

激光与光电子学进展

基于相位解调的相位敏感光时域反射计研究

司召鹏, 卜泽华, 毛邦宁*, 赵春柳**, 徐贲, 康娟, 李裔, 金尚忠

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 基于相位敏感的光时域反射计(Φ -OTDR)通过发射光脉冲到传感光纤内,利用分析传感光纤的后向瑞利散射光或前向散射光的方法对入侵扰动事件进行识别和定位。对比其他光纤分布式传感技术, Φ -OTDR能够长距离分布式多点测量,精度高、可靠性好,研究 Φ -OTDR具有重要的应用价值。本文介绍了 Φ -OTDR的基本原理、结构、系统性能、信号解调和应用情况,并对 Φ -OTDR技术进行了展望。

关键词 光纤光学; 相位敏感光时域反射; 分布式光纤传感; 扰动检测; 信号调制

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.1100007

Review of Research on Phase Sensitive Optical Time-Domain Reflectometer Based on Phase Demodulation

Si Zhaopeng, Bu Zehua, Mao Bangning*, Zhao Chunliu**, Xu Ben, Kang Juan,

Li Yi, Jin Shangzhong

College of Optics and Electronic Science and Technology, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, Zhejiang, China

Abstract Phase sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR) transmits light pulses into the sensing optical fiber, and uses the method of analyzing the back Rayleigh scattered light or forward scattered light of the sensing fiber to identify and analyze intrusion disturbance events. Compared with other distributed optical fiber sensing technology, Φ -OTDR can perform long-distance distributed multi-point measurement with high accuracy and reliability. The study of Φ -OTDR has important application value. In this paper, the basic principle, structure, system performance, signal demodulation, and application of Φ -OTDR are introduced, and the extension Φ -OTDR technology is prospected.

Key words fiber optics; phase sensitive optical time-domain reflection; distributed optical fiber sensing; disturbance detection; signal modulation

1 引言

随着物联网时代的快速发展,信息感知的重要性越来越多地体现在社会生产的各个方面,分布式光纤传感技术是现代众多传感技术中发展最迅速

的分支之一,分布式光纤传感技术以光作为信息的载体,光纤作为传播媒介,是通过解析传感光纤中的光信号来获取其中蕴藏的有用信息的一种新型传感技术,特别是对于相位敏感型光时域反射计(Φ -OTDR),该装置可实现现实空间连续的全尺度

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-07-27; 录用日期: 2021-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFF0217800)、国家自然科学基金(61775202)、广东省信息光子技术重点实验室开放课题基金(GKPT20-04)

通信作者: *maobangning@cjlu.edu.cn; **clzhao@cjlu.edu.cn

分布式监测且具有监测距离长、测量参数多、灵敏度高、信噪比(SNR)好等无法取代的独特性能。1993年 Taylor 等^[1]第一次提出了 Φ -OTDR 技术, 1994年 Juškaitis 等^[2]发表了基于相干瑞利散射的分布式光纤传感的学术论文, 2005年前后, 随着窄线宽激光器的成熟和商业化, Φ -OTDR 技术得到了快速的发展。因 Φ -OTDR 优异的性能和良好的动态特性, 且易于工程铺设, 因此 Φ -OTDR 技术在桥梁等建筑的安全监测、岩石变形测量、地下管道和场地测量以及周界安防监控中都有着广泛的应用, 本文介绍了 Φ -OTDR 的基本工作原理并对影响 Φ -OTDR 的性能指标进行了分析, 对该技术的研究进展和在各领域的应用价值也进行了介绍并对该技术进行了展望。

2 Φ -OTDR 工作原理

Φ -OTDR 的基本工作原理如图 1 所示, 使用非常窄的线宽激光源发射光脉冲到传感光纤内, 测量该脉冲在传感光纤中传播时所产生的背向瑞利散射, 由向前传播的探测脉冲产生的瑞利后向散射光波将经历相干叠加, 并且由于从光纤的不同位置产生的瑞利后向散射的随机强度和相位关系呈现“锯齿状”外观, 传感光纤上的外部扰动会使得该处光纤折射率发生变化, 从而引起瑞利散射光波的相位变化, 则“锯齿”信号会在对应的位置处发生变化, 因此, 传感光纤上的外部扰动可以通过观察信号的

变化来检测, 其频率可以通过分析扰动信号的频谱来获得, 可对前后两条瑞利散射曲线进行差分处理, 对扰动处进行定位。

当有扰动信号作用于传感光纤上时, 传感光纤的长度、纤芯直径, 以及纤芯折射率都会产生变化, 这些因素的变化会导致光脉冲的背向瑞利散射信号的相位发生变化, 相位变化表示为

$$\Delta\phi = \beta \cdot \Delta L + \Delta\beta \cdot L = \beta L \left(\frac{\Delta L}{L} \right) + \left(\frac{\partial\beta}{\partial n} \right) \Delta n + L \left(\frac{\partial\beta}{\partial a} \right) \Delta a, \quad (1)$$

式中: β 为传播常数; L 为光纤长度; n 为纤芯折射率; a 为纤芯直径。第一项为传感光纤的应变导致光纤的长度发生了变化, 从而导致了相位延迟; 第二项为外力通过弹光效应对于沿应力方向偏振的光, 使得介电常数增加导致光纤纤芯的折射率发生变化, 从而产生相位延迟; 第三项是光纤的泊松效应, 当传感光纤受到扰动时, 会使得光纤纤芯的直径发生变化, 导致相位延迟。一般引起相位变化的因素由前两者决定, 第三项可忽略不计。

从式(1)可以看出, 当传感光纤受到外界扰动时, 其扰动信息会影响背向瑞利散射信号的相位, 故 Φ -OTDR 技术可以通过探测瑞利散射信号相位的变化情况来获取外界振动信号的相关信息。

3 Φ -OTDR 性能参数研究

3.1 激光线宽的影响

自 1993 年 Taylor 等首次在应变检测中使用 Φ -OTDR 传感器以来, 研究人员对此装置提出了许多新的改进, 以提高 Φ -OTDR 的检测性能, 2008 年, 谢孔利等^[3]提出了一种采用大功率超窄线宽的单模光纤激光器作为光源用于 Φ -OTDR 分布式传感系统, 该激光器线宽很窄, 频率漂移小, 在实验测试中, 该装置定位精度为 50 m, 传感长度最大为 14 km。2010 年, 高存孝等^[4]报道了一种适用于分布式光纤传感的大功率光纤激光器, 该激光器的重复频率和脉冲宽度分别独立可调输出, 可以实现长距离的光纤传感。然而, 在大多数的 Φ -OTDR 方案中, 高相干激光光源是核心器件, 光源的线宽和性能会影响传感系统的检测性能。线宽是激光光源最常考虑的参数之一, 虽然激光的线宽相似, 但是在不同的实验中, 不同的研究团队检测到的光纤传感长度却完全不同, 仅仅依靠激光的相干长度来确定光源是远远不够的, 还需要进一步研究线宽的影响机理为

