

激光与光电子学进展

基于线性调频脉冲的光纤分布式声波传感技术

马喆^{1†}, 张明江^{2,3*†}, 江俊峰^{4,5,6,7}, 张建忠^{1,3}, 肖连团^{1,2,3}, 刘铁根^{4,5,6,7}¹太原理工大学电子信息与光学工程学院, 山西 太原 030024;²太原理工大学物理学院, 山西 太原 030024;³太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;⁴天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072⁵天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072⁶天津大学光纤传感研究所, 天津 300072⁷天津市光纤传感工程中心, 天津 300072

摘要 基于线性调频(LFM)脉冲的光纤分布式声波传感(DAS)技术采用同时具有连续波形和脉冲波形优势的 LFM 脉冲作为探测光, 利用频移产生附加相位实现光纤应变导致相位补偿的原理进行传感。可实现光纤链路沿线声/振信号的定量波形恢复, 具有响应速度快、灵敏度高等特点, 在地球物理学、线性基础设施监测等领域具有显著的优势和应用前景。论述基于 LFM 脉冲 DAS 技术的基本传感机理, 概述传感距离、空间分辨率、频率响应与衰落噪声抑制等关键技术指标的研究进展, 介绍 DAS 在典型应用中的进展, 并对未来可能发展趋势进行探讨。

关键词 光纤光学; 分布式声波传感; 线性调频脉冲; 瑞利散射; 相位解调

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230746

Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing Technology Based on Linear Frequency Modulation Pulses

Ma Zhe^{1†}, Zhang Mingjiang^{2,3*†}, Jiang Junfeng^{4,5,6,7}, Zhang Jianzhong^{1,3}, Xiao Liantuan^{1,2,3}, Liu Tiegeng^{4,5,6,7}¹College of Electronic Information and Optical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;²College of Physics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;³Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;⁴School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China⁵Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China⁶Institute of Optical Fiber Sensing of Tianjin University, Tianjin 300072, China⁷Tianjin Optical Fiber Sensing Engineering Center, Tianjin 300072, China

Abstract Fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) technology based on linear frequency modulation (LFM) pulses has gained popularity due to its ability to combine the advantages of both continuous and pulse waveforms in detection light. By utilizing the principle of frequency shift, additional phases can be generated to achieve phase compensation for fiber strain sensing. This technology enables quantitative waveform recovery of acoustic signals at various locations along the fiber optic link, with fast response times and high sensitivity. DAS has significant potential for applications in geophysics and linear infrastructure monitoring. In this study, we discuss the basic sensing mechanism of LFM pulse-based DAS technology,

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-04-20; 录用日期: 2023-04-28; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(62205237, 62075151, 62075153, 62205234)、山西省青年科学基金(20210302124396, 202103021223042)、山西省重点研发计划(202102150101004)

通信作者: *zhangmingjiang@tyut.edu.cn

† 共同第一作者

present research progress on key scientific and technical indicators such as sensing distance, spatial resolution, frequency response, and fading noise suppression, and introduce the progress of DAS in typical applications. Finally, we discuss possible future development trends.

Key words fiber optics; distributed acoustic sensor; linear frequency modulation pulse; Rayleigh scattering; phase demodulation

1 引言

光纤分布式声波传感(DAS)技术是一种利用光纤中后向瑞利散射来定位和恢复光纤链路上任意位置环境物理量变化的先进感知技术^[1-2],该技术具有环境适应性强、传感范围大、信道间光速同步、时空分辨率高等优势。目前,DAS技术已经在地球物理勘探与地震学^[3]、油气资源勘探^[4]以及一系列线性基础设施安全在线监测^[5]等领域展示出独特的技术优势和巨大的应用潜力,其应用领域仍在进一步拓展中。

基于光纤瑞利散射的DAS技术从强度检测的定性阶段逐渐发展到波形恢复的定量阶段。前者又称为光纤分布式振动传感(DVS)技术^[6],仅对整条光纤链路的振动事件进行定位和事件频率信息进行表征,其主要对振动信号进行定性检测,无法正确恢复振动信号的波形信息。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,获取光波时延信息并线性重建外界扰动变化。DAS技术

的发展脉络可以按调制脉冲的频率成分依次划分为单频脉冲DAS技术、多频脉冲DAS技术和线性调制(LFM)脉冲DAS技术,如图1所示。多数的DAS系统均使用单频脉冲结合不同的探测结构和不同的相位解调方法来实现传感测量。根据探测结构的不同,DAS系统可分为直接探测方式和相干探测方式两大类,其中相干探测方式的相位敏感光时域反射(φ -OTDR)技术^[7-9]通常称为相干光时域反射(COTDR)技术^[10]。与探测方式相对应的相位解调与定量测量方案,包括 3×3 耦合器解调法^[11-12]、相位生成载波(PGC)解调法^[13-14]、数字同相正交(IQ)相位解调法^[15-16]和差分相位解调法^[17-18]等。在单频脉冲DAS系统的基础上,逐步演化出了双频脉冲^[19-20]和多频脉冲DAS传感技术^[21-22]。与单频脉冲 φ -OTDR传感技术相比,多频脉冲技术的优势主要体现在两方面^[21]:1)避免脉冲重复频率的限制,突破测量带宽的限制;2)实现干涉噪声的抑制。不同频率光脉冲的相干瑞利散射曲线衰落位置不同,使用多频脉冲技术可以减弱衰落噪声的影响。

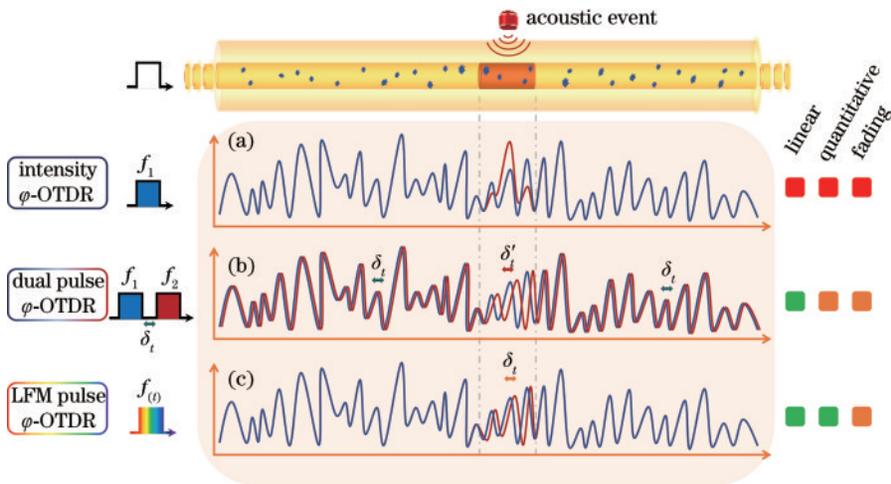


图1 根据调制脉冲频率成分的DAS技术分类。(a)单频脉冲 φ -OTDR;(b)多频脉冲 φ -OTDR;(c)LFM脉冲 φ -OTDR

Fig. 1 DAS technical classification based on modulated pulse frequency components. (a) Single frequency pulse φ -OTDR; (b) multifrequency pulse φ -OTDR; (c) LFM pulse φ -OTDR

线性频率调制是一种综合连续波形和脉冲波形优势的扩频调制技术,可打破脉冲宽度和空间分辨率的限制,被广泛应用于雷达和激光雷达的距离和速度测量^[23-25],近年来这项技术陆续被研究人员引入DAS中。本文从LFM脉冲DAS技术的基本传感机理和关键科学技术指标的提升两个方面,综述了近些年基于LFM脉冲DAS技术的重要进展,并列举了几种典型应用场景,对未来进一步发展需要突破的关键问题进行探讨。

2 基于LFM脉冲DAS技术的基本传感机理

基于光纤后向瑞利散射的光时域反射(OTDR)技术属于脉冲内散射点干涉信号的直接探测技术,其探测灵敏度高,目前大多数DAS系统均是基于 φ -OTDR架构。部分研究人员基于光频域反射(OFDR)技术^[26]的结构也开展相关研究。与OTDR技术相比,OFDR有空间分辨率高和动态范围大的特点,但受光源噪声的影响远

距离待测光纤位置的相位解调会出现失真问题,因此该技术通常适用于短距离和高空间分辨率的领域。基于 OFDR 技术衍生的时间门控数字光频域反射仪(TGD-OFDR)DAS 系统^[27]采用 LFM 脉冲结合匹配滤波技术,可实现长传感距离和高空间分辨率的同时,还可对声振信号进行感知。采用离散散射理论模型对 LFM 脉冲 DAS 技术在 φ -OTDR 架构的传感机理进行阐述。

2.1 基于 φ -OTDR 分布式传感的基本原理

使用简化的光纤模型对 φ -OTDR 的工作原理进行分析,仅考虑两个散射单元($z_{i=a}$ 和 $z_{i=b}$)。假设每个散射单元均呈相同的散射系数 ρ ,入射激光的振幅为 E_0 ,激光频率为 f_0 。简化后的模型示意图如图 2(a)所

示, E_a 、 E_b 分别为位置 z_0 处检测到散射单元 $z_{i=a}$ 和 $z_{i=b}$ 的后向散射信号:

$$E_{a(z=z_0)} = E_0 \cdot \rho \cdot \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_0)], \quad (1)$$

$$E_{b(z=z_0)} = E_0 \cdot \rho \cdot \exp\{j[2\pi f_0(t - t_{ab}) + \varphi_0]\}, \quad (2)$$

式中: $t_{ab} = 2n_0(z_b - z_a)/c$, 激光从散射单元位置 $z_{i=a}$ 到 $z_{i=b}$ 产生了额外的相位 $\varphi_{ab} = 2\pi f_0 t_{ab}$ 。因此,式(2)可改写为

$$E_{b(z=z_0)} = E_0 \cdot \rho \cdot \exp\{j[2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi_{ab}]\}, \quad (3)$$

沿光路 $[z_0, z_a]$ 和 $[z_0, z_b]$ 的相应相位值分别为 φ_0 和 $\varphi_0 + \varphi_{ab}$ 。此时,在 z_0 处探测到的光强为

$$I_{(z=z_0)} = |E_a + E_b|^2 = 2|E_0 \rho|^2 (1 + \cos \varphi_{ab}). \quad (4)$$

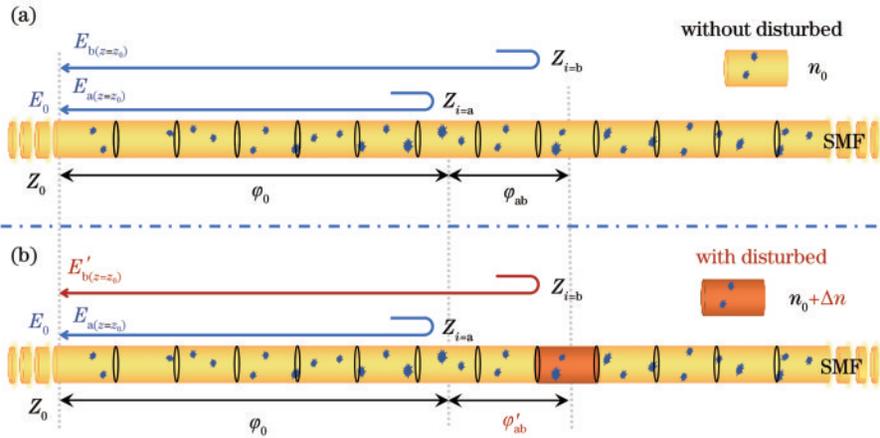


图 2 φ -OTDR 离散散射单元简化模型。(a)无扰动;(b)有扰动

Fig. 2 φ -OTDR discrete scattering element simplified model. (a) Without disturbance; (b) disturbance

如图 2(b)所示,当散射单元 z_b 受外界扰动引起折射率发生改变后 $[z_a, z_b]$ 光路的光程差将发生改变,并产生一个额外的相位差 $\Delta\varphi$ 。此时,散射单元 z_b 的后向散射信号可表示为

$$E'_{b(z=z_0)} = E_0 \cdot \rho \cdot \exp\{j[2\pi f_0 t + \varphi_0 + \varphi'_{ab}]\}, \quad (5)$$

式中: $\varphi'_{ab} = \varphi_{ab} + \Delta\varphi$ 。此时,在 z_0 处探测到的光强为

$$I'_{(z=z_0)} = |E_a + E'_b|^2 = 2|E_0 \rho|^2 [1 + \cos(\varphi_{ab} + \Delta\varphi)]. \quad (6)$$

由以上分析可知,当外界环境的温度或应变引起光纤某个位置的折射率改变后, φ -OTDR 对来自不同散射单元的后向散射之间相对相位变化具有敏感性。根据两个散射单元的简化分析模型,将该模型扩展到大量的散射单元进行分析。散射效应是由纤维制造过程中的随机密度波动产生的,虽然瑞利散射过程随机发生,但如果光纤保持完全稳定状态,散射信号的振幅和相对相位将保持不变。这说明 φ_{ab} 的值(随机且固定)有助于保持最终的后向散射轨迹。

由图 2(b)可知,脉冲光在光纤中传播时,被其覆盖的散射单元均产生后向散射光,其中部分散射单元的后向散射光将发生重叠并同时达到光纤入射端,该过程中重叠的后向散射光将发生干涉。光脉冲到达光

