

文章编号:1001-5078(2025)01-0060-07

· 激光应用技术 ·

## 激光雷达回波信号多尺度增强方法研究

王芳<sup>1,2</sup>, 宋斌<sup>3</sup>, 袁浩<sup>1,3</sup>

(1. 郑州西亚斯学院 计算机与软件工程学院, 河南 新郑 451150; 2. 河南省智能制造数字孪生工程研究中心, 河南 新郑 451150;  
3. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 由于目标物体的形状、大小、距离等因素的影响, 激光雷达回波信号中的特征信息会分布在不同尺度上, 且信号经历多径效应后, 导致信号相位扭曲和叠加, 使单纯依靠小波阈值对整体回波信号进行增强的思路变得过于简单, 并且信号的非线性也影响信号增强的效果。提出一种基于 CEEMDAN 联合小波阈值算法的激光雷达回波信号多尺度增强方法。该方法首先利用形态滤波器去除激光雷达回波信号中含有脉冲、间歇等间断事件; 再基于上述处理结果利用 CEEMDAN 算法对激光雷达回波信号实施有效的尺度分解, 以有效地将复杂非线性信号分解成若干个 IMF 分量, 提高信号处理的准确性; 利用相关系数指标, 获取回波信号中噪声以及信号之间的 IMF 临界点, 使用小波阈值算法对其主导 IMF 分量实施去噪处理, 根据处理结果实现信号的多尺度增强。实验结果表明, 利用该方法开展回波信号增强时, 信号去噪效果好、增强性能高。

**关键词:** CEEMDAN 分解; 小波阈值; 激光雷达通信; 回波信号; 多尺度; 增强算法设计

**中图分类号:** TN958; TN911.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.009

## Research on multi-scale enhancement methods for LiDAR echo signals

WANG Fang<sup>1,2</sup>, SONG Bin<sup>3</sup>, YUAN Hao<sup>1,3</sup>

(1. School of Computer and Software Engineering, Sias University, Xinzheng 451150, China;  
2. Henan Intelligent Manufacturing Digital Twin Engineering Research Center, Xinzheng 451150, China;  
3. School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003 China)

**Abstract:** Due to the shape, size, distance and other factors of the target object, the feature information in the LiDAR echo signal is distributed at different scales, and the signal undergoes multipath effects, which leads to the signal phase distortion and superposition, making the idea of relying solely on wavelet thresholding to enhance the overall echo signal too simple. Moreover, the nonlinearity of the signal also affects the effectiveness of signal enhancement. In this paper, a multi-scale enhancement method for LiDAR echo signals based on the CEEMDAN joint wavelet threshold algorithm is proposed. Firstly, a morphological filter is used to remove intermittent events such as pulses and intermittency from the LiDAR echo signal. Then, based on the above processing results, the CEEMDAN algorithm is used to implement effective scale decomposition of the LiDAR echo signal to effectively decompose the complex nonlinear signal into several IMF components, and to improve the accuracy of signal processing. Finally, the correlation coefficient index is used to obtain the IMF thresholds between the noise and the signals in the echo signal, and the wavelet thresholding

**基金项目:** 河南省 2021 年省级民办教育发展专项资金资助项目 (No. 豫财教[2021]16 号软件工程专业);

2023 年河南省科技厅科技攻关项目 (No. 232102210137) 资助。

**作者简介:** 王芳 (1983 -), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为计算机应用、图像处理技术。E-mail: wf5454545@yeah.net

**收稿日期:** 2024-05-28; **修订日期:** 2024-06-18

algorithm is used to denoise the dominant IMF components, and the multi-scale enhancement of the signal is realized according to the processing results. The experimental results show that the signal denoising effect is good and the enhancement performance is high when the echo signal enhancement is carried out using this method.