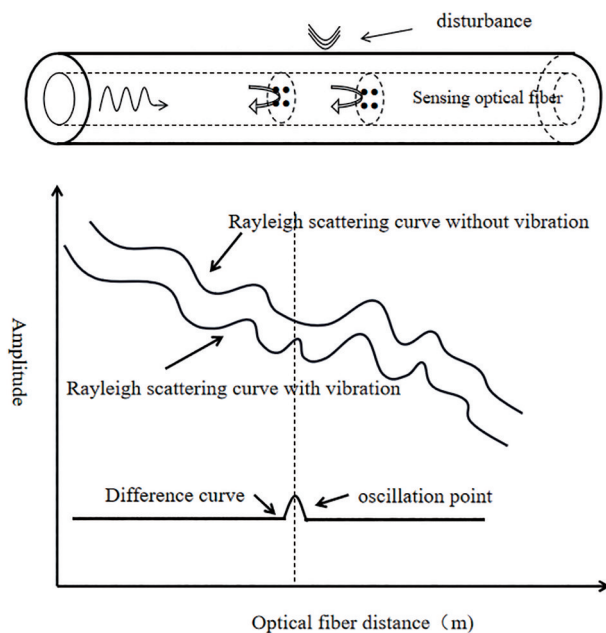


图1 Φ -OTDR 工作原理^[1]

Fig. 1 Working principle of Φ -OTDR^[1]

使用激光光源提供更合适的指标。

在非准单色光条件下,光源的线宽不可忽略,可视为光场表达式的一部分,相位变化会影响干涉结果的幅度,对于 Φ -OTDR系统,主要的干扰过程包括:光脉冲覆盖中的干扰和外差检测中的干扰。2019年,Li等^[5]分析和证明了激光线宽对外差检测 Φ -OTDR的影响。Li等推导了外差探测下,干扰信号强度表达式为

$$I_{\text{hd}} = (1 + R) E_0^2 + 2\sqrt{R} E_0^2 \cos(\Delta\tau\omega_{\text{AOM}}t + \Delta\phi_\epsilon) \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta\omega\tau\right), \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega$ 代表线宽; τ 代表两脉冲信号之间的时间延迟。线宽所带来的影响以指数形式来改变干扰信号的交流分量的幅度。该团队通过仿真和实验展示出线宽所带来的影响如图2和图3所示。图2中,L1~L17表示激光源线宽,分别为2 kHz、50 kHz、100 kHz、150 kHz、200 kHz、250 kHz、300 kHz、350 kHz、400 kHz、430 kHz、500 kHz、600 kHz、700 kHz、800 kHz、900 kHz、1 MHz。

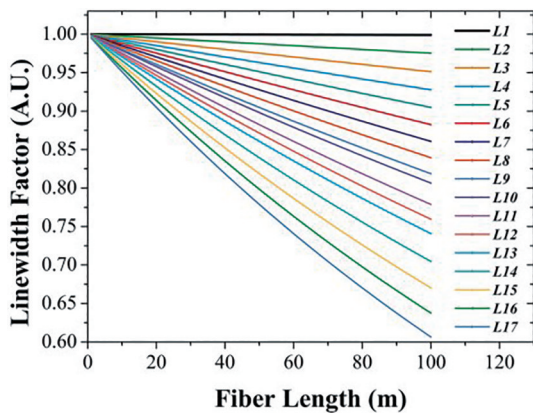


图2 不同线宽条件下不同位置的指数衰减因子值^[5]

Fig. 2 Exponential attenuation factor values at different positions under different line widths^[5]

从推导和实验可以看出,线宽会减弱外差探测过程中的干扰信号,降低系统信噪比,对于一般的 Φ -OTDR传感系统,探测性能可以通过已知的线宽参数和传感距离来计算,这可以用来确定激光器的性能,在考虑激光源的相干长度和线宽影响后,可保证传感系统的最佳探测能力,控制传感系统的整体成本。同时,该课题组也报道过一种实现线宽可控激光输出的单频光纤激光器^[6]。通过将低通滤波的高斯白噪声信号应用于光反馈环路的光纤拉伸器,实现了线宽的控制,这种可控的单频光纤激光器对于优化基于高阶正交幅度调制的相干光通信

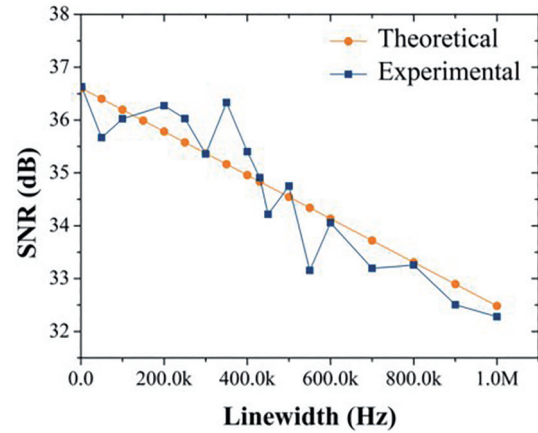


图3 实验检测与理论推导的信噪比与线宽关系对比^[5]

Fig. 3 Comparison of relationship between signal-to-noise ratio and line width of experimental detection and theoretical derivation^[5]

系统的接收灵敏度和误码率性能具有重要的意义和价值。

3.2 信噪比的增强

信噪比的好坏是反映 Φ -OTDR系统性能的重要参数,实际的应用之中不但与系统器件性能有关还与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以及由于光纤应变与干涉强度非线性对应关系引起的测量失真等有关,提升 Φ -OTDR系统的信噪比一直是国内外学者研究的重点^[7-10]。

2010年,加拿大渥太华大学的Lu等^[11]利用外差相干探测技术将系统的信噪比进行了大幅度提升。2011年Qin等^[12]开发了一种偏振保持装置,用来克服单模光纤中偏振态变化引起的信号衰落和噪声问题,从而提高信噪比,但是全保偏装置对于实际工程应用来说装置复杂且价格昂贵,2012年该团队又提出了一种提高分布式振动传感器检测性能的小波去噪方法^[13],小波变换具有适应沿光纤长度的局部变化的内在能力,可通过适当的阈值算法来获得最佳的去噪数据,以抑制由不同位置和检测器中的不同偏振状态引起的随机噪声,可将信噪比提高3 dB。2013年,Zhu等^[14]提出利用二维边缘检测方法来提高 Φ -OTDR系统的信噪比和空间分辨率,边缘检测方法通过与Sobel算子进行卷积,计算出由各点瑞利散射道组成的图像的空间梯度,从而定位外部振动引起的瑞利后向散射道的振幅起伏。与传统方法相比,基于该方法的位置信息的信噪比增加到高达8.4 dB。2016年,Muanenda等^[15]使用商用现成分布式反馈(DFB)激光器和直接检测相

