光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250728001

基于HO-SG-ACF的Φ-OTDR振动定位方法

尚秋峰[1,2,3]，陈冰桦[1*]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 针对噪声和光功率衰减等影响相位敏感光时域反射仪（Φ-OTDR）对振动有效定位的问题，文章提出一种Φ-OTDR系统振动定位方法。该方法对Φ-OTDR系统经外差解调后的幅值信号应用萨维茨基-戈雷滤波器（Savitzky-Golay，SG）平滑滤波，并结合自相关分析，可以实现在低信噪比情况下的振动定位。采用河马优化算法优化SG滤波窗口大小和多项式拟合阶数，既能充分保留信号高频细节，又能防止过拟合而陷入局部最优。为验证所提方法的有效性，构建了外界振动和法兰松动实验，并将该方法和移动差分定位方法、连续平均-移动差分法进行对比。结果表明，所提方法信噪比提升效果最好，在相同的振动信号条件下，该方法处理后信噪比为9.93 dB，菲涅尔反射信噪比为2.34 dB，而移动差分方法分别为－2.16 dB和－1.37 dB。所提方法为振动定位及熔接头松动等故障的早期诊断提供了一种新的解决思路。

关键词： Φ-OTDR；Savitzky-Golay滤波；河马优化算法；自相关函数；定位

中图分类号： TN911.6　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1064－07

Locating Vibrations with Φ-OTDR Using Hippopotamus Optimization and a Savitzky-Golay Filter with an Autocorrelation Function

SHANG Qiufeng[1,2,3], CHEN Binghua[1]

(1. Dept. of Electronic and Communication Engineering; 2. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technol.;
3. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technol., North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: Noise and optical power attenuation affect the capability of phase-sensitive optical time-domain reflectometry (Φ-OTDR) instruments to locate vibrations. In this study, we propose a vibration location method for Φ-OTDR systems to address this issue. The amplitude signal of a Φ-OTDR system after heterodyne demodulation can locate vibrations under conditions with low signal-to-noise ratio (SNR) using a smoothing Savitzky-Golay (SG) filter and an analysis of the autocorrelation function (ACF). The size of the window for SG filtering and the order of polynomial fitting were optimized using the hippopotamus optimization (HO) algorithm to fully retain high-frequency details of the signal and prevent overfitting or falling into a local optimum. We conducted experiments with external vibration and flange loosening in which the proposed HO-SG-ACF method was compared with moving-differential, continuous average moving-differential, and moving variance average methods. The results show that the proposed method achieved the most significant improvement in SNR. After processing the same vibration signal, the SNR obtained using the proposed method reached 9.93 dB, whereas the Fresnel

收稿日期：2025－07－28.

基金项目：河北省省级科技计划项目（SZX2020034）.

* 通信作者：陈冰桦

reflection method yielded an SNR of 2.34 dB. In comparison, the moving-differential method resulted in SNRs of −2.16 dB and −1.37 dB, respectively. Thus, our findings demonstrate that the proposed method offers a new approach to localize vibration information and diagnose faults such as loose fusion splices earlier than would be possible with other methods.

Key words: Φ-OTDR; SG filtering; HO algorithm; autocorrelation function; location

0　引言

相位光敏感时域反射仪(Φ-OTDR)作为一种常见的分布式光纤传感技术,具有抗电磁干扰、灵敏度高、成本低等优点[1],被广泛应用于建筑健康监测[2]、油气管道泄露预警[3]、电力线缆监测[4-5]等领域。Φ-OTDR通过后向瑞利散射光(RBS)之间的相干效应来实现对外界振动信息的监测,当传感光纤受到外界扰动时,RBS光局部相位关系发生改变,进而通过解调RBS光的幅值和相位信息即可实现对外部振动事件的定位和识别[6-7]。然而,随着Φ-OTDR技术应用范围的不断扩展,系统噪声、环境噪声及长距离光纤信号衰减等问题愈发凸显。如何获取有效的振动定位信号,已成为Φ-OTDR应用中亟待解决的关键问题。

