

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209932

基于移动方差平均算法的相位敏感光时域 反射计去噪算法研究*

管彦周¹, 万生鹏^{1,2}, 程亚楠¹, 万东辉¹, 喻俊松¹

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 南昌航空大学江西省光电信息科学与技术重点实验 南昌 330063)

摘 要:在相位敏感光时域反射计(φ -OTDR)系统中,扰动信号一般淹没在噪声中,导致扰动定位困难。为了提高扰动信号的信噪比,本文结合方差算法自身具有突出数据离散程度的特点,提出了一种移动方差平均算法。相比于累加平均、移动平均法、分离平均法、小波去噪、移动平均法+移动微分等传统算法,仿真和实验结果显示,移动方差平均算法具有更好的去噪效果,具有更高的信噪比(SNR)。因此,该算法可以用较少的累加采集次数实现扰动信号的定位,从而可以进一步提高 φ -OTDR系统的响应频率,提升系统的实时性。

关键词:相位敏感光时域反射计;移动方差平均算法;定位;信噪比

中图分类号: TN247 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the denoising algorithm of phase sensitive optical time domain reflectometry based on the moving variance average algorithm

Guan Yanzhou¹, Wan Shengpeng^{1,2}, Cheng Yanan¹, Wan Donghui¹, Yu Junsong¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing (Nanchang Hangkong University), Ministry of Education, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In the phase sensitive time domain reflectometer (φ -OTDR) system, the disturbance signal is usually hidden in the noise, which makes it difficult to locate the disturbance. To improve the signal-to-noise ratio (SNR) of disturbed signals, this article proposes a moving variance averaging algorithm, which combines the characteristics of variance algorithm with outstanding data discreteness. Compared with traditional algorithms, such as cumulative average, moving average, separation average, wavelet denoising algorithm, moving average and moving differential, simulation and experimental results show that the moving variance averaging algorithm has better denoising effect and higher SNR. Therefore, the moving variance averaging algorithm can use fewer cumulative acquisition times to locate the disturbance signal, which can further improve the response frequency of the φ -OTDR system and improve the real-time performance of the system.

Keywords: φ -OTDR; moving variance averaging algorithm; location; SNR

0 引 言

数字经济时代对感知技术的需求在不断增加。分布式光纤传感系统凭借自身既是传感媒介又是感知元件,以及无源、抗电磁干扰、分布式、在线等优势,成为传感器领域的研究热点之一。目前,分布式光纤传感系统已经

广泛应用于管道入侵和泄露^[1]、结构健康^[2]、轨道交通^[3]、周界安防^[4]等领域。在众多类型的分布式光纤传感技术中,相位敏感光时域反射计(phase sensitive time domain reflectometer, φ -OTDR)可以实现动态扰动信号的定位与再现,成为当前分布式光纤传感系统研究的主流方向之一^[5]。根据最近的调查显示, φ -OTDR市场在过去几年一直稳步增长,具有巨大的发展潜力^[6]。

收稿日期:2022-06-09 Received Date: 2022-06-09

* 基金项目:江西省自然科学基金重点项目(20202ACBL202002)、国家自然科学基金(62105139,61465009)项目资助

在分布式传感中,传感距离越长,信噪比越低,导致 φ -OTDR系统的实时性和扰动监测的可靠性严重降低。因此,在山体滑坡预警^[7]、铁路火车位置定位^[8]、输电线损坏检测^[9]等实时性要求较高的应用领域,需要研究高效的信号去噪算法,以在较少的累加次数下实现较高的信噪比,从而提高 φ -OTDR系统的可靠性和实时性。

目前, φ -OTDR系统中的传统去噪方法主要有累加平均法^[10]、分离平均法^[11]、移动平均法^[12]、移动平均法+移动微分算法^[13]。累加平均法是一种有效的信噪比改善算法,根据统计理论^[14],通过对原始信号进行多次平均可以提高系统的信噪比。但是,累加平均法需要大量的原始信号采集,这导致系统实时性变差。分离平均法的性能虽然有所提升,但是在分离平均法中,需要把原始信号分离成独立的曲线组分别平均,从而,在曲线组间经分离平均法处理后,增加了更多额外的尖峰,降低了信噪比,导致定位的误判概率增大,同时,分离平均法的可探测频率较低。移动平均法可以解决分离平均法去噪中的额外尖峰问题,并将理论上可探测的频率提高2倍^[13],相对于累加平均法和分离平均法,性能明显提升。虽然移动平均+移动微分算法处理得到的曲线条数和移动平均相比基本没变,但是相对于单一的移动平均去噪方法,移动平均+移动微分算法兼具移动平均法和移动微分算法的优点,进一步提高了信噪比。