位的低成本分布式声传感器 Φ -OTDR 系统,该装置优化了激光的线宽和稳定性,以同时保证脉冲内相干和脉冲间不相干,同时通过用循环脉冲编码对这种激光器进行外部调制,实验结果表明,它能够测量 5 km 标准单模光纤上 500 Hz 的振动,空间分辨率 5 m,与单脉冲等效物相比,信噪比提高了 9 dB。同年,山东科学院激光研究所^[16]将超弱光纤光栅(UWFBG)引入到 Φ -OTDR 系统中,用光栅所产生的稳定的、可控的反射光来代替功率较弱的散射信号,提高传感系统的信噪比。2017 年, Pastor-Graells 等^[17]提出了一种利用啁啾脉冲放大概念提高 Φ -OTDR 系统信噪比的装置,该技术采用了 2 个色散系数大小相等方向相反的线性啁啾光纤布拉

格光栅,通过脉冲拉伸,将脉冲所携带的能量分布在较长的时域内,降低了峰值功率,避免了非线性效应,实验结果表明,该技术将信噪比提高了 20 dB。同年,华中科技大学 Ai 等^[18]采用超宽带(UWB)光纤光栅的 Φ -OTDR 宽带全分布式振动传感装置,紫外曝光制作的超弱光纤布拉格光栅可以提供强信号光,借助于拉丝塔在线光纤光栅刻写技术,可以沿光纤制作一系列超宽带光纤光栅,并通过时分复用进行大容量复用,因此,超宽带光纤光栅是改善光纤后向瑞利散射的理想选择。与普通瑞利后向散射光相比,基于超宽带光纤光栅反射光强度,其信噪比增加了 9 dB。其实验结果如图 4 所示。

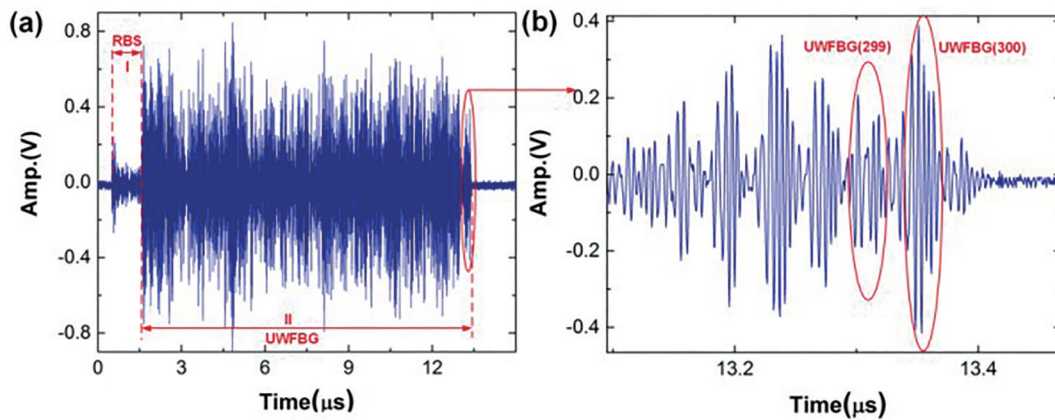


图 4 超宽带光纤光栅增强信噪比示意图^[18]。(a)单个 OTDR 轨迹;(b)第 299 个和第 300 个超宽带光纤光栅的信号

Fig. 4 Schematic diagram of UWB fiber grating enhanced SNR^[18]. (a) A single OTDR trajectory; (b) 299th and 300th UWB fiber grating signals

从图 4(a)可以很明显地看出,第 2 节的超宽带光纤光栅反射光信号强度比第 1 节的瑞利后向散射信号光强度提高了 6 dB~9 dB,使用超宽带光纤光栅来提升反射光信号的信噪比的作用十分明显。

2019 年,南京大学 Zabihi 等^[19]提出了一种具有三种不同探测频率的 Φ -OTDR 系统的连续相干衰落的抑制方法来提高系统的信噪比,相比普通的 Φ -OTDR 系统散射光在某些区域可能没有足够的强度,这些区域具有低幅度反向散射,甚至在某些时间段可能低于系统噪声本底相比,该方法在衰落实际发生之前预测衰落的发生,该方法实验结果表明在系统连续实时运行下衰落被抑制到 1.15%,该方式具有高效性和可重复性,适用于实际的测试。同年 Chen 等^[20]则提出了一种基于啁啾脉冲的 Φ -OTDR 系统以避免衰落问题的影响从而提升信噪比的方法,该方式克服了传统 Φ -OTDR 系统在空间分辨率和感知距离之间的折中,采用瑞利干涉图法对整个

光纤的应变分布进行定量解调,不存在瑞利相位法存在的衰落问题,在 10 km 的光纤尾端测试中,信噪比高达 35 dB。2020 年北京邮电大学、瑞士洛桑联邦理工学院和智力圣马利亚理工大学^[21]合作提出了一种新型编解码技术,通过向光纤注入一组由遗传算法优化、符合最大去噪标准的非周期编码脉冲并解码,即可实现系统信噪比的大幅提升,该方式在常规分布式光纤传感系统中,无需添加任何额外硬件,只需改动调制光脉冲的电信号和解码软件即可实现,与传统解码方案对比,该方案可容忍脉冲包络变形、光噪声恶化等传统编码方案存在的技术问题,无需码子切换且解码快速。

3.3 空间分辨率的提升

空间分辨率是系统辨别两事件的最小空间间隔, Φ -OTDR 系统的空间分辨率主要受到注入传感光纤中光脉冲宽度的影响,设脉冲宽度为 t ,对应空间分辨率为 δ ,表示为

$$\delta = ct / 2, \quad (3)$$

式中： c 为光脉冲在传感光纤中传播的速度。要想提高系统的空间分辨率，最常用的方法则是减小注入传感光纤的光脉冲宽度，但是光脉冲宽度的变小会使脉冲信号的信噪比下降，同时受到脉冲功率下降及噪声的影响传感距离也会缩短，因此空间分辨率与信号的信噪比和传感距离之间存在着一种矛盾关系，为了突破这一限制，光学频域反射(OFDR)被提出^[22]。OFDR采用周期性线性调频(LFM)光作为光源，在频域上对后向散射光进行分析。OFDR的空间分辨率由LFM扫描距离决定而不是脉冲宽度决定，在一定程度上解决了空间分辨率和动态范围的难题。但其测量范围受到激光源相干长度的物理限制^[23]，为解决这一问题引入了相位噪声补偿OFDR(PNC-OFDR)^[24-25]。它增加了一个参考干涉仪来检测相位噪声，从而保证超出相干长度的测量范围，但是该系统中，性能的改善是以复杂和昂贵的光学仪器为代价。2012年Ottwa大学Qin等^[13]通过小波技术降低了时域噪声，获得了亚米级空间分辨率。2015年上海交通大学利用光脉冲压缩反射测量方法^[26]，打破了传统OTDR和OFDR的限制，该方法采用了基于频率调制的脉冲压缩技术，脉冲响应类似于相位编码OTDR，通过概念验证实验，在5.4 km的测量距离上验证了47 cm的空间分辨率。同年该课题组采用扫频脉冲作为探测光，对接收端信号做类似匹配滤波处理，此时 Φ -OTDR系统的空间分辨率为

