

相敏型光时域反射系统信噪比提升

王子豪 刘志凯 冯玉祥 张成龙 吕立冬

Improvement of signal-to-noise ratio for phase-sensitive optical time-domain reflecting system

WANG Zi-hao, LIU Zhi-kai, FENG Yu-xiang, ZHANG Cheng-long, LV Li-dong

引用本文:

王子豪, 刘志凯, 冯玉祥, 张成龙, 吕立冬. 相敏型光时域反射系统信噪比提升[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0122

WANG Zi-hao, LIU Zhi-kai, FENG Yu-xiang, ZHANG Cheng-long, LV Li-dong. Improvement of signal-to-noise ratio for phase-sensitive optical time-domain reflecting system[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0122

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0122>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

557.7 nm波段地基探测风场的多普勒非对称空间外差干涉仪研制

Development of a doppler asymmetric spatial heterodyne interferometer for ground-based wind field detection at the 557.7 nm wavelength

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1226 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2022-0018>

利用低信噪比小样本太赫兹光谱实现心肌淀粉样变检测

Detection of myocardial amyloidosis by a small number of terahertz spectra with low signal-to-noise ratio

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 443 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0223>

面向空间激光干涉的多通道相位测量系统

Multi-channel phase measurement system for the space laser interferometry

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1089 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0258>

数字域时间延迟积分CMOS遥感相机动态传函建模分析

Dynamic MTF modeling and analysis of digital domain TDI CMOS remote sensing camera

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 983 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0111>

融合遗传算法和BP神经网络的光斑定位方法

Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 407 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0084>

基于互补集合经验模态分解结合希尔伯特变换的光频扫描干涉信号相位提取方法

Phase-extracting method of optical frequency scanning interference signals based on the CEEMD-HT algorithm

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 682 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0173>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-10

相敏型光时域反射系统信噪比提升

王子豪, 刘志凯, 冯玉祥, 张成龙, 吕立冬
(安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽马鞍山 243002)

摘要: 相位敏感型光时域反射系统(Φ -OTDR)的灵敏度受激光器的相位噪声、掺铒光纤放大器的自发辐射噪声、光电探测器的散粒噪声及热噪声等系统固有噪声和环境随机噪声的制约, 因此, 本文研究光时域反射数据的降噪算法, 在不降低系统频率响应范围的条件下提高系统的信噪比。本文提出 Savitzky-Golay 平滑算法, 选择固定长度的滑动窗口, 对窗口内的光时域反射数据进行降噪处理, 同时保持数据的采样频率, 并搭建实验系统进行验证。实验结果显示: 采用 Savitzky-Golay 平滑算法, 系统的信噪比相对于原始信号逐差法的信噪比提高了 5.41 dB, 与常用的累加平均算法、滑动平均算法相比信噪比分别提升 3.39 dB 和 5.05 dB。结果表明: Savitzky-Golay 平滑算法可提高 Φ -OTDR 系统的灵敏度和准确度, 使其能够精准的感知微小振动事件, 以降低系统误报率。

关键词: 相位敏感光时域反射仪; Savitzky-Golay 平滑算法; 信噪比; 阈值定位

中图分类号: TP212.9; TN212

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0122

CSTR: 32171.14.CO.2024-0122

Improvement of signal-to-noise ratio for phase-sensitive optical time-domain reflecting system

WANG Zi-hao, LIU Zhi-kai, FENG Yu-xiang, ZHANG Cheng-long, LV Li-dong

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: The sensitivity of phase-sensitive optical time-domain reflecting (Φ -OTDR) system is limited by the intrinsic system noise such as the phase noise of the laser, the spontaneous emission noise of the erbium-doped fiber amplifier, and the shot noise and thermal noise of the photodetector, as well as the random noise in the environment. Therefore, the noise reduction algorithms based on the optical time-domain reflecting data is investigated to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the system without degrading the frequency response range. And the Savitzky-Golay smoothing algorithm is proposed by selecting a slidable window with fixed-length to process OTDR data for the SNR improvement, while maintaining the system sampling frequency, and then, the experimental system is built to demonstrate the results. The experimental results show that by using the Savitzky-Golay smoothing algorithm, the SNR of the system is improved by 5.41dB relative to that by difference method with the original data, and the SNR is improved by 3.39dB and 5.05dB respectively, compared to the commonly used cumulative averaging method and sliding averaging method. It is demonstrated that the Savitzky-Golay smoothing algorithm can improve the sensitivity and accuracy of the

收稿日期: 2024-07-02; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51977001)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977001)

Φ -OTDR system, which helps to accurately sense weak vibration events and reduce false alarm rate.

Key words: phase sensitive optical time domain reflectometer; Savitzky-Golay smoothing algorithm; SNR; threshold positioning

1 引言

近年来,分布式光纤传感器因其抗电磁干扰强、灵敏度高、响应速度快、传输距离远、耐腐蚀性强、安装便捷等优点^[1,2],已被广泛应用于电力设备状态监测^[3]、安防入侵报警^[4]、建筑健康监测^[5]、油气管道泄漏监测^[6]等领域。其中,相位敏感光时域反射仪(Phase sensitive optical time domain reflectometer, Φ -OTDR)可以实现动态振动事件的定位,成为当前分布式光纤传感系统研究的热点之一^[7]。在 Φ -OTDR系统中,当光脉冲注入传感光纤时,由于脉冲持续时间内散射点间的相互干涉,光纤中产生的背向瑞利散射光被调制成类似散斑的轮廓,从而可以用来感知外部振动事件^[8]。外部振动事件作用于传感光纤,会导致光纤上相应位置的折射率和长度发生变化,从而调制背向瑞利散射光的相位,进而使背向瑞利散射功率出现异常抖动,于是,通过甄别光时域反射曲线的异常抖动,系统能够精确地定位和识别外部振动事件^[9]。然而, Φ -OTDR系统中采用了高相干性的光源,系统非常灵敏,要进一步提升系统的灵敏度,则必须压低系统的固有噪声和抑制传感光纤环境噪声的干扰^[10]。比如,电力设备通常工作在嘈杂的环境中,为了提高 Φ -OTDR系统的性能,需要设计和选择高效的降噪算法^[11]。

