光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.020

EEMD法在激光语音传输系统中的应用

华秀宝，吴　艳，张蓉竹*

（四川大学 电子信息学院，成都 610065）

摘　要： 为消除激光语音传输系统中激光器输出功率不稳定对探测信号的影响，提出了一种结合集合经验模态分解(EEMD)与相关系数的方法对信号进行处理。该方法将信号分解为不同的分量，算出不同分量和原信号间的相关系数，再设置固定判定阈值来区分真实信号和趋势项分量。该方法可以克服传统处理方法中存在的模态混叠和需要主观判断趋势分量的缺点，从而达到避免主观判断失误和准确提取趋势的目的。仿真及实验结果表明，使用该方法后再去噪效果优于直接去噪，此外该方法能有效去除激光器功率线性变化和频率小于15 Hz的正弦起伏变化导致的趋势。

关键词： 语音传输；集合经验模态分解；相关系数；趋势项；信噪比

中图分类号： TN249　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0407－05

Application of EEMD Method in Laser Speech Transmission System

HUA Xiubao, WU Yan, ZHANG Rongzhu

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, CHN)

Abstract: In order to eliminate the influence of power instability on the signal detection in laser speech transmission system, a method combining ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and correlation coefficient is proposed to process the signal. The method decomposes the signal into several intrinsic mode functions through EEMD, and calculates the correlation coefficient between each component and the original signal. Then a determination threshold is set to distinguish the real signal and IMF component of trend term. It can overcome such shortcomings existing in traditional methods as the modal aliasing and need for subjective judgment of trend components. Simulation and experimental results show that the noise suppression effect of the improved EEMD is better than wavelet denoising. Furthermore, this method can effectively remove the trend caused by linear change of laser power and sinusoidal change of frequency less than 15 Hz.

Key words: speech transmission; EEMD; correlation coefficient; trend term; SNR

0　引言

激光作为载波传输信息具有易保密、易于调制、传输距离远、传送信息容量大的优点，因此广泛用于各种语音探测、数据传输等领域[1-3]。但是激光在传输过程中会受到大气衰减、大气湍流、激光器功率不稳定等因素的影响[4-5]，使得载波带有趋势项。趋势项的存在会影响时域分析和频域分析，甚至导致低频谱完全失真。因此，准确地消除趋势项对于信号分析具有重要意义。

消除信号趋势项的方法有很多，常用的方法有小波变换方法、最小二乘法，以及经验模态分解法(EMD)等[6-9]。前两种方法都需要先验判断，而EMD法具有较强的自适应性且不需要原信号的先验信息，因此在许多领域得到了广泛的应用。EMD依据信号本身的特性就可以生成对应的固有模态分量(IMF)，并且模态函数能较好地反映信号的部分时频特性[7]。

收稿日期：2021－03－30.

* **通信作者：**张蓉竹

张军等[8]通过比较各原始信号均值和 IMF 分量的均值，可以判断这一阶的 IMF 分量是否为趋势项，结果表明基于 EMD 的信号趋势项提取和确定方法具有很大的优势。张慧娟等[10]通过 EMD 将信号分解，对不同的 IMF 分量和原始信号间的相关系数进行了计算，并以相关系数为准绳来设置判断阈值，以区分 IMF 分量，结果证明此方法可以有效去除趋势。陈真诚等[11]先对脉搏波信号进行集合经验模态分解(EEMD)，采用去除后两个分量和剩余分量的方式来消除基线漂移，结果表明此方法能够很好地消除脉搏波中的基线漂移噪声。

上述方法在消除载波功率不稳定的影响上都有一定效果，但是 EMD 在分解较复杂的信号时，容易发生模态混叠现象，只去除最后两个分量和剩余分量有时不能准确去除信号的趋势项。本文针对上述问题提出 EEMD 相关系数法，即先通过 EEMD 将信号分解为不同的 IMF 分量，然后求得不同 IMF 分量与原始信号的相关系数，再设定合适的固定阈值来去除相关系数较低的分量。该方法克服了模态混叠和需要主观判断的缺点，同时本文还对该方法的适用范围进行了分析，为提高激光语音系统中信号的准确性提供了新的思路。