$$\delta = c / 2nB, \quad (4)$$

式中： B 为线性频率调制的范围。从式(4)可以看出，系统的空间分辨率与线性频率的扫频范围成反比，与脉冲宽度无关，该方法也突破了分辨率与信噪比和传感距离的矛盾，实验中，Zou等^[27]采用宽度为1 μ s、线性频率调制范围为1 GHz的光脉冲，使得系统的空间分辨率达到了10 cm。2017年中国科学院上海光学精密机械研究所Lu等^[28]采用LFM作为探测光，并采用匹配滤波器压缩探测器处理的脉冲宽度，在实验中使用脉宽为2 μ s、线性频率调制范围为420 MHz的光脉冲，在19.8 km的传感光纤上首次实现了30 cm的亚米级别的空间分辨率。同年，该课题组^[29]使用脉宽为1.5 μ s、线性频率调制范围为1.5 MHz的光脉冲，在75 km的传感光纤上实现了0.95 m的空间分辨率。2018年，Chen等^[30]提出了一种基于光强度调制器(IM)的时间门控数字光

频域反射(TGD-OFDR)结构来提升分辨率，传统的相干检测系统，光脉冲必须小于10 ns才能达到亚米的空间分辨率，但是光脉冲过小会使得传感器的传感长度和应变分辨率严重恶化，该课题组所提方法可以在保持空间分辨率不变的情况下充分利用正谐波和负谐波抑制衰落，实验结果表明，在总长度为9.8 km的光纤上，系统的空间分辨率为80 cm。2019年该课题组又提出了一种基于时间选通数字光频域反射计的长距离、高灵敏度分布式声学传感器(DAS)系统^[31]，在108 km长距离的传感光纤上空间分辨率达到了5 m。Pastor-Graells等^[17]将基于啁啾脉冲放大概念引入到相位敏感光时域系统之中，将具有给定色散系数的线性啁啾光纤布拉格光栅(LC-FBG)用于拉伸脉冲，在小脉冲宽度下进行测量，使得空间分辨率提升至1.8 cm，同时信噪比也得到了增强。

3.4 传感距离的提升

Φ -OTDR系统作为分布式传感技术的一种，其传感距离的提升一直以来都是研究人员关注的热点，传感长度也代表着光纤的实际长度，较长的传感长度有利于降低单位监测距离的系统成本，使得 Φ -OTDR系统更多地应用于工程技术领域，但是随着光纤长度的增加，传播损耗会进行累积，信噪比也会因为脉冲消光比不理想而恶化。因为传感距离与光脉冲能量大小成正比，提升传感距离最主要的方法便是增大入射传感光纤的光脉冲能量，然而，当入纤功率过高时，传感光纤中会发生受激布里渊散射(SBS)等非线性效应，导致传感光脉冲信号的能量发生大量转移并被消耗。

为克服上述技术缺陷，2009年电子科技大学Rao等^[32]提出了在 Φ -OTDR传感系统中利用拉曼分布式放大技术提升传感长度，分布式拉曼放大技术可以补偿传感光脉冲和瑞利后向反射光的衰减损耗，该技术实现了62 km的传感长度。2013年该课题组提出了一种基于双向拉曼放大延长相位敏感光时域反射仪分布式光纤传感系统传感距离的方法^[33]，利用双向拉曼抽运对光脉冲信号进行放大，补偿信号光损耗，实现了74 km的传感距离。2014年，Peng等^[34]提出双向一阶拉曼放大技术放大泵浦光和信号光的同时进行外差检测，使得传感距离剧增到131.5 km，空间分辨率可达15 m。同年，该组提出基于布里渊放大和拉曼放大结合的混合放大结构^[35]，进一步增加了光纤传感距离，实验结

果表明传感距离达到了 175 km,同时空间分辨率为 25 m。2015 年, Martins 等^[36]采用随机激光放大以及平衡探测技术,抑制了光纤中相对强度噪声转移,传感距离可达 125 km。2018 年 Song 等^[37]提出了一种能够检测超过 150 km 的入侵的相敏光学时域反射系统的 Φ -OTDR。该系统采用非平衡光中继器扩展感知距离,中继器由两个掺铒光纤放大器(EDFA)和一个拉曼放大器(RA)组成,一个 EDFA 功率放大器对前发射脉冲进行放大,另一个 EDFA 对后向散射信号进行放大,RA 则有助保持光纤上的功率稳定,在不进行额外信号处理的情况下,实验中成功测量了 151 km 处 35 Hz 的振动信号。同年电子科技大学 Fu 等^[38]将放大技术和复用技术巧妙地结合在一起,通过融合 BOTDR 和 Φ -OTDR 共享同一个光纤链路,恰当地克服了与放大泵的竞争和两种信号之间的相互作用有关的困难,使得传感距离达到了 150.62 km。2019 年,重庆大学 Zhang 等^[39]通过引入迭代预失真和三载波脉冲,降低了光脉冲信号的相干衰落噪声,该方法与传统的 Φ -OTDR 系统增加传感距离相比,不需要分布式放大的单端远程 Φ -OTDR,迭代预失真可以对放大脉冲的失真进行校正,三载波脉冲可以减轻干扰衰落和受激布里渊反向散射的影响。在实验测试中该方

式使得探测距离达到 80 km。2019 年 Chen 等^[31]报道了一种基于时间选通数字光频域反射计的长距离 DAS 系统,采用双向分布式拉曼放大,传感距离达到了 108 km。

3.5 频率响应范围的提高

Φ -OTDR 系统的频率响应范围由探测脉冲的重复周期和传感距离决定,依据奈奎斯特采样定律,最大响应频率为脉冲重复频率的一半,同时,为了避免不同瑞利散射光波之前的混叠,探测光脉冲之间的间隔应大于光脉冲在传感光纤中往返一次的传输时间。系统最大的频率响应为

$$f = \frac{1}{2T} = \frac{c}{4nL}, \quad (5)$$

式中: T 为探测光脉冲的重复周期; L 为传感光纤的长度,从式(5)可以看出,随着传感光纤长度的增加,系统最大频率响应则会相应下降,更大的频率响应范围将会带来更高的检测信号保真度,有利于实际的工程技术应用,因此,提高系统频率响应范围也是人们一直研究的热点。2015 年中国科学院上海光学精密机械研究所 Wang 等^[40]提出了并行采样的方法,通过频率标记方式解决了相邻脉冲信号重叠问题,在 9.6 km 的光纤上频率响应范围达到了 0.5 MHz,如图 5 所示。

