

# Vibration Positioning Analysis of Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometry

Haiyan Li

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong  
Email: 13805404082@163.com

Received: Jul. 24<sup>th</sup>, 2019; accepted: Aug. 6<sup>th</sup>, 2019; published: Aug. 13<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Phase sensitive optical time domain reflectometry is one of the most commonly technologies for distributed optical fiber sensing and it has a wide range of theoretical and practical research values. The common method to obtain external vibration position information is analyzing the backward Rayleigh scattered light by signal processing algorithms. In the paper, a novel signal processing method based on butter-worth filtering is proposed to realize the external vibration position monitoring of phase sensitive optical time domain reflection technology. The vibration position can be obtained by the Butterworth low-pass filter transfer function. The high-frequency noise can be filtered by this method, which means the low-frequency signal related to the vibration signal is retained. Experiment results show that the SNR is increased to 20.5 dB for the vibration event of 100 Hz along 3.5 km sensing fiber without affecting the spatial resolution of the system, which indicates the prominent performance of the novel method for vibration detection.

## Keywords

Phase Sensitive Optical Time Domain Reflection Technique, Butter-Worth Filter, Denoising, Signal to Noise Ratio, Spatial Resolution

---

# 相敏光时域反射技术振动定位分析

李海燕

山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南  
Email: 13805404082@163.com

收稿日期: 2019年7月24日; 录用日期: 2019年8月6日; 发布日期: 2019年8月13日

## 摘要

相敏光时域反射技术是最常用的分布式光纤传感技术之一, 具有广泛的理论和实际研究价值。通过算法对其后向瑞利散射光分析是得到外部振动位置信息的常用手段。本文提出了一种基于巴特沃斯滤波的算法, 此算法通过频域滤波实现对相敏光时域反射技术进行外界振动位置的监测。通过巴特沃斯低通滤波传递函数, 对高频噪声进行滤波, 只保留与振动信号相关的低频信号, 从而达到去噪的功能, 继而找到振动位置。实验结果表明: 在长度为3.5 km的传感光纤上, 该滤波方法在不影响系统的空间分辨率情况下, 对于沿传感光纤100 Hz的振动信号而言, 振动位置的信噪比可以达到20.5 dB, 表明了该振动检测新方法具有突出的性能。

## 关键词

相敏光时域反射技术, 巴特沃斯滤波器, 去噪, 信噪比, 空间分辨率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 分布式光纤传感技术基于其抗电磁干扰, 高灵敏度, 长传感距离以及低成本等优越的特性引起了国内外研究学者们的广泛关注[1] [2] [3] [4]。传统的分布式光纤传感技术主要包括点传感器[5] [6]和分布式传感器[7] [8]。基于光纤内部的散射效应, 分布式光纤传感技术主要分为基于布里渊散射的传感技术(B-OTDR) [9] [10], 基于拉曼散射的传感技术(R-OTDR) [11] [12]以及相敏光时域反射技术( $\phi$ -OTDR) [13] [14] [15]。其中,  $\phi$ -OTDR 技术作为分布式振动传感最有价值的技术之一, 已广泛应用于边境安全, 民用基础设施健康监测, 断点定位和管道入侵检测等多个领域[16] [17] [18]。

