

doi: 10.7690/bgzdh.2025.10.008

基于 EMD 和时频分析的遥测振动信号降噪方法

李振兴, 李 冬, 刘建男

(中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对飞行器试验遥测振动信号频率内容丰富降噪困难问题, 提出一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和时频分析的遥测振动信号降噪方法。将带噪信号利用 EMD 进行多尺度分解, 得到不同尺度的本征模态分量(intrinsic mode function, IMF), 利用短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)得到对应的时频表示, 并根据时频能量分布设定滤波阈值, 在时频域进行滤波处理。将滤波后的时频表示进行 STFT 逆变换, 并累加求和得到降噪后信号。该方法具有更好的噪声抑制能力, 并且保护信号中细节信息不受损失。计算机仿真和实测数据处理结果表明: 与 EMD 降噪、小波降噪相比, 该方法仿真条件下信噪比提高约 2.8 和 2.4 dB, 在实测信号中信噪比提高约 14.3 和 10.1 dB, 证明该方法在遥测振动信号预处理中具有实际应用价值。

关键词: 遥测; 振动信号; EMD; 时频分析; 降噪

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A

Telemetry Vibration Signal Denoising Method Based on EMD and Time-frequency Analysis

Li Zhenxing, Li Dong, Liu Jiannan

(No. 91550 Unit of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to denoise the telemetry vibration signal with rich frequency content in aircraft test, a denoising method of telemetry vibration signal based on empirical mode decomposition (EMD) and time-frequency analysis is proposed, and the noisy signal is decomposed by multi-scale EMD. The intrinsic mode function (IMF) at different scales are obtained, and the corresponding time-frequency representation is obtained by short-time Fourier transform (STFT), and the filtering threshold is set according to the time-frequency energy distribution. Filtering is performed in the time-frequency domain. And performing STFT inverse transformation on the filtered time-frequency representation, and accumulating and summing to obtain a denoised signal. The method has better noise suppression capability and protects the detail information in the signal from being lost. Computer simulation and real data processing results show that compared with EMD denoising and wavelet denoising, this method improves the SNR by 2.8 and 2.4 dB in the simulation condition, and improves the SNR by 14.3 and 10.1 dB in the real signal, which proves that this method has practical application value in the telemetry vibration signal preprocessing.

Keywords: telemetry; vibration signal; EMD; time-frequency analysis; noise reduction

0 引言

在飞行器试验中, 振动信号作为遥测主要环境参数, 直接反映飞行器在整个飞行过程中所受激励和结构的状态响应情况^[1], 振动信号的处理结果对飞行器故障诊断、试验鉴定提供重要支撑^[2]。噪声的存在影响振动信号时域统计处理精度, 同时对于频域和时频域的分辨率也会产生影响, 严重噪声干扰甚至会淹没某些微弱信号的提取和分析^[3-4]; 因此, 降噪是遥测振动信号预处理中的一项重要工作。传统降噪方法均难以兼顾噪声抑制能力与信号细节信息损失之间的矛盾。考虑遥测振动信号频谱接近连续、频率内容丰富的特点, 平滑滤波常会将某些

细节信息受到损失, SVD 降噪相空间重构嵌入维度要相当大^[5], 且无论采用均值还是中值准则处理奇异值, 均难达到理想降噪效果。进一步考虑遥测振动信号呈典型非平稳特征, 因此所选降噪方法必须适用于非平稳信号处理。目前, 较为有效的遥测振动信号降噪方法可分为: 1) 基于数据分解的降噪方法; 2) 基于小波阈值降噪及改进阈值的小波降噪方法。基于数据分解的降噪方法包括经验模态分解(EMD)、VMD、EEMD 等, 其基本思想是利用上述非平稳信号的分解方法, 将带噪信号分解为系列分量, 利用某种准则判定噪声与有用信号的分界点, 舍弃噪声分量并将有用信号求和得到降噪结果。如采用连续均方误差和 l_2 范数将 EMD 分解本征模态

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2024-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703408)