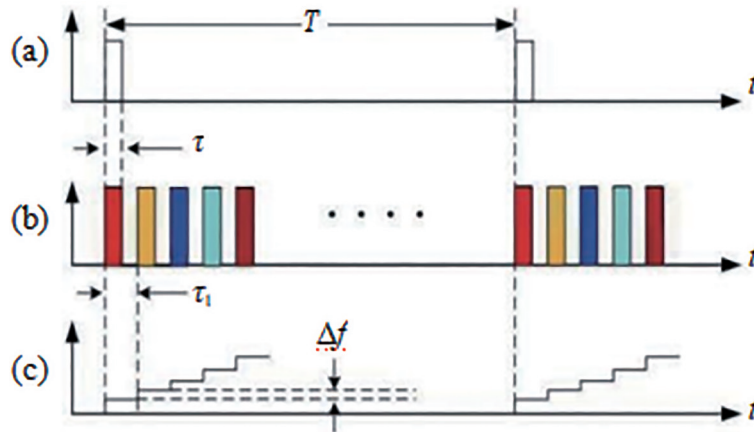


图 5 Φ -OTDR 脉冲序列变化图^[41]。(a)传统 Φ -OTDR 脉冲序列; (b)频分复用下的 Φ -OTDR 脉冲序列; (c)脉冲序列的频率变化
Fig. 5 Variation diagram of Φ -OTDR pulse train^[41]. (a) Traditional Φ -OTDR pulse train; (b) Φ -OTDR pulse train under frequency division multiplexing; (c) frequency variation of pulse train

2015 年加拿大的 He 等^[41]提出用波分复用的方式,将不同波长的脉冲以时间延迟的方式注入传感光纤之中,频率响应达到了 30 kHz。2017 年日本 NTT 学者 Iida 等^[42]使用 FDM 的方式,在 5 km 的传感光纤上,频率响应达到了 80 kHz。2018 年 Zhang 等^[43]采用对脉冲间隔进行随机调制,使光纤中每个传

感点都实现了等效亚奈奎斯特加性随机采样,实验结果表明,在 10 km 的传感光纤上,实现了 500 kHz 的频率响应。2019 年南京大学 Zhang 等^[44]用 330 m 的弱反射光纤光栅阵列,结合多色光进行采样,实现了 440 kHz 的频率响应。

此外,研究者们提出将 Φ -OTDR 与马赫-曾德

尔技术进行融合,利用 Φ -OTDR 技术来获取振动信号的位置信息,利用马赫-曾德干涉仪(MZI)结构获取振动信号的频域信息,干涉仪可测频率范围仅受到探测器的带宽限制,利用 Φ -OTDR 与马赫-曾德尔融合技术可以大大提高 Φ -OTDR 系统的频率响应范围。Zhu 等^[45]将 Φ -OTDR 与马赫-曾德尔干涉仪进行复用,在 1064 m 的实验中实现了 5 m 的空间分辨率,频率响应范围达到了 3 MHz。之后该课题组又利用宽窄脉冲对的融合结构,并结合相干检测技术,在 1.1 km 的传感光纤上最高响应频率达到了 6.3 MHz^[46]。2016 年,西南交通大学 He 等^[47]将 Φ -OTDR 与 MZI 融合,利用频分复用技术,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,频率响应范围达到了 40 kHz。2018 年,香港理工大学 Zhao 等^[48]利用多芯光纤及 Φ -OTDR 与 MZI 融合技术,克服了传统 Φ -OTDR 传感器受到后向散射光强度对振动的非线性依赖性的影响,可以实现真正不间断的分布式振动传感,具有宽振动频率响应范围和高空间分辨率,实验结果表明,在 2.42 km 的传感光纤上频率响应范围达到了 12 kHz。南京大

学 Zhang 等^[49]提出将单端 MZI 与 Φ -OTDR 融合传感结构,在该实验装置中窄光脉冲和连续波同时通过光纤前端注入光纤,在光纤的后端设计了一个频移镜,从而实现了单端接入配置。基于频分复用技术和数字信号处理,可以将干扰信号分离出来,实验结果显示该系统的频率响应范围最大为 1.2 MHz。

4 相位解调技术

Φ -OTDR 利用散射光的强度信息对扰动事件进行快速定位,由于脉冲内散射点的随机分布,使得接受到的散射信号强度与传感光纤上受到的扰动信息没有确定的关系,无法通过幅度解调计算出传感光纤上所受到的扰动值,但是扰动信号会引起传感光纤折射率发生变化,从而导致瑞利散射信号的相位信息发生变化,通过检测瑞利散射信号的相位变化,就能够对扰动信息进行定量测量。 Φ -OTDR 利用瑞利散射光相位变化信息的方式一般有两种:1)利用干涉效应引起的瑞利信号强度发生变化;2)瑞利散射信号的相位发生变化。常见的 Φ -OTDR 系统装置如图 6 所示。

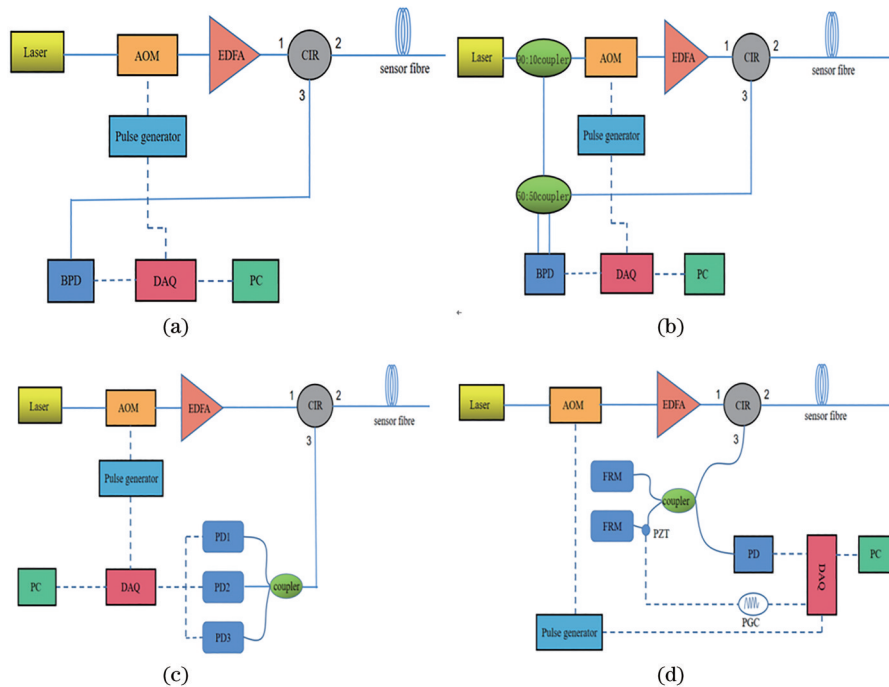


图 6 Φ -OTDR 系统装置图^[9]。(a)基于直接探测结构;(b)基于外差相干探测结构;(c)基于 3 端口耦合器探测结构;(d)基于相位产生载波(PGC)探测结构

Fig. 6 Φ -OTDR system installation diagram^[9]. (a) Based on direct detection structure; (b) based on heterodyne coherence detection structure; (c) based on 3-port coupler detection structure; (d) based on phase generation carrier (PGC) detection structure