随着 Φ -OTDR技术的不断发展,许多学者对其信号的解调处理进行了深入探索与研究。2010年Yuelan Lu等人提出将移动平均和移动差分法应用到 Φ -OTDR系统,进行振动信号处理,在提升信噪比的同时保持较高的频率响应范围^[12]。2012年Zhengqing Pan等人提出将移相双脉冲的方法应用到分布式振动传感系统,降低脉冲干扰对 Φ -OTDR系统相位解调的影响,以降低系统的误报率^[13]。2013年Tao Zhu等人提出将二维边缘检测技术用于 Φ -OTDR系统进行测量外部振动事件,采用Sobel算子将瑞利散射曲线构成的二维图像解析为卷积矩阵,计算曲线的图像梯度来提高振动定位精度^[14]。2017年Dian Chen等人提

出了内脉冲频分法和旋转矢量和法,利用正负频率结合移动平均的方法来抑制瑞利散射信号的衰落,从而提升系统性能^[15,16]。2020年Wei Chen等人提出使用皮尔逊相关系数与经验模态分解相融合的方法来提升系统信噪比,通过对每个经验模态分解的信号进行皮尔逊相关系数计算,将阈值内的分解信号进行重构,从而实现对系统降噪^[17]。2021年杨文晨等人提出基于希尔伯特-黄变换(HHT)的振动定位算法,对振动信号区域进行互相关运算,得到两路信号的时间延时后进行定位计算,减少了计算量且提高了定位精度^[18]。2023年Tianxiong Li等人针对噪声信号,提出了基于遗传算法(GA)和变分模态分解(VMD)的降噪法,通过GA来改进VMD算法中参数选择的问题。将含噪数据分解为多个本征模态分量,根据各模态分量的排列熵和时频域信息提取有效分量进行信号重构,得到去噪信号,从而大幅压低信号噪声^[19]。

虽然许多学者在分布式光纤传感领域取得了不少成果,但在分布式光纤振动事件动态测量方面仍存在些不足。其中包括空间分辨率低、频率响应范围小、信噪比差等问题,尤其在长距离光纤线路监测中仍然存在误报、错报、漏报、定位精度差等问题^[20],需要进一步研究与改进。本文针对传统逐差法抗噪性能差的问题,分析了常规累加平均算法、滑动平均算法的不足,提出将Savitzky-Golay(S-G)平滑算法应用到 Φ -OTDR系统中,将S-G平滑降噪算法与逐差阈值定位算法相结合,在保持信号数据频率特性的同时,压低噪声阈值以增加系统灵敏度,从而提高信号的信噪比,以降低系统误报率。

2 系统降噪算法原理

由于 Φ -OTDR系统采用的是高度相干的光源,激光器线宽非常窄,所以系统对外部的振动事件非常灵敏,因此,系统固有的噪声源往往决定了对微弱振动事件探测的极限。系统的固有噪声包

括: 激光器的相位噪声、掺铒光纤放大器的自发辐射噪声、光电探测器的散粒噪声及热噪声等^[21]。此外, 外部环境的随机干扰噪声也应加以考虑, 比如传感光纤周围环境的背景噪声, 会引起传感光纤中的背向瑞利散射光相位小幅波动, 导致系统灵敏度降低。对于随机噪声的抑制, 通常采用累加平均算法、滑动平均算法, 通过增加采样的噪声样本, 压低噪声幅度以实现系统降噪。

2.1 累加平均算法

将采集卡采集到的 M 条连续周期的瑞利散射曲线记为 $r = \{r_1, r_2, r_3 \cdots r_l \cdots r_M\}$, 其中 r_l 表示第 l 条瑞利散射曲线。累加平均算法将 M 条瑞利散射曲线进行 k 段平均处理, 将每段的 N 条瑞利散射曲线数据进行累加, 并计算平均值, 用这个平均值代表该段内的瑞利散射曲线。累加平均后的曲线记为 $\bar{X} = \{\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \cdots, \bar{X}_i, \cdots, \bar{X}_k\}$, 其中 \bar{X}_i 表示累加平均后的第 i 条曲线数据, $k = M/N$, 其公式如下:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{l=N*(i-1)+1}^{l=N*i} r_l, \quad l \in [1, M], i \in [1, k], \quad (1)$$

根据统计理论, 对噪声进行 N 次累加平均, 噪声功率将减少 $5 \log_{10} N$ dB, 因此通过此方法可以有效地减少噪声的影响, 提高系统的信噪比^[22]。然而, 累加平均算法将 N 条连续采集周期的 OTDR 数据平均变成一条, 使得系统对传感光纤的沿线信息的单次采样周期变为原来的 N 倍, 从而降低系统对振动事件捕捉的频率响应范围, 不利于对高频振动事件的精细分析。

