

基于差分SG-NLM算法的 Φ -OTDR扰动定位方法研究

沈伟 沈威 胡欣 万小进 俞浩 许颖文 胡程勇 邓传鲁 黄恠

Research on Φ -OTDR disturbance localization method based on differential SG-NLM algorithm

SHEN Wei, SHEN Wei, HU Xin, WAN Xiaojin, YU Hao, XU Yingwen, HU Chengyong, DENG Chuanlu, HUANG Yi

引用本文:

沈伟, 沈威, 胡欣, 等. 基于差分SG-NLM算法的 Φ -OTDR扰动定位方法研究[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 319–326. DOI: 10.5768/JAO202546.0202004

SHEN Wei, SHEN Wei, HU Xin, et al. Research on Φ -OTDR disturbance localization method based on differential SG-NLM algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 319–326. DOI: 10.5768/JAO202546.0202004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0202004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于扰动源分类控制的二维陀螺平台过顶稳定方法

Passing zenith stabilization method of two-dimensional gyro platform based on disturbance sources classification control

应用光学. 2021, 42(6): 989–996 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601007>

基于局部RANSAC的结构光标定方法

Structured light calibration method based on local RANSAC

应用光学. 2024, 45(6): 1252–1260 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603006>

基于局部图像分割与多特征滤波的自适应桥梁露筋检测算法

Self-adaptive bridge bare rebar detection algorithm based on local image segmentation and multi-feature filtering

应用光学. 2020, 41(3): 508–515 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0302004>

基于差分海洋捕食者优化算法的FBG重叠谱解调方法

FBG overlapping spectrum demodulation method based on differential marine predator optimization algorithm

应用光学. 2023, 44(6): 1317–1323 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0602001>

基于非局部广义全变分的计算鬼成像重建方法

Reconstruction method of computational ghost imaging based on non-local generalized total variation

应用光学. 2022, 43(1): 52–59 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0102001>

基于光纤相干背向瑞利散射的列车实时定位技术

Real-time positioning technology of train based on optical fiber coherent Rayleigh backscattering

应用光学. 2022, 43(5): 994–1000 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0319-08

引用格式: 沈伟, 沈威, 胡欣, 等. 基于差分 SG-NLM 算法的 Φ -OTDR 扰动定位方法研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(2): 319-326.

SHEN Wei, SHEN Wei, HU Xin, et al. Research on Φ -OTDR disturbance localization method based on differential SG-NLM algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 319-326.



在线阅读

基于差分 SG-NLM 算法的 Φ -OTDR 扰动定位方法研究

沈 伟¹, 沈 威², 胡 欣¹, 万小进¹, 俞 浩¹, 许颖文¹, 胡程勇², 邓传鲁², 黄 恽²

(1. 国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司, 江苏 泰州 225300; 2. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘 要: 针对相位敏感光时域反射计 (phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR) 信号中存在的随机噪声, 提出了一种基于差分 SG-NLM (Savitzky-Golay-non-local mean) 算法的扰动定位方法, 以降低非扰动区域的噪声。差分 Savitzky-Golay (SG) 平滑滤波用于实现外部扰动的初步定位。非局部均值 (non-local mean, NLM) 算法适用于处理二维信号中的随机噪声, 可进一步降低 Φ -OTDR 幅度信号的噪声。实验结果表明, 所提出的方法能够最大限度地滤除随机噪声, 达到更好的定位效果。与传统的非局部均值算法和幅度方差定位法相比, 信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 提高了 15.14 dB, 空间分辨率提升了 4.05 m。

关键词: 相位敏感光时域反射计; Savitzky-Golay 平滑滤波; 非局部均值; 扰动定位

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0202004

Research on Φ -OTDR disturbance localization method based on differential SG-NLM algorithm

SHEN Wei¹, SHEN Wei², HU Xin¹, WAN Xiaojin¹, YU Hao¹, XU Yingwen¹, HU Chengyong², DENG Chuanlu², HUANG Yi²

(1. Taizhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou 225300, China; 2. Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: For random noise presenting in phase-sensitive optical time domain reflectometer (Φ -OTDR) signals, a disturbance localization method based on differential Savitzky-Golay non-local means (SG-NLM) algorithm was proposed to reduce the noise in non-disturbed areas. The differential Savitzky-Golay (SG) smoothing filtering was used to achieve the preliminary localization of external disturbances. The Φ -OTDR amplitude signal noise could be further reduced by using the non-local means (NLM) algorithm, which was suitable for dealing with random noise included in two-dimensional signals. The experimental results show that the proposed method can maximally filter out random noise and achieve better localization effect. Compared with the traditional NLM algorithm and the amplitude variance localization method, the signal-to-noise ratio (SNR) is increased by 15.14 dB, and the spatial resolution is improved by 4.05 m.

