

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.020

基于移动方差平均与谱减法的通信光缆 Φ -OTDR 扰动定位

沈伟¹, 胡欣¹, 张泽¹, 鞠玲¹, 吴健¹, 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(phase sensitive-optical time domain reflectometry, Φ -OTDR)系统对电力通信光缆上扰动的定位易受环境噪声影响而导致定位信号信噪比低的问题,文中对基于移动方差平均与谱减法的 Φ -OTDR定位技术进行研究。首先,通过搭建的相干探测型 Φ -OTDR系统连接光纤与光缆进行舞动模拟实验,并采集背向瑞利散射信号,对其进行解调获得幅度信号曲线。其次,通过选择合适的曲线数量与最优步长对幅度曲线进行移动方差平均处理,得到初步的扰动定位图。然后,针对定位区域外的环境噪声,使用谱减法进行降噪,实现定位效果增强。最后,将小波分解降噪与经验模态分解降噪2种方法与谱减法进行对比,结果显示谱减法的定位效果明显优于其他2种降噪算法,经过谱减法降噪处理后的扰动定位信号的信噪比提升可超过20 dB,从采集原始信号到完成定位和降噪处理的计算时间低至0.58 s。

关键词:光缆监测;相位敏感光时域反射(Φ -OTDR)系统;扰动定位;幅度信号;移动方差平均;谱减法

中图分类号:TM773; TN247

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)03-0211-08

0 引言

近年来,电力通信系统正向着高压、高效、灵活的方向发展,为实现远距离、大容量、高质量的电能输送和优化资源配置提供了重要的技术手段和保障^[1-4]。光纤复合相线(optical phase conductor, OPCC)作为一种具备输电和通信双重功能的新型光缆,具有耐腐蚀、抗拉强度高、热稳定性好等特性,能够适应高压强电和恶劣气候环境,被广泛应用于电力通信领域^[5-9]。然而,由于长期处于户外,大风、覆冰等恶劣天气易造成光缆舞动,甚至出现断裂、移位等线路故障,可能造成重大安全事故,因此,对电力通信线路进行状态监测极其重要^[10-11]。目前光缆扰动监测的主要方法有图像检测法、记忆网络法、拉力分析法等^[12]。其中,图像检测法受天气因素和设备分辨率的限制;记忆网络法需要采集大量气象等数据来建立样本库,并进行分析预测,实时性较差;拉力分析法需要部署多种传感器,且对输电线路监测模型精度有较高要求。

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 reflectometry, Φ -OTDR)系统通过测量沿光纤分布的局部相位变化获取扰动事件的位置和强度信息^[13-15],特别适用于对动态扰动事件的检测^[16-19],从而实现外破、振动等故障的实时预警。与传统的光时域反射技术相比, 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势,在通信光缆状态监测和扰动定位中具有重要的应用价值,能够大幅度提高通信的可靠性和安全性^[20-21]。

然而,随着 Φ -OTDR传感距离的增加,环境噪声和系统噪声干扰不断累积,导致系统采集到的信号信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)不断降低,严重影响最终的扰动定位效果^[22-23]。随着 Φ -OTDR技术的不断发展,新的去噪算法被不断提出。文献^[24]提出一种改进的小波去噪方法,利用对数函数的非线性改进阈值并引入噪声方差,在不改变反射事件和非反射事件波形属性的情况下有效滤除噪声,使测试曲线相对SNR提升超过10 dB,但其使用的小波降噪方法需要合理地选择阈值和小波基函数,否则可能会导致信号失真或噪声残留。文献^[25]提出基于差分法和Prewitt边缘检测法的 Φ -OTDR系统,分别实现一维和二维振动定位,将SNR由21.6 dB提高至39.07 dB,但差分法和Prewitt边缘检测法都需要对信号进行滤波和阈值处理,可能会造成信号失真或漏检。文献^[26]提出一种基于自适应时域匹配滤波的 Φ -OTDR系统相位噪声抑制方法,根据检测到的扰动计算最优滤波器权重进而构造出自适应滤波器,使SNR提高超过10 dB,但该方法仅在时间维度进行滤波,会导致信号时间维度变小,有效信息丢失。文献^[27]提出基于经验模态分解和皮尔逊相关系数(empirical mode decomposition and Pearson correlation coefficient, EMD-PCC)融合的 Φ -OTDR系统噪声滤波方法,将SNR从