移动差分算法是Φ-OTDR系统中典型的振动定位方法,但在信噪比低的情况下,该算法常会出现定位失效的问题。此外,其差分窗口选择存在一定的主观性,若窗口选择不当,会显著影响定位结果的准确性。相较于优化硬件结构的降噪方案,利用软件算法对信号进行降噪和定位处理,具有成本低、实现简单等优势。2018年,魏源等[8]提出一种基于频谱分析的定位算法,能够有效抑制激光器频率漂移对定位精度的影响,然而该算法难以区分10 Hz以下的低频振动信号。2022年,管彦周等[9]提出移动方差平均算法,通过较少的累加和采集次数实现振动信号的定位。同年,Zhu等[10]对连续平均和移动差分算法进行理论研究,揭示传统振动定位方法信噪比受限于移动窗口选取的特点。2024年,沈伟等[11]提出一种区域划分和边缘检测相结合的振动定位方法,实现了振动位置的定位,然而该方法通过相位信号进行定位,易受相干衰落噪声影响。

文献[12]和[13]研究表明,Φ-OTDR系统中受扰RBS信号蕴含与外界振动相关的高次谐波分量,在信号处理过程中,需选取能够有效保留此类关键频率特征的方法。萨维茨基-戈雷滤波器(Savitzky-Golay,SG)平滑算法在抑制系统噪声的同时,可较好保持信号的原始频率特性。自相关函数(Autocorrelation Function, ACF)通过度量随机信号在不同时刻的关联性,可有效检测混叠在随机噪声中的周期性成分。因此,本文提出一种融合SG平滑算法与ACF分析的振动定位方法,并采用河马优化算法(Hippopotamus Optimization, HO)对SG的滤波窗口大小与多项式阶数进行自适应优化。该方法基于Φ-OTDR系统采集的RBS的幅值信号进行振动定位分析,避免了相干衰落问题,同时也能有效定位菲涅尔反射点,进而识别熔接头松动等故障。

1　Φ-OTDR系统

1.1　系统结构

相干探测型Φ-OTDR系统结构如图1所示。系统使用窄线宽激光器(Narrow-Linewidth Laser, NLL)作为光源,其输出光经耦合器OC1以90∶10分为两路。其中,90%的探测光由声光调制器(Acoustic Optical Modulator, AOM)调制为脉宽为100 ns的脉冲光,并施加50 MHz的移频。调制后的脉冲光经掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifire, EDFA)放大后,通过环形器(Optical circulator, CIR)端口1注入传感光纤。传感光纤中的RBS光由环形器端口3输出后,进入3 dB耦合器,与10%的本地参考光进行相干拍频。拍频信号由光电探测器(Balanced Photo-Detector, BPD)转换为电信号,并由数字采集卡(Data Acquisition Card, DAQ)以160 MSa/s的采样率转换为数字信号后传输至PC端,用于后续数据分析和处理。

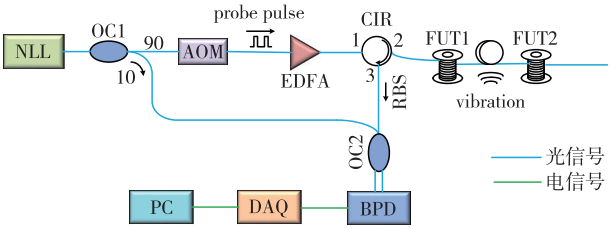


图1　相干探测型Φ-OTDR系统原理结构

1.2　信号解调与移动差分定位

在完成上述实验系统搭建后,采集0.1 s原始

RBS信号$S(t)$,表示为:

$$S(t)=A(t)\cos\left[2\pi\Delta ft+\varphi_t(t)\right] \tag{1}$$

式中,$A(t)$表示所采集的RBS信号幅值,Δf为AOM添加的频移,$A(t)$和$\varphi_t(t)$包含振动信号的信息。

如图2所示为正交(IQ)解调原理框图,经混频、滤波后得到$I(t)$和$Q(t)$:

$$I(t)=\frac{1}{2}A(t)\cos\left[\varphi_t(t)\right] \tag{2}$$

$$Q(t)=-\frac{1}{2}A(t)\sin\left[\varphi_t(t)\right] \tag{3}$$

振动信号的幅值$A(t)$和相位$\varphi_t(t)$可表示为:

$$A(t)=\sqrt{I^2(t)+Q^2(t)} \tag{4}$$

$$\varphi_t(t)=\arctan\left[\frac{Q(t)}{I(t)}\right]+2k\pi \tag{5}$$

式中,k为整数。

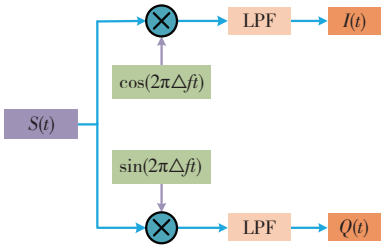


图2 正交解调原理框图

由公式(5)可知,经正交解调法得到的相位信号由arctan函数限制其值域为$[-\pi/2,\pi/2]$,需进行进一步扩展运算解卷绕以还原振动信号相位。由于相位信号易受相干衰落影响出现异常值,常选择幅值$A(t)$进行振动信号定位。

