

文章编号: 2095-4980(2024)04-0431-07

近海摩托艇信号的模态分解

靳淑雅^{a,b}, 苏煜^a, 樊亚仙^{a,b}, 陶智勇^b

(桂林电子科技大学 a. 无线宽带通信与信号处理广西重点实验室, 广西 桂林 541000; b. 海洋工程学院, 广西 北海 536000)

摘要: 在非线性非平稳信号的分析、处理以及特征提取中, 希尔伯特-黄变换(HHT)是一种高效的自适应分析方法, 在工程领域中有着广泛应用。本文利用经验模态分解(EMD)和变分模态分解(VMD)方法对近海摩托艇的水声信号进行对比分析, 发现水声信号能量主要集中在低频段。与高频段相比, 其振幅相对较大。EMD方法在分析这类信号时, 会产生模态混叠, 因此不能有效分解信号和提取特征; 而VMD方法可有效降低模态混叠现象, 能够成功提取其信号特征。研究结果表明, VMD方法在船舶水声信号处理分析及特征提取时更为有效, 为复杂水声信号的处理提供了一种可行的技术参考。

关键词: 模态混叠; 模态分解; 船舶水声信号; 特征提取

中图分类号: TN911.7; TB566

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022063

Mode decomposition of offshore motorboat signals

JIN Shuya^{a,b}, SU Yu^a, FAN Yaxian^{a,b}, TAO Zhiyong^b

(a. Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin Guangxi 541000, China; b. School of Ocean Engineering, Guilin University of Electronic Science and Technology, Beihai Guangxi 536000, China)

Abstract: Hilbert-Huang Transform(HHT) is an efficient adaptive analysis method in nonlinear and nonstationary signal analysis, processing and feature extraction, which is widely used in engineering field. In this paper, Empirical Mode Decomposition(EMD) and Variational Mode Decomposition(VMD) are employed to compare and analyze the underwater acoustic signals of offshore motorboats. It is found that the energy of underwater acoustic signal is mainly concentrated in the low frequency band, and its amplitude is relatively large compared with that in the high frequency band. When analyzing this kind of signal, mode mixing is produced by EMD method, therefore using EMD cannot effectively decompose the signal and extract features. Nevertheless, using VMD method can effectively reduce the phenomenon of mode mixing and successfully extract its signal characteristics. The results show that VMD method is more effective in ship underwater acoustic signal processing and feature extraction.

Keywords: mode mixing; mode decomposition; ship underwater acoustic signal; feature extraction

由于人类活动、船舶航行和海床地质运动的不断加剧, 近海船舶水声信号的识别变得越来越困难。船舶水下噪声是由于动力系统和螺旋桨的振动而辐射到周围海域的, 对其有针对性的处理在国防和海洋科学领域具有重要的研究价值和实际意义^[1-2]。船舶辐射噪声包含丰富的目标参数和运动信息, 因此, 准确高效的信号分解技术对于获取船舶特征信息和分类识别具有重要意义。

船舶水声信号具有非线性和非平稳的特点^[3], 随着海洋环境日益复杂和船舶隐身技术的不断发展, 准确高效获取近海船舶水声特征已成为研究热点。随着相关研究的不断深入, 一些学者提出了多种处理非线性和非平稳信号的方法, 如经验模态分解(EMD)^[4]、集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)^[5]、互补集合经验模态分解(Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition, CEEMD)^[6]、完全集成噪声自适应经验模式分解(Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, CEEMDAN)^[7]和均匀相位经

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-05-06

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2021GXNSFDA075006; 2021GXNSFAA220086); 国家自然科学基金资助项目(12064005)

*通信作者: 苏煜 email:suyu@guet.edu.cn

验模式分解(Uniform Phase Empirical Mode Decomposition, UPEMD)^[8]等。利用上述方法可以使原始船舶水声信号分解为一系列的固有模态,并通过 Hilbert 变换得到具有清晰物理意义的瞬时频率,能够表达信号的局部特征。但这些方法属于经验分解方法,容易出现模态混叠。2014年,Dragomiretskiy 等提出了变分模态分解(VMD)方法^[9]。与 EMD 等经验分解方法不同,VMD 基于维纳滤波、希尔伯特变换和分析信号理论,具有相对严格的数学基础和可靠的分解结果。基于先构建变分模型,然后迭代求解的分解原理,VMD 比 EMD 和其他经验分解方法具有更高的抗噪声性能,有效改善了模态混叠问题。基于上述优点,VMD 广泛用于信号处理^[10-12]、机械故障诊断^[13-14]、金融数据分析^[15]等领域。

