

极点均值型经验模式分解及其去噪应用

熊兴隆, 李 猛, 蒋立辉, 冯 帅

(中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 使用经验模式分解(EMD)对信号进行去噪时, 由于 EMD 本身会产生模态混叠, 往往很难将噪声完全分离。针对这一问题, 提出了一种新型的极点均值型 EMD 方法, 并且给予固有模态函数(IMF)一个新的定义。首先, 将相邻极点平均以求得均值包络, 然后迭代相减进而获得 IMF。最后用原始信号减去分离出的高频 IMF 实现去噪。随机信号仿真以及激光雷达回波信号去噪实验表明, 该方法与 EMD 分解相比, 可以更好地将噪声分离, 有效地抑制模态混叠, 更可以极大地减小均方误差。因此, 极点均值型 EMD 拥有很好前景。

关键词: 极点均值型经验模式分解; 固有模态函数; 模态混叠; 去噪

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1628-07

Extrema-mean empirical mode decomposition and its application of denoising

Xiong Xinglong, Li Meng, Jiang Lihui, Feng Shuai

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Using empirical mode decomposition (EMD) for denoising, it's difficult to remove the noise from the signal because of the mode mixing in EMD. Aiming at this problem, a new method was proposed that is extrema-mean empirical mode decomposition (Extrema-mean EMD), making a new definition of intrinsic mode function (IMF). Firstly, the average of each two successive extrema was calculated and the mean curve was obtained. Secondly, the mean curve was subtracted from the signal iteratively, and then the IMF was got. Finally, the high frequency IMF were removed from the original signal for denoising. Through the random signal simulation and lidar return signals de-noising experiment, it's turned out that compared with the EMD, the Extrema-mean EMD could restrain the mode mixing and remove the noise from the signal effectively. This method can decrease the MSE of the denoised signal significantly. Therefore, the Extrema-mean EMD has a promising future.

Key words: extrema-mean empirical mode decomposition(Extrema-mean EMD); intrinsic mode functions(IMF); mode mixing; denoising

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(41075013); 中央高校基本科研基金(ZXH2011D003); 中国民航大学校内基金(05yk22m)

作者简介: 熊兴隆(1962-), 男, 副教授, 主要研究方向为光电子工程和激光探测方面的研究。Email: xx_long@126.com

0 引言

经验模式分解(EMD)是 1996 年美国科学家 Huang 博士提出的一种分解方法^[1],由于其有很好的自适应性以及不受测不准原理约束,所以广泛的应用于非线性非平稳信号的处理中^[2-3]。激光雷达信号是一种典型的非线性非平稳信号^[4],使用 EMD 对其进行去噪^[5-7],可以有效地利用 EMD 方法的自适应性,与小波去噪相比,不用考虑小波基的选取问题,并且在实际应用中取得了不错的效果。然而,由于 EMD 方法存在模态混叠问题,所以在信号分解时,不能将噪声有效地分离,容易产生信号失真。Wu 和 Huang^[8-9]等人提出了 EEMD 分解方法,这种方法可以有效地降低模态混叠,但是需要对信号引入白噪声。参考文献[10],提出了一种 EMD 和 Savitzky-Golay 相结合的方法,先对信号进行 EMD 分解,再对固有模态函数(IMF)进行平滑处理,参考文献[11]提出了一种 EMD 与小波分析性相结合的方法,先对信号进行去噪处理,再做 EMD 分解实现进一步去噪,两种方法虽然可以一定程度增强去噪效果,但都没有从根本上解决模态混叠的问题,所以在减去高频 IMF 后,依然会造成失真。

文中提出了一种解决模态混叠的新方法,对 IMF 给出了一个新定义,并且对 EMD 分解求取包络平均值的过程做了改变,从而避免了由于极点包络误差所带来的模态混叠。首先,对高频加噪信号以及低频加噪信号进行去噪仿真,将小波去噪、传统 EMD 和文中所用方法做了对比。然后对激光雷达回波信号进行去噪实验,将传统 EMD、文中所用方法以及 EMD 与平滑算法相结合的方法做对比,验证了文中所用方法的有效性和实用性。

1 EMD 分解及其问题

1.1 EMD 分解

使用 EMD 方法对信号进行分解,分解为固有模态函数(IMF)。IMF 满足下面两点要求:

(1) 信号的极点数与零点数相等,或最多相差 1。

(2) 任意时刻,信号极大值点与极小值点所构成的上包络和下包络的均值为 0 或标准偏离系数小于 Δ (如公式(1))。

$$\frac{|m|^2}{|x|^2} < \Delta \quad (1)$$

式中: m 为上下包络均值曲线; x 为待处理信号。

根据 IMF 的定义可以给出 EMD 的分解方法为:

(1) 首先根据极大值和极小值点,通过三次样条拟合求出信号的上包络和下包络,计算上下包络每一点的平均值,进而获得上下包络的平均值曲线 m_{10} ,设待处理信号为 $f(x)$,则:

$$f(x) - m_{10} = h_{10} \quad (2)$$

(2) 如果 h_{10} 满足 IMF 的条件,那么取 $c_1 = h_{10}$ 就为一阶的 IMF。

(3) 如果 h_1 不满足 IMF 的特点,那么将 h_1 作为待处理信号进行步骤(1), $h_{1(n-1)} - m_{1n} = h_{1n}$,循环 n 次知道得到满足 IMF 条件的 h_{1n} ,取 $c_1 = h_{1n}$ 为一阶 IMF。

(4) 用待处理信号减去 c_1 得到 r_1 ,将 r_1 作为待处理信号重复步骤(1)~(3)。

$$r_1 = f(x) - c_1 \quad (3)$$

(5) 最后得到 r_n 为一个单调函数,或者满足 IMF 的条件。可得:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (4)$$

1.2 EMD 分解的问题

EMD 分解面临的最大问题是模态混叠^[12]。模态混叠,包括两种,一种是相近尺度混叠在不同的 IMF 分量中,另一种是同一 IMF 分布较宽尺度的信号。模态混叠很大程度来源于脉冲干扰以及间歇成分所造成的极点拟合包络误差。对一个稳定的正弦信号 $f(t) = \sin(20\pi t)$ (图 1)进行 EMD 分解,如图 2 所示。