2.2 滑动平均算法

滑动平均算法是对累加平均算法的改进, 其主要思路是选择一个固定间隔长度的滑动窗口, 将窗口内的 N 条瑞利散射曲线数据进行累加平均处理, 将处理得到的曲线代替窗口内的第一条瑞利散射曲线数据, 然后将窗口向下移一条数据, 再重复上述过程。其公式表达如下:

$$\bar{R}_t = \frac{1}{N} \sum_{l=t}^{l=t+N-1} r_l, \quad l \in [1, M], t \in [1, M-N+1], \quad (2)$$

其中: \bar{R}_t 表示滑动平均后得到的第 t 条曲线, r_l 为第 l 条 OTDR 曲线数据, N 表示滑动窗口内瑞利散射曲线的条数。虽然滑动平均算法可克服累加

平均算法会造成系统频率响应范围倍减的问题, 而且由于滑动窗口的移动是连续的, 新生成的瑞利散射曲线数据基本能够保持原始曲线的形状和特征, 但窗口内数据的时间特征依然被模糊化了, 存在一定的失真。

2.3 基于 S-G 平滑处理算法

本文提出了使用 Savitzky-Golay 平滑算法来降低 OTDR 曲线的噪声信号, 从而提高信号的信噪比。S-G 平滑算法是一种基于局部多项式拟合的信号处理方法, 采用低阶数的多项式拟合对信号进行处理, 同时尽可能地保留信号中的有用信息。其处理信号的方法是首先选择一个固定长度的滑动窗口, 将窗口内的数据点进行低阶多项式拟合, 通过最小二乘法确定多项式的系数, 使其能够更好地逼近窗口内的数据。用多项式的中心点的值作为降噪后的值, 从而实现信号的平滑处理。其具体算法如下:

设 m 为单侧窗口大小, n 为窗口大小, 两系数满足 $n = 2m + 1$ 关系。令窗口中心的数据点左边有 m 个点, 右边有 m 个点, 用低阶多项式将数据进行拟合如公式(3)所示:

$$f_j = \sum_{p=0}^{p=k} c_p x_j^p, \quad (3)$$

其中 k 为多项式的阶数, 其值要小于窗口大小 n ; c_p 为第 p 个数据的系数; x_j^p 为窗口中的第 j 个数据点, p 为其对应的阶数^[23]。则拟合数据点与原数据点的方差为:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{h=j-m}^{h=j+m} (f_h - x_h)^2, \quad (4)$$

使用最小二乘拟合令拟合结果最好, 则方差应最小, 即 E 关于 c_p 的偏导为 0。设多项式系数矩阵 $C = [c_0, c_1, \cdots, c_k]^T$, 由最小二乘拟合得:

$$C = (A^T A)^{-1} A^T X, \quad (5)$$

其中矩阵 A 为^[24]:

$$A = \begin{bmatrix} (-m)^0 & (-m)^1 & \cdots & (-m)^k \\ (-m+1)^0 & (-m+1)^1 & \cdots & (-m+1)^k \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m^0 & m^1 & \cdots & m^k \end{bmatrix}, \quad (6)$$

矩阵 X 为:

$$\mathbf{X} = [x_{j-m}, x_{j-m+1}, \dots, x_j, \dots, x_{j+m-1}, x_{j+m}]^T, \quad (7)$$

最终得到 S-G 平滑公式为:

$$X_j^* = \frac{1}{n} \sum_{q=-m}^{q=m} c_{q+j} x_{q+j}, \quad (8)$$

其中: X_j^* 表示平滑后第 j 个数据点; c_{q+j} 为第 $q+j$ 个数据的系数; x_{q+j} 表示第 $q+j$ 个原始数据; 由于 S-G 平滑算法是基于多项式拟合的, 他能够在去除噪声的同时保留有用的信息, 因此能够很好的处理像瑞利散射曲线这些具有连续性和周期性的数据。

S-G 平滑算法有两个参数需要设定, 即多项式拟合阶数和窗口大小。阶数越高, 多项式就能越精确地拟合数据的局部变化, 但也可能会导致过度拟合。但阶数过小则可能无法准确拟合信号的变化, 导致信号失真; 窗口大小越大, 处理后的信号就越平滑, 但也可能会导致信号中的某些细节被平滑掉。但窗口大小过小时则可能会导致信号平滑效果太差, 无法有效去除噪声。

3 系统方案设计与数据获取

3.1 实验系统搭建

本文设计的 Φ -OTDR 系统结构如图 1 所示。窄线宽激光器 (NLL-1550-1, 武汉光迅) 发出的连续光经声光调制器 (T-M200-0.1C2J-3-F2S, Gooch&Housego) 调制成光脉冲, 光脉冲再经掺铒光纤放大器 (BG-pulse-EDFA-M-20 W-1550-FC/APC, 厦门彼格) 提升峰值功率, 经光纤环形器的 1 端口进入, 再经 2 端口进入到传感光纤 (G.652, 长飞光纤)。光脉冲在传感光纤传输时产生的背向瑞利散射信号光返回经光纤环形器的 2 端口, 然后经由 3 端口输出, 进入到光电探测器 (BG-DASA-M1-1550-30-FC/APC, 厦门彼格)。光电探测器将相应的背向瑞利散射光信号转换成电信号, 数据采集卡 (USB9812A, 北京星烁) 采集该电信号得到光时域反射信号数据, 并传输给计算机, 由其进行数据处理和分析^[9]。光电探测器的带宽为 100 MHz, 数据采集卡采样率为 100 Msps。窄线宽激光器输出波长为 1550.12 nm, 线宽为 1.6 kHz。计算机控制数据采集卡产生电脉冲, 以驱动声光调制器产生光脉冲, 光脉冲的脉冲宽度