收稿日期: 2023-12-04; 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目 (J2022101)

作者简介: 沈伟 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化、电力系统通信研究。

E-mail: shenwei5630@vip.sina.com

通信作者: 黄恽 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事特种光纤、光纤传感、光电检测研究。E-mail: huangyi1008@shu.edu.cn

Key words: phase-sensitive optical time domain reflectometer; Savitzky-Golay smoothing filtering; non-local means; disturbance localization

引言

作为一种分布式光纤传感技术,相位敏感光时域反射(phase-sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR)系统通过测量沿光纤分布的局部相位变化来获取干扰事件的位置和强度信息^[1-3],其非常适合用于检测动态干扰事件,可实现对外部断裂、振动等故障的及时预警^[4-6]。与传统的 OTDR 技术相比, Φ -OTDR 技术具有响应速度快、灵敏度高、抗电磁干扰能力强等优点,在扰动定位领域具有重要的应用价值^[7-9]。然而,在实际应用中,环境噪声和系统噪声干扰会不断累积,导致系统采集到的信号信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)不断降低,从而影响最终的扰动定位效果^[10-12]。因此,近年来,为了提高 Φ -OTDR 系统的定位性能,各种定位处理算法被不断提出。

文献[13]提出了一种基于自适应匹配滤波的 Φ -OTDR 系统噪声抑制方法,根据外部扰动来选择滤波器的最优权重,在此基础上构造出滤波器,对信号进行滤波,使定位信噪比提高 10 dB 以上。文献[14]提出了一种基于快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)的 Φ -OTDR 相位信号恢复方法,在空间方向上对原始信号进行 FFT 变换从而提取相位信息,在此基础上进行差分,以此降低相位噪声,差分后的相位信号可以用于振动信号的定位,大大提升了信噪比,改善了定位性能。文献[15]提出一种改进的小波去噪定位方法,利用对数函数的非线性来改进小波重构的阈值,同时引入噪声方差,在不改变反射事件波形属性的情况下滤除噪声,其最终测试曲线的相对信噪比提升了 10 dB 以上。文献[16]提出了一种由粗到细的 Φ -OTDR 系统事件定位方法,通过将背向散射的迹线分成若干段,以实现粗略定位,基于差分补偿算法进行相位解调和还原,在包含外部振动的目标段内实现精细定位,使得定位信噪比得到提高。然而,以上针对 Φ -OTDR 系统中的一维信号所提出的方法只能单独从时间维度或空间维度来对扰动定位进行改善。为了进一步提高定位信噪比,同时实现多维度的定位降噪优化处理是近年来该领域的重点研究方向之一。

随着图像处理技术的发展,一些图像去噪方法已被应用于分布式光纤传感的信号去噪领域^[17-18]。

二维图像处理方法可以充分利用数据的相关性,实现时间与空间多维度的噪声抑制。与传统的一维信号去噪方法相比,二维图像处理方法对信噪比的改善效果更为显著。作为一种图像降噪算法,非局部均值(non-local mean, NLM)算法利用整个图像的冗余信息来降低噪声,同时保留信号的边缘和细节特征。Savitzky-Golay(SG)平滑滤波器是一种数字滤波方法,可用于平滑数据,并能在不改变信号趋势或宽度的情况下提高数据的准确性。

本文提出了一种基于差分 SG-NLM 算法的扰动定位方法,适用于相干探测型 Φ -OTDR 分布式传感系统的扰动定位。利用差分 SG 平滑滤波实现外部扰动的初步定位。在此基础上,利用 NLM 方法进一步从时空域上降低幅度信号噪声,从而显著提高定位效果。最终的信噪比提高了 15.14 dB,空间分辨率提升了 4.05 m。

1 算法原理

基于差分 SG 平滑滤波和 NLM 算法的扰动定位方法流程图如图 1 所示。对光纤中返回的原始背向瑞利散射信号(backward Rayleigh scattering, RBS)进行 I/Q 解调,可获得幅度信号的初始矩阵。将不同光脉冲得到的幅度信号曲线进行相互差分得到差分幅度信号矩阵。利用 SG(Savitzky-Golay)平滑滤波处理差分幅度信号矩阵,可以滤除部分噪声,初步确定扰动位置。在此基础上,使用 NLM 算法对初步处理过的二维信号矩阵进行进一步的降噪,同时保留信号的边缘和细节特征。最终,可以获得清晰的一维信号定位图。

1.1 差分 Savitzky-Golay 平滑滤波

Φ -OTDR 系统在实际应用过程中会受到多种噪声的影响,其中包括加性噪声。加性噪声的存在会影响系统的信噪比和灵敏度,降低系统的性能,进而导致系统无法获得准确的定位信息^[19]。为了提高幅度信号的定位精度,首先需要有效地降低加性噪声对系统的影响。SG 滤波是一种基于时间序列平滑和最小二乘法的卷积算法^[20]。对于一维时间信号,该算法通过在时域内移动窗口并利用最小二乘法以达到最佳拟合的效果。差分 SG 平滑滤波算法用于预处理幅度信号,可以更有效

