

激光与光电子学进展

光纤分布式声波传感器原理与应用

何祖源*, 刘庆文

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 基于光纤的分布式声波传感器(DAS)是近十余年来发展最快的光纤传感技术之一,它能够以高采样率同时获取光纤链路上多个位置处机械振动的波形,从而获取周围环境的丰富信息,在周界围栏安防、油气资源勘探、地震波形检测等领域具有巨大的应用潜力。将介绍DAS的基本原理,包括3种适合在长距离光纤中定位后向瑞利散射(RBS)信号的反射仪技术和2种利用RBS信号恢复振动波形的方法,介绍DAS系统的两类典型应用,最后讨论DAS技术的发展趋势。

关键词 光通信; 光纤传感器; 分布式声波传感; 光反射仪技术; 瑞利散射

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306001

Principles and Applications of Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors

He Zuyuan*, Liu Qingwen

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Optical fiber based distributed acoustic sensor (DAS) is one of the most attractive and well developed fiber sensing technologies in the recent decade. It can simultaneously detect and recover the waveforms of multiple mechanical vibrations along the sensing fiber with high sampling rate, providing abundant information of the environment, which has great potential applications in perimeter fence security, oil and gas exploration, seismic waveform detection, and other fields. This paper first reviews the principles involved in DAS system, including three types of reflectometry to locate the Rayleigh backscattering (RBS) along the long distance fiber, and the two methods to recover the vibration waveform using RBS signal. Then two typical applications of DAS system are reviewed, and finally the possible research trends of DAS technology are discussed.

Key words optical communications; fiber sensor; distributed acoustic sensor; reflectometry; Rayleigh backscattering

OCIS codes 060.2370; 290.5870; 120.7280

1 引言

基于光纤的分布式声波传感器(DAS)是一种利用光纤中的后向瑞利散射(RBS)来定位和恢复光纤链路上的任意位置处机械振动信息(振幅、相

位和频率)的技术^[1]。由于机械振动通常能够在介质中传播很远,DAS能够检测远离光纤的事件;基于光纤的低损耗特性,传感光纤的长度可达数千米至上百千米,因此DAS系统的探测覆盖范围非常广;DAS的振动检测带宽可高达数十千赫兹,可以

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-05; 录用日期: 2021-05-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500)、国家自然科学基金(61875121,61620106015,61275097,61975116)

通信作者: *zuyuanhe@sjtu.edu.cn

包含待测事件的丰富信息;传感光缆具有本征安全、抗电磁干扰、耐恶劣环境等优势。这些优点使得 DAS 在周界围栏安防、管道安全监测、井下资源勘探等长距离应用领域中有着巨大的应用潜力,并且其应用领域仍在不断拓展中。

早期提出的基于后向瑞利散射强度变化的分布式振动传感技术可以检测到振动的存在并定位振动的位置,但无法正确地恢复振动的波形,通常被称为分布式振动传感器(DVS)^[2]。而基于后向瑞利散射相位变化或频谱移动的解调技术可以线性恢复振动的振幅、频率和相位信息,被称为分布式声波传感器,即 DAS。DAS 的这一线性响应特性,为后续的数据处理技术(如阵列信号处理算法)提供了更丰富准确的信息,使传感系统具有更好的综合性能,在越来越多的应用中取代了传统的 DVS 技术。

在光反射仪技术基础上,DAS 通过对瑞利散射信号进行分析,获取传感光纤自身感受到的动态应变信息,实现对环境振动信号的检测。本文将介绍长距离 DAS 系统中所用到的三种反射仪技术,及分别基于瑞利散射强度和相位的振动波形恢复算法,并列举 DAS 系统的几种应用案例,最后对 DAS 技术进行总结与展望。

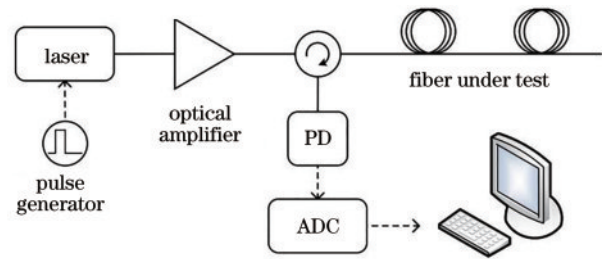
2 DAS 的基本原理

目前大部分实用化的 DAS 采用光时域反射(OTDR)架构^[3-4],也有部分课题组开展了基于光频域反射仪(OFDR)的 DAS 技术的研究^[5-8]。同 OTDR 相比,OFDR 具有更高的空间分辨率和更大的动态范围,但探测脉冲持续时间长,对激光器的相位噪声更敏感,易受串扰问题的影响,因此 OFDR 系统通常应用于实现较短传感距离、高空间分辨率的相关领域。基于时间门控数字光频域反射仪(TGD-OFDR)系统的 DAS 一定程度上综合了前述两种技术的优点^[9-10],下面将详细讨论三种反射仪技术。

2.1 光时域反射仪(OTDR)

为了监视光通信链路的状况,Barnoski 等^[11]于 1976 年提出了 OTDR 技术。典型的直接接收 OTDR 系统结构的示意图如图 1 所示。激光器产生的短脉冲注入到待测光纤中,在光纤中传输时产生后向瑞利散射信号,后向瑞利散射信号沿原路返回,所经过的时间延迟 τ 正比于散射发生的距离,关系式为

$$z = \frac{c\tau}{2n}, \quad (1)$$



PD: photo-detector; ADC: analog to digital converter

图 1 OTDR 系统的典型结构

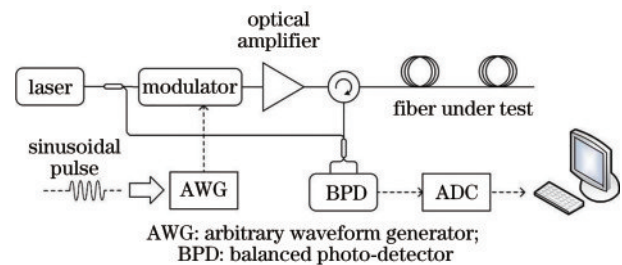
Fig. 1 The typical OTDR configuration

式中: c 为真空中的光速; n 为光纤的折射率。

为了提升信噪比,可在 OTDR 中引入相干接收,即从激光器中分出一路连续光作为本地参考光,并与返回的瑞利散射光进行拍频。这种相干接收的 OTDR 系统被称为相干光时域反射仪(COTDR)。图 2 展示了 COTDR 系统的典型结构。任意波形发生器(AWG)产生的电信号表达为

$$s(t) = w\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_0 t), \quad (2)$$

式中: T_p 为脉冲持续时间; $w(t)$ 为窗函数; f_0 为电脉冲的中心频率,也就是光脉冲的频移。



AWG: arbitrary waveform generator; BPD: balanced photo-detector

图 2 COTDR 系统的典型结构

Fig. 2 The typical COTDR configuration

COTDR 系统采用具有长相干长度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),另一路被调制为探测脉冲。调制前和调制后的光电场的表达式分别为

$$E_1(t) = \sqrt{P_1} \exp(j2\pi\nu_0 t), \quad (3)$$

$$E_p(t) = \sqrt{P_p} w\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi\nu_0 t + j2\pi f_0 t), \quad (4)$$

式中: P_p 和 P_1 分别为探测光功率和本地参考光功率; ν_0 为激光的中心频率。平衡光电探测器(BPD)接收的光电场是从待测光纤返回的瑞利散射信号的总和,表达式为

$$E_R(t) = \sum_{i=1}^N E_i \omega \left(\frac{t - \tau_i}{T_p} \right) \exp \left[j2\pi\nu_0(t - \tau_i) + j2\pi f_0(t - \tau_i) \right], \quad (5)$$

式中: N 为光纤中散射点的总数; τ_i 为光从第 i 个散射点到达光纤起始端的往返时间; E_i 为第 i 个散射点的散射光的电场强度, 由该点的散射率和途径损耗所决定。

BPD 所产生的光电流的表达式为

$$i(t) \propto \text{Re} \{ E_R(t) \cdot E_1^*(t) \} = \sum_{i=1}^N A_i \omega \left(\frac{t - \tau_i}{T_p} \right) \cos [2\pi f_0(t - \tau_i) - 2\pi\nu_0\tau_i], \quad (6)$$