**Keywords:** CEEMDAN decomposition; wavelet threshold; LiDAR communication; echo signal; multi scale; enhanced algorithm design

## 1 引言

激光雷达作为一种主动式遥感技术,近年来技术已经逐渐趋于成熟阶段。且其凭借独特的技术优势,在现代科技领域中占据了举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。激光雷达核心技术特点主要体现在高亮度性、高方向性、高单色性和高相干性等方面。这些特性使得激光雷达能够在复杂的环境条件下,实现精确、高效的目标探测和识别<sup>[2-3]</sup>。然而,激光雷达回波信号往往受到各种噪声和干扰的影响,导致信号质量下降,进而影响到后续的目标检测与识别性能。因此,如何有效地增强激光雷达回波信号的强度,已经成为当前科研领域的重要课题。

目前,在雷达信号处理领域,研究者们正不断探索新的方法来提高信号处理的效率和准确性。例如,周丽军<sup>[4]</sup>等人首先在考虑信号临近测点关联基础上,通过变换算法完成信号相关特征的提取;再由此重构目标图像,并对图像变换分数域;最后使用分数阶傅里叶变换算法对信号直达波以及噪声实施有效抑制,实现雷达信号的增强。在该方法中,由于多径效应的影响,激光雷达信号的能量会分散在多个不同的传播路径上,导致信号的能量密度降低。这种能量分散现象会使得接收到的信号信噪比(SNR)降低,即信号中的有用信息相对于噪声的强度减小。当使用分数阶傅里叶变换(FrFT)算法对信号中的直达波和噪声进行抑制时,如果信号的信噪比过低,那么抑制效果可能会受到显著影响。廖智勇<sup>[5]</sup>等人首先针对信号展开预处理,结合信号增强模型,获取信号和真实样本;再以此构建调控分布模型,将信号样本输入模型对实施调控分布,实现信号质量提升。该方法在处理激光雷达回波信号时,由于存在多个反射面,会产生多个反射路径。这些路径上的信号会在接收器处叠加,导致信号相位扭曲和叠加。这种失真使得信号中的原始特征信息变得难以辨认,甚至可能产生误导性的信息。因此,在构建调控分布模型时,如果未能有效处理多径效应带来的失真,那么模型的性能将受到严重影响。李杨<sup>[6]</sup>等人

首先通过激活函数优化神经网络,将信号特征图置入神经网络框架中剔除噪声特征;联合U-Net网络中替换阈值函数,提高去噪后信号的信噪比,实现信号的增强。在该方法中,由于激光雷达回波信号中的特征信息分布在不同尺度上,单一尺度的神经网络框架可能无法完全捕获所有重要的特征。特别是在处理具有复杂反射面和多径效应的信号时,重要的细节信息可能会被忽略或丢失。Wang Q<sup>[7]</sup>等人首先采用自适应投影学习算法优化RBF神经网络;再利用优化后RBF神经网络,通过自适应投影学习功能提取信号的边缘图像和非边缘图像,最后将非边缘图像作为图像噪声展开剔除处理,实现信号的有效增强。在该方法中,当信号经历多径效应时,不同路径的信号会在接收器处叠加,导致信号相位扭曲和叠加。这种失真会破坏信号中的原始特征信息,使得神经网络难以准确提取和识别这些特征,这将对后续的噪声剔除和信号增强产生不利影响。

为了克服激光雷达回波信号在尺度增强过程中遇到的挑战,特别是在处理特征信息多尺度分布和多径效应导致的相位扭曲和叠加时,本研究提出了一种基于完备集合经验模态分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)联合小波阈值算法的激光雷达回波信号多尺度增强方法。

## 2 基于形态滤波器的雷达回波信号中断事件去除

开展激光雷达回波信号多尺度增强前,充分考虑激光雷达通信过程中,信号会经历多径效应,导致信号的相位扭曲和叠加,使回波信号变得复杂并且非线性,影响信号处理的准确性,利用CEEMDAN算法对激光雷达回波信号实施有效的多尺度分解<sup>[8-9]</sup>。由于CEEMDAN算法在处理激光雷达回波信号时,会产生模态混叠情况,从而对信号造成信号失真情况。而CEEMDAN算法分解筛分由信号中极值点分布决定的,回波信号通信过程中环境因素影响会使激光雷达回波信号中存在脉冲、间歇等信号中断事件。该中断事件的发生会导致回波信号出现

