

基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术

蔡海文^{1, 2*}, 叶青^{1, 2}, 王照勇^{1, 2}, 卢斌^{1, 2}

¹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;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感(DAS)技术可以实时获取光纤沿线各位置的振动和声场信息, 具有传感范围大、时空精度高等独特优势, 近年来得到了多个领域研究学者的广泛关注。论述了 DAS 的基本传感机理, 概述了相干衰落抑制、响应带宽与空间分辨率提升等关键科学技术问题的研究进展, 介绍了 DAS 在安防、铁路等领域的应用进展, 并针对 DAS 技术未来可能的发展方向进行了评述与展望。

关键词 散射; 相干瑞利散射; 相敏光时域反射计; 光纤传感; 分布式光纤声波传感

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.050001

Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing Technology Based on Coherent Rayleigh Scattering

Cai Haiwen^{1, 2*}, Ye Qing^{1, 2}, Wang Zhaoyong^{1, 2}, Lu Bin^{1, 2}

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Centre of Materials Science and Optoelectronics Engineering,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Distributed optical fiber acoustic sensing (DAS) technology based on coherent Rayleigh scattering can obtain the vibration and sound field information along the optical fiber in real time. Recently, DAS has received extensive attention from scholars in many fields, due to its unique advantages such as large sensing range and high time-and-space resolution. In this paper, the fundamental sensing mechanism of DAS is introduced. The research progress on key scientific and technological issues, such as coherent fading suppression, response bandwidth enhancement, and spatial resolution optimization, is briefly reviewed. The application progress of DAS in perimeter security, rail transportation, and other fields is also described. Finally, the potential future research directions are discussed and speculated.

Key words scattering; coherent Rayleigh scattering; phase sensitive optical time domain reflectometry; fiber sensing; distributed optical fiber acoustic sensing

OCIS codes 290.5870; 290.5825

1 引言

先进的感知技术是大数据的来源、人工智能发展的基础, 是构建智慧地球、智慧城市、智慧海洋的关键支撑。分布式光纤声波传感(DAS)技术是一种可以实现振动和声场连续分布式探测的新型传感技

术, 利用窄线宽单频激光在光纤中激发的相干瑞利散射对应变变化高度敏感的特性, 结合光反射计原理, 对与光纤相互作用的环境振动与声场信息进行长距离、高时空精度的感知。DAS 独特的信息感知能力, 受到学术界和工业界的广泛关注。随着 DAS 技术性能的不不断提升, 其应用快速发展, 已在周界入

收稿日期: 2020-01-20; 修回日期: 2020-02-10; 录用日期: 2020-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(61535014, 61675216, 61905262, 61905260)、国家重点研发项目(2017YFB0405501)、上海市自然基金(18ZR1444600)、上海市科技委员会项目(18DZ1201303)

* E-mail: hwcai@siom.ac.cn

侵检测、铁路安全在线监测、地球物理勘探与地震学等工业应用和科学研究方面展示了独特的技术优势和潜力。本文从技术与应用两个维度,综述了 DAS 近年来的重要进展,分析了其进一步发展需要突破的关键问题及未来发展方向。

2 基本传感机理

随着 20 世纪 70 年代低损耗石英光纤的问世,相关领域学者开始深入研究光纤的损耗机制。在光纤的近红外吸收窗口,主要的光波损耗来源为瑞利散射^[1]。通过对后向瑞利散射的探测可以实现光纤损耗和缺陷的测试,该技术即为光时域发射计(OTDR)技术^[2]。在 20 世纪 80 年代初,随着多模光纤向单模光纤的发展,研究者在 OTDR 中发现了瑞利散射的干涉效应,探测到的瑞利背向散射光强度随时空的变化严重影响了光纤损耗评估的准确性^[3-4]。为解决这一问题,研究者们对相干瑞利散射的机理与特性进行了大量研究,相干光时域反射计随之产生,用于超长距离光纤通信线路状态的测量^[5-7]。20 世纪 90 年代初,Taylor 等^[8]提出利用瑞利散射的相干效应进行光纤沿线扰动探测的设想,Juškaitis 等^[9]于 1994 年发表了基于相干瑞利散射的分布式光纤传感的学术论文。在 2005 年前后,随着窄线宽单频激光器技术的成熟和商业化,相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)^[10]技术迅速发展。

Φ -OTDR 是基于光程变化对散射光相位的调制实现感知的,依据胡克定律、弹光效应等,外界扰动或环境变化会调制光纤长度 l 与光纤折射率 n_0 ,进而引起传输光波的光程发生变化,设光程变化量为 Δz_{path} ,则有

$$\begin{cases} \Delta z_{\text{path}} = (n_0 + \Delta n)(l + \Delta l) - n_0 l \\ \Delta n = e_z \xi n_0 \\ \Delta l = e_z \eta l \end{cases}, \quad (1)$$

式中: η 为弹性系数; ξ 为弹光系数; e_z 为光纤轴向应变。

后向瑞利散射光的相位变化量可表示为

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta z_{\text{path}}/\lambda, \quad (2)$$

式中: λ 为波长。

探测脉冲的后向散射光电场 \bar{E}_R 可表示为

$$\bar{E}_R = E_R \exp(j\varphi_R) = E_0 \exp(-\alpha z - j2\omega_s t_z + j2\beta z) \int_{\Delta z} r_R \exp(2j\beta y) dy, \quad (3)$$

式中: E_R 为散射光幅度; φ_R 为散射光相位; t_z 为入射光波由注入光纤至光纤位置 z 的往返传输时间;

E_0 为探测光电场幅度; ω_s 为光波角频率; r_R 为瑞利散射系数; $\beta = 2\pi n_0/\lambda$ 为传播常数。(2)式中积分部分为散射光的脉冲内干涉,相应光纤位置的光程变化将导致散射光幅度 E_R 和相位 φ_R 的变化。最初, Φ -OTDR 是通过直接探测方式获取相干瑞利散射回波的强度,实现外界扰动动态检测的^[8,11-12]。如图 1 所示,通过对前后时间内的强度信息进行差分,可以对扰动事件进行探测;利用脉冲散射光的往返时间,可实现对扰动事件的定位。但是,施加在光纤上的物理量变化与散射光强度并不是呈单调变化的,这一信号解调方式只能定性判断扰动事件的有无,无法直接获取扰动信号的准确波形。这一定性检测阶段的 Φ -OTDR 通常被称为分布式光纤振动传感(DVS)技术。

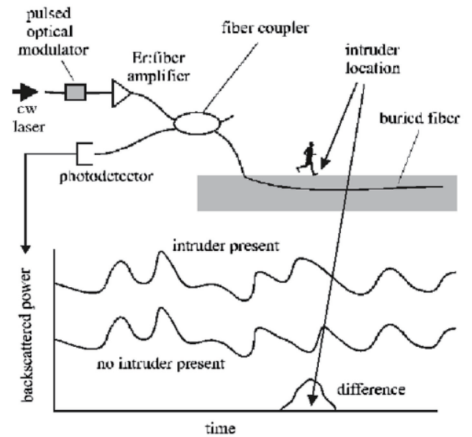


图 1 直接探测式 Φ -OTDR 与基于时间差分的入侵检测^[10]
Fig. 1 Direct detection Φ -OTDR and intrusion detection based on time difference^[10]

2011 年,Pan 等^[13]开展了基于光纤瑞利散射相位提取的 Φ -OTDR 技术研究,如图 2(a)所示,利用瑞利散射空间差分相位与外界振动的线性映射关系,通过空间差分处理,获得光纤沿线外界振动信号的量化分布式测量,实现了振动信号波形(幅频相)的量化测量,这标志着 Φ -OTDR 步入定量测量阶段,即实现了 DAS 技术。根据这一技术思想,可将外差相干探测信号表示为

$$I \propto 2E_{\text{LO}}E_R \cos \theta \cos(\Delta\omega t_z + \phi), \quad (4)$$

