

基于频分复用的 Φ -OTDR系统

李钰婷,张红娟*,王鹏飞,高妍,王宇,靳宝全

(太原理工大学 电气与动力工程学院,太原 030024)

摘要:为解决光纤传感系统在长距离检测中高频局部放电声波信号响应受限的问题,提出一种基于频分复用的相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)系统。该系统采用电光调制器生成多频探测脉冲,结合正交解调技术对各通道拍频信号分别解调,并按脉冲时序组合相位信息,实现声波信号的准确重构。实验结果表明:在11.6 km传感光纤上,6通道频分复用系统实现了24 kHz的频率响应,等效采样率提升至传统系统的6倍;高压电缆局部放电实验中,系统成功检测到约20 kHz的局部放电信号,验证了其在长距离、高频局部放电检测中的有效性与稳定性。

关键词:频分复用;光纤传感;正交解调;声波检测

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2025)06-0069-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.013

Frequency division multiplexing-based Φ -OTDR system

LI Yuting, ZHANG Hongjuan*, WANG Pengfei, GAO Yan, WANG Yu, JIN Baoquan

(School of Electrical and Power Engineering, University of Taiyuan University of Technology of China, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To address the limitation of high-frequency partial discharge acoustic wave signal response in long-distance fiber optic sensing systems, this paper proposes a phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ -OTDR) system based on frequency division multiplexing. The system employs an electro-optic modulator to generate multi-frequency probe pulses and incorporates quadrature demodulation technology to separately demodulate the beat signals of each channel. The phase information is then combined according to the pulse sequence to achieve accurate reconstruction of acoustic signals. Experimental results demonstrate that on an 11.6 km sensing fiber, the 6-channel frequency division multiplexing system achieved a frequency response of 24 kHz, with an equivalent sampling rate increased by six times compared to conventional systems. In partial discharge experiments on high-voltage cables, the system successfully detected partial discharge signals at approximately 20 kHz, validating its effectiveness and stability for long-distance, high-frequency partial discharge detection.

Key words: frequency division multiplexing, optical fiber sensing, orthogonal demodulation, acoustic detection

0 引言

高压电力设备的安全稳定运行对电能生产、传输与消费的整体可靠性具有关键影响,其中设备绝缘状

收稿日期:2024-11-26。

基金项目:国家自然科学基金项目(62375197)资助;中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B004)资助;山西省基础研究计划项目(202103021222010)资助;山西省科技创新团队项目(201805D131003)资助。

作者简介:李钰婷(1999—),女,山西长治人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备智能检测技术、光纤振动检测技术。曾主要参与课题组的国家自然科学基金项目及中央引导地方科技发展专项项目。

***通信作者:**张红娟(1974—),女,博士,教授,主要研究方向为电气节能、电气检测和电力电子等新技术。



态是保障电网安全的核心环节^[1]。交联聚乙烯(XLPE)电力电缆具备优异的绝缘性能、机械强度及运行可靠性,在电能传输与分配中发挥着重要作用^[2]。然而,在电缆制造、运输、安装及运行过程中可能引入各类绝缘缺陷,进而诱发局部放电。若未及时处理,局部放电将持续劣化绝缘结构,最终导致击穿和绝缘失效^[3],严重威胁电力系统安全。因此,局部放电活动的检测成为评估电力电缆绝缘状态的重要方向。

局部放电过程伴随有电磁辐射、发光、发热和声发射等多种物理现象,为检测与分析故障定位提供了多种途径。相较于其它方法,声波检测技术因具备非侵入特性与故障定位潜力而受到广泛关注^[4],相关研究和应用也取得了显著进展。例如,基于相敏光时域

反射仪(Φ -OTDR)技术的分布式光纤传感系统凭借其高绝缘性、灵敏度及抗电磁干扰能力^[5],可实现沿光纤声波信号的连续精确测量,已逐步应用于局部放电检测领域^[6]。然而,传统单脉冲调制 Φ -OTDR系统中,每个探测周期仅允许一个脉冲在整段光纤中传播并返回瑞利散射信号,光纤长度制约了脉冲重复频率,进而限制了系统可检测的声波频率范围。实际局部放电所产生的声信号频谱宽泛,覆盖低频至特高频多个频段,尤其在长距离电缆监测场景中,系统频率响应能力不足的问题更为突出^[7-13]。因此,亟需发展兼具长传感距离与宽频响能力的光纤传感系统。