纤中某个位置 z 所需的时间为 $t_z = z/v_g$, 因此该位置的后向散射光需要 $t = 2t_z$ 的时间才能返回 $z = 0$ 的初始位置进而被探测。光脉冲覆盖部分的一半最终将被探测,其为包含 M 个散射单元的总和 $E_{(t=2t_z, z=0)}$, $E_{(t=2t_z, z=0)}$ 可表示为

$$E_{(t=2t_z, z=0)} = E_0 \exp\left(-\frac{\alpha z}{2}\right) \exp(j2\pi f_0 t) \sum_{m=1}^M \rho_m \exp(j\varphi_m), \quad (7)$$

式中: α 为光纤衰减系数; ρ_m 为第 m 个散射单元的散射系数。此处忽略光纤的损耗,在初始位置 $z = 0$ 处的归一化光强 I 为

$$I = |E|^2 = \left| \sum_{m=1}^M \rho_m \exp(j\varphi_m) \right|^2 = \sum_{m=1}^M \rho_m^2 + 2 \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \rho_i \rho_j \cos(\varphi_i - \varphi_j). \quad (8)$$

由式(8)可知,不同散射单元的后向瑞利散射光之间发生的干涉可通过相干时域信号进行探测。这些散射单元的位置是随机的,所以 φ -OTDR 的时间序列通常沿着光纤随机振荡。根据以上对静态光纤的光强分析,现假设在第 p 个散射单元施加一个相位变化 ϕ_p , 其中 $p \in [1, M]$ 。施加干扰后的光强 I' 与静态的光强 I 之

间相应的光强变化 ΔI 为

$$\Delta I = 2 \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=p}^M \rho_i \rho_j [\cos(\varphi_i - \varphi_j - \phi_p) - \cos(\varphi_i - \varphi_j)] \quad (9)$$

受干扰和未受干扰的信号具有相关的指数概率分布,因此强度变化的概率分布服从拉普拉斯分布^[28]。由式(9)可知,当第 p 个散射单元的相对相位变化 $\varphi_i - \varphi_j$ 包含在半脉宽内才会引起光强差 ΔI 改变。扰动仅影响相应的区域,而相干时域信号的其余部分保持不变,因此基于 φ -OTDR 的传感系统可沿光纤不同位置进行定位。此外,除了 ϕ_p 的值非常小,由光纤中的扰动引起的强度变化不是线性关系。因此,要实现线性响应测量则需采用相位检测^[15,17,29]或频率扫描^[30-31]等其他技术。

根据以上定点离散散射单元的扰动分析进一步推广到包含大量散射单元的情况。此时,包含在扰动部分中的所有散射单元将经历微小的相位变化。根据相位差和光程差(OPD)的关系,可得从扰动部分初始位置到结束位置的总累积相位变化为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta f_{\text{OPD}}}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta n \times z + n \times \Delta z), \quad (10)$$

式中: Δn 为由温度 ΔT 或应变 $\Delta\epsilon$ 沿光纤位置 Δz 变化引起的折射率变化; Δf_{OPD} 为 OPD 变化; λ 为激光的波长。值得注意的是,应变扰动本质上引起的是光程差的变化而不会真正引起折射率的改变,这里的光程差变化可以用等效折射率变化来描述。

根据文献[30]可知折射率变化 Δn 与温度 ΔT 和应变 $\Delta\epsilon$ 的关系,在此统一使用光程差变化 Δf_{OPD} 来完善理论:

$$\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta f_{\text{OPD}}}{f_{\text{OPD}}} = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T, \quad (11)$$

式中: K_ϵ 为应变系数, $K_\epsilon \approx -0.78\epsilon^{-1}$; K_T 为温度系数, $K_T \approx -6.92 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。由文献[30]可知,激光频率(波长)偏移可以补偿微小折射率变化,即 $\Delta n/n$ 可用 $\Delta f/f$ 来代替, f 为激光频率。因此,式(10)、式(11)可改写为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta f_{\text{OPD}}}{\lambda} = 2\pi(\Delta f \times f_{\text{OPD}} + \Delta f_{\text{OPD}} \times f), \quad (12)$$

$$\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta f_{\text{OPD}}}{f_{\text{OPD}}} = \frac{\Delta f}{f} = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T. \quad (13)$$

2.2 LFM 脉冲的离散散射理论模型

首先定义 LFM 脉冲曲线 P_{LFM} , 该曲线振幅为 E_0 , 持续时间为 T , 且瞬时频率为 $f_{(t)} = f_s + \frac{\mu t}{T}$ 。 P_{LFM} 可表示为

$$P_{\text{LFM}} = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) E_0 \exp[j2\pi(f_0 - f_{(t)})t], \quad (14)$$

式中: f_s 为 LFM 脉冲的初始频率; μ 为 LFM 脉冲的调频斜率, $\mu = (f_e - f_s)/T$, f_e 为 LFM 脉冲的截止频率; j 为虚数; t 为时间; f_0 为激光器的输出频率; $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数,当 $0 \leq x \leq 1$ 时, $\text{rect}(x) = 1$, 其他情况为 0。

当脉冲 P_{LFM} 沿光纤传播时,在每一个时刻,LFM

脉冲的每一个微小部分均会产生瑞利后向散射光。因此,后向散射信号连续产生且在不同时刻不同位置产生的后向散射信号将重叠产生 φ -OTDR 信号 $E(t)$, t 时刻在传感光纤的反射端接收到该信号。为了简化模型,将 LFM 脉冲对应的空间长度划分为一系列长度相等的离散散射单元,记作 $[z_1, z_2, \dots, z_n]$, 相应离散散射单元的光频率记作 $[f_1, f_2, \dots, f_n]$, 如图 3 所示。因此, P_{LFM} 沿着光纤传播的表达式可以用多个散射单元累加求和的形式给出:

$$E(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T}\right) \sum_{i=1}^n \rho_i \exp\left(-\frac{\alpha z_i}{2}\right) \exp\left\{j2\pi[f_0 - f_{(t-\tau_i)}](t - \tau_i)\right\}, \quad (15)$$

式中: ρ_i 为每个离散散射单元对应的散射系数; f_0 为激光器的光频率。当脉冲 P_{LFM} 沿着光纤传播时,产生的散射光强 $E(t)$ 由 n 个散射单元累积实现。当未发生 OPD 变化时,后向相干瑞利散射时域信号轨迹保持不变,整个 LFM 脉冲的散射信号如图 3 所示。假设第 i 个离散散射单元 z_i 位置处受到外界动态应变 ϵ_i , 使得 OPD 发生微小改变,根据式(12)可知,要保证初始相位值 φ 不发生改变则需要改变激光频率来进行补偿。该方案使用了 LFM 脉冲,激光频率与时间呈线性变化,直接体现为相干瑞利散射时域信号的平移,图 3 中两条曲线对应的相位相同。每个离散单元对应的相位大小为 $\varphi_i = 2\pi n f_i t_i$, 对光纤中任意两个位置散射信号之间的相位差 φ_{ij} 为

$$\varphi_{ij} = 2\pi n (f_j - f_i)(t_j - t_i). \quad (16)$$

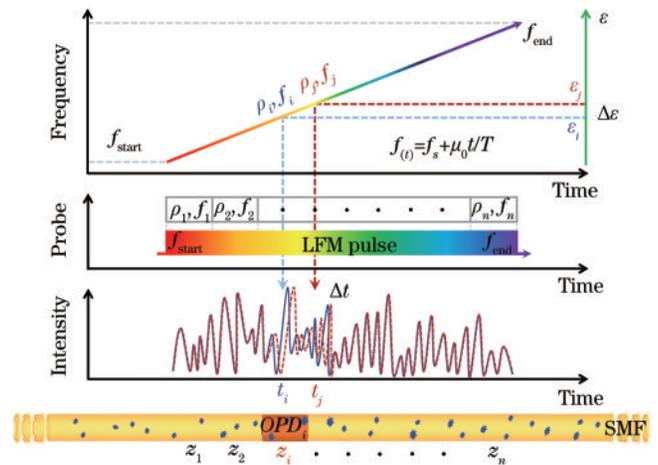


图 3 LFM 脉冲分布式声传感离散理论模型
Fig. 3 Discrete theoretical model of LFM pulse distributed acoustic sensing

由式(16)可知,扰动引起的微小光程差的变化可以通过相干瑞利散射时域信号的水平移动来补偿(此处暂不考虑噪声引起信号的抖动)。因此, ϵ 和 Δt 之间的关系可表示为

$$\epsilon = \frac{1}{K_\epsilon} \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{K_\epsilon} \frac{\mu}{f} \Delta t. \quad (17)$$

以上是基于 LFM 脉冲 φ -OTDR 传感器的测量原理,图 3 为 $\Delta\epsilon$ 、 Δf 和 Δt 之间的关系。假如在光纤的某个位置 z 受到动态应变引起光程差发生改变,则该位置的局部时域信号 $E(t)$ 将发生水平偏移 Δt ,相应的频移变化 Δf 可用于补偿光程差的变化 Δf_{OPD} 。通过计算两次连续测量得到时域信号的局部相关性,可以确定两个不同时域信号沿光纤的局部时移 Δt 的变化。

时移 Δt 通常对相邻两帧相干时域信号的子序列使用时间延迟估计法(TDE)^[32]来进行估计,最常见的方法是通过两个信号的快速互相关运算,通过记录相关峰的轨迹即可获得 Δt 的值。该运算具体过程为

$$\Lambda_{(i)} = \max \left\{ \text{corrcoef} \left[E_i(t - \omega_T, t + \omega_T), E_{i+1}(t - \omega_T, t + \omega_T) \right] \right\}, \quad (18)$$

式中:corrcoef(\cdot)为相关系数函数。

将相干时域信号的子序列平移变化记为 $\Lambda_{(i)}$,通过记录先后注入光纤中脉冲的后向相干瑞利散射时域信号 E_i 和 E_{i+1} ,使用逐点滑移选取窗口 ω_T 的信号提取算法对相邻两帧时域信号求最大互相关系数,其中 ω_T 与脉冲持续时间相当。

2.3 LFM 脉冲 DAS 系统的探测结构比较

基于 LFM 脉冲 DAS 系统的典型结构如图 4 所示,采用具有长期稳定性的窄线宽激光器作为光源,产生的高相干光经过光纤耦合器被分为两路,一路作为本地参考光(LO),另一路被调制为 LFM 脉冲作为探测光脉冲,经 EDFA 放大后经光环形器注入传感光纤进而产生后向瑞利散射(RBS)光。RBS 光和 LO 发生干涉后由平衡探测器(BPD)转换为电信号后进行采集处理。也有研究人员使用无 LO 的直接探测结构,对两种结构进行比较分析。

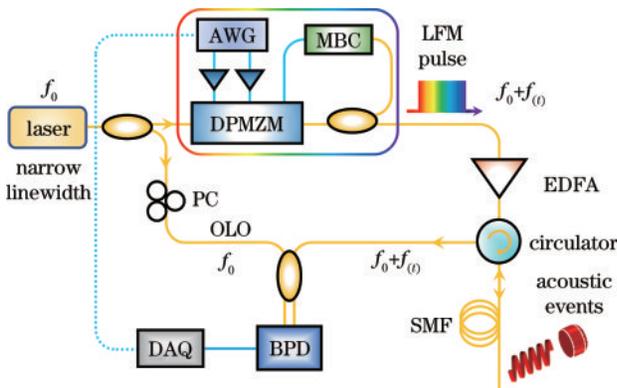


图 4 基于 LFM 脉冲 DAS 系统的典型结构

Fig. 4 Typical structure of LFM pulse DAS system

根据部分离散理论模型,LFM 光脉冲注入光纤后的 RBS 光示意图如图 5 所示^[33],在某一时刻返回接收端的 RBS 光,可以认为是探测光脉冲前半部分所覆盖的散射点产生的 RBS 光的叠加。为了方便分析,将整个 LFM 脉冲光对应光纤位置的 PSL 以单个频率成分划分为一系列长度相等的离散散射单元,记作

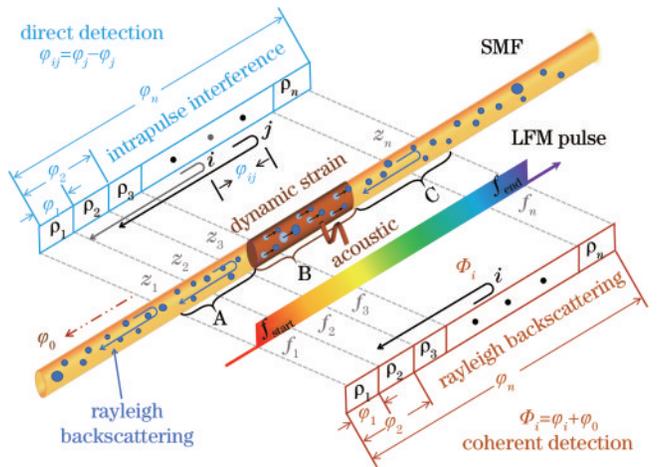


图 5 LFM 脉冲在光纤中的离散散射模型

Fig. 5 Discrete scattering model of LFM pulse in optical fiber

$[z_1, z_2, \dots, z_n]$, 相应离散散射单元的光频率记作 $[f_1, f_2, \dots, f_n]$ 。假设经过时间延迟 τ_i 后 RBS 光返回到接收端的光场表达式为

$$E(t) = \sum_{i=1}^n \rho_i \exp\left(-\frac{\alpha z_i}{2}\right) \exp\left\{j\left[2\pi f_0 - 2\pi f_s - \pi\mu(t - \tau_i)\right](t - \tau_i)\right\} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{T}\right), \quad (19)$$