Φ-OTDR系统中以一定脉冲重复频率遍历传感光纤,可将幅值信号构成一个矩阵,包含空间信息和时间信息。其中"行"表示激光器单次脉冲在光纤中遍历的信号,即表示空间位置状态;"列"表示激光器不同探测光发射时间。对于长度为L的传感光纤,采集M次的幅值信号矩阵可表示为:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_1\\ \boldsymbol{X}_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{X}_M\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,L}\\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,L}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ x_{M,1} & x_{M,1} & \cdots & x_{M,L}\end{bmatrix} \tag{6}$$

则对于传统移动差分(Moving Differential, MD)定位算法,以间隔N差分后的振动定位曲线Z表示为:

$$Z=\sum_{i=1}^{i=M-N}\mathrm{abs}(\boldsymbol{X}_{i+N}-\boldsymbol{X}_i) \tag{7}$$

式中,abs表示取绝对值。最终曲线Z中变化较大的尖峰即为振动位置。

2 HO-SG-ACF算法原理

本文算法基本流程为:1)采集M组原始RBS光信号,经IQ解调后得出幅值信号$A(t)$;2)设定种群数量N_{ho},迭代次数T,对SG平滑算法的窗口大小W和多项式拟合结束P进行寻优;3)采用HO算法优化后的SG滤波器对幅值信号$A(t)$进行降噪,进而采用ACF实现振动定位。

2.1 SG-ACF振动定位算法

SG平滑滤波算法是一种常用的数据平滑算法,通过局部多项式拟合的方法实现信号的滤波降噪[14]。

由矩阵$\boldsymbol{A}$,对于传感光纤位置l处,依次从M条幅值曲线中取W条(W为奇数)作为SG平滑算法窗口,设多项式阶数为$P(P\leqslant W)$,则拟合后表示为:

$$x'_{m',l}=\sum_{p=0}^{P}a_p x_{m',l}^{p} \tag{8}$$

式中,$x'_{m',l}$表示在当前传感光纤位置l处,窗口W内第m'个数据点的拟合结果;a_p为第p个数据的系数,$x_{m',l}^{p}$为窗口内第m'个数据点,p为对应的阶数。

此时通过最小二乘法使系数a_p偏导数为0,即可获得最优的拟合结果。则经SG平滑后的幅值信号可表示为:

$$\boldsymbol{A}'=\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}'_1\\ \boldsymbol{X}'_2\\ \vdots\\ \boldsymbol{X}'_M\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x'_{1,1} & x'_{1,2} & \cdots & x'_{1,L}\\ x'_{2,1} & x'_{2,2} & \cdots & x'_{2,L}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ x'_{M,1} & x'_{M,2} & \cdots & x'_{M,L}\end{bmatrix} \tag{9}$$

为实现外界振动的定位,计算SG平滑后幅值信号位置l处的自相关函数后得到:

$$\boldsymbol{R}_{A'}=[\boldsymbol{R}_{x'_1},\boldsymbol{R}_{x'_2},\cdots,\boldsymbol{R}_{x'_L}]=$$

$$\begin{bmatrix}\sum_{i=0}^{M}x'_{i,1}x'_{i,1} & \sum_{i=0}^{M}x'_{i,2}x'_{i,2} & \cdots & \sum_{i=0}^{M}x'_{i,L}x'_{i,L}\\ \sum_{i=0}^{M-1}x'_{i,1}x'_{i+1,1} & \sum_{i=0}^{M-1}x'_{i,2}x'_{i+1,2} & \cdots & \sum_{i=0}^{M-1}x'_{i,L}x'_{i+1,L}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ x'_{i,1}x'_{i+M,1} & x'_{i,2}x'_{i+M,2} & \cdots & x'_{i,L}x'_{i+M,L}\end{bmatrix} \tag{10}$$