随着 φ -OTDR技术的不断发展,不断有新的去噪算法提出。2012年,Qin等^[15]将小波去噪算法应用到分布式传感系统的信号处理中。小波去噪算法具备良好的随机噪声处理能力,可以很好地抑制随机噪声,从而提高系统的信噪比。然而,小波分析的结果依赖于小波基函数,使得与时间、频率相关的信息并不能以相同的精度进行分类,并且容易造成高频信息大量丢失。2013年,Zhu等^[16]将图像处理中的边缘检测技术用于提高 φ -OTDR系统的信噪比和空间分辨率。该文献通过Sobel算子进行卷积,获得背向瑞利散射曲线构成的二维图像的空间梯度,从而定位扰动位置,最终在1 km的光纤上实现了空间分辨率为3 m、信噪比为8.4 dB的定位,但是该算法在对边缘位置的扰动定位不够准确,也缺乏对信号的特点分析。2017年,Qin等^[17]提出了一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的去噪算法,该算法将噪声信号分解为若干固有模式函数(intrinsic mode functions, IMF)和一个残差分量之和,通过滤波来降低噪声,信噪比得到提升。但是EMD算法容易产生模式混叠,且直接保留皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient, PCC)较大的模态分量,也使得该分量的噪声被保留,影响系统信噪比。黎威等^[18]采用了小波包的降噪优化方法,通过对信号进行小波包分解降噪,解决了小波去噪法无法对高频信号分解的问题,进一步提升了信

噪比。2019年,张春熹等^[19]针对当前 φ -OTDR分布式光纤扰动传感系统去噪算法复杂的问题,采用谱减法去噪,将含有扰动信号的功率谱减去噪声的估计功率谱得到信号的功率谱,将信噪比提高了2.7 dB,实现了传感距离为53.6 km的扰动定位。这种方法虽然运算速度快,但是在非平稳环境下,有扰动和无扰动下的环境噪声变化较大,无扰动下的噪声估计功率谱不能很好反映有扰动时的背景噪声功率谱,导致无法获得较好信噪比的扰动信号。

基于上述目的,本文结合传统的累加平均、分离平均、移动平均、移动平均+移动微分等算法的优点,提出了一种信噪比更好的移动方差平均算法。

1 移动方差平均算法理论与性能仿真

实验中的噪声,如激光相位噪声、掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)自发辐射噪声(amplifier spontaneous emission noise, ASE)、随机热噪声、散粒噪声、拍频噪声等导致背向瑞利信号中的扰动信号被淹没,为了发现扰动信号,需要进行去噪以提高信号的信噪比。

1.1 移动方差平均算法理论

通过将采集到的原始信号构成一个矩阵,其中“行”代表一个周期的原始信号,“列”代表光纤某一位置不同时刻信号的变化,该矩阵包括了空间信息和时间信息。求出行向量的平均值曲线,然后将所有原始信号曲线与之相减,初步去除一个共有噪声信号,得到一个差值矩阵。再对差值矩阵采用移动平均的分组思想对信号进行分组求方差,从而得到移动方差矩阵。最后对移动方差矩阵求平均值得到移动方差平均曲线,移动方差平均值曲线中突变较大的尖峰对应传感光纤上的扰动位置。

具体公式计算推导如下:假设某次扰动定位中采集到 M 条原始信号曲线,将 M 条曲线构成如下二维矩阵 S :

$$S = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1L} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{M1} & r_{M2} & \cdots & r_{ML} \end{bmatrix} \quad (1)$$

首先,计算出 M 条瑞利散射曲线的平均值曲线 S_a :

$$S_a = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{R}_i = \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_{i,1} \quad \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_{i,2} \quad \cdots \quad \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_{i,L} \right] \quad (2)$$