1 原理方法

1.1 经验模态分解(EMD)

经验模态分解[7]是依据信号的时间特征来将信号分解成不同的固有模态函数(IMF)，其中 IMF 分量按瞬时频率从高到低排序，每个 IMF 分量必须达到以下两个约束条件：1)整个时间序列上极值点的数目和过零点的数目必须相等或最多差 1 个；2)由极小值点和极大值点组成的包络线的均值为 0。

1.2 集合经验模态分解(EEMD)法

EEMD 是一种噪声辅助数据分析方法，克服了 EMD 模态混叠的现象[12]。模态混叠指的是模态分量不能按时间尺度分离，导致相近的特征尺度分布在不同的 IMF 分量中，难以辨认出相邻混叠的 IMF 波形，使 EMD 分解不能有效去除噪声[11]。EEMD 原理为：通过加入高斯白噪声信号，使得信号在多次分解后能够在不同尺度上保持连续，从而较好地改善模态混叠现象。

EEMD 算法数学表达式为

$$x_k(t)=x_{\text{original}}(t)+n_k(t)=\sum_{j=1}^{n}IMF_{kj}+r_k \quad (1)$$

式中，$x_{\text{original}}(t)$为原信号，$n_k(t)$是第 k 次加入的白噪声，$x_k(t)$为第 k 次加入白噪声后的信号，r_k 为第 k 次分解产生的余项，n 为 EEMD 分解所得的 IMF 数目。

$$IMF_j=\frac{1}{s}\sum_{k=1}^{s}IMF_{kj} \quad (2)$$

其中，s 为总平均次数。在选取白噪声等级为 0.2，总平均次数为 100 时，EEMD 能达到较好的分解效果[13]。

相关系数是反映两个变量间相关程度的统计分析指标[10]，真实信号的 IMF 分量与原始信号的相关系数很大，而虚假 IMF 分量与原始信号的相关系数很小。因此，可通过相关系数来判定，从而完成对信号趋势项的去除。相关系数的数学表达式为

$$\rho_{xy}=\frac{\sum_{k=1}^{N}(X_k-\overline{X})(Y_k-\overline{Y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}(X_k-\overline{X})^2\sum_{k=1}^{N}(Y_k-\overline{Y})^2}} \quad (3)$$

式中，X 表示原信号，Y 表示目标信号。

经大量仿真发现，当原始信号和 IMF 分量间的相关系数 $\rho_{xy}<0.08$ 时，可以认为此 IMF 分量不再与实际信号相关。EEMD 法的基本流程如图 1 所示。