其中,最后计算矩阵$\boldsymbol{R}_{A'}$位置l处标准差得到最终定位曲线Z':

$$Z'=\{Z'_1,Z'_2\cdots,Z'_L\} \tag{11}$$

式中,$Z'_l=\sqrt{\frac{1}{M-1}\sum_{j=1}^{M}(R_{x'_{j,l}}-\mu_l)^2}$,$\boldsymbol{R}_{x'_{j,l}}=\sum_{i=0}^{M-j}x'_{l,l}x'_{j,l}$

表示矩阵$\boldsymbol{R}_{A'}$中l位置，第j组数据，μ_l表示该位置数据均值。曲线Z'中尖峰即为振动位置。

2.2 HO优化算法

SG平滑算法基于多项式拟合的方法，该算法能够在去除RBS信号噪声的同时保留信号有用信息。然而，SG平滑算法需要结合信号选取合适的窗口大小和多项式拟合阶数，窗口越大，信号越平滑，但存在有用信号中的高频细节被滤除的风险；多项式拟合阶数越高，信号局部特征越能得到充分保留，但随着阶数增大，信号中易出现过拟合的问题。因此，为平衡窗口大小和多项式拟合阶数的关系，本文引入HO优化算法，构建一种高频保留-过拟合抑制自适应机制。该算法融合全局与局部搜索机制，并采用Levy分布等策略，有效避免陷入局部最优，增强了探索与开发能力。在抑制过拟合的同时，该机制可自适应调整SG滤波器平滑窗口宽度，从而在保留有用信号的基础上，最大限度保持高频细节。HO算法[15]是Amiri等在2024年提出的一种新型元启发式算法，其流程如图3所示。

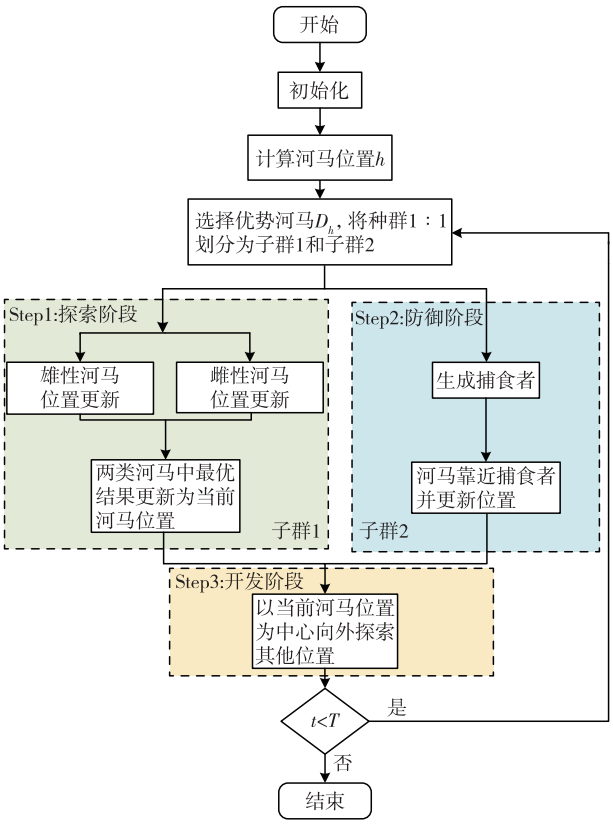


图3　HO算法流程图

在初始化阶段，设置种群规模N_{ho}=16，迭代次数T=100，待优化参数W取值范围为[1,M]，P取值范围为[1,5]，以信噪比为目标函数评估河马位置h并据此选择优势河马D_h。完成后将种群按1:1划分为子群1和子群2，分别进入探索和防御阶段的迭代更新。在探索阶段，子群1中河马个体被同时模拟为雄性河马和雌性河马，并通过比较雄性河马H^{Mh}和雌性河马H^{FMh}所对应的适应度值，选择其中较优的位置对当前河马个体位置h进行更新。H^{Mh}和H^{FMh}位置更新为：

$$H_{ij}^{Mh}=h_{ij}+r_1(D_h-y_1h_{ij}) \tag{12}$$

$$H_{ij}^{FBh}=\begin{cases}h_{ij}+\boldsymbol{\alpha}_j(D_h-y_2S_i), & t_p>0.6\\ h_{ij}+\boldsymbol{\beta}_j(S_i-D_h), & t_p>0.6 \text{ and } r_2>0.5\\ k_j^{\min}+r_3(k_j^{\max}-k_j^{\min}), & \text{else}\end{cases} \tag{13}$$