式中: $\text{Re}\{E\}$ 表示取复数 E 的实部; $*$ 表示共轭; A_i 为第 i 个散射点的瑞利散射光被 BPD 转为电信号后的幅值。

在进行数字信号处理时, 可采用希尔伯特变换将实信号转换为解析信号, 并将 (6) 式改写为积分形式:

$$i(t) = \int_0^{T_F} A(\tau) \omega \left(\frac{t - \tau}{T_p} \right) \exp [j2\pi f_0(t - \tau) - j2\pi\nu_0\tau] d\tau = h(t) \otimes s(t), \quad (7)$$

式中: \otimes 为卷积符号; T_F 为光在光纤中最长的往返时间; $h(t)$ 为待测光纤的冲激响应。

$$h(t) = A(t) \exp(-j2\pi\nu_0 t). \quad (8)$$

由 (8) 式可知, 在一次探测中, COTDR 系统可以被看作一个线性时不变系统, 其中系统的输入 $s(t)$ 为 AWG 生成的电信号。系统的冲激响应为 $h(t)$, 反映光纤上不同位置处瑞利散射信号的相位和幅度信息; 系统的输出即为 BPD 输出的电信号 $i(t)$ 。 $i(t)$ 的分辨率与 $s(t)$ 相同, 因此 COTDR (OTDR 相同) 系统的空间分辨率为

$$Z_{SR} = \frac{cT_p}{2n}. \quad (9)$$

瑞利散射的功率与系统噪声之间的比值称为信噪比 (SNR), 它是脉冲功率、脉冲持续时间、光电探测器灵敏度和系统噪声的函数。瑞利散射的 SNR

是制约 DAS 检测灵敏度的重要因素。探测器灵敏度受光电探测器量子效率的限制, 脉冲峰值功率受光纤中非线性效应的限制^[12], 脉冲的宽度受空间分辨率的限制。因此, 在 OTDR 技术中, 提高空间分辨率将导致脉冲宽度减小, 信号功率降低, 瑞利散射光功率降低; 与此同时, 高空间分辨率需要光电探测器具有更大的带宽, 引入更强的噪声功率, 最终导致 SNR 的恶化。空间分辨率和信噪比相互制约是 OTDR 系统在高空间分辨率应用中的主要不足。

2.2 光频域反射仪 (OFDR)

OFDR 主要应用于高空间分辨率的光纤链路监测中^[13-17]。OFDR 系统的基本结构如图 3 所示。具有高相干性的线性扫频的连续光被光纤耦合器分为两路, 其中一路作为 LO, 另一路作为探测光。线性扫频光的电场表达式为

$$E_1(t) = \sqrt{P_1} \omega \left(\frac{t}{T_s} \right) \exp [j2\pi\nu_0 t + j\pi\gamma t^2 + j\phi(t)], \quad (10)$$

式中: γ 为扫频速率; $\phi(t)$ 为包括光源的扫频非线性和自发辐射导致的相位噪声项; T_s 为扫频时长。当传感距离远小于激光器的相干长度且光源有良好的扫频线性度时, 可以忽略相位噪声项以简化分析。由于探测光和 LO 来源于同一光源, 散射点的瑞利散射可以看作是 LO 路的时间延迟, 返回的瑞利散射光的表达式为

$$E^{RBS}(t) = \int_0^{T_F} E(\tau) \omega \left(\frac{t - \tau}{T_s} \right) \exp \left\{ j \left[2\pi\nu_0(t - \tau) + \pi\gamma(t - \tau)^2 \right] \right\} d\tau, \quad (11)$$

式中: $E(\tau)$ 为对应散射点的返回光信号的电场强度。在 OFDR 系统中, 当光在整根光纤中的往返时间 T_F 远小于扫频时间 T_s 时, 可近似认为在整个光纤的往返时间上均存在 LO, 以简化分析。此时 BPD 接收到的光电流信号为

$$i(t) \propto \int_0^{T_F} A(\tau) \cos(2\pi\gamma\tau t + 2\pi\nu_0\tau - \pi\gamma\tau^2) \cdot \omega \left(\frac{t}{T_s} \right) d\tau. \quad (12)$$

不同散射点的往返时间不同, 导致不同位置处的后向瑞利散射光和 LO 拍频后的信号频率不同, 如图 4 所示, 光纤上后向瑞利散射光的时间延迟正比于拍频信号的频率。

对 (12) 式进行傅里叶变换, 由于实信号的频谱为正负对称, 只考察频谱为正的部分即可, 得到

$$F(f) = \int_0^{T_F} A(\tau) \exp(j2\pi\nu_0\tau - j\pi\gamma\tau^2) W(f - \gamma\tau) \cdot d\tau = H(f) \otimes W(f), \quad (13)$$

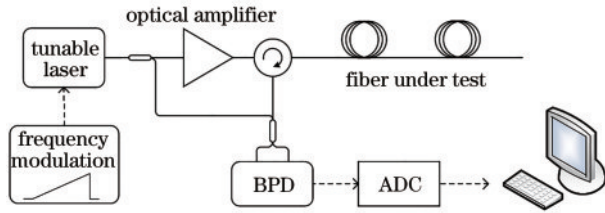


图 3 OFDR 系统结构
Fig. 3 OFDR configuration

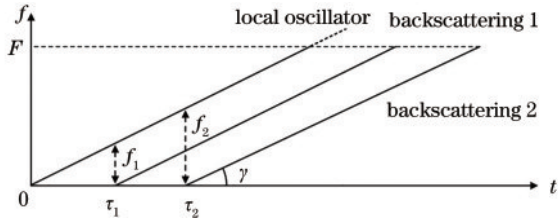


图 4 OFDR 系统定位原理
Fig. 4 Locating principle of OFDR system

式中： $W(f)$ 为 $w(t)$ 的傅里叶变换结果； $H(f)$ 为待测光纤在频域的冲激响应。

$$H(f) = A(f) \exp\left[j\left(2\pi\nu_0 f/\gamma - \pi f^2/\gamma\right)\right]. \quad (14)$$

因此，OFDR 在频域上是一个线性时不变系统，该系统的输入为窗函数的傅里叶变换 $W(f)$ ，输出 $I(f)$ 包含了瑞利散射的强度和相位信息。 $|W(f)|$ 的宽度决定了 OFDR 系统在频域的频率分辨率，在不额外施加窗函数的情况下，有

$$\left|W(f)\right| = \left|\frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f}\right|. \quad (15)$$

$|W(f)|$ 在第一个零点处的半峰全宽 Δf 被定义为 $|W(f)|$ 的宽度，同时也是系统输出 $I(f)$ 的频率分辨率，可以通过 $f = \gamma t$ 将频域信息映射到时域上，因此 OFDR 的空间分辨率为

$$Z_{SR} = \frac{c}{2n} \cdot \frac{\Delta f}{\gamma} = \frac{c}{2n\Delta F}, \quad (16)$$

式中：光源的扫频范围 $\Delta F = \gamma T_s$ 。根据 (16) 式，OFDR 系统的空间分辨率与探测光时长无关，而仅仅取决于光源的扫频范围。OFDR 采用连续光作为探测光，因此具有较高的信噪比，同时系统的空间分

辨率取决于系统的扫频总范围，而与探测光持续时间无关。此外，OFDR 中接收机的带宽远远小于探测光的扫频范围，有助于降低系统的噪声水平。

OFDR 系统的主要噪声源是光源的扫频非线性和自发辐射所引起的相位噪声，导致 OFDR 系统的空间分辨率随着探测距离的增加而下降^[18-20]。有两种方式来抑制上述噪声带来的影响：一是通过反馈控制^[21-22]、前馈控制^[23]等技术提高光源的扫频线性度和相位噪声的实时补偿；二是使用辅助干涉仪检测激光器的相位噪声，并据此补偿相位噪声对 OFDR 性能的影响^[24-27]。两种方法都可以在数十千米的传感范围内实现亚米级的空间分辨率。