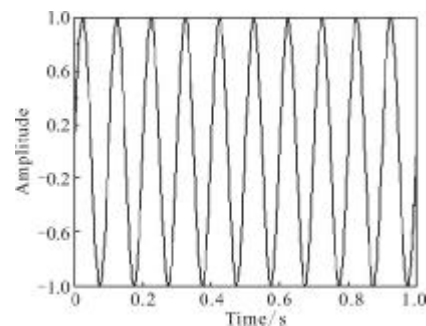


图 1 信号 $f(t) = \sin(20\pi t)$

Fig.1 Signal $f(t) = \sin(20\pi t)$

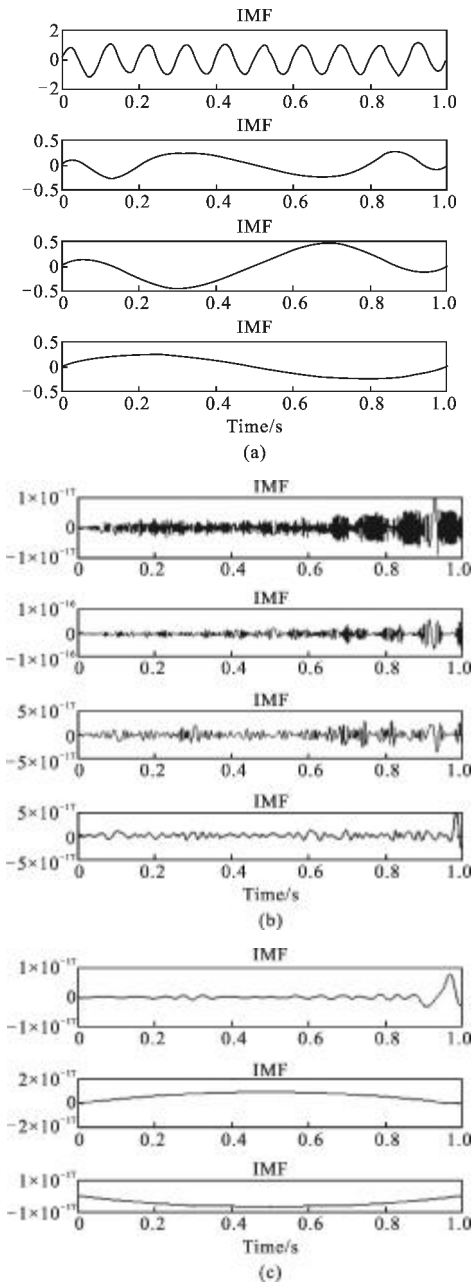


图 2 信号 $f(t)=\sin(20\pi t)$ EMD 分解结果
Fig.2 EMD result of the signal $f(t)=\sin(20\pi t)$

显然图 1 的信号已经可以理解为 IMF 分量了,但是由于边缘的间歇性干扰所带来的包络拟合误差,产生了非常多的虚假 IMF。在对信号进行去噪处理时,这些虚假 IMF 会带来严重的模态混叠。从而在高频中混入很多有用信号,严重影响去噪效果。

2 极点均值型 EMD 去噪方法

2.1 IMF 的新定义

信号的极点数与零点数相等或最多相差 1,并

且信号各相邻极值点(极大值和极小值)连线的中点的标准偏离系数小于 Δ 时(如公式(5)),认为是 IMF。

$$\frac{|\vec{m}|^2}{|x|^2} < \Delta \quad (5)$$

式中: \vec{m} 为信号各相邻极点(极大值点和极小值点)连线中点纵坐标值所构成的向量, x 为待处理信号。

传统的 IMF 定义,在求取上下包络时,往往将端点或间歇点处取 0 去拟合,这样会带来拟合误差,如果不取 0,又很难找到合适的值来处理,这里提出的定义可以有效解决此类问题。并且新的定义更强调区域极大值点(或极小值点)的等值性。使用极点均值 EMD 分解所得 IMF 的极点包络更加平稳,这种平稳特性很大程度上取决于 Δ 值的选取, Δ 越小,平稳性越高。从某种意义上讲,传统的 IMF 是调幅和调频的,新定义的 IMF 更多是调频的,调幅特性则依赖于 Δ 值。

同时新的定义采用极点均值纵坐标向量 \vec{m} 来定义标准偏离系数,而传统的 EMD 则采用包络均值曲线来定义,这就使新方法在计算量上要小一些。

2.2 极点均值型 EMD 算法步骤

(1) 设待处理信号为 $f(x)$ 将信号所有极点(极大点和极小点)的横坐标所正序排列,取为 x_n 。设点 (x'_n, y'_n) ,满足:

$$x'_n = \frac{x_n + x_{n+1}}{2} \quad (6)$$

$$y'_n = \frac{f(x_n) + f(x_{n+1})}{2} \quad (7)$$

待处理信号的起点横坐标设为 x_{00} , 结尾点设为 x_m ,对 $(x_{00}, 0), (x'_n, y'_n), (x_m, 0)$ 进行三次样条函数拟合,设为 m_1 。图 3 为新 EMD 分解方法(见图 3(a))与传统 EMD 分解方法(见图 3(b))求取均值 m_1 的对比,则:

$$f(x) - m_1 = h_1 \quad (8)$$

(2) 如果 h_1 满足 IMF 的条件,那么取 $c_1 = h_1$ 就为一阶的 IMF。

(3) 如果 h_1 不满足 IMF 的特点,那么将 h_1 作为待处理信号进行步骤(1), $h_{1(n-1)} - m_{1n} = h_{1n}$,循环 n 次知道得到满足 IMF 条件的 h_{1n} ,取 $c_1 = h_{1n}$ 为一阶 IMF。