7.32 dB 提升至 13.68 dB, 但 EMD-PCC 方法需要对信号进行多次分解和重构, 计算量较大。

基于目前存在的问题, 文中提出一种基于移动方差平均与谱减法的扰动定位降噪方法, 在无须经对信号进行阈值处理的情况下大幅提升了定位效果。该方法利用移动方差平均算法处理系统的幅度信号, 通过选择最优幅度信号曲线数量与步长参数实现扰动的初步定位, 在此基础上, 运用谱减法对定位信号进行降噪, 使得最终的 SNR 提高了超过 20 dB。

1 算法理论

1.1 移动方差平均算法理论

Φ -OTDR 系统采集到的 M 条瑞利散射光信号经过正交(in-phase and quadrature-phase, IQ)解调后可得到幅度信号时空域矩阵 $\mathbf{R} = (e_{ij})_{M \times N}$, 表示为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_i \\ \vdots \\ \mathbf{E}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1N} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{i1} & e_{i2} & \cdots & e_{iN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{M1} & e_{M2} & \cdots & e_{MN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N 为每次光脉冲注入光缆后所获得的瑞利散射光信号的空间采样点数; e_{ij} 为第 i 条瑞利散射光信号在第 j 个空间采样点的幅度值, $i \in [1, M]$, $j \in [1, N]$; \mathbf{E}_i 为由 $e_{i1} \cdots e_{iN}$ 组成的行向量。

首先, 对幅度信号时空域矩阵的每一列进行平均运算, 求得 M 条散射信号对应幅度曲线的平均值矩阵 \mathbf{R}_a , 即:

$$\mathbf{R}_a = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e_{i1} & \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e_{i2} & \cdots & \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M e_{iN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

进而, 对每条幅度曲线与平均值曲线进行差分运算, 得到各自的差值矩阵 $\Delta \mathbf{D}_i$:

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

以 r_{ij} 表示差值曲线中的每个点, 每条差值曲线包含 N 个点, 则 $\Delta \mathbf{D}_i$ 亦可表示为:

$$\Delta \mathbf{D}_i = [r_{i1} \quad r_{i2} \quad \cdots \quad r_{iN}] \quad (4)$$

差值矩阵由 M 条差值曲线构成, 从差值矩阵中的第 1 条曲线开始, 依次取 L 条曲线计算方差, 每次步进 n 条曲线作为下一组计算的起点。最终, 经过移动方差可以获得 d 条方差曲线。其中, $d = \lceil (M-L)/n + 1 \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。记每条方差曲

线为 \mathbf{R}_t^2 , 则 \mathbf{R}_t^2 可表示为:

$$\mathbf{R}_t^2 = \left[\frac{1}{L} \sum_{i=nt-n+1}^{nt-n+L} (r_{i1} - r_{ave,1})^2 \quad \frac{1}{L} \sum_{i=nt-n+1}^{nt-n+L} (r_{i2} - r_{ave,2})^2 \quad \cdots \quad \frac{1}{L} \sum_{i=nt-n+1}^{nt-n+L} (r_{iv} - r_{ave,v})^2 \quad \cdots \quad \frac{1}{L} \sum_{i=nt-n+1}^{nt-n+L} (r_{iN} - r_{ave,N})^2 \right] \quad (5)$$

式中: t 为方差曲线的索引, $t \in [1, d]$; $r_{ave,v}$ 为第 v 个点处的 M 条差值曲线的平均值, $v \in [1, N]$ 。最终, 对 d 条方差曲线求平均, 可得移动方差平均值曲线, 即:

$$\overline{\mathbf{R}^2} = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d \mathbf{R}_t^2 \quad (6)$$

在所得移动方差平均值曲线中, 出现变化较大尖峰的坐标点即是扰动信号的作用位置。

1.2 谱减法降噪理论

谱减法是最有效的语音降噪方法之一, 具有约束少、物理意义明确、计算时间短等特点, 能够在快速处理信号的同时提高 SNR^[28]。谱减法利用了语音信号的短时平稳特性, 假设背景噪声是近似平稳的, 在非纯语音信号的情况下, 可以利用平均噪声谱估计含语音信号时的噪声谱, 再从含噪信号频谱中减去噪声频谱, 从而得到纯语音频谱的估计值^[29]。一方面, 对于 Φ -OTDR 系统, 其噪声主要来源于环境噪声和电气噪声, 其特点是频带较宽, 因此可以通过谱减法进行降噪^[30]; 另一方面, 虽然语音信号整体是一个非平稳过程, 其特性及表征参数均随时间变化, 无法直接采用平稳数字信号处理方法对其进行分析。但由于其短时平稳性, 可视为准稳态过程, 而 Φ -OTDR 系统中的定位信号也具有相似的短时平稳特征, 因此适用于谱减法处理。该方法先对信号进行分帧, 再分别对每帧信号进行加窗、傅里叶变换及谱相减处理, 从而达到最终的降噪目的^[31]。基于谱减法的 Φ -OTDR 系统降噪过程如下。