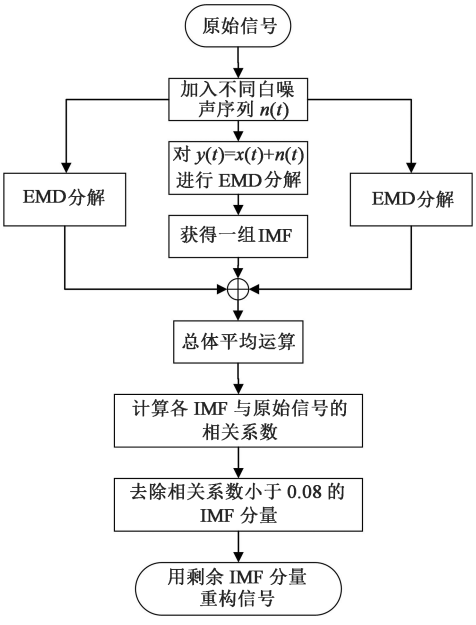


图 1 本文方法流程图

与传统 EMD 法相比，EEMD 法在 EMD 分解前的信号中加入高斯白噪声信号。利用白噪声频率分布均匀、均值为零的特点，在多次分解后可以更好

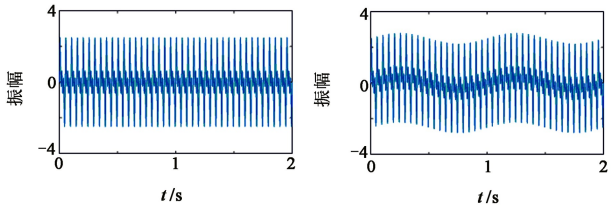
地改善模态混叠现象，并且在设定固定阈值后不需要主观判断趋势分量，从而避免了主观判断失误导致的误差。

2　仿真分析

下面以仿真信号 $x(t)=\sin(40\pi t)+\sin(60\pi t)+\sin(80\pi t)$ 作为原信号来说明 EEMD 法的提取过程，将 $s(t)=0.3\sin(2\pi t)$ 作为激光器功率不稳定所致趋势加入原信号中，构成待分解信号。

仿真的原信号与待分解信号分别如图 2(a)，(b)所示，将图 2(b)进行 EEMD 分解，可以将信号分解为 14 个 IMF 分量。分别求出各 IMF 分量的相关系数，如表 1 所示。

在去除相关系数小于 0.08 的 IMF 分量即去除 IMF 9-14 后，可以得到去除趋势后的信号，如图 3(a)所示。利用剩余的 IMF 分量重构得到去趋势后的信号，如图 3(a)所示，可以清楚看出基本去除了趋势带来的影响。从图 3(b)，(c)可以看出，加入的趋势项和提取的趋势项基本契合且误差很小。

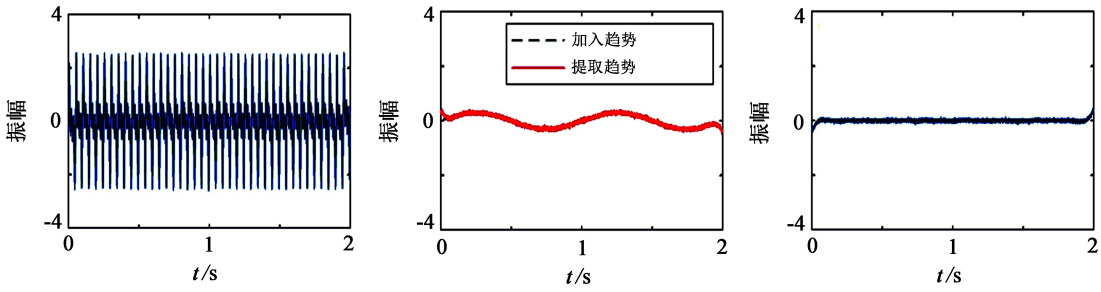


(a)　原信号　　(b)　待分解信号

图 2　原信号和待分解信号

表 1　各 IMF 分量的相关系数

参数	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7
相关系数	0.920 6	0.147 0	0.152 0	0.206 0	0.769 7	0.832 5	0.789 0
参数	IMF8	IMF9	IMF10	IMF11	IMF12	IMF13	IMF14
相关系数	0.225 0	0.030 6	0.002 0	0.004 1	0.000 0	0.000 0	0.021 8



