

引用本文: 杨苏凡, 张春熹, 王夏霄. 基于 SOA 光纤环形激光器的分布式声传感系统[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 18–22.

基于 SOA 光纤环形激光器的分布式声传感系统

杨苏凡, 张春熹, 王夏霄

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了降低传统分布式声学传感器(DAS)系统复杂度并提高信噪比(SNR), 提出了一种基于半导体光放大器的光纤环形激光器(SOA-FRL)的 DAS 系统。该系统用 SOA-FRL 取代了传统的 DAS 系统中的窄线宽激光器和脉冲调制器, 实现了高稳定的光脉冲输出; 采用双脉冲外差探测方法, 实现了精确的声信号探测和声源定位。实验结果表明: 在频率为 1 kHz、幅值为 1.14 rad 的声信号作用下, 所提系统的解调 SNR 高达 38.25 dB, 空间分辨率为 12 m。

关键词: 分布式声传感; 半导体光放大器; 光纤环形激光器; 外差探测; 光纤传感

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0018-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Distributed acoustic sensing system based on SOA fiber ring laser

YANG Sufan, ZHANG Chunxi, WANG Xiaoxiao

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to reduce the complexity of the traditional distributed acoustic sensor (DAS) system and improve the signal-to-noise ratio(SNR), a DAS system based on a fiber ring laser(SOA-FRL) based on a semiconductor optical amplifier is proposed. This system uses SOA-FRL to replace the narrow linewidth laser and pulse modulator in the traditional DAS system, and realizes the highly stable optical pulse output. The double pulse heterodyne detection method is used to achieve accurate sound signal detection and sound source location. The experimental results show that the demodulation SNR of the proposed system is as high as 38.25 dB and the spatial resolution is 12 m under the action of the acoustic signal with frequency of 1 kHz and amplitude of 1.14 rad.

Key words: distributed acoustic sensing, semiconductor optical amplifier, fiber ring laser, heterodyne detection, fiber optic sensing

0 引言

水声探测对于开发海洋资源和国家水下军事防御有着十分重要的意义^[1-3]。分布式声传感器(DAS)具有覆盖范围广、时空分辨率高、环境适应性强等优势, 在海洋生物探测^[4]、海洋地震监测^[5]、海洋资源勘探^[6]等应用领域有着较大潜力。

基于相位敏感光时域反射计(Φ -OTDR)的 DAS 系

统不仅具备了 DAS 的优势, 还可以实现声信号的实时测量^[7-9], 使其在水声探测的研究中受到了广泛关注^[10-11]。

DAS 系统引入了相位解调部分, 可以获得由外部声学信号引起的相位变化, 进而恢复声信号的完整波形。为了准确地进行声学信号的检测, 系统必须具有高信噪比^[12]。目前, 在系统信号处理方法方面, 有关于小波去噪滤波算法^[13-16]、脉冲编码方法^[17-19]的报道; 使用高功率激光器^[20-21]、高性能光电探测器(PD)^[22]或光放大器^[23-24]的报道。虽然这些方法和器件都可以提高 DAS 系统的信噪比, 但同时也会增加系统复杂度或者增大硬件开销。针对上述问题, 本文提出一种基于半导体光放大器的光纤环形激光器(SOA-FRL)的 DAS 系统。

收稿日期: 2023-06-29。

作者简介: 杨苏凡(1994—), 女, 博士研究生, 现就读于北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院光学工程专业, 主要从事光纤分布式声传感器、光纤水听器等方面的工作, 博士在读期间获得工信部和北京教育系统等省部级奖励 3 项。



1 SOA-FRL 结构和原理

本文设计的 SOA-FRL 结构示意图如图 1 所示。SOA-FRL 由 1 个 SOA、1 个反射型光纤布喇格光栅 (FBG)、1 个光隔离器 (ISO) 和 1 个光环形器 (CIR) 构成。SOA 在腔体中充当增益介质^[25]和环内脉冲调制器, 由可编程的脉冲发生器 (PPG) 调制。因此, SOA-FRL 产生的脉冲重复频率与 PPG 施加在 SOA 上的调制频率一致。FBG 作为一个波长选择滤波器^[27], 可以改变环形腔输出信号的损耗特性, 过滤 SOA 发出的宽带脉冲光。ISO 与 10:90 的单模光纤耦合器 (C₁) 和掺铒光纤放大器 (EDFA) 相连, 用来保持腔体的单向性并保护 SOA。EDFA 对 C₁ 输出的脉冲进行放大以满足长距离探测的需求。