近年来,研究人员在提升长距离传感系统频率响应方面开展了广泛探索^[14]。例如,通过将 Φ -OTDR与马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结合构建混合系统,可在6.35 km长光纤上检测1.2 MHz信号^[15],并在4 km长光纤中实现10 MHz频率响应^[16],显著扩展了系统频响范围。然而,此类混合系统在多点位声波同步检测方面存在局限。为应对该问题,研究人员陆续提出基于非均匀采样与压缩感知的声信号检测方法^[17-18]。例如,采用平均重复频率低于5 kHz的亚奈奎斯特采样序列,在4.5 km长光纤中检测到24 kHz声信号并利用压缩感知恢复其频谱^[19];结合时延采样方案,系统以10 kHz脉冲重复频率同步识别13 kHz与47 kHz声波^[20];基于随机采样的系统在5.4 km长光纤上检测到384 kHz高频声信号^[21]。然而,这些方法均存在特定限制:压缩感知技术需依赖信号稀疏性先验信息,且仅能恢复稀疏信号的频率与位置,对高频局部放电信号的完整重构能力有限;随机采样虽可离散化采集信号,但未实质性扩展系统频率响应范围,检测高频局部放电信号时仍存在瓶颈。

由于局部放电过程复杂且随机性强,其声波信号的稀疏性及其它波形特征难以预知,导致上述方法在电缆高频局部放电检测中适用性受限。针对这一问题,本文提出一种基于频分复用的 Φ -OTDR系统,结合相位解调技术实现局部放电声波信号的准确恢复与重构。

1 基于频分复用的 Φ -OTDR系统的调制与解调原理

1.1 系统结构与光路设计

本文所提出的基于频分复用的 Φ -OTDR系统的光路结构如图1所示。激光器产生线宽小于100 Hz的单频连续光,经过90:10的耦合器将连续光分为探测光

和本振光,以实现相干检测。光电调制器(EOM)将探测光调制成多频脉冲光,脉冲光通过具有200 MHz频移的声光调制器(AOM)后进入掺铒光纤放大器(EDFA)。EDFA用于补偿探测光经过EOM和AOM后的光功率损失。随后,脉冲光通过环形器被注入光纤,返回的瑞利背向散射(RBS)信号与本振光进行拍频。拍频信号由带宽为350 MHz的光/电转换器捕获,该转换器将光信号转换为电信号。采样率为1 GS/s的数据采集卡将光/电转换器的输出数字化,并将数据传输到计算机进行分析。此外,信号发生器用于同步调制信号和数据采集卡的触发信号。

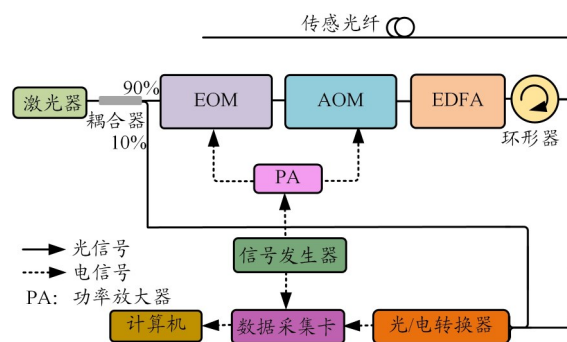


图1 基于频分复用的 Φ -OTDR系统光路结构图

1.2 多频探测脉冲的生成与调制

与传统的单脉冲 Φ -OTDR系统相比,基于频分复用的 Φ -OTDR系统在每个探测周期内会依次注入多个频率各异的探测脉冲。每个脉冲的特定频率成分可视为一个独立的子探测脉冲,如图2所示。在一个探测周期 T 内,系统共注入 n 个不同频率(相邻探测信号之间的频率间隔为 Δf)的探测脉冲,多频探测脉冲信号经过EOM和AOM后得到的调制脉冲 $m(t)$ 表示为

$$m(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} \exp(j2\pi f_i t) \text{rect}\left(\frac{t - \tau/2 - i\tau_s}{\tau}\right) \quad (1)$$