局部极值点异常,使信号极值点分布不均匀。因此,激光雷达回波信号开展 CEEMDAN 分解时,需要对信号实施去除间断时间,提升激光雷达信号在 CEEMDAN 分解时的分解效果。所以在 CEEMDAN 分解前,需要借助形态滤波器对激光雷达回波信号中的间断事件展开有效抑制。

抑制过程中需要充分考虑下列问题:

问题 1: 间断事件去除时,如何依据基本形态运算特点将其以组合形式构成形态滤波器。

问题 2: 如何选取合适结构元素,使后续信号分解效果更加优良。

### 2.1 选取运算方式

使用形态滤波器展开信号间断事件抑制时,滤波器一般有形态开闭计算以及腐蚀、膨胀运算几种形式。其中,形态开运算能够有效抑制回波信号中峰值脉冲噪声,滤除信号的上边缘毛刺以及孤立点;形态闭运算主要抑制信号低谷脉冲噪声,去除下边缘毛刺以及孤立点。与此同时,形态滤波的平滑功能,会平滑地完成信号间断事件滤除过程。为了同时利用形态开运算和闭运算的优点,可以构建 1 个组合的形态滤波器,即采用形态开、闭计算的级联形式。数学公式如下:因此,间断事件滤除时,采用形态开、闭计算的级联形式构建一个组合的形态滤波器  $y(k)$ 。

$$y(k) = \frac{foc_m + fco_m}{2} \quad (1)$$

式中, $y(k)$  表示形态开运算的结果; $foc_m$  表示形态闭运算的结果; $fco_m$  表示组合形态滤波器的输出。

通过使用这种组合形态滤波器,可以在抑制信号间断事件的同时,保留信号的原始特征信息,实现更有效的信号处理。

### 2.2 选取结构元素

滤波器结构元素设计时需要在充分考虑信号复杂性基础上,选取合适结构元素作为滤波器的结构元素。

由于激光雷达回波信号中会包含多种噪声模式,若选取单一的尺度结构元素,会影响后续的噪声滤除效果。综合考虑信号中的脉冲和间歇等特性可知,这些特征主要存在于分布式信号的相邻极点间。因此可依据局部极值点来确定滤波器的结构元素,从而自适应地形成 1 组与原信号尺度相匹配的滤

波器。

选取滤波器结构元素时,具体流程如下:

步骤 1: 首先对原始激光雷达回波信号极值点分布,获取信号相邻极值点间距最大值  $\max\_distance$  以及最小值  $\min\_distance$ :

$$\max\_distance = \max(\text{distance}) \quad (2)$$

$$\min\_distance = \min(\text{distance}) \quad (3)$$

步骤 2: 对取得信号相邻极值点最大值、最小值展开求奇计算,根据计算结果,设定最小值到最大值之间步长为 2,以此生成 1 组长度尺度  $\text{length\_scales}$ ,作为滤波器的结构元素尺度:

$$\text{length\_scales} = \text{list}(\text{range}(\min\_distance\_even, \max\_distance\_even + 1, 2)) \quad (4)$$

完成结构元素选取后,根据选取的结构元素即可实现形态滤波器的构成,通过形态滤波器即可实现激光雷达回波信号的间断事件剔除。

## 3 激光雷达回波信号多尺度增强

基于上述信号间断事件剔除结果,使用 CEEMDAN 联合小波阈值算法,完成激光雷达回波信号的有效多尺度增强。

### 3.1 信号 CEEMDAN 多尺度分解

在剔除激光雷达回波信号中的间断事件后,这些信号可能仍然包含多种频率成分。直接对原始信号进行处理可能会因为不同频率成分之间的干扰而导致模式混淆。为了解决这个问题,本研究提出采用 CEEMDAN 分解方法,该方法能够将激光雷达回波信号分解为多个固有模态函数(IMF)分量。每个 IMF 分量都具有特定的频率范围和振幅特征,这种精细的频域划分使得后续过程能够对信号中的不同频率成分进行独立且准确的分析和处理。

激光雷达回波信号的 EEMD 分解流程如下:

步骤 1: 首先获取激光雷达回波信号,并经上述形态滤波器  $y(k)$  进行处理,获得处理后的信号  $x(t)$ ,接着初始化 CEEMDAN 分解算法总体平均次数  $N$ ;