式中: ρ_i 为每个离散散射单元对应的散射系数; α 为光纤的衰减系数。从初始位置到第 i 个散射单元的时间延迟 τ_i 和相应的距离满足 $z_i = (c\tau_i)/2n$, c 为光在真空中的速度。

待测事件长度小于 PSL 时,在不失一般性的前提下,将发生动态应变的光纤区域记作 B ,而整个 PSL 为 $A+B+C$,如图 5 所示,对应于 B 区域的整个均匀相位变化记作 $\Delta\varphi$ 。对直接检测结构而言,任何两个不同的散射单元 z_i 和 z_j 之间都会发生干涉。因此,光电探测器光电流的交流分量和相位差 φ_{ij} 的关系式为

$$I_{\text{Direct}} = \sum I_{R,S}, R, S \subseteq \{AA, BB, CC, AB, AC, BC\}, \quad (20)$$

$$I_{R,S} = 2 \sum_{i \in R} \sum_{j \in S, j \neq i} \rho_i \rho_j \cos \varphi_{ij}, \quad (21)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_j - \varphi_i = \frac{4\pi n(f_j - f_i)(z_j - z_i)}{c}, \quad (22)$$

式中: R, S 为干涉发生的任意两个区域,二者满足以下集合关系: $R \subseteq \{A, B, C\}, S \subseteq \{A, B, C\}$ 。由于脉冲内干涉现象发生在任意两个离散单元之间,因此 R 和 S 均满足以下集合关系: $R, S \subseteq \{AA, BB, CC, AB, AC, BC\}$ 。只有 I_{Direct} 的干涉分量产生于 B 区域的任意一点和 A 或 C 区域的任意一点之间时,例如 $i \in B$ 同时 $j \in A \& C$,将引起相位的变化。每个干涉分量的相位变化不同,总的干涉信号 I_{Direct} 会发生较大的变化,很难保持原来的相干时域包络形态。对相干探测方式而言,各离散散射单元的 RBS 光与参考光 $E_{LO}(t)$ 之间发生干涉,干涉信号的强度高于 RBS 光

脉冲内任意两个散射单元之间的干涉强度。因此，BPD 输出的交流分量 I_{Coherent} 和相位差 Φ_i 分别为

$$I_{\text{Coherent}} = 2A_{\text{LO}} \exp(j2\pi f_0 t) \sum_{i=1}^n \rho_i \cos \Phi_i, \quad (23)$$

$$\Phi_i = \varphi_i + \varphi_0 = \frac{4\pi n(f_i - f_1)(z_i - z_1)}{c}, \quad (24)$$

式中： A_{LO} 为参考光的振幅； φ_0 为探测脉冲当前所在位置的公共相位，是特定位置的常数。当散射单元 i 分别处于 A、B、C 3 个区域时对应的相位变化分别为 $\Phi_A^i = \varphi_i + \varphi_0$ ， $\Phi_B^i = \varphi_i + \varphi_0 + i \cdot \delta\phi$ ， $\Phi_C^i = \varphi_i + \varphi_0 + \Delta\varphi$ 。 $\delta\phi$ 为 B 区域各散射单元的相位变化，假设 B 区域的散射单元数量为 N ，则 $\Delta\varphi$ 与 $\delta\phi$ 之间的关系为 $\Delta\varphi = N \cdot \delta\phi$ 。因此，相干探测方式的相干时域信号包络可以稳定保持，比直接探测方式更适用于时延估计法来进行相位解调。另外，相干探测方式的信号与直接探测方式相比具有双倍增益，同时抑制共模噪声。

2.4 LFM 脉冲 DAS 的传感原理分类

线性频率调制是一种综合连续波形和脉冲波形优势的扩频调制技术，广泛应用于雷达和激光雷达的距离和速度测量，该项技术陆续被研究人员引入 DAS。根据所使用 LFM 脉冲的长短可将基于 LFM 脉冲的

DAS 分为瑞利干涉图样法^[30,34-36]和光脉冲压缩法^[37-39]。

目前基于 LFM 脉冲的传感技术大多使用的脉冲宽度为百纳秒级，该方法一般是从时域角度对瑞利干涉图样进行分析，大致可分为 3 类。第一类通过依次扫描 φ -OTDR 的光学频率来实现对折射率变化非常敏感的静态测量，可用于温度^[30]、应变^[31]和双折射^[40-41]测量。2009 年，Koyamada 等^[30]提出一种通过控制激光光源频率来实现应变和温度精确测量的方法，其工作原理是利用光脉冲的频率偏移来补偿光纤中的折射率变化。步进式频率扫描和数据处理结构如图 6 所示。假设 f_0 为激光器的初始频率，以 Δf 为步进间隔不断调节激光器的光频，将采集不同激光频率下 N 个脉冲的相干探测信号作为参考，记作采样时间为 T_a 。与另一采样时间 T_b 下不同激光频率的相干探测信号沿着距离轴进行相关运算，例如采样时间 T_a 中的序列 m 和采样时间 T_b 中的序列 $m+1$ ，通过记录相关峰的峰值在频域上的移动轨迹即可获得光纤沿线的应变或温度的变化情况。通过使用上述方法，实现 8 km 传感距离上的分布式温度测量。该方案需要对激光器的频率进行步进式扫描，完成一次测量的等待时间较长，在这种情况下测量时间和系统的复杂性都会增加，因此该系统仅适合静态或准动态的应变和温度的测量。

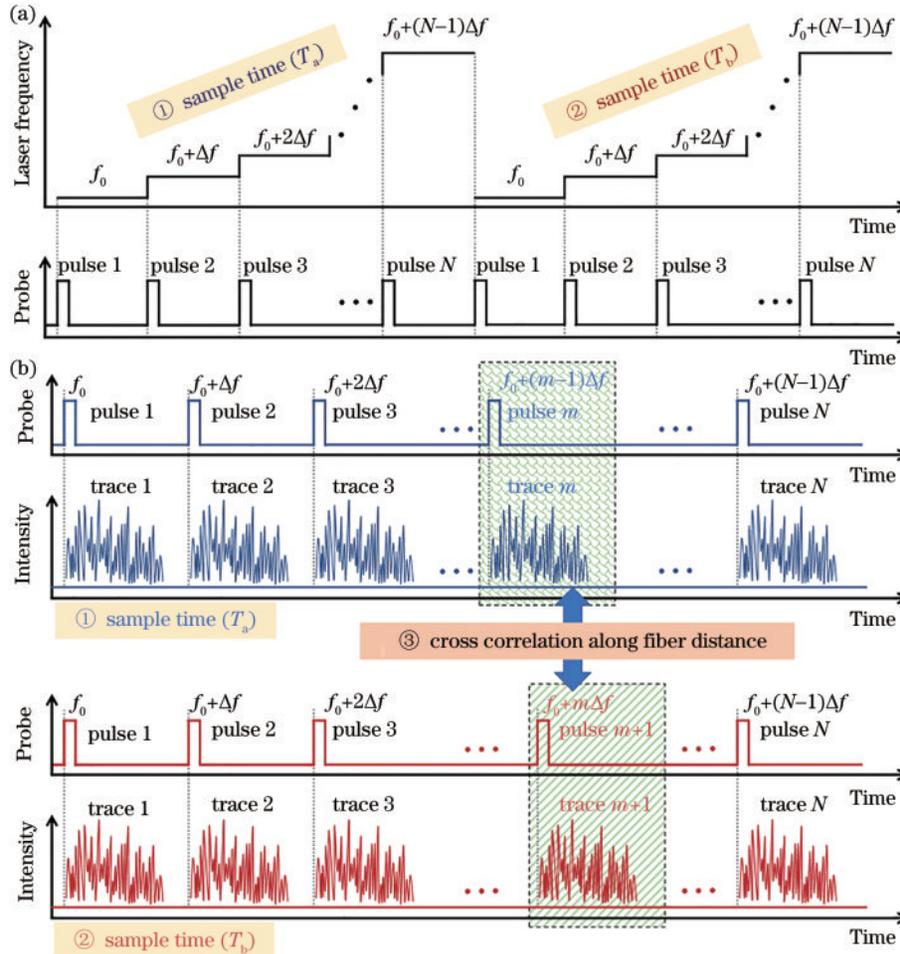


图 6 步进式频率扫描传感测量原理。(a) 步进频率扫描；(b) 数据处理结构

Fig. 6 Principle of step frequency scanning sensor. (a) Step frequency scanning; (b) data processing structure

2015年,Zhou等^[31]通过比较不同激光频率下的信号模式来检测光纤的应变,并从任意激光频率的信号中同时检测出光纤的振动。利用相同频率的光脉冲产生信号检测光纤振动,利用不同频率的光脉冲检测光纤应变。

第二类使用单个 LFM 光脉冲作为探测脉冲可实现对第一类系统的简化,瑞利干涉图样的偏移直接反映了应变变化特征。根据上述方案的原理,Pastor-Graells等^[34]于2016年提出使用 LFM 脉冲代替需要不断步进式扫频的方法,该传感方案可以在一个往返时间中发送具有多个频率成分的光脉冲,其频移补偿原理如图 7 所示。LFM 脉冲在采样时间 T_a 和 T_b 时刻分别得到两个不同的相干瑞利散射时域序列,通过沿距离轴对两个信号进行互相关运算来实现应变、温度以及动态应变的测量,该方案显著提高了系统的测量速度。不过该方案中的 LFM 脉冲是通过改变激光驱动电流调制来模拟产生的,因此需要不断对瞬时频率进行校准工作。随后该组研究人员基于此原理相继提出一些改进的方案来提高传感系统指标^[42-48]。本课题组基于 LFM 脉冲的 DAS 结合并行计算对信号进行处理,分析了并行计算参数线程块大小对并行线程利用效率的影响,以及计算数据量对并行计算加速效果的影响,滑窗相关计算的速度提高了 85.31 倍^[49]。

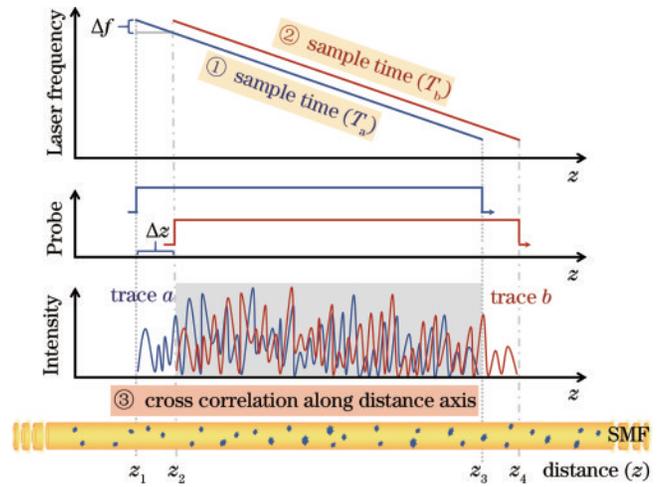


图 7 LFM 脉冲的频移补偿原理

Fig. 7 Frequency shift compensation principle of LFM pulse

第三类是基于 LFM 脉冲的另一种分析方法,采用波长扫描法沿波长域进行相关分析也可以实现动态应变的测量。2018年,Liehr等^[35]提出波长扫描相干光时域反射技术沿激光频率轴提取相干瑞利散射时域信号进行相关分析实现了动态应变的测量,该方法的基本原理和数据处理结构如图 8 所示,由于不需要高带宽

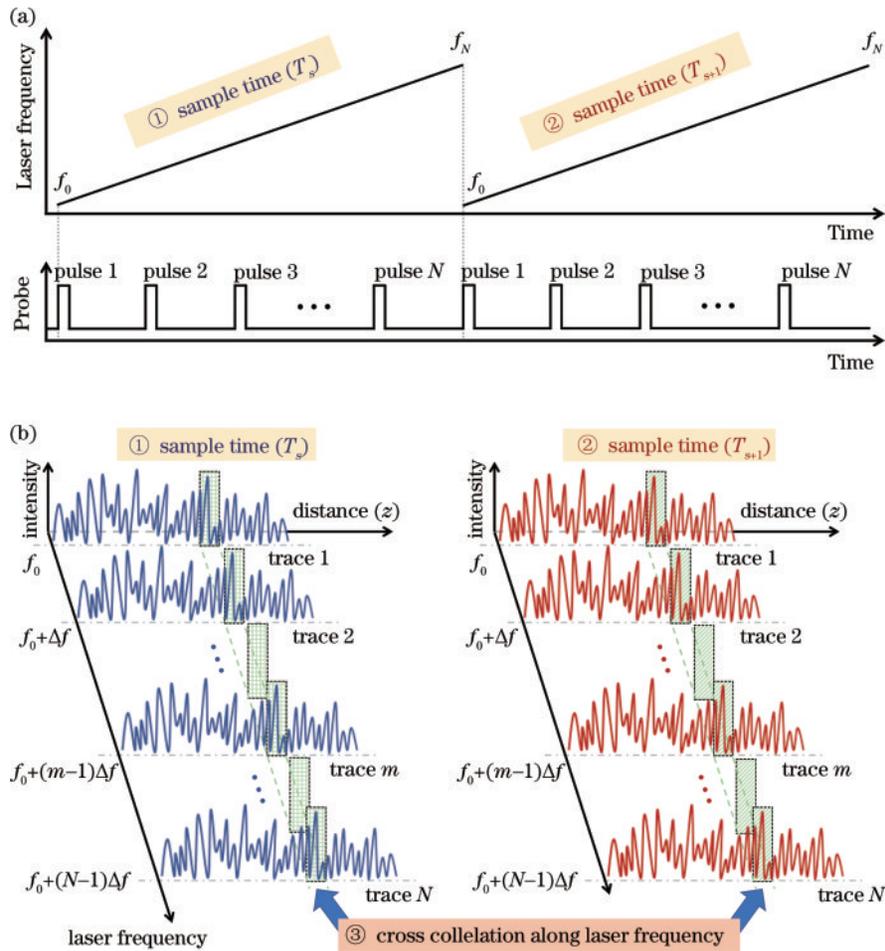


图 8 波长扫描法的传感原理。(a)波长扫描;(b)数据处理结构

Fig. 8 Sensing principle of wavelength scanning method. (a) Wavelength scanning; (b) data processing structure