本文针对近海摩托艇的水声信号特征,引入 VMD 分解方法,有效改善了 EMD 分解中的模态混叠问题,有利于后续近海摩托艇水声信号的特征提取和分类识别,能够为准确获取近海船舶航行参数提供重要技术支持。

1 模态分解算法

1.1 EMD 算法

通过希尔伯特-黄变换(HHT)方法中的 EMD 使信号在没有任何先验信息的情况下,自适应地分解成多个固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF);然后将各个 IMF 显示在时频域中,再对信号进行希尔伯特谱分析。EMD 将原始信号分解为几个 IMF 和一个残差的形式:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + Res_n(t) \quad (1)$$

式中: $x(t)$ 为原始信号; $IMF_i(t)$ 为分解信号的固有模态函数; $Res_n(t)$ 为残差。

1.2 VMD 算法

VMD 是一种通过求解频域变分优化问题,估计各个信号分量的信号处理方法。该技术具有更坚实的数学理论基础,其自适应性表现在:根据实际情况确定所给序列的模态分解个数,随后的搜索和求解过程中可以自适应地匹配每种模态的最佳中心频率和有限带宽,并可实现固有模态分量的有效分离、信号的频域划分,进而得到给定信号的有效分解成分,最终获得变分问题的最优解。VMD 获得包含多个不同频率尺度且相对平稳的子序列,适用于非平稳性的序列,减轻了 EMD 方法存在端点效应和模态分量混叠的问题。

VMD 的核心思想是构建和求解变分问题。首先构建变分问题,假设原始信号 $x(t)$ 被分解为 n 个分量,为保证分解序列为具有中心频率的有限带宽的模态分量,同时各模态的估计带宽之和最小,约束条件为所有模态之和与原始信号相等,则相应约束变分表达式为:

$$\begin{cases} \min_{\{u_i\}, \{\omega_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^n \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_i(t) \right] e^{-j\omega_i t} \right\|^2 \right\} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n u_i(t) = f(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为分解的模态个数(正整数); $\{u_i\}$ 、 $\{\omega_i\}$ 分别对应分解后第 i 个模态分量和中心频率; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数; $*$ 为卷积运算符, j 为虚数单位。

然后求解式(2),引入 Lagrange 乘法算子 λ , 将具有约束条件的变分模型转换为无约束条件的变分模型,得到增广 Lagrange 表达式为:

$$L(\{u_i\}, \{\omega_i\}; \lambda) = \alpha \sum_{i=1}^n \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_i(t) \right] e^{-j\omega_i t} \right\|^2 + \left\| f(t) - \sum_{i=1}^n u_i(t) \right\|^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{i=1}^n u_i(t) \right\rangle \quad (3)$$

式中 α 为二次惩罚因子。

可通过交替方向乘子法(Alternating Direction Method of Multipliers, ADMM)结合傅里叶变换与 Parseval 定理求解该约束问题,交替寻优迭代后的变量表达式为:

$$\hat{u}_n^{k+1} = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i=1, i \neq n}^N \hat{u}_i^{k+1}(\omega) - \sum_{i=1, i < n}^N \hat{u}_i^k(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_n^k)^2} \quad (4)$$

$$\hat{\omega}_n^{k+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_i^{k+1}(\omega)| d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_n^{k+1}(\omega)| d\omega}, \quad n \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (5)$$

$$\hat{\lambda}^{k+1}(\omega) = \hat{\lambda}^k(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_n \hat{u}_n^{k+1}(\omega) \right] \quad (6)$$

式中： τ 为噪声容差参数； k 为迭代次数，初始 $k=0$ ， ω 为频率变量；含“ \wedge ”的变量为该变量的傅里叶变换。

根据解决方案结果判断最终条件，确定是否满足结束条件：

$$\sum_n \|\hat{u}_n^1 - \hat{u}_n^k\| / \|\hat{u}_n^1\|^2 < \varepsilon \quad (7)$$