式中: E_{LO} 为本地光幅度; ϕ 为两光波的相位差; $\Delta\omega$ 为两光波的角频率差; θ 为偏振态夹角; t_z 为光沿 z 向传播的时间。利用数字相干相位解调方法,可得后向瑞利散射光的幅度与相位分别满足

$$\begin{cases} E_R \cos \theta \propto \text{abs} \left[\int I \exp(-j\Delta\omega t_z) dt_z \right] \\ \phi = \text{angle} \left[\int I \exp(-j\Delta\omega t_z) dt_z \right] + 2k\pi \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\text{abs}(\cdot)$ 表示求取输入的绝对值; $\text{angle}(\cdot)$ 表示求取输入的相位。通过对散射光相位进行空间差分,可以得到^[14]

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \Delta\phi_R + 2\beta\Delta z, \quad (6)$$

式中: ϕ_1 、 ϕ_2 、 β 为光波传播常数; Δz 为前后位置的空间间隔; $\Delta\phi_R$ 为空间差分前后位置的瑞利散射附加相移,可视为时间常量。显然,这一方法可以线性解调空间差分前后位置之间的光程变化,进而定量

探测光纤应变与外界物理量的变化。

随后,国内外研究学者分别提出了多种相位解调与量化测量方案,如图 2 所示,包括 IQ 解调技术^[15-17]、基于 3×3 耦合器的相位解调技术^[18-19]、相位生成载波 (PGC) 技术^[20-21]、双脉冲测量方案^[22-25]、基于直接探测的定量测量^[24,26-27] 等。此外,研究学者们还提出了基于啁啾脉冲与频移解调的定量测量方案^[28-30] 等。

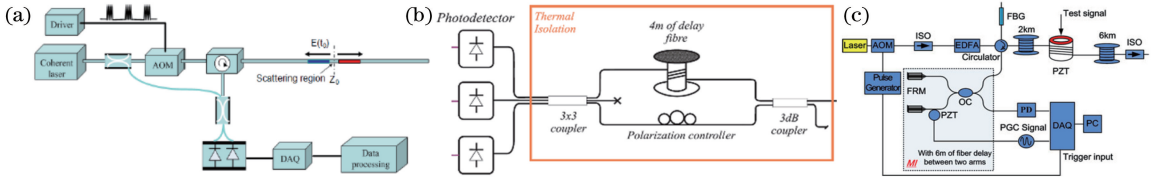


图 2 定量测量代表性方案。(a) 数字相干相位解调^[13]; (b) 3×3 耦合器方案^[18]; (c) PGC 方案^[20]

Fig. 2 Representative schemes of quantitative measurement. (a) Digital coherent phase demodulation^[13]; (b) scheme using 3×3 coupler^[18]; (c) PGC scheme^[20]

3 重要技术进展

为了解决 DAS 在发展与应用中面临的科学问题与技术瓶颈,研究者们开展了一系列研究,以提升系统性能指标,包括信号衰落、响应带宽、空间分辨率等。

3.1 信号衰落

DAS 探测信号受到两种衰落机制的影响,即干涉衰落和偏振衰落。偏振衰落源于传感光纤内探测脉冲和后向瑞利散射光的偏振态变化,散射光与本振参考光之间的偏振态不匹配,导致拍频信号能量

显著降低,拍频信号幅度变弱。偏振衰落主要采用分偏振接收^[11,31]、保偏结构^[32]等方式予以解决。干涉衰落则是由脉冲内干涉引起的,当出现干涉相消时,光强变弱,甚至淹没在噪声中。如图 3 所示,在强度/幅度解调系统中,干涉衰落会引起系统信噪比的恶化^[33],形成时空域的随机探测盲区;在相位解调的定量测量中,信号衰落会导致相位畸变,甚至产生虚假扰动。显然,脉冲内干涉既是 DAS 的传感机理,也是造成干涉衰落的根源,一直是影响 DAS 技术进一步发展的一大难题。

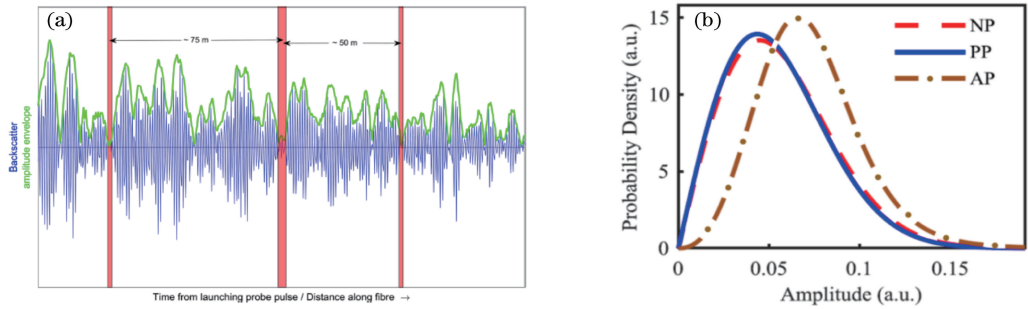


图 3 干涉衰落与散射光幅度的概率密度分布。(a) 干涉衰落^[34]; (b) 散射光幅度的概率密度分布^[35]

Fig. 3 Interference fading and probability density distribution of scattering light amplitude. (a) Interference fading^[34]; (b) probability density distribution of scattering light amplitude^[35]

前期,研究人员将干涉衰落归因于瑞利散射系数的随机波动,但是这一理论不能解释干涉衰落的时间缓变特性。随后,人们发现利用光纤折射率的非均匀分布能够更好地解释这一现象^[36]。国内外多个研究小组根据干涉衰落随脉冲激光频率的变化发生变化的特性,提出了频率分集^[36-38]、相位分集^[23,35]等方法,对多载波信号进行综合判

决或矢量合成^[39],进而抑制信号衰落的影响,如图 4 所示。类似地,基于光纤位置、光波横模模式对干涉衰落的影响,采取空间分集^[34-36]、模式分集^[40]等方法有效抑制衰落。多种研究证实,分集水平越高,衰落抑制效果越好。相较于其他方式,空间分集更易于实现大规模的分集,获得较好的衰落抑制效果。

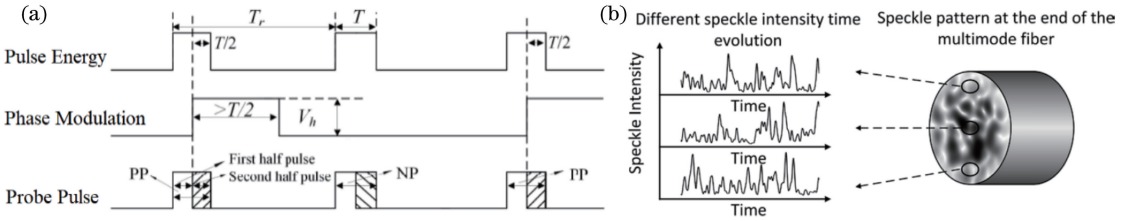


图 4 信号衰落抑制代表性方案。(a)相位分集^[35];(b)模式分集^[40]

Fig. 4 Representative schemes for signal fading suppression. (a) Phase diversity^[35]; (b) mode diversity^[40]

3.2 响应带宽

Φ -OTDR 系统具有传统 OTDR 无可比拟的高灵敏度和高信噪比,可以实现振动/声波的实时检测。振动、声波信号的高保真获取,通常需要较大的系统响应带宽。根据奈奎斯特采样定律,较大的响应带宽对系统询问频率-探测脉冲重复频率提出了较高的要求。在 OTDR 类传感系统中,探测脉冲的重复频率受到传感光纤长度的制约,传感范围越大,可实现的响应带宽越小。探测脉冲需在前一个探测脉冲的光纤末端散射光返回至接收端后才能发出,否则,两个脉冲的散射光会发生叠加,产生信号混叠。然而,在大型结构健康监测、接触网局部放电等应用领域中,既需要长距离分布式监测,又需要较大的响应带宽以对高频信号进行高保真探测。如何解决传感范围与响应带宽的矛盾,实现两者的同步提升,是 DAS 在应用发展中面临的一个重要问题。

2014 年,上海光学精密机械研究所研究团队提

出了多色光并行采样的思想^[41],如图 5(a)所示。多色光并行采样方法通过频率标记方式解决相邻脉冲信号混叠与脉冲间隔受限问题,在不牺牲传感范围的情况下有效增大了系统响应带宽,实现了 9.6 km 传感范围、0.5 MHz 响应带宽的分布式传感^[42]。日本 NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation)学者借鉴这一思想^[43],在 5 km 传感长度上实现了 80 kHz 响应带宽^[44];南京大学研究团队利用 330 m 超弱光栅阵列,结合多色光并行采样,实现了 440 kHz 频率的信号探测^[45]。