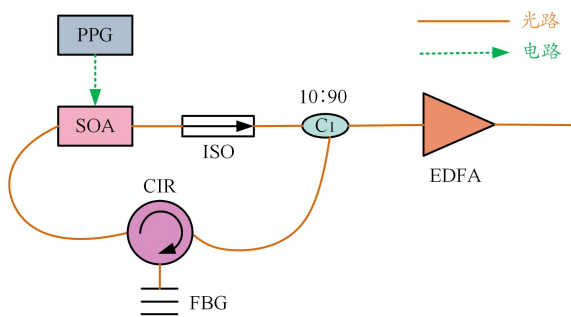


图 1 SOA-FRL 结构示意图

SOA-FRL 作为一个可调谐的脉冲锁模激光器^[28], 工作原理与传统的连续波 (CW) 或锁模激光器不同, 且 SOA-FRL 涉及多种物理效应, 其腔体动力学比 CW 或锁模激光器更加复杂。SOA-FRL 的谐振频率 f_{cav} 与透射光的往返时间有关, 即

$$f_{\text{cav}} = \frac{v_g}{L_0 + L_{\text{FBG}}} \quad (1)$$

其中, v_g 是群速度, L_0 是对应于环形器的固定光纤长度, L_{FBG} 是 CIR 和 FBG 之间的光纤长度。

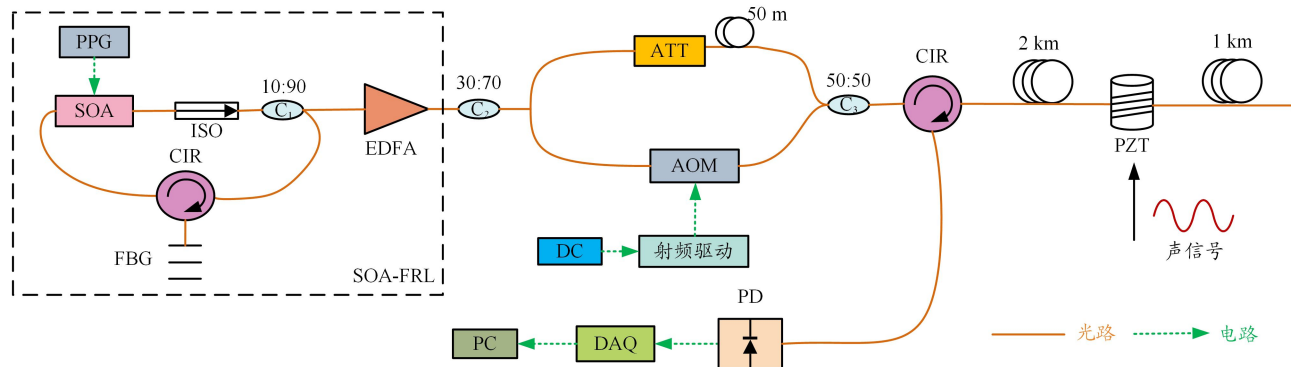


图 2 基于 SOA-FRL 的 DAS 系统结构示意图

SOA-FRL 取代了传统 DAS 系统中的窄线宽激光器 (NLL) 和脉冲调制器, 在简化系统结构的同时, 又可以实现高稳定的光脉冲输出。

2 系统设计

2.1 传感原理

本文提出的基于 SOA-FRL 的 DAS 系统结构图如图 2 所示。从 SOA-FRL 发出的脉冲光, 经过 30:70 的 C₂ 后分为 2 路: 一路经过声光调制器 (AOM), 另一路经过衰减器 (ATT) 和一段延迟光纤, 2 路光在 50:50 的 C₃ 处合光, 形成一对脉冲对 (外差脉冲对)。AOM 受到直流 (DC) 信号驱动, 只对光进行移频, 其移频量为 Δf , 则 2 个脉冲的频率差为 Δf , 即外差频率。外差脉冲对通过 CIR 进入传感光纤, 2 段光纤由 1 个压电陶瓷 (PZT) 连接。

与传统的 Φ -OTDR 系统不同, 本文在提出的 DAS 系统中注入传感光纤的探测光是脉冲对。脉冲对进入传感光纤后, 光纤会产生后向瑞利散射 (RBS) 脉冲。后向散射脉冲发生干涉, 并通过 CIR 进入光电探测器 (PD)。受带宽限制, PD 对高频信号不响应, 只有 Δf 的外差干涉信号被 PD 接收, 接收的信号表达式为

$$I_s(t) = A \cos[2\pi\Delta ft + \Phi(t) + \Delta\varphi_0] \quad (2)$$

其中, A 是干涉信号的振幅, $2\pi\Delta ft$ 是外差载波, $\Phi(t)$ 是由外部振动引起的相位变化, $\Delta\varphi_0$ 是双脉冲的初始相位噪声差。