其中, t 为时间, i 为信道探测脉冲的序列, N 为不同频率的探测脉冲数, f_i 为每个探测脉冲的频率, τ 为单个

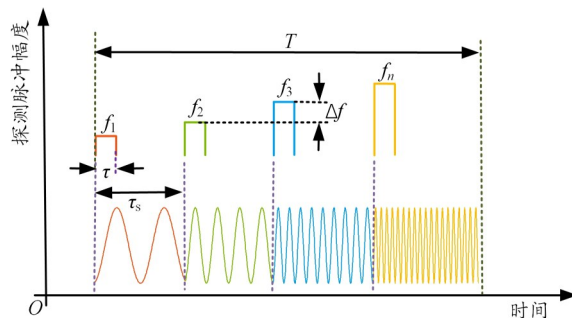


图2 多频探测脉冲序列

脉冲的时域宽度, τ_s 为相邻脉冲的时间间隔。

当窄线宽激光器产生的连续光经过调制信号调制后, 得到的探测脉冲光 $p(t)$ 为

$$p(t) = E_0 \exp[j(2\pi(f_c + f_i)t + \varphi_0)] \times \text{rect}\left(\frac{t - \tau/2 - i\tau_s}{\tau}\right) \quad (2)$$

其中, E_0 为探测光的电场强度, f_c 为激光器频率, φ_0 为激光器初始相位。

1.3 拍频信号的产生与模型构建

在光纤位置 z 处产生的 RBS 光信号会返回到光电探测器, 并与本振光进行拍频, 得到的拍频信号 E_{beat} 表示为

$$E_{\text{beat}}(t, t_z) = E_0 E_L r_z \exp\left(-\alpha \frac{ct_z}{n}\right) \times \exp[-j(2\pi f_c t_z + \Phi_z)] \times \exp[j(2\pi f_i(t - t_z) + \varphi_0)] \times \text{rect}\left(\frac{t - t_z - \tau/2 - i\tau_s}{\tau}\right) = h(t_z)m(t - t_z) \quad (3)$$

其中, E_L 为本振光的电场强度, r_z 为位置 z 的 RBS 系数, α 为光纤衰减系数, Φ_z 为传感光纤位置 z 的相位变化, t_z 为位置 z 处的往返时间, c 为光速。

根据式(3)可知, 利用相干探测得到的光纤 z 处拍频信号由两部分构成, 分别记为 $h(t_z)$ 和 $m(t - t_z)$ 。其中 $h(t_z)$ 体现了系统中除去调制部分之外的全部特性, 涵盖激光器的强度、频率以及相位特性, 传感光纤的衰减、散射特性, 还有因外部振动致使背向光信号产生的相位变化等特性; 而 $m(t - t_z)$ 则表征系统的调制模式。

那么, 基于频分复用的 Φ -OTDR 系统在一个探测周期内输出的拍频信号为

$$E_{\text{beat}}(t) = \sum_{z=0}^{\infty} h(t_z)m(t - t_z) = h(t)m(t) \quad (4)$$

1.4 正交解调与通道分离

平衡光电探测器输出的拍频信号包含来自各信道的多个频率分量。为分离各通道信息, 系统采用正交解调技术: 先将滤波后的拍频信号分别与各频率通道对应的正交参考信号 $\cos(2\pi f_i t)$ 和 $\sin(2\pi f_i t)$ 相乘, 获得混频输出。由于相位信息主要存在于零频附近, 对混频信号进行低通滤波后, 即可提取第 i 个通道的同相与正交分量, 其表达式为

$$I_i(t) = \frac{1}{2} E_0 E_L r \exp\left(-\alpha \frac{ct_z}{n}\right) \cos(\varphi_0 - \Phi_i(t)) \quad (5)$$

$$Q_i(t) = \frac{1}{2} E_0 E_L r \exp\left(-\alpha \frac{ct_z}{n}\right) \sin(\varphi_0 - \Phi_i(t)) \quad (6)$$