2015 年,重庆大学研究团队提出了周期非均匀采样方式,利用频率调谐对非均匀脉冲序列进行标记,在不加大探测带宽的情况下提升了频率响应,如图 5(b)所示,先后利用 3 km 光纤长度实现了最大 30 kHz 的频率响应^[46],基于 10 km 光纤长度实现了超过 50 个频率成分的稀疏宽带信号探测^[47]。

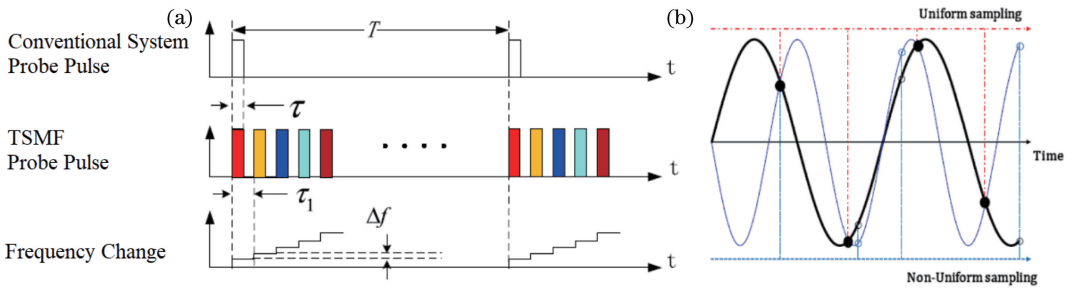


图 5 多色光并行采样和周期非均匀采样。(a)多色光并行采样^[42];(b)周期非均匀采样^[48]

Fig. 5 Multicolor parallel sampling and periodic non-uniform sampling. (a) Multicolor parallel sampling^[42];

(b) periodic non-uniform sampling^[48]

3.3 空间分辨率

空间分辨率是系统可分辨的最小空间间隔。在 Φ -OTDR 系统中,空间分辨率由脉冲宽度决定,设脉冲宽度为 t_w ,对应的空间分辨率 $\delta z = ct_w/2$ (其中 c 为光波在光纤中的传输速度)。要获得更高的空间分辨率,需要压窄脉冲宽度,但是脉冲宽度变窄会导致注入光能量减少,进而导致信噪比(SNR)和传感距离的减小。因此,空间分辨率与传感范围之间

存在矛盾的关系,不能同时满足高空间分辨率和长传感距离的应用需求,如大型结构建筑健康检测、铁轨与列车轮轴的裂纹检测等。

2017 年,上海光学精密机械研究所研究团队将光学脉冲压缩反射计技术^[49]与微波雷达的调频脉冲压缩概念引入分布式光纤传感^[50],如图 6 所示。用线性调频激光作为探测脉冲,利用较长的探测脉冲可确保接收端信号具有较高的信噪比(SNR)。同

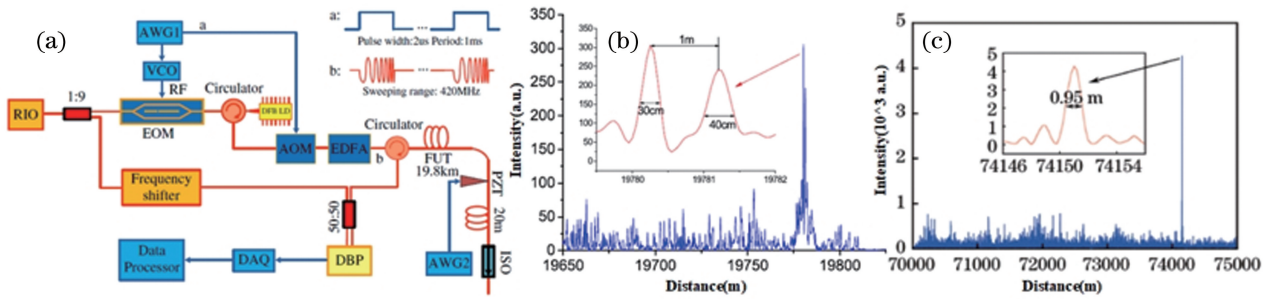


图 6 (a) 基于脉冲压缩的高空间分辨率技术; (b) 20 km 和 (c) 75 km 传感范围的实验结果^[50-51]

Fig. 6 (a) High spatial resolution technology based on pulse compression; experimental results with sensing distance of (b) 20 km and (c) 75 km^[50-51]

时,接收端通过匹配滤波近似于脉冲压缩的过程,获得较高的空间分辨率,在 20 km 传感范围的验证性实验中实现了 30 cm 空间分辨率;在 75 km 传感范围的验证性实验中实现了 0.95 m 空间分辨率^[51]。

4 重要应用进展

随着技术的不断完善,越来越多的研究者投入到相关领域的应用研究中,在周界安防、铁路运输、地球物理勘探、结构健康监测等领域取得了重要进展。

4.1 周界安防

边境线、机场、大型变电站等重要区域的安全,关系着国家政治稳定、人民生命与财产安全。DAS 系统具有环境适应性强、隐蔽性高、监测范围大、分布式无盲区等优点,特别适用于入侵源的被动式检测。近年来,基于 DAS 的光纤围栏在周界安防等领域受到了越来越广泛的关注。

2007 年, Juarez 等^[52]开展了 DAS 入侵检测应用研究,解决了入侵信号的探测与定位问题。在美国尤马海军航空站的废弃地带对 Φ -OTDR 的入侵检测效果进行了外场测试,测试装置如图 7 所示。通过在 8.5 km 的检测线上双向铺设光纤,实现了对步行入侵者以及附近公路行驶车辆的有效探测。

根据 DAS 探测到的大量复杂信号判断光纤沿

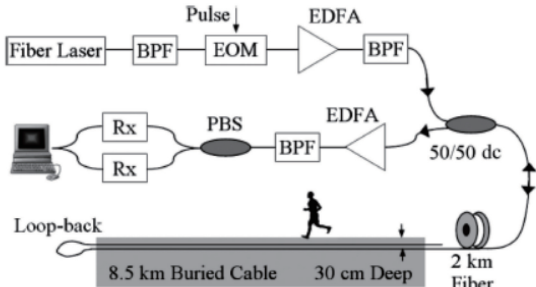


图 7 基于 DAS 的入侵检测外场测试^[52]

Fig. 7 Intrusion detection field test based on DAS^[52]

线发生了什么扰动、什么性质的入侵,这在周界安防应用中备受关注。因此,有必要对探测到的扰动信号进行初步识别,以便更加快速、准确地作出响应。Tejedor 等^[53-55]提出了基于支持向量机^[56]、高斯混合模型等传统机器学习方法,实现对入侵事件信号的探测与识别。以色列 Lihi Shiloh 团队以及南京大学、电子科技大学等多个团队提出了基于卷积神经网络的入侵信号识别与分类方法,解决了网络训练对现场数据需求量的问题与识别耗时问题^[57-58]。上海光学精密机械研究所创新地提出挖掘空间信息,利用时空频多维信息,结合频谱欧氏距离^[59]、双路径深层网络^[60],实现了高鲁棒性、高准确率入侵信号分类识别,测试结果如图 8 所示。

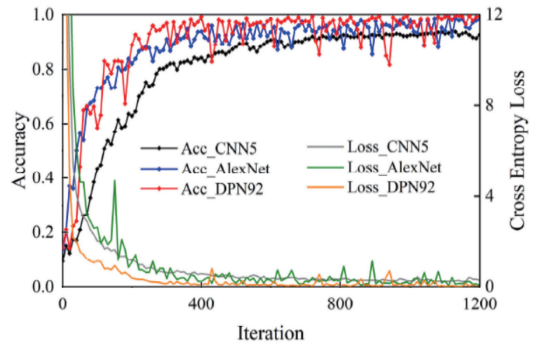


图 8 多分类识别的深度学习神经网络测试结果^[60]

Fig. 8 Test result of deep neural network using multi-classification recognition^[60]