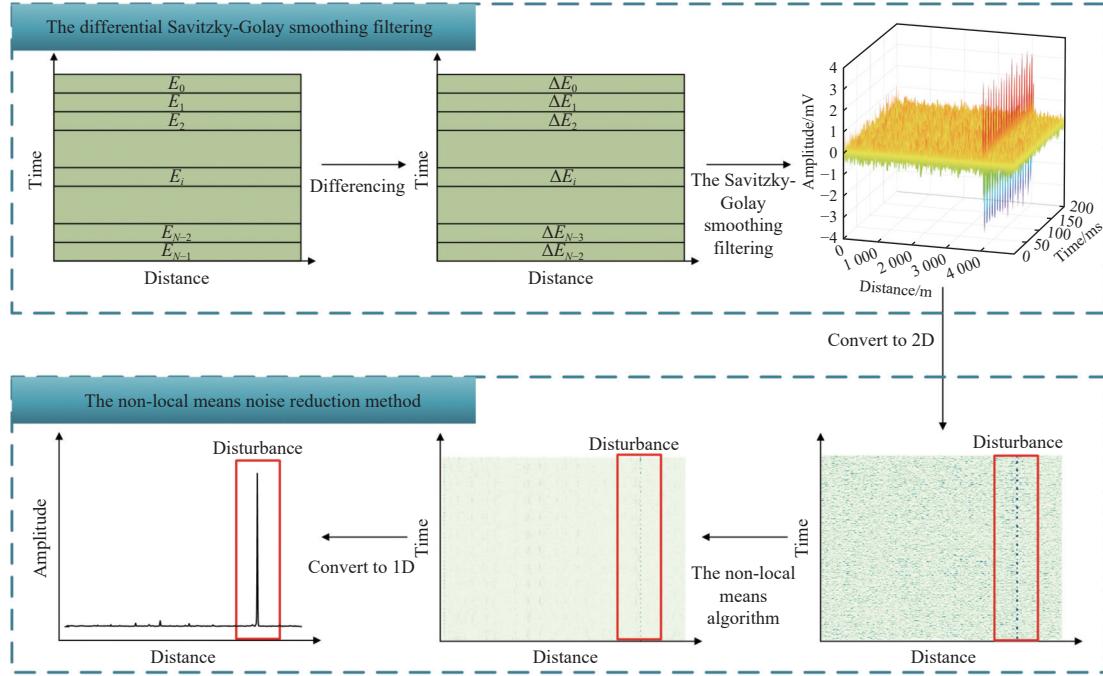


图 1 定位方法流程图

Fig. 1 Diagram of localization method flow

地实现对扰动的初步定位。首先,差分算法可以在一定程度上降低噪声的影响,有效提高信号的可见性,并且可以消除时间偏移,提高时间序列信号的可比性。其次,SG滤波器可以在保持信号趋势的同时提高数据精度,因此差分SG平滑滤波算法可以最大限度地滤除噪声,保留良好的信号特征。

原始幅度信号矩阵 E 可表示为

$$E = \{E_0, E_1, \dots, E_i, \dots, E_{N-1}\} \quad (1)$$

式中: N 表示发射的光脉冲数。经过差分SG平滑滤波后,幅度信号 E_{sg} 可表示为

$$E_{sg} = \{\Delta E_{0,sg}, \Delta E_{1,sg}, \dots, \Delta E_{i,sg}, \dots, \Delta E_{N-2,sg}\} \quad (2)$$

$$\Delta E_{i,sg} = \Delta E_{i-1}^* = \frac{\sum_{j=-m}^m C_j \times \Delta E_{i+j}}{K} \quad (3)$$

$$\Delta E_i = E_{i+1} - E_i, i = 0, 1, \dots, N-2 \quad (4)$$

式中: ΔE_{i-1}^* 为拟合值; ΔE_{i+j} 为原始幅度信号值经过差分后的结果; C_j 为第 j 个值滤波时的系数; m 为半个滤波窗口的宽度; K 为滤波器长度,且 $K = 2m + 1$ 。

1.2 非局部均值算法

非局部均值(NLM)算法通过选择要处理的像素点来进行降噪过滤。在进行降噪滤波时,通过设置搜索窗口,对窗口内具有相似特征的像素点进行加权和平均处理,以尽量减少图像本身的损失^[21]。因此,NLM算法在二维图像去噪中得到了