第一作者: 李振兴(1977—), 男, 河北人, 硕士。

分量(IMF)为噪声 IMF、噪声和信息混合 IMF、信息 IMF 3 部分,采用不同策略分别处理后重构进行降噪^[6]得到了较好的降噪结果。采用最小二乘法与 EMD 结合的方法,也可去除低频趋势噪声^[7]。将信号首先进行 EMD 分解,在 EMD 分解 IMF 上计算小波阈值并进行小波降噪,降噪后 IMF 重构得到最终降噪结果^[8]的方法相对于 EMD 降噪具有更高信噪比。将带噪信号进行 VMD 分解并利用相关系数筛选有效固有模态函数实现信号重构完成降噪^[9],对噪声分量的判别更为准确。对于频谱接近连续分布的遥测振动信号进行数据分解,有用信息几乎分布在每阶分量中,判别噪声分量并舍弃的降噪方法均会存在细节信息丢失的风险。在小波阈值降噪方法的基础上,通过深入分析小波系数分布特点,很多改进阈值函数小波降噪研究成果均取得了较好噪声抑制效果。如文献[10]根据软、硬阈值设计了一种新的小波阈值函数,在高速风洞数据处理中有效抑制干扰的同时能够捕获飞行器模型在突变区域的高频信号。文献[11]基于双曲正切函数构造了一个具有高阶可导性质和小波系数自适应收缩能力的阈值函数,进一步增强了小波阈值降噪能力。小波阈值降噪从信号不同尺度上利用噪声和信号小波系数特征实现降噪,具有较好降噪性能^[12],但是由于小波变换本身受小波基选取、分解层数设定、阈值函数设计因素约束,同一约束条件下对不同信号的降噪性能会导致较大差异性。

笔者从振动信号可由不同尺度的单一振荡模式叠加表示的角度出发,结合 EMD 和时频分析方法,设计了一种新的降噪方法:首先,将带噪信号利用 EMD 进行多尺度分解,得到不同尺度的 IMF 分量;其次,将各 IMF 分量分别利用短时傅里叶变换(STFT)得到对应的时频表示,并根据时频能量分布设定滤波阈值,在时频域进行滤波处理;最后,将滤波后的时频表示进行 STFT 逆变换,并累加求和得到降噪后信号。该方法通过在不同尺度上对信号中的噪声进行滤波处理,滤波阈值选取更为精确,因此具有更好的噪声抑制能力,并且保护信号中的细节信息不受损失。

1 时频滤波降噪原理

时频分析是非平稳信号处理的有效技术手段^[13],遥测振动信号呈现典型的非平稳特征,从时间、频率和能量分布刻画信号对应的内容,能够更加深入的认识和理解在特定时刻、特定频率上信号

给出的信息。STFT 依据任何非平稳信号在短时局部可满足平稳特征的原理,通过加窗并在窗口内作傅里叶变换的方法得到对应的时频表示结果^[14],作为一种线性时频表示方法,STFT 没有交叉项干扰,即在时频表示中不存在由于变换引入的额外信息,STFT 可用式(1)表示^[15]:

$$X(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (1)$$

式中 $h(t)$ 为窗函数。由式(1)可知,STFT 相当于基函数为 $h(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau}$ 的傅里叶变换,在窗函数 $h(t)$ 的作用下,具有了时频局域化的表示结果。STFT 为一种线性时频表示,具有可和性,因此,叠加噪声信号的 STFT 在时频域等于信号与噪声各自 STFT 的和。虽然低通滤波可以抑制噪声干扰,但是对于不同信号滤波器门限的设置并不容易,特别对于非平稳信号,某些高频弱分量成分并不具有显著的能量聚集性,直接利用低通滤波处理很容易丢失原有信号的细节信息。