为 10 ns, 峰值功率约为 33 dBm。由于光脉冲周期应略大于光脉冲沿光纤传播的往返时间, 所以光脉冲的重复频率设置为 6 kHz。实验采用全长约为 14.5 km 的单模光纤进行振动探测, 在光纤的 9922 m 处通过轻拍或抖动的方式施加振动信号。目前对于振动事件加载的常用方法有用低频电信号驱动压电陶瓷周期性地拉伸其中的光纤^[14], 通过在光纤附近走动^[25] 或扬声器产生的声音振动^[26] 来加载振动事件。这些方法都无法实现定量的振动强度实验, 只能将系统及算法改进前后的效果进行对比, 突出效果。

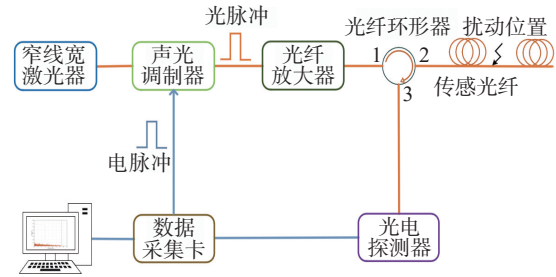


图 1 Φ -OTDR 系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the Φ -OTDR system

3.2 OTDR 信号获取与定位算法

实验分别采集了无振动时的 100 条连续周期的光时域反射曲线以及加载振动事件时的 100 条连续周期的光时域反射曲线。实验中, 通过人为的轻拍或抖动给光纤某部位加载振动事件。这两组光时域反射曲线的叠加显示结果如图 2 所示, 其中传感光纤 9900 m 到 9930 m 范围为振动事件预设区, 如图 2 中的局部放大子图所示。图 2(a) 为未加载振动事件的信号曲线, 图 2(b) 为加载振动事件的信号曲线。对比图 2(a) 和图 2(b) 中的振动事件预设区域, 可以看出在 9922m 附近施加振动后, 图 2(b) 中的相应区域对应的曲线变得急剧混乱, 而在其他区域的曲线基本贴合。在光纤的入射端和反射端各有一个信号较强的菲涅尔反射峰。本实验在进行信噪比计算时, 为了获得有效的振动事件信号, 提取两反射峰间的光时域反射信号, 用于振动事件分析。

逐差阈值定位法是常用的定位方法, 将相邻周期的光时域反射曲线作差, 然后通过阈值进行振动事件定位。由图 2(b) 可以看出, 光时域反射曲线中, 未加载振动事件位置的曲线基本贴合, 因此, 相邻曲线的差值很小, 而在加载振动事件位

置的信号幅度剧烈变化, 相邻曲线的差值会显著增大。

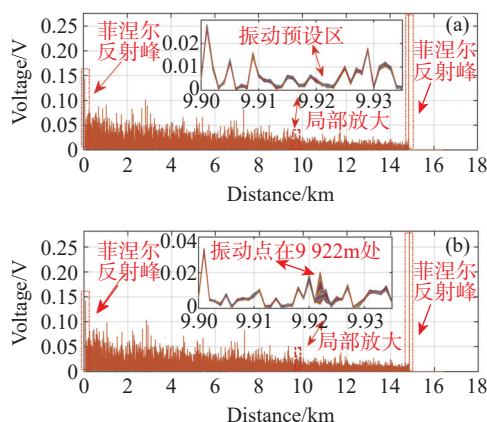


图 2 原始 OTDR 曲线。(a) 未加载事件; (b) 加载事件
Fig. 2 Original OTDR traces.(a) no vibration event loaded; (b) loading vibration events

将图 2(a) 中采集的 100 条无振动事件时的光时域反射曲线进行逐差处理, 获得 99 条差值曲线, 如图 3(a) 所示。将图 3(a) 中每个位置幅值的峰值取出, 绘出峰值曲线如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可以看出每个位置对应的幅值都不大于 3.32 mV, 可以将其作为系统的噪声阈值, 即理论阈值。在实际应用中, 为了降低系统的误报率, 通常将其设置较高一点, 本实验中设置的实际阈值为 3.50 mV。

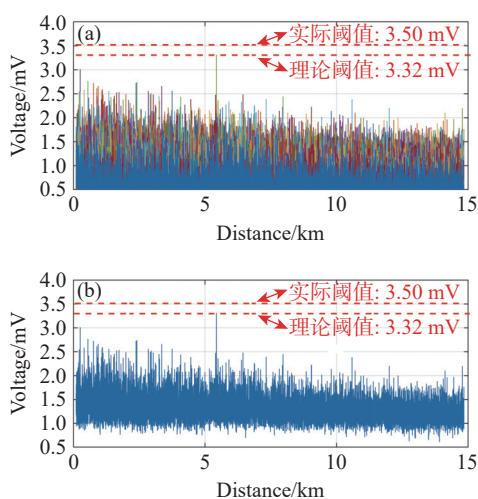


图 3 无振动事件时的逐差曲线。(a) 差值曲线; (b) 峰值曲线
Fig. 3 Differential traces in the absence of vibration events. (a) difference traces; (b) peak trace

图 4 显示了对 100 条相邻周期的光时域反射

曲线逐差后再叠加显示的结果, 并使用阈值法进行定位, 可看出曲线在 9.922 km 处有明显的尖峰其幅值超出所设置的阈值, 可以判定光纤在该点处存在振动事件, 这与振动位置吻合。