广泛应用。由于 Φ -OTDR 系统获取的二维信号具有相似的特性,因此 NLM 算法也可用于 Φ -OTDR 扰动信号,以达到降低定位波形噪声的效果。算法处理后的幅度信号值 $E(i)$ 可表示为

$$E(i) = \frac{1}{N(i)} \sum_{j \in D} \omega(i, j) x(j) \quad (5)$$

式中: $\omega(i, j)$ 为权重,表示以 i 和 j 为中心的两个搜索窗口之间的相似度; D 代表搜索窗口; $x(i)$ 是搜索窗口中的像素强度; $N(i)$ 是一个归一化参数,表示所有搜索窗口的相似度总和,可表示为

$$N(i) = \sum_{j \in D} \omega(i, j) \quad (6)$$

在搜索像素点的过程中,如果两个样本之间的相似度越高,则权重 $\omega(i, j)$ 就越高,反之亦然。权重 $\omega(i, j)$ 可以表示为

$$\omega(i, j) = \exp\left\{\frac{-\|I(D(i)) - I(D(j))\|_{2,G_k}^2}{h^2}\right\} \quad (7)$$

式中: $I(D(i))$ 和 $I(D(j))$ 分别表示搜索窗口 D 中以 i 点和 j 点为中心的像素块的强度; h 表示平滑参数,用于控制指数函数的衰减程度和去噪强度; G_k 是高斯核函数。

2 实验系统

实验中建立了一个相干探测型 Φ -OTDR 系

统,系统结构如图2所示。中心波长为1550 nm的窄线宽激光器(narrow linewidth laser, NLL)发出的连续光经过光纤耦合器(optical coupler, OC1)后被分成90%的探测光 and 10%的本振光。频移为200 MHz的声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)将连续的探测光调制成脉冲光,经掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)进行功率放大后输入到环形器(circulator, Cir)的1端口,并通过2端口输入到待测光纤(fiber under test, FUT)中,其中脉冲光的重复频率为1 kHz,脉宽为100 ns。在传输过程中产生的RBS光返回至环形器,通过环形器的端口3输出,在50:50的光

纤耦合器(OC2)处与本振光发生干涉,产生拍频信号。最后,拍频信号通过平衡光电探测器(balanced photodetector, BPD)进行光电转换。转换后的电信号由采样速率为250 MS/s的数据采集卡(data acquisition card, DAQ)采集,并发送到个人电脑(personal computer, PC)进行数据处理和分析。其中,现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)用于生成两路同频率的脉冲信号,一路用于输入射频驱动器(radio-frequency driver, RF Driver)以驱动AOM将连续光调制成脉冲光,另一路则作为DAQ的同步触发信号用于数据采集。

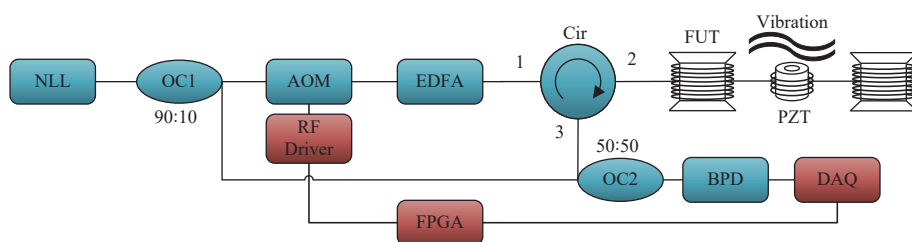


图2 Φ -OTDR 系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of Φ -OTDR system

3 实验结果与分析

在本实验中,将相干探测型 Φ -OTDR系统连接5 km单模光纤以进行扰动定位测试。将压电陶瓷管(piezoelectric ceramic tube, PZT)缠绕在约4 km处的光纤上。在PZT上施加幅度为10 V、频率为50 Hz的正弦波,以模拟扰动源。

系统所获得的RBS信号实质上是由采集卡所采集到的电压信号,经正交解调后得到幅度信号(单位为mV)。幅度信号矩阵经差分SG平滑滤波后初步得到有效的扰动定位信息。SG滤波算法中有两个关键参数会影响最终的平滑和去噪效果,包括窗口长度 w 和拟合阶数 n 。窗口长度越长,算法所计算的点数越多,输出结果越平滑,但可能会丢失细节。参数 n 决定拟合所用多项式的阶数,更高的多项式阶数可以捕捉到更复杂的趋势,但也可能带来随机的振荡。因此,确定SG平滑滤波的最佳参数极为重要。在实际使用时,拟合阶数必须小于窗口长度。选择较小的拟合阶数通常是为了确保滤波后的信号不失真。一般来说,拟合阶数在2到4之间^[22]。为了定量比较不同窗口长度和拟合阶数的平滑降噪效果,这里定义信号信噪比 R_{SN} 作为衡量指标^[23], R_{SN} 可定义为

$$R_{SN} = 20 \log \frac{A_{\text{signal}}}{\bar{A}_{\text{noise}}} \quad (8)$$

式中: A_{signal} 是定位信号峰值的大小; $\bar{A}_{\text{noise}}$ 是噪声的均方根。

不同SG参数对信号滤波的影响如图3所示。当参数 n 分别固定为2、3和4时,信噪比的变化均呈现先增大后减小的趋势。综合两个参数来看,当窗口长度 w 为139、拟合阶数 n 为3时,信噪比达到最大值。因而将窗口长度139、拟合阶数3确定为SG平滑滤波的最佳参数。