在  $\phi$ -OTDR 系统中, 对于外界振动信号的定位直接制约着传感系统的发展和应用, 通常通过测量由  $\phi$ -OTDR 系统中的折射率变化引起的后向瑞利散射光的强度变化来检测外部环境的振动事件。通过分析沿传感光纤的后向瑞利散射光强度的变化, 可以实现对外界振动位置的实时监测。然而, 实际应用过程中, 瑞利散射光非常弱并且容易受到由激光相位噪声和许多不确定因素引起随机噪声的干扰, 使得采集到的信号无法检测到外界振动信号的位置。因此, 对扰动信号的定位处理技术已经成为了  $\phi$ -OTDR 传感系统领域研究者们广为关注的研究课题。2010年, Lu等[19]在  $\phi$ -OTDR 传感系统通过使用滑动平均和滑动差分的方法来识别外界扰动的位置。2012年, Qin等[20]提出了基于小波变换方法在  $\phi$ -OTDR 传感系统中实现对外界环境扰动信号的检测, 但是该方法主要依赖于小波变换的基本功能, 需要复杂的参数优化。2013年, Zhu等[21]报道了一种基于二维边缘检测的方法在  $\phi$ -OTDR 传感系统中实现抑制随机噪声并且实现对振动位置的检测, 该方法利用了原始数据中时间信息和位置信息的冗余性和相关性, 实现了二维去噪方法在  $\phi$ -OTDR 中的应用。2016年, M. A. Soto等[22]使用二维和三维图像处理的方法实现了对分布式光纤传感器的检测性能的进一步提升。2017年, He[23]等提出了基于自适应二维双边滤波算法对采集到的原始信号进行处理, 相比于之前的去噪技术, 进一步提升了处理时间以及信噪比。

总的来讲, 对  $\phi$ -OTDR 传感系统外界振动位置的检测正在经历由一维到三维, 由实验室到实际应用发展的过程。但是对于  $\phi$ -OTDR 传感系统而言, 利用简单的滤波方法进行信号处理的相关研究还是报道

较少。本文利用巴特沃斯滤波算法,实现了基于频域滤波对分布式  $\varphi$ -OTDR 传感系统外界扰动位置的定位。实验结果表明,在长度为 3.5 km 的传感光纤上,在不影响空间分辨率的情况下实现信噪比达到 20.5 dB 的去噪效果。巴特沃斯滤波算法显示了在实践中实现  $\varphi$ -OTDR 系统振动事件测量的巨大潜力。

## 2. 巴特沃斯滤波算法原理

巴特沃斯滤波器是电子滤波器的一种,这种滤波器最先由英国工程师斯蒂芬·巴特沃斯(Stephen Butterworth)在 1930 年发表在英国《无线电工程》期刊的一篇论文中提出的。巴特沃斯滤波器的特点是使得通频带内的频率响应曲线达到最大限度平坦,没有起伏,而在阻频带则逐渐下降为零。在  $\varphi$ -OTDR 系统中,随机噪声的信号频率大部分为高频信号,振动信号的频率通常较低,采用巴特沃斯滤波器对采集信号在频域滤波可以较好的滤除高频噪声,保留低频信号,从而实现振动定位。

在  $\varphi$ -OTDR 系统中,采用一阶巴特沃斯低通滤波器对采样信号进行频域滤波。巴特沃斯低通滤波器的传递函数可以用如下公式表示:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + (D(u, v)/D_0)^{2n}}$$