检测动态信号的串扰是 OFDR 用于 DAS 系统时面临的主要挑战^[8]。由于探测光持续时间很长，当待测光纤上有高频振动时，探测脉冲在经过振动区域时会受到相位调制，从而导致在光纤上前一个位置的振动对后一个位置的检测造成串扰。串扰的严重性随着振动频率的提高而增加，影响了 OFDR 系统在动态应变测量中的应用。如果串扰问题得到有效解决，OFDR 将成为高空间分辨率 DAS 系统的有力解决方案。

2.3 时间门控数字光频域反射仪 (TGD-OFDR)

TGD-OFDR 是一种结合了 OTDR 和 OFDR 的反射仪技术^[11-12]，基本结构如图 5 所示。与 COTDR 相比，TGD-OFDR 的区别为，其探测脉冲不是单频率脉冲而是线性频率调制 (LFM) 脉冲；与 OFDR 相比，区别在于其本地光信号为单频激光而非扫频激光。

在 TGD-OFDR 中，AWG 驱动的调制器输出的线性扫频光脉冲的表达式为

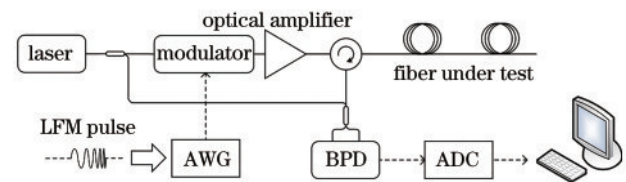


图 5 TGD-OFDR 系统结构
Fig. 5 TGD-OFDR configuration

$$E_p(t) = \sqrt{P_p} w\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left[j\left(2\pi\nu_0 t + 2\pi f_0 t + \pi\gamma t^2\right)\right]. \quad (17)$$

BPD 产生电流的指数形式为

$$i(t) = \int_0^{T_F} A(\tau) w\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi f_0(t-\tau) + j\pi\gamma(t-\tau)^2 - j2\pi\nu_0\tau\right] d\tau = h(t) \otimes s(t). \quad (18)$$

由(18)式可知,此时系统空间分辨率仍然由脉冲宽度确定。为了提高空间分辨率,可在数字域中生成与探测脉冲共轭的匹配滤波器 $s^*(-t)$ 来实现对脉冲的压缩:

$$I(t) = h(t) \otimes s(t) \otimes s^*(-t) = h(t) \otimes S(t), \quad (19)$$

式中: $S(t)$ 为压缩后的脉冲。

$$S(t) = W\left(\frac{t}{2T_p}\right) \frac{\sin[\pi\gamma t(T_p - |t|)]}{\pi\gamma t} \times \exp\left[-j2\pi\left(f_0 + \frac{\gamma T_p}{2}\right)t\right]. \quad (20)$$

经过压缩后的脉冲 $S(t)$ 为该线性系统的输入。(20)式等号右边包含三个部分,从左到右依次是一个两倍于原探测脉冲宽度的窗函数、具有采样函数形式的幅度项、频率为 $f_0 + \frac{\gamma T_p}{2}$ 的相位项。其中幅度项的半峰全宽(FMWH)决定了系统的空间分辨率:

$$Z_{SR} = \frac{c}{2n\Delta F}. \quad (21)$$

因此, TGD-OFDR 的空间分辨率与 OFDR 系统相似,取决于探测脉冲的扫频范围而与探测脉冲的持续时间无关, TGD-OFDR 系统可以在不牺牲 SNR 的情况下实现高空间分辨率。而与 OFDR 不同的是, TGD-OFDR 中的探测脉冲持续时间更短、扫频速率更快,可以有效缓解 OFDR 易受相位噪声和振动影响所带来的串扰问题,在没有相位噪声补偿的情况下,该系统可以同时实现超过 100 km 的传感距离和米级的空间分辨率^[10],也可用于动态振动信号的感知。

综上所述,反射仪作为一种线性系统,输入是探测脉冲,输出是光纤自身在冲激响应激励下的瑞利散射信息(包含光纤振动信息)与探测脉冲的卷积,卷积的结果是平滑之后的瑞利散射分布信息。利用任意一种反射仪获得光纤上的瑞利散射分布信息后,再用恰当的解调算法从瑞利散射中恢复振动波形,即可实现分布式声波传感。

3 相位法解调

光纤后向瑞利散射的一个简单而有效的物理模

型是光纤上分布着位置随机、反射率也随机的独立反射点。外界振动引起的应变改变了光纤的长度和折射率,用高相干探测光探测时,各反射点的反射光之间的相位关系随之变化,并且会彼此干涉而改变瑞利散射光的强度。后向瑞利散射中恢复振动信号波形主要有两种方法:一种是相位法,即当光纤应变很小时,后向瑞利散射相位变化量与该位置处光纤所受应变呈线性关系,据此可以通过瑞利散射的相位信息恢复振动信息;另一种是频谱法,通过调谐探测激光的频率,来补偿应变引起的各位置处散射光之间的相位差,使后向瑞利散射的强度保持不变,则此时激光频率正比于光纤所受的应变。

利用瑞利散射信号分析光纤所受应变的技术与瑞利散射的定位技术是独立的,因此对于任何一种光反射仪技术得到的后向瑞利散射信号,都可以用相位法或者频谱法来解调,线性获取振动波形信号。

3.1 应变与散射信号相位间的关系

考虑在位置 z 处的一个反射点,在施加应变前,其反射光相位为

$$\Phi(z, 0) = 2 \int_0^z \beta n(x) dx = 2\beta n z, \quad (22)$$

式中:真空中的波矢大小 $\beta = 2\pi/\lambda$; λ 为光波长。光纤折射率分布 $n(x)$ 是应变分布 $\epsilon(x)$ 的函数, $n(x) = n + C_\epsilon \epsilon(x)$, C_ϵ 为光纤的光弹系数。

如图 6 所示,当光纤 (z_A, z_B) 区域被施加大小为 ϵ 的应变时,位于光纤 $(0, z_A)$ 区域的散射光的相位不会发生改变,而位于光纤 (z_A, z_B) 区域的散射光相位变为

$$\Phi(z, \epsilon) = 2 \int_0^z \beta n(x) dx = 2\beta n z_A + 2\beta(n + C_\epsilon \epsilon)(1 + \epsilon)(z - z_A). \quad (23)$$

对位于光纤 $z \in (z_B, z_F)$ (z_F 为光纤总长度)区域的散射点,其散射光相位为

$$\Phi(z, 0) = 2 \int_0^z \beta n(x) dx = 2\beta n(z - z_B + z_A) + 2\beta(n + C_\epsilon \epsilon)(1 + \epsilon)(z_B - z_A). \quad (24)$$

应变发生前,光纤 (z_A, z_B) 区域内,对距离为 L 的两点进行空间差分,得到的相位差为

$$\Phi_L(0) = \Phi(z, 0) - \Phi(z - L, 0) = 2\beta n L. \quad (25)$$

应变发生后,空间差分后的相位差变为

$$\Phi_L(\epsilon) = \Phi(z, \epsilon) - \Phi(z - L, \epsilon) = 2\beta(n + C_\epsilon\epsilon)(1 + \epsilon)L. \quad (26)$$

因此应变前后,该区域的相位差的变化量(时间差分)为

$$\Delta\Phi_L(\epsilon) = \Phi_L(\epsilon) - \Phi_L(0) = 2\beta(n\epsilon + C_\epsilon\epsilon + C_\epsilon\epsilon^2)L. \quad (27)$$