步骤 2: 再在初始化基础上,设定加入激光雷达回波信号的白噪声加入数值幅度,并令  $i = 1$ ;

步骤 3: 将设定添加幅度的白噪声  $a_i(t)$  置入激光雷达回波信号  $x(t)$  上,生成新的信号  $x_i(t)$ ,过程如下式所示:

$$x_i(t) = x(t) + a_i(t) \quad (5)$$

式中,信号中第  $i$  次添加的加性白噪声序列描述成  $a_i(t)$  形式,且  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

步骤4:对所有具备噪声的激光雷达回波信号  $x_i(t)$  展开 EMD 多尺度分解,获取不同信号的 IMF 分量和,结果如下式所示:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^J b_{i,j}(t) + r_{i,j}(t) \quad (6)$$

式中,残余函数描述成  $r_{i,j}(t)$  形式,IFM 数量描述成  $J$  形式,第  $i$  次加入白噪声后分解出回波信号  $j$  个 IMF 分量描述成  $b_{i,j}(t)$  形式。

步骤5:对上述流程实施  $N$  次迭代,将白噪声信号通过若干次分解加入回波信号中,建立激光雷达回波信号的 IMF 集合  $[\{b_{1,j}(t), b_{2,j}(t), \dots, b_{N,j}(t)\}]$ ,并利用统计平均值计算方法,对  $[\{b_{1,j}(t), b_{2,j}(t), \dots, b_{N,j}(t)\}]$  实施集合平均计算,通过计算结果捕捉回波信号最终信号 IMF 分量,过程如下式所示:

$$b_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_{i,j}(t) \quad (7)$$

步骤6:通过上述计算结果,获取激光雷达回波信号的最终多尺度分解结果,结果如下式所示:

$$x'(t) = \sum_j b_j(t) + r(t) \quad (8)$$

式中,信号残余分量描述成  $r(t)$  形式。

通过上述信号多尺度分解结果,将其中阶数小的 IMF 分量看作回波信号低频分量,即信号主导 IMF 分量,阶数大的 IMF 分量看作信号高频分量(即为噪声主导)<sup>[10-11]</sup>。因此可利用相关系数指标,获取回波信号中噪声以及信号之间的 IMF 临界点,相关系数  $\zeta(x, I_i)$  计算过程如下式所示:

$$\zeta(x, I_i) = \frac{\sum_{n=1}^T [x(n) - \bar{x}][I_i(n) - \bar{I}_i]}{\sqrt{\sum_{n=1}^T [x(n) - \bar{x}]^2 \sum_{n=1}^T [I_i(n) - \bar{I}_i]^2}} \quad (9)$$

式中,具备噪声的激光雷达回波信号描述成  $x(n)$  形式,  $x(n) \in x'(t)$ , 噪声信号均值描述成  $\bar{x}$  形式,信号第  $i$  层 IMF 分量均值描述成  $\bar{I}_i$  形式。

通过上述计算结果即可获取激光雷达回波信号多尺度 IMF 分量相关系数,通过差值计算获取差分曲线,其中第一个大于 0 峰值点即为噪声与信号 IMF 分量临界点。

### 3.2 不同尺度下的激光雷达回波信号增强

在激光雷达回波信号处理中,多尺度 IMF 分量

通常包含了信号的主要信息,但也可能受到噪声的干扰。通过使用小波阈值算法对这些多尺度 IMF 分量进行增强处理,可以有效地提高信号质量,为后续的目标检测、定位和跟踪等应用提供更准确的数据基础。由于噪声通常在高频细节部分具有较大能量,而信号的重要特征往往集中在低频或特定尺度上,因此,通过设置一个合适的阈值,将低于阈值的小波系数视为噪声并置零或减小其幅度,保留或适度调整高于阈值的系数,就可以实现信号的细节恢复和增强处理。

#### 3.2.1 阈值选取

阈值选取过程中,需要针对信号分解层级中噪声分布情况,选取阈值过程如下式所示:

$$\gamma_j = \sigma_j \sqrt{2 \log_2 M / \ln(j+1)} \zeta(x, I_i) \quad (10)$$

式中,信号分解层数描述成  $j$  形式;信号长度描述成  $M$  形式;噪声标准差描述成  $\sigma_j$  形式; $j$  层小波系数阈值描述成  $\gamma_j$  形式。