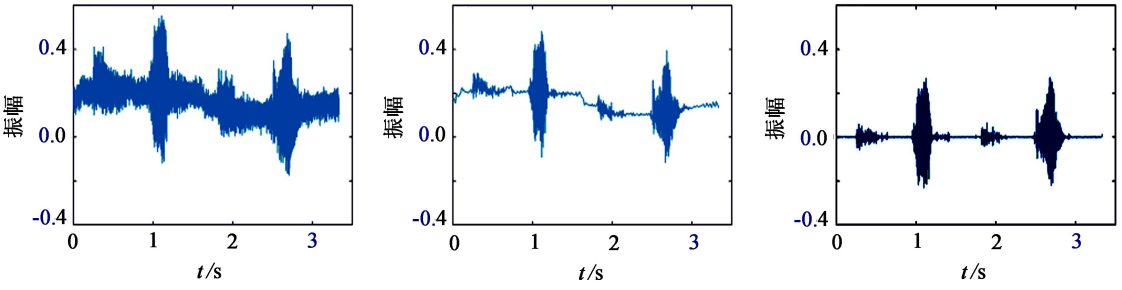
(a)　重构信号　　(b)　加入与提取的趋势　　(c)　误差

图 3　重构信号与误差

3　实验验证

在激光语音传输实验中，实际采集了一组语音信号，如图 4(a)所示，可以看出由于激光器输出功率的不稳定以及背景噪声的影响使得信号质量变差。为了说明去除激光输出功率不稳定的必要性，分别对采集到的信号直接去噪以及去除趋势后再去噪进行比较。直接去噪选用去噪效果较好的软阈值函数小波阈值去噪方法[14]，多次测试后为使效果最好，选取小波分解层数为 6 层，小波基函数为 db8[15]。

图 4 给出了原信号、小波软阈值法和 EEMD 去趋势-小波软阈值法对语音信号处理后的时域图。



(a)　原信号　　(b)　小波软阈值法　　(c)　EEMD 去趋势-小波软阈值法

图 4　不同方法处理后的时域图

比较图 4(b)和(c)可以发现，直接用小波软阈值去噪虽然曲线变得比较平滑，但是仍存在激光功率不稳定带来的趋势误差，而先用本文方法去趋势，再用小波软阈值去噪后，效果明显改善，基线也更加

平滑。图 4 中各时域图的信噪比(SNR)和均方误差(MSE)的数据如表 2 所示。

表 2 不同方法处理后的信噪比和均方误差

参数	原始信号	小波软阈值法	去趋势-小波软阈值法
SNR	−12.28	−12.08	8.91
MSE	0.029 54	0.029 02	0.000 36

从表 2 也可以看出,在没有消除激光不稳定影响的情况下直接用小波软阈值去噪,信噪比几乎没有变化,效果没有明显改善。应用去趋势-小波软阈值法,信噪比提高 21.19,均方误差减小了 0.029 18,去噪效果明显提升。由此可知激光功率不稳定导致的趋势项对信号影响很大,去除趋势后更有利于后续的降噪处理。

4 EEMD 法适用范围分析

在第 3 节要测量的原信号上加入信号来分析本文方法的适用范围,同时将本文方法与传统的 EMD 法进行对比。本文分析两种情况:1)在测量过程中光源强度存在线性不稳定性,本文中通过添加线性趋势的斜率来模拟;2)当测量过程中载波强度存在高低起伏时,本文通过添加正弦信号来模拟。

4.1 加入线性趋势

如图 5 所示,通过增加线性趋势的斜率来模拟光源强度存在线性不稳定性,当光源强度呈线性变化时,原信号信噪比明显降低,信号质量也明显下降。EMD 相关系数法在斜率大于 0.035 时,也可以去除趋势但是效果不稳定,而 EEMD 相关系数能稳定地去除趋势项带来的影响且信噪比稳定在 22 dB 左右。