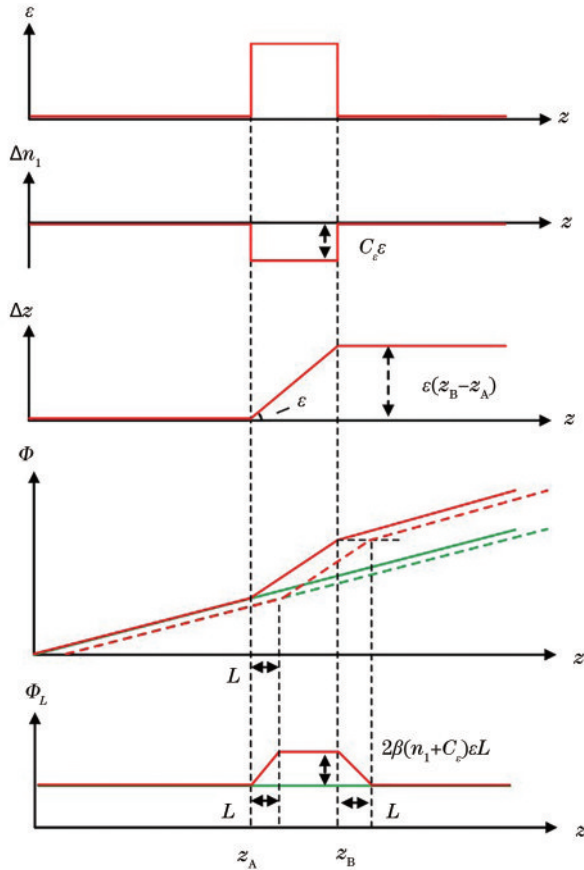


图 6 RBS 相位法实现振动测量的原理示意图

Fig. 6 Principle of vibration measurement via RBS phase method

当应变幅度较小时, (27)式二阶项可以忽略不计,因此可以化简为

$$\Delta\Phi_L(\epsilon) = 2\beta(n + C_\epsilon)\epsilon L. \quad (28)$$

从(28)式可以看出,瑞利散射光相位的变化量

正比于振动引起的光纤轴向应变 ϵ 的幅度,而在振动以外的区域,相位差的变化量为 0,由此可以对振动区域进行定位。当激光器中心波长为 1550.12 nm, 光纤纤芯的折射率为 1.46 时, (28) 式中的灵敏度系数为 $110.37 \text{ ne}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ [28-29]。

3.2 相位解调方法

由于系统结构简单,不需要对探测光信号进行扫频操作,且数据运算量较小,大多数 DAS 系统采用相位法来实现振动信号的解调。由于光电探测器不能直接响应瑞利散射光的相位,因此通常采用干涉技术将瑞利散射的相位差信息转换为光强信息。

在基于高相干光源 OTDR 架构系统的接收端添加干涉仪,是一种常用的相位解调型 DAS 方案。干涉仪不同臂之间引入的时间延迟使待测光纤上不同位置处的后向瑞利散射光在光电探测器上相遇并发生干涉,同时完成了(25)式中的空间差分操作。由于干涉光强信号是相位差的偶函数,为了解决光强计算相位差时的不唯一性,一种方法是采用非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪并采用 3×3 耦合器,如图 7(a) 所示,利用 3×3 耦合器各输出端口的光相位具有 120° 移相的特性,实现瑞利散射光信号的相位恢复。通过这种方式, Masoudi 等 [30] 成功实现了 1 km 长光纤上的多振源检测。相位生成载波法 (PGC) 技术是另一种解决相位差模糊的技术,如图 7(b) 所示,在迈克耳孙干涉仪的一臂上利用压电陶瓷引入频率高于被检测信号的正弦相位调制,并采用相位生成载波的解调算法恢复瑞利散射信号自身的相位变化。该方案采用法拉第旋光反射镜作为迈克耳孙干涉仪的反射镜,解决了干涉仪中的偏振态失配

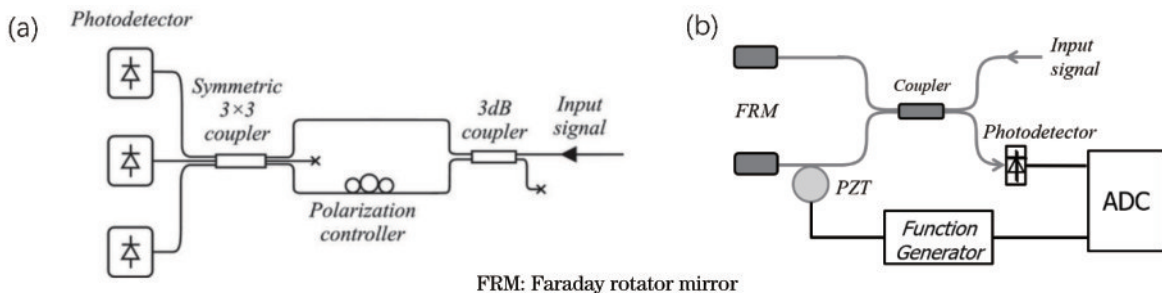


图 7 基于非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪的 DAS 解调方案。(a) 3×3 耦合器相位检测 [30]; (b) 相位产生载波技术的相位检测 [31]

Fig. 7 The DAS demodulation scheme based on unbalanced Mach-Zehnder interferometer. (a) Phase demodulation using 3×3 coupler [30]; (b) phase demodulation using phase-generated carrier technology [31]

问题。利用这一方案, Fang 等^[31]实现了 10 km 距离上 6 m 的空间分辨率。此外, 微分交叉乘积法^[32]也可用于后向瑞利散射光相位信息的解调。

双探测脉冲系统是另一种典型的直接接收 DAS 方案。将具有不同频率和特定时延的两个脉冲先后注入到传感光纤中, 来自不同位置的两个探测脉冲的后向瑞利散射信号将在光电探测器处相遇, 进而可通过外差解调的方式来恢复后向瑞利散射的相位变化。1990 年, Christopher 等^[33]首先提出了双脉冲反射仪技术, 随后 Alekseev 等^[34]提出了一种发射三对具有不同相位差的探测脉冲的 DAS 方案。2017 年, He 等^[35]进一步提高了系统性能, 最终实现了 20 Hz~25 kHz 的系统响应带宽及 0 dB~60 dB 的动态范围。

在最近十几年中, 采用相干检测技术的 DAS 系统被广泛应用于需要长测量距离和高信噪比的场景中。相干检测技术包括外差检测和零差检测两种方式。当在 DAS 系统中采用声光调制器(AOM)来产生探测脉冲时, 由于 AOM 的频移特性, 这样的 DAS 系统自动工作在外差检测状态, 外差探测得到的拍频电信号可通过希尔伯特变换等方法转换为后向瑞利散射的相位信息。2010 年, Lu 等^[36]在 DVS 系统中通过引入外差探测的方式来提升 RBS 的信噪比。随后, Pan 等^[37]通过数字相位解调算法提取相位信息, 真正实现了 DAS 功能。零差探测系统需要用正交解调(I/Q 解调)方案来获取瑞利信号的相位信息^[38-39]。2016 年, Wang 等^[38]基于零差探测方法, 实现了传感长度为 12.56 km、空间分辨率为 10 m、振动信号带宽为 1 kHz 的性能指标。与外差探测相比, 零差探测可以降低接收机带宽和采集卡速率, 但需要使用两倍的光电探测器数量和数据采集通道数量, 增加了系统的复杂度。

3.3 应变分辨率

DAS 系统中, 解调仪实际检测的对象是外界振动引起的光纤应变变化, 因此应变检测的分辨率可以用于评估 DAS 解调仪系统的灵敏度。在相位解调方案中, 应变的分辨率由检测瑞利散射相位信息时的噪声水平决定, 该噪声有两个主要来源: 一个是激光自身的相位噪声; 另一个是利用瑞利散射信号的强度计算其相位时, 强度信号的噪声引起的计算误差。

探测到的激光脉冲的相位噪声会直接叠加到后向瑞利散射光的相位信息中, 与振动引起的相位变化混到一起。数值仿真表明, 该项噪声的大小正

比于激光光源的线宽, 正比于脉冲持续时间的平方根, 因此理论上窄线宽激光光源和短探测脉冲有助于抑制光源引入的相位噪声。但是在典型的基于 OTDR 的 DAS 系统中, 所采用的光纤激光器线宽可以达到 1 kHz, 脉冲持续时间在 100 ns(对应的空间分辨率为 10 m)左右时, 光源相位噪声对应变灵敏度的贡献可以忽略。但是在 TGD-OFDR 和 OFDR 系统中, 由于脉冲的持续时间相比 OTDR 有数量级的增加, 此时激光器相位噪声的影响开始占据主导地位。

由于光电探测器只能检测后向瑞利散射信号的光强, 其相位信息是通过强度计算出来的, 因此后向瑞利散射强度信号的噪声将会导致计算得到的相位产生偏差, 这是相位型 DAS 系统的第二个主要噪声源^[40]。数值模拟和实验数据表明, 在强度噪声为白噪声时, 提取出的相位信号的噪声服从高斯分布, 其方差是瑞利散射强度信号信噪比 S_{NR} 的倒数^[41]:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{S_{NR}}. \quad (29)$$