PD 采集到的外差干涉信号经高速数据采集卡 (DAQ) 进入电脑 (PC), 通过适当的信号处理方法解调出所需的声波相位、振幅等信息。

2.2 反正切解调算法和相位差分算法

本文采用反正切解调算法^[29]可以解调出 $\Phi(t)$, 算法框图如图 3 所示。将式 (2) 分别与 $\cos(2\pi\Delta ft)$ 和 $\sin(2\pi\Delta ft)$ 相乘, 再经过低通滤波器 (LPF), 得到 2 个

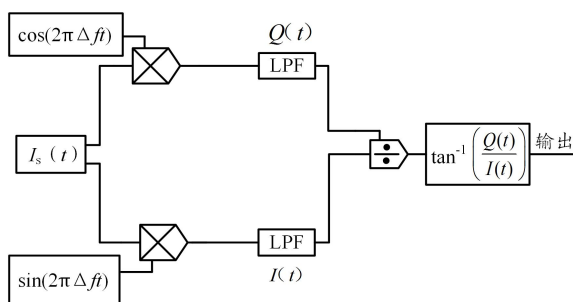


图3 反正切解调算法框图

支路的信号表达式为

$$I(t) = \frac{A}{2} \cos(\Phi(t) + \Delta\varphi_0) \quad (3)$$

$$Q(t) = \frac{A}{2} \sin(\Phi(t) + \Delta\varphi_0) \quad (4)$$

通过对式(3)和式(4)求平方和及反正切,可以得到 RBS 脉冲的幅值和相位信息如式(5)、式(6)所示。

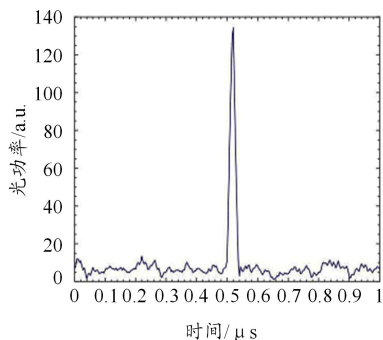
$$A = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)} \quad (5)$$

$$\Phi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right) - \Delta\varphi_0 \quad (6)$$

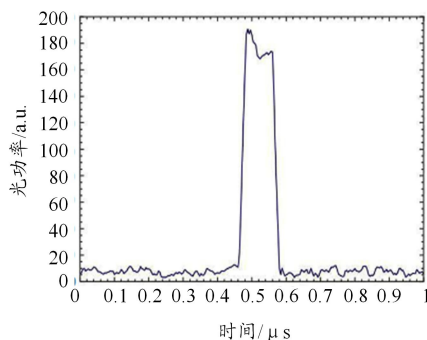
由于初始相位噪声差 $\Delta\varphi_0$ 是一个缓变量,通过高通滤波器进行滤除后可以得到 $\Phi(t)$ 。此外,反正切解调法的取值范围为 $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$,后续可以通过解卷绕算法^[32]来扩展。

当外界声信号作用在传感光纤时,位于声波扰动点前的相位信息则会被 RBS 带回来。由于只有位于扰动点后面位置的 RBS 拥有声波扰动信息,因此可以通过相位差分法消除相位积累,获得相位变化信息,实现对声信号的定位。此外,RBS 是在半个脉冲内相干的结果,故选取的相位差分的长度应该大于半个脉冲宽度,即大于该系统的空间分辨率。通过采用相位差算法,解调出光纤相应部分的相位变化如式(7)所示。

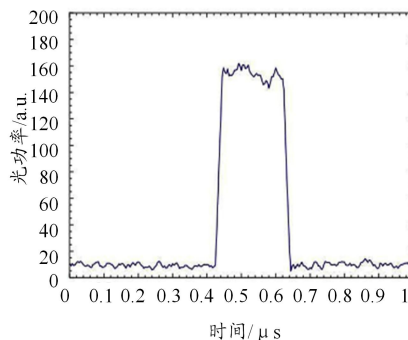
$$\Delta\Phi(t) = \Phi_a(t) - \Phi_a(t) \quad (7)$$