式中，$r_{1,2,3}$=rand(0,1)，表示0到1之间服从均匀分布的随机值；$y_{1,2}$=rand(1,2)；i=1,2,…,8，表示种群中第i只河马；j=1,2，表示需要寻优的参数；t_p=exp(t/T)表示选择概率，t为当前迭代次数；S_i为选择种群中随机数量河马平均的位置；$\boldsymbol{\alpha}_j$和$\boldsymbol{\beta}_j$表示随机向量；$k^{\max}$和$k^{\min}$表示寻优参数取值范围的上界和下界。

探索阶段中随机产生捕食者位置$H^{\Pr}$：

$$H_j^{\Pr}=k_j^{\min}+\bar{\omega}_j\cdot(k_j^{\max}-k_j^{\min}) \tag{14}$$

式中，$\bar{\omega}_j$表示0到1之间的随机变量。

探索阶段中子群2河马位置按下式进行更新：

$$h_{ij}^{\mathrm{HR}}=\begin{cases}V_j\cdot H_j^{\Pr}+o\cdot\left(\dfrac{1}{X_c}\right), & F_j^{\Pr}<F_i\\ V_j\cdot H_j^{\Pr}+o\cdot\left(\dfrac{1}{2\times X_c+\bar{\omega}_j}\right), & F_j^{\Pr}\geqslant F_i\end{cases} \tag{15}$$

$$o=\left[\frac{b}{(c-e\times\cos(2\pi g))}\right] \tag{16}$$

式中，V为具有Levy分布的随机变量；$X_c=\left|H_j^{\Pr}-h_{ij}\right|$，表示河马与捕食者之间的距离；$F$对应河马或捕食者的目标函数值；$b$=rand(2,4)；$c$=rand(1,1.5)；$d$=rand(2,3)；$g$=rand(−1,1)；

最终两阶段的河马子群合并进入开发阶段，此时河马位置更新为：

$$h_{ij}^{\mathrm{HR}}=h_{ij}+r_4\left[k_j^{\min}+\varepsilon\cdot(k_j^{\max}-k_j^{\min})\right] \tag{17}$$

式中，r_4=rand(0,1)；ε服从正态分布。

3　实验分析

为验证本文算法对外界振动和菲涅尔反射的定位能力，如图1所示，搭建了由两段ITU-T. G625D

24 km长单模光纤连接的光纤实验链路，并使用一段20 m长单模单芯FC/APC光纤跳线作为测试光纤。设置激光器脉冲重复频率为1.25 kHz，开展以下实验：

（1）分别在传感光纤24 km和48 km处连接20 m的测试光纤，通过振动台施加不同频率与振幅的周期性振动；

（2）将法兰一端松动产生菲涅尔反射。

上述实验均采集0.1 s（125条连续信号）的RBS幅值信号。

3.1 移动差分定位局限性

经解调后的归一化幅值曲线如图4所示。相较于邻近未加载振动区域，在传感光纤24 km处加载振动的RBS信号曲线时间轴变化更丰富，此时通过公式（7）和（11）计算，可将外界振动所在位置以尖峰呈现。同时观察在传感光纤约24.09 km处出现菲涅尔反射峰，且后续幅值功率降低。

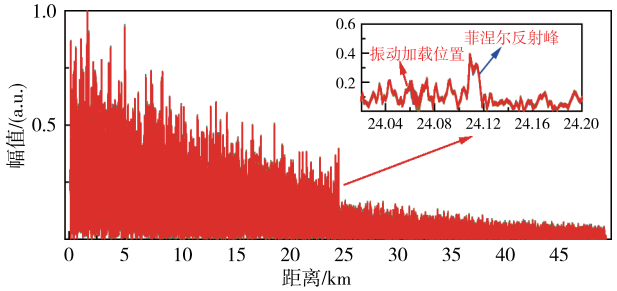


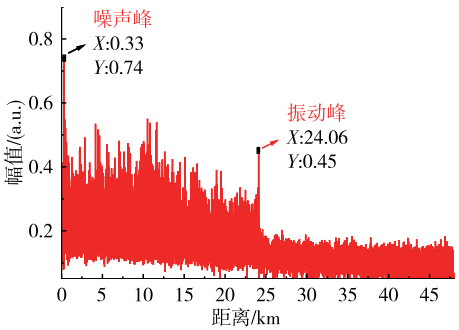
图4 采集RBS解调后幅值曲线

将上述采集的125组信号通过公式（7）的MD算法进行处理，结果如图5所示，曲线中尖峰即为振动信号所在位置。为准确说明振动信号定位质量，揭示噪声对振动定位曲线的影响，引入信噪比计算公式：