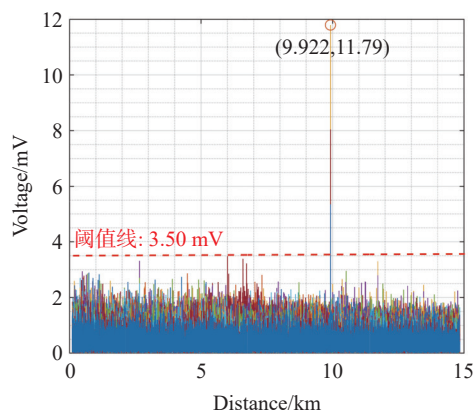


图 4 逐差法曲线
Fig. 4 Traces by difference method

4 降噪算法效果对比

实验中首先将采集的 100 条无振动事件时的光时域反射曲线进行 S-G 平滑处理, 经过迭代计算确定 S-G 平滑算法参数中多项式拟合阶数为 4, 拟合的窗口大小为 71, 其对应不同参数迭代条件下的均方差最小值。然后, 将采集的 100 条无振动事件时的光时域反射曲线分别用累加平均算法, 滑动平均算法和 S-G 平滑算法进行降噪, 并使用逐差法进行处理, 取出每列的峰值如图 5 所示。图 5(a) 为无振动事件时原始数据曲线经逐差处理获得的峰值曲线, 其理论阈值为 3.32 mV, 设置的实际阈值为 3.50 mV; 图 5(b) 为原始数据曲线经累加平均处理后得到的逐差峰值曲线, 其理论阈值为 1.50 mV, 设置的实际阈值为 1.70 mV; 图 5(c) 为原始数据曲线经滑动平均处理后得到的逐差峰值曲线, 其理论阈值为 0.79 mV, 设置的实际阈值为 1.00 mV; 图 5(d) 为原始数据曲线经 S-G 平滑处理后得到的逐差峰值曲线, 其理论阈值为 0.27 mV, 设置的实际阈值为 0.30 mV。从图 5 可以看出对原始数据曲线进行降噪处理后理论阈值和实际阈值都降低了, 这是因为降噪算法主要降低了系统的随机噪声, 而随机噪声会出现在传感光纤的每个位置, 所以逐差的峰值必然减小, 即所设置的阈值会降低。由于数据处理算法会改变

逐差后数据幅度,通常,为进行不同算法实际效果

的对比会采用归一化方法做进一步处理。

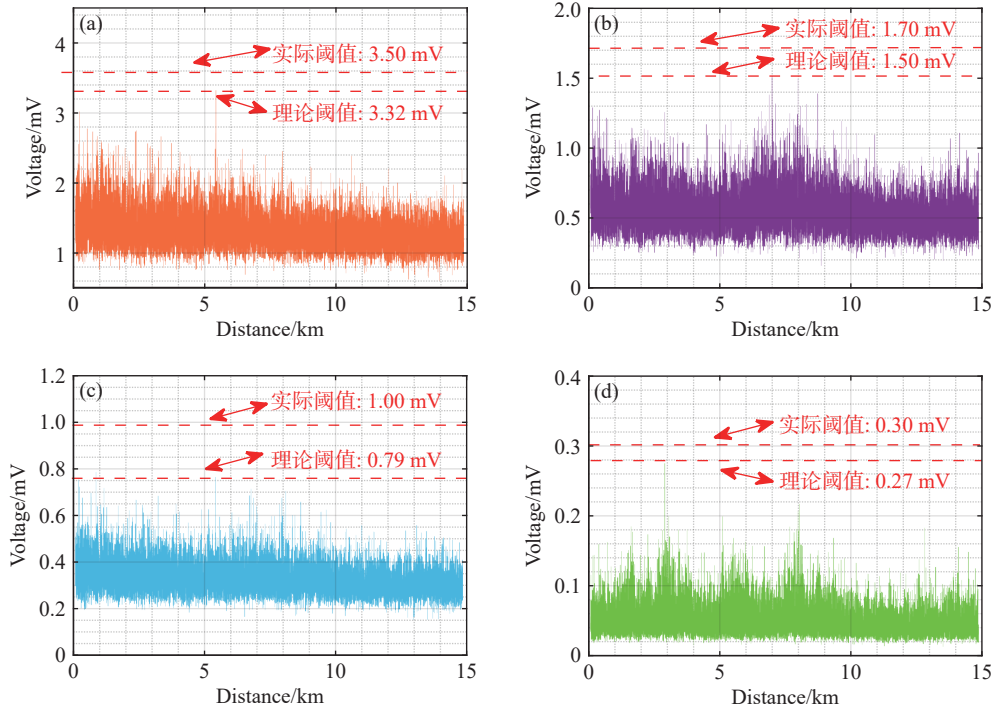


图 5 不同算法无振动事件时的逐差峰值曲线。(a) 原始曲线; (b) 累加平均算法; (c) 滑动平均算法; (d) S-G 平滑算法

Fig. 5 Differential peak traces of different algorithms without vibration events. (a) original trace; (b) cumulative average algorithm; (c) moving average algorithm; (d) S-G smoothing algorithm

本文将 S-G 平滑算法用于系统降噪,并与常规的去噪算法进行效果对比。加载振动事件条件下,采集的 100 条光时域反射曲线,分别用累加平均算法,滑动平均算法与 S-G 平滑算法进行处理,结果如图 6 所示。