(a) 持续时间为 20 ns, 重复频率为 10 kHz



(b) 持续时间为 100 ns, 重复频率为 50 kHz



(c) 持续时间为 200 ns, 重复频率为 20 kHz

图5 对 SOA 施加不同脉冲持续时间和重复频率调制的输出结果

3 实验与结果

3.1 SOA-FRL 测试实验

本文搭建了 SOA-FRL 输出测试实验装置对 SOA-FRL 输出光脉冲进行测试,装置图如图 4 所示。实验参数设置如下:PD 带宽为 200 MHz,DAQ 的采样率为 250 MHz;FBG 的带宽小于 0.3 nm,反射率大于 90%;SOA 驱动电路集成了 SOA 的温控和电流控制模块。SOA 施加的调制信号由一个 PPG 产生,SOA-FRL 输出的光经过 EDFA 放大后,通过一个 20 dB 的 ATT 后进入 PD,然后经 DAQ 进入 PC。对 SOA 施加不同脉冲持续时间和重复频率调制的输出结果如图 5 所示。可以看出,SOA-FRL 输出的光脉冲功率较高,在持续时间、重复频率分别为 20 ns、10 kHz,100 ns、50 kHz,200 ns、20 kHz 时,输出光功率分别约为 140、180、170 a.u.,并且输出光脉冲上升/下降沿较小。

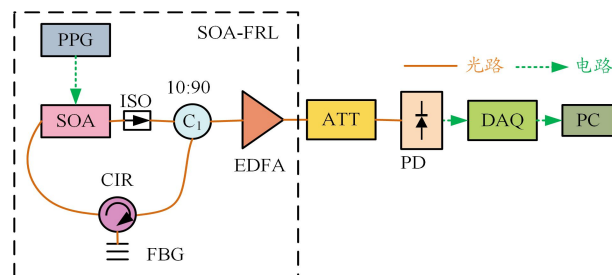


图4 SOA-FRL 输出测试实验装置

3.2 声传感测试实验

声传感测试实验中所用的传感光纤由 2 段单模光纤构成,其中一段光纤的长度约为 2 km,另一段约为 1 km,PZT 的调制系数为 1.9 rad/V,AOM 移频量为 80 MHz。本文使用一个信号发生器对 PZT 施加连续的正弦调制信号,模拟声信号的产生。PPG 对 SOA 进行调制,使得 SOA-FRL 输出宽度 $\tau=240$ ns、重复频率 $f_r=10$ kHz 的光脉冲。解调过程中,首先采集 $M=2\ 000$ 条 RBS 信号序列,通过提取序列中特定点对采集到的