显然, 更长的探测脉冲可以得到更高的后向瑞利散射强度信噪比。在 OTDR 系统中, 增加探测脉冲长度导致空间分辨率降低, 而 TGD-OFDR 和 OFDR 系统的空间分辨率与脉冲持续时间无关, 因此可以同时实现高信噪比和高空间分辨率。

需要指出的是, 长探测脉冲并不意味着光纤所有位置都具有高信噪比。由于各位置处瑞利散射信号光是相干叠加的, 干涉现象导致后向瑞利散射的强度表现出很强的随机波动特性, 并且在某些位置其强度会极微弱, 这种现象被称为相干衰落; 在相干检测 DAS 系统中, 由于后向瑞利散射信号光的偏振态随位置变化而变化, 在某些位置其与本地光偏振态接近正交而不发生干涉, 使得拍频信号强度极为微弱, 这种现象称为偏振衰落。在衰落位置处, 极差的信噪比会导致解调出的瑞利散射光相位被噪声所支配, 无法正确恢复这些位置处的振动信息, 这就是所谓的“死区”问题, 是影响相位型 DAS 系统可靠性的主要因素。

3.4 衰落现象的消除

偏振衰落可以通过偏振分级接收或者保偏系统来解决^[42], 而干涉衰落问题则较难解决^[40, 42-45]。相干衰落与光的相位差有关, 当探测光频率不同或相位发生突变时, 衰落点出现的位置也将相应改变。因此, 有效的解决方案包括两个步骤: 用不同频率或相位的脉冲对待测光纤进行探测, 不同探测

脉冲中出现相干衰落的位置大概率不重合;然后通过合适的方法组合不同探测脉冲得到的结果,得到无“死区”的分布式传感。

2012年,上海光学精密机械研究所蔡海文课题组提出发射一对相位有突变的探测脉冲对来消除干涉衰落的死区的方案^[46-47]。如图 8(a)所示,窄线宽探测光首先经过一个声光调制器斩出脉冲,再经过一个相位调制器进行相位调制,得到具有脉冲内 π 相移和脉冲内无相移的交替脉冲序列。每个探测脉冲均获得待测光纤的后向瑞利散射信号,探测脉冲的相位差异使得交替探测序列得到的瑞利散射信号的衰落位置相互错开;然后选择具有较高强度的瑞利散射信号,用于计算相应位置的振动信息,从而避免了采用极微弱瑞利信号计算相位导致的

“死区”问题。2013年,该课题组进一步利用同时包含三个同光频率成分的探测脉冲,分别解调其相位,并通过多频率综合判决的方法来消除干涉衰落^[48]。2017年,本课题组基于 TGD-OFDR 的系统,提出了一种利用脉冲内分频和旋转矢量相加法来消除衰落噪声的方案^[41]。如图 8(b)所示,在 TGD-OFDR 系统的接收端,采用多个不同频段的数字匹配滤波器,同时获取具有不同中心频率的瑞利散射信号。然后用旋转相位累加的方法对不同频率的瑞利散射信号进行处理,得到最终的相位信息,过程如图 8(c)~(e)所示。该方法实质上是对不同探测脉冲获得的相位变化进行加权平均,而权重则对应瑞利散射信号的强度,有效抑制了相干衰落对振动信号检测的影响。

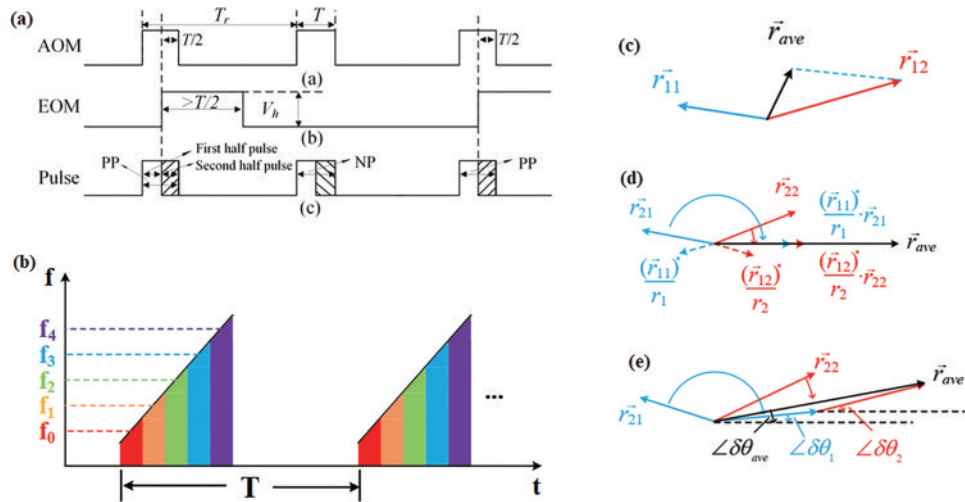


图 8 相干衰落现象的抑制。(a) π 相位调制探测脉冲对^[47]; (b) TGD-OFDR 信号的脉冲内分频^[47]; (c)~(e) 旋转矢量累加方法原理^[41]

Fig. 8 Suppression of coherence fading. (a) Dual probe pulses with π -phase shift^[47]; (b) inner-pulse frequency-division in TGD-

4 频率法解调

基于瑞利信号频谱特征的频率解调法近年来也受到了广泛的关注。该方法关注瑞利散射的强度而非相位信息,不受相干衰落的影响^[49];这种方法还可以检测静态信号,因为光纤的应变与瑞利散射频谱的移动具有一一对应关系^[50]。作为对比,基于相位解调的 DAS 系统输出相移总是落在 $-\pi$ 到 $+\pi$ 的范围内,在非连续测量且光纤状态变化较大的情况下,不能由相位唯一确定光纤的应变信息或温度信息。

4.1 光纤应变与瑞利散射频谱偏移量的关系

光纤中引起瑞利散射的离散反射点可以被视为

具有随机相位调制的光栅(随机光栅)。每段随机光栅都具有特定的频谱(瑞利图形)。当随机光栅受到应变时,如图 9 所示,其频谱将像光纤布拉格光栅(FBG)一样移动。但与 FBG 不同,随机光栅的频谱通常没有主峰,而且频谱形状是一条随机的曲线。因此,频谱偏移一般需要利用互相关等算法来计算。

随机光栅的频谱偏移 $\Delta\nu$ 、光纤折射率 n 和应变 ϵ (或温度 ΔT) 之间的关系与光纤光栅完全相同。

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{\Delta n}{n} = -K_\epsilon \epsilon, \quad (30)$$

式中: K_ϵ 为应变系数; ν_0 为激光中心频率; Δn 为光纤折射率的变化量。从(30)式可以看出,应变与频率

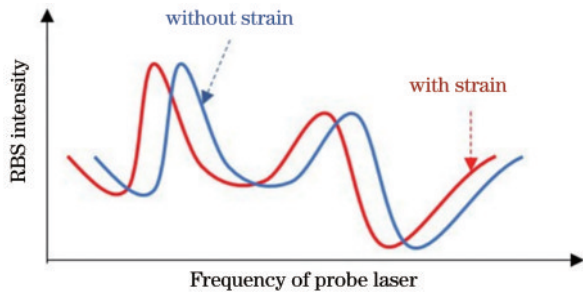


图 9 DAS中频率解调法的原理

Fig. 9 Principle of frequency demodulated method in DAS

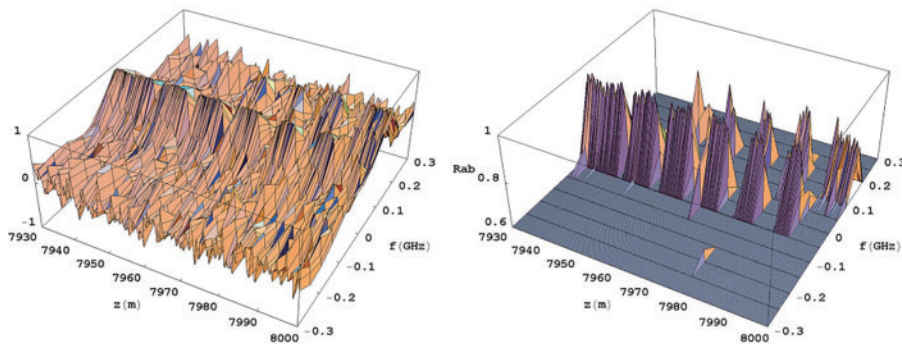
的偏移成正比,因此可以由频率的偏移得到应变的大小(振动波形)。在标准单模光纤中,(30)式中的应变灵敏度系数 K_ϵ 约为0.78。当激光中心波长为1550 nm时,1 $\mu\epsilon$ 的应变对应约150 MHz的频移^[51]。