#### 3.2.2 建立阈值函数

完成阈值获取后,根据确定阈值建立阈值函数,阈值函数建立时对软硬阈值函数展开改进,完成小波阈值函数  $W_{j,k}$  的建立,过程如下式所示:

$$W_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} \left[ 1 - \frac{\phi^{2a}}{u^{2a} e^{b(|w_{j,k}| - \gamma_j)^2}} \right]; & |w_{j,k}| \geq \gamma_j \\ 0; & |w_{j,k}| < \gamma_j \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u = (e^{w_{j,k}} + e^{-w_{j,k}}) / 2 \\ \phi = (e^{\gamma_j} + e^{-\gamma_j}) / 2 \end{cases} \quad (12)$$

式中,分解后信号第  $j$  个尺度下  $k$  个小波系数描述成  $w_{j,k}$  形式,调节因子描述成  $a, b$  形式,小波系数逼近增量描述成  $u$  形式,逼近增量描述成  $\phi$ , 对应增量系数表述成  $e$  形式。

完成阈值函数建立后,通过阈值函数对信号中占主导 LMF 分量实施增强处理。最后,利用处理各层的 LMF 分量以及残差根据上述公式(6)重构激光雷达回波信号,实现信号的有效增强。

## 4 实验

为了验证上述激光雷达回波信号增强方法的整体有效性,需要对此方法测试。

分别采用基于 CEEMDAN 联合小波阈值算法的激光雷达回波信号多尺度增强(所提方法)、基于空间相关性分数域的探地雷达回波信号增强方法研究

(文献[3]方法)、基于软阈值函数的深度学习磁信号去噪算法(文献[5]方法)开展信号增强处理,以此测试上述方法在安增强时的有效性。

#### 4.1 实验环境设置

实验环境如图1所示。在实验过程中,采用535 nm 啁啾强度对激光器展开调制,将调制后激光器作为光源,设定激光器的调频范围在[10 MHz ~ 20 GHz]区间内,激光最大功率输出值在2.55 W左右;激光雷达回波信号通过PMT探测器采集,利用上述3种方法对其实施回波信号增强,最后利用MATLAB仿真软件对去噪信号展开增强性能检测,以此验证不同方法的实际信号增强效果。

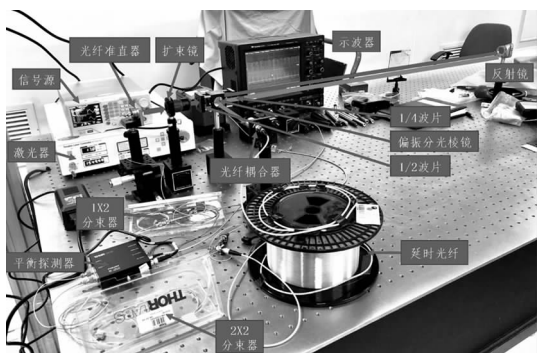


图1 实验环境

Fig.1 Experimental environment

#### 4.2 实验指标

开展激光雷达回波信号增强时,选取峰值信噪比  $R_{SNR}$  以及均方误差  $E_{rms}$  作为评价指标,通过3种方法对比测试结果,验证不同方法的实际信号增强性能。评价指标获取过程如下:

$$\begin{cases} E_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x'(n) - x(n)]^2 \\ R_{SNR} = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_{n=1}^N x^2(n)}{\sum_{n=1}^N [x'(n) - x(n)]^2} \right\} \end{cases} \quad (13)$$

式中,原始回波信号表述成  $x(n)$  形式,增强后信号表述成  $x'(n)$  形式,信号数量用  $N$  表述。其中均方误差主要衡量信号增强后与原始信号之前相似程度,峰值信噪比主要衡量方法的降噪能力,测试时计算出的均方误差越小、峰值信噪比值越高,说明算法的信号增强性能越好。