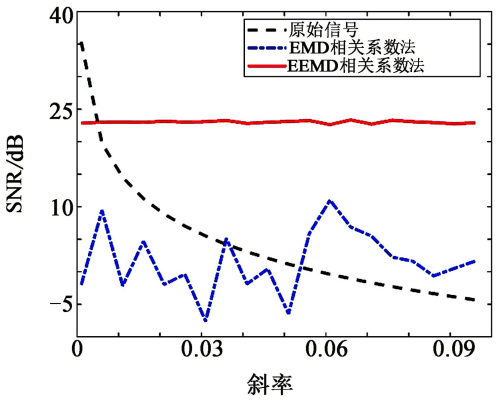


图 5 线性趋势的斜率对信噪比的影响

4.2 加入正弦趋势

当利用正弦趋势来模拟载波强度存在高低起伏时,分别分析振幅和频率对 EEMD 相关系数法和 EMD 相关系数法的影响。

首先设定正弦项的频率为固定频率 1 Hz。如图 6 所示,原信号信噪比随着振幅的增大而不断降低。EMD 相关系数法在去除趋势项上整体表现较差,并且由于模态混叠的原因,在振幅较低时会将原信号的有用分量视作虚假分量去除,导致信噪比进一步降低。而本文 EEMD 相关系数法能够将信噪比稳定在 22 dB 左右,此时去除后的信号质量较好。

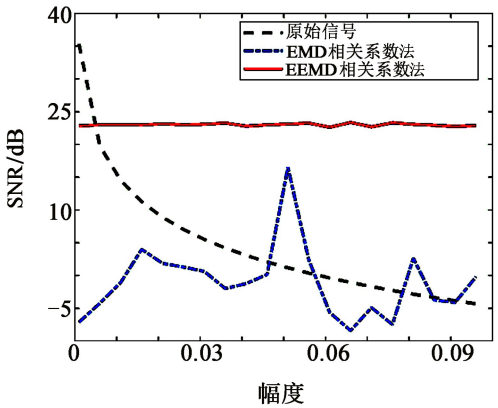


图 6 振幅变化对信噪比的影响

对频率的影响分析结果如图 7 所示,设振幅为固定值 0.05。从图中可以看出随着频率的增大,原信号的信噪比稳定在 1.45 dB 左右。与 EMD 相关系数法相比,EEMD 相关系数法去趋势效果更好,信噪比更高,尤其是在频率小于 15 Hz 时效果更好,此时信噪比稳定在 23 dB 左右。在频率大于 15 Hz 时,SNR 持续降低,此时去除效果变差。

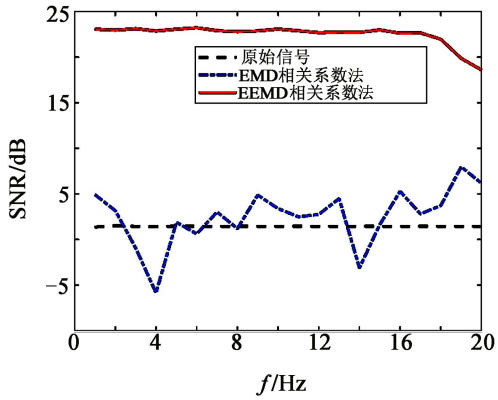


图 7 频率变化对信噪比的影响

比较图 5,6,7 可以看出,由于模态混叠原因的影响,用 EMD 相关系数法去除趋势项的效果比较差并且不稳定,而用 EEMD 相关系数法可以在一定程度上消除模态混叠的影响,有效去除偏离基线的趋势,提高信号信噪比。同时,本文方法可以有效应

对趋势幅度的增加，其受频率影响较大，适用于 15 Hz 以下的低频信号。

5　结论

本文提出一种将 EEMD 和相关系数相结合的方法来消除激光语音传输系统中激光功率不稳定导致的趋势，该方法既可以避免 EMD 法模态混叠的现象，也能避免主观判断错误导致误差的问题。仿真及实验结果表明，使用该方法进行趋势项去除后再去噪优于直接去噪，同时该方法也可以有效去除激光器功率线性变化和频率小于 15 Hz 的正弦起伏导致的趋势。

参考文献：

[1] 吕　韬. 远距离激光相干语音信号侦测技术研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2019.
Lv Tao. Research on the remote laser coherent speech signal detection techonology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2019.