其中, $I_i(t)$ 和 $Q_i(t)$ 的幅值取决于拍频信号强度, 而其相位则承载了激光器与探测脉冲的相位信息。

根据 $I_i(t)$ 和 $Q_i(t)$, 可解调出第 i 个通道所检测声波信号的幅值与相位分别为

$$A(t) = \sqrt{I_i^2(t) + Q_i^2(t)} \quad (7)$$

$$\varphi(t) = \arctan\left[\frac{Q_i(t)}{I_i(t)}\right] \quad (8)$$

其中, 幅值用于声波定位, 而相位用于恢复声波信号。

1.5 相位组合与等效采样率提升

由于不同频率的探测脉冲在时域上依次注入传感光纤, 将各通道解调所得的相位按脉冲注入时序进行组合, 可得

$$\Phi(t) = [\Phi_0(t), \Phi_1(t), \dots, \Phi_{N-1}(t)] \quad (9)$$

由式(9)可知, 在传感光纤长度一定的条件下, 不同通道的探测脉冲分别对局部放电声波信号进行独立采样, 系统在单个探测周期内的等效采样率与总采样点数提升至单通道情况的 N 倍, 从而在保持传感距离不变的同时, 有效扩展了系统可检测声信号的频率范围。

2 实验结果与分析

2.1 频分复用 Φ -OTDR 系统对高频声波信号的检测实验

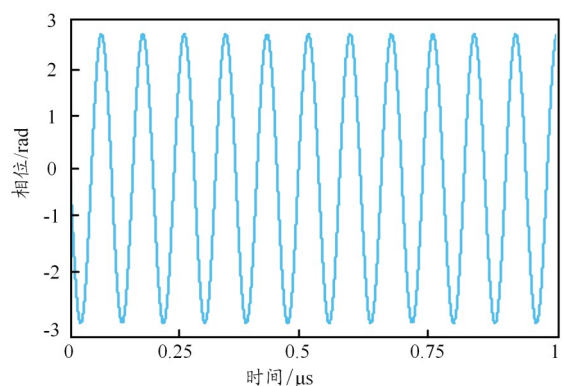
为验证基于频分复用的 Φ -OTDR 系统对高频声波信号的检测与还原能力, 本实验采用压电陶瓷 (PZT) 模拟局部放电声波信号。实验设置中, 传感光纤总长度为 11.6 km, PZT 布置于距起始端 10.606 km 处。系统重复频率设定为 8 kHz, 采用 6 通道多频调制方案, 各通道频率均匀分布区间为 20~180 MHz。

根据奈奎斯特采样定理, 传统单脉冲 Φ -OTDR 系统在 8 kHz 重复频率下的最高可检测频率为 4 kHz。而本系统每个探测周期内包含 6 个频率不同的探测脉冲, 使得每个周期内的采样点数量提升为传统系统的 6 倍。因此, 在相同重复频率下, 系统等效采样率提高至 48 kHz, 可检测信号频率上限相应提升至 24 kHz。

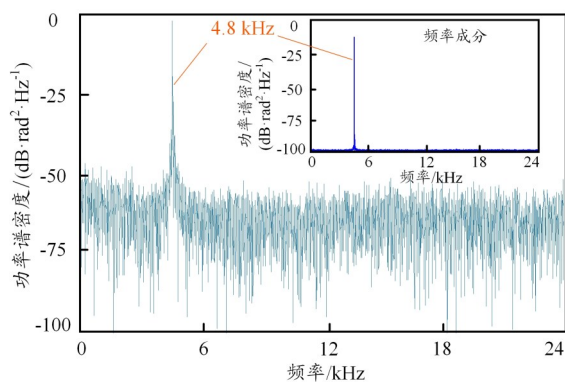
实验中, 对 PZT 施加频率为 4.8 kHz 的正弦声波信号。通过将 6 个通道的相位解调结果按脉冲注入时序进行组合, 成功恢复了声波波形, 结果如图 3 所示。图 3(a) 为恢复信号的时域波形, 图 3(b) 为其功率谱密度, 两者均显示出与输入信号频率一致的特征, 表明该频分复用 Φ -OTDR 系统能够有效实现高频声波信号的高精度恢复。

随后, 实验向 PZT 施加了 5 个振幅相同、频率各异

李钰婷,张红娟,王鹏飞,等:基于频分复用的 Φ -OTDR系统



(a) 恢复信号的时域波形



(b) 恢复信号的功率谱密度

图3 24 kHz声波信号恢复的波形与功率谱密度

的正弦声波信号,并利用所提出的基于频分复用的 Φ -OTDR系统分别进行解调。各频率信号对应的功率谱密度分布如图4所示。可以看出,随着声波频率的逐步升高,系统仍能保持良好的频率响应平坦性,未出现明显衰减。这一实验结果充分验证了频分复用 Φ -OTDR系统在扩展高频响应范围方面的有效性与稳定性。