(4) 用待处理信号减去 c_1 得到 r_1 ,将 r_1 作为待处理信号重复步骤(1)~(3)。

$$r_1 = f(x) - c_1 \quad (9)$$

(5) 最后得到 r_n 为一个单调函数,或者满足 IMF

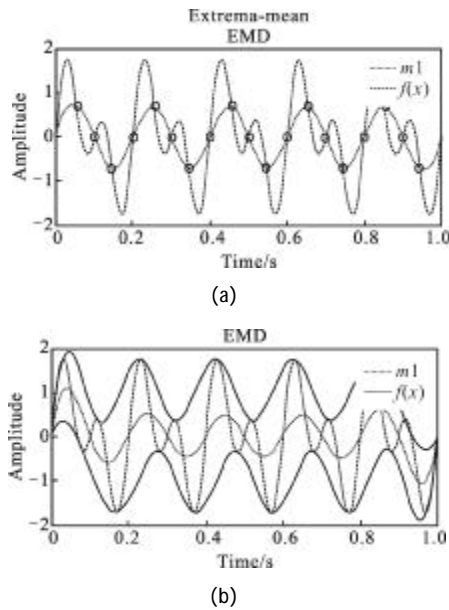


图 3 极点均值型 EMD 与传统 EMD 求取均值 m_1 的对比
Fig.3 Comparison of m_1 between the Extrema-mean EMD and EMD

的条件。可得：

$$f(x) = \sum_{i=1}^n c_n + r_n \quad (10)$$

2.3 模态混叠检验

同样对稳定正弦信号 $f(t) = \sin(20\pi t)$ 进行极点均值型 EMD 分解,如图 4 所示。

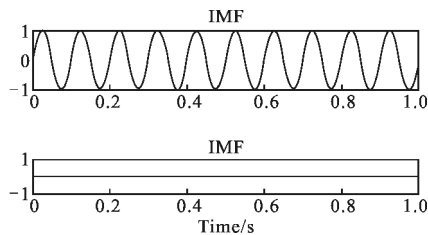


图 4 信号 $f(t) = \sin(20\pi t)$ 极点均值型 EMD 分解结果
Fig.4 Extrema-mean EMD result of the signal $f(t) = \sin(20\pi t)$

从图 4 与图 2 的对比可以看出,新的 EMD 分解方法可以有效地避免虚假 IMF 分量,在很大程度上消除了模态混叠,将原始信号的特征充分的保留和展示。

2.4 去噪步骤

(1) 先对待处理信号进行极点均值型 EMD 分解,得到 IMF 分量。

(2) 用原始信号减去 IMF 分量中的高频分量实现去噪。

3 去噪仿真分析

3.1 较高频率信号去噪仿真

将原始信号 $f(t) = \sin(40\pi t) + \sin(20\pi t)$ 混入噪声 (信噪比为 10 dB)。分别用传统 EMD,小波去噪和文中所用方法对含噪声信号进行去噪仿真如图 5 所示。

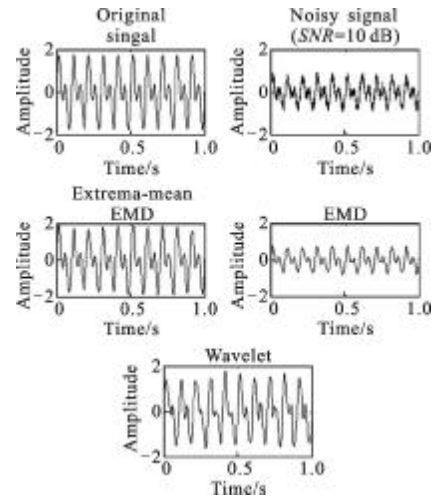


图 5 不同方法去噪效果对比
Fig.5 Comparison among the denoising results of different methods
从图 6、图 7 中应用极点均值型 EMD 分解,高