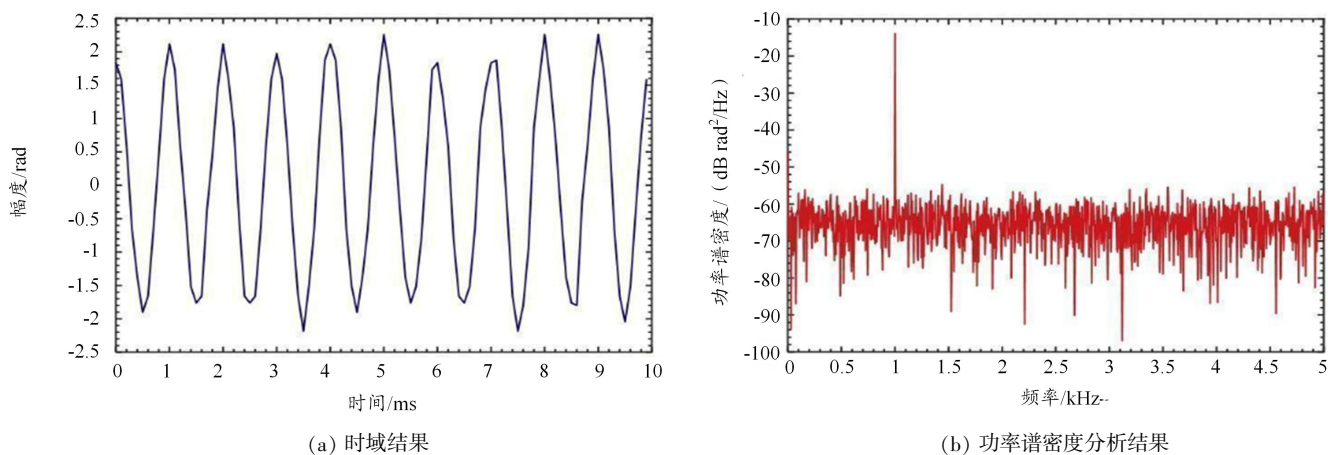


图 6 1.14 rad 和 1 kHz 声信号的解调结果

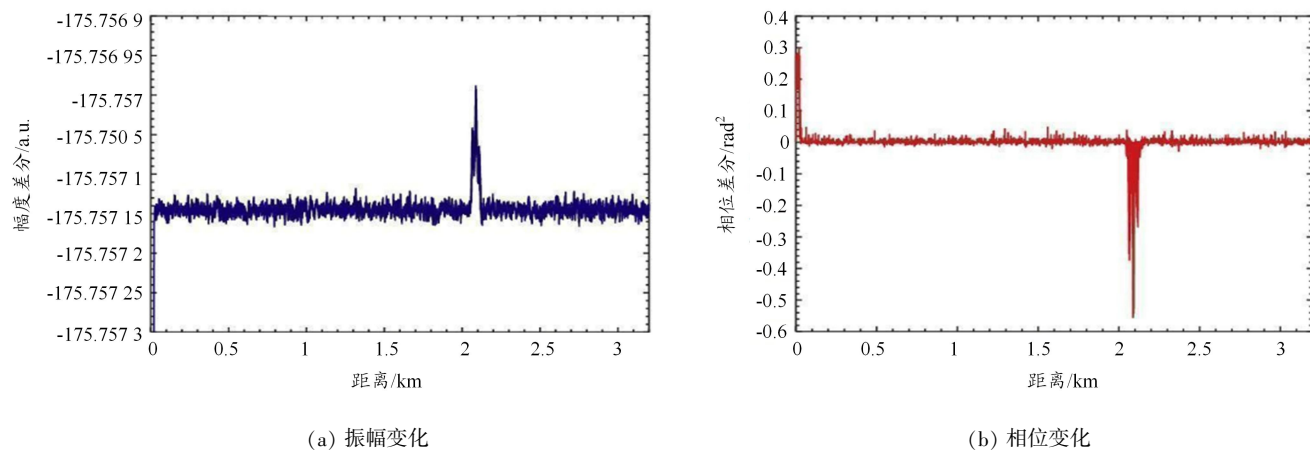


图 7 对 1 kHz、1.14 rad 声信号的解调结果进行振幅和相位差分结果

RBS 信号进行重构;然后,对重构后的信号分别采用反正切解调算法和相位差分算法处理,以获取声信号相位信息,并对声信号进行定位。扰动信号可以通过提取每个 RBS 序列中的特定点进行重构。

在该情况下,可以计算出传感系统最大的探测距离 $L_s = \frac{c}{2nfM} \approx 10.2$ km,空间分辨率是 $\frac{w_r + L_d}{2} = 11.8$ m (取 12 m),其中 w_r 是空间域上的脉冲宽度, n 是光纤折射率(一般取 1.47), L_d 是延迟光纤长度。

系统对应的声信号幅值为 1.14 rad,在不同频率 (0.3、0.5、0.7、1 kHz) 的声信号作用下,测得系统解调信噪比分别为 36.46、33.24、37.17、38.25 dB,其中频率为 1 kHz 时的解调结果如图 6 所示。可以看出,系统可以准确地检测到不同频率的声信号,并可以较好地还原声信号波形。

对解调结果使用相位差分算法可以实现声信号的定位,得到振幅和相位差分结果如图 7 所示。可以

看出,特殊信号出现在 2.1 km 处,结果与 PZT 的位置一致。这表示系统可以实现对声信号的准确定位。

4 结束语

本文提出了一种基于 SOA-FRL 的 DAS 系统。将 SOA-FRL 作为脉冲锁模激光器,取代了传统 DAS 系统中的 NLL 和脉冲调制器,获得一个高稳定的光脉冲输出;同时,采用了双脉冲外差检测方法进行解调,实现了精确的声信号探测和声源定位。实验结果表明:系统在 1.14 rad、1 kHz 声信号作用下,实现了 38.25 dB 的高信噪比解调。该系统具有结构简单、体积小、室温下多波长操作可靠和设计紧凑等优点,在海洋探测应用中具有较大潜力。

参考文献:

- [1] DANDRIDGE A. Fiber optic interferometric sensors at sea [J]. Optics and Photonics News, 2019, 30(6): 34-44.