在国内,2011年之前对 Φ -OTDR系统的研究还只能停留在对扰动信息的定性检测,2011年开始,Pan等^[50]开展了基于光纤瑞利散射相位提取的研究,利用瑞利散射空间差分相位与外界振动的线性关系,来定量获取外界扰动信号的信息,这标志着 Φ -OTDR进入了定量测量阶段,之后围绕 Φ -OTDR系统的各项相位解调方案陆续展开。2014年,Alekseev等^[51]利用三个连续的双脉冲对序列作为探测脉冲,三组脉冲对应不同的相位值,外界扰动会使得三组脉冲彼此之间的相位发生变化,通过提取该相位变化就能定量测量该扰动信号信息。该系统实验表明在2 km的传感光纤上空间分辨率5 m,相位敏感度0.01 rad。2017年,北京大学张敏等^[52]基于同原理提出了双脉冲的 Φ -OTDR系统,在500 m的传感光纤上实现了20 Hz~25 kHz的定量测量,2018年南京大学王峰等^[53]在 Φ -OTDR系统中嵌入弱反射光纤光栅,将同频双脉冲与外差探测结合,实现了对振动息相位信息的测量。同时国内外学者也提出了许多相位解调与定量的方案,包括基于 3×3 耦合器的相位解调技术^[54]、IQ解调技术^[55-56]、相位载波的PGC技术^[57]、基于直接探测与双脉冲探测技术^[58-59]。多种解调技术各有自己的优缺点, 3×3 耦合器的相位解调技术可以避免相干探测所带来的额外的信号衰落问题,同时具有极好的实时响应

性,动态范围大,响应带宽高等优点,可对光路进行直接探测,但是该解调方法对于器件的要求较高,会给系统增加更多不稳定性,IQ解调方法省去了调制器件,解调结构简单,所获得信号的灵敏度和信噪比也比较高,但是IQ信号之间存在 90° 的相位差,会使得光源引入的相位噪声变大,一般该方法受限于外差相干探测装置,相位解调的载波解调方式可以解决相干探测时工作点随机漂移的问题,精度较高,线性度良好,可以去除大部分低频环境噪声,但对于调制器工作点的稳定要求较高。

5 Φ -OTDR重要应用

5.1 周界安防与目标识别

随着我国社会经济的发展,安全监测问题越来越受到大家的关注,目前国内的传统安防技术已经日趋成熟,但是对于军事基地、边境线、监狱、机场等特殊场所,传统安防技术因其被突破几率高、定位原始、监控范围有限等缺陷难以满足该类特殊场所的应用。分布式光纤传感系统以及 Φ -OTDR技术因其传感距离长、灵敏度高、定位准确、易于铺设、价格低等独特的性能优势,在周界安防领域得到了快速应用。2007年,Juarez等^[60]开展了DAS入侵检测的研究,在8.5 km的检测线上实现了对入侵者和附近行驶车辆的检测和定位。其实验装置图如图7所示。

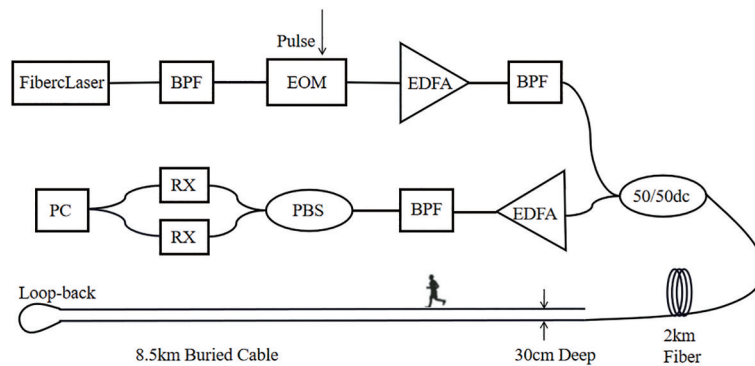


图7 基于DAS入侵检测装置^[60]

Fig. 7 Based on DAS intrusion detection device^[60]

2014年,喻晓芒等^[61]提出基于频带能量的特征提取方法,在无环境噪声干扰下,使用反向传播(BP)神经网络对三种环境噪声和三种入侵目标进行识别。2015年,Sun等^[62]针对 Φ -OTDR系统中入侵识别,提出了一种新的特征提取方法,用时空域信号代替时域信号进行特征提取,识别时间小于1 s,识别精度可达97.8%。2016年,中国电子科技集团50所Yu等^[63]报道了一种基于 Φ -OTDR的分

布式栅栏周边入侵监测系统,其系统空间分辨率达到了10 m。2017年Tejedor等^[64]提出基于支持向量机模型对入侵事件信号进行探测识别,其定位分辨率达到了0.5 m,对不同事件的识别率最高达到了81.1%。2018年南京大学Jiang等^[65]将采集到的声信号的倒频谱系数作为事件的特征,将其输入到卷积神经网络中,对于2300个测试样本的识别率高达98%。同年,电子科技大学Chen等^[66]提出了一种实

时分布式深度学习模型,利用高效的一维卷积神经网络学习不同扰动的可区分特性,并通过训练原始事件数据自动识别它们,该装置可以实现几十千米的实时分布式识别,同时对振动事件的识别准确率可以达到90%。

5.2 输电线路在线监测

随着中国经济的快速发展,我国的电网规模和电力输送容量已跃居世界首位,从奥运会的不间断供电到寻常百姓的普通照明,输电线路的可靠供应已经成为国家电网正常运行的重要组成部分,我国地势复杂多变,气候千差万别,给输电线路的管理与维护带来了很大的工作量,如不能及时检测出输电线路的故障问题,将会给电力系统带来不可估量的损失,我国一开始输电线路的监测方式为人工巡检,该方式费时费力,且不能做到实时监测,后面采用无线传感设备,虽然该设备可以做到实时在线监测,但是该设备安全性能低,易于受到电磁干扰,分布式光纤传感器因其监测灵敏度高、抗电磁干扰强、监测距离长、无需供电、成本低等独特的优异性能迅速应用于国家输电线路的在线监测之中。

2015年,谢凯等^[67]利用 Φ -OTDR技术对河南尖山4 km长的输电线路中9个杆塔间和放置塔杆上的光纤复合架空地线(OPGW)进行了两年多的监测,2019年郝伟博等^[68]利用 Φ -OTDR技术实现了对光纤复合相线的舞动状态识别和实时监测,利用comsol仿真光纤复合相线舞动如图8所示。

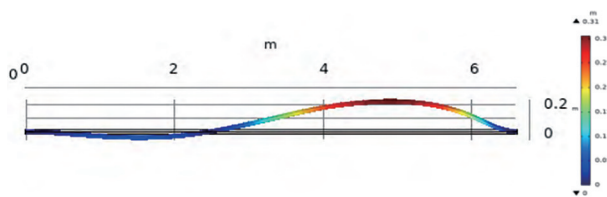


图8 光纤复合相线舞动的形变仿真结果^[68]