STFT 具有时频局域化能力,对信号的不同频率内容可根据时间分布在时频平面上,高斯白噪声在整个时频平面分布,但是不具有能量聚集性,即噪声的能量分布幅值要远小于信号能量幅值。根据这一特点,可在时频平面进行滤波,以时频能量均值设置滤波门限,抑制掉噪声干扰。设所采集信号为:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + n(t). \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 为信号真值; $n(t)$ 为高斯白噪声。则观测信号 $\tilde{x}(t)$ 对应的 STFT 时频表示为:

$$\tilde{X}(t, f) = X(t, f) + N(t, f). \quad (3)$$

式中 $X(t, f)$ 和 $N(t, f)$ 分别为信号真值 $x(t)$ 和高斯白噪声 $n(t)$ 的 STFT 时频表示,根据分析可知 $|N(t, f)| < |X(t, f)|$,即使在信号被噪声淹没,即噪声功率大于信号功率的情况下,由于噪声能量是均匀分布在整个时频平面上,而信号能量集中分布在某些特定的时频区域,这一关系也依然成立。

依据信号和噪声在 STFT 时频表示中能量聚集性特征的不同,可根据时频能量设置阈值进行滤波,首先找到时频平面上的能量聚集点,即所有能量极大值点,取所有能量极大值点中的最小值设为 a ,再找到时频平面上的能量最小值设为 b ,则滤波阈值可以根据 a 和 b 设定为:

$$\lambda = (a - b) / 2. \quad (4)$$

根据阈值 λ 对时频平面进行滤波如式(5)所示。

$$\hat{X}(t_i, f_j) = \begin{cases} \tilde{X}(t_i, f_j) & |\tilde{X}(t_i, f_j)| > \lambda \\ 0 & |\tilde{X}(t_i, f_j)| \leq \lambda \end{cases} \quad (5)$$

式中： $i=1, 2, \dots, m$ ； $j=1, 2, \dots, m$ ； $\tilde{X}(t, f)$ 时频的维度为 $m \times m$ 。

2 EMD-STFT 降噪方法

对于多分量信号，如果信号中的某一分量持续时间历程非常短，或某一分量信号能量相对较弱，则根据时频能量聚集特性确定的能量极大值点差异性会非常大，能量极大值点中的极小值会出现接近能量最小值的情况。此时，直接采用式(4)给出的门限值存在超出有用分量在时频域的能量值；因此，直接采用时频滤波降噪会导致有用分量的时频能量被滤除的风险，从而出现有用信号信息损失。笔者提出一种结合 EMD 的 STFT 降噪方法，通过 EMD 首先将带噪信号分解为接近单分量的简单信号，分别对 EMD 分解得到的 IMF 进行 STFT 降噪，再将降噪后 IMF 累加求和得到降噪后信号，可有效避免信号信息损失，并进一步提高降噪性能。

EMD 是一种有效的非线性非平稳信号处理方法^[11]，能够将多分量信号分解为系列近似单分量信号，每个本征模态函数都反映一种振荡模式，具有特定的物理意义^[16]，因此 EMD 特别适用于处理遥测振动信号。EMD 通过寻找信号的上下极值点构建包络，并通过插值后计算包络均值，通过反复“筛”得到满足 IMF 条件的分量作为第一个 IMF，即极值点的数量和过零点的数量相等或最多相差 1 个，同时信号序列局部极大值和局部极小值所定义的包络均值为零，从原信号中减去分离出的 IMF，继续上述过程，直到所有的 IMF 均被求出，这样原信号可以表示为^[17]：

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (6)$$

式中： $c_j(t)$ 为分解得到的 IMF 分量； $r_n(t)$ 为分解余项，一般情况下 $r_n(t)$ 为常数序列或者趋势项序列，在信号的重构过程中可以省略，等于对进行了信号调零或去除趋势项干扰。

EMD 与小波分解最大的不同点是不需要固定的基函数，具有自适应性^[18]，分解过程中，基函数直接由信号本身产生，数据的分解结果具有真实物理意义。在对数坐标系下，EMD 具有梳状滤波特性，根据随机噪声具有高频特性；因此，噪声一般分布在高阶 IMF 分量中，据此相关文献提出了 EMD 降