瑞利频谱法通常需要在获得瑞利图形后进行互相关计算,以找出相关峰的偏移量。峰值偏移量的分辨率决定了应变的分辨率,其中一个重要限制因素是探测激光器的频率调谐步长。在实际应用中,由于测量时间和设备成本的限制,频率步长不能无限小,此时可采用插值的方法提高数据处理中

激光器波长调谐分辨率^[52]。另一个限制分辨率的因素是瑞利散射信号的信噪比,这一点与相位解调方法是一致的。

4.2 瑞利散射频谱偏移量的解调方法

基于频率解调的DAS需要不同频率的瑞利散射强度曲线。2009年,Koyamada等^[53-54]通过在传统OTDR装置上步进式地调谐激光器发射的探测脉冲频率,得到了不同频率对应的瑞利散射曲线,然后使用互相关算法计算瑞利散射的频移,得到环境应变或者温度的变化,如图10所示。在文献^[53]的工作中,研究人员改进了计算瑞利散射频移的方法,用互相关系数法代替直接的互相关运算,避免了互相关运算中可能出现的大误差问题,成功地实现了8 km长光纤上的温度测量,分辨率为0.01 $^{\circ}\text{C}$ 。然而,由于需要步进式地反复调谐激光器的频率,早期的瑞利散射频谱解调方法的响应带宽很低,只能用于准稳态信号如温度变化的检测。通过改善实验装置硬件^[55]和数据处理方法^[56-57],这种方案的系统空间分辨率和测量速度得到了一定提升。

图 10 利用瑞利频谱和互相关算法实现的分布式传感^[53]Fig. 10 Distributed sensing using Rayleigh frequency pattern and the cross correlation algorithm^[53]

为了解决步进式扫频法耗时导致系统相应带宽很低的问题,本课题组于2019年提出了一种单次测量(single-shot)获取多频率下瑞利散射曲线的方法^[58]。在TGD-OFDR系统中,在接收端通过匹配滤波器将宽带的瑞利散射信号分为多个中心频率不同的子带,从而得到整个待测光纤内不同频率对应的RBS曲线,如图11所示。该方案将频率为1 GHz的一个探测脉冲得到的瑞利散射信号划分为171个中心频率间隔5 MHz的瑞利散射曲线,并进一步通过插值算法将频率步进提升到了0.1 MHz。由于避免了步进式调谐过程,在10 km的情况下系统的响应带宽达到了5 kHz。在文献^[59]中,利用

相似的方法将传感距离扩展到了75 km。

基于瑞利散射频谱方法的DAS系统需要大量的运算,是制约其实际应用的一个重要障碍。为了减少计算量,2016年,Pastor-Graells等^[60-61]提出了基于啁啾脉冲的应变-时间映射解调法。当光纤上发生应变时,其瑞利散射频谱会相应移动。由于探测脉冲是线性啁啾脉冲,当瑞利散射频移量较小时,瑞利散射频谱的移动表现为检测到瑞利散射曲线的时间延迟而形状保持不变,如图12所示。此时可以通过瑞利散射强度的变化来确定振动的有无并确定其位置,然后仅在发生振动的区域进行互相关运算以获取应变的波形。

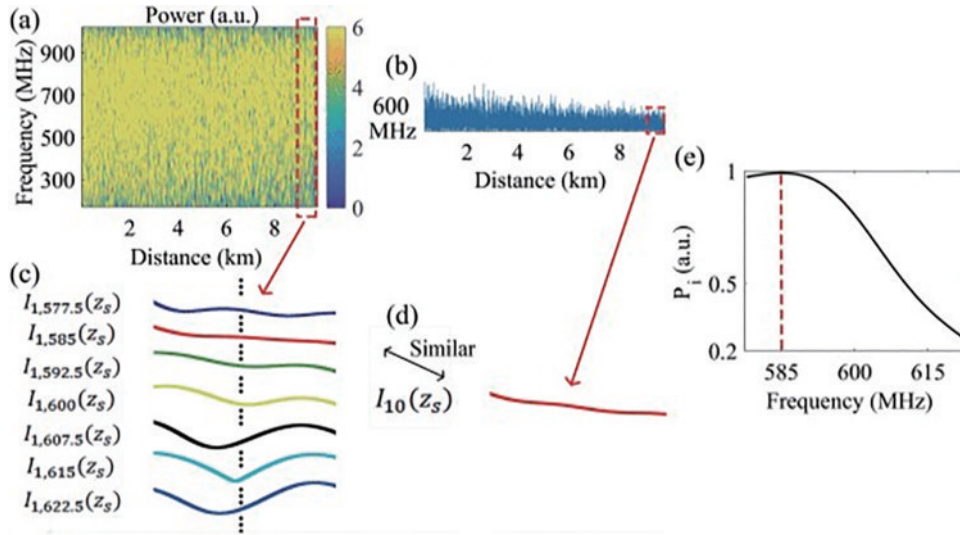


图 11 使用 RBS 曲线匹配的解调方案^[58]

Fig. 11 Demodulation using RBS curve matching^[58]

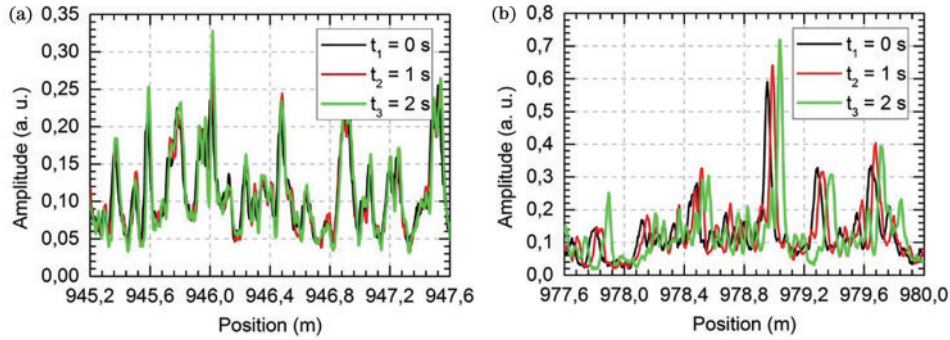


图 12 当在光纤上施加温度变化时 RBS 曲线产生的纵向偏移^[60]

Fig. 12 Longitudinal shift of the RBS trace when temperature changes are applied to the fiber^[60]

在基于 OTDR 架构的应变-时间映射方案中,空间分辨率仍然取决于探测脉冲的持续时间。利用 TGD-OFDR 架构代替 OTDR 方案,不仅可以提高系统的空间分辨率,而且解调时如果用非匹配滤波器代替匹配滤波器,将输出一定程度上被压缩的

啁啾脉冲,且啁啾速率可以通过非匹配滤波的参数器灵活调整^[62]。图 13 展示了啁啾脉冲在被匹配和非匹配滤波器压缩之后的结果。利用该方法,在实验中实现了 10 km 距离上 2 m 空间分辨率的分布式声波传感,信噪比达到 35 dB。