(1) 对含有噪声的 Φ -OTDR 幅度定位信号进行分帧处理, 得到短时平稳随机信号。信号的模型可以表示为:

$$x(k) = n(k) + s(k) \quad (7)$$

式中: k 为信号时间点; $x(k)$ 为原始信号; $n(k)$ 为噪声信号; $s(k)$ 为有效信号。

(2) 对分帧后的信号进行加窗处理, 经傅里叶变换后提取信号相位, 记为 $\varphi(\omega)$ 。所得结果可表示为:

$$X_w(\omega) = N_w(\omega) + S_w(\omega) \quad (8)$$

式中: $X_w(\omega)$ 、 $N_w(\omega)$ 、 $S_w(\omega)$ 分别为 $x(k)$ 、 $n(k)$ 、 $s(k)$ 对应的短时傅里叶谱; ω 为角频率。

(3) 对短时傅里叶谱的幅度进行平方得到短时功率谱, 由于噪声信号与原始信号在频谱上相互独立, 相关统计平均值为 0, 有效信号的短时傅里叶谱可估计为:

$$|\hat{S}_w(\omega)|^2 = |X_w(\omega)|^2 - E(|N_w(\omega)|^2) \quad (9)$$

式中: $\hat{S}_w(\omega)$ 为对有效信号的短时傅里叶谱估计; $E(\cdot)$ 为取其统计平均值。

(4) 基于提取的相位 $\varphi(\omega)$ 进行傅里叶反变换得到去噪后的信号 $\hat{s}(k)$, 即:

$$\hat{s}(k) = \text{IFFT}(|\hat{S}_w(\omega)|e^{i\varphi(\omega)}) \quad (10)$$

式中: $\text{IFFT}(\cdot)$ 为快速傅里叶逆变换函数。

由于噪声具有局部平稳特性, 该方法首先基于 Φ -OTDR 幅度定位信号的前 5 帧估计噪声的平均短时功率谱, 然后从原始信号中逐帧减去估算出的功率谱, 最终获得有效信号的功率谱, 从而达到降噪目的。

2 扰动定位实验

实验中采用相干探测型 Φ -OTDR 系统, 其结构如图 1 所示。中心波长为 1 550 nm 的窄线宽激光器 (narrow linewidth laser, NLL) 发出的连续光, 经过光耦合器 (optical coupler, OC1) 后被分成 90% 的探测光与 10% 的本振光两部分。探测光通过频移为 200 MHz 的声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 调制成光脉冲, 经掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 进行功率放大后, 通到环形器 (circulator, Cir) 的 1 端口输入, 由 2 端口注入待测光纤 (fiber under test, FUT)。探测光在光纤中传输产生的背向瑞利散射光返回至 Cir, 通过 Cir 的 3 端口输出, 并与本振光在 50 : 50 的 OC2 处干涉产生拍频信号。经平衡探测器 (balanced photodetector, BPD) 光电转换后, 由数字采集卡 (digital acquisition card, DAQ) 采集, 并传输至个人计算机 (personal computer, PC) 处理。现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 产生两路相同频率的脉冲信号, 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同步数据采集。由此搭建的硬件系统如图 2 所示。

为验证算法的定位效果, 搭建如图 3 所示的模拟舞动实验装置, 采用 OPPC 光缆与单模光纤进行测试。实验使用 OPPC 光缆中的一芯作为测试光

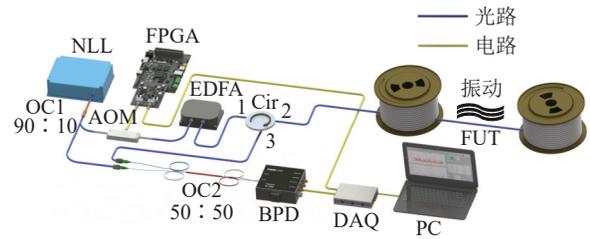


图 1 相干探测型 Φ -OTDR 系统

Fig.1 The coherent detection Φ -OTDR system



图 2 硬件系统连接

Fig.2 The hardware system connection

纤, 光缆跨距为 50 m, 在其首端连接 4 km 单模光纤并与监测系统连接, 尾端连接 1 km 单模光纤。在距首端 4 km 处使用激振器对 OPPC 光缆施加频率为 1 Hz 的振动。注入光脉冲频率为 1 kHz, 脉宽为 100 ns。采集卡的采样频率为 250 MS/s。