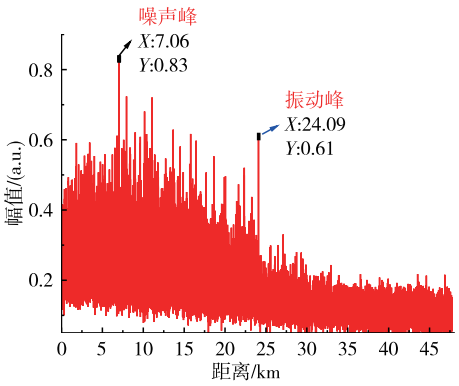
$$SNR = 10\lg\frac{A_s}{A_n} \tag{19}$$

式中，A_s表示振动定位信号的幅值，A_n表示噪声信号幅值。

图5（a）为传感光纤24 km处振动信号定位结果，曲线中24.06 km尖峰处为振动信号所在位置，其SNR为−2.16 dB，振动信号强度明显小于噪声，难以有效识别，容易引起振动漏判，因此移动差分定位法在信噪比低的情况下存在定位失效的风险。图5（b）为菲涅尔反射定位结果，曲线中24.09 km尖峰处为菲涅尔反射所在位置，SNR为−1.37 dB，峰值强度小于噪声峰，可知移动差分定位法在信噪比低的情况下难以识别菲涅尔反射。



（a）光纤24 km处加载振动信号



（b）光纤24 km菲涅尔反射

图5 移动差分定位效果

3.2 HO-SG-ACF定位算法性能分析

首先验证HO算法有效性，根据采集信号，设定HO算法寻优参数边界$W\in[1,125]$，$P\in[1,5]$，同时为充分保留信号特征，取ACF滞后阶数为125，最终以信噪比为目标函数将该算法与粒子群优化算法（PSO）、灰狼优化算法（GWO）进行对比分析。如图6所示，三种算法的收敛特性呈现显著差异：PSO算法收敛速度慢且陷入次优解；GWO算法初期收敛速度快，但出现了局部最优问题；HO算法具有最好的收敛速度和收敛精度，展现出高效的全局搜索能力。因此，本文采用HO优化算法。

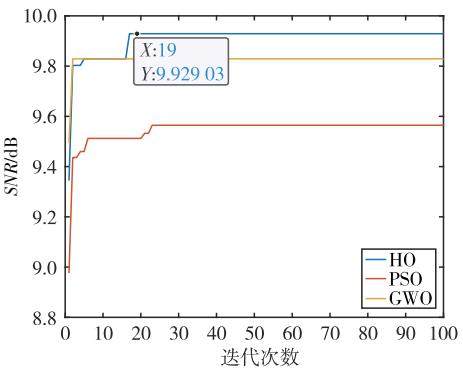
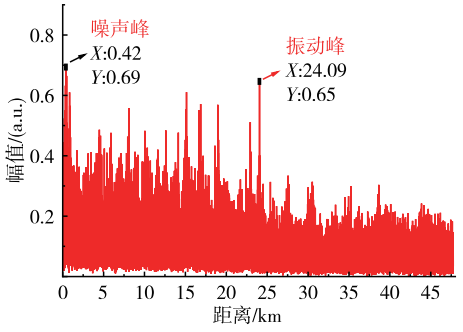
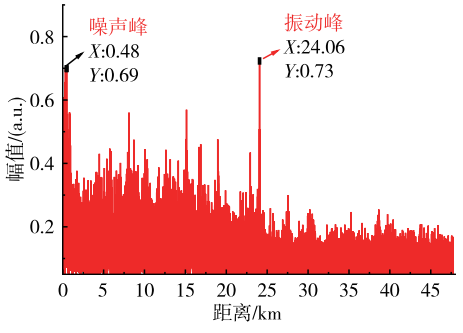