噪方法，即将某些高阶 IMF 分量视为噪声剔除，其余 IMF 分量累加作为降噪后信号。EMD 降噪方法的缺陷是对于剔除的高阶 IMF 分量无法确定其中是否包含信号的高频信息，并且 EMD 方法不具有严格正交性，分解过程中的能量泄露会使噪声污染与所剔除的高阶 IMF 相邻的分量，导致降噪不完全。EMD 分解所得的每个 IMF 分量所含有用信号分量近似于单分量，因此单个 IMF 分量在时频平面上的能量聚集性反映了该单个分量的信息成分，在该 IMF 分量对应的时频平面上确定的能量极大值对应的即为该分量的能量极大值，而极小值接近所含噪声能量，利用式(4)确定时频滤波阈值不会影响信号中的其他分量成分，同时，由于有用信号能量极大值远大于噪声能量，滤波门限能最大程度上保证噪声分量被滤除，可知在 IMF 分量基础上进行时频滤波降噪，能够达到最佳降噪效果并保护信号的细节信息不受损失，方法流程如图 1 所示。

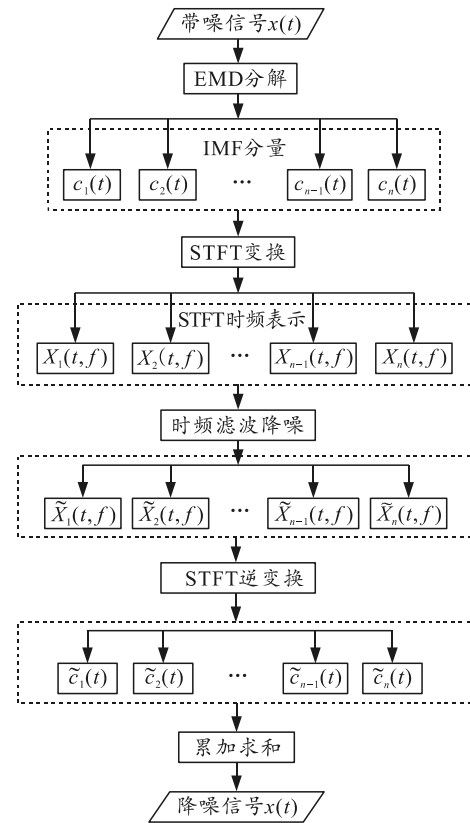


图 1 EMD-STFT 降噪流程

由图 1 可知，EMD-STFT 降噪方法分别对 IMF 分量进行时频滤波降噪，能量极大值点和最小值点在各个 IMF 分量的 STFT 时频表示中求取，对于多分量信号能够更加精确地获得每个分量成分中信号和噪声能量确定的滤波阈值 λ ，从而能够获得最佳的降噪性能并保护低能量分量的丢失情况，同时与

直接 EMD 降噪方法相比, 避免了高阶 IMF 分量作为噪声直接舍弃导致信号细节信息的损失的缺点。

3 仿真和实测数据处理

采用中心频率不同的正弦信号叠加模拟遥测振动信号, 其中采样频率 $f_s=2\ 048\text{ Hz}$, 信号的中心频率分别为 5、25 和 100 Hz, 如式(7)所示。

$$x(t) = \sum_{i=1}^3 A_i \sin(2\pi f_i t) + n(t) \quad (7)$$

式中: A_i 为各正弦信号的幅度, 分别取值为 2、3 和 1; $n(t)$ 为高斯白噪声。设置信噪比为 0, 仿真信号的时域波形如图 2 所示。

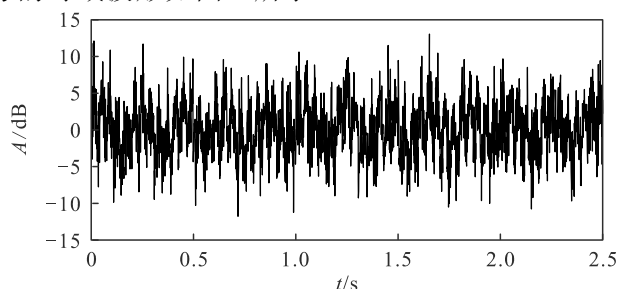


图 2 仿真信号时域波形 (SNR=0)