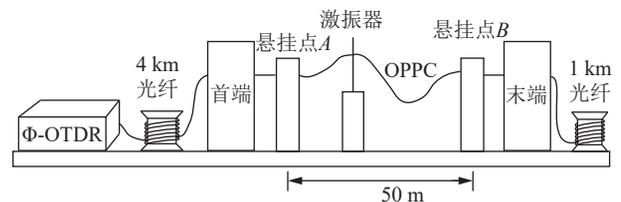


图 3 基于激振器的模拟舞动实验监测示意图

Fig.3 The schematic of the shaker-based simulated galloping experiment monitoring system

图 4 为系统采集的典型原始散射曲线, 横轴为光纤与起始位置的距离, 纵轴为采集卡采集到的电压信号幅度大小。在单次数据处理任务中, 系统连续采集 200 条背向瑞利散射曲线, 用于后续的移动方差平均值计算。

根据弹光效应, 外部振动事件会引起光纤纤芯折射率、纤芯直径以及光纤长度的变化, 进而导致散射光的相位变化, 最终表现为散射光的幅度发生变化^[32]。因此, 在扰动点附近区域, 散射光信号幅度在时间维度上的分布趋于分散。据此特点, 需要对采集的 200 条背向瑞利散射曲线进行 IQ 解调, 以得到各条曲线的幅度信息方便后续的扰动定位。解调后的幅度信号如图 5 所示。

图 5 中的幅度信号曲线难以清晰准确地确定扰动位置, 因而需要对幅度信号进行移动方差平均

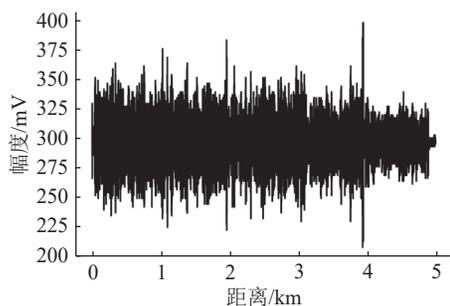


图4 解调前原始散射曲线

Fig.4 The original scattering curve before demodulation

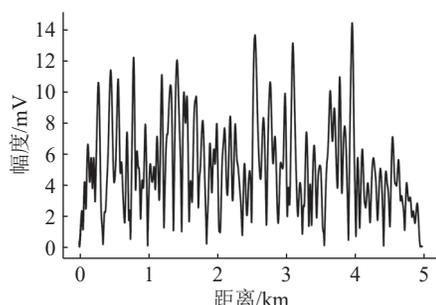


图5 幅度信号曲线

Fig.5 The amplitude signal curve

处理。为了便于后续计算,需要对幅度信息矩阵数据进行归一化处理。值得注意的是,移动方差平均处理的效果受到2个关键参数影响,每次计算选取的幅度信号曲线数量和步长,这2个参数的优化选择对于扰动的定位极其重要。

为了定量地比较不同幅度信号曲线数量与移动方差步长的扰动定位效果,文中采用均方根误差(root mean square error, RMSE)与SNR作为评价指标。

首先,通过RMSE指标评估定位效果,以此初步确定曲线数量的选取, RMSE定义为:

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{H} \sum_{k=1}^H (y(k) - \bar{n}(k))^2} \quad (11)$$

式中: R_{RMSE} 为幅度信号的 RMSE; $y(k)$ 为定位点的扰动信号; $\bar{n}(k)$ 为非定位区域噪声信号的均值; H 为信号的长度。此处采用 RMSE 衡量定位信号与噪声的偏差程度,若 RMSE 越高,则说明信号定位峰相对于噪声更加明显,定位效果也更好。

不同曲线数量对应的 RMSE 如图 6 所示。当选取幅度信号曲线数量为 20 时, RMSE 达到最大,为 0.069。同时随着曲线数量的增加, RMSE 呈逐渐下降趋势。因此,文中选择 20 条幅度信号曲线作为移动方差运算的曲线数量。

在此基础上,为确定移动方差的最优步长,以 SNR 评估步长对于扰动定位的影响^[33]:

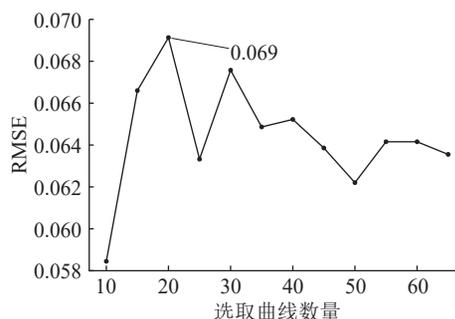


图6 不同曲线数量所对应的 RMSE

Fig.6 The RMSE for different curve numbers

$$S_{\text{SNR}} = 20 \lg \frac{A_{\text{signal}}}{\bar{A}_{\text{noise}}} \quad (12)$$