采样和光电探测硬件,系统复杂性进一步降低。LFM(即波长扫描)范围从 f_0 连续扫描到 f_N ,对应的 N 个脉冲序列定义为一个完整的采样时间。通过对距离轴上某一位置处的相邻采样时间(T_s 和 T_{s+1})内的相干瑞利散射时域信号采用最小二乘相关运算来确定频率的漂移量进而得到应变或温度的变化。

另一种方法则是使用微秒级的长脉冲结合匹配滤波器或非匹配滤波器对 LFM 脉冲进行压缩,如图 9 所示^[50]。平衡光电探测器输出的光电流信号 $i(t)$ 是多个延时不同、幅度系数不同的 LFM 脉冲 $s(t)$ 叠加。在数字域,数字 LFM 脉冲 $h(t)$ 被用来处理原始信号 $i(t)$,如果 $h(t)$ 的参数与 $s(t)$ 完全相同,则称 $h(t)$ 为匹配滤波器;否则,被称为非匹配滤波器。无论是匹配滤波还是非匹配滤波,经过 $h(t)$ 处理后, $i(t)$ 中的 $s(t)$ 被压缩成新的脉冲,压缩后的 LFM 脉冲充分利用了光脉冲的能量,其主瓣的半高全宽决定了空间分辨率,在频域对干涉信号进行处理进而实现高空间分辨率的传感测量。2015 年,Wang 等^[37]使用匹配滤波器对 LFM 脉冲的散射信号进行压缩,并结合光学混合器实现了空间分辨率为 3.5 m 的振动信号动态测量。2017 年,Lu 等^[38]使用 LFM 脉冲作为探测光脉冲,在接收器中使用匹配滤波器来压缩处理后的脉冲宽度,使得普通 φ -OTDR 的传感距离和空间分辨率矛盾得以缓解。2018 年,Mompó 等^[39]提出使用线性频率调制的高斯型 LFM 脉冲在光学脉冲压缩反射计,通过调节激光器驱动电流实现频率扫描,最终实现了 50 km 光纤链路末端的动态事件检测。2019 年,Chen 等^[51]提出非匹配滤

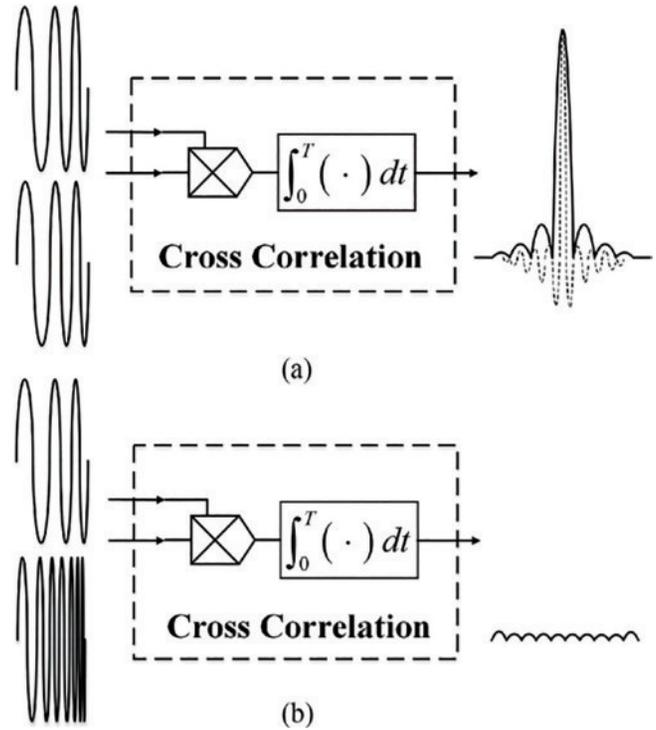


图 9 脉冲压缩的基本原理^[50]。(a)匹配滤波器;(b)非匹配滤波器
Fig. 9 Basic principle of pulse compression^[50]. (a) Matched filter; (b) unmatched filter

波器算法,将瑞利快速频率解调法用于基于 TGD-OFDR 的 DAS 系统,其空间分辨率由脉宽和非匹配率共同决定,使得此类系统灵活可调且对衰落噪声免疫。整理归纳了基于 LFM 脉冲 DAS 的传感原理分类及特点比较,如表 1 所示。

表 1 基于 LFM 脉冲 DAS 的传感原理分类及比较

Table 1 Classification and comparison of sensing principles based on LFM pulse DAS

| Classification | Reference | Key technology | Technical characteristics |
|------------------|-----------|--|--|
| Time domain | [30] | Stepping frequency scanning method | Static measurement (temperature, strain, etc); Cross correlation along fiber distance; Complex system with long measurement time |
| | [34] | Linear frequency scanning method | Static and dynamic measurement; Cross correlation along fiber distance; Single shot measurement |
| | [35] | Wavelength scanning method | Static and dynamic measurement; Cross correlation along laser frequency; Simple system solution |
| Frequency domain | [37] | Long pulse combined with pulse compression | Static and dynamic measurement; Rayleigh fast frequency demodulation; High spatial resolution |

3 基于 LFM 脉冲的 DAS 性能指标发展历程

基于 LFM 脉冲的 DAS 与 φ -OTDR 的传感系统一样,存在传感距离与空间分辨率、频率响应等性能指标之间的制衡问题。系统的信噪比取决于所使用光脉冲

的能量大小,当增加输入光脉冲的峰值功率或脉冲持续时间可以实现传感距离和信噪比的提升时,空间分辨率也同时受到影响。然而,光纤中的非线性折射(克尔效应)会引起一系列非线性效应,如自相位调制和调制不稳定性效应等,因此光脉冲的峰值功率不能无限增加。此外,激光的相位噪声、LFM 脉冲的信号质量

和系统衰落噪声等因素也会对 LFM 脉冲的 DAS 性能有直接的影响,因此需要根据实际工程需求来权衡各个性能指标的提升方案。将从传感距离、空间分辨率、频率响应与衰落噪声抑制 4 个关键技术指标分别对基于 LFM 脉冲的 DAS 性能指标发展进行梳理。

3.1 传感距离

为了解决传统 OFDR 中传感距离和空间分辨率之间的矛盾,Liu 等^[27]提出 TGD-OFDR 技术,在时间窗口内扫描探测光束的频率,而参考光保持频率稳定的连续光波,通过数字域等效参考实现频率-距离的映射。在长度为 110 km 的传感光纤上获得了 1.6 m 的空间分辨率。随后,Steinberg 等^[52]在 OFDR 中使用了时频混合技术。在 LFM 脉冲中,通过门控询问信号可以获得具有极高扫描速率的可调谐测量窗口,在 101 km 处实现了空间分辨率为 1.4 m 的超灵敏动态传感。之后,Chen 等^[53]将 LFM 脉冲的形状预调制到标准汉宁窗口中抑制串扰,双向一阶分布式拉曼放大技术被用于 TGD-OFDR 的 DAS 系统,实现了 108 km 的传感距离和 5 m 空间分辨率的动态测量。此外,Xiong 等^[54]提出了一种子啁啾脉冲提取算法,以取代传统方案中耗时的扫描过程,该算法可以提取子啁啾脉冲的瑞利散射信号,其啁啾率可不同于探测啁啾脉冲的啁啾率。在没有分布式拉曼放大的情况下,系统中传感范围为 75 km,空间分

辨率为 2 m。此外,Zhang 等^[55]提出了一种多频非线性调频(NLFM)探测脉冲,该脉冲使用具有高旁瓣抑制比的 NLFM 脉冲来抑制相邻反向散射点的串扰。预失真多频技术抑制了光学非线性效应,提高了系统的探测脉冲能量,从而增强了直接检测结构的 φ -OTDR 的传感距离。Pastor-Graells 等^[43]将 LFM 脉冲信号与双向一阶拉曼放大技术相结合,在直接检测的情况下实现了 75 km 的传感范围和 10 m 的空间分辨率。本课题组通过使用双 LFM 脉冲和 WFBG 阵列的相互作用产生具有固定载波频率的干涉脉冲感知光纤的应变,并使用基于离散傅里叶变化的相位提取方法,提取干涉脉冲的相位变化以对应光纤上的应变。所提系统可以实现 101.64 km 光纤末端的声传感^[56]。

Ip 等使用频率分集 LFM 脉冲 DAS 通过相关检测、分集组合和双向全拉曼放大实现了超过 1000 km 的 DAS 实验。当标距长度为 20 m 时,系统实现了约 $100 \text{ ps}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的传感性能,成功观察过往车辆、火车和建筑造成的真实振动。图 10 为一段现场光纤 40 s 周期内的瀑布图,分别展示了火车正反向经过某地点、没有火车经过的环境情况,以及地理光纤附近的周期性机械事件。同时还使用无频率分集 LFM 脉冲 DAS 实现 210 km 范围内动态事件的实时监测能力,结果如图 11 所示^[57]。

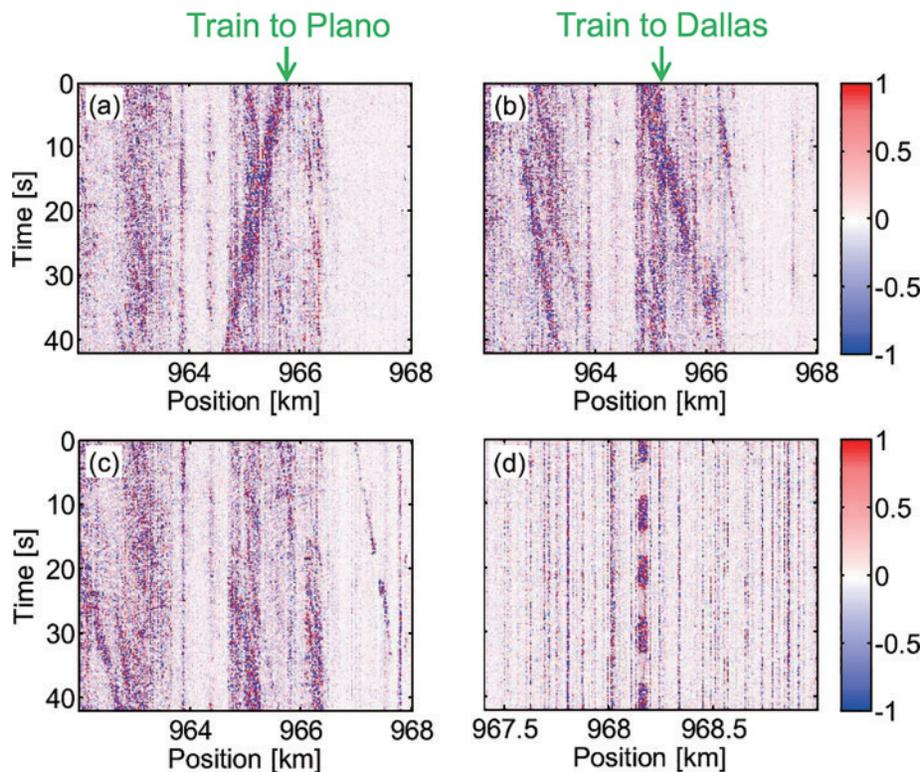


图 10 一段现场光纤 40 s 周期内的瀑布图^[57]

Fig. 10 Waterfall plot over a 40 s period for a section of field fiber^[57]

3.2 空间分辨率

研究人员基于 LFM 脉冲的时域或频率 DAS 系统,先后提出不同的方案来对空间分辨率进行优化。对时

域系统而言,Pastor-Graells 等^[42]受啁啾脉冲放大概念的启发,使用线性啁啾光纤布拉格光栅对输入超短探测脉冲进行物理时间拉伸和放大。大大增加了探测脉冲的

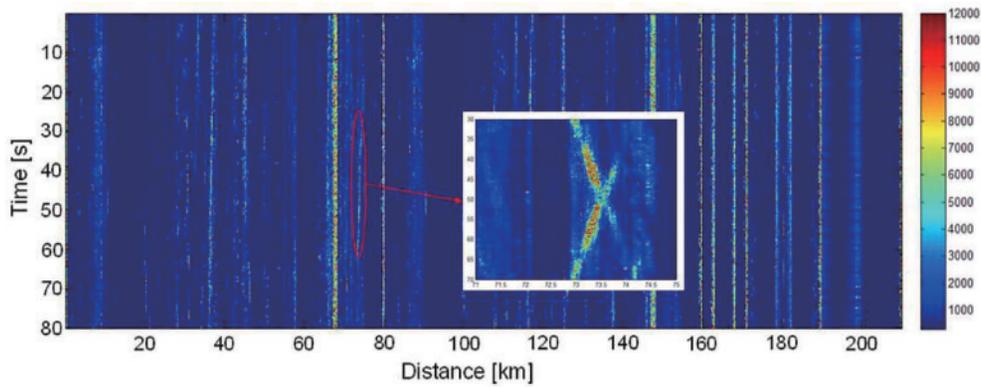


图 11 实时 LFM 脉冲 DAS 生成的全长 209.4 km 链路的瀑布图^[57]