然后,将 M 条瑞利散射曲线分别减去平均值曲线 S_a ,得到差值曲线 $\Delta \mathbf{R}_i$:

$$\Delta \mathbf{R}_i = \mathbf{R}_i - S_a = \mathbf{R}_i - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{R}_i \quad (3)$$

接着,对差值曲线构成的差值矩阵进行处理,依次从 M 条差值曲线中取 N 条用于计算方差,每次移动 n 条作为下一次分组起点。则最终可以获得 k 条方差曲线,如式(4)所示,其中 $k = [(M - N)/n + 1]$, $[\]$ 为取整函数。

$$\begin{cases} 1 \rightarrow N \\ n \rightarrow n + N \\ \vdots \\ kn \rightarrow kn + N \end{cases} \quad (4)$$

设每一条差值曲线 ΔR_i 有 L 个点,每个点用 $s_{i,j}$ 表示,将差值曲线 ΔR_i 记作:

$$\Delta R_i = \{s_{i,1}, s_{i,2}, \dots, s_{i,L}\}, i \in (1, M) \quad (5)$$

接着,每次步进 n 条曲线,依次从 M 条 ΔR_i 曲线中取 N 条计算方差,得到 k 条方差曲线 S_{num}^2 :

$$S_{\text{num}}^2 = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=n \cdot j - n + 1}^{n \cdot j - n + N} (s_{i,1} - s_{\text{ave},1})^2, \right. \\ \left. \frac{1}{N} \sum_{i=n \cdot j - n + 1}^{n \cdot j - n + N} (s_{i,2} - s_{\text{ave},2})^2, \dots, \right. \\ \left. \frac{1}{N} \sum_{i=n \cdot j - n + 1}^{n \cdot j - n + N} (s_{i,L} - s_{\text{ave},L})^2 \right\} \quad (6)$$

式中: $\text{num} \in (1, k)$, $j \in (1, k)$, $s_{\text{ave},x}$ 表示第 x 个点处的 N 条差值曲线的平均值, $x \in (1, L)$ 。最终,将 k 条方差曲线叠加平均,得到最终的移动方差平均值曲线 $\overline{S^2}$:

$$\overline{S^2} = \frac{1}{k} \sum_{\text{num}=1}^k S_{\text{num}}^2 \quad (7)$$

得到的移动方差平均值曲线中变化较大的尖峰,即是扰动信号。

$$d = \frac{\Delta t \cdot c}{2n} \quad (8)$$

式中: Δt 表示尖峰出现的时间,最后根据上式可获得扰动信号作用在光纤上的位置。

1.2 去噪算法仿真研究

首先建立图 1 所示的背向瑞利散射模型。在散射模型中, W 是脉冲光的脉宽所对应光纤长度,后向散射过程可以用一组反射镜来描述,这些反射镜可以被视为特定长度的光纤 ΔL 内随机分布的散射点构成。 ΔL 中每个散射点向后散射的背向瑞利散射具有独立的随机相位和振幅。

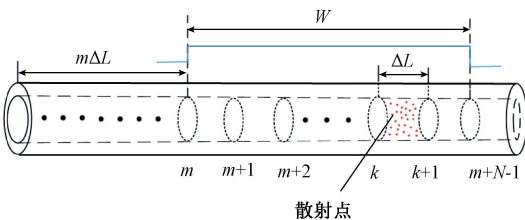


图 1 ϕ -OTDR 散射模型

Fig. 1 Scattering model of ϕ -OTDR

而该脉冲光 W 内的 N 个反射镜产生的背向瑞利散射光在光纤 $m\Delta L$ 处的干涉场可以表示为^[20]:

$$E_b(m\Delta L) = E_0 \sum_{k=m}^{m+N-1} P_k r_k \exp j(\theta_k + \phi_k) e^{-\alpha k \Delta L} \quad (9)$$

式中: E_0 为入射光场振幅; P_k 为第 k 个反射镜的随机偏振; r_k 为第 k 个反射镜的振幅; θ_k 代表由于第 k 个反射器中的扰动而产生的相位变化; ϕ_k 为第 k 个反射镜的相位; α 为功率衰减系数; ΔL 为反射镜的长度。为了模拟入侵传感器的性能,假设入侵者产生的扰动仅改变 θ_k , 每个反射镜的偏振状态也被视为一个随机量,假设它在每个反射镜的 ΔL 中缓慢变化,并且一个反射器的偏振与其他反射器的偏振不相关。