杨苏凡, 张春熹, 王夏霄: 基于 SOA 光纤环形激光器的分布式声传感系统

- [2] TOKY A, SINGH R P, DAS S. Localization schemes for underwater acoustic sensor networks-a review [J]. *Computer Science Review*, 2020, 37: 100241-1-100241-18.
- [3] 王军成, 孙继昌, 刘岩, 等. 我国海洋监测仪器装备发展分析及展望. [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(3): 42-52.
- [4] GUO Y, MARIN J M, ASHRY I, et al. Submarine optical fiber communication provides an unrealized deep-sea observation network [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 15412-1-15412-10.
- [5] 何向阁, 文鹏飞, 杨辉, 等. 基于分布式光纤传感技术实现的小道距海上拖缆地震数据采集系统 [J]. *石油物探*, 2022, 61(1): 70-77.
- [6] HE X G, WU X M, WANG L, et al. Distributed optical fiber acoustic sensor for in situ monitoring of marine natural gas hydrates production for the first time in the Shenhu Area, China [J]. *China Geology*, 2022, 5(2): 322-329.
- [7] MARTINS H F, MARTIN-LOPEZ S, CORREDERA P, et al. Coherent noise reduction in high visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(23): 3631-3637.
- [8] WANG Z, 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.
- [9] SORIANO-AMAT M, MARTINS H F, DURÁN V, et al. Time-expanded phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(3): 443-454.
- [10] LU B, WU B, GU J, et al. Distributed optical fiber hydrophone based on Φ -OTDR and its field test [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3147-3162.
- [11] ALMUDÉVAR A, SEVILLANO P, VICENTE L, et al. Unsupervised anomaly detection applied to Φ -OTDR [EB/OL]. [2023-06-29]. <https://doi.org/10.3390/s22176515>.
- [12] ZINSOU R, LIU X, WANG Y, et al. Recent progress in the performance enhancement of phase-sensitive OTDR vibration sensing systems [EB/OL]. [2023-06-29]. <https://www.xueshufan.com/publication/2918977909>.
- [13] QIN Z, CHEN L, BAO X. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 542-544.
- [14] SHI Y, FENG H, ZENG Z. A long distance phase-sensitive optical time domain reflectometer with simple structure and high locating accuracy [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15: 21957-21970.
- [15] QIN Z, CHEN H, CHANG J. Detection performance improvement of distributed vibration sensor based on curvelet denoising method [EB/OL]. [2023-06-29]. <https://www.xueshufan.com/publication/2626843635>.
- [16] LI D, LOU S, XIN Q, et al. SNR enhancement of far-end disturbances on distributed sensor based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1957-1964.
- [17] MUANENDA Y, OTON C J, FARALLI S, et al. A cost-effective distributed acoustic sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection phase-OTDR [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8: 1-10.
- [18] WANG Z-N, ZHANG B, XIONG J, et al. Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6: 6117-6124.
- [19] SORIANO-AMAT M, MARTINS H F, DURAN V, et al. Quadratic phase coding for SNR improvement in time-expanded phase-sensitive OTDR [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4406-4409.
- [20] MARTINS H F, MARTÍN-LÓPEZ S, CORREDERA P, et al. Distributed vibration sensing over 125 km with enhanced SNR using phi-OTDR over a URFL cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33: 2628-2632.
- [21] CHOI K N, TAYLOR H F. Spectrally stable Er-fiber laser for application in phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(3): 386-388.
- [22] QIAN H, LUO B, HE H, et al. Phase demodulation based on DCM algorithm in Φ -OTDR with self-interference balance detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32: 473-476.
- [23] CHEN Y, MAO B M, ZHOU B, et al. Improving the SNR of the phase-OTDR by controlling the carrier in the SOA [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67: 1241-1246.
- [24] MARTINS H F, MARTÍN-LÓPEZ S, CORREDERA P, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over >100 km [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32: 1510-1518.
- [25] ZULKIFLI M Z, HASSAN N A, AWANG N A, et al. Multi-wavelength fiber laser in the S-band region using a Sagnac loop mirror as a comb generator in an SOA gain medium [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(9): 673-676.
- [26] HE X, XIE S, 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.
- [27] MUANENDA Y. Recent advances in distributed acoustic sensing based on phase-sensitive optical time domain reflectometry [J]. *Journal of Sensors*, 2018, 22: 1-16.
- [28] MADRIGAL J, FRAILE-PELÁEZ F J, ZHENG D, et al. Characterization of a FBG sensor interrogation system based on a mode-locked laser scheme [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24650-24657.
- [29] GAO X, HU W, DOU Z, et al. A method on vibration positioning of Φ -OTDR system based on compressed sensing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(16): 16422-16429.