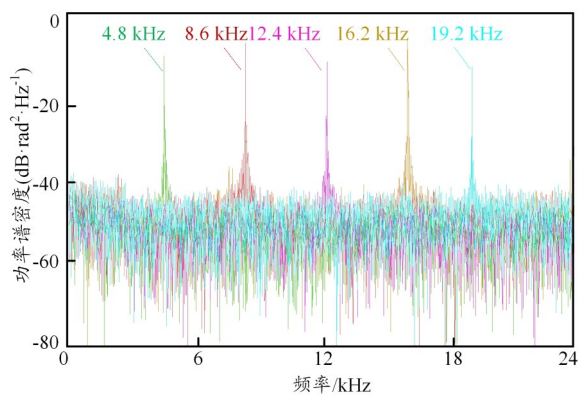


图4 Φ -OTDR系统各频率信号对应的功率谱密度分布图

2.2 高压设备系统结构与高频局部放电信号检测实验

在局部放电检测实验中,采用已验证的基于频分

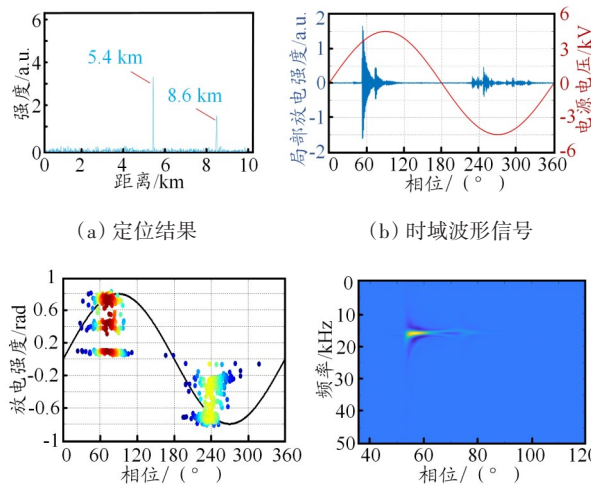
复用的 Φ -OTDR系统进行测量,整个实验在高压屏蔽室内完成。高压实验装置的配置如图5所示。将220 V交流电输入控制台,经调节后输出0~400 V可调电压。为抑制电源中的高阶谐波干扰,将该可调电压通过低通滤波器进行处理,随后输入充气式变压器。在控制台调控下,变压器输出0~100 kV高压,作为电力电缆的高压交流电源。高压端经保护电阻连接至耦合电容器,以防止短路故障,同时将电力电缆接入耦合电容器以耦合局部放电产生的脉冲电流,并监测电缆的放电状态。



图5 高压系统搭建平台

实验前,在电力电缆表面人为设置2处缺陷,并将传感光纤铺设在缺陷位置。为加速缺陷发展,采用阶梯升压法,每级电压维持30~60 min,期间每隔5 min利用频分复用 Φ -OTDR系统采集局部放电信号,以确保准确捕捉放电现象。

当电缆在特定电压下发生稳定局部放电时,基于光纤传感与相位解调技术实现了局部放电的定位与检测,结果如图6所示。图6(a)为局部放电沿传感光



(c) PRPD图谱

(d) 正半周期放电信号的频率分布

图6 电缆局部放电检测结果

纤的定位结果,在5.4 km和8.6 km处均检测到明显放电信号;图6(b)为局部放电信号的时域波形,在电源电压的正、负半周期内均存在连续放电活动。正半周期放电持续时间对应的相位约为 $60^{\circ}\sim 100^{\circ}$,负半周期约为230~280 rad。对应周期信号的相位分辨部分放电(PRPD)图谱如图6(c)所示,正半周期放电信号强度较高、重复性较好,与图6(b)结果一致。图6(d)展示了正半周期放电信号的频率分布,其能量主要集中在20 kHz附近,表明所提系统在实际高频局部放电检测中具有良好的适用性。