为了验证 EMD-STFT 降噪方法性能, 将其与 EMD 降噪和小波降噪进行比较, EMD 降噪方法中将第 1 阶和第 2 阶 IMF 视为噪声剔除, 在小波降噪中小波基函数选择 “sym8”, 分解层数为 4, 采用自适应阈值降噪方法, 带噪信号的降噪结果分别如图 3—5 所示。从降噪结果可知, EMD-STFT 降噪后信噪比相比 EMD 降噪和小波阈值降噪分别提高了 2.8 和 2.4 dB。

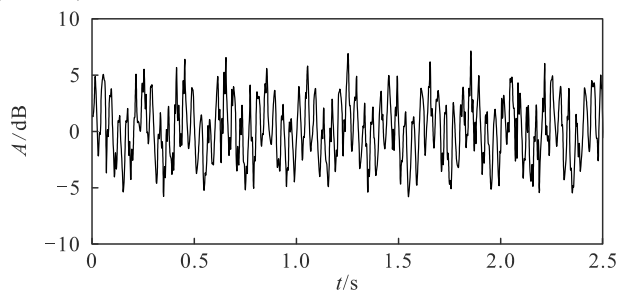


图 3 EMD 降噪结果 (SNR=6.8 dB)

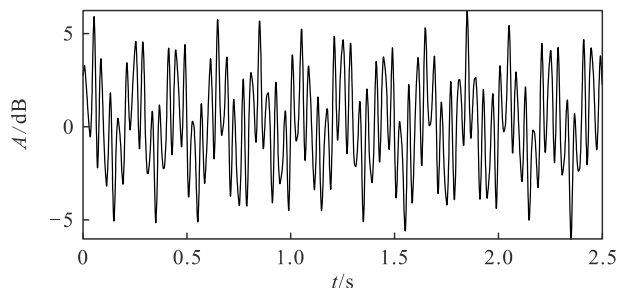


图 4 小波阈值降噪结果 (SNR=7.2 dB)

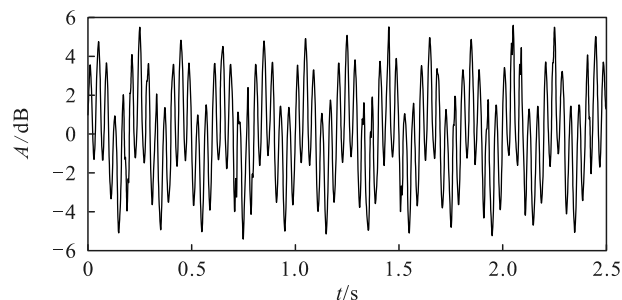


图 5 EMD-STFT 降噪结果 (SNR=9.6 dB)

选择某次飞行器试验中某传感器采集的高频振动信号进行处理进一步验证 EMD-STFT 的降噪性能, 其中采样频率 $f_s=5\ 000\text{ Hz}$, 信号的时域波形如图 6 所示。

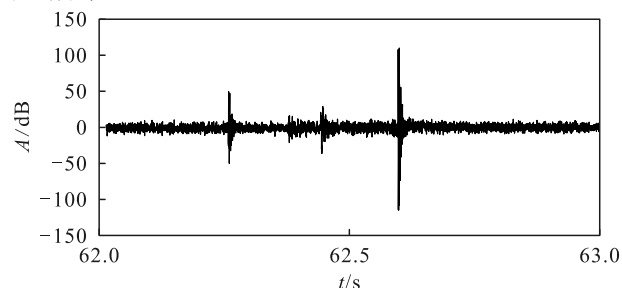


图 6 高频振动信号 (SNR=5.7 dB)