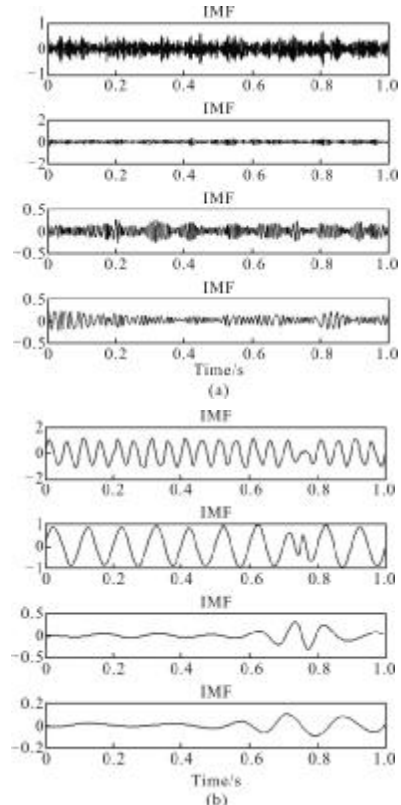


图 6 极点均值型 EMD 分解结果
Fig.6 Result of Extrema-mean EMD

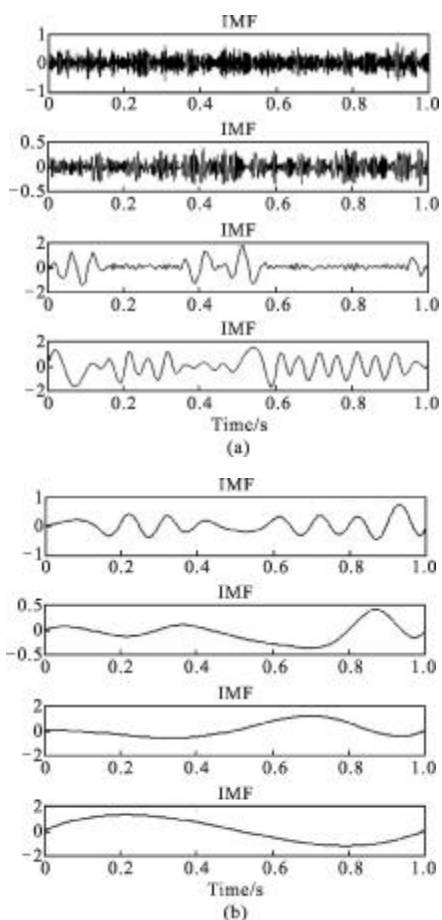


图 7 EMD 分解结果
Fig.7 Result of EMD

频噪声几乎全部集中在前四个 IMF 中,而传统 EMD 分解除了集中在前两个 IMF 中,还有较多的高频噪声混叠于第三个低频 IMF 分量中。此外,新方法第 5、6 个 IMF 很好地分离出了两个频率的正弦信号,这在 10dB 的 SNR 下是很不容易的,而传统 EMD 分解两个正弦信号却混叠在了多个 IMF 中。

从表 1 中可以看出,针对较高频信号进行去噪,采用 EMD 方法去噪比小波去噪效果要好很多。同时,采用文中方法去噪的均方误差比传统 EMD 方法以及小波去噪都要小,取得非常好地去噪效果。

表 1 不同方法的均方误差和峰值信噪比

Tab.1 MSE and PSNR of different methods

Method	MSE	PSNR
EMD	0.023 1	80.856 8
Wavelet	0.061 7	72.325 1
Extrema-mean EMD	0.013 8	85.333 2

3.2 较低频率信号去噪仿真

将原始信号 $f(t)=\sin(4\pi t)+\sin(2\pi t)$ 混入噪声(信

噪比为 10 dB)。分别用传统 EMD,小波去噪,和文中所用方法对含噪声信号进行去噪仿真。图 8 为不同方法去噪效果对比

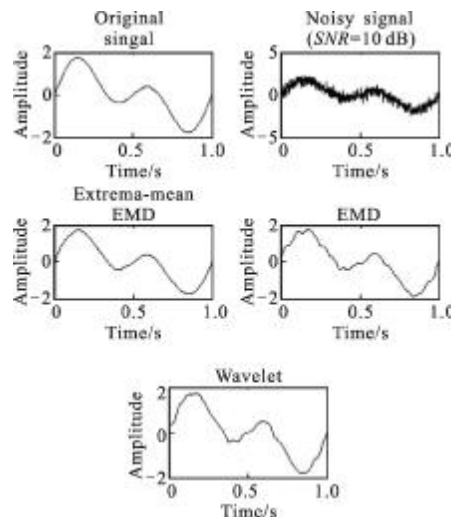


图 8 不同方法去噪效果对比

Fig.8 Comparison among the denoising results of different methods

从图 8 中可以看出,针对较低频信号进行去噪,传统 EMD 方法和小波去噪都会造成不同程度的失真,而应用极点均值型 EMD 与原始信号几乎一样。

从表 2 中可以看出,针对较低频信号进行去噪,传统 EMD 由于存在较严重的模态混叠,去噪效果最差,而采用文中方法则较小波去噪和传统 EMD 方法都要好很多。

表 2 不同方法的均方误差和峰值信噪比

Tab.2 MSE and PSNR of different methods

Method	MSE	PSNR
EMD	0.010 6	87.624 7
Wavelet	0.005 3	93.645 3
Extrema-mean EMD	0.002 3	100.896 2