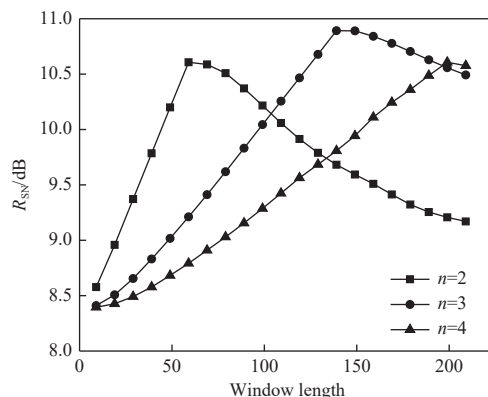


图3 不同SG参数对于信号滤波的影响

Fig. 3 Impact of different SG parameters on signal filtering

图 4 显示了差分 SG 平滑滤波前后时空域幅度信号的对比。处理前的图 4(a) 中呈现的有效信息相对较少, 而差分运算可以突出时间上的变化, 然后通过 SG 平滑滤波滤除噪声干扰, 保留信号的波动特性。因此, 在处理后的图 4(b) 中, 4 km 处的扰动清晰可见。

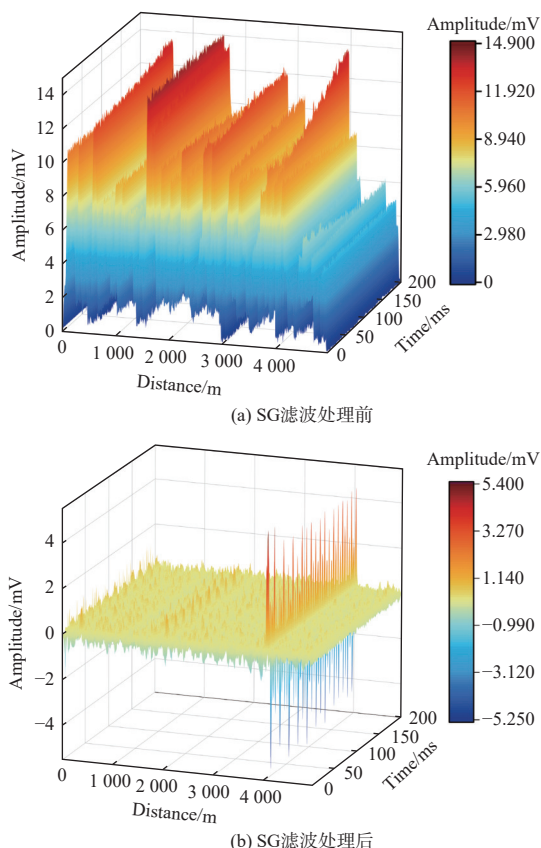


图 4 SG 平滑滤波处理前后的时空域幅度信号

Fig. 4 Amplitude signals in space-time domain before and after processing by SG smoothing filtering

在初步确定扰动点位置后, 使用 NLM 算法对差分 SG 滤波后的幅度信号进行加权平均处理, 以减少非扰动区域的噪声影响。经 NLM 算法处理前后的二维幅度信号图如图 5 所示。从图 5(a) 中可以看出, 虽然从预处理后的二维幅度信号中可以看出 4 km 处存在扰动, 但在其非扰动区域仍存在大量干扰噪声, 可能会造成扰动定位的误判。如图 5(b) 所示, 在使用 NLM 算法对幅度信号进行加权平均处理后, 4 km 处的扰动相对更清晰, 而非扰动区域的噪声被大量抑制, 图像相对更加平滑。

在扰动点附近, 不同发射脉冲对应的 RBS 幅度曲线如图 6 所示, 不同幅度曲线对应了不同脉冲光所获得的散射光幅度信息。由于在非扰动区域, 没有散射光相位变化, 因此由不同脉冲光所获