Fig. 11 Waterfall plot for the full 209.4 km link produced by the real-time LFM-DAS^[57]

能量,同时避免了光纤内的非线性相互作用,并在不影响空间分辨率的情况下实现了信噪比的提高。最终该系统实现了 1.8 cm 的空间分辨率,同时信噪比提高了 20 dB。Wu 等^[58]采用了 LFM 脉冲和相位噪声补偿技术,结合弱反射器阵列在 20 km 链路中实现 20 m 的空间分辨率和 500 Hz~2.5 kHz 的频率响应。Lu 等^[38]使用

具有更高脉冲能量的 LFM 脉冲并结合匹配滤波器来压缩处理,在 19.8 km 的传感光纤中实现了 30 cm 的空间分辨率,信噪比约为 10 dB。Mompó 等^[39]使用基于 LFM 的高斯探测脉冲和相干检测来降低旁瓣,实现了 50 km 光纤链路末端的 34 cm 空间分辨率的 500 Hz 动态事件测量,实验装置图和空间分辨率结果如图 12 所示。

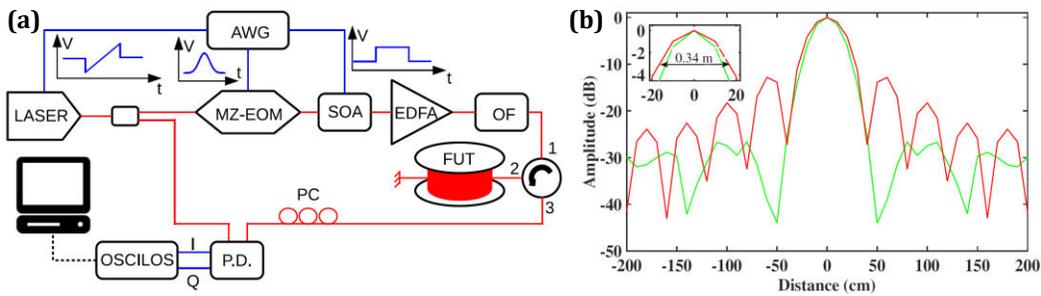


图 12 光脉冲压缩反射技术。(a)实验装置;(b)高斯型脉冲的空间分辨率^[39]

Fig. 12 Optical pulse compression reflectometry. (a) Experimental setup; (b) spatial resolution of Gaussian pulse^[39]

在 OFDR 系统中,Wang 等^[37]使用 LFM 脉冲结合脉冲压缩技术在 40 km 的传感范围内测量频率达到 600 Hz,并获得 3.5 m 的空间分辨率。Chen 等^[59]分析了相位噪声和后向散射强度之间的关系,提出基于 LFM 脉冲的内脉冲变频方法,实现了 35 km 光纤上 1.25 kHz 的振动响应带宽,空间分辨率接近 5 m。随后,Chen

等^[51]通过结合光学 LFM 脉冲和非匹配滤波器方法改进了上述系统方案,采用瑞利干涉图样法对振动信号进行解调,在 10 km 传感距离上实现了 2 m 的空间分辨率,信噪比为 35 dB,实验装置和结果如图 13 所示。

3.3 频率响应

在实际工程应用中,频率的检测范围直接决定了

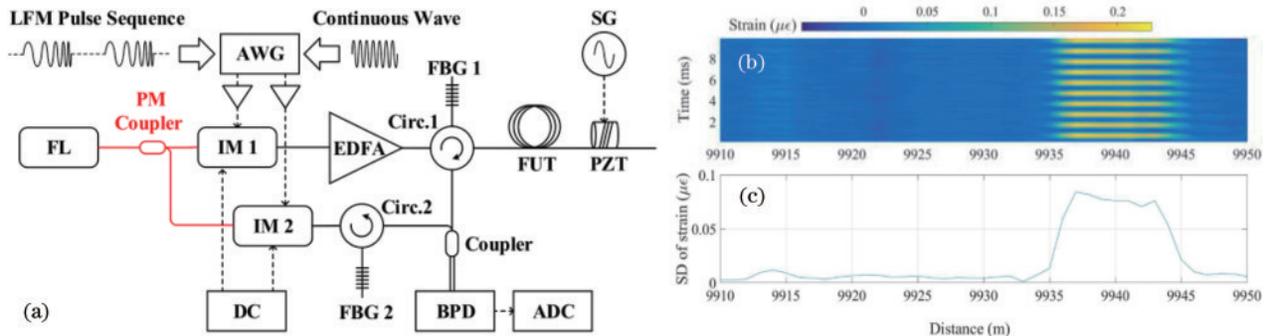


图 13 LFM 脉冲结合非匹配滤波技术。(a)实验装置;(b)应变分布;(c)应变分布的标准差^[51]

Fig. 13 LFM pulse combined with unmatched filtering technology. (a) Experimental setup; (b) strain distribution; (c) standard deviation of strain distribution^[51]

声振信号的检测情况。因此,频率响应始终是 DAS 中有价值的参数之一。基于 LFM 脉冲的 DAS 技术也不断改进,以提高频率响应范围。为了通过相干检测改善 φ -OTDR 系统的频率响应,Wang 等^[60]提出基于 LFM 脉冲和匹配滤波器的测量方案,通过避免耗时的阶跃频率调谐过程,系统可以获得高响应带宽。在 10 km 传感距离上实现 0.9 m 的空间分辨率和 5 kHz 的响应带宽。Wang 等^[61]提出了一种全同间插 LFM 脉冲优化该方案,并可以复用相同的 LFM 脉冲,直接解调混合反射信号,从而避免了频分复用(FDM)技术中不一致的相位偏移,结果表明频率响应范围高达 277 kHz,实验装置图和结果如图 14 所示。Chen 等^[50]在 TGD-OFDR 系统中引入了 FDM 技术,基于欠采样的方法

来降低模数转换器的采样率和数据量。通过连续注入不同频率范围的 LFM 探针脉冲,在 24.7 km 的传感光纤上检测到两个振动频率高达 9 kHz 的振动事件。Zhang 等^[62]通过使用辅助弱反射点作为解调单元,实现了具有宽频率响应的长距离振动波形测量。实验中成功测量了 100 km 中 20 kHz 的单点振动。同时,基于 LFM 脉冲的 DAS 对于低频响应也得到了实际的应用研究。Fernández-Ruiz 等^[63]使用基于 LFM 脉冲结合二维线性滤波算法滤除大量噪声分量,实现了 0.02~1 Hz 之间不同波段的地震波探测。与宽带地震仪测量结果相比,低成本的 LFM 脉冲 DAS 也可以测量准确的结果,确保了光纤传感器的可靠性。

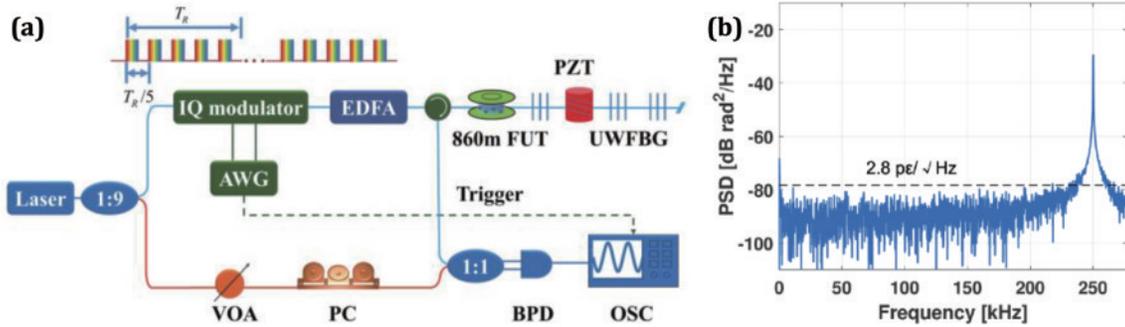


图 14 全同间插 LFM 脉冲技术^[61]。(a)实验装置;(b)功率谱密度

Fig. 14 Interleaved identical LFM pulses technology^[61]. (a) Experimental setup; (b) power spectral density

3.4 衰落噪声抑制

基于光纤瑞利散射的 DAS 技术,由于使用高相干探测光波,在后向散射过程中会不可避免地出现干涉衰落效应,在相应的位置会成为传感盲区^[64]。LFM 脉冲的 DAS 系统由于使用了调频脉冲可提升系统的信噪比,并且具有抑制衰落噪声的效果。研究表明,将 LFM 脉冲和 FDM 技术结合对干涉衰落的抑制效果更显著。Chen 等^[59]将一个包含四段频率的长 LFM 脉冲作为探测光,使用匹配滤波分离出不同频率的瑞

利散射曲线,并通过旋转矢量求和方法整合相位信息消除干涉衰落。此外,旋转矢量求和方法不需对每个频率信息分别进行解卷绕和相位差分操作,具有较快的信号处理速率。本课题组提出异构双边带(HDSB) LFM 脉冲调制方法^[65-67],利用 LFM 脉冲的斜率矢量特性在上下边带分别加载调频带宽相同、斜率相反的信号,可同时实现噪声抑制和灵敏度倍增的效果,低频噪声被抑制了 27 dB,具体原理如图 15 所示。此外,还提出了基于 LFM 脉冲的虚拟块阵列空间差分

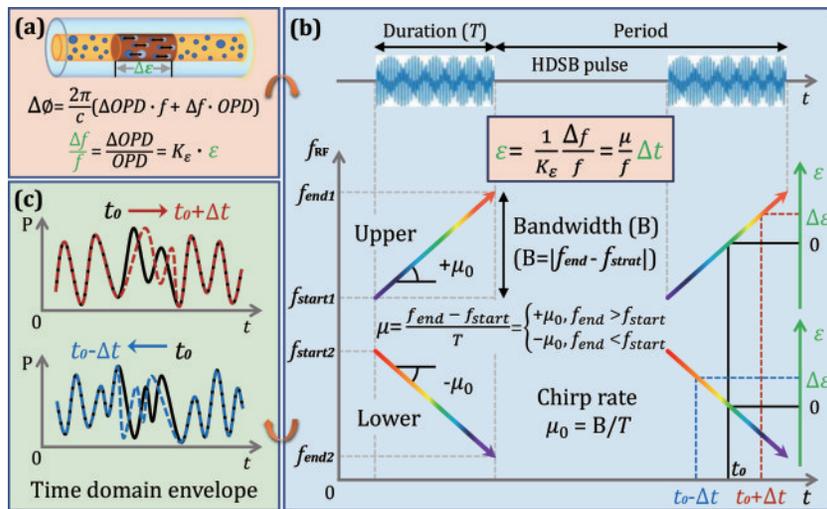


图 15 HDSB-LFM 脉冲原理示意图^[66]。(a)传感光纤;(b)HDSB-LFM 脉冲;(c)相干时域信号

Fig. 15 Schematic diagram of LFM pulse principle of HDSB^[66]. (a) Sensing fiber; (b) HDSB-LFM pulse; (c) coherent time-domain signal

相位提取方法,解决了干涉衰落的影响和信噪比差的问题,信噪比达到 47.28 dB^[68]。此外,Xiong 等^[69]提出去啾啾和时域子啾啾脉冲的 DAS 系统,首先将高频率的瑞利散射信息映射到小带宽的接收信号上,利用子啾啾提取算法再将小带宽接收信号转换为大频率的瑞利散射图样。

在 DAS 关键性能指标进一步突破的研究过程中,通常各指标之间会形成关联关系,因此主要从传感距离、空间分辨率、频率响应和衰落噪声抑制 4 个关键指标进行梳理。汇总了国内外近年来基于 LFM 脉冲 DAS 的部分代表性工作如表 2 所示,由表 2 可知,这些进展显著拓展了传统 DAS 的性能。

表 2 基于 LFM 脉冲的 DAS 性能指标发展历程
Table 2 Development of DAS performance indicators based on LFM pulse

| Year | Key technology | Sensing distance /km | Spatial resolution /m | Frequency response /Hz | Fading noise |
|------|---|----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|
| 2015 | Time gated LFM pulse ^[27] | 110 | 1.6 | | Yes |
| 2017 | LFM pulse with first-order Raman amplification ^[43] | 75 | 10 | 500 | No |
| 2019 | Hanning window pre-distorted LFM pulse ^[53] | 108 | 5 | 455 | No |
| 2020 | Dual identical LFM pulse + weak FBGs ^[56] | 101.64 | 10 | 80 | Yes |
| 2023 | Frequency-diversity LFM pulse + diversity combining + Raman amplification ^[57] | 1007 | 20 | 16 | Yes |
| 2015 | LFM pulse with 90° optical hybrid ^[37] | 40 | 3.5 | 600 | Yes |
| 2017 | LFM probe pulse ^[38] | 19.8 | 0.3 | 200 | Yes |
| 2018 | LFM Gaussian pulse ^[39] | 50 | 0.34 | 700 | Yes |
| 2019 | LFM pulse and Non-matched filter ^[51] | 10 | 2 | 5000 | No |
| 2019 | LFM pulse and matched filters ^[60] | 10 | 0.9 | 5000 | Yes |
| 2017 | LFM pulse based on FDM ^[50] | 24.7 | 10 | 9000 | Yes |
| 2020 | Interleaved identical LFM pulse ^[61] | 0.86 | 5 | 277000 | No |
| 2020 | LFM combined with weak reflector arrays ^[62] | 100 | 0.1 | 20000 | No |
| 2020 | LFM pulse + 2D linear filtering ^[63] | 42 | 10 | 0.02-1 | No |
| 2020 | LFM pulse + phase analysis method ^[68] | 1.2 | 10 | 1500 | No |
| 2020 | Positive and negative LFM + RVSM + Raman amplification ^[70] | 103 | 9.3 | 10800 | No |
| 2021 | Continuous LFM wave ^[71] | 1 | 4.4 | 1000000 | No |