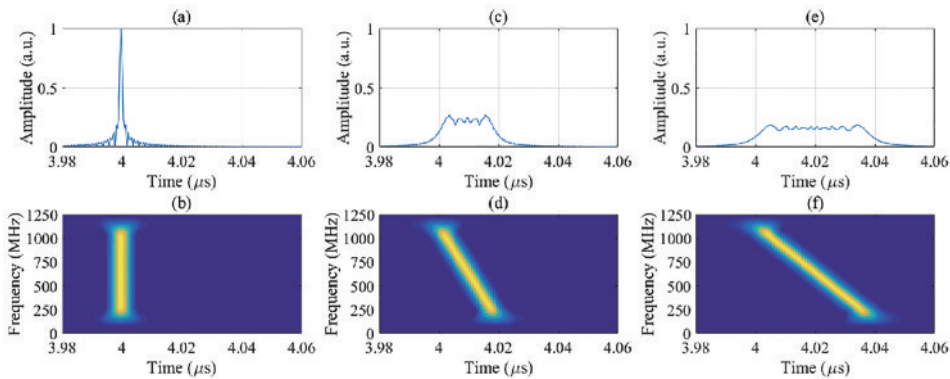


图 13 啁啾脉冲和相应脉冲的短时傅里叶变换结果^[62]

Fig. 13 Chirped pulse and short-time Fourier transform of corresponding pulse^[62]

5 DAS 的应用及数据处理的方法

随着技术的不断改进和产业的迫切需求, DAS 技术在许多领域中获得了应用。这些应用大致可分为两种类型:一种是替代传统的应变传感器或加速度传感器,形成大规模、低成本的传感器阵列,获取振动的准确波形;另一种主要用于振动事件检测和分类,需要对 DAS 系统输出的信号进行分类判别,而不关心振动的具体波形,如输油气管线的泄露检测应用。

5.1 DAS 系统在地球物理领域中的应用

DAS 系统在地球物理领域获得了广泛的关注,尤其是在垂直地震剖面(VSP)分析和地震监测方面。在 VSP 技术中,在钻井中位于不同深度的地震检波器记录了地表震源所激发的地震波,对其进行分析可获得深层岩石的各种属性^[63],然而在井下布设大量的电子地震检波器不仅成本高而且风险很大。利用 DAS 技术,可用永久安装的光缆代替沿钻井安装的电子地震检波器,成本低且不影响油井的其他作业。2011 年, Mestayer 等^[64]首次证明了 DVS 具有 VSP 采集的能力,随后逐渐被 DAS 技术取代。图 14 是 DAS 与传统地震检波器获取的 Walk-away VSP 的图像比较^[65],所采用的 DAS 系统是基于 OTDR 架构和双探测脉冲相位检测方案的,经过数据处理后,可见 DAS 成像数据与地震检波器得到的波形非常相似,验证了 DAS 用作 VSP 检波器的性能。

对 VSP 中 DAS 的质量进行定量分析,结果表明, DAS 数据提供了适合创建地震图像的可靠振幅信息^[66]。与传统地震检波器相比, DAS 具有几个关键优势:独立传感通道数量更多(数千个甚至更多)、频率响应范围更宽^[67]、具有耐热性、与生

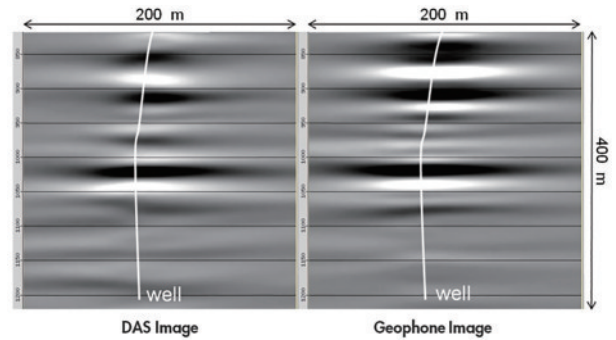


图 14 从传统检波器的数据和 DAS 中获取的 Walk-away VSP 图像^[65]

Fig. 14 Walk-away VSP images from conventional geophone data and DAS^[65]

产钻井协同工作、可长期监控等。尽管单个位置处 DAS 的噪声实际上要比地震检波器更大,但 DAS 更多的传感通道数量和空间一致特性允许应用有效的阵列处理技术来提升检测信号的质量。

5.2 DAS 用于事件检测

在边境监控、管道监控系统、铁路安全等应用中, DAS 由于具有覆盖范围广、传感灵敏度高的特性,是一种强有力的技术手段,尤其在管道和铁路建设中,往往同时部署了光缆,大大降低了引入 DAS 技术的成本。相比 DAS,虽然 DVS 在数据解调上更简单,但存在输出信号中包含振动信号的高阶谐波、链路衰减导致光纤的远端信号强度明显减小等不足,使得 DAS 在事件检测系统中具有更优良的性能。

在这些场景中,只利用 DAS 系统提取出的实际振动波形是远远不够的,需要在短时间内给出对事件的判定结果。各种应用场景下, DAS 在数据处理方面的整体结构相似,图 15 展示了一种面向管道安

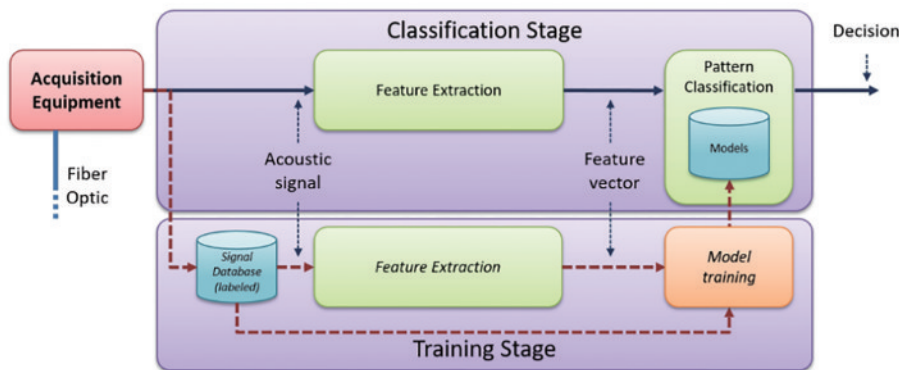


图 15 DAS 和模式识别系统的标准流程结构^[68]

Fig. 15 Standard architecture of a DAS and pattern recognition system^[68]

全监测的 DAS 系统数据处理的流程结构^[68]。数据处理模块包括训练阶段,负责生成能准确判决输入数据的事件种类的模型;分类阶段会根据 DAS 所输出的信号和经过训练模型输出的特征生成最终的决策。在两个阶段里,输入信号都需要经过特征提取模块得到特征向量,随后将相应的特征向量给予分类器进行判决,或者将足够的特征向量用于训练阶段生成模型。特征提取和模式识别是振动事件分类中的两个主要步骤。

在特征提取阶段,2014 年,Zhu 等^[69]将振动信号强度在单位时间内超过给定阈值的次数作为信号的特征。2016 年,Papp 等^[70]使用傅里叶变换获得信号的频谱分布,并将其划分为多个子频带来减少特征数量,随后使用主成分分析来进一步减少特征维数。2017 年,Tejedor 等^[71]使用短时傅里叶变换提取信号频谱信息,通过计算每个频带的能量来建立特征向量。多尺度小波分解方法是另一种常用的特征提取方法^[72]。经验模式分解(EMD)、形态特征提取等方式也可用于提取振动信号的特征^[73-74]。在分类阶段,支持向量机是常用的分类模型^[73]。Papp 等^[70]利用傅里叶变换和主成分分析提取特征后,使用支持向量机实现 15 km 铁轨上对运行火车的实时定位和跟踪。2019 年,Wu 等^[75]采用卷积神经网络进行特征提取,并使用支持向量机代 Softmax 层作为分类器。Sun 等^[74]在特征提取后,使用了相关向量机技术实现对多种事件的精度识别。Wu 等^[72]使用三层反向传播人工神经网络,网络对三种事件的识别率接近 90%。

6 展 望

在油气资源勘探、管线围栏安防等需求的引领下,DAS 技术经过多年的快速发展已经成熟,并在多个应用领域开始获得商用;而不断扩展的需求,对 DAS 技术也提出了更高的要求。未来值得关注的研究方面如下。

1) 进一步提高 DAS 系统的性能,例如灵敏度、空间分辨率、动态范围、频率响应等。与光纤光栅或者干涉仪型光纤传感器相比,由于后向瑞利散射信号的强度很低,DAS 在单个位置处的应变检测灵敏度较低。空间分辨率不仅决定了单位长度光纤上等效的传感通道数量,而且直接影响到传感器的最大应变测量范围,因此高空间分辨率在结构健康检测等领域中至关重要。