Fig. 8 Deformation simulation results of fiber composite phase line dancing^[68]

谭磊等^[69]利用相位敏感型的瑞利散射技术与OPGW结合,实现了输电线路的风速监测,通过监测OPGW的振动频率结合卡门漩涡公式来计算沿线各档距风速。2020年南京大学结合POTDR技术和 Φ -OTDR技术可以大幅减少振动监测的误判率和漏判率,可以很好地对线路的异物悬挂、覆冰舞动和微风振动进行监测,同时 Φ -OTDR还可以与ROTDR技术结合,对电缆的外破、温度等进行监测^[70]。

5.3 地下管线监测

管道作为一种有效、经济、环保的输送方式,广泛应用于我国市政工程和各种工业装置之中,对于国家经济的发展有着重要的作用,在我国和世界各地有着大量的管道被用来运输淡水、石油、天然气等重要基础生活物资,因此对管道的监测以确保管道的安全运营尤为重要。管道一般埋于地下,属于隐蔽性工程,地下管道网错综复杂,交叉重叠,同时我国地势辽阔,管线沿线地质环境多变,像西气东输及南水北调工程管道沿线跨越几千千米,地下管道的老化、损坏、稳定运行在长时间下难以得到保障,同时管道埋于地下,对于损坏处的位置不易发现,传统的管道监测方式有管内探测球法、实时模型法、压力梯度法等方式,但是这些方式需要众多传感器且不能及时发现管道故障,如何兼顾经济性和可靠性,有效对管道安全进行监测和预警是人们研究的热点问题。分布式光纤传感技术因其探测距离长、抗干扰性好、可靠性高、定位精确、成本低等优势在管道监测方面前景广阔。

2005年,西安交通大学Gao等^[71]使用基于光时域反射技术对地下油气管道进行泄露监控,传感距离为3.023 km,分辨率为22.4 m。2008年,中国科学院上海光学精密机械研究所张晓建等^[72]使用基于OTDR传感技术对石油管道进行监测。2014年Wang等^[35]介绍了一种超长相敏光时域反射仪,可以在131.5 km光纤上实现高灵敏度入侵检测,空间分辨率为8 m,实验证实了这种超长 Φ -OTDR应用于管道安全的可行性。2017年李鹏等^[73]基于分布式传感技术对天水市城区供水管道进行了安全监测,实验测试表明,在距离管道首端65 m,距离管道轴线上方2.9 m处,进行车辆行驶,机械挖掘振动,均可以准确定位振动位置。同时对于监测信号的处理问题,2014年,电子科技大学李小玉等^[74]对于 Φ -OTDR系统在环境干扰下的误报问题,提出将空间各点的纵向时间序列形成矩阵,并对矩阵进行奇异谱分析提取特征信息来辨别扰动信息。2015年天津大学Sun等^[62]将 Φ -OTDR的时间和空间信号累积为二维图像,不同扰动事件累积的二维图像不同,借此识别行人走过、汽车行驶等扰动信号。2016年,电子科技大学Qian等^[75]用小波和小波包结合的方法对 Φ -OTDR系统的管道信号进行分析,事件识别准确率达到96%。

5.4 地震波及物探监测

地球物理与自然灾害的发生对于人们的生产生活会造成十分严重的影响,尤其是地震的发生对人们的危害是巨大的,传统的地震波探测手段一般为点式的电子传感器,但是该探测方式需要大规模的空间密集组网方式,这样就产生了高昂的成本,同时传统的电子探测器空间布设较为稀疏,不利于实时大范围监测地震波的产生, Φ -OTDR 技术在地震波监测中,布设简单、成本低,同时具备着高精度的探测能力,基于 Φ -OTDR 技术的地震探测应用,近年来逐步成为相关领域学者研究的重点。

2017 年, Lindsy 等^[76]利用 Φ -OTDR 技术设计了一种新的地震记录方法,该方法将通信光缆转换成传感器阵列,能够在几十千米长的线性光纤上进行米级记录,再通过分析三个不同分布式传感器记录的观测数据得出了与标准地震仪可比拟的数据。2018 年, Jousset 等^[77]利用分布式光纤传感技术,记录了来自自然和人工震源的地震信号,在雷克雅那半岛 15 km 的光纤电缆布局实验中,以高分辨率识别了雷克雅那斜裂谷的正断层和火山墙等构造特征。同年,中国科学院与美国威斯康辛大学合作,采用 Silixa 公司的 iDAS 系统在加州成功监测到了里氏 4.3 级地震^[78]。2019 年, Lindsy 等^[79]利用既有的海底通信光缆,对微地震波进行探测,发现了海底断层区域并分析了微震等。

利用 Φ -OTDR 技术进行地震波探测是当前地震领域科研人员研究的热点方向,该技术不仅可以实现对地震源的高精度的定位,而且具有高分辨率、成本低等特点, Φ -OTDR 技术将为地球物理勘探,自然灾害预防等提供全新的探测手段。

同样 Φ -OTDR 技术在油气等资源的探测方面也有着广阔的应用前景,油气等资源的开发影响着世界能源的布局,常规的油气等资源的勘探多采用电子检波器,但是常规的电子检测器件检验耗时长且受到高温高压的限制,不能很好应用于深层物体探测,发展新的物体探测技术意义重大,2012 年, Silixa 公司 Miller 等^[80]首次用 DAS 进行了油气资源开发的研究,2015 年劳伦斯伯克利国家实验室 Daley 等^[81]报告了他们在 VSP 资源勘探方面的工作,其结论表明,与常规井眼检波器相比,额外的空间采样和更低的部署成本很好弥补了目前油管部署分布式传感所需的额外震源工作。2018 年阿帕奇公司 Byerley 等^[82]报告了他们在 VSP 资源勘探方

面的工作,2019 年 Correa 等^[83]将光缆放置注入井的生产油管中,实现了 20 km 的信号有效探测。

6 结束语

本文回顾了 Φ -OTDR 技术在性能参数方面的研究进展,其 Φ -OTDR 技术经过数十年的研究,已经在周界安防、输电线路监测、油气管道监测等方面得到了很好的利用,发展前景良好,但是由于我国 Φ -OTDR 技术起步较晚,与国外的相关研究工作相比还是有着一定的差距,限制了 Φ -OTDR 技术在现有应用中的实际性能,同时也存在着一些问题。例如在噪声干扰方面,当同一感测单元周围存在多个扰动信号时,各扰动信号可能会互相干扰,使得 Φ -OTDR 系统无法工作,同时也需要对 Φ -OTDR 系统进一步改进,实现无探测死区、长距离、高信噪比的振动传感测量,我们可利用弱反射光纤光栅阵列产生的发射光代替瑞利散射信号,以降低相干衰落效应造成的探测死区,但是弱反射光纤光栅阵列价格昂贵,低成本的无探测死区的 Φ -OTDR 系统将会是人们研究的重点。同时 Φ -OTDR 技术在监测地震波、分析三维探测能力等方面也有着较为明亮的前景。