4 实验分析

4.1 针对水平能见度激光雷达信号的去噪实验

实验采用自行研制的后向式散射激光雷达,由光学接收单元、激光发射单元、信号探测采集单元和数据处理单元构成。发射单元采用半导体激光器,波长为 905 nm,脉宽为 100 ns,能量为 15 μJ,PRF 为 5 kHz。接收单元由透镜和镜筒组成,直径为 50 mm,视场域为 1.2 mrad,安装了带宽为 5 nm 的窄带滤光片。数据接收单元采用 MCS-Pci 采集卡。数据处理单元则为嵌入式计算机 PCM-3370。

实验数据采集的是 5 月份天津机场附近清晨 5 点的激光雷达回波信号(如图 7),横坐标表示探测距离,纵坐标表示积累的光子数。由于受到较强背景光的影响,信号被噪声污染较严重。

这里分别对比了传统 EMD 算法,传统 EMD 算法与平滑算法相结合方法以及文中所用方法的去噪效果见图 9。这里的三种方法都是减去一阶的高频 IMF 分量。从图 10 可以看出,由于存在模态混叠,无

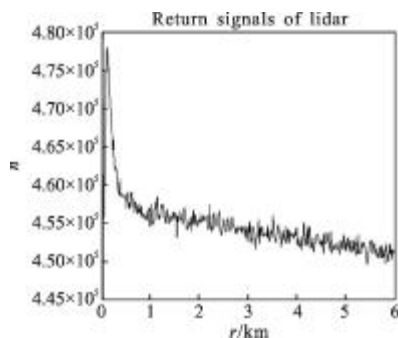


图 9 激光雷达回波信号

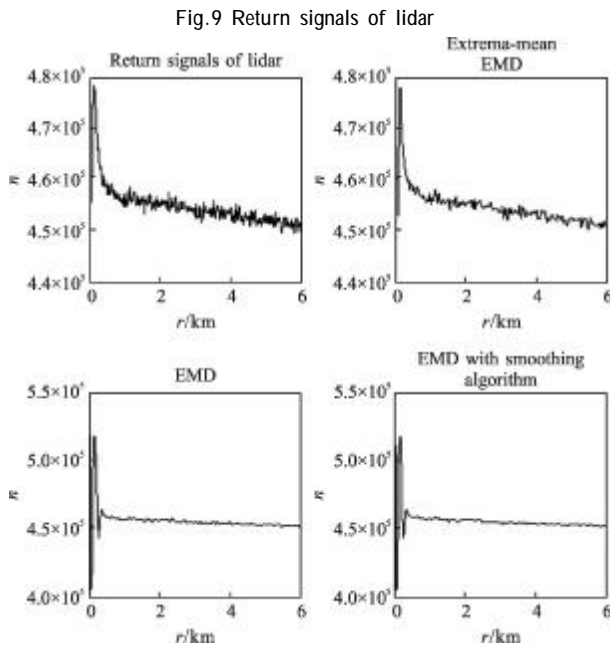


图 10 不同方法去噪效果对比

Fig.10 Comparison among the denoising results of different methods 论是传统 EMD 还是 EMD 与平滑算法的结合方法,在直接减去一阶高频 IMF 分量后都会产生失真。图 9-10 中,纵坐标 n 指激光雷达接受的光子数,横坐标 r 指激光雷达探测的距离,而文中所提出的极点均值型 EMD 则很好地分离出了噪声,并能够一定程度上的保持信号的细节,取得相对不错的去噪效果。

4.2 针对高云和气溶胶探测激光雷达信号去噪实验

实验采用 2008-6-30 日安徽光机所测得的数据,在数据中的 12 km 处出现云层。针对此种情况,对比了传统 EMD 算法,传统 EMD 算法与平滑算法相结合方法以及文中所用方法的去噪效果。在实际操作中,极点均值型 EMD 能在 1,2 阶 IMF 中分离出噪声,而传统 EMD 只能在 1 阶分离出噪声。