在不考虑噪声的情况下,仿真的传感光纤长度设置为 5 km,光脉冲的脉宽度设置为 10 ns,得到的背向瑞利散射信号归一化后如图 2 所示。

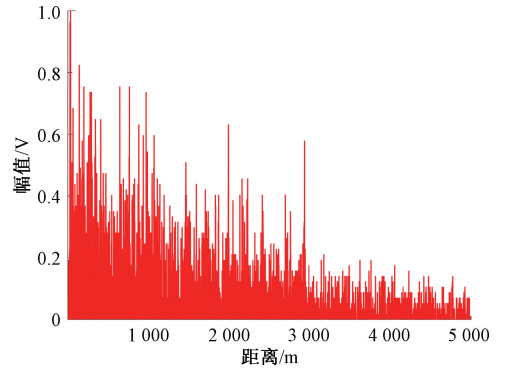


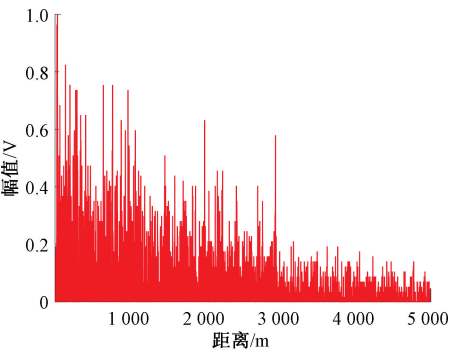
图 2 ϕ -OTDR 背向瑞利散射曲线

Fig. 2 Back Rayleigh scattering curve of ϕ -OTDR

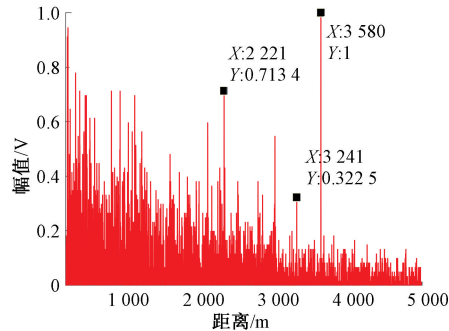
结合上面的背向瑞利散射模型和移动方差平均算法,本文对移动方差平均算法的去噪效果进行仿真。同时,为了对比,对另外几种传统算法的去噪效果也进行了仿真。仿真中模拟了如下 4 种实际场景:不同类型的扰动信号、不同位置的扰动信号、不同振动强度的扰动信号、不同振动时长的扰动信号,由此来验证算法的性能。在 5 km 光纤的 2 221、3 241、3 580 m 处同时模拟施加不同类型的扰动信号,在 2 221 m 处施加一个振动时长仅为 30 个采样周期的三角波扰动信号。在 3 241 m、3 580 m 处分别施加方波型扰动和随机扰动,并且这两个扰动始终都存在,最终得到 200 条背向瑞利散射记录曲线。

基于本次仿真得到的数据,分别使用累加平均、移动平均法、分离平均法、小波去噪、移动平均法+移动微分、移动方差平均法对其进行处理,结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,累加平均法未能有效将 3 个扰动点的信号定位出来,其主要原因是仿真中的扰动强度太弱,累加后求平均进一步将强度降低,导致微弱的扰动信号无法分

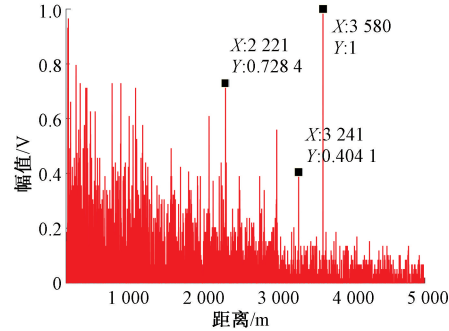
离出来。可见累加平均算法更适用于扰动信号强度较强的定位中。分离平均与移动平均法处理结果基本相同,并未像引言部分所述移动平均法效果更好,这主要是在仿真中的数据更趋近于理想情况,在移动平均的分组之间并未像具体实验中那样引入额外尖峰问题。小波去噪