图6 HO，PSO，GWO算法迭代对比图

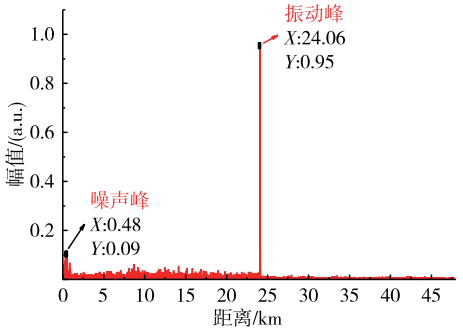
在搭建的实验系统中，使用同一组实验数据分别使用移动方差平均（Moving Variance Averaging，MVA）法、连续平均-移动差分（Moving Averaging - Moving Differential，MA-MD）法与本文算法进行对比分析。实验中使用振动台产生振动频率为 20 Hz，振幅为 0.1 mm 的振动定位结果如图 7 所示，本文所提出的 HO-SG-ACF 算法效果最好，能够有效实现低信噪比下的振动定位，*SNR* 为 9.93 dB；连续平均和移动差分法次之，其 *SNR* 为 0.25 dB；移动方差平均法效果最差为 −1.97 dB。



（a）MVA 法



（b）MA-MD 法



（c）HO-SG-ACF 法

图 7　振动定位性能比较

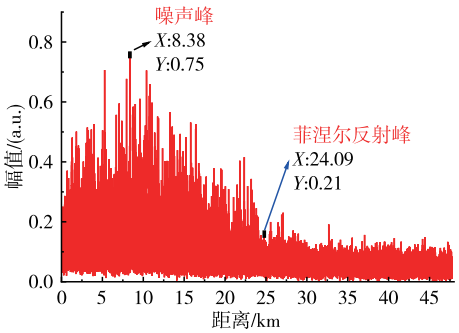
表 1 展示了四种方法的定位曲线信噪比。结果表明，在 48 km 的光纤链路中，本文方法的信噪比提升均显著优于其他三种方法，且在振动幅度较小时，该优势更为突出。

表 1　定位算法对比

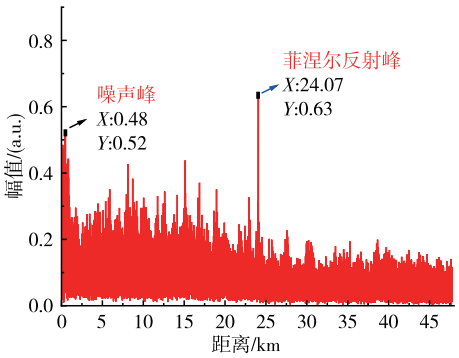
振动位置	振动频率/幅度	*SNR*/dB			
		MD	MVA	MA-MD	HO-SG-ACF
24 km	20 Hz/0.1 mm	−2.16	−1.97	0.25	9.93
	20 Hz/0.3 mm	1.12	6.17	2.05	14.69
	80 Hz/0.1 mm	−2.45	−3.69	0.18	7.15
	80 Hz/0.3 mm	0.12	2.22	2.11	5.93
48 km	20 Hz/0.1 mm	−4.14	−4.95	−3.94	5.07
	20 Hz/0.3 mm	−2.88	−6.43	−1.08	8.50

3.3　菲涅尔反射峰检测性能分析

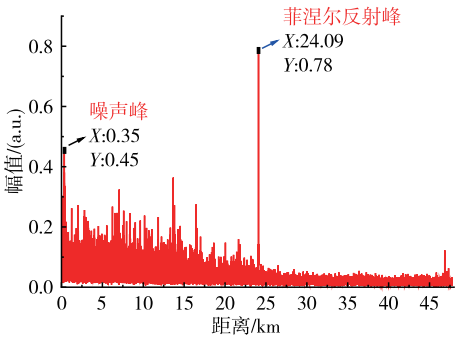
为验证本文算法对菲涅尔反射峰的检测能力，将图 4 中幅值信号使用本文方法，MVA，MA-MD 进行对比分析，结果如图 8 所示。本文算法明显优于其他算法，能够有效检测菲涅尔反射峰，其 *SNR*



（a）MVA 法



（b）MA-MD 法



（c）HO-SG-ACF 法

图 8　菲涅尔反射对比

为2.34 dB；MA-MD法次之，其*SNR*为0.83 dB；MVA法效果最差为－5.53 dB。

4 结论

针对Φ-OTDR系统受噪声和光功率衰减等因素影响而出现振动信号定位质量较差等问题，提出一种基于HO-SG-ACF的振动定位方法。该方法通过HO算法自适应选取SG滤波的窗口大小和多项式阶数，有效克服了信噪比提升与移动窗口选取方面的局限性。设置光纤链路24 km与48 km处外界振动和法兰松动实验，并将所提方法与MD法、MA-MD法、MVA法进行对比。结果表明，所提方法信噪比提升效果最好，同时可有效定位菲涅尔反射位置，为法兰松动等故障识别提供一种新思路。

参考文献：

[1] Liu S, Yu F, Hong R, et al. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(3): 200078.