式中: S_{SNR} 为信号的 SNR; A_{signal} 为信号定位峰的幅值大小; \bar{A}_{noise} 为噪声信号幅值的均方根。不同移动方差步长下扰动定位后的 SNR 如图 7 所示。

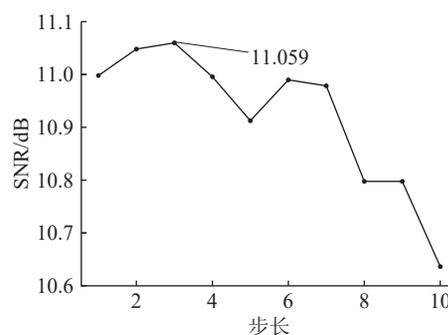


图7 不同步长所对应的 SNR

Fig.7 The SNR for different steps

SNR 在步长为 3 时达到最大值 11.059 dB,因此,选择 3 作为最优步长。基于此参数进行移动方差平均处理后,得到的扰动定位结果如图 8 所示。

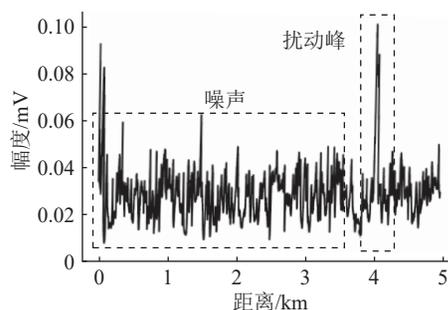


图8 扰动定位

Fig.8 The disturbance localization

图 8 中 4 km 处有相对明显的扰动峰,但非扰动区域仍存在大量环境噪声。为进一步提升定位精度,对移动方差平均后的幅度信号进行谱减法处理,以抑制环境噪声对于扰动定位的影响。谱减法处理后的有效信号如图 9 所示。

相比于图 8,图 9 可明显观察到在 4 km 处有扰动峰的存在,同时非扰动区域的环境噪声也得到了抑制。为了进一步突出定位峰,对有效信号进行平

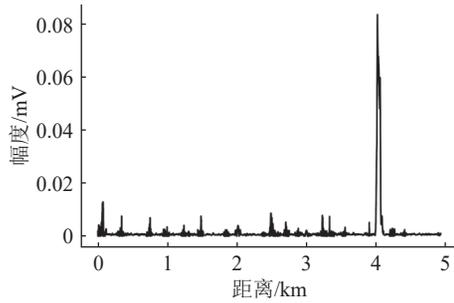


图9 经谱减法处理后的扰动定位

Fig.9 The disturbance localization after spectral subtraction

滑滤波处理,平滑后的扰动定位曲线如图10所示。

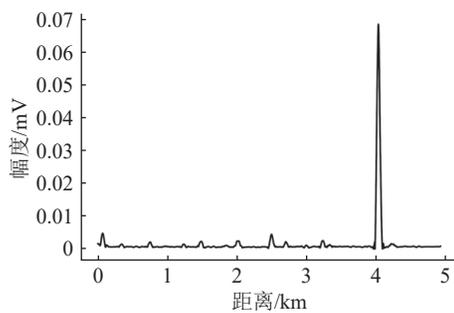


图10 经平滑滤波处理后的扰动定位

Fig.10 The disturbance localization after smoothing filtering

对比谱减法降噪前后定位峰的SNR,如表1所示。

表1 2种算法处理后的SNR比较
Table 1 Comparison of SNR after processing by 2 algorithms

算法	SNR/dB
移动方差平均	11.059
移动方差平均+谱减法	35.787

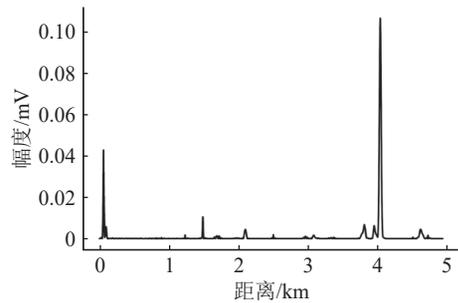
实验结果表明,经移动方差平均计算结合谱减法处理后,SNR大幅提高,定位效果得到增强。