从图 11 可以看出,三种去噪方式都没有流失太多有用信号,对云层信息均能够很好地保留。但是极点均值性 EMD 的去噪效果明显好于传统 EMD 以及平滑算法相结合的 EMD 方法。图中横坐标 r 指激光雷达探测的距离。

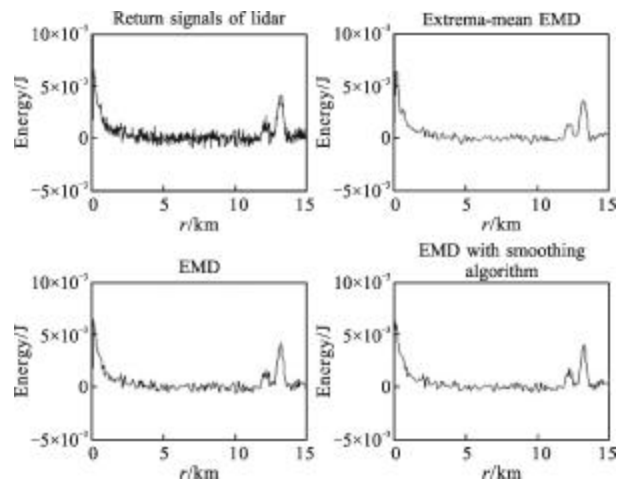


图 11 不同方法去噪效果对比

Fig.11 Comparison among the denoising results of different methods

5 结论

EMD 分解是一种自适应的分解方法,非常适合处理非线性非平稳信号。但由于受到模态混叠的影响,使其信号去噪上遇到了困难。文中提出了一种极点均值型 EMD 分解方法,给予 IMF 一个新的定义,在一定程度上降低了模态混叠,使其可以适用于信号去噪。通过激光雷达回波信号的消噪实验,检验了这种方法的有效性。

这种方法还可同某些方法相结合用于信号检测方面,与其他解决模态混叠的方法相比,简单实用,具有多方面的应用前景。

参考文献:

- [1] Huang N E. The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[M]. London: Proc R Soc London, 1998.
- [2] Huang N E. The age of large amplitude coastal seiches on the caribbean coast of Puerto rice [J]. *Phy Oceanography*, 2000, 30(8): 405-409.
- [3] Pachori R B. Discrimination between ictal and seizure-free EEG signals using empirical mode decomposition [EB/OL]. [2008-01-05]. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1595395>.
- [4] Xiong Xinglong, Ji ang Lihui, Feng Shuai, et al. Using improves Newton method to determine the boundary value of atmospheric extinction coefficient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1744-1749. (in Chinese)
熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 改进的牛顿法确定大气消光系数边界值[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1744-1749.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S R. A new view of non linearwater waves: the hibert spectrum [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 1999, 1: 417-457.
- [6] Xiong Xinglong, Jiang Lihui, Feng Shuai. Return signals processing method of Mie scattering lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 89-95. (in Chinese)
熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅. Mie 散射激光雷达回波信号处理方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 89-95.
- [7] Chen Min, Sun Dongsong, Li Hongjing. Detective method and analysis of atmosphere slant visibility for lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 156-160. (in Chinese)
陈敏, 孙松, 李洪敬. 激光雷达斜程能见度的一种探测方法其分析[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 156-160.
- [8] 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.
- [9] Zhang J, Yan R Q, Gao R, et al. Performance enhancement of ensemble empirical mode decomposition [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24: 2104-2123.
- [10] He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. A denoising method for backscatter signal of laser ceilometer based on hilbert-huang transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 32(2): 1-10. (in Chinese)
何俊峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于希尔伯特黄变换的激光云高仪后向散射信号去噪方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 1-10.
- [11] Lin Ruilin, Sun Yunling, Meng Xiangdong. Research on the EMD method based on wavelet noise reduction [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2010, 39(2): 30-32. (in Chinese)
林瑞霖, 孙云岭, 孟祥东. 基于小波降噪的经验模式分解方法研究[J]. *船海工程*, 2010, 39(2): 30-32.
- [12] Wu Z, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method [J]. *Rroc R Soc Lond A*, 2004, 460: 1597-1611.