2) 研究高效、快速的 DAS 信号处理技术。一方面充分利用 DAS 系统提供的信息,例如,由于后向瑞利散射信号对应变和温度都敏感,利用合适封装的光缆和信号处理算法,一套硬件系统可以同时用于振动信号感知和高分辨率温度传感;另一方面是高效、通用、可移植的模式识别技术,例如将人工智能技术应用于 DAS 信号处理,这是许多 DAS 应用所面临的主要挑战。

参 考 文 献

- [1] Cai H W, Ye Q, Wang Z Y, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.
蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.
- [2] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2081-2087.
- [3] 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.
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.
- [4] Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106004.
张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106004.
- [5] Song J, Li W H, Lu P, et al. Long-range high spatial resolution distributed temperature and strain sensing based on optical frequency-domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1-8.
- [6] Arbel D, Eyal A. Dynamic optical frequency domain reflectometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 8823-8830.
- [7] Li J, Gan J L, Zhang Z S, et al. High spatial resolution distributed fiber strain sensor based on phase-OFDR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27913-27922.
- [8] Li H, Liu Q W, Chen D, et al. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor

- based on Φ -OFDR with enhanced crosstalk suppression[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 563-566.
- [9] Liu Q W, Liu L, Fan X Y, et al. A novel optical fiber reflectometry technique with high spatial resolution and long distance[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2014: AW3I.2.
- [10] 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.
- [11] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [12] Izumita H, Koyamada Y, Furukawa S, et al. The performance limit of coherent OTDR enhanced with optical fiber amplifiers due to optical nonlinear phenomena[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(7): 1230-1238.
- [13] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency-domain reflectometry in single-mode fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference 1981, April 27-29, 1981, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 1981: WF3.
- [14] Mussi G, Gisin N, Passy R, et al. -152.5 dB sensitivity high dynamic-range optical frequency-domain reflectometry[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(10): 926-927.
- [15] von der Weid J P, Passy R, Gisin N. Mid-range coherent optical frequency domain reflectometry with a DFB laser diode coupled to an external cavity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(5): 954-960.
- [16] Ghafoori-Shiraz H, Okoshi T. Fault location in optical fibers using optical frequency domain reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(3): 316-322.
- [17] Ghafoori-Shiraz H, Okoshi T. Optical-fiber diagnosis using optical-frequency-domain reflectometry[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(3): 160-162.
- [18] Amann M C. Phase noise limited resolution of coherent LIDAR using widely tunable laser diodes [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(18): 1694-1696.
- [19] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [20] Ebben T H, Begley D L, Marshalek R G. Phase-noise-limited accuracy of distance measurements in a frequency-modulated continuous-wave LIDAR with a tunable twin-guide laser diode[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(3): 896-903.
- [21] Roos P A, Reibel R R, Berg T, et al. Ultrabroadband optical chirp linearization for precision metrology applications[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3692-3694.
- [22] Qin J, Zhou Q, Xie W L, et al. Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [23] Chen J G, Liu Q W, He Z Y. Feedforward laser linewidth narrowing scheme using acousto-optic frequency shifter and direct digital synthesizer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4657-4664.
- [24] Moore E D, McLeod R R. Correction of sampling errors due to laser tuning rate fluctuations in swept-wavelength interferometry[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13139-13149.
- [25] Yüksel K, Wuilpart M, Mégret P. Analysis and suppression of nonlinear frequency modulation in an optical frequency-domain reflectometer[J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5845-5851.
- [26] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Phase-noise-compensated optical frequency-domain reflectometry with measurement range beyond laser coherence length realized using concatenative reference method [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(22): 3227-3229.
- [27] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Compensation of laser frequency tuning nonlinearity of a long range OFDR using deskew filter[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3826-3834.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Qian H, Luo B, He H J, et al. Phase demodulation based on DCM algorithm in Φ -OTDR with self-interference balance detection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(8): 473-476.
- [33] Christopher D, John P. A sensing method employing a fibre optic sensor system: PCT/GB1989/001017 [P]. 1991-03-07.
- [34] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. Phase-sensitive optical coherence reflectometer with differential phase-shift keying of probe pulses[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(10): 965-969.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Pan Z Q, Liang K Z, Ye Q, et al. Phase-sensitive OTDR system based on digital coherent detection [C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), November 13-16, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011.
- [38] 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.
- [39] Fu Y, Xue N T, Wang Z N, et al. Impact of I/Q amplitude imbalance on coherent Φ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1069-1075.
- [40] Gabai H, Eyal A. On the sensitivity of distributed acoustic sensing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5648-5651.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] He Z Y, Liu Q W, Chen D. Advances in fiber-optic distributed acoustic sensors[C]//2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), July 2-6, 2018, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2018.
- [45] Chen D, Liu Q W, Fan X Y, et al. Fading-noise-free distributed fiber-optic vibration sensor based on time-gated digital OFDR[C]//Asia-Pacific Optical Sensors Conference 2016, October 11-14, 2016, Shanghai, China. Washington, D. C.: OSA, 2016: W4A.2.
- [46] Pan Z Q, Liang K Z, Zhou J, et al. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 842129.
- [47] 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.
- [48] Zhou J, Pan Z Q, Ye Q, et al. Phase demodulation technology using a multi-frequency source for discrimination of interference-fading induced false alarms in a ϕ -OTDR system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0905003.
周俊, 潘政清, 叶青, 等. 基于多频率综合鉴别 ϕ -OTDR 系统中干涉衰落假信号的相位解调技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0905003.
- [49] Fernández-Ruiz M R, Martins H F, Costa L, et al. Statistical analysis of SNR in chirped-pulse Φ -OTDR [C]//Optical Fiber Sensors 2018, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D. C.: OSA, 2018: WF16.
- [50] Hartog A H. An introduction to distributed optical fibre sensors[M]. Boston: CRC Press, 2017.
- [51] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [52] Costa L, Martins H F, Martín-López S, et al. Fully distributed optical fiber strain sensor with $10\text{--}12\ \mu\text{ε}/\sqrt{\text{Hz}}$ sensitivity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4487-4495.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Liehr S, Münzenberger S, Krebber K. Wavelength-scanning coherent OTDR for dynamic high strain resolution sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10573-10588.
- [56] Zhang L, Yang Z S, Gyger F, et al. Rayleigh-based distributed optical fiber sensing using least mean square similarity[C]//*Optical Fiber Sensors 2018*, September 24-28, 2018, Lausanne, Switzerland. Washington, D.C.: OSA, 2018: ThE29.
- [57] Zhang L, Costa L D, Yang Z S, et al. Analysis and reduction of large errors in Rayleigh-based distributed sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(18): 4710-4719.
- [58] 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): 1-8.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Stewart R R. VSP: an in-depth seismic understanding [J]. *CSEG Recorder*, 2001, 26(7): 79-83.
- [64] Mestayer J, Cox B, Wills P, et al. Field trials of distributed acoustic sensing for geophysical monitoring [M]//*SEG technical program expanded abstracts 2011*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 4253-4257.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] Becker M W, Coleman T I. Distributed acoustic sensing of strain at earth tide frequencies[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 1975.
- [68] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. Machine learning methods for pipeline surveillance systems based on distributed acoustic sensing: a review[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(8): 841.
- [69] Zhu H, Pan C, Sun X H. Vibration pattern recognition and classification in OTDR based distributed optical-fiber vibration sensing system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9062: 906205.
- [70] Papp A, Wiesmeyr C, Litzberger M, et al. A real-time algorithm for train position monitoring using optical time-domain reflectometry[C]//*2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, August 23-25, 2016, Birmingham, UK. New York: IEEE Press, 2016: 89-93.
- [71] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H F, et al. Towards detection of pipeline integrity threats using a smart fiber optic surveillance system: pit-stop project blind field test results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10323: 103231K.
- [72] Wu H J, Xiao S K, Li X Y, et al. Separation and determination of the disturbing signals in phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3156-3162.
- [73] Wang Z D, Lou S Q, Liang S, et al. Multi-class disturbance events recognition based on EMD and XGBoost in ϕ -OTDR[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 63551-63558.
- [74] Sun Q, Feng H, Yan X Y, et al. Recognition of a phase-sensitivity OTDR sensing system based on morphologic feature extraction[J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(7): 15179-15197.
- [75] 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.