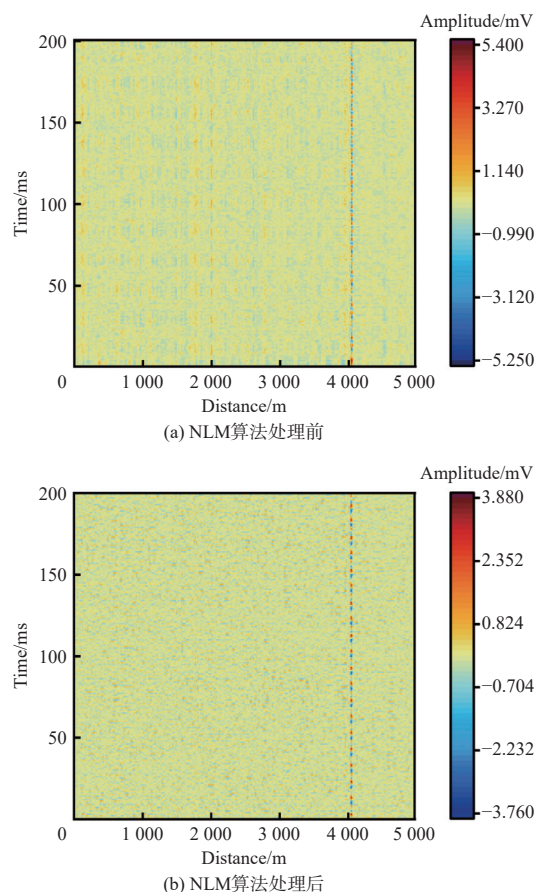
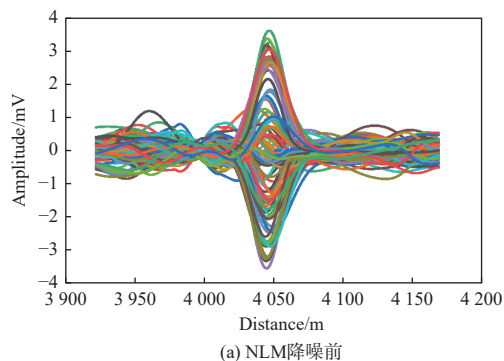


图 5 NLM 算法处理前后的二维幅度信号图

Fig. 5 2D amplitude signal diagrams before and after processing by NLM algorithm

得的散射光幅度在时间上分布几乎一致, 趋于集中; 而在扰动点附近, 由于散射光子相位被扰动调制, 光信号幅度随时间变化, 趋于分散。相比于图 6(a), 在非扰动区间, 图 6(b) 的各条曲线相对处于重合状态, 而在扰动区间, 图 6(b) 的各条曲线的幅值差较大。这说明幅度信号中的噪声得到了有效的抑制。比较去噪前后的曲线, 可以得出定位的空间分辨率也得到了提高。这些结论证明, 基于 NLM 算法的图像去噪方法确实能有效降低噪声, 优化 RBS 幅度信号。



(a) NLM 降噪前

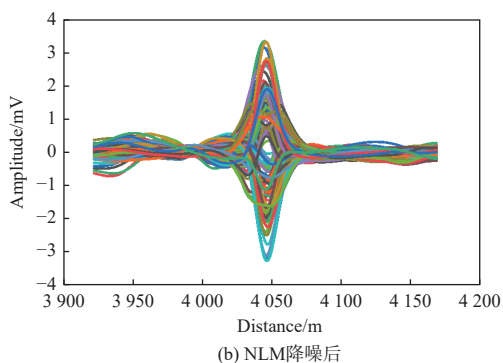


图6 经NLM降噪前后的多条RBS幅度曲线对比

Fig. 6 Comparison of multiple RBS amplitude curves before and after NLM denoising

去噪前后的一维定位效果如图7所示。相比于图7(a),经过传统NLM算法处理后的图7(b),非扰动区域的噪声得到了部分抑制。但可以看

出,经过SG-NLM算法处理后的定位效果更好,如图7(c)所示,不仅在4 km处的扰动定位峰更加明显,而且非扰动区域的大部分噪声得到抑制。此处定义边缘宽度为从峰值的10%上升到90%的空间距离,而空间分辨率则为上升边缘宽度和下降边缘宽度的平均值。由图7可知,3种方法得到的定位空间分辨率分别为15.32 m、14.26 m和11.27 m。由于加入了差分SG滤波的处理,初步抑制了一些噪声,因此相比于单独使用NLM算法,SG-NLM算法处理后定位峰的空间分辨率也得到了改善。

3种方法的定位信噪比和空间分辨率如表1所示。与原始方法相比,差分SG-NLM算法得到的定位信噪比和空间分辨率都得到了改善,信噪比提高了15.14 dB,空间分辨率提升了4.05 m。