4 典型应用

作为一种环境适应性强、传感距离长、时空分辨精度高、可实时监测的新型分布式光纤传感技术,研究者们围绕 DAS 展开了大量的探索性试验,并在多个领域中取得了重要的应用进展。典型的应用领域主要集中在地球物理学和线性基础设施监测两方面。对前者而言,需要获取具体位置的声振波形信息,传统的感知系统(地震仪、检波器、节点阵列)在需要大规模密集探测的场景中无法满足实际应用需求,因此需要寻找一种具有空间采样密度高、测量范围广、成本低、便捷度高等优势的系统来代替。铁路、隧道、管线等线性基础设施因受地质灾害、人类活动的影响,面临潜在损坏的风险,通常需要对声振事件进行精准探测和分类,而不是只对事件具体的波形进行重构。因此,根据具体波形信息的需求对 DAS 的典型应用领域进行分类介绍。

4.1 地球物理学领域的应用

1) 天然地震波探测

地震活动的探测是了解地球内部结构和动力学的

为的关键。常见的地质灾害包括地震、海啸、泥石流和山体滑坡等,这些灾害都会给人们的生活带来巨大危害,因此研究地质灾害的演化规律,掌握预警灾害的办法一直是相关领域的研究重点。相比于传统地震波感知系统,DAS 可以将数百公里的地理光缆变成密集排列的“地震仪”,是一种空间连续的远程感知探测技术,且具有更宽的频响范围,可有效弥补乃至代替现有预警手段。

近年来,国内外研究人员开展了大量的现场试验研究^[72-75]。2018 年,Jousset 等^[73]使用既有的通信光缆实现天然地震波和人造震源的定位和监测,并初步实现了断层破坏区的成像。2019 年,Williams 等^[74]使用基于 LFM 脉冲的 DAS 系统观测了比利时近海的微震、局部地表重力波和远震。捕捉到斐济发生的 8.2 级地震,并与陆上地震检波器的数据进行比较,如图 16 所示。2020 年,Walter 等^[75]利用 DAS 在阿尔卑斯山的冰川表面进行冰震和岩崩监测,根据监测结果反演冰川及岩床厚度和材料特性。多项研究结果表明,DAS 可以充分利用海陆大规模冗余通信光缆^[76],构建全球范围内的天然地震波检测网,实现地质灾害

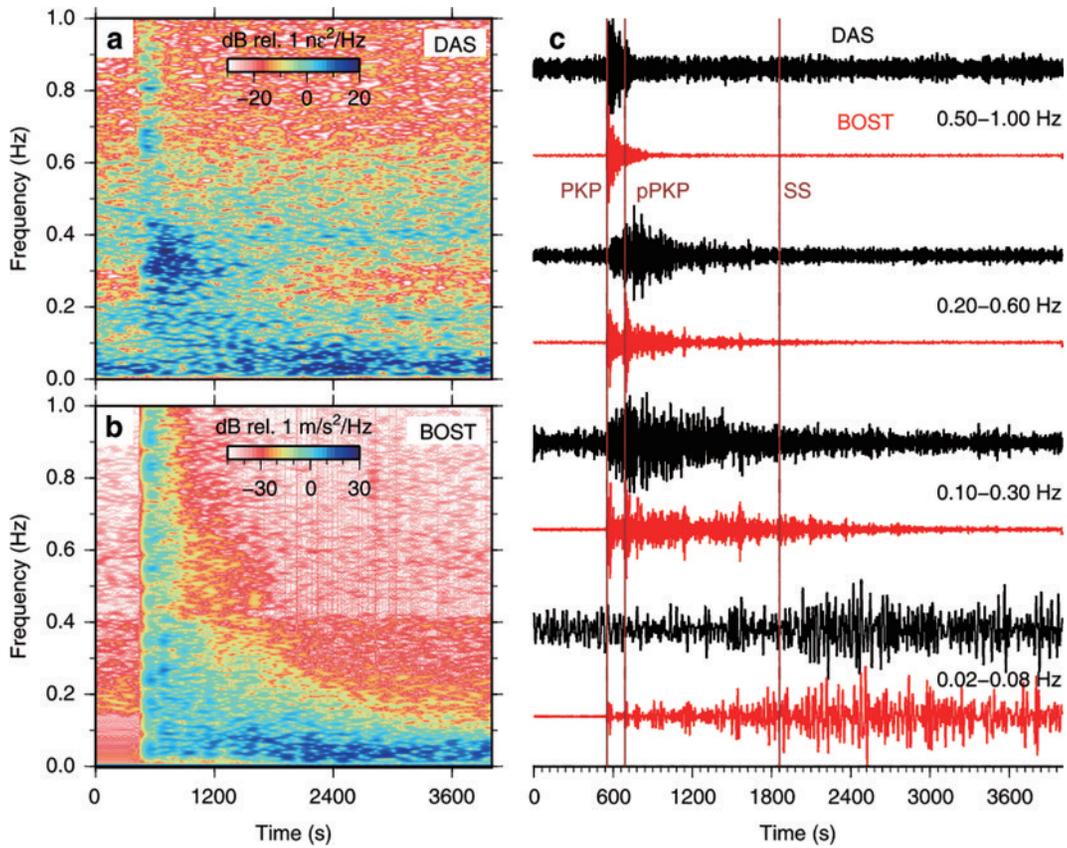


图 16 DAS与地震检波器的结果比较^[74]。(a)DAS测量结果;(b)地震检波器测量结果;(c)探测波形比较

Fig. 16 Comparison of measurement results between DAS and geophones^[74]. (a) Measurement results of DAS; (b) measurement results of geophones; (c) comparison of detection waveforms

预警。但是,目前的陆地和海底冗余通信光缆排布走向不统一,需要首先解决既有通信光缆的定标问题才能实现不同DAS系统的灵活阵列化。

2) 油气资源勘探

垂直地震剖面(VSP)分析是一种井中地震观测技术,在油气资源勘探领域广泛应用。常规的检波器在井中安装复杂、无法大规模密集布设,数据采集范围有限等问题,使得油气资源勘探的成本较高^[77]。DAS技术自身具备的众多优势可以很好地弥补VSP的不足,如可用永久安装的光缆代替沿钻井安装的检波器,占井空间小,其可以降低成本也不影响油井的其他作业。此外,传感光缆具备耐高温、抗腐蚀等特性,能够胜任各种复杂的井况。

2011年,Miller等^[78]证明DAS系统具备VSP采集的能力,随后各国的科研工作者先后尝试使用DAS采集VSP数据,如海基自喷井VSP^[79]、压裂开采时移VSP^[80]、多分量VSP检测^[81]、VSP数据质量评估^[82]等方面的研究工作。Li等^[83]在华北油田进行试验,对比了可控震源激发条件下DAS与检波器采集的数据,如图17所示。该结果表明:二者的振幅衰减规律、频谱及子波的形态均保持较好的一致性,进一步验证了DAS具有VSP采集的能力。研究还发现检波器受套管内井筒波干扰严重,而传感光缆则布设在套管外侧,

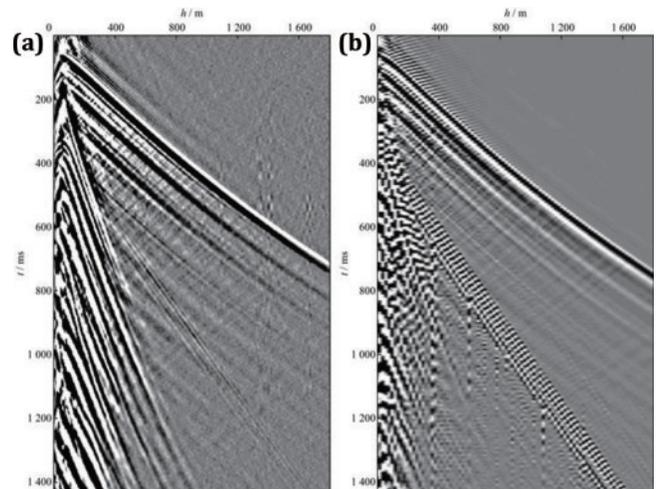


图 17 DAS与检波器结果比较^[83]。(a)DAS测量结果;(b)检波器Z方向分量的VSP结果

Fig. 17 Comparison of DAS and geophone^[83]. (a) Measurement results of DAS; (b) VSP results of the Z-direction component of the detector

因此DAS采集的数据受干扰更小。DAS虽然在VSP采集上具备一定优势,但数据的信噪比较低,且缺少部分方向的地震数据。因此,未来的实际勘探中还需对光缆的布设形态进行改进,使得光缆与周边介质具备更好的耦合效果。

3) 地下结构探测与成像

地下空间结构的智能开发和工程安全是世界各国发展的重要研究内容之一,地下结构微弱变化可能会引起建筑与重大设施的毁灭性灾难,如土壤松散会导致地面沉降与道路垮塌、永久冻土融解会造成地上建筑物损害等。将 DAS 与面波成像技术相结合可实现地下浅层结构的探测与成像。

Daley 等^[84]使用 Silixa 开发的 DAS 系统记录重锤激发的面波信号,并成功提取出面波频散曲线,展示了 DAS 在主动源面波成像中的应用潜能。Dou 等^[85]利用 L 型光纤阵列实现了近地表交通噪声的监测与分析。随后研究了 DAS 在近地表结构成像^[76]、环境噪声滤除^[86]等方面的应用。Lin 等^[87]将 DAS 与背景

噪声成像技术结合,记录背景噪声数据并反演得到 DAS 阵列下方近百米深处的横波波速结构。城市中包含大量冗余的通信光缆,理论上只需要将 DAS 与地下的通信光缆相连便可以进行数据采集,因此探测过程会十分方便。不仅如此,利用 DAS 进行城市浅层结构探测还具有其他优势,如探测范围广、成本低、隐蔽性高、监测时间长等。Fang 等^[88]利用斯坦福校园下方的通信光缆作为 DAS 监测阵列,成功监测到由周边地下室开挖所引起的浅层结构波速变化,如图 18 所示。该实验结果证明:DAS 具有监测地下浅层结构变化的能力。随着 DAS 探测能力的进一步完善,其将在城市地下空间结构探测和智慧城市发展方面发挥巨大的作用。

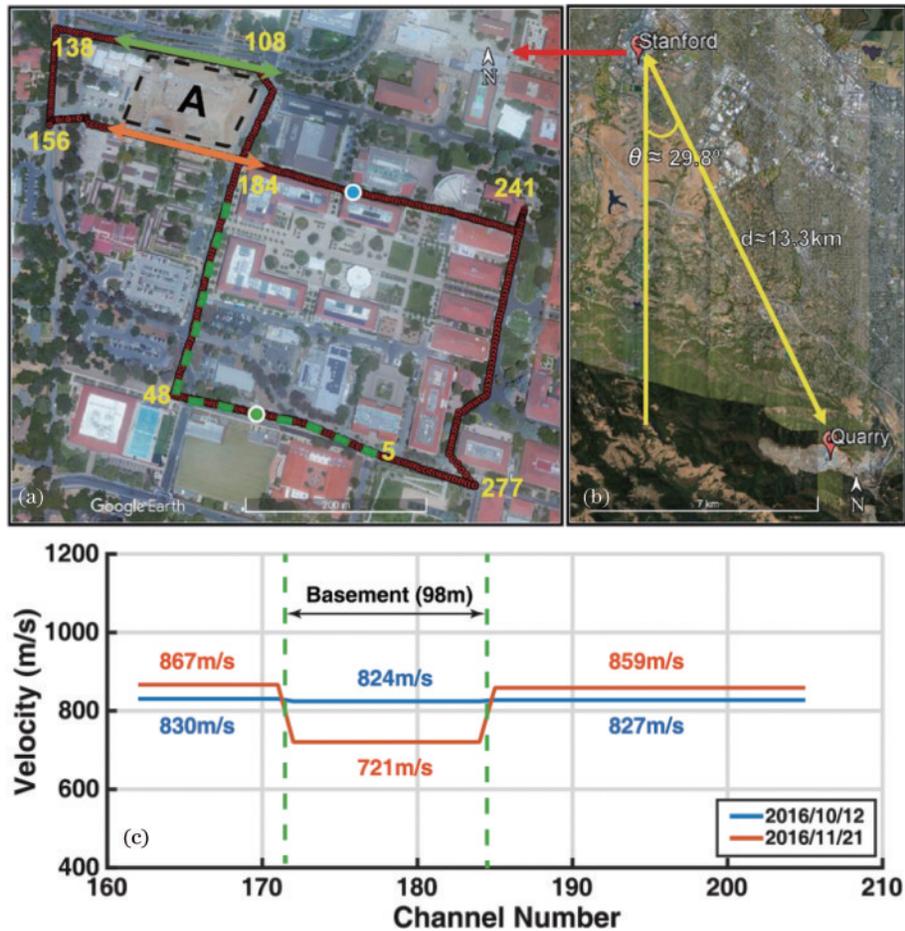


图 18 DAS 阵列及探测结果^[88]。(a)DAS 阵列的布局;(b)采石场相对于 DAS 阵列的位置;(c)开挖前后三段测得的平均速度

Fig. 18 DAS array and detection results^[88]. (a) Layout of the DAS array; (b) location of the quarry relative to the DAS array; (c) average velocities measured in three segments before and after excavation