4.2 铁路运输领域

随着铁路运输技术的快速发展,铁路运输压力不断提升,列车定位与轨迹监测、轮轨安全检测、沿线安全检测等对铁路安全运营具有重要意义。当前已经发展了多种成熟检测技术手段,但多为点式电磁学传感,需要现场供电,存在受强雷电等恶劣天气干扰的风险,且点式传感的设备量需求大,数据及硬件管理复杂。DAS 技术将无源光纤作为传感与传

输器件,可以实现光纤沿线扰动信号的空间连续感知,具有灵敏度高、无需现场供电、抗电磁干扰、可长距离分布式测量、单位距离成本低等特点,能够很好地弥补现有技术手段的缺点,符合铁路运输领域的应用需求,可以较为快速地融入到现有铁路线路中,并已经逐步在铁路运输领域的多个安全检测中得到重要应用。

在列车定位与轨迹监测方面,电子科技大学的饶云江课题组采用 DAS 技术,利用铁路沿线现有通信光缆,通过小波去噪方法对探测信号进行处理,实现了列车的长距离定位与速度监测,如图 9 所示^[61]。Cedilnik 等^[62]从列车与铁轨角度对列车行驶的二维振动数据进行分析,揭示了铁轨与列车的特性,为列车定位检测与铁轨健康监测提供了技术基础。

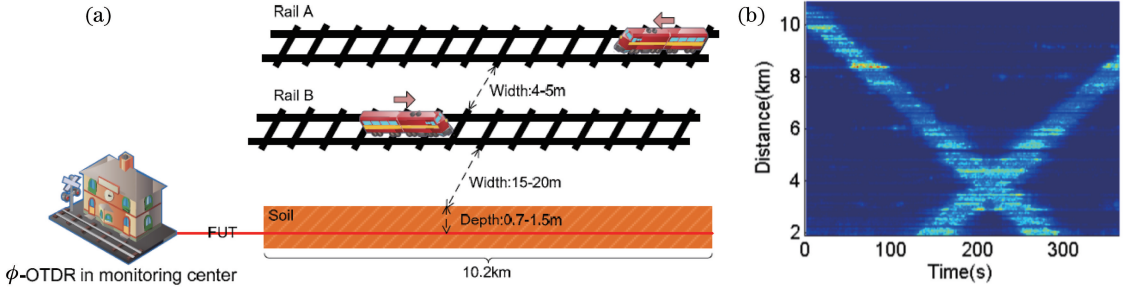


图 9 列车轨迹检测^[61]。(a)现场测试布设;(b)DAS 的瀑布图结果

Fig. 9 Train track detection^[61]. (a) Field test layout; (b) waterfall pattern with DAS

在铁路沿线安全检测中,需要对非法施工信号、环境噪声和列车行驶振动进行区分,并产生必要的警报^[63]。2013 年,英国 OptaSense 公司与美国 BNSF 运输公司率先提出了基于 DAS 的铁路沿线落石检测,检测准确率达到 95%^[64]。2017 年,上海光学精密机械研究所先后提出了基于多维综

合分析^[65]与深度学习^[66]的铁路沿线安全检测技术,如图 10 所示。利用动态频率空间图像分析方法消除环境噪声,利用多维综合分析方法进行列车识别、扰动识别,利用深度网络提取信号特征与分类识别,这些方法在多条实际线路中得到充分验证。

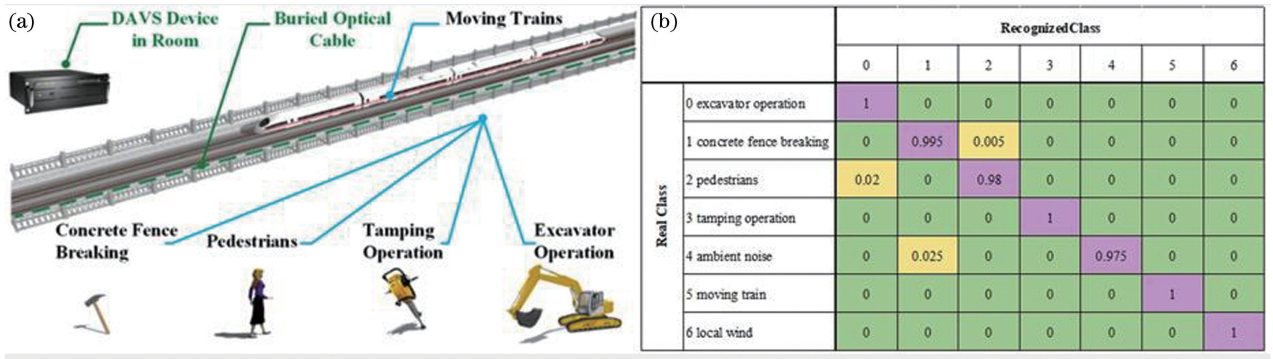


图 10 (a)基于 DAS 与 (b)多分类识别混淆矩阵的铁路沿线安全检测^[66]

Fig. 10 Railway safety monitoring based on (a) DAS and (b) confusion matrix of multi-classification recognition^[66]

4.3 油气资源勘探

油气资源勘探技术的发展会极大降低油气资源开采成本,影响世界能源布局。常规油气资源勘探技术多采用点式电子检波器,部署效率低,大规模实验耗时长,而且受高温、高压限制,难以应用于深井探测。发展新一代油气勘探感知技术和全周期智能监控系统,意义重大。DAS 可以分布式实时感知光纤沿线的扰动信息,满足地面检波仪、井中检波仪的

技术要求,可以在钻井、完井、生产等全生命周期发挥作用,成为重要的油气资源勘探手段。

2014 年,英国 Silixa 公司率先将 DAS 应用于海基自喷井的垂直地震剖面 (VSP) 探测^[67],成功实现了气枪激励源的地震波动信号,如图 11 所示。随后,Silixa 公司又提出了模块化钻井监测概念,并通过将探测的应变信号转换为等效的速度单位,实现了 DAS 与现有地震检波器的定量化性能评估^[68]。

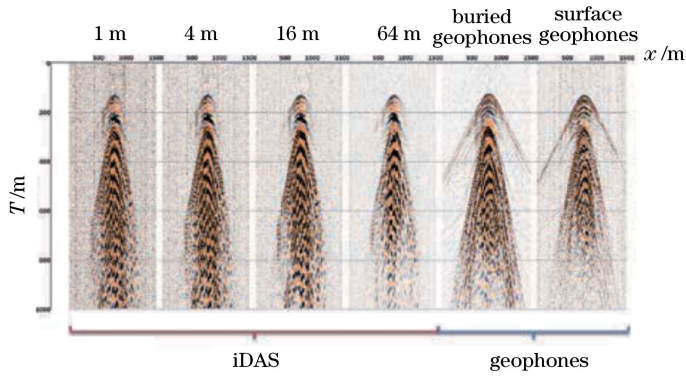


图 11 DAS 与常规地震检波器的探测数据^[67]

Fig. 11 Detection data of DSA and conventional seismometer^[67]

2016 年, Harris 等^[69]将 DAS 应用于二氧化碳存储的时延 VSP 监测, 如图 12 所示。通过在观察井内布设光缆, 对距离 150 m 的注入井进行监测, 实现了最小 27 kt 二氧化碳的 10 m 级储层地震波探测。2018 年, 美国 Apache 公司报道了将 DAS 应用于水平页岩井的压裂监测研究^[70], 分别在钻井、完井阶段监测压裂过程的时移地震响应, 揭示了时

延地震响应的新视角, 如图 13 所示。2019 年, Correa 等^[71]研究了 DAS 在既有钻井中的 VSP 探测可行性。将光缆放置于注入井的生产油管中, 虽然振动信号耦合变差, 但是依然能够实现 20 km 信号的有效探测。近年来, 国内也有多家单位开展了相关研究, 特别是电子科技大学与中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司合作取得了突破性进展。