如果满足条件，迭代完成，信号分解完成；否则，返回到式(2)并继续分解，直到满足式(7)为止。

2 仿真信号分析

采用不同频率、不同幅值的正余弦信号构建仿真信号：

$$X = \cos(2\pi \times 80t) + 0.8\sin(2\pi \times 50t) + 0.6\sin(2\pi \times 25t) + 0.4\cos(2\pi \times 10t) + 0.3\cos(2\pi \times 3t) \quad (8)$$

$$Y = 0.3\cos(2\pi \times 80t) + 0.4\sin(2\pi \times 50t) + 0.6\sin(2\pi \times 25t) + 0.8\cos(2\pi \times 10t) + \cos(2\pi \times 3t) \quad (9)$$

X 、 Y 分别为组成成分不同的仿真信号，仿真信号 X 中各正余弦函数的频率和振幅大小变化规律一致，仿真信号 Y 中各正余弦函数的频率和振幅大小变化规律相反，采样频率为1 024 Hz。

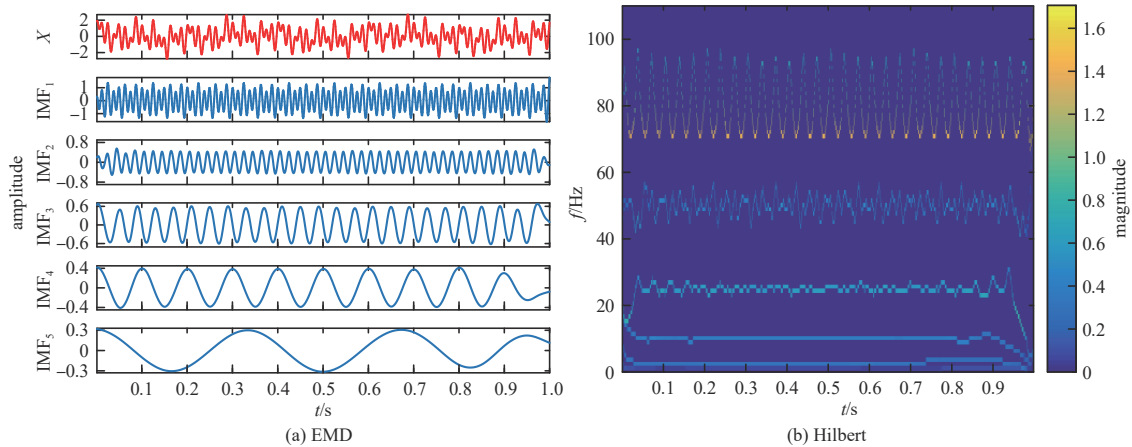


Fig.1 EMD result and Hilbert spectra of simulated signal X

图1 仿真信号 X 的EMD结果与Hilbert谱

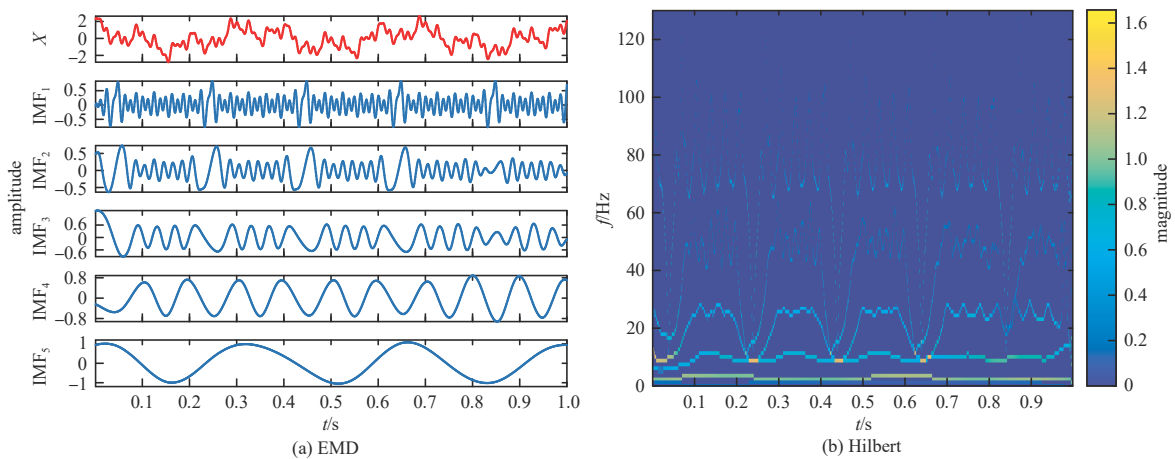


Fig.2 EMD result and Hilbert spectra of simulated signal Y

图2 仿真信号 Y 的EMD结果与Hilbert谱