接着,在上述测试的基础上,主观呈现各方法对实际激光雷达回波信号增强效果,完成对方法实际增强效果的验证。

#### 4.3 实验结果及分析

##### 4.3.1 所提方法激光雷达回波信号 IMF 分解效果测试

在利用所提方法开展激光雷达信号增强时,对信号进行 CEEMDAN 多尺度分解是整个增强过程的核心步骤。若分解结果与实际信号的 IMF 分量存在偏差,那么后续的增强效果将直接受到影响。为了确保增强过程的准确性,需要对所提方法在信号增强前对回波信号 IMF 分量进行分解,分解结果如图2所示。

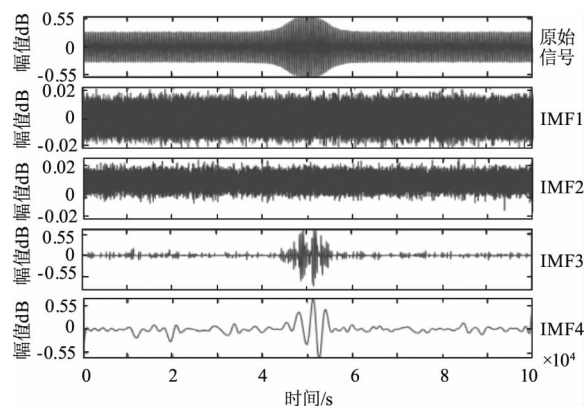


图2 信号 IMF 分量多尺度分解

Fig.2 Multiscale decomposition of IMF components in the signal

从图2所展示的实际信号 IMF 分量可以看出,所提方法能够准确地识别并提取出原始信号中的多个固有模态函数(IMF)分量,这些分量代表了信号中不同频率尺度的成分。

为了验证分解结果的准确性,本实验进一步将所有 IMF 分量进行了重构,以恢复出原始信号。图3展示了所提方法回波信号 IMF 分量重构的结果。

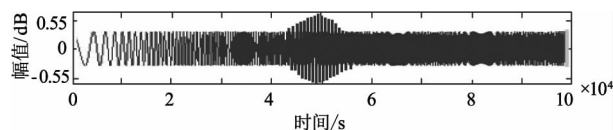


图3 所提方法回波信号 IMF 分量重构结果

Fig.3 The reconstruction results of the IMF component of the echo signal using the proposed method

从图3中可以看出,重构后的信号在波形和幅值上与原始信号极为接近。这一结果充分证明了本文所提方法在信号分解与重构方面的准确性和有效性。具体而言,本文方法的 CEEMDAN 多尺度分解策略能够准确地根据原始信号的频率特性,将信号分解为一系列具有不同频率尺度的 IMF 分量。这种分解方式不仅能够保留原始信号中的关键信息,而且能够去除噪声和干扰,为后续的信号增强提供

了有力的支持。此外,通过对所有 IMF 分量的重构,进一步验证了分解结果的准确性。重构信号与原始信号的高度一致性,说明本文所提方法在信号分解方面具有较高的精度和可靠性。这不仅为后续的信号增强提供了有力的保障,也为类似信号的处理提供了有价值的参考。

#### 4.3.2 增强性能测试

利用所提方法、文献[3]方法以及文献[5]方法开展回波信号增强时,各方法峰值信噪比  $R_{SNR}$  以及均方误差  $E_{rms}$  的结果如表 1 所示。

表 1 不同方法回波信号增强性能测试结果

Tab.1 Test results of echo signal enhancement performance using different methods

待测试信号数据	评价指标	增强效果测试结果		
		所提方法	文献[3]方法	文献[5]方法
100	$E_{rms}/\%$	0.011	0.113	0.124
	$R_{SNR}$	33.69	30.44	29.78
200	$E_{rms}/\%$	0.015	0.125	0.168
	$R_{SNR}$	32.87	29.22	28.54
300	$E_{rms}/\%$	0.132	0.158	0.179
	$R_{SNR}$	32.22	28.64	27.91
400	$E_{rms}/\%$	0.155	0.211	0.237
	$R_{SNR}$	31.45	27.02	26.99