其中,  $D_0$  表示通带的半径,  $n$  表示巴特沃斯滤波器的次数。

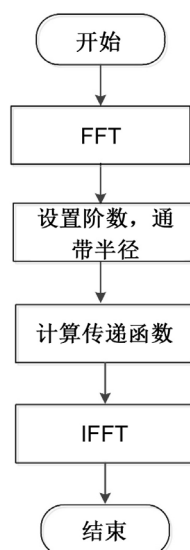


Figure 1. Schematic diagram based on Butterworth filter algorithm

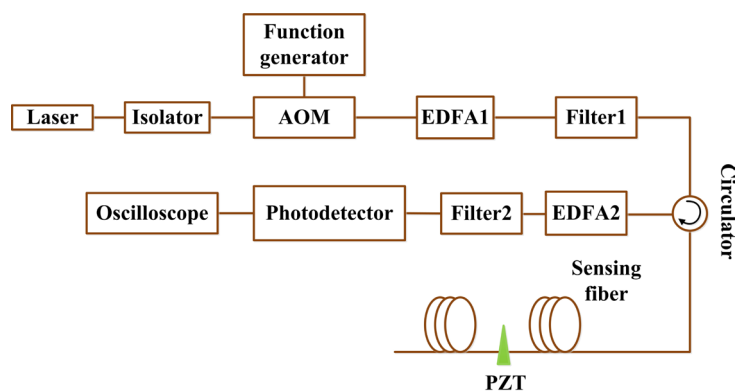
图 1. 基于巴特沃斯滤波去噪算法原理图

对原始信号采用巴特沃斯滤波器进行频域滤波流程图如图 1 所示。图 1 中, FFT 表示傅里叶变换, IFFT 表示逆傅里叶变换, 其中巴特沃斯滤波器阶数设置为 1, 通带半径设置为 60。在数据处理过程中, 先对采集数据进行傅里叶变换得到其频域信息, 并对巴特沃斯滤波器的通带半径进行设置。使用一阶巴特沃斯低通滤波器对信号进行高频滤波, 可以有效的滤除高频信息, 得到振动信号的信息, 继而找到振动信号的位置。

## 3. 实验装置及其结果

本文中使用的  $\varphi$ -OTDR 系统的实验装置如图 2 所示。光源(Laser)为窄线宽激光光源, 其中线宽小于

5 kHz, 最大输出功率为 10 mW; 隔离器(Isolator)是防止后向散射光进入激光器, 起到保护激光器的作用。激光光源发出的连续光进入由函数发生器(Function generator)驱动的声光调制器调制成脉冲宽度为 50 ns 的脉冲光, 其中脉冲重复频率为 10 kHz; 之后脉冲光进入第一个掺铒光纤放大器(EDFA1)进行放大, 由于放大过程中产生放大自发辐射噪声(ASE), 要经过滤波器 1(Filter1)滤除 ASE 噪声。放大后的脉冲光经过环形器(Circulator)进入到传感光纤(Sensing fiber)中; 后向瑞利散射光经过环形器进入到另一个 EDFA2 放大, 并经过 Filter2 滤除 ASE 噪声, 再由光电探测器(Photodetector)探测, 光电探测器采集瑞利信号, 将光信号转换为高速示波器采集的电信号, 示波器的采样速率为 100 MHz, 最后由电脑 Matlab 软件进行数据处理。



Laser: 窄线宽光源; Isolator: 隔离器; AOM: 声光调制器; EDFA: 掺铒光纤放大器; Filter: 滤波器; Photodetector: 探测器; Oscilloscope: 示波器; Function generator: 函数发生器; Circulator: 环形器; Sensing fiber: 传感光纤; PZT: 压电陶瓷

Figure 2. Experimental setup of  $\phi$ -OTDR system

图 2.  $\phi$ -OTDR 系统实验装置图

在实验中, 将缠绕 5 m 传感光纤的压电陶瓷(PZT)用作振动源, 传感光纤的长度为 3.5 km, 将压电陶瓷放置在 1250 m 处, 并由函数发生器进行驱动。我们将频率为 100 Hz 的振动信号施加到 PZT 上, 使得传感光纤随着 PZT 以相同的频率共同振动, 并通过高速示波器收集 1000 条迹线。