从图 6 中可以看出: 信号中包含噪声干扰, 采用功率谱估计其信噪比为 5.7 dB。分别采用小波降噪、EMD 降噪和文中提出的 EMD-STFT 方法进行处理, 其中小波降噪中仍然选择小波基函数为 “sym8”, 分解层数设置为 6, 采用自适应阈值降噪方法, 降噪结果如图 7 所示。

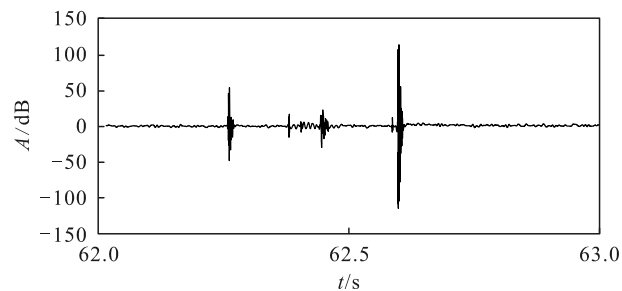
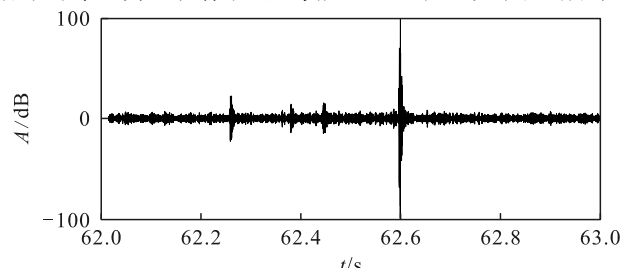


图 7 小波阈值降噪结果 (SNR=12.5 dB)

由于遥测振动信号的频率内容丰富, EMD 分解结果中信号几乎存在于每阶 IMF 中, 如图 8 所示。



(a) IMF1

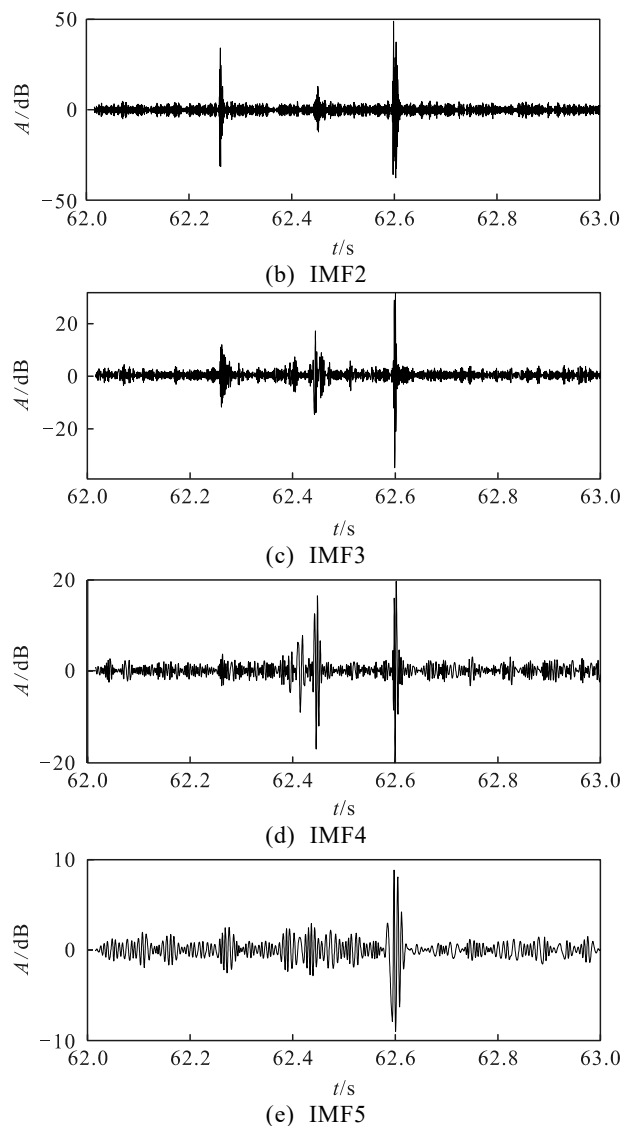


图 8 EMD 分解结果(前 5 阶 IMF)