分析表 1 可知,当实施信号增强时,所提方法的  $R_{SNR}$  值可达到 30 以上,且  $E_{rms}$  值可控制在 0.16% 以下。相比于另外两种对比方法,所提方法具有较好的信号增强性能。这是由于在信号处理前,所提方法通过形态滤波器对信号进行预处理有效地去除这些中断事件,使信号更加平滑和连续,为后续的信号增强提供了更好的输入数据。因此,在后续的信号增强阶段,该方法能够更有效地提升信号质量,明显优于其他两种方法。而文献[3]方法和文献[5]中的方法由于在信号增强过程中未能充分考虑信号脉冲等中断事件的影响,导致在测试信号增强性能时,结果不够理想。

#### 4.3.3 实际增强效果测试

利用所提方法、文献[3]方法以及文献[5]方法开展回波信号增强时,对不同方法的实际激光雷达回波信号增强效果展开检测,检测结果如图 4 所示。通过对比增强前后信号的幅值波动情况,可以评估各种方法的增强效果。若某一方法增强后的信号幅

值波动明显减小,表现出更高的稳定性,则可以认为该方法的增强效果较好。

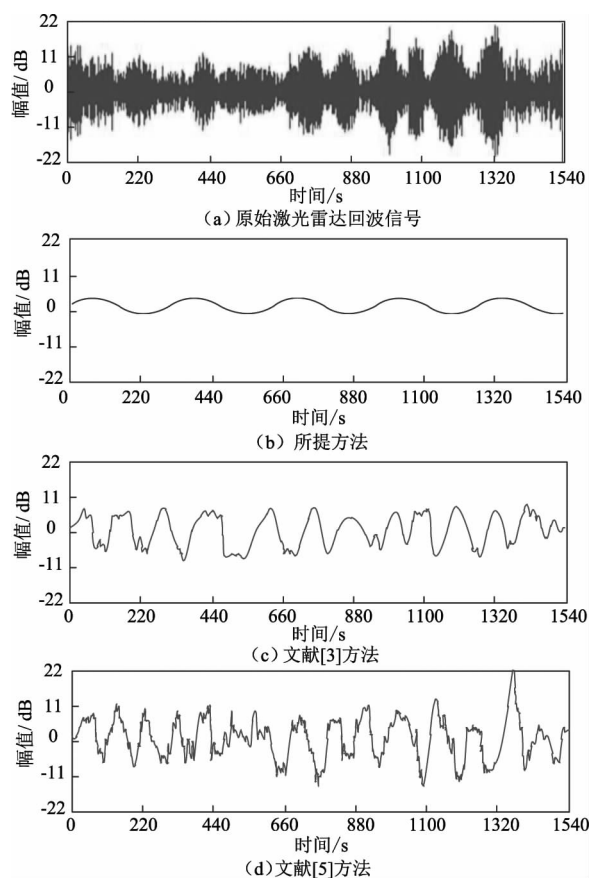


图 4 不同方法的实际回波信号增强效果测试结果

Fig.4 Test results of actual echo signal enhancement effects using different methods

分析图 4 可知,在激光雷达回波信号增强的过程中,所提出的方法在信号去噪和增强效果上表现出显著的优势。相较于其他两种方法,本方法不仅去噪效果显著,而且能够显著增强激光雷达回波信号的稳定性,其波形呈现出极高的稳定性,幅值波动极小。相比之下,文献[3]方法和文献[5]方法在信号增强效果上的表现较为逊色,其波形稳定性较差,幅值波动较大,其中文献[5]方法的增强效果最差。由此可认定,利用所提方法开展激光雷达回波信号增强时,增强效果好、性能高。

## 5 结语

针对传统方法在处理复杂非线性信号时的不足,本文提出了一种基于 CEEMDAN 联合小波阈值算法的激光雷达回波信号多尺度增强方法。该方法不仅通过形态滤波器有效剔除了回波信号中的脉冲、间歇等中断事件,消除了其对信号质量的影响,而且利用 CEEMDAN 算法对信号进行了精