分别对仿真信号 X 、 Y 进行 EMD 分解, X 信号的 EMD 结果与 Hilbert 谱如图 1 所示, Y 信号的 EMD 结果与 Hilbert 谱如图 2 所示。由图 1(a) 可以看出, 仿真信号 X 的 EMD 得到的 IMF 与仿真信号 X 中的几个单频信号对应, 相应的 Hilbert 谱(图 1(b))也能区分出仿真信号 X 中的 5 种不同频率的振荡。由图 2(a) 可以看出, 仿真信号 Y 的 EMD 分解结果出现了明显的模态混叠现象, 并且在 Hilbert 谱(图 2(b))中出现了复杂的频率交错, 无法确认仿真信号中的成分。

为解决这种现象, 采用 VMD 方法对仿真信号 Y 进行分析。参考所构建仿真信号的特征, VMD 的分解层数为 5。同时为了方便比较, 将 VMD 的结果按照频率降序排列。如图 3(a) 所示, VMD 方法得到的各 IMF 之间存在明显差异, 有利于特征提取。对其进行 Hilbert 谱分析后, 可以发现, 同一区域各 IMF 频谱较原先 HHT 方法, 逐渐趋于同一水平线, 即在时域上波动趋于平稳, 表明模态混叠现象得到明显抑制。

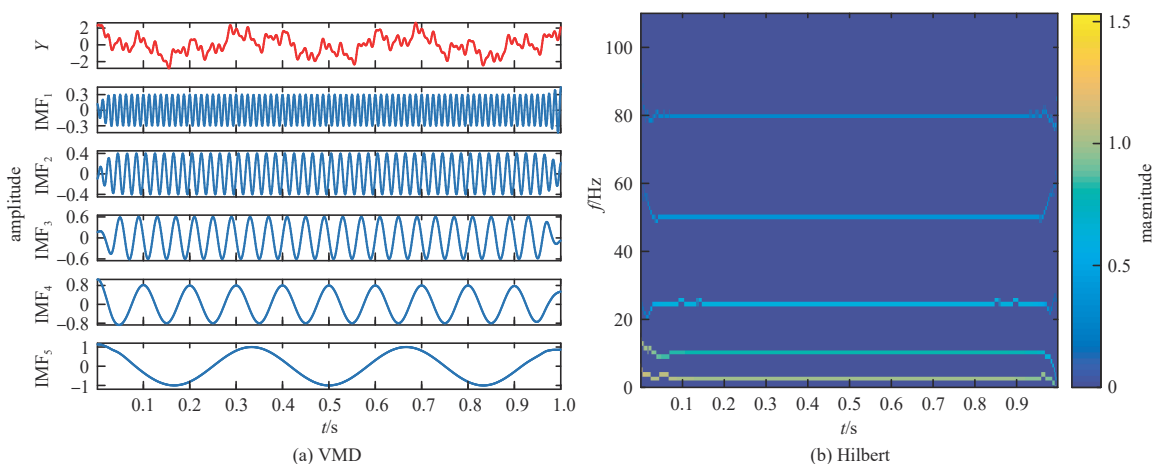


Fig.3 VMD result and Hilbert spectra of simulated signal Y

图 3 仿真信号 Y 的 VMD 结果与 Hilbert 谱

通过观察和计算中心频率可知信号分解中各模态对应的频率。通过表 1 可以看出, 仿真信号 X 经 EMD 得到 IMF 的中心频率与原仿真信号各分量更接近, 而仿真信号 Y 经 EMD 得到 IMF 的中心频率与原仿真信号各分量有明显差异, 主要表现在第 1 至第 3 个 IMF 中, 说明存在模态混叠现象。当采用 VMD 方法对仿真信号 Y 进行分析时, 得到的 IMF 差异明显, 未发现模态混叠。