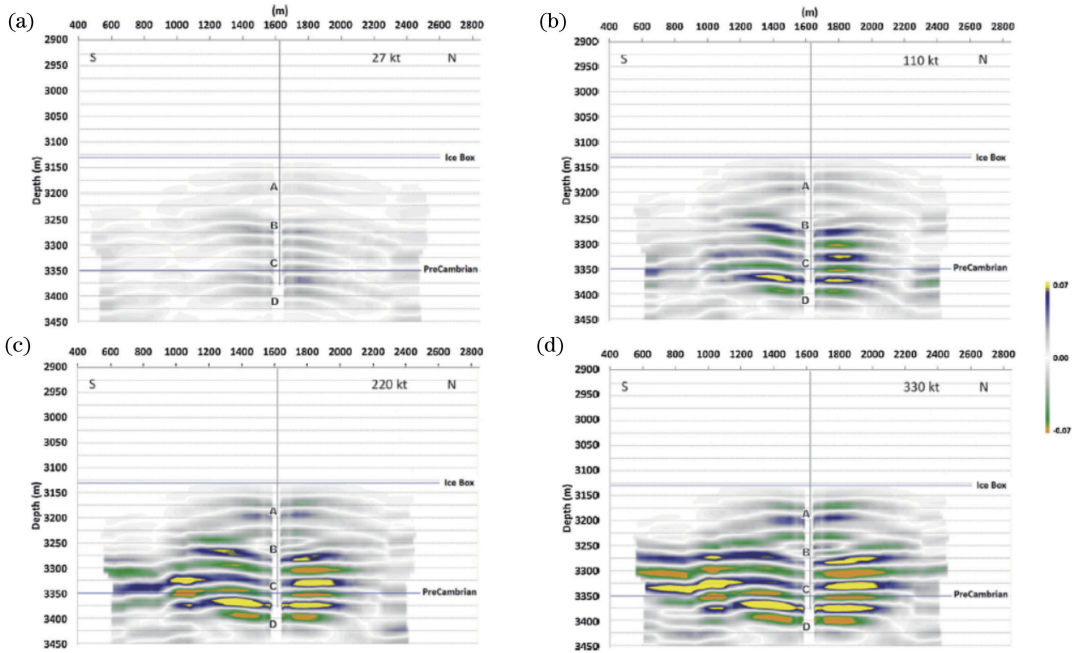


图 12 不同二氧化碳注入量的地震波信号^[69]。(a) 27 kt; (b) 110 kt; (c) 220 kt; (d) 330 kt

Fig. 12 Seismic signals for different injected volume of CO₂^[69]. (a) 27 kt; (b) 110 kt; (c) 220 kt; (d) 330 kt

4.4 结构健康监测

结构健康监测可以提供早期损伤的诊断信息, 对物理设施管理具有重要意义。光纤具有尺寸小、质量轻等特点, 易于嵌入到复合材料、建筑材料、土壤介质等结构中, 采用 DAS 技术可以方便地实现材料与结构的永久性在线探测。

2016 年, Franciscangelis 等^[72]提出将 DAS 技术应用于航空航天复合材料的健康监测中, 如图 14 所示。通过将标准单模光纤嵌入复合材料板中, 对振动源进行实时定位, 并评估探测信号的频率成分, 实现材料疲劳、结构颤振的实时在线检测。

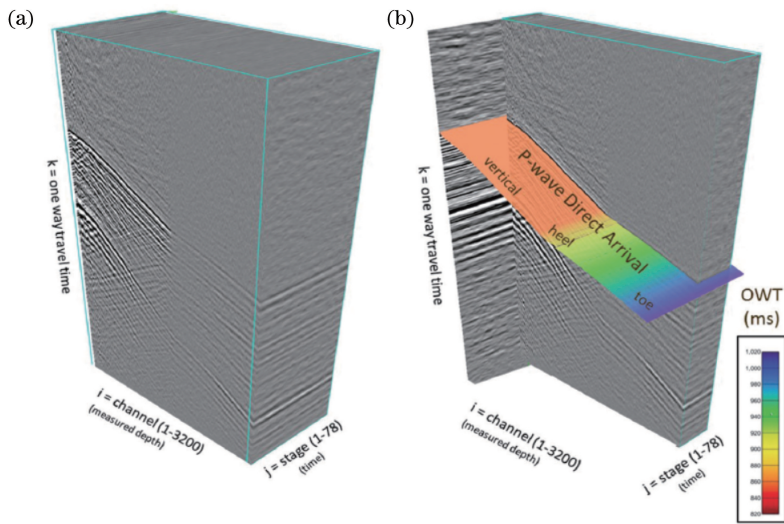


图 13 基于 DAS 的 VSP 信号^[70]。(a)三维分布;(b)可视化

Fig. 13 VSP signals based on DAS^[70]. (a) 3D distribution; (b) visualization

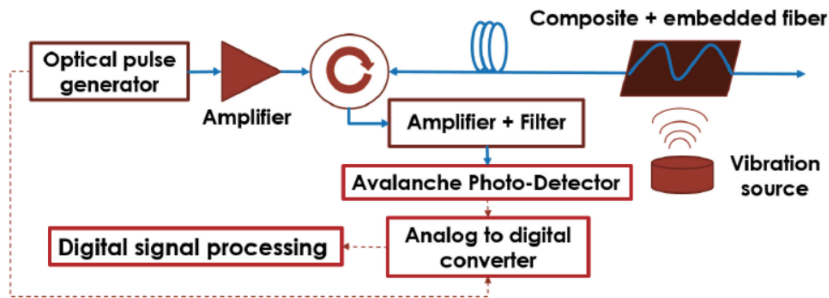


图 14 基于嵌入光纤的复合材料结构监测^[72]

Fig. 14 Monitoring of composite material structure with embedded fiber^[72]

2017 年, Michlmayr 等^[73] 提出利用声发射对滑坡进行检测, 实现滑坡崩塌的提前预警, 如图 15 所示。该方法利用 DAS 的高时空分辨率与大覆盖范围特性, 探测声发射信息, 有效获取滑坡产生的弹性

波, 并提供对浅层滑坡与快速板块移动的大范围 (km 级尺度) 检测预警, 实现了地质灾害的全天候、高精度、大带宽实时检测与提前预警。

随后, Filograno 团队、南安普顿大学 Newson 团队分别研究了用于结构健康监测的低成本 DAS 技术^[74] 和频率提升与灵敏度提升技术^[75], 为结构健康监测提供了有益的工程指导与技术支撑。

5 未来发展趋势

在国内外多个研究团队的共同努力下, DAS 技术的探测能力与应用领域得到了迅猛发展。DAS 技术的大规模、高时空精度、动态定量探测能力, 使其不仅在入侵检测、铁路运输、资源勘探、结构健康监测等领域得到深入应用, 而且有望解决地球物理探测、海洋水声探测、电缆局放检测等领域的技术难题。但是, 受限于相对较低的灵敏度、光纤轴向一维探测能力, DAS 技术尚未在相应领域得到广泛应用。因此, 从 DAS 的应用与技术发展角度来看, 该领域未来值得关注的研究方向主要有以下 3 个方面。

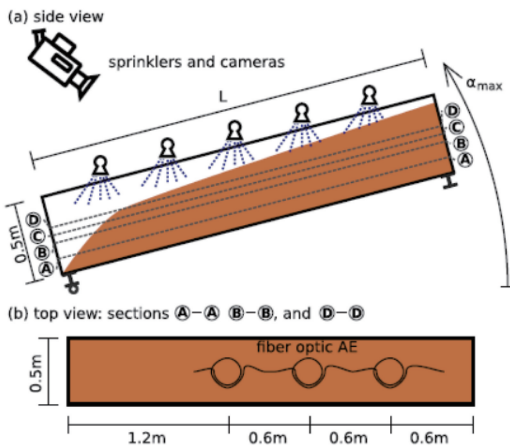


图 15 基于声发射的滑坡检测模型实验^[73]。

(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 15 Experiment of landslide detection model based on acoustic emission^[73]. (a) Side view; (b) top view

5.1 地球物理与自然灾害探测

地球物理与自然灾害探测需要大规模空间密集的地震检测手段,传统地震波探测手段为点式电子传感器,高昂的组网成本和稀疏的空间布设限制了该学科领域的发展。DAS 具备高时空精度探测能力,可以将光纤转换为大型传感器阵列,低成本、高

精度地实现地球物理勘探与地震探测,近年来逐渐得到相关领域学者的关注^[76-78]。

2017 年, Dou 等^[76] 利用 DAS 进行城市近表面地震波检测的相关工作,利用通信光缆作为传感阵列,将交通噪声作为激励,分析土壤含水量、永久冻土融化等城市地质情况,并取得了不错的效果,如图 16 所示。