[2] 高世杰，吴佳彬，刘永凯，等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学，2020，13(6)：1171-1181.
Gao Shijie, Wu Jiabin, Liu Yongkai, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1171-1181.

[3] 白　帅，王建宇，张　亮，等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展，2015，52(7)：7-20.
Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, et al. Development progress and trends of space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 7-20.

[4] 刘西川，高太长，刘　磊. 基于非球形雨滴的降雨对激光传输衰减的影响[J]. 红外与激光工程，2013，42(1)：167-173.
Liu Xichuan, Gao Taichang, Liu Lei. Effect of rainfall on laser transmission attenuation based on non-spherical raindrops[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 167-173.

[5] 安连生，张鸿业，杨位钦，等. 氦氖激光器稳定性测试及功率谱分析[J]. 光学技术，1995(4)：20-23.
An Liansheng, Zhang Hongye, Yang Weiqin, et al. Stability testing and power spectrum analyzing of He-Ne laser[J]. Optical Technique, 1995(4): 20-23.

[6] 龙　源，谢全民，钟明寿，等. 爆破震动测试信号预处理分析中趋势项去除方法研究[J]. 工程力学，2012，29(10)：63-68.
Long Yuan, Xie Quanmin, Zhong Mingshou, et al. Research on trend removing methods in preprocessing analysis of blasting vibration monitoring signals[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 63-68.

[7] Huang Norden E, Shen Zheng, Long Steven R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. 1998, 454(1971): 903-995.

[8] 张　军，潘泽鑫，郑玉新，等. 振动信号趋势项提取方法研究[J]. 电子学报，2017，45(1)：22-28.
Zhang Jun, Pan Zexin, Zheng Yuxin, et al. Research on vibration signal trend extraction[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(1): 22-28.

[9] Yu Huadong, Jun Xingzhang. Trend extraction in vibration signal based on EMD[J]. Adv. Materials Research, 2012, 459: 377-380.

[10] 张慧娟，李　冬. 相关系数判决的 EMD 在振动数据趋势项提取中的应用[J]. 舰船电子工程，2018，38(5)：159-163.
Zhang Huijuan, Li Dong. Application of EMD of correlation coefficient judgment in the extraction of vibration data trend [J]. Ship Electronic Engin., 2018, 38(5): 159-163.

[11] 陈真诚，吴贤亮，赵飞骏. EEMD 结合小波阈值的光电容积脉搏波信号降噪[J]. 光学精密工程，2019，27(6)：1327-1334.
Chen Zhencheng, Wu Xianliang, Zhao Feijun. Denoising and implementation of photoplethysmography signal based on EEMD and wavelet threshold [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(6): 1327-1334.

[12] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.

[13] 蒋文君，胡　晓，张　培，等. 基于 EEMD 近似熵的水电机组振动信号特征提取[J]. 水力发电学报，2020，39(6)：18-27.
Jiang Wenjun, Hu Xiao, Zhang Pei, et al. Vibration feature extraction for hydropower units based on ensemble empirical mode decomposition and approximate entropy [J]. J. of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(6): 18-27.

[14] 程　知，何　枫，张已龙，等. 趋势项调制的小波-经验模态分解联合方法用于大气相干长度廓线去噪[J]. 光学学报，2017，37(12)：15-26.
Cheng Zhi, He Feng, Zhang Silong, et al. Combination method of wavelet and empirical mode decomposition with trend modulation used for atmospheric coherent length profile denoising[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 15-26.

[15] 吴　艳，张蓉竹. 小波阈值降噪算法在光电探测器信号处理中的应用[J]. 光子学报，2019，48(10)：156-163.
Wu Yan, Zhang Rongzhu. Application of wavelet threshold denoising algorithm in photodetector signal processing[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(10): 156-163.

作者简介：

华秀宝(1995－)，男，硕士生，主要从事光电子技术的研究；

张蓉竹(1975－)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事光电子技术、精密光学制造与检测方面的研究。