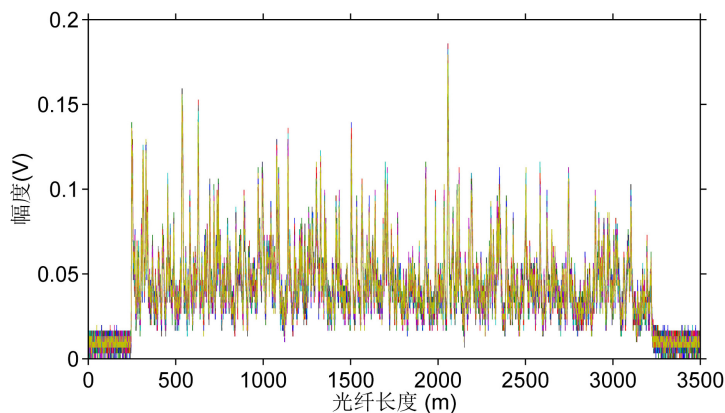


Figure 3. 1000 consecutive raw Rayleigh back scattering traces

图 3. 1000 次连续原始瑞利后向散射轨迹

图 3 显示了在 PZT 振动信号为 100 Hz 的情况下, 1000 次连续原始瑞利后向散射轨迹。从图 3 中可

可以看出, 光脉冲持续时间内多个散射中心的相干作用, 原始信号的轨迹呈现出锯齿形外观。由于原始的后向瑞利散射轨迹与由环境波动或者其它影响因素引起的随机噪声混合, 所以直接对原始数据进行判断难以找到振动信号的位置。

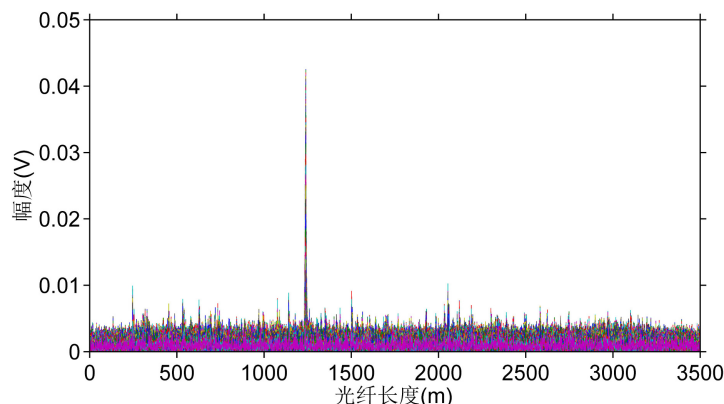


Figure 4. Detection of 100 Hz vibration using Butterworth filtering method  
图 4. 采用巴特沃斯滤波方法对 100 Hz 的振动进行检测

图 4 展示了基于巴特沃斯去噪方法对 100 Hz 的振动信号数据去噪结果, 相比于图 3 的原始数据而言, 我们可以看出在 1250 m 处的位置可以找到一个明显的峰值。通过图 3 可以看出, 巴特沃斯滤波去噪方法能够有效的对振动信号进行定位, 从而找到外界扰动的位置, 继而证实了传统的滤波方法可以有效的应用于  $\varphi$ -OTDR 系统中进行去噪, 并且达到找出振动位置的目的。在  $\varphi$ -OTDR 系统中, 我们通常使用信噪比(SNR)来衡量去噪性能, 其中  $SNR = 20 * \log_{10}(V_{signal} / RMS(V_{noise}))$ , 式中,  $V_{signal}$  表示在振动位置处振动信号的幅值,  $RMS(V_{noise})$  表示背景噪声的均方根。在图 3 中, 对于巴特沃斯滤波算法来说, 振动位置信息的信噪比为 20.5 dB, 通过信噪比反映可以看出, 本文中使用的办法可以较好的对信号进行去噪。在  $\varphi$ -OTDR 系统中, 由于对振动的测量都是相互独立的, 每个振动位置彼此之间无相互关系, 所以在对单振动测试有效的情况下, 多个振动位置的测试也是有效的。

在  $\varphi$ -OTDR 系统中, 空间分辨率也是其重要参数之一, 可以用来表征系统性能的好坏。空间分辨率指的是系统可以分辨振动位置之间的最小距离。由于在  $\varphi$ -OTDR 系统中我们监测的是后向瑞利散射光在脉冲持续时间内所对应的光纤长度内多个散射颗粒发出的散射光之间的干涉的结果。通常系统的空间分辨率可以表示为:  $Z = Tc/2n_e$ , 其中  $T$  表示为输入传感光纤的脉冲宽度, 在本次实验中, 使用的脉冲宽度为 50 ns,  $c$  表示光在真空中的传播速度,  $n_e$  表示传感光纤的有效折射率, 通常为 1.5。当脉冲宽度为 50 ns 的时候, 计算得知  $\varphi$ -OTDR 系统的理论空间分辨率为 5 m。