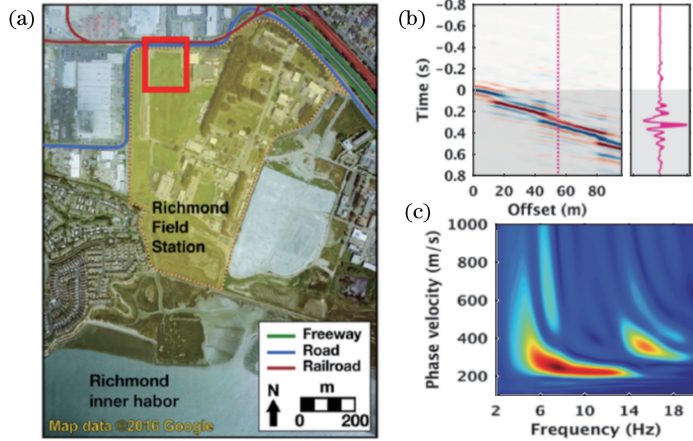


图 16 基于交通噪声的地质监测^[76]。(a) 光缆布设;探测信号的(b)时空分布与(c)频谱分布

Fig. 16 Geological monitoring based on traffic noise^[76]. (a) Optical cable layout; (b) time-space distribution and (c) spectral distribution of detection signal

2018 年, Jousset 等^[77] 利用高空间分辨率的 DAS 系统进行地震波探测,如图 17 所示。他们利用既有的通信光缆进行地震波监测,不仅实现对地震源的定位,而且基于 DAS 系统的高灵敏度和高空

间分辨能力,发现了传统地震波探测领域没有发现的反射波现象。该研究充分表明, DAS 可以充分发挥全球范围的大规模冗余通信光缆的作用^[79],为地球物理勘探、自然灾害探测提供全新的技术手段。

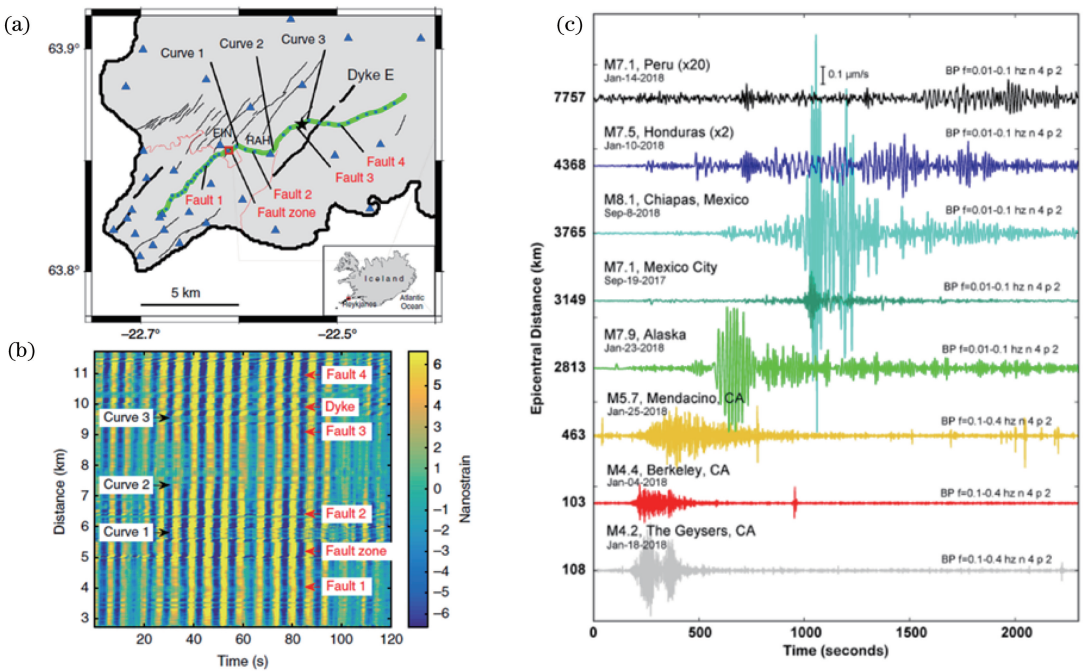


图 17 基于通信光缆的地震信号探测。(a) 光缆位置及走向^[77]; (b) DAS 获取的地震信号^[77]; (c) 不同位置处的地震信号^[79]

Fig. 17 Seismic signal detection based on communication cable. (a) Position and direction of cable^[77]; (b) seismic signals obtained by DAS^[77]; (c) seismic signals at different positions^[79]

2019年,Lindsey等^[78]利用既有的海底通信光缆,通过对微地震波场的探测,发现了多个海底断层

区域,并研究分析了次微震、潮汐、沙尘暴、长重力波等多类环境噪声的影响,如图18所示。

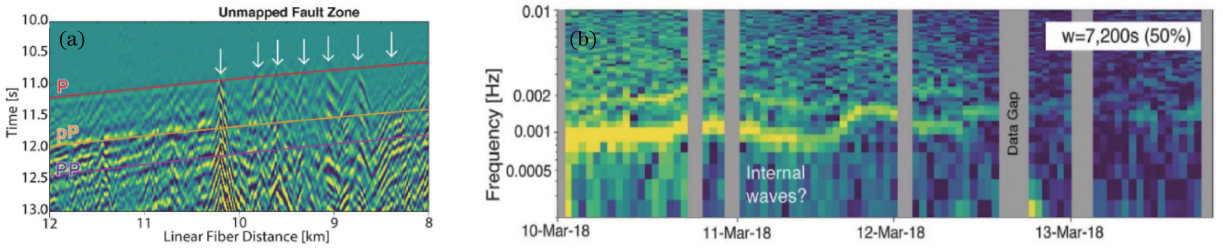


图18 基于既有通信光缆与DAS技术的地质探测^[78]。(a)地图上未标记的断层区域; (b)可能源于地球内部波的低频谐波噪声

Fig. 18 Geological detection based on existing communication cable and DAS technique^[78].

(a) Unmarked fault zone on map; (b) low-frequency harmonic noise possibly derived from waves in the earth's interior

5.2 提升探测灵敏度

DAS是高灵敏的分布式光纤传感技术,但是其灵敏度相较于点式传感技术还有很大的差距。根据文献[33]中的理论模型,系统灵敏度与散射光的强度成正比,极低的瑞利散射系数(-60 dB ~ -50 dB)决定了DAS的灵敏度远低于点式传感技术。为使分布式传感这一极大的优势在多种领域得到广泛应用,需要进一步提升DAS技术的灵敏度。

在实际工程应用中,已有科研学者提出了用多种优化光纤传感头结构或布设方式^[80-82]代替常规的既有通信光缆,以改善外界信号与光纤之间的耦合效率。这一方式较为适合点式探测,但不适合长距离分布式探测,有必要从传感机理出发深入研究

DAS灵敏度的提升方法。Loranger等^[83]、Yan等^[84]分别提出了基于紫外辐照、超快激光处理的瑞利散射增强技术,极大提升了DAS技术的信噪比与灵敏度,如图19所示。2018年,美国海军研究实验室提出了基于多模光纤的高灵敏DAS技术^[85](图20),利用高速相机构成离轴全息系统,利用多模光纤带来的非线性效应阈值高、瑞利散射收集孔径大与多空间横模等优势,实现了高灵敏度探测,系统最小相位噪声低至-80 dB。然而,现有技术是基于特种光纤,不适用于大规模既有通信光纤网络,不利于DAS技术的应用推广。如何在常规单模通信光纤上实现灵敏度的极大提升,是这一领域的重要研究课题。