表 1 与原仿真信号对应 IMF 的中心频率

Table 1 Center frequency of IMFs corresponding to the original simulation signals

f/Hz	EMD of X	EMD of Y	VMD of Y
80	76.57	61.95	79.98
50	49.68	29.11	50.16
25	24.65	18.32	24.92
10	10.05	10.01	10.94
3	5.16	3.02	5.00

3 实际信号分析

本文以近海摩托艇信号为例, 对比 EMD 和 VMD 的分解结果。获得近海摩托艇持续 20 s 的稳定水声信号后, 提取信号单个样本, 持续时间约为 100 ms, 则摩托艇水声数据集由 200 个样本构成。图 4 为其中一个样本的时域和频域图, 其中小插图为放大的频谱图, 可以看出, 在摩托艇水下噪声信号中, 信号的波形十分复杂且频率范围较广, 低频段声能量的振幅较大。

对样本数据集进行 EMD 和 VMD 分解, 并对其中的模态混叠现象进行研究。研究表明, 近海摩托艇水声信号的声能量主要集中在低频段, 且与高频段相比, 其振幅较大, 使用现有的 EMD 方法分析船舶水声信号, 容易出现模态混叠现象, 不能有效分解信号和提取特征。而采用 VMD 方法, 可以减轻模态混叠。图 5(a)~5(b) 为摩托艇信号及经过 EMD 与 VMD 分解后的各阶 IMF。图中第 1 个标记为 ship 的信号为原始摩托艇水声信号, 随后排列的是分解后得到的 10 个 IMF。图 6 为对应的 Hilbert 谱, 从图 6(a) 中可以看出, 摩托艇信号经 EMD 后, 相邻 IMF 之间频率相近, 有明显的模态混叠; 从图 6(b) 中可以看出, 摩托艇信号经 VMD 后, 相邻 IMF 之间频率有差异, 且集中在不同的频段。