细的尺度分解,将复杂的非线性信号分解成多个 IMF 分量,为后续的去噪和增强提供了更加精确的基础。通过相关系数指标精准识别信号与噪声之间的临界点,并结合小波阈值算法对主导 IMF 分量进行去噪处理,实现了信号的多尺度增强。实验结果表明,该方法在信号去噪和增强方面均取得了显著效果,有效提升了激光雷达回波信号的质量和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] Cui Gengshen, Qiu Dexuan, Kuang Bing, et al. The segment feature matching method for LiDAR based on Kalman fusion[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(3): 380 - 388. (in Chinese)  
崔更申, 邱德宪, 匡兵, 等. 基于卡尔曼融合的激光雷达特征匹配方法[J]. *激光与红外*, 2024, 54(3): 380 - 388.
- [2] Wang Rongxiu. The research and realization of key technologies for multiline LiDAR with independent intellectual properties[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2022, 45(4): 781 - 786. (in Chinese)  
王荣秀. 自主可控多线激光雷达关键技术研究及实现[J]. *电子器件*, 2022, 45(4): 781 - 786.
- [3] Wang Hai, Liu Mingliang, Cai Yingfeng, et al. Vehicle target detection algorithm based on fusion of lidar and millimeter wave radar[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2021, 42(4): 389 - 394. (in Chinese)  
王海, 刘明亮, 蔡英凤, 等. 基于激光雷达与毫米波雷达融合的车辆目标检测算法[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2021, 42(4): 389 - 394.
- [4] Zhou Lijun, Sun Bei. Research on ground penetrating radar echo signal enhancement method based on spatial correlation fractional domain[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2022, (6): 82 - 85. (in Chinese)  
周丽军, 孙贝. 基于空间相关性分数域的探地雷达回波信号增强方法研究[J]. *机电信息*, 2022, (6): 82 - 85.
- [5] Liao Zhiyong. Research on the rapid enhancement of wireless communication signal based on multi-scale filtering[J]. *Information & Computer*, 2023, 35(8): 44 - 46. (in Chinese)  
廖智勇. 基于多尺度滤波的无线通信信号快速增强研究[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2023, 35(8): 44 - 46.
- [6] Li Yang, Tian Bin, Yang Chao. Deep learning magnetic signal denoising algorithm applying soft threshold function[J]. *Journal of Detection & Control*, 2023, 45(4): 95 - 101. (in Chinese)  
李杨, 田斌, 杨超. 基于软阈值函数的深度学习磁信号去噪算法[J]. *探测与控制学报*, 2023, 45(4): 95 - 101.
- [7] Wang Q, Zhou H, Liu Q. Denoising method for terahertz signal using RBF neural network with adaptive projection learning algorithm[J]. *Wireless Networks*, 2023, 29(2): 749 - 759.
- [8] Liu Dewei, Zhu Aihong, Zhao Yanhao, et al. De-noising of balise uplink signal based on improved CEEMDAN[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(12): 1 - 9. (in Chinese)  
刘德伟, 朱爱红, 赵岩浩, 等. 基于改进 CEEMDAN 的应答器上行链路信号降噪研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(12): 1 - 9.
- [9] Li Chuhui, Kong Lingchao, Dong Yi, et al. Research on noise reduction in gate vibration signals based on CEEMDAN and wavelet packet decomposition[J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2024, 47(1): 16 - 18, 119. (in Chinese)  
李初辉, 孔令超, 董懿, 等. 基于 CEEMDAN 和小波包分解的闸门振动信号降噪研究[J]. *水电站机电技术*, 2024, 47(1): 16 - 18, 119.
- [10] Lu Lirong, Niu Xiaodong, Wang Jian, et al. ECG signal denoising based on EMD and statistical characteristics of IMF components[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2021, 38(12): 1529 - 1534. (in Chinese)  
卢莉蓉, 牛晓东, 王鉴, 等. 基于 EMD 与 IMF 分量统计特性的 ECG 去噪[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(12): 1529 - 1534.
- [11] Liang Xionghe, Chen Shan, Wei Hao, et al. Extraction of rolling bearing fault sound signal features based on optimal IMF components and KSVD[J]. *Machinery & Electronics*, 2022, 40(2): 8 - 12, 17. (in Chinese)  
梁雄鹤, 陈珊, 魏豪, 等. 基于最优 IMF 分量和 K-SVD 的滚动轴承故障声音信号特征提取[J]. *机械与电子*, 2022, 40(2): 8 - 12, 17.