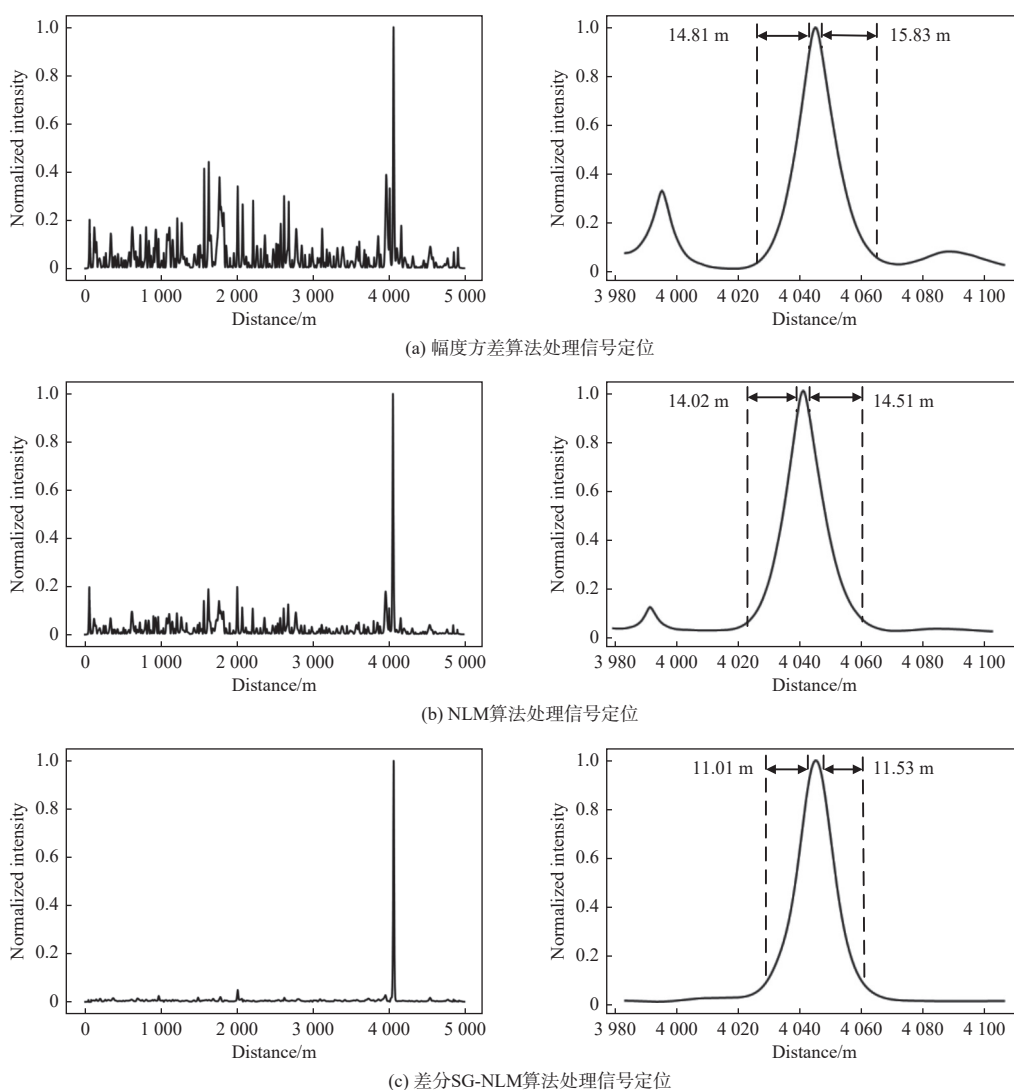


图7 不同方法处理的一维信号定位结果对比

Fig. 7 Comparison of localization results of 1D signals processed by different methods

表 1 算法性能对比

Table 1 Comparison of algorithm performances

Method	SNR /dB	Spatial resolution /m
Raw signals	8.42	15.32
NLM	18.79	14.26
SG-NLM	23.56	11.27