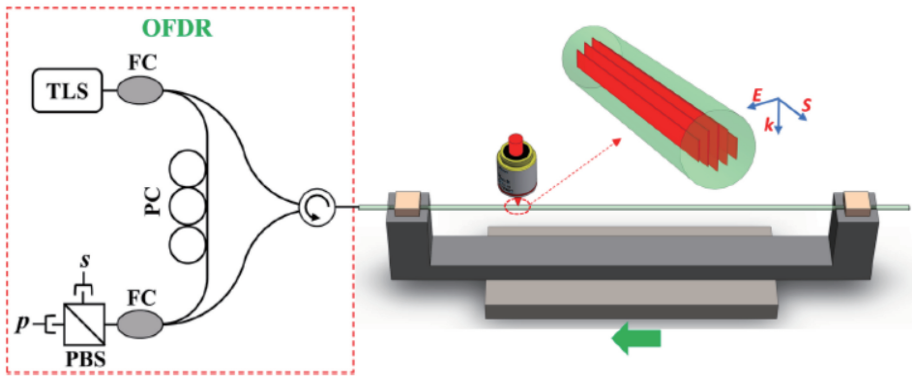


图19 基于超快激光的瑞利散射增强技术的方案示意图^[84]

Fig. 19 Diagram of Rayleigh scattering enhancement technique based on ultrafast laser^[84]

5.3 分布式三维探测能力

当前,DAS探测能力依然受限于光纤轴向一维探测与定位,难以获取扰动源至光纤的横向距离,也不具备对空间多分量信号的探测能力,分布式传感特性并没有得到充分研究与利用,还具有很大的研究与发展空间。

在分布式空间定位方面,Shpalensky等^[86]于2018年提出基于点式探测思想与多普勒频移效应的移动目标二维定位技术。2019年,Liang等^[87]采用分布式传感的空间连续感知信息,提出了DAS分布式密集阵列模型与基于阵列信号处理的分布式空间定位方法,如图21所示。分布式空间定位能力有

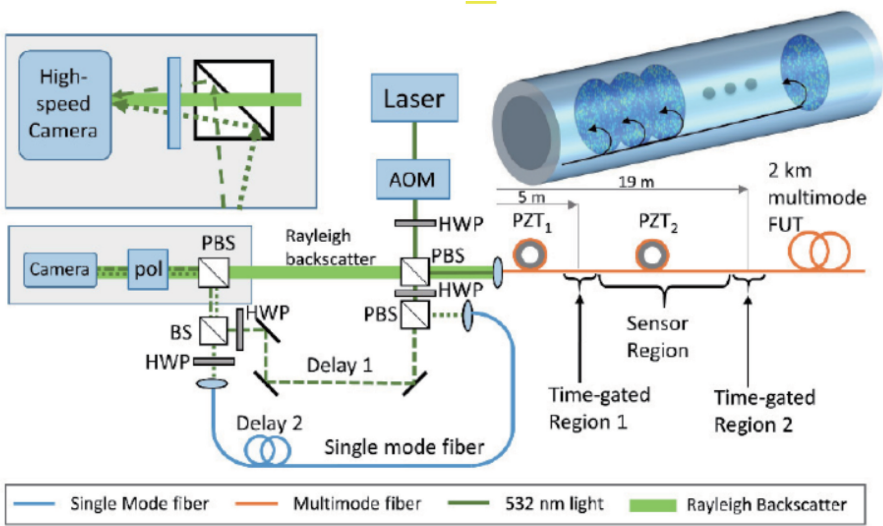


图 20 基于多模瑞利散射的 DAS 原理框图^[85]

Fig. 20 Principle of DAS based on multimode Rayleigh scattering^[85]

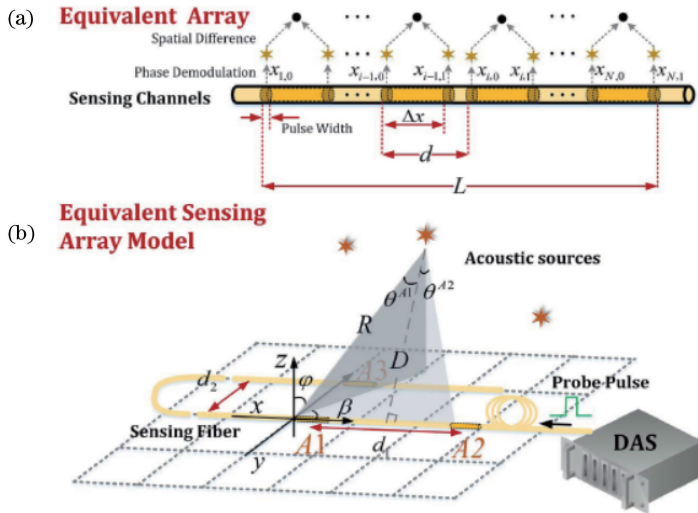


图 21 分布式传感阵列模型与等效传感阵列^[87]。(a)分布式传感阵列模型；(b)等效传感阵列

Fig. 21 Model of distributed sensing array and equivalent sensing array^[87]. (a) Model of distributed sensing array; (b) equivalent sensing array

助于提供更为全面的信号源信息,解决周界安防、铁路运输、结构健康检测等现有应用领域的技术难题,拓展 DAS 在海洋水声探测、无人机反制等领域的应用。

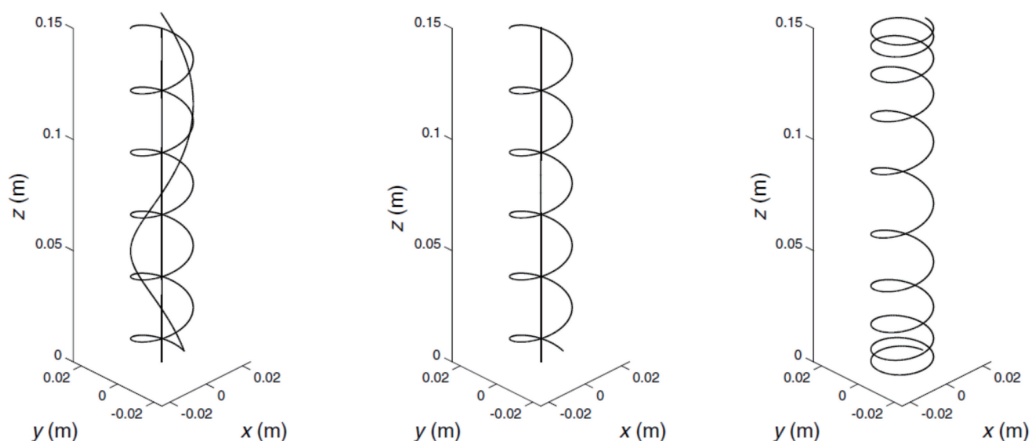
在分布式多分量测量方面,Den Boer 等^[88-89]通过设计传感光纤布置的几何构型,测量外界多分量振动在光纤各个位置处的轴向标量,然后通过反演模型实现多分量测量的理论设想,利用在不同平面弯折的光纤分别对三个分量进行测量,如图 22 所示。分布式多分量探测能力有助于获取光纤沿线各方向的应变波形,解决油气资源勘探、地震探测等领域对多维探测能力的需求问题,提升 DAS 的性能与应用潜力。不过,现有方案需要 cm 级空间分辨率,

否则,将难以实现待测信号重建^[89],无法保证光纤几何构型的小型化,不利于推广应用。

因此,如何充分挖掘 DAS 的分布式、高时空精度的空间连续感知信息,解决 DAS 的空间定位与多分量探测问题,实现 DAS 探测能力由一维到多维的飞跃,也是 DAS 技术的未来发展趋势。

6 结束语

DAS 技术具有空间连续感知的独特优势,在国内外科研团队的共同努力下,响应带宽、空间分辨率等性能指标得到了大幅度提升,DAS 技术已经在周界安防、铁路运输、地球物理勘探、结构健康监测等领域得到了广泛应用。围绕 DAS 技术的性能指标

图 22 多分量测量中三种光纤空间构型^[89]Fig. 22 Three kinds of geometry configurations of optical fibers for multi-component measurement^[89]

提升、技术应用进展等进行重点介绍,并对 DAS 技术当前面临的问题及未来发展趋势进行判断与评述。有理由相信,随着相关技术的不断完善,DAS 有望在更为广阔的领域得到深入应用。