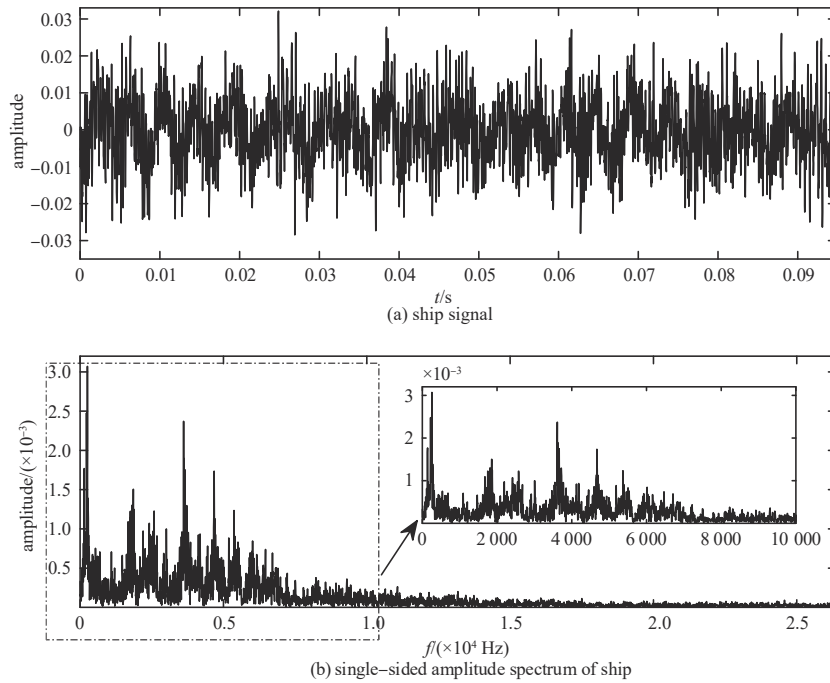


Fig.4 Time and frequency domains of motorboat signals

图4 摩托艇信号的时域和频域图

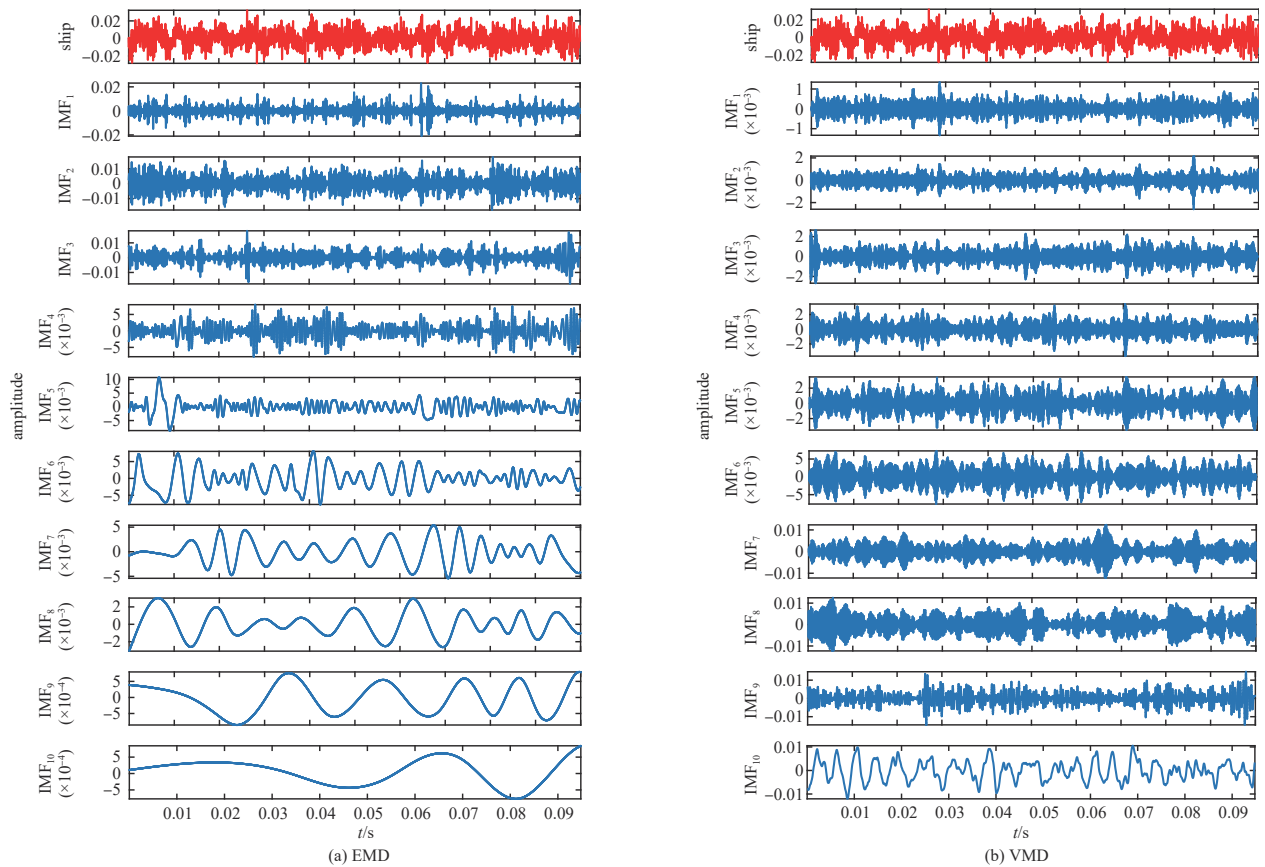


Fig.5 Results of motorboat signals by EMD and VMD

图5 摩托艇信号的EMD与VMD分解结果

4 结论

本文利用EMD和VMD方法对近海摩托艇的水声信号进行对比分析。在分析仿真信号的过程中发现，原始信

号中各组成成分的频率和振幅大小变化规律一致时, EMD 的分解效果优于变化规律相反的信号; 原始信号中各组成成分的频率和振幅大小变化规律相反时, 使用 VMD 方法对信号分解更有效, 它减轻了 EMD 方法存在端点效应和模态分量混叠的现象, 并且分解获得包含多个不同频率尺度且相对平稳的子序列, 适用于非平稳性信号的分析, 为船舶水声信号的处理提供了重要的技术参考。