参 考 文 献

- [1] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US5194847[P]. 1993-03-16.
- [2] Juskaitis 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.
- [3] 谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 Φ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 569-572.
Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light Φ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572.
- [4] 高存孝, 朱少岚, 冯莉, 等. 用于分布式光纤传感的全光纤激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1501-1504.
Gao C X, Zhu S L, Feng L, et al. An all fiber laser for distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1501-1504.
- [5] 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.
- [6] Zhou K J, Zhao Q L, Huang X, et al. kHz-order linewidth controllable 1550 nm single-frequency fiber laser for coherent optical communication[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19752-19759.
- [7] Chang S G, Yu B, Vetterli M. Spatially adaptive wavelet thresholding with context modeling for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(9): 1522-1531.
- [8] Peng Z K, Chu F L. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004, 18(2): 199-221.
- [9] 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.
- 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.
- [10] 马皓钰, 王夏霄, 马福, 等. Φ -OTDR 型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 130005.
- Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of Φ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 130005.
- [11] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(22): 3243-3249.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhu T, Xiao X H, He Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in Φ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [15] 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): 3243-3249.
- [16] 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.
- [17] Pastor-Graells J, Cortés L R, Fernández-Ruiz M R, et al. SNR enhancement in high-resolution phase-sensitive OTDR systems using chirped pulse amplification concepts[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(9): 1728-1731.
- [18] Ai F, Sun Q Z, Zhang W, et al. Wideband fully-distributed vibration sensing by using UWFBG based coherent OTDR[C]//*Optical Fiber Communication Conference*, March 19-23, 2017, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2017: W2A.19.
- [19] Zabihi M, Chen Y S, Zhou T, et al. Continuous fading suppression method for Φ -OTDR systems using optimum tracking over multiple probe frequencies [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3602-3610.
- [20] 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): 29415-29424.
- [21] Sun X Z, Yang Z S, Hong X B, et al. Genetic-optimised aperiodic code for distributed optical fibre sensors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5774.
- [22] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 1981, 39(9): 693-695.
- [23] Uttam D, Culshaw B. Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using a frequency modulated continuous wave ranging technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1985, 3(5): 971-977.
- [24] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Phase-noise-compensated optical frequency-domain reflectometry [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(6): 594-602.
- [25] Ito F, Fan X Y, Koshikiya Y. Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1015-1024.
- [26] 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.
- [27] 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: W3I.5.
- [28] 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.
- [29] 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.
- 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.
- [30] Chen D, Liu Q W, He Z Y. High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16138-16146.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Wang J, Jia X H, Rao Y J, et al. Phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on bi-directional Raman amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044212.
- [34] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13804-13810.
- [35] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. 175 km phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9157: 9157D5.
- [36] Martins H F, Martin-Lopez S, Corredera P, et al. Distributed vibration sensing over 125 km with enhanced SNR using ϕ -OTDR over a URFL cavity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2628-2632.
- [37] 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: 027104.
- [38] Fu Y, Wang Z N, Zhu R C, et al. Ultra-long-distance hybrid BOTDA/ Φ -OTDR[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 976-984.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Zhu T, He Q, Xiao X H, et al. Modulated pulses based distributed vibration sensing with high frequency response and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 2953-2963.
- [46] He Q, Zhu T, Xiao X H, et al. Distributed vibration sensing based on time-difference pulses[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8924: 89241M.
- [47] He H J, Shao L Y, Li Z L, et al. Distributed vibration sensing with high frequency response based on frequency division multiplexing[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 16244694.
- [48] Zhao Z Y, 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.
- [49] Zhang Y X, Xia L, Cao C Q, et al. A hybrid single-

- end-access MZI and Φ -OTDR vibration sensing system with high frequency response[J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 176-181.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] He X G, Xie S R, Liu F, et al. Multi-event waveform-retrieved distributed optical fiber acoustic sensor using dual-pulse heterodyne phase-sensitive OTDR[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 442-445.
- [53] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Interrogation of ultra-weak FBG array using double-pulse and heterodyne detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(8): 677-680.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 盛庆华, 俞钊, 卢斌, 等. 基于异构加速的 Φ -OTDR 实时信号处理系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104002.
- 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 喻晓芒, 罗光明, 朱珍民, 等. 分布式光纤传感器周界安防入侵信号的多目标识别[J]. *光电工程*, 2014, 41(1): 36-41.
- Yu X M, Luo G M, Zhu Z M, et al. The multi target recognition of intrusion signal of perimeter security with distributed fiber-optic sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(1): 36-41.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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): 355.
- [65] 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.
- [66] 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: 290-296.
- [67] 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.
- 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.
- [68] 郝伟博, 赵衍双, 李卓枢, 等. 基于相位敏感光时域反射技术的导线舞动状态监测[J]. *应用科学学报*, 2019, 37(4): 437-446.
- Hao W B, Zhao Y S, Li Z S, et al. Transmission-line galloping monitoring based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2019, 37(4): 437-446.
- [69] 谭磊, 赵永强, 赵留学, 等. 基于分布式光纤的电网台风灾害预警方法研究[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(15): 20-24.

- Tan L, Zhao Y Q, Zhao L X, et al. Research on warning method of typhoon disaster based on distributed fiber[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(15): 20-24.
- [70] 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: 046101.
- [71] Gao J Z, Jiang Z D, Zhao Y L, et al. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(11): 633-635.
- [72] 张晓建, 张国轩, 阮昊. 基于光时域反射计的全分布式光纤漏油传感器[J]. *光子学报*, 2008, 37(12): 2453-2457.
- Zhang X J, Zhang G X, Ruan H. Distributed fiber optic sensor for oil pipeline leakage detection based on OTDR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2453-2457.
- [73] 李鹏. 基于 DAS 技术的天水市城区供水管道安全监测概述[J]. *水能经济*, 2017, 7: 114-116.
- Li P. A survey on the safety monitoring of water supply pipeline in Tianshui urban area based on DAS technology[J]. *Water Energy Economy*, 2017, 7: 114-116.
- [74] 李小玉, 吴慧娟, 彭正谱, 等. 基于时间序列奇异谱特征的 Φ -OTDR 扰动检测方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 0428001.
- Li X Y, Wu H J, Peng Z P, et al. A novel time sequence singular spectrum analysis method for Φ -OTDR disturbance detection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0428001.
- [75] Qian Y, Wu H J, Zhang W, et al. Feature extraction with WD and WPD in distributed optical-fiber vibration sensing system for oil pipeline safety monitoring[C]//Asia Pacific Optical Sensors Conference, October 11-14, 2016, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2016: W4A.37.
- [76] 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.
- [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] Wang H F, Zeng X F, Miller D E, et al. Ground motion response to an ML 4.3 earthquake using co-located distributed acoustic sensing and seismometer arrays[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(3): 2020-2036.
- [79] 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.
- [80] 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. De Molen: EAGE Publications BV, 2012.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 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 CO₂ CRC Otway project[J]. *Interpretation*, 2019, 7(1): SA11-SA19.