4 结论

本文提出了一种基于差分 SG-NLM 算法的扰动定位方法, 适用于相干探测型 Φ -OTDR 分布式传感系统的扰动定位。在使用差分 SG 平滑滤波对外部扰动进行初步定位的基础上, 利用 NLM 方法进一步减小二维幅度信号的噪声。实验表明, 本文提出的方法可以获得更好的定位效果, 与另外两种定位降噪方法相比, 信噪比提高了 15.14 dB, 空间分辨率提升了 4.05 m。因此, 本文提出的方法可以有效提高定位信噪比和空间分辨率, 在 Φ -OTDR 系统对于外部扰动的定位中具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] MA F, SONG N F, WANG X X, et al. Study on the generation and influence factors of the new wavelength components in backscattering light of Φ -OTDR[J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126106.
- [2] 单媛媛. 基于 Φ -OTDR 的分布式光纤振动传感系统关键技术研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
SHAN Yuanyuan. Research of distributed optical fiber vibration sensing system based on Φ -OTDR[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [3] 赵丽娟, 张旭哲, 徐志钮, 等. 分布式声波传感系统中 IQ 解调方法的影响因素[J]. *光学学报*, 2023, 43(14): 284-289.
ZHAO Lijuan, ZHANG Xuzhe, XU Zhiniu, et al. Influencing factors of IQ demodulation method in distributed acoustic sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(14): 284-289.
- [4] 杨震, 封皓. 基于深度学习的 Φ -OTDR 输油管道入侵监测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(8): 51-59.
YANG Zhen, FENG Hao. Oil pipeline intrusion monitoring based on deep learning of Φ -OTDR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 51-59.
- [5] 邱玉东, 秦祖军, 熊显名, 等. 车辆振动检测 Φ -OTDR 系统研究与信号处理[J]. *光通信技术*, 2018, 42(4): 33-36.
QIU Yudong, QIN Zujun, XIONG Xianming, et al. Vehicle vibration detection Φ -OTDR system design and signal processing[J]. *Optical Communication Technology*, 2018, 42(4): 33-36.
- [6] 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(1): 5778.
- [7] 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): 100-114.
ZHANG Xuping, DING Zhewen, HONG Rui, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 100-114.
- [8] 杨纯, 李垠韬, 宋伟, 等. Φ -OTDR 光纤传感电缆防外破监测数据预处理方法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(4): 486-492.
YANG Chun, LI Yintao, SONG Wei, et al. Preprocessing method of monitoring data for cable breaking prevention based on Φ -OTDR optical fiber sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(4): 486-492.
- [9] 张智望, 王强, 谷小红, 等. 基于分布式光纤的埋地自来水管多点泄漏定位方法分析[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 228-234.
ZHANG Zhiwang, WANG Qiang, GU Xiaohong, et al. Analysis on underground water pipes multi-point leakage location method based on distributed optical fiber[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 228-234.
- [10] 董小卫, 谢斌, 潘勇, 等. 分布式光纤声波振动传感系统研发及应用[J]. *应用光学*, 2020, 41(6): 1298-1304.
DONG Xiaowei, XIE Bin, PAN Yong, et al. Development and application of distributed optical fiber acoustic vibration sensor system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1298-1304.
- [11] 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): 66-80.
MA Haoyu, WANG Xiaoxiao, MA Fu, et al. Research progress of Φ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 66-80.
- [12] XU C J, GUAN J J, BAO M, et al. Pattern recognition based on time-frequency analysis and convolutional neural networks for vibrational events in Φ -OTDR[J]. *Optic-*

- al Engineering, 2018, 57(1): 016103.
- [13] ÖLÇER İ, ÖNCÜ A. Adaptive temporal matched filtering for noise suppression in fiber optic distributed acoustic sensing[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1288.
- [14] 司召鹏, 毛邦宁, 卜泽华, 等. 基于快速傅里叶变换的分布式振动传感信号解调分析[J]. *中国激光*, 2023, 50(5): 0506001.
- SI Zhaopeng, MAO Bangning, BU Zehua, et al. Demodulation analysis of distributed vibration sensor signal based on FFT[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(5): 0506001.
- [15] 齐晓辉, 宋宛鸿, 李文召. 一种改进的小波去噪方法在 OTDR 中的应用[J]. *光通信技术*, 2021, 45(4): 54-58.
- QI Xiaohui, SONG Wanhong, LI Wenzhao. Application of an improved wavelet denoising method in OTDR[J]. *Optical Communication Technology*, 2021, 45(4): 54-58.
- [16] 孟金昌. 基于相位漂移补偿的 Φ -OTDR 系统事件快速定位方法[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2022.
- MENG Jinchang. Fast location method of Φ -OTDR system event based on phase shift compensation[D]. Wuhan: Wuhan FiberHome Technologies Group, 2022.
- [17] SOTO M A, RAMÍREZ, JAIME A, et al. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10870.
- [18] DEXIN B, AYANA L A, YING W, et al. Image-matching assisted dual-frequency phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(34): 10632-10637.
- [19] 张旭苹, 张益昕, 王峰, 等. 相位敏感型光时域反射传感系统光学背景噪声的产生机理及其抑制方法[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 87-100.
- ZHANG Xuping, ZHANG Yixin, WANG Feng, et al. The mechanism and suppression methods of optical background noise in phase-sensitive optical time domain reflectometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 87-100.
- [20] 顾筠. 基于子区投影和 Savitzky-Golay 滤波的三维数字图像相关法应变场计算方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 393-402.
- GU Jun. Strain field calculation by 3D digital image correlation method based on subset projection and Savitzky-Golay filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 393-402.
- [21] 龙超, 金恒, 黎玲, 等. 基于特征融合的非局部均值 CT 图像降噪[J]. *光学学报*, 2022, 42(11): 281-291.
- LONG Chao, JIN Heng, LI Ling, et al. CT image denoising with non-local means based on feature fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(11): 281-291.
- [22] 志芳, 战福瑞. 一种基于 Savitzky-Golay 滤波的物理层密钥生成方法[J]. *电讯技术*, 2023(6): 972-978.
- ZHI Fang, ZHAN Furui. A physical layer key generation method based on Savitzky-Golay filter[J]. *Telecommunication Engineering*, 2023(6): 972-978.
- [23] 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.