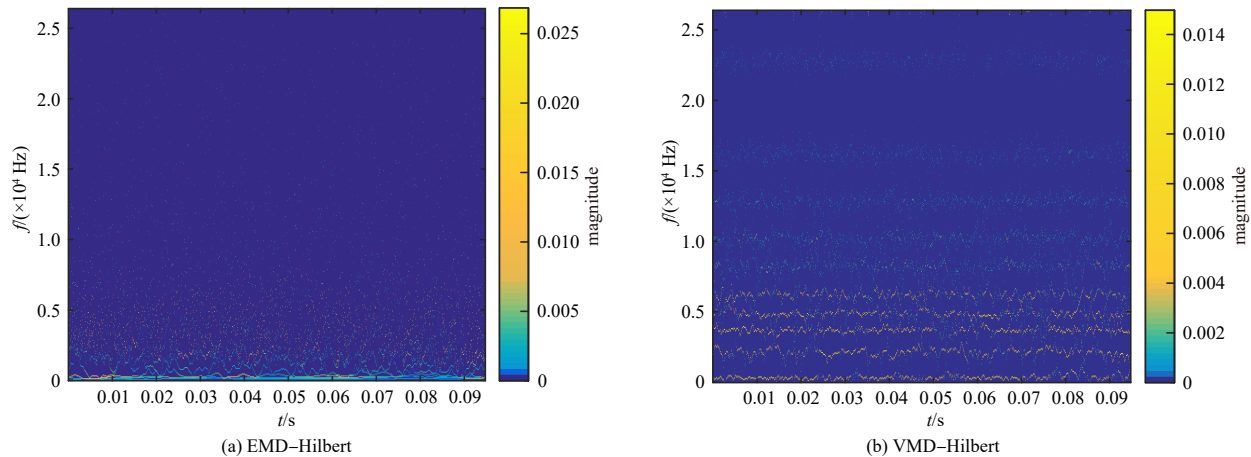


Fig.6 Hilbert spectra of motorboat signals by EMD and VMD
图6 摩托艇信号经 EMD 与 VMD 分解后的 Hilbert 谱

参考文献:

- [1] XIE Dongri,SUN Haixin,QI Jie. A new feature extraction method based on improved variational mode decomposition, normalized maximal information coefficient and permutation entropy for ship-radiated noise[J]. Entropy, 2020, 22(6):620. doi: 10.3390/e22060620.
- [2] HONG Feng,LIU Chengwei,GUO Lijuan,et al. Underwater acoustic target recognition with a residual network and the optimized feature extraction method[J]. Applied Sciences, 2021,11(4):1442. doi:10.3390/app11041442.
- [3] HU Gang,WANG Kejun,LIU Liangliang. Detection Line spectrum of ship radiated noise based on a new 3D chaotic system[J]. Sensors, 2021,21(5):1610. doi:10.3390/s21051610.
- [4] WU Zhaohua,HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings of the Royal Society of London.Series A:Mathematical,Physical and Engineering Sciences, 2004,460(2046):1597-1611. doi:10.1098/rspa.2003.1221.
- [5] WU Zhaohua,HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition:a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009,1(1):1-41. doi:10.1142/S1793536909000047.
- [6] YEH J R,SHIEH J S,HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition:a novel noise enhanced data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010,2(2):135-156. doi:10.1142/S1793536910000422.
- [7] TORRES M E,COLOMINAS M A,SCHLOTTHAUER G,et al. A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise[C]// 2011 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing(ICASSP). Prague,Czech Republic: IEEE, 2011:4144-4147. doi:10.1109/ICASSP.2011.5947265.
- [8] WANG Y H,HU Kun,LO M Z. Uniform phase empirical mode decomposition:an optimal hybridization of masking signal and ensemble approaches[J]. IEEE Access, 2018(6):34819-34833. doi:10.1109/ACCESS.2018.2847634.
- [9] DRAGOMIRETSKIY K,ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 62(3): 531-544. doi:10.1109/TSP.2013.2288675.
- [10] LI Yuxing,LI Yaan,CHEN Xiao,et al. A novel feature extraction method for ship-radiated noise based on variational mode decomposition and multi-scale permutation entropy[J]. Entropy, 2017,19(7):342. doi:10.3390/e19070342.
- [11] HUANG Qinyuan,XIE Luofeng,YIN Guofu,et al. Acoustic signal analysis for detecting defects inside an arc magnet using a combination of variational mode decomposition and beetle antennae search[J]. ISA Transactions, 2020(102): 347-364. doi: 10.1016/j.isatra.2020.02.036.