可知在高阶 IMF 中每阶 IMF 均包含了信号和噪声成分, 根据 EMD 降噪原理, 舍弃前 2 阶 IMF 分量, 在丢失部分信号信息的条件下实现降噪, 结果如图 9 所示。

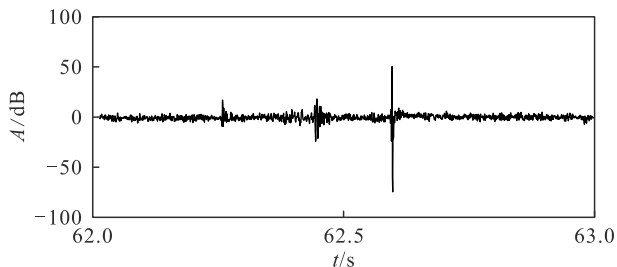


图 9 EMD 降噪结果(SNR=8.3 dB)

EMD-STFT 在每阶 IMF 分量上进行时频滤波降噪, 能够更精细的实现降噪处理, 在抑制噪声的同时能够避免有用信息的丢失, 结果如图 10 所示。

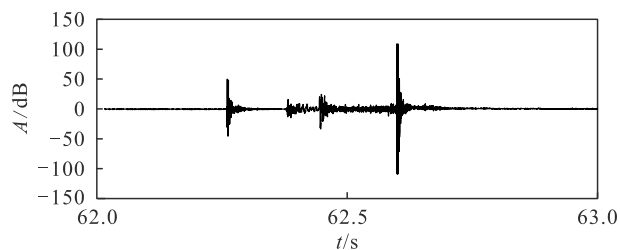


图 10 EMD-STFT 降噪结果(SNR=22.6 dB)

由实测振动信号处理结果可知, EMD-STFT 降噪后信噪比相比 EMD 降噪和小波阈值降噪分别提高了 14.3 和 10.1 dB。

采用 EMD-STFT 方法对某型飞行器试验遥测振动信号进行预处理, 不同位置传感器测量的振动信号处理结果均表明降噪效果显著, 有效提高了时域统计量估计结果, 以及功率谱和时频谱的估计精度, 为飞行器试验鉴定提供了可靠的数据支撑。

4 结束语

针对遥测振动信号非平稳且频率内容丰富的特点, 在分析时频表示能量和噪声聚集性特点的基础上, 提出了 EMD-STFT 降噪方法, 通过 EMD 分解得到具有简单振荡模式的 IMF 分量, 利用时频滤波对每阶 IMF 降噪后再重构得到最终降噪信号, 在抑制噪声的同时能够最大程度上避免有用信号的丢失。仿真和实测数据处理结果证明: EMD-STFT 降噪方法与小波阈值降噪、EMD 降噪相比具有更好的降噪性能, 在遥测振动信号预处理工作中具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 李振兴, 翟月, 刘学. 基于 EEMD 和盲源分离的遥测振动信号降噪方法[J]. 强度与环境, 2021, 48(4): 59-64.
- [2] 张东. 双谱估计在遥测振动参数处理中的应用[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(1): 170-172, 188.
- [3] 肖瑛, 马艺伟, 刘学. 遥测振动信号单通道盲源分离自适应滤波幅度校正方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(23): 127-133, 158.
- [4] 刘学, 孙翱, 李冬, 等. 时频流形自适应稀疏重构的遥测振动信号特征增强方法[J]. 振动工程学报, 2022, 35(1): 246-254.
- [5] 张莹, 殷红, 彭珍瑞. 基于改进 SVD 及参数优化 VMD 的轴承故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 51-58.
- [6] 宋雷, 游东东, 郑振兴, 等. 基于经验模态分解的 RV 减速器运动参数降噪研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(18): 266-272, 290.