通过图 6 可以看出经三种不同方法处理后,叠加显示的光时域反射曲线均贴合更紧。接下来,对原始的光时域反射曲线数据和经不同降噪算法处理后的光时域反射曲线数据进行逐差和归一化处理,得到各算法 99 条叠加的归一化曲线,并提取每个位置的最大值,最终得到归一化后的最大值曲线,如图 7 所示。归一化方法是将逐差后的曲线除以其最大值。图 7 中的阈值线是将无振动事件加载时的实际阈值除以原始曲线、累加平均曲线、滑动平均曲线及 S-G 平滑曲线各自逐差过后的最大值。图 7 显示了归一化后的阈值定位效果,由局部放大子图可见测得的振动点都为 9922 m,可见三种方法都可以进行准确的定位。通过底部的噪声归一化幅值可以看出三种方法相比于原始曲线都有抑制噪声的功能,且经 S-G 平滑后的曲线其底部归一化幅值更低。

通常采用信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 来评价系统性能,其值越大,代表系统对噪声信号的抑制能力越强。信噪比的计算参照(9)式。

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_n} = 10 \log_{10} P_s - 10 \log_{10} P_n \quad (9)$$

其中 P_s 为最大信号强度, P_n 为最大噪声强度。通过(9)式对图 7 的四组数据分别取对数,将信号的最大值与噪声的最大值作差就可以得到相应的信噪比数据,结果如图 8 所示。由图 8(a)可见,未经处理的原始信号 SNR 为 5.30dB。图 8(b)中,运用累加平均算法后的 SNR 为 7.32dB,这主要因为累加平均算法增加了用于平均的光时域反射曲线数据的数量,从而降低随机噪声。

综上所述,累加平均算法可以提升系统的信噪比但平均次数增加必然导致系统的频率响应范围变小,滑动平均算法在不额外增加平均次数及维持较高的系统频率响应范围的基础上可在一定程度的基础上提升系统的信噪比但提升幅度不大,本文提出的 S-G 平滑算法能兼顾累加平均算法和滑动平均算法各自的优点同时能显著提升系统的信噪比。

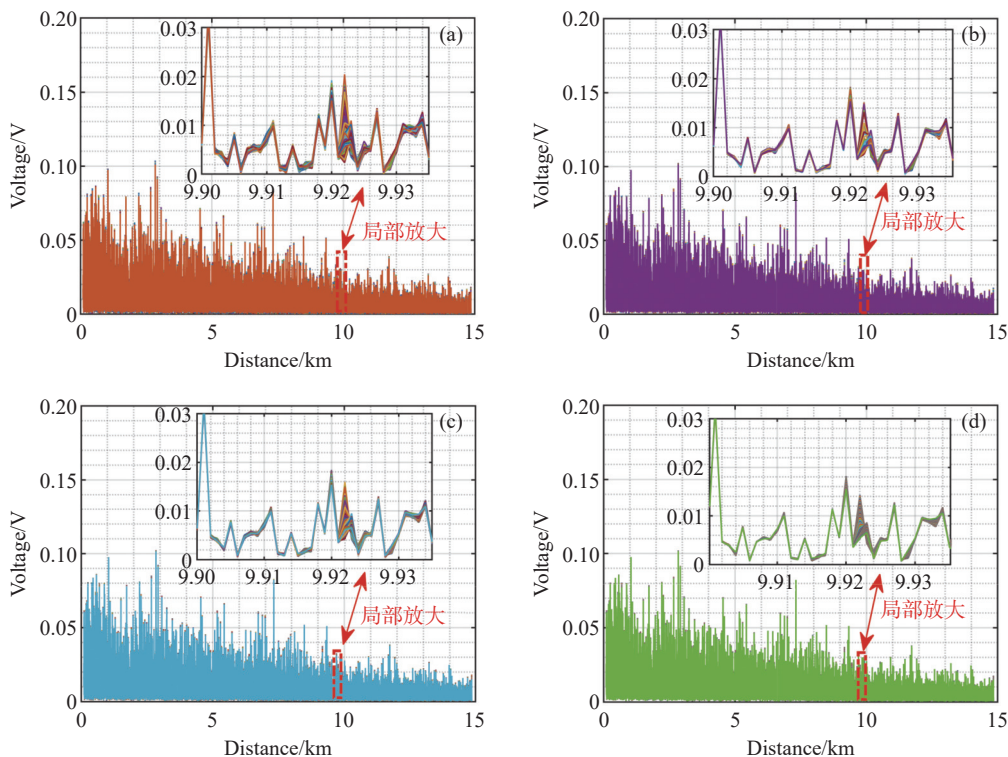


图 6 不同算法处理 OTDR 曲线。(a) 原始曲线; (b) 累加平均算法; (c) 滑动平均算法; (d) S-G 平滑算法

Fig. 6 Different algorithms for processing OTDR traces. (a) original traces; (b) cumulative average algorithm; (c) moving average algorithm; (d) S-G smoothing algorithm