空间分辨率通常为振动位置峰值的强度的 10%至 90%的宽度, 在我们实验中, 由于示波器的采样率为 100 MS/s, 对应的 1 个点代表 1 m。采用巴特沃斯滤波方法得到的空间分辨率如图 5 所示, 可以看出峰值强度的 10%至 90%的宽度范围内的长度为 5 m, 对应着系统的空间分辨率为 5 m。从图 5 可以看出, 巴特沃斯滤波方法可以获得与理论空间分辨率相同的距离。因此, 该方法可以在达到去噪效果的同时不影响系统的空间分辨率。

图 6 显示了在振动位置应用傅立叶变换得到振动事件的频谱信息。我们给 PZT 施加的振动信号的频率为 100 Hz, 通过图 6 可以看出, 在 100 Hz 处有一个明显的峰值, 得到的频率信息与施加在 PZT 上面的频率一致。

另外, 在实验中, 我们主要是通过 Matlab 软件对信号进行处理, 使用 Matlab 软件对信号进行处理的

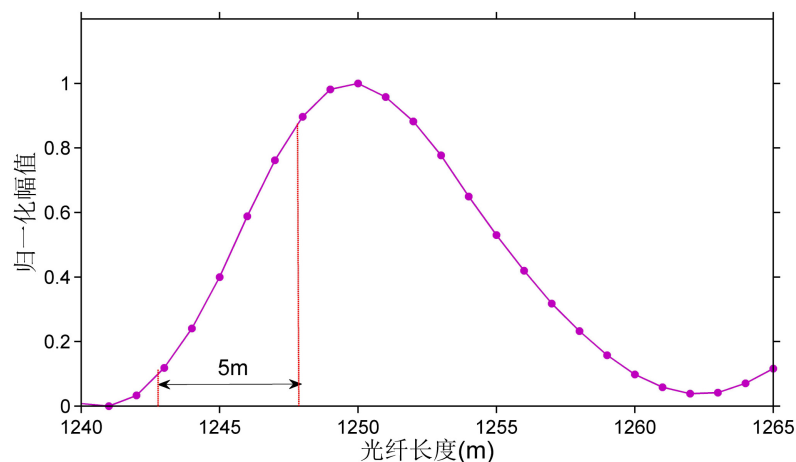


Figure 5. Spatial resolution using Butterworth filtering  
图 5. 采用巴特沃斯滤波方法的空间分辨率

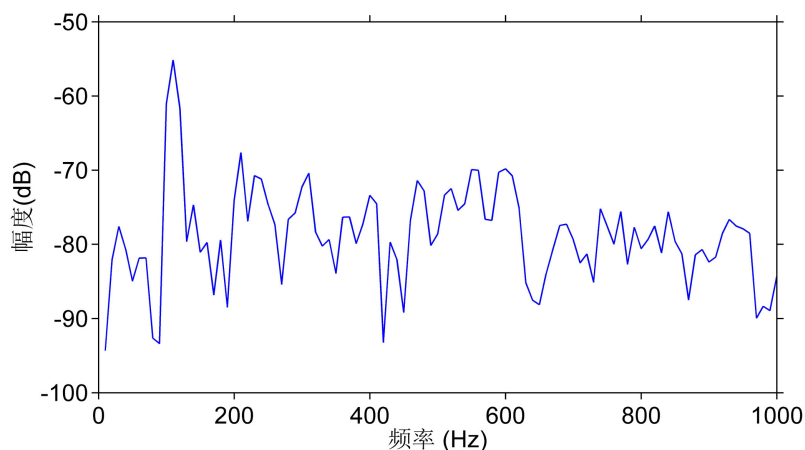


Figure 6. Frequency information of vibration events at PZT  
图 6. PZT 处振动事件的频率信息

时间为 10.61 s。在实际应用中，利用 FPGA 和 DSP 实现对  $\varphi$ -OTDR 系统实时检测具有很大的潜力。

#### 4. 结论

本文介绍了一种新的振动定位方式，提出了一种基于巴特沃斯滤波算法在  $\varphi$ -OTDR 系统中实现去噪功能，从而达到寻找振动位置的目的。本文从信噪比，空间分辨率，处理时间等方面进行分析，实验结果表明，在长度为 3.5 km 的传感光纤上，系统去噪后的信噪比可以达到 20.5 dB，空间分辨率为 5 m，处理时间可以达到 10.61 s。因此，对于实际应用中，该方法可以在  $\varphi$ -OTDR 系统中发挥较大的潜力，实现对外界振动信号进行定位。目前的工作主要是基于 Matlab 软件对信号进行处理，处理时间相对较长，所以我们进一步计划通过 FPGA 和 DSP 实现巴特沃斯滤波算法在  $\varphi$ -OTDR 系统中进行实时检测。

#### 参考文献

- [1] Russell, S.J., Brady, K.R.C. and Dakin, J.P. (2001) Real-Time Location of Multiple Time-Varying Strain Disturbances, Acting over a 40 km Fiber Section, Using a Novel Dual-Sagnac Interferometer. *Journal of Lightwave Technology*, **19**, 205-213. <https://doi.org/10.1109/50.917882>
- [2] Sun, Q., Liu, D., Wang, J. and Liu, H. (2008) Distributed Fiber-Optic Vibration Sensor Using a Ring Mach-Zehnder