[2] 胡祖翰，钱 恒，石先明，等. 相干衰落抑制Φ-OTDR的分布式光纤周界安防技术[J]. 西南交通大学学报，2024，59(3)：564-571.
Hu Zuhan, Qian Heng, Shi Xianming, et al. Distributed optical fiber perimeter security technology based on Φ-OTDR with interference fading suppression[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(3): 564-571.

[3] 李 琅，蒋忠胜，胡洲畅，等. 基于CNN-Transformer的DAS管道泄漏信号识别方法[J]. 光学学报，2025，45(10)：1012001.
Li Lang, Jiang Zhongsheng, Hu Zhouchang, et al. Pipeline leak signal recognition method based on CNN-transformer for DAS[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(10): 1012001.

[4] Ding Z W, Zhang X P, Zou N M, et al. Phi-OTDR based on-line monitoring of overhead power transmission line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(15): 5163-5169.

[5] 马国明，秦炜淇，王思涵，等. 海底电缆状态分布式光纤监测技术研究综述[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：370-387.
Ma Guoming, Qin Weiqi, Wang Sihan, et al. Summary of distributed optical fiber monitoring technology for submarine cable status[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 370-387.

[6] 张旭苹，张益昕，王 亮，等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报，2024，44(1)：0106001.
Zhang Xuping, Zhang Yixin, Wang Liang, et al. Present situation and future of research and application of distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106001.

[7] 赵航航，张明红，范 敏，等. 分布式光纤多参数融合传感系统研究[J]. 半导体光电，2024，45(6)：1024-1030.
Zhao Hanghang, Zhang Minghong, Fan Min, et al. Research on distributed fiber optic multi-parameter fusion sensing system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(6): 1024-1030.

[8] 魏 源，王夏霄，邬战军，等. 一种减小Φ-OTDR光纤扰动传感系统中频率漂移误差的新定位算法[J]. 半导体光电，2018，39(5)：733-736，741.
Wei Yuan, Wang Xiaxiao, Wu Zhanjun, et al. A new localization algorithm to reduce the frequency drift error in Φ-OTDR optical fiber sensing system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(5): 733-736, 741.

[9] 管彦周，万生鹏，程亚楠，等. 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[J]. 仪器仪表学报，2022，43(10)：233-240.
Guan Yanzhou, Wan Shengpeng, Cheng Yanan, et al. Research on the denoising algorithm of phase sensitive optical time domain reflectometry based on the moving variance average algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 233-240.

[10] Zhu X, Zhao S, Li X, et al. Optimization of the moving averaging - moving differential algorithm for Φ-OTDR[J]. Applied Optics, 2022, 61(19): 5633-5639.

[11] 沈 伟，戴静怡，戴 勇，等. 基于区域划分和边缘检测的Φ-OTDR定位方法[J]. 激光与光电子学进展，2024，61(17)：86-92.
Shen Wei, Dai Jingyi, Dai Yong, et al. Φ-OTDR localization method based on region segmentation and edge detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 86-92.

[12] Sha Z, Feng H, Zeng Z. Phase demodulation method in phase-sensitive OTDR without coherent detection[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4831-4844.

[13] Chen M, Zhu R, Luo J, et al. Distributed vibration sensor with a high strain dynamic range by harmonics analysis[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 159: 109006.

[14] 涂兴华，栾小晨，王 战. 吸收光谱线二次谐波的频率分解和SG滤波复合降噪[J]. 光谱学与光谱分析，2025，45(5)：1209-1216.
Tu Xinghua, Luan Xiaochen, Wang Zhan. Denoising of second harmonic signals of the absorption spectrum using the frequency decomposition combined with the savitzky-golay filtering [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(5): 1209-1216.

[15] Amiri M H, Mehrabi Hashjin N, Montazeri M, et al. Hippopotamus optimization algorithm: a novel nature-inspired optimization algorithm[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 5032.

作者简介：

尚秋峰(1968－)，女，博士，教授，主要研究方向为光电子与光传感；

陈冰桦(2002－)，男，硕士研究生，主要研究方向为分布式光纤传感。