4.2 线性基础设施的监测

线性基础设施(如铁路、公路、管道、隧道和输电线路等)是一种跨度较长的通用基础设施,其具有距离长、分布范围广、使用寿命长的特点,广泛分布于复杂多变的自然环境中。这些线性基础设施在经济和社会发展中发挥着重要作用。然而,由于地质灾害、地震、腐蚀、老化、人类活动和其他多重因素的影响,线性基础设施在其服役期间面临结构退化和损坏的潜在风

险^[5]。因此,为了确保线性基础设施的安全可靠运行,需要稳健高效的监控系统。目前线性基础设施的监测系统主要是基于非接触探测和岩土工程仪器探测技术。在监测灵敏度、频率以及覆盖范围方面,这些方法大多存在缺陷,使其难以对线性基础设施进行准确、实时和全面监测。DAS 在长距离、高密度和实时监测方面具有独特优势,除了地球物理学领域,还在线性基础设施监测领域发挥重要的作用。近年来,研究人员使

用 DAS 对线性基础设施进行大量实地调查,主要列举轨道健康监测、公路交通监测和管道安全监测方面的应用。

1) 轨道健康监测

轨道交通在世界范围内需求不断增加,列车定位与轨迹监测、高速铁路入侵监测、轮轨安全在线检测等对铁路安全运营日益突出。在列车定位和速度监控中,轨道电路技术被广泛使用^[89]。然而,在一些极端天气条件下,如超强闪电,轨道电路技术可能无法正常工作,应用其他传感技术也有限制。例如,全球定位系统(GPS)在封闭环境(如隧道)中的感知能力较弱,无法获得准确的列车运动信息。

DAS 的发展为列车定位、速度监控和健康监测提

供了新的解决方案。2013 年,英国国家铁路公司在风河峡谷使用 OptaSense 公司的 DAS 系统进行列车轨道沿线的落石监测模拟,经实验测试其检测准确率超过 95%,模拟落石监测结果如图 19 所示^[90]。2020 年, Milne 等^[91]基于 DAS 对铁路的机械性能进行连续的时间和空间监控。使 DAS 系统对附着在长度为 10.4 m 的单轨腹板一侧的顶部和底部的光纤进行传感监测。虽然案例研究站点的长度相对较短,但开发的原则表明,该系统也同样适用于长度较长的轨道。Kowarik 等^[92]基于 DAS 系统提出了优化的人工神经网络算法,沿时间或空间方向定位数据中的列车信号,并且发现以 160 km/h 速度行驶的列车,速度标准偏差小于 5 km/h。

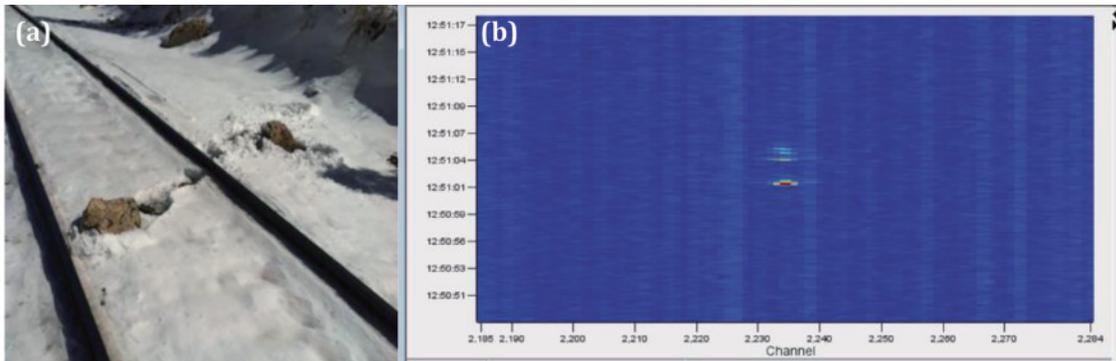


图 19 模拟落石监测结果^[90]。(a)铁路沿线落石;(b)落石监测瀑布图

Fig. 19 Simulated rockfall monitoring results^[90]. (a) Rockfall along the railway; (b) rockfall monitoring waterfall

2) 公路交通监测

公路交通是人们生活的重要组成部分,为了监控公路交通,近年来开发了各种固定(雷达枪、道路传感器、摄像头等)和移动(车辆 GPS、移动电话等)监控技术。前者可以提供高分辨率的监测数据,但其安装和维护成本较高,空间覆盖率相对较低。后者具有较高的空间覆盖率,但其数据收集频率较低,无法进行实时监控,可能还涉及个人隐私问题。因此,迫切需要新的交通监控系统。

DAS 系统可为公路交通监控提供替代方案。通信光缆大多预埋的道路下方,这种检测方法具有很强的隐蔽性,且埋在地下的电缆可以避免长期监测过程中的物理损坏。Wang 等^[93]使用道路下方的通信电缆监测了帕萨迪纳玫瑰游行。通过分析传感光缆收集的振动信息,成功识别交通特征信号,如行人、摩托车和彩车。此外,还提出了一种测量道路交通流量和速度的方法,并分析了新冠肺炎爆发前后的城市道路交通状况^[94],结果如图 20 所示。可以看到新冠肺炎爆发后,城市总体交通流量下降,而速度有所提高。经过比较分析,DAS 的监测结果与其他监测技术的结果具有良好的 consistency,充分证明了 DAS 在公路交通监测中的可行性。Catalano 等^[95]提出了霍夫变换在车辆计数中的应用,并演示了自动检测和计数车辆的算法。现场

测试表明:该算法的准确率达到 73%。

3) 管道安全监测

管道作为安全、廉价的运输设备,广泛用于石油、天然气和其他产品的运输。管道运行状态的实时监测可以有效维护管道安全,延长管道使用寿命。近年来,分布式光纤传感技术在管道安全监测中得到广泛应用。例如,分布式温度传感(DTS)技术用于监测管道泄漏^[96-97],分布式应变传感(DSS)技术用于监控管道变形^[98]。然而,其为静态监测技术,不能对管道进行实时和动态监测。

研究人员提出将 DAS 与人工智能算法(如模式识别、神经网络和支持向量机)相结合,以处理大量实时监测数据^[99-101]。近期的研究工作使用了多种模式识别算法来分类和识别不同类型的机械入侵信号,如大型挖掘机撞击地面、大型挖掘机刮擦地面和小型挖掘机沿着地面移动等^[102]。这些算法显示出良好的分类和识别效果,可以显著降低入侵检测中的误报率。同时,为了解决复杂和恶劣监测环境中人类和动物活动分类的困难,He 等^[99]设计了一个双阶段识别网络并进行现场实验,探索该网络对五种不同类型入侵事件的识别精度,如动物入侵、人类入侵和机械挖掘,平均识别率达到 97.04%。此外,Yang 等^[100]提出一种用于远程管道入侵监测的半监督学习方法,在低信噪比条

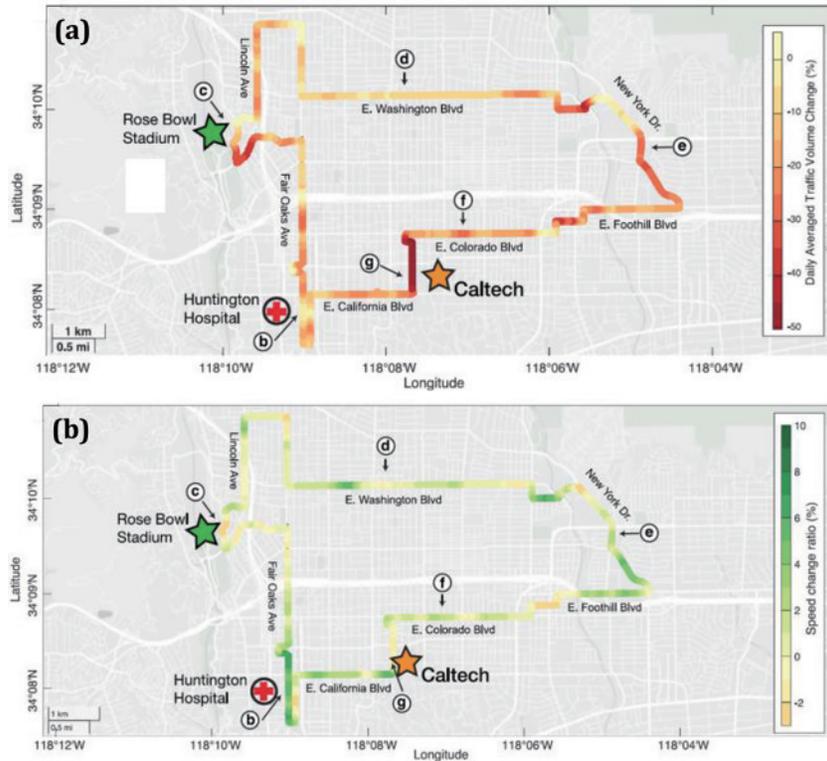


图 20 基于 DAS 的封锁前后交通变化^[94]。(a) 平均每天交通量变化; (b) 平均交通速度变化

Fig. 20 Traffic changes before and after blockade based on DAS^[94]. (a) Average daily traffic volume change; (b) average traffic speed change

件下有效提高了识别和定位入侵事件的能力。

5 未来展望

1) DAS 数据存储、传输和处理。基于 LFM 脉冲的 DAS 使用 LFM 脉冲作为探测光脉冲,与传统 φ -OTDR 技术不同的是,其原始信号为迹线局部位移的特征,因此数据处理时分析计算成本和性能改进之间需要适当权衡。虽然使用空间和时间的二维算法来确定迹线局部位移可以获得比使用单个迹线的信息更好的结果,但这种算法的计算量仍然过大,且不适合实时处理显示。由于传感光缆上的每个传感单元都以高频率收集信息,记录的数据量非常庞大。数十公里光缆每天收集的信息量甚至可达太字节级别,海量数据使得存储、传输和处理任务变得复杂且耗费时间。在数据存储方面,一些 DAS 制造商提供可以减少记录数量的过滤和压缩系统。然而,压缩后会丢失部分有价值的信息。在传输方面,很少有无线网络平台支持 DAS 记录的传输,因此数据记录一般通过硬盘等方式传输。在处理方面,尽管人工智能算法可以提高处理速度,但面对 TB 级别的海量监测数据,数据处理速度仍需提高。此外,联合分析 DAS 数据和其他监测数据(如 DTS 数据、检波器数据等)也是一大挑战。

2) 基于 LFM 脉冲的通信传感一体化。在分布式光纤传感系统中,通过对 LFM 脉冲的强度、相位、偏振或频率等光学参数进行调制来测量光纤沿线的物理参数变化,而在光纤通信系统中,则使用 LFM 脉冲来实

现数据传输。LFM 技术属于光纤通信中的一种扩展频谱调制技术,基于 LFM 脉冲的分布式光纤传感与光纤通信系统在架构、信号检测和信号解调方面的高度相似性使二者非常适合集成到一个系统中,用于同时进行数据传输和环境监测。近年来, φ -OTDR 已通过波分复用和频分复用集成到相干光通信网络中,以实现数据传输和分布式振动检测。现有光纤网络通过集成化探索了交通监控和道路粗糙度检测。基于目前 DAS 的应用情况,将二者一体化后还可能开发更多潜在的功能。然而,现有的方案大多是在传感和通信中共享光纤,仍有两个单独的系统。同时,传感中所使用的强脉冲光容易激发非线性效应,传输性能可能会降低。此外,相干光通信通常用于远程传输,似乎与传统的分布式光纤传感距离不匹配。因此将二者集成为一体,保持传输性能的同时又不影响传感探测,是值得进一步研究的科学问题。

6 结 语

DAS 技术作为光纤传感测量技术的发展前沿之一,具有环境适应性强、传感范围大、信道间光速同步、时空分辨精度高等不可替代的优势,已经在地球物理学的多个领域以及一系列线性基础设施安全在线监测方面展示出独特的技术优势和初步的应用。按调制脉冲的频率成分对 DAS 技术进行分类整理,详细介绍了基于 LFM 脉冲 DAS 技术的传感物理机制,并围绕各关键科学技术指标梳理了相应的研究进程,列举了