- Interferometer. *Optics Communications*, **281**, 1538-1544. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.11.055>
- [3] Liu, X., Wang, Y., Zhang, J., Wang, D., Wang, P., Bai, Q. and Jin, B. (2018) Real-Time Distributed Optical Fiber Vibration Sensing Based on Phase-Sensitive OTDR. *International Symposium on Optoelectronic Technology and Application*, Beijing, 22-24 May 2018, 108491J. <https://doi.org/10.1117/12.2505720>
- [4] 彭正谱. 高性能长距离相敏光时域反射系统研究及安防应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [5] Gangopadhyay, T.K. and Henderson, P.J. (1999) Vibration: History and Measurement with an Extrinsic Fabry-Perot Sensor with Solid-State Laser Interferometry. *Applied Optics*, **38**, 2471-2477. <https://doi.org/10.1364/AO.38.002471>
- [6] Tsuda, H. (2010) Fiber Bragg Grating Vibration-Sensing System, Insensitive to Bragg Wavelength and Employing Fiber Ring Laser. *Optics Letters*, **35**, 2349-2351. <https://doi.org/10.1364/OL.35.002349>
- [7] 夏俏兰. 分布式光纤传感器的长距离密集波分复用技术和应用研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [8] Masoudi, A. and Newson, T.P. (2017) High Spatial Resolution Distributed Optical Fiber Dynamic Strain Sensor with Enhanced Frequency and Strain Resolution. *Optics Letters*, **42**, 290-293. <https://doi.org/10.1364/OL.42.000290>
- [9] Peled, Y., Motil, A., Yaron, L. and Tur, M. (2011) Slope-Assisted Fast Distributed Sensing in Optical Fibers with Arbitrary Brillouin Profile Slope-Assisted Fast Distributed Sensing in Optical Fibers with Arbitrary Brillouin Profile. *Optics Express*, **19**, 19845-19854. <https://doi.org/10.1364/OE.19.019845>
- [10] Dong, Y., Ba, D., Jiang, T., Zhou, D., Zhang, H., Zhu, C., Lu, Z., Li, H., Chen, L. and Bao, X. (2013) High-Spatial-Resolution Fast BOTDA for Dynamic Strain Measurement Based on Differential Double-Pulse and Second-Order Sideband of Modulation. *IEEE Photonics Journal*, **5**, Article ID: 2600407. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2267532>
- [11] Noguchi, K., Murakami, Y., Kimura, Y. and Ishihara, K. (1982) Ultralong Multimode Optical Fibre Fault Location Using Raman Optical Time Domain Reflectometry. *Electronics Letters*, **18**, 542-543. <https://doi.org/10.1049/el:19820367>
- [12] Martins, H.F., Martin-Lopez, S., Corredera, P., Filograno, M.L., Frazao, O. and Gonzalez-Herráez, M. (2014) Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer Assisted by First-Order Raman Amplification for Distributed Vibration Sensing over > 100 km. *Journal of Lightwave Technology*, **32**, 1509-1518. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2308354>