为了验证算法的适用性,使用激振器施加了2种不同频率的振动,并使用文中算法进行扰动定位,如图11所示。

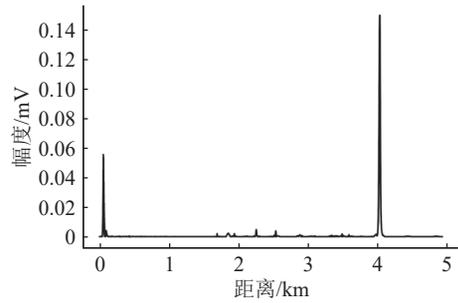
图11(a)、(b)中,在4 km处均出现明显的扰动峰,2 Hz与3 Hz的模拟扰动信号位置一致,这一结果表明,文中算法对不同频率的振动信号均具有较强的适用性。

为了突出文中所提方法的优越性,将移动方差平均算法分别与小波分解去噪法、经验模态分解去噪法进行结合处理,并与文中提出的方法进行比较,结果如图12所示。

3种定位降噪算法的SNR值如表2所示。对



(a) 振动频率2 Hz

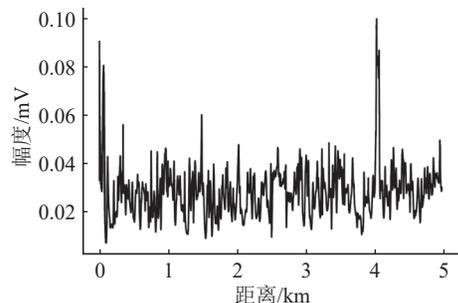


(b) 振动频率3 Hz

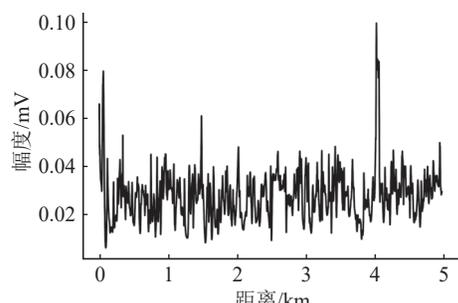
图11 不同振动频率的扰动定位

Fig.11 The disturbance localization for different vibration frequencies

于同一种扰动,通过移动方差平均法可实现对扰动的初步定位。在降噪算法选择方面,虽然3种降噪算法均能提升SNR,但小波分解去噪法对于随机性较强的高斯白噪声去除效果较差,而经验模态分解去噪法存在模态混叠,易导致重构信号失真。文中所提出的谱减法无须对信号进行多层次的分解处理,避免了重构信号失真问题,因此谱减法的定位去噪效果优于上述2种方法。谱减法最终的定位SNR提高超过20 dB,定位效果得到了明显提升。



(a) 移动方差平均+小波分解去噪



(b) 移动方差平均+经验模态分解去噪

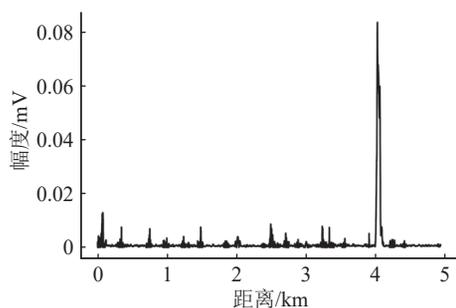


图 12 3 种定位去噪算法的噪声抑制能力对比

Fig.12 Comparison of noise suppression ability by 3 positioning and denoising algorithms

表 2 3 种定位去噪算法处理后的 SNR 对比

Table 2 Comparison of SNR values after processing by 3 positioning and denoising algorithms

算法	SNR/dB
移动方差平均+小波分解去噪	11.131
移动方差平均+经验模态分解去噪	11.081
移动方差平均+谱减法去噪	35.787

此外,为体现文中所提算法的计算效率,对 3 种定位降噪算法的计算时间进行了对比,结果如表 3 所示。由表 3 可知,移动方差平均结合谱减法扰动定位所用计算时间为 0.58 s,少于其他 2 种去噪方法的时间,因此文中算法在计算效率上也具有一定优势。

表 3 3 种定位去噪算法的计算时间对比

Table 3 Comparison of computational time values after processing by 3 positioning and denoising algorithms

算法	计算时间/s
移动方差平均+小波分解去噪	0.65
移动方差平均+经验模态分解去噪	10.56
移动方差平均+谱减法去噪	0.58

3 结论

随着电力通信系统在远距离、大容量、高质量的电能输送中发挥着日益重要的作用,对于传输光缆上的扰动定位技术也引起广泛重视。文中基于相干探测型 Φ -OTDR 分布式传感系统,提出一种基于移动方差平均法与谱减法相结合的光缆扰动定位方法。在对外部扰动初步定位的基础上,利用谱减法优异的宽带噪声抑制能力,对幅度信号曲线进行深度降噪。实验表明,文中所提谱减法可以获得更好的定位效果,与小波分解和经验模态分解这 2 种定位降噪方法相比,SNR 提升超过 20 dB,计算时间低至 0.58 s。

致谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022101)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 吴斌,贺云,冯晓芳,等.基于 LFM-OTDR 的超长跨距光纤电力通信链路监测[J].光通信技术,2021,45(2):55-59.
WU Bin, HE Yun, FENG Xiaofang, et al. Ultra long span optical fiber power grid communication link monitoring based on LFM-OTDR[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(2): 55-59.
- [2] 熊小萍,刘瑞,蔡义明.计及节点重要度协同知识模型的电力通信 QoS 路由策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):45-53.
XIONG Xiaoping, LIU Rui, CAI Yiming. Power communication QoS routing strategy considering node importance degree and knowledge model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 45-53.
- [3] 韩嘉佳,孙歆,吕磅,等.新型电力系统终端通信协议的逆向分析及模糊测试[J].浙江电力,2023,42(11):57-62.
HAN Jiajia, SUN Xin, LYU Bang, et al. Reverse analysis and fuzzy testing of a communication protocol for new power system terminals[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 57-62.
- [4] 张艺伟,刘文霞,张帅,等.考虑极端场景的输电-通信网络协同鲁棒扩展规划方法[J].电力建设,2022,43(10):121-135.
ZHANG Yiwei, LIU Wenxia, ZHANG Shuai, et al. Joint robust expansion planning of transmission network and communication network considering extreme scenarios[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 121-135.
- [5] 尹翔.OPPC 技术在配电网建设中的应用[J].现代信息科技,2020,4(1):46-49.
YIN Xiang. Application of OPPC technology in distribution network construction[J]. Modern Information Technology, 2020, 4(1): 46-49.
- [6] 赵启,王建,林丰恺,等.基于格拉姆角场与 ResNet 的输电线路故障辨识方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(10):95-104.
ZHAO Qi, WANG Jian, LIN Fengkai, et al. Transmission line fault identification method based on Gramian angular field and ResNet[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 95-104.
- [7] 汤璐,王淑青,王年涛,等.基于改进 YOLOX 网络的雾天绝缘子缺陷检测[J].高压电器,2024,60(3):223-228.
TANG Lu, WANG Shuqing, WANG Niantao, et al. Insulator defect detection in foggy condition based on improved YOLOX network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 223-228.
- [8] 曹璞璘,黄美琴,王云龙,等.交流线路避雷线融冰故障电磁暂态分析与间接式行波故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):11-21.
CAO Pulin, HUANG Meiqin, WANG Yunlong, et al. Electro-

- magnetic transients analysis and indirect traveling wave fault location for ground wires of AC transmission line amid de-icing[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 11-21.
- [9] 潘浩,周仿荣,马仪,等.输电线路覆冰情势与气象要素关联模型研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(12): 75-82.
PAN Hao, ZHOU Fangrong, MA Yi, et al. Association model for icing situation with meteorological factors for transmission line[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(12): 75-82.
- [10] 谢凯,张洪英,赵衍双,等.导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 70606.
XIE Kai, ZHANG Hongying, ZHAO Yanshuang, et al. Structural health monitoring of power transmission system based on optical fiber sensor under transmission line galloping[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 70606.
- [11] 熊菲,丁文红,张益昕,等.基于布里渊光时域反射技术的多参数输电线路覆冰预警[J]. *电力科学与工程*, 2019, 35(1): 36-44.
XIONG Fei, DING Wenhong, ZHANG Yixin, et al. Detection of transmission line icing based on multiple parameters measured by Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2019, 35(1): 36-44.
- [12] 郝美.输电线路覆冰在线监测的关键技术[J]. *电子技术*, 2020, 49(3): 90-91.
HAO Mei. Key of icing online monitoring for transmission line[J]. *Electronic Technology*, 2020, 49(3): 90-91.
- [13] MARIE T F B, YANG B, HAN D Z, 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.
- [14] ZHONG Z C, LIU K Y, HAN X, et al. Review of fiber-optic distributed acoustic sensing technology[J]. *Instrumentation*, 2019, 6(4): 47-58.
- [15] 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.
- [16] TARANOV M A, GORSHKOV B G, ALEKSEEV A E, et al. Distributed strain and temperature sensing over 100 km using tunable-wavelength OTDR based on MEMS filters[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(11): 3049-3054.
- [17] LIU S Q, SHAO L Y, YU F-H, et al. Quantitative demodulation of distributed low-frequency vibration based on phase-shifted dual-pulse phase-sensitive OTDR with direct detection[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 10096.
- [18] 林圣淘,王子南,熊吉,等.光纤瑞利散射传感抗干涉衰落技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306008.
LIN Shengtao, WANG Zinan, XIONG Ji, et al. Progresses of anti-interference-fading technologies for Rayleigh-scattering-based optical fiber sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306008.
- [19] 李子牛.我国电力工业发展的现状及未来展望[J]. *自动化应用*, 2023(6): 54-57.
LI Ziniu. Present situation and future prospect of China's electric power industry[J]. *Automation Application*, 2023(6): 54-57.
- [20] 郝伟博,赵衍双,李卓枢,等.基于相位敏感光时域反射技术的导线舞动状态监测[J]. *应用科学学报*, 2019, 37(4): 437-446.
HAO Weibo, ZHAO Yanshuang, LI Zhuoshu, et al. Transmission-line galloping monitoring based on phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2019, 37(4): 437-446.
- [21] WU H J, TANG B, XIAO Y, et al. Monitoring of the transmission line galloping with a novel distributed optical fibre sensor and its statistical data analysis[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(1): 166-171.
- [22] 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.
- [23] 吴慧娟,刘欣雨,饶云江.基于 Φ -OTDR 的光纤分布式传感信号处理及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 39-59.
WU Huijuan, LIU Xinyu, RAO Yunjiang. Processing and application of fiber optic distributed sensing signal based on Φ -OTDR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 39-59.
- [24] 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.
- [25] WANG Y, JIN B Q, WANG Y C, et al. Real-time distributed vibration monitoring system using Φ -OTDR[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(5): 1333-1341.
- [26] ÖLÇER İ, ÖNCÜ A. Adaptive temporal matched filtering for noise suppression in fiber optic distributed acoustic sensing[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1288.
- [27] 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.
- [28] 陈志博,王思雨,刘远泽,等.一种基于改进多带谱减法的低信噪比语音识别方法[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2022, 55(6): 58-61.
CHEN Zhibo, WANG Siyu, LIU Yuanze, et al. Low SNR speech recognition method based on improved multiband spec-