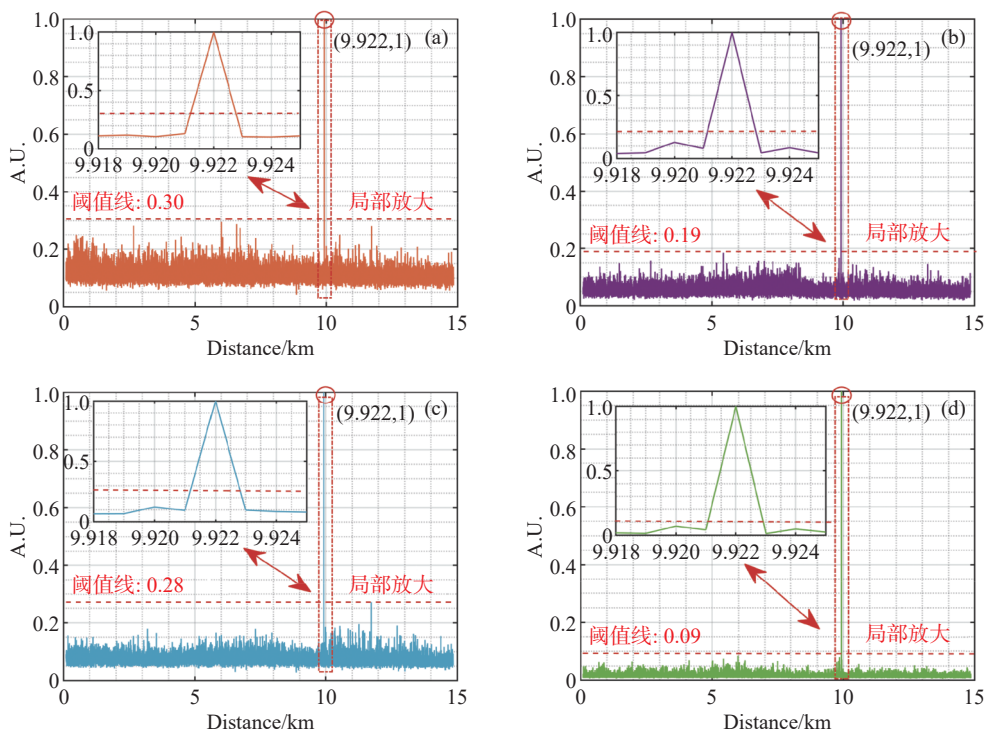


图 7 不同算法归一化阈值定位。(a) 原始曲线; (b) 累加平均算法; (c) 滑动平均算法; (d) S-G 平滑算法

Fig. 7 Different algorithms for normalized threshold localization. (a) original trace; (b) cumulative average algorithm; (c) moving average algorithm; (d) S-G smoothing algorithm

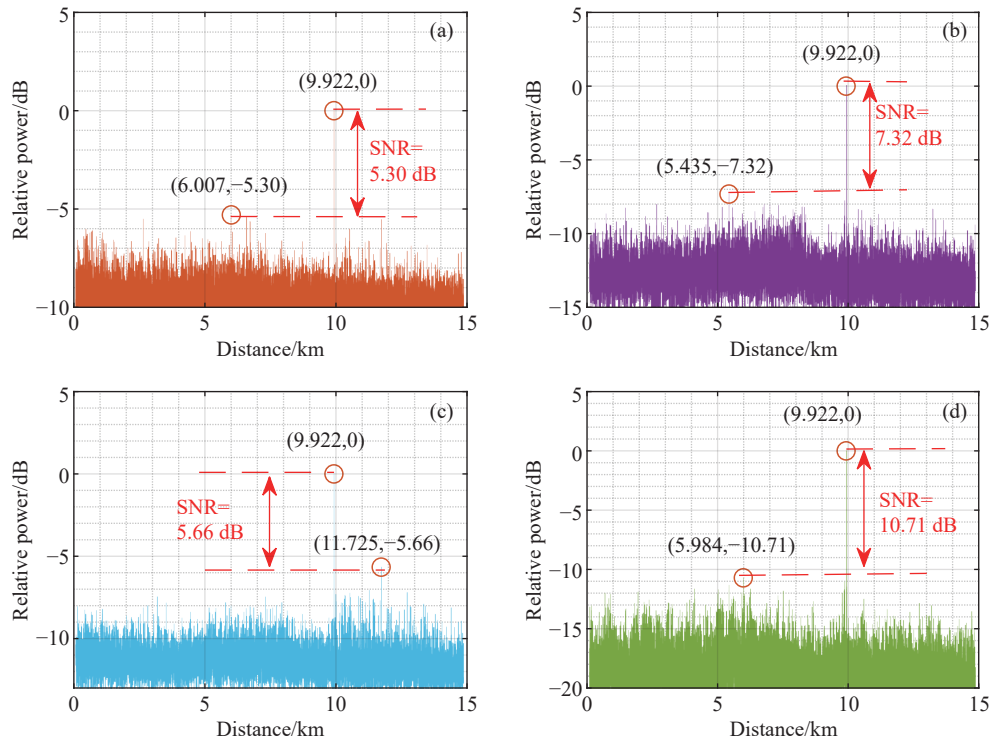


图 8 不同算法的信噪比。(a) 原始曲线; (b) 累加平均算法; (c) 滑动平均算法; (d) S-G 平滑算法

Fig. 8 Signal to noise ratio of different algorithms. (a) original trace; (b) cumulative average algorithm; (c) moving average algorithm; (d) S-G smoothing algorithm

从图 8(c) 可以看出, 采用滑动平均算法, SNR 为 5.66 dB, 比累加平均算法所得的 SNR 稍差, 因为它并未增加随机信号的样本数, 而且, 由于在噪声降低的同时振动信号也被降低了, 所以滑动平均算法较累加平均算法获得的信噪比反而更低, 但是它可以保持高的采样频率。图 8(d) 显示了基于 S-G 平滑算法的降噪效果, 其 SNR 高达 10.71 dB, 由此可见 S-G 平滑算法与累加平均算法和滑动平均算法相比, 降噪效果更明显。