3 结束语

光纤传感系统在检测高频局部放电声波信号时,常面临传感距离与可检测频率之间的制约关系。为突破此限制,本文提出了一种基于频分复用的 Φ -OTDR系统,旨在同步提升系统传感距离与频率响应能力。为验证系统性能,构建了具有6个通道的频分复用 Φ -OTDR实验系统,并开展了高频检测与信号恢复可靠性实验。结果表明,在向传感光纤施加不同频率的声波信号时,随着频率升高,系统仍保持良好的频率响应平坦性,并在11.6 km的传感距离上实现了高达24 kHz的频率响应。进一步在高压屏蔽环境中进行的电力电缆局部放电检测实验中,系统成功捕捉到频率约为20 kHz的局部放电信号。综上所述,本文所提出的频分复用 Φ -OTDR系统为解决长距离高频声波信号检测提供了一种有效技术路径。

参考文献:

- [1] OKABE S. Research in high voltage and insulation engineering of UHV-class electric power equipment[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 18(9): 1384-1397.
- [2] WANG H, WANG W, WU F, et al. Characteristics analysis of water needle induced electrical trees in XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 1988-1995.
- [3] MONTANARI G C, SHAFIQ M, MYNENI S B. Insulation defect modelling and partial discharge typology identification: a robust and automatic approach[J]. Applied Sciences, 2024, 14(15): 6715-1-6715-13.
- [4] 赵丽娟,魏迎健,徐志钊. 基于 Φ -OTDR的声波事件识别分类器研究进展[J]. 光通信研究, 2023(2): 1-5.
- [5] SHANG Y, SUN M C, WANG C, et al. Research progress in distributed acoustic sensing techniques[J]. Sensors, 2022, 22(16): 6060-1-6060-31.
- [6] 肖春,张海燕,张建民,等. 局部放电光纤检测的梁支撑膜结构光纤 F-P 传感器设计与仿真[J]. 光通信技术, 2021, 45(7): 28-32.
- [7] ZHOU Z X, LIU H, ZHANG DW, et al. Distributed partial discharge locating and detecting scheme based on optical fiber rayleigh backscattering light interference[J]. Sensors, 2023, 23(4): 1828-1-1828-14.
- [8] LI J L, LIU H H, SHEN X L, et al. SNR enhancement of quasi-distributed weak acoustic signal detection by elastomers and MMF integrated Φ -OTDR[J]. Optics Express, 2024, 31(22): 37019-37029.
- [9] QIN W Q, MA G M, WANG S H, et al. Distributed discharge detection based on improved cotdr method with dual frequency pulses[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 9001308-1-9001308-8.
- [10] PALMIERI L, SCHENATO L, SANTAGIUSTINA M, et al. Rayleigh-based distributed optical fiber sensing[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6811-1-6811-35.
- [11] 曾凌烽,林朝哲,黄建理,等. 光纤分立式多点局部放电检测与定位技术[J]. 应用光学, 2023, 44(5): 1125-1132.
- [12] 卞晓亮,江俊杰,童欣,等. 基于 Sagnac 干涉仪的多点局部放电检测系统[J]. 激光与红外, 2024, 54(1): 154-160.
- [13] ZHANG W, LU P, NI W J, et al. Gold-diaphragm based Fabry-Perot ultrasonic sensor for partial discharge detection and localization[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 1-1.
- [14] 张旭苹,张益昕,王亮,等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73.
- [15] ZHANG Y X, XIA L, CAO C Q, et al. A hybrid single-end-access MZI and Φ -OTDR vibration sensing system with high frequency response[J]. Optics Communications, 2017, 382: 176-181.
- [16] MA P F, SUN Z S, LIU K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. Optics and Laser Technology, 2020, 124: 105966-1-105966-8.
- [17] HE Q, ZHU T, ZHOU J, et al. Frequency response enhancement by periodical nonuniform sampling in distributed sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(20): 2158-2161.
- [18] ZHANG J D, ZHENG H, ZHU T, et al. Distributed fiber sparse-wideband vibration sensing by sub-nyquist additive random sampling[J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2022-2025.
- [19] QU S, QIN Z G, LIU Z J, et al. Broadening frequency response of a distributed sparse wideband vibration sensing via a time-division multi-frequency sub-nyquist sampling[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14237-14245.
- [20] DENG Y, LIU Q, HE Z. Distributed fiber-optic acoustic sensor for sparse-wideband vibration sensing with time delay sampling[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(12): 13290-13295.
- [21] LIN Z H, HE H, ZHAO Z Y, et al. Frequency response enhanced quantitative vibration detection using fading-free coherent F-OTDR with randomized sampling[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(15): 5159-5168.