- tral subtraction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2022, 55(6): 58-61.
- [29] 吴俊, 管鲁阳, 鲍明, 等. 基于多尺度一维卷积神经网络的光纤振动事件识别[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180493.
WU Jun, GUAN Luyang, BAO Ming, et al. Vibration events recognition of optical fiber based on multi-scale 1-DCNN[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(5): 180493.
- [30] 田曼伶. 基于 φ -OTDR 光纤传感系统的扰动信号分类研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
TIAN Manling. Research on disturbance signal classification of φ -OTDR optical fiber sensing system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [31] 徐琅. 基于深度神经网络的单通道语音增强算法研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
XU Lang. Research on speech enhancement method based on deep neural network[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [32] 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. The key technology research of distributed optical fiber vibration sensor based on Φ -OTDR[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [33] WANG Z N, 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.
- 作者简介:

 沈伟(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统自动化、电力系统通信相关工作(E-mail: shenwei5630@vip.sina.com);
 胡欣(1991), 男, 硕士, 工程师, 从事电力通信工程、电磁场与微波相关工作;
 张泽(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统自动化相关工作。

Φ -OTDR disturbance localization of communication optical cable based on moving variance average and spectral subtraction

SHEN Wei¹, HU Xin¹, ZHANG Ze¹, JU Ling¹, WU Jian¹, HUANG Yi²

(1. State Grid Taizhou Power Supply Company of 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: To address the issue of low signal-to-noise ratio in disturbance localization on power communication optical cables caused by environmental noise in phase sensitive-optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) systems, the Φ -OTDR localization technique is investigated based on moving variance averaging and spectral subtraction. A coherent detection Φ -OTDR system is built to connect optical fibers and optical cables to carry out galloping simulation experiments. The backward Rayleigh scattering signal is acquired by using the system and the scattering signal is demodulated to obtain the amplitude signal curve. By selecting an appropriate number of curves and an optimal step size, the amplitude signal curves are processed using moving variance average to generate a preliminary disturbance localization map. To suppress ambient noise outside the localization region, noise reduction using spectral subtraction is performed to achieve enhanced localization. A comparative analysis is conducted between spectral subtraction and two alternative noise reduction methods-wavelet decomposition and empirical mode decomposition. The results demonstrate that spectral subtraction significantly outperforms the other two algorithms in localization effectiveness, achieving an SNR improvement exceeding 20 dB while maintaining a computational time as low as 0.58 s.

Keywords: optical cable monitoring; phase sensitive-optical time domain reflectometry (Φ -OTDR) system; disturbance localization; amplitude signal; moving variance average; spectral subtraction

(编辑 吴昊)