DAS 在地震波、油气资源勘探、地下结构探测以及线性基础设施监测中的典型应用进展,并对未来可能的发展趋势进行了探讨。随着科技的不断进步,相信 DAS 技术可以进一步完善,在更广阔的领域得到深入应用。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 何祖源,刘庆文.光纤分布式声波传感器原理与应用[J].激光与光电子学进展,2021,58(13):1306001.
He Z Y, Liu Q W. Principles and applications of optical fiber distributed acoustic sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306001.
- [3] 王照勇,卢斌,叶蕾,等.分布式光纤声波传感及其地震波检测应用[J].激光与光电子学进展,2021,58(13):1306006.
Wang Z Y, Lu B, Ye L, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing and its application to seismic wave monitoring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306006.
- [4] 孙琪真,范存政,李豪,等.光纤分布式声波传感技术在石油行业的研究进展[J].石油物探,2022,61(1):50-59,77.
Sun Q Z, Fan C Z, Li H, et al. Progress of research on optical fiber distributed acoustic sensing technology in petroleum industry[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(1): 50-59, 77.
- [5] Zhu H H, Liu W, Wang T, et al. Distributed acoustic sensing for monitoring linear infrastructures: current status and trends[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7550.
- [6] 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.
- [7] Liu S Q, Yu F H, Hong R, et al. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(3): 200078.
- [8] 吴慧娟,刘欣雨,饶云江.基于 Φ -OTDR的光纤分布式传感信号处理及应用[J].激光与光电子学进展,2021,58(13):1306003.
Wu H J, Liu X Y, Rao Y J. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ -OTDR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306003.
- [9] 张旭莘,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] Juškaitis R, Mamedov A M, Potapov V T, et al. Distributed interferometric fiber sensor system[J]. Optics Letters, 1992, 17(22): 1623-1625.
- [11] Koo K P, Tveten A B, Dandridge A. Passive stabilization scheme for fiber interferometers using (3×3) fiber directional couplers[J]. Applied Physics Letters, 1982, 41(7): 616-618.
- [12] 宋牟平,尹聪,陆燕,等.基于3×3迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调 Φ -OTDR[J].光学学报,2018,38(8):0806001.
Song M P, Yin C, Lu Y, et al. Four-channel detecting phase demodulation Φ -OTDR based on 3×3 Michelson interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0806001.
- [13] 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.
- [14] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. Measurement, 2016, 79: 222-227.
- [15] 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.
- [16] 刘珉舍,王旭,于森,等.相位敏感光时域反射系统的时钟同源 I/Q 解调方法[J].光子学报,2018,47(8):0806003.
Liu M H, Wang X, Yu M, et al. Clock homologues I/Q demodulation in phase sensitive optical time-domain reflection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0806003.
- [17] Tu G J, Zhang X P, Zhang Y X, et al. The development of an Φ -OTDR system for quantitative vibration measurement[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(12): 1349-1352.
- [18] Liu H H, Pang F F, Lü L B, et al. True phase measurement of distributed vibration sensors based on heterodyne Φ -OTDR[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 7101309.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Hartog A H, Liokumovich L B. Phase sensitive coherent OTDR with multi-frequency interrogation: US20130113629 [P]. 2013-05-09.
- [23] Zhang J X, Jiang W J, Yu Y, et al. Photonics-based simultaneous measurement of distance and velocity using

- multi-band LFM microwave signals with opposite chirps [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27580-27591.
- [24] Xu Z Y, Tang L Z, Zhang H X, et al. Simultaneous real-time ranging and velocimetry via a dual-sideband chirped lidar[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2254-2257.
- [25] 周逸潇, 赵尚弘, 李轩, 等. 面向通雷一体化的啁啾调制倍频 LFM 产生研究 [J]. *中国激光*, 2022, 49(7): 0706001.
Zhou Y X, Zhao S H, Li X, et al. Chirp modulated and frequency multiplied LFM for communication radar integration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0706001.
- [26] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [27] 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.
- [28] Wojcik A K. Signal statistics of phase dependent optical time domain reflectometry[D]. College Station: Texas A&M University, 2006.
- [29] 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.
- [30] Koyamada Y, Imahama M, Kubota K, et al. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(9): 1142-1146.
- [31] 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.
- [32] Jacovitti G, Scarano G. Discrete time techniques for time delay estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(2): 525-533.
- [33] Ma Z, Jiang J F, Wang S A, et al. High performance distributed acoustic sensor based on digital LFM pulse coherent-optical time domain reflectometer for intrapulse event[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(1): 012016.
- [34] 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.
- [35] Liehr S, Münzenberger S, Krebber K. Wavelength-scanning coherent OTDR for dynamic high strain resolution sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10573-10588.
- [36] 王一凡, 刘庆文, 李赫, 等. 基于瑞利图形相关的光纤分布式动态应变传感器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1110002.
Wang Y F, Liu Q W, Li H, et al. Distributed fiber-optic dynamic strain sensor based on spectra correlation of Rayleigh backscattering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1110002.
- [37] Wang S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33301-33309.
- [38] 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.
- [39] Mompó J J, Martín-López S, González-Herráez M, et al. Sidelobe apodization in optical pulse compression reflectometry for fiber optic distributed acoustic sensing [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1499-1502.
- [40] Soto M A, Lu X, Martins H F, et al. Distributed phase birefringence measurements based on polarization correlation in phase-sensitive optical time-domain reflectometers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24923-24936.
- [41] Lu X, Soto M A, Thévenaz L. Temperature-strain discrimination in distributed optical fiber sensing using phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16059-16071.
- [42] 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.
- [43] Pastor-Graells J, Nuño J, Fernández-Ruiz M R, et al. Chirped-pulse phase-sensitive reflectometer assisted by first-order Raman amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4677-4683.
- [44] Fernández-Ruiz M R, Pastor-Graells J, Martins H F, et al. Laser phase-noise cancellation in chirped-pulse distributed acoustic sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 979-985.
- [45] Bhatta H D, Costa L, Garcia-Ruiz A, et al. Dynamic measurements of 1000 microstrains using chirped-pulse phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4888-4895.
- [46] Fernández-Ruiz M R, Costa L, Martins H F. Distributed acoustic sensing using chirped-pulse phase-sensitive OTDR technology[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4368.
- [47] Marcon L, Soriano-Amat M, Veronese R, et al. Analysis of disturbance-induced “virtual” perturbations in chirped pulse φ -OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(3): 158-161.
- [48] Marcon L, Soto M A, Soriano-Amat M, et al. High-resolution chirped-pulse φ -OTDR by means of sub-bands processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 4142-4149.
- [49] Wang S H, Jiang J F, Wang S A, et al. GPU-based fast processing for a distributed acoustic sensor using an LFM pulse[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(35): 11098-11103.
- [50] Chen D, Liu Q W, Fan X Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 2037-2043.
- [51] 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.
- [52] Steinberg I, Shiloh L, Gabai H, et al. Over 100 km long ultra-sensitive dynamic sensing via Gated-OFDR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 96341B.
- [53] Chen D, Liu Q W, He Z Y. 108-km distributed acoustic sensor with $220\text{-p}\varepsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ strain resolution and 5-m spatial resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4462-4468.
- [54] Xiong J, Wang Z N, Wu Y, et al. Single-shot COTDR using sub-chirped-pulse extraction algorithm for distributed strain sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 2028-2036.
- [55] 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.
- [56] Liang G H, Jiang J F, Liu K, et al. Phase demodulation method based on a dual-identical-chirped-pulse and weak fiber Bragg gratings for quasi-distributed acoustic sensing [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1093-1099.
- [57] Ip E, Huang Y K, Huang M F, et al. DAS over 1, 007-km hybrid link with 10-Tb/s DP-16QAM co-propagation using frequency-diverse chirped pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(4): 1077-1086.
- [58] Wu M S, Fan X Y, Liu Q W, 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.
- [59] 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.
- [60] Wang Y F, Liu Q W, Chen D, et al. Distributed fiber-optic dynamic-strain sensor with sub-meter spatial resolution and single-shot measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 6803608.
- [61] Wang Z T, Jiang J L, Wang Z N, et al. Quasi-distributed acoustic sensing with interleaved identical chirped pulses for multiplying the measurement slew-rate [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38465-38479.
- [62] Zhang Z P, Fan X Y, He Z Y. Long-range and wide-band vibration sensing by using phase-sensitive OFDR to interrogate a weak reflector array[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18387-18396.
- [63] Fernández-Ruiz M R, Soto M A, Williams E F, et al. Distributed acoustic sensing for seismic activity monitoring[J]. *APL Photonics*, 2020, 5(3): 030901.
- [64] 林圣淘, 王子南, 熊吉, 等. 光纤瑞利散射传感抗干涉衰落技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306008.
Lin S T, Wang Z N, Xiong J, et al. Progresses of anti-interference-fading technologies for Rayleigh-scattering-based optical fiber sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 10306008.
- [65] Ma Z, Jiang J F, Wang S A, et al. Double-sideband heterogeneous pulse modulation method for distributed acoustic sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10618: 1061807.
- [66] Ma Z, Jiang J F, Wang S A, et al. Phase drift noise suppression for coherent-OTDR sensing based on heterogeneous dual-sideband LFM pulse[J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(8): 082002.
- [67] 马喆, 王逸璇, 江俊峰, 等. 光纤分布式声传感的动态范围扩展方法研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(13): 1306008.
Ma Z, Wang Y X, Jiang J F, et al. Research on dynamic range expansion method of fiber-optic distributed acoustic sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306008.
- [68] Ma Z, Jiang J F, Liu K, et al. Virtual-block-array phase analysis for distributed acoustic sensors with a high signal-to-noise ratio reconstruction waveform[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24577-24585.
- [69] Xiong J, Wang Z N, Jiang J L, et al. High sensitivity and large measurable range distributed acoustic sensing with Rayleigh-enhanced fiber[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2569-2572.
- [70] Xiong J, Wang Z N, Wu Y, et al. Long-distance distributed acoustic sensing utilizing negative frequency band[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35844-35856.
- [71] Jiang J L, Wang Z N, Wang Z T, et al. Continuous chirped-wave phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 685-688.
- [72] 苟量, 张少华, 余刚, 等. 光纤地球物理技术的发展现状与展望[J]. *石油物探*, 2022, 61(1): 15-31.
Gou L, Zhang S H, Yu G, et al. Optical fiber geophysics: development status and future prospects[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(1): 15-31.
- [73] 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.
- [74] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 5778.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] Mateeva A, Lopez J, Mestayer J, et al. Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with VSP[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(10): 1278-1283.
- [78] Miller D, Parker T, Kashikar S, et al. Vertical seismic profiling using a fibre-optic cable as a distributed acoustic sensor[C]//*Proceedings 74th EAGE Conference and Exhibition incorporating EUROPEC 2012*, June 4-7, 2012, Copenhagen, Denmark. Netherlands: EAGE Publications BV, 2012: 803.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] Ivan L C N, Sava P. Multicomponent distributed acoustic sensing: concept and theory[J]. *Geophysics*, 2018, 83(2): 1-8.
- [82] 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.
- [83] 李彦鹏, 李飞, 李建国, 等. DAS 技术在井中地震勘探的应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(2): 242-249.
Li Y P, Li F, Li J G, et al. Application of distributed acoustic sensing in borehole seismic exploration[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(2): 242-249.
- [84] Daley T M, Freifeld B M, Ajo-Franklin J, et al. Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring[J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(6): 699-706.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 林融冰, 曾祥方, 宋政宏, 等. 分布式光纤声波传感系统在近地表成像中的应用 II: 背景噪声成像[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(4): 1622-1629.
Lin R B, Zeng X F, Song Z H, et al. Distributed acoustic sensing for imaging shallow structure II: ambient noise tomography[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1622-1629.
- [88] Fang G, Li Y E, Zhao Y M, et al. Urban near-surface seismic monitoring using distributed acoustic sensing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(6): e2019GL086115.
- [89] Wybo J L. Track circuit reliability assessment for preventing railway accidents[J]. *Safety Science*, 2018, 110: 268-275.
- [90] Akkerman J, Prah F. Fiber optic sensing for detecting rock falls on rail rights of way[M]. Washington, D. C.: AWEMA, 2013: 1099-1118.
- [91] Milne D, Masoudi A, Ferro E, et al. An analysis of railway track behaviour based on distributed optical fibre acoustic sensing[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106769.
- [92] Kowarik S, Hussels M T, Chruscicki S, et al. Fiber optic train monitoring with distributed acoustic sensing: conventional and neural network data analysis[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 450.
- [93] Wang X, Williams E F, Karrenbach M, et al. Rose parade seismology: signatures of floats and bands on optical fiber[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(4): 2395-2398.
- [94] Wang X, Zhan Z W, Williams E F, et al. Ground vibrations recorded by fiber-optic cables reveal traffic response to COVID-19 lockdown measures in Pasadena, California[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 160.
- [95] Catalano E, Coscetta A, Cerri E, et al. Automatic traffic monitoring by ϕ -OTDR data and Hough transform in a real-field environment[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3579-3584.
- [96] Li J A, Zhang M J. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 128.
- [97] Madabhushi S S C, Elshafie M Z E B, Haigh S K. Accuracy of distributed optical fiber temperature sensing for use in leak detection of subsea pipelines[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2015, 6(2): 04014014.
- [98] Li H J, Zhu H H, Li Y H, et al. Experimental study on uplift mechanism of pipeline buried in sand using high-resolution fiber optic strain sensing nerves[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(4): 1304-1318.
- [99] He T, Liu Y J, Zhang S X, et al. High accuracy intrusion pattern recognition using a dual-stage-recognition network for fiber optic distributed sensing system[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 9-14, 2021, San Jose, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2021: JW1A.119.
- [100] Yang Y Y, Zhang H F, Li Y. Long-distance pipeline safety early warning: a distributed optical fiber sensing semi-supervised learning method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 19453-19461.
- [101] Wu H J, Chen J P, Liu X R, et al. One-dimensional CNN-based intelligent recognition of vibrations in pipeline monitoring with DAS[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(17): 4359-4366.
- [102] 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.