- [13] Wang, C., Shang, Y., Liu, X. and Peng, G. (2015) Distributed Acoustic Mapping Based on Interferometry of Phase Optical Time-Domain Reflectometry. *Optics Communications*, **346**, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.02.044>
- [14] Ren, M., Lu, P., Chen, L. and Bao, X. (2016) Theoretical and Experimental Analysis of  $\Phi$ -OTDR Based on Polarization Diversity Detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, **28**, 697-700. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2504968>
- [15] Peng, F., Wu, H., Jia, X., Rao, Y., Wang, Z. and Peng, Z. (2014) Ultra-Long High-Sensitivity  $\Phi$ -OTDR for High Spatial Resolution Intrusion Detection of Pipelines. *Optics Express*, **22**, 13804-13810. <https://doi.org/10.1364/OE.22.013804>
- [16] Juarez, J.C., Maier, E.W., Choi, K.N. and Taylor, H.F. (2005) Distributed Fiber-Optic Intrusion Sensor System. *Journal of Lightwave Technology*, **23**, 2081-2087. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.849924>
- [17] Zhu, T., He, Q., Xiao, X. and Bao, X. (2013) Modulated Pulses Based Distributed Vibration Sensing with High Frequency Response and Spatial Resolution. *Optics Express*, **21**, 2953-2963. <https://doi.org/10.1364/OE.21.002953>
- [18] Lu, B., Pan, Z., Wang, Z., Zheng, H., Ye, Q., Qu, R. and Cai, H. (2017) High Spatial Resolution Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer with a Frequency-Swept Pulse. *Optics Letters*, **42**, 391-394. <https://doi.org/10.1364/OL.42.000391>
- [19] Lu, Y., Zhu, T., Chen, L. and Bao, X. (2010) Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, **28**, 3243-3249.
- [20] Qin, Z., Chen, L. and Bao, X. (2012) Wavelet Denoising Method for Improving Detection Performance of Distributed Vibration Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 542-544. <https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2182643>
- [21] Zhu, X., Xiao, X., He, Q. and Diao, D. (2013) Enhancement of SNR and Spatial Resolution in  $\phi$ -OTDR System by Using Two-Dimensional Edge Detection Method. *Journal of Lightwave Technology*, **31**, 2851-2856. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2273553>
- [22] Soto, M.A., Ramirez, J.A. and Thevenaz, L. (2016) Intensifying the Response of Distributed Optical Fibre Sensors Using 2D and 3D Image Restoration. *Nature Communications*, **7**, Article No. 10870. <https://doi.org/10.1038/ncomms10870>
- [23] He, H., Shao, L., Pan, W., Luo, B., Zou, X. and Yan, L. (2017) SNR Enhancement in Phase-Sensitive OTDR with Adaptive 2D Bilateral Filtering Algorithm, *IEEE Photonics Journal*, **9**, Article ID: 6802610.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；  
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0530，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ojav@hanspub.org](mailto:ojav@hanspub.org)