5 结 论

Φ -OTDR 系统因其固有噪声和环境随机噪声的影响, 所以其测得的瑞利散射曲线数据可能含有相对较大的噪声分量, 微小振动信号, 甚至有可

能会被噪声所淹没。本文提出使用 S-G 平滑算法来对瑞利散射曲线进行降噪, 将 S-G 平滑算法与逐差法相结合, 并用阈值法对分布式光纤振动事件进行定位。实验结果显示, 与传统的累加平均算法、滑动平均算法相比, 该算法的降噪效果远优于传统算法的降噪效果。在对 100 条光时域反射曲线处理中, 传统降噪算法对信噪比的改善是有限的, 而本文提出的 S-G 算法不仅可以实现对振动点的精确定位, 且信号的信噪比高达 10.71 dB。比原始信号逐差法的信噪比高出 5.41 dB, 比累加平均算法高出 3.39 dB, 比滑动平均算法高出 5.05 dB。由此表明, 本文提出的 S-G 平滑算法可以显著提高 Φ -OTDR 系统的信噪比, 同时保持高频响应能力。

参考文献:

- [1] 刘舒馨, 祝苒, 刘忠富. 分布式光纤传感器在地震监测中的应用综述[J]. *山西电子技术*, 2023(5): 108-110.
LIU SH X, ZHU R, LIU ZH F. Application of distributed fiber optic sensor in seismic monitoring[J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2023(5): 108-110. (in Chinese).
- [2] ELSHERIF M, SALIH A E, MUÑOZ M G, *et al.*. Optical fiber sensors: working principle, applications, and limitations[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(11): 2100371.

- [3] DUAN R. Real-time hotspot tracing and model analysis of a distributed optical fiber sensor integrated power transformer[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 57242-57254.
- [4] 江虹, 曾庆龙, 李家成. 基于 VMD 与 MFE 的光纤周界安防入侵事件识别[J]. *激光与红外*, 2023, 53(7): 1073-1080. JIANG H, ZENG Q L, LI J CH. Intrusion event identification for fiber optic perimeter security based on VMD and MFE[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(7): 1073-1080. (in Chinese).
- [5] CHAMOIN L, FARAHBAKHS S, PONCELET M. An educational review on distributed optic fiber sensing based on Rayleigh backscattering for damage tracking and structural health monitoring[J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(12): 124008.
- [6] ASHRY I, MAO Y, WANG B W, *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] LIU SH Q, YU F H, HONG R, *et al.*. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(3): 200078.
- [8] HEALEY P. Fading in heterodyne OTDR[J]. *Electronics Letters*, 1984, 20(1): 30-32.
- [9] SHATALIN S V, TRESCHIKOV V N, ROGERS A J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5600-5604.
- [10] LIAO Y H, LI K, GONG Y D. Research on the noise suppression by ϕ -OTDR[J]. *Journal of Optics*, 2024: 1-10. (查阅网上资料, 未找到对应的卷期页码信息, 请确认).
- [11] SUN Y T, MA H ZH. Progress of Fiber Bragg Grating Sensors in state perception of electrical equipment[J]. *Measurement*, 2023, 222: 113691.
- [12] 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.
- [13] PAN ZH Q, LIANG K ZH, ZHOU J, *et al.*. Interference-fading-free phase-demodulated OTDR system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 842129.
- [14] ZHU T, XIAO X H, 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.
- [15] CHEN D, LIU Q W, HE Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [16] CHEN D, LIU Q W, HE Z Y. High-fidelity distributed fiber-optic acoustic sensor with fading noise suppressed and sub-meter spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16138-16146.
- [17] CHEN W, MA X H, MA Q L, *et al.*. Denoising method of the Φ -OTDR system based on EMD-PCC[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(10): 12113-12118.
- [18] 杨文晨, 秦增光, 刘兆军, 等. 基于希尔伯特-黄变换的双马赫-曾德分布式光纤传感振动定位方法[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1410-1416. YANG W CH, QIN Z G, LIU ZH J, *et al.*. A Hilbert-Huang transform method for vibration localization based on a dual Mach-Zehnder distributed optical fiber sensor[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1410-1416. (in Chinese).
- [19] LI T X, ZHANG F D, LIN J, *et al.*. Fading noise suppression method of Φ -OTDR system based on GA-VMD algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(19): 22608-22619.
- [20] MARIE T F B, BIN Y, DEZHI H, *et al.*. Principle and application state of fully distributed fiber optic vibration detection technology based on Φ -OTDR: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16428-16442.
- [21] BAI X Y, LIU H ZH, LIN J, *et al.*. SNR enhancement method for Φ -OTDR system based on Sdr SampEn-BiPSO-SVD algorithm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 9502212.
- [22] 潘冬阳, 南钢洋, 白雪. 基于高速信号采集系统累加平均算法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(8): 122-125. PAN D Y, NAN G Y, BAI X. Research on overlapping average algorithm based on high speed signal acquisition system[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(8): 122-125. (in Chinese).
- [23] NAKAJIMA I, MURAKI Y, ICHIMURA H, *et al.*. Value and challenges of using the Savitzky-Golay method for ECG noise reduction[C]. *Proceedings of 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies*, IEEE, 2022: 1-5.
- [24] NIEDŹWIECKI M J, CIOŁEK M, GAŃCZA A, *et al.*. Application of regularized Savitzky-Golay filters to identification of time-varying systems[J]. *Automatica*, 2021, 133: 109865.

- [25] 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.
- [26] ZHOU ZH X, TIAN L, HAN Y SH, *et al.*. Distributed vibration and temperature simultaneous sensing using one optical fiber[J]. *Optics Communications*, 2021, 487: 126801.

作者简介:



吕立冬(1982—),男,四川省邻水人,博士,副教授,硕士研究生导师,2005年获得西安工业大学学士学位,2009年获得中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所硕士学位,2012年获得南京大学博士学位。主要研究方向为电力设备状态监测与诊断、分布式光纤传感、能源互联网等,现主要从事光纤传感技术及其在智能电网方面的研究。E-mail: lvlidong@ahut.edu.cn