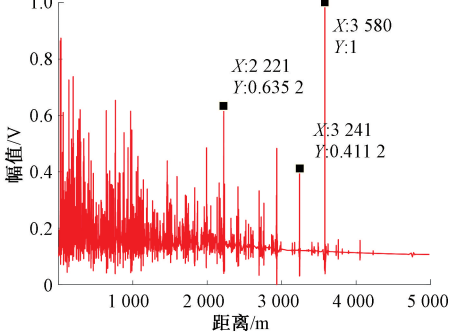
(a) 累加平均算法
(a) Cumulative average algorithm



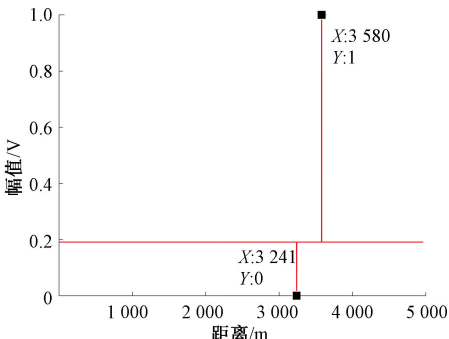
(b) 分离平均算法
(b) Separated average algorithm



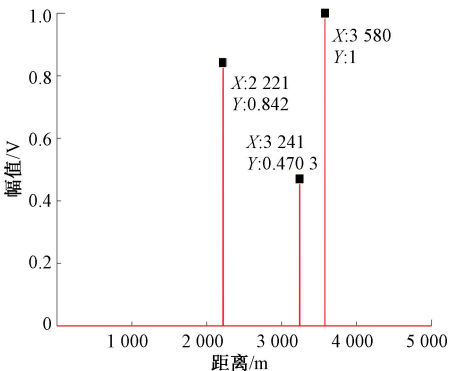
(c) 移动平均算法
(c) Moving average algorithm



(d) 小波去噪算法
(d) Wavelet denoising algorithm



(e) 移动平均法+移动微分算法
(e) Moving average and moving differential algorithm



(f) 移动方差平均算法
(f) Moving variance average algorithm

图 3 不同去噪算法性能仿真

Fig. 3 Performance simulation of different denoising algorithms

明显有所提升,可见小波去噪适用范围更广。而移动平均+移动微分算法和移动方差平均算法本身就具备突出差异的独特优势,从而结果仅留下了扰动信号,但是也可以看到移动平均+移动微分算法仅能对后两个点进行定位,主要原因是该方法虽然信噪比相对于移动平均更好,但频率适用范围更小。移动方差平均算法成功将微弱的扰动信号提取出来,因此,该算法适用范围更广、性能更优越。

2 实 验

搭建如图 4 所示的系统进行实验验证,整个系统工作过程如下:光纤激光器(narrow-linewidth laser, NLL)产生的连续光经光隔离器(Isolator, ISO)后进入 99:1 的耦合器,光耦合器将光信号分为探测光和本振光,探测光经声光调制器(acoustic optical modulator, AOM)调制为实验所需的脉冲光,再经光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)放大后进入环形器(optical circulator, CIR),探测光在传感光纤产生的背向瑞利散射光携带扰动信号,再由环形器射入 3 dB 耦合器,与本振光发生拍频,由平衡探测器(balanced photo-detector, BPD)转换为电信号,最终由数据采集卡(data acquisition card, DAQ)采集,并上传到上位机显示。

