity threat detection[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: WF36.
- [47] Chen J P, Wu H J, Liu X R, et al. A real-time distributed deep learning approach for intelligent event recognition in long distance pipeline monitoring with DOFS[C]//2018 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), October 18-20, 2018, Zhengzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 290-2906.
- [48] Bernard M T F, Han D, An B. Pattern recognition

- algorithm and software design of an optical fiber vibration signal based on  $\Phi$ -optical time-domain reflectometry[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(31): 8423-8432.
- [49] 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 Journal*, 2015, 7(6): 1-10.
- [50] Masoudi A, Belal M, Newson T P. Distributed optical fibre audible frequency sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91573T.
- [51] Rohwetter P, Eisermann R, Krebber K. Distributed acoustic sensing: towards partial discharge monitoring [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 96341C.
- [52] Franciscangelis C, Margulis W, Florida C, et al. Vibration measurement on composite material with embedded optical fiber based on phase-OTDR[J]. *Proceedings of SPIE*, 10168: 101683Q.
- [53] Liang J J, Wang Z Y, Lu B, et al. Distributed acoustic sensing for 2D and 3D acoustic source localization[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(7): 1690-1693.
- [54] Wang Z Y, Zheng H R, Li L C, et al. Practical multi-class event classification approach for distributed vibration sensing using deep dual path network[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23682-23692.
- [55] Thomas M D, Barry M F, Ajo-Franklin J B, et al. Field test of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(6): 699-706.
- [56] Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2509.
- [57] Lindsey N J, Dawe T C, Ajo-Franklin J B. Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing[J]. *Science*, 2019, 366(6469): 1103-1107.
- [58] 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.
- [59] Fang Z J, Chin K K, Qu R H, et al. *Fundamentals of optical fiber sensors*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- [60] 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.
- [61] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. A contextual GMM-HMM smart fiber optic surveillance system for pipeline integrity threat detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4514-4522.
- [62] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H, et al. Machine learning methods for pipeline surveillance systems based on distributed acoustic sensing: a review[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(8): 841-867.
- [63] Aktas M, Akgun T, Demircin M U, et al. Deep learning based multi-threat classification for phase-OTDR fiber optic distributed acoustic sensing applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10208: 102080G.
- [64] Wang Z Y, Pan Z Q, Ye Q, et al. Novel distributed passive vehicle tracking technology using phase sensitive optical time domain reflectometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(10): 100603.
- [65] Cedilnik G, Hunt R, Lees G. *Advances in train and rail monitoring with DAS*[C]//*Optical Fiber Sensors 2018*, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: ThE35.
- [66] Shpalensky N, Shiloh L, Gabai H, et al. Use of distributed acoustic sensing for Doppler tracking of moving sources[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17690-17696.
- [67] Ku E M, Duckworth G L. Tracking a human walker with a fiber optic distributed acoustic sensor[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2013, 19: 070053.
- [68] Parker T, Shatalin S, Farhadiroushan M. Distributed acoustic sensing: a new tool for seismic applications[J]. *First Break*, 2014, 32(2): 61-69.
- [69] Zhou Z X, Zhuang S L. A lateral locating method for optical fiber distributed intrusion sensing system[J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 1-5.
- [70] Bakku S K. *Fracture characterization from seismic measurements in a borehole*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- [71] Ivan L C N, Sava P. Multicomponent distributed acoustic sensing: concept and theory[J]. *Geophysics*, 2018, 83(2): P1-P8.
- [72] Wang Z Y, Yang J Q, Gu J F, et al. Multi-source aliasing suppression for distributed fiber acoustic sensing with directionally coherent enhancement technology [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5672-5675.
- [73] Munn J D, Coleman T I, Parker B L, et al. Novel cable coupling technique for improved shallow distributed

- acoustic sensor VSPs[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, 138: 72-79.
- [74] 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]. *Geophysical Prospecting*, 2017, 65(1): 184-193.
- [75] Willis M E, Barfoot D, Ellmauthaler A, et al. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data[J]. *The Leading Edge*, 2016, 35(7): 605-609.
- [76] Harris K, White D, Melanson D, et al. Feasibility of time-lapse VSP monitoring at the Aquistore CO<sub>2</sub> storage site using a distributed acoustic sensing system [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 50: 248-260.
- [77] Daley T M, Miller D E, Dodds K, et al. Field testing of modular borehole monitoring with simultaneous distributed acoustic sensing and geophone vertical seismic profiles at Citronelle, Alabama[J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64(5): 1318-1334.
- [78] Correa J, Egorov A, Tertysnikov K, et al. Analysis of signal to noise and directivity characteristics of DAS VSP at near and far offsets: a CO<sub>2</sub>CRC Otway project data example[J]. *The Leading Edge*, 2017, 36(12): 994a1-994a7.
- [79] Correa J, Pevzner R, Bona A, et al. 3D vertical seismic profile acquired with distributed acoustic sensing on tubing installation: a case study from the CO<sub>2</sub>CRC Otway project[J]. *Interpretation*, 2019, 7(1): SA11-SA19.
- [80] Michlmayr G, Chalari A, Clarke A, et al. Fiber-optic high-resolution acoustic emission (AE) monitoring of slope failure[J]. *Landslides*, 2017, 14(3): 1139-1146.
- [81] Walter F, Gräff D, Lindner F, et al. Distributed acoustic sensing of microseismic sources and wave propagation in glaciated terrain[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2436.
- [82] Martin E R, Huot F, Ma Y B, et al. A seismic shift in scalable acquisition demands new processing: fiber-optic seismic signal retrieval in urban areas with unsupervised learning for coherent noise removal[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(2): 31-40.
- [83] 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(1): 1328.
- [84] Wu M, Fan X, Liu Q, et al. Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing system based on pulse compression technique and phase-noise compensation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5969-5972.
- [85] Huot F, Biondi B. Machine learning algorithms for automated seismic ambient noise processing applied to DAS acquisition[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts, August 27, 2018, Anaheim, California. South Yale: Society of Exploration Geophysicists, 2018: W20-03.