参 考 文 献

- [1] Fang Z J, Chin K K, Qu R H, et al. Fundamentals of optical fiber sensors[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 496.
- [2] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. Applied Optics, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [3] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. Applied Physics Letters, 1981, 39(9): 693-695.
- [4] Healey P, Malyon D. OTDR in single-mode fibre at 1.55 μm using heterodyne detection[J]. Electronics Letters, 1982, 18(20): 862-863.
- [5] King J P, Smith D F, Richards K, et al. Development of a coherent OTDR instrument [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(4): 616-624.
- [6] Healey P. Fading rates in coherent OTDR [J]. Electronics Letters, 1984, 20(11): 443-444.
- [7] Healey P. Fading in heterodyne OTDR [J]. Electronics Letters, 1984, 20(1): 30-32.
- [8] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US005194847A [P]. 1993-03-16.
- [9] Juškaitis R, Mamedov A M, Potapov V T, et al. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber[J]. Optics Letters, 1994, 19(3): 225-227.
- [10] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [11] Juarez J C, Taylor H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3284-3286.
- [12] Rao Y J, Luo J, Ran Z L, et al. Long-distance fiber-optic Φ -OTDR intrusion sensing system [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 75031O.
- [13] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8311: 83110S.
- [14] Wang Z Y. Study on key technologies of long-haul Φ -OTDR [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
王照勇. 长距离 Φ -OTDR 关键技术研究 [D]. 上海: 中国科学院大学, 2017.
- [15] Pouet B, Breugnot S, Clémenceau P. Robust laser-ultrasonic interferometer based on random quadrature demodulation [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 820: 233.
- [16] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858.
- [17] Dong Y K, Chen X, Liu E H, et al. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer [J]. Applied Optics, 2016, 55(28): 7810-7815.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse ϕ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 687-701.
- [22] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse diverse frequency probe signal [J]. *Laser Physics*, 2015, 25(6): 065101.
- [23] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, et al. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 842129.
- [24] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse ϕ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 687-701.
- [25] He X G, Liu F, Qin M Z, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with heterodyne demodulation[C] // 25th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2017: 1-4.
- [26] Wang Z N, Zhang B, Xiong J, et al. Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6117-6124.
- [27] Sha Z, Feng H, Zeng Z M. Phase demodulation method in phase-sensitive OTDR without coherent detection[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 4831-4844.
- [28] Zhou L, Wang F, Wang X C, et al. Distributed strain and vibration sensing system based on phase-sensitive OTDR [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(17): 1884-1887.
- [29] 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.
- [30] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Distributed fiber-optic acoustic sensor with sub-nano strain resolution based on time-gated digital OFDR [C] // Asia Communications and Photonics Conference, Guangzhou, Guangdong. Washington, D.C.: OSA, 2017: S4A.2.
- [31] Ren M Q, Lu P, Chen L, et al. Theoretical and experimental analysis of Φ -OTDR based on polarization diversity detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 697-700.
- [32] 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.
- [33] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5648-5651.
- [34] Hartog A H, Liokumovich L B, Ushakov N A, et al. The use of multi-frequency acquisition to significantly improve the quality of fibre-optic-distributed vibration sensing [J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(S1): 192-202.
- [35] Wang X, Lu B, Wang Z Y, et al. Interference-fading-free Φ -OTDR based on differential phase shift pulsing technology [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 39-42.
- [36] 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]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2947-2954.
- [37] Hartog 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] // 78th EAGE Conference and Exhibition 2016, May 30-June 2, 2016. Vienna, Austria. Netherlands: EAGE Publications BV, 2016: 192-202.
- [38] 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.
- [39] Chen D, Liu Q W, He Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [40] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al.

- Fading reduction in a phase optical time-domain reflectometer with multimode sensitive fiber [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(9): 095101.
- [41] 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.
- [42] Wang Z Y, Pan Z Q, Fang Z J, 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.
- [43] Iida D, Toge K, Manabe T. High-frequency distributed acoustic sensing faster than repetition limit with frequency-multiplexed phase-OTDR [C] // *Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California. Washington, D.C. : OSA, 2016: M2D.6.*
- [44] Iida D, Toge K, Manabe T. Distributed measurement of acoustic vibration location with frequency multiplexed phase-OTDR [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 19-25.
- [45] Zhang Y X, Fu S Y, Chen Y S, et al. A visibility enhanced broadband phase-sensitive OTDR based on the UWFBG array and frequency-division-multiplexing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 101995.
- [46] 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.
- [47] Zhang J D, Zheng H, Zhu T, et al. Distributed fiber sparse-wideband vibration sensing by sub-Nyquist additive random sampling [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 2022-2025.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Lu B, Wang Z Y, Zheng H R, et al. The achievement of high spatial resolution and long haul distributed 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实现 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1015001.
- [52] 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.
- [53] 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*, 2017, 17(2): E355.
- [54] Sun Q, Feng H, Yan X Y, et al. Recognition of a phase-sensitivity OTDR sensing system based on morphologic feature extraction [J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 15179-15197.
- [55] Tan D J, Tian X Z, Sun W, et al. An oil and gas pipeline pre-warning system based on Φ -OTDR [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 91578W.
- [56] 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.
- [57] Jiang F, Li H L, Zhang Z H, et al. An event recognition method for fiber distributed acoustic sensing systems based on the combination of MFCC and CNN [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10618: 1061804.
- [58] 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. IEEE, 2018: 290-296.
- [59] 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.
- [60] Wang Z Y, Li L C, Zheng H R, et al. Smart distributed acoustics/vibration sensing with dual path network [C] // *26th International Conference on Optical Fiber Sensors, Lausanne. Washington, D.*

- C.: OSA, 2018: WF105.
- [61] Duan N, Peng F, Rao Y J. Field test for real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91577A.
- [62] Cedilnik G, Hunt R, Lees G. Advances in train and rail monitoring with DAS[C]//Conference of Optical Fiber Sensors, 2018: ThE35.
- [63] He Z Y, Liu Q W, Fan X Y, et al. Fiber-optic distributed acoustic sensors (DAS) and applications in railway perimeter security [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10821: 1082102.
- [64] Akkerman J, Prahel F. Fiber optic sensing for detecting rock falls on rail rights of way [M]. Washington: AREMA, 2013: 1099-1118.
- [65] Wang Z Y, Lu B, Zheng H R, et al. Novel railway-subgrade vibration monitoring technology using phase-sensitive OTDR [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103237G.
- [66] 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.
- [67] Parker T, Shatalin S, Farhadiroushan M. Distributed acoustic sensing - a new tool for seismic applications [J]. First Break, 2014, 32: 61-69.
- [68] 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.
- [69] Harris K, White D, Melanson D, et al. Feasibility of time-lapse VSP monitoring at the AquistoreCO₂ storage site using a distributed acoustic sensing system[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 50: 248-260.
- [70] 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.
- [71] 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 CO₂CRC Otway Project[J]. Interpretation, 2019, 7(1): SA11-SA19.
- [72] Franciscangelis C, Margulis W, Florida C, et al. Aircraft distributed structural health monitoring based on φ -OTDR [C]. Aerospace Technology Congress, 2016.
- [73] 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.
- [74] Filograno M L, Riziotis C, Kandyla M. A low-cost phase-OTDR system for structural health monitoring: design and instrumentation [J]. Instruments, 2019, 3: 46.
- [75] Masoudi A, Newson T P. Distributed optical fibre sensing with enhanced frequency range and sensitivity for structural health monitoring [C] // Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF), Vancouver. Washington, D. C.: OSA, 2016: SeM3D.2.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] Steven L G, David A B, Brian L B, et al. General purpose fiber optic hydrophone made of castable epoxy[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1367: 13-29.
- [81] Philipp R, René E, Katerina K. Distributed acoustic sensing: Towards partial discharge monitoring [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 96341C.
- [82] Murray M J, Davis A, Redding B. Fiber-wrapped mandrel microphone for low-noise acoustic measurements[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3205-3210.
- [83] Loranger S, Gagné M, Lambin-Iezzi V, et al. Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11177.
- [84] 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(1): 9360.
- [85] Murray M J, Davis A, Redding B. Multimode fiber Φ -OTDR with holographic demodulation[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23019-23030.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] Den Boer J J, Koelman J M V A, Pearce J G, et al. Fiber optic cable with increased directional sensitivity: US9091589B2[P]. 2015.07.28.
- [89] Ivan L, Chen N, Paul S. Multicomponent distributed acoustic sensing: Concept and theory [J]. Geophysics, 2018, 83(2): P1-P8.