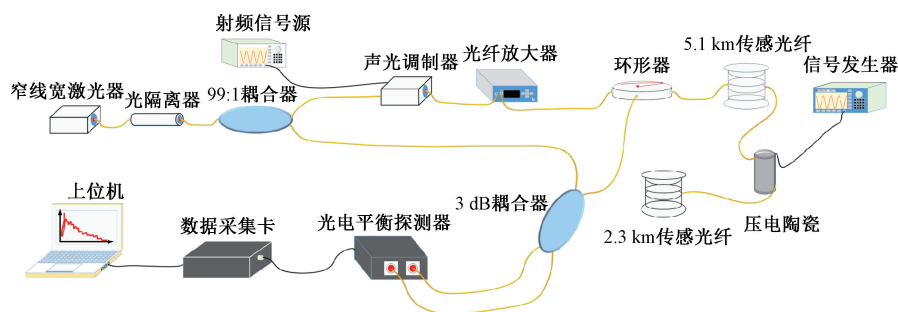


图 4 ϕ -OTDR 系统
Fig. 4 ϕ -OTDR system

实验中使用的光纤激光器的中心波长为 1 551 nm、线宽 8.73 kHz,传感光纤为 7.4 km,脉冲光的重复频率为 10 kHz,脉宽为 10 ns。在传感光纤的 5 100 m 的位置加上一个压电陶瓷 (piezoelectric ceramic tube, PZT), PZT 产生一个 500 Hz 的正弦波扰动信号,数据采集卡以 100 MHz 的采样频率进行采样。为了观察方便,先对原始数据进行归一化后,然后进行去噪处理。图 5 是携带振动信号的一次采样信号波形,可以看到在光纤的入射端和反射端各有一个固有的且相对较强的端面反射,本实验在进行信噪比计算时将这两个端面反射忽略。

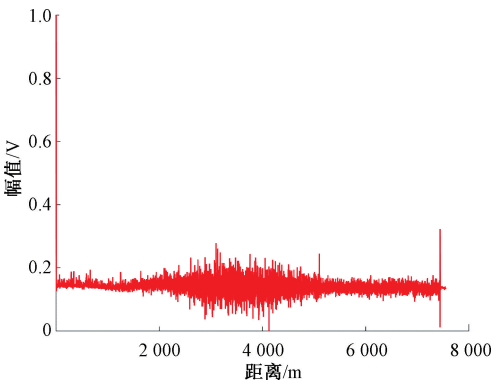


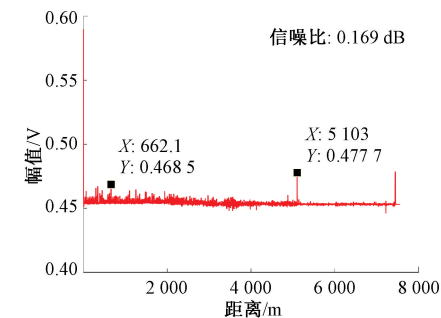
图 5 单次采集的原始数据波形

Fig. 5 Original data waveform of single acquisition

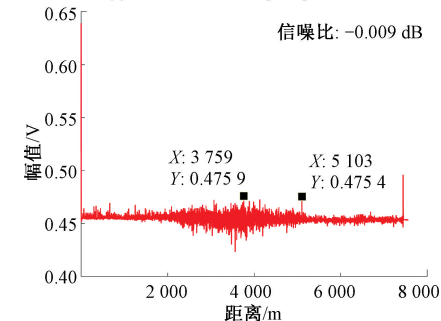
为了比较本文所提出移动方差平均算法与现有的传统去噪算法的去噪效果。对采集的 50 条轨迹分别用累加平均算法、分离平均算法、移动平均算法、小波去噪法、移动平均法+移动微分算法以及本文提出的移动方差平均算法进行处理,处理结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,累加平均算法去噪得到的 $SNR = 0.169\text{ dB}$,分离平均法去噪得到的 $SNR = -0.009\text{ dB}$,移动平均算法去噪得到的 $SNR = 0.076\text{ dB}$,小波去噪得到的 $SNR = 0.299\text{ dB}$,移动平均法+移动微分算法去噪得到的 $SNR = 1.411\text{ dB}$,移动方差平均算法去噪得到的 $SNR =$

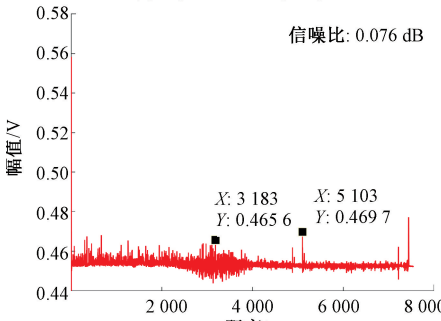
9.927 dB。从整体而言,由于原始信号条数较少,上述去噪算法的信噪比都比较低,随机噪声仍然比较明显。其中,分离平均算法无法进行定位,累加平均算法相对于分离平均算法性能更可靠,移动平均算法、小波去噪算法、移动平均法+移动微分算法虽然都能对 5 103 m 处的振



(a) 累加平均算法
(a) Cumulative average algorithm



(b) 分离平均算法
(b) Separated average algorithm



(c) 移动平均算法
(c) Moving average algorithm

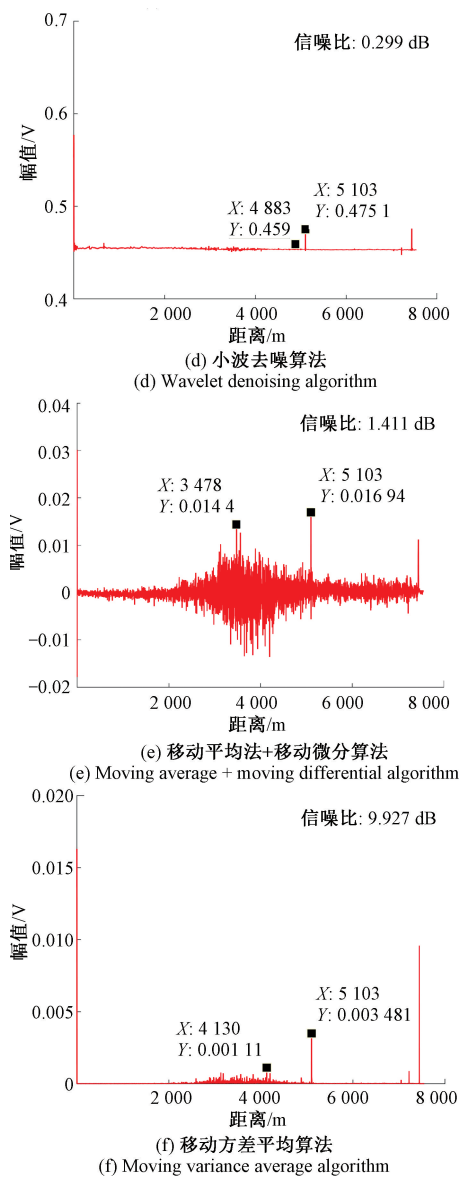


图 6 50 条数据不同去噪算法的去噪结果
Fig. 6 Denoising results of 50 data with different denoising algorithms

动信号进行定位,但是信噪比明显低于移动方差平均算法。并且在实验中,分离平均算法、移动平均算法、移动平均+移动微分算法处理得到的结果为一个平均值曲线组,当扰动强度变小时,部分平均值曲线中的扰动信号依旧淹没在噪声中无法定位,可见传统算法的定位存在不稳定性。本文所提出的移动方差平均算法的 SNR=9.927 dB,去噪效果明显优于传统算法,该算法通过少量的原始数据就可以实现对扰动信号较高信噪比的定位,其实时性能更好。从而在山体滑坡、轨道交通等实时性要求较高的应用环境下具备更高效的预警效果。

3 结 论

本文通过分析传统算法的优缺点,提出了移动方差平均算法,并对其进行了理论和实验研究。实验结果显示,该算法的去噪效果远优于传统去噪算法的去噪效果。在对 50 条原始信号处理中,传统去噪算法信噪比改善有限。分离平均法甚至无法对扰动点进行定位,而移动方差平均算法不仅能准确地实现扰动定位,且信噪比远大于其他几种去噪算法的信噪比,高达 9.927 dB。可见本文提出的移动方差平均算法可以在较少的平均次数情况下定位扰动信号的位置,可以显著提高 φ -OTDR 系统的信噪比和高频响应能力。

参考文献

[1] 王大伟,封皓,杨洋,等. 基于 Φ -OTDR 光纤传感技术的供水管道泄漏辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4):830-837.

WANG D W, FENG H, YANG Y, et al. Study on leakage identification method of water supply pipeline based on Φ -OTDR optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 830-837.

[2] 单一男,马智锦,曾旭,等. 基于分布式光纤传感技术的结构变形估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4):1-9.

SHAN Y N, MA ZH J, ZENG X, et al. Research on structural deformation estimation based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4):1-9.

[3] HE Z Y, LIU Q W, FAN X Y, et al. Fiber-optic distributed acoustic sensors (DAS) and applications in railway perimeter security[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10821: 1082102.

[4] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等. 基于时频混合特征提取算法的光纤传感信号识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9):153-159.

ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Time-frequency domain based hybrid feature extraction algorithm for fiber optic sensing events recognition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9):153-159.

- [5] TEJEDOR J, MACIAS-GUARASA J, MARTINS H F, et al. Real field deployment of a smart fiber-optic surveillance system for pipeline integrity threat detection: Architectural issues and blind field test results [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36 (4): 1052-1062.
- [6] ASHRY I, MAO Y, WANG B, et al. A review of distributed fiber-optic sensing in the oil and gas industry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(5):1407-1431.
- [7] MICHLMAYR G, CHALARI A, CLARKE A, et al. Fiber-optic high-resolution acoustic emission (AE) monitoring of slope failure [J]. Landslides, 2016, 14(3): 1139-1146.
- [8] PENG F, DUAN N, RAO Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [9] ZHANG X P, WANG Q, XIONG F, et al. Performance enhancement method for phase-sensitive optical time-domain reflectometer system based on suppression of fading induced false alarms [J]. Optical Engineering, 2020, 59(4): 046101.
- [10] 陈瑞麟, 万生鹏, 贾鹏, 等. 基于累加平均的分布式光纤拉曼测温系统[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 590-594.
CHEN R L, WAN SH P, JIA P, et al. Distributed fiber Raman temperature measurement system based on cumulative average [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 590-594.
- [11] JUAREZ J C, TAYLOR H F. Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion sensor system [J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3284-3286.
- [12] 沙洲. 长距离相位敏感光时域反射分布式扰动探测系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
SHA ZH. Research on long haul distributed disturbance sensing system based on φ -OTDR [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [13] 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.
- [14] GOGOLLA T, KREBBE K. Distributed beat length measurement in single-mode optical fibers using stimulated Brillouin-scattering and frequency-domain analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(3): 320-328.
- [15] QIN Z G, CHEN L, BAO X Y. Wavelet denoising method for improving detection performance of distributed vibration sensor [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 542-544.
- [16] ZHU T, XIAO X, HE Q, et al. Enhancement of SNR and spatial resolution in Φ -OTDR system by using two-dimensional edge detection method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2851-2856.
- [17] QIN Z, CHEN H, CHANG J. Signal-to-noise ratio enhancement based on empirical mode decomposition in phase-sensitive optical time domain reflectometry systems [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1870.
- [18] 黎威, 张健. 基于小波包的相位敏感 OTDR 分布式光纤振动信号降噪方法的研究 [J]. 光电子·激光, 2017, 28(1): 32-37.
LI W, ZHANG J. Wavelet packet denoising method in phase-sensitive OTDR distributed vibration sensor [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2017, 28(1): 32-37.
- [19] 张春熹, 邓卓, 王夏霄, 等. 谱减降噪法在相位敏感 OTDR 扰动传感系统中的应用 [J]. 激光杂志, 2019, 40(3): 16-19.
ZHANG CH X, DENG ZH, WANG X X, et al. Application of spectral subtraction method in phase sensitive OTDR disturbance sensing system [J]. Laser Journal, 2019, 40(3): 16-19.
- [20] PARK J, LEE W, TAYLOR H F. Fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical time-domain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering [C]. SPIE, 1998, 3555: 49-56.

作者简介



管彦周, 2020 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感。

E-mail: 2714165211@qq.com

Guan Yanzhou received his B. Sc. degree

from Nanchang Hangkong University in 2020. He is currently pursuing his master degree at Nanchang Hangkong University. His main research interests include optical fiber sensors.



万生鹏 (通信作者), 1993 年于南昌大学获得学士学位, 2002 年于电子科技大学获得博士学位(硕博连读), 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为光纤传感。

E-mail: sp_wan@163.com

Wan Shengpeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanchang University in 1993, and received his Ph. D. degree from University of Electronic Science & Technology of China in 2002. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include optical fiber sensors.



喻俊松, 2012 年于华中科技大学文华学院获得学士学位, 2015 年于南昌航空大学获得硕士学位, 2020 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为光纤传感和结构健康监测。

E-mail: 70940@nchu.edu.cn

Yu Junsong received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology WenHua College in 2012, received his M. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2015, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2020. He is currently a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interests include optical fiber sensors and structural health monitoring.