

基于自适应多尺度形态滤波与 EMD 的激光雷达回波 信号去噪方法

蒋立辉^{1,2}, 符超², 刘雯菁², 熊兴隆^{1,2}

- (1. 中国民航大学 民航气象技术研究所, 天津 300300;
2. 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: 在使用经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)对激光雷达回波信号进行去噪处理时, 由于信号含有脉冲及间歇等间断事件而产生模态混叠, 导致不能很好地分解出有用信号成分, 影响去噪效果。针对这一问题, 提出了一种形态滤波与 EMD 相结合的组合算法。首先, 使用自适应多尺度形态滤波器作为前置单元, 对信号进行初步处理, 剔除信号中的间断事件干扰。之后, 应用 EMD 对处理过的信号去噪。采用仿真数据及真实激光雷达回波数据进行了去噪实验。实验结果表明, 文中算法相比于直接 EMD 去噪, 在仿真试验中信噪比提高了 8.89 dB, 均方根误差降低了 0.0514; 在真实回波数据去噪实验中, 6 km 以后平均信噪比提高了 3.356 4 dB。该组合算法有效地抑制了模态混叠现象, 具有良好的去噪效果及应用前景。

关键词: 模态混叠; 经验模式分解; 激光雷达回波信号; 形态滤波; 去噪

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1673-07

Lidar backscattering signal denoising method based on adaptive multi-scale morphological filtering and EMD

Jiang Lihui^{1,2}, Fu Chao², Liu Wenqing², Xiong Xinglong^{1,2}

- (1. Civil Aviation Meteorological Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Because of interruption contained in a Lidar echo signal, mode mixing is often generated when using EMD (Empirical Mode Decomposition) to denoise such a signal. It lead to that it can't remove the noise from useful signal easily, and make the denoising effect so worse. In order to solve this problem, a combinational algorithm was presented which combine the morphological filtering and EMD together. Firstly, an adaptive multi-scale morphological filter was used to dispose the signal and remove the interruption, as a preliminary treatment, then used EMD for denoising. At last, a simulated signal denoising experiment and a real Lidar echo signal denoising experiment were done, the results showed that SNR increased by 8.89 dB and RMSE reduced by 0.051 4 compared with using EMD to denoise directly in the former experiment, the mean-SNR after 6 km increased by 3.356 4 dB in the later. This

收稿日期: 2014-09-08; 修订日期: 2014-10-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB731800); 国家自然科学基金(60879016);

国家自然科学基金民航联合重点基金(U1433202)

作者简介: 蒋立辉(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事激光雷达探测、图像处理及光电子技术等方面的研究。

Email: jlhhit@163.com

combinational algorithm can restrain mode mixing effectively, and has a better denoising effect and application prospects.

Key words: mode mixing; empirical mode decomposition; lidar echo signal; morphological filtering; denoising

0 引言

激光雷达能见度仪是一种利用大气气溶胶及分子的后向散射信号来反演能见度的主动式观测设备,在民用航空领域具有很好的应用前景。其接收到的回波信号含有各种噪声,如天空背景光噪声、探测器的暗电流和热噪声、散粒噪声等。由于噪声的存在,降低了激光雷达的探测距离与探测精度。因此,滤除噪声是激光雷达信号处理中一个极为重要的步骤^[1]。

激光雷达回波信号是一种典型的非线性、非平稳信号。对于这样的信号,目前国内外较多使用经验模式分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)^[2-3] 的去噪方法。EMD 去噪具有很好的自适应性,且不受测不准原理约束,可以将非线性信号分解为一系列频率由高到低排列的固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF),极好地反映了信号在任何时间局部的频率特征^[4-6]。但是在分解的过程中,EMD 需要利用信号的局部极值点来拟合上下包络线,而这一过程对原信号存在的间断事件如间歇信号、脉冲噪声等非常敏感,极易容易造成模态混叠 (Moding Mixing)。模态混叠一旦产生,会对信号的后续分解产生干扰,使得分解结果不能完整、有效地将有用信号与噪声分离,影响去噪效果。

针对模态混叠的问题,2003年 Huang N.E. 给出了基于周期上限准则的解决方法^[7],但是它需要预先掌握信号的基本特点,这不仅难以做到,而且削弱了 EMD 自适应的优点。2005年 Ryan Deering 提出了掩膜信号法^[8],通过对原信号引入合适的掩膜信号再进行 EMD 分解,能在一定程度上降低模态混叠,但如何选择合适的掩膜信号仍然是一个难点。2009年 Wu 和 Huang 等人提出了 EEMD 分解^[9],这种方法可以有效地降低模态混叠,但是需要对原信号引入白噪声。2010年赵玲、刘小峰等提出了改进的掩膜信号法^[10],可该方法只是对所用掩膜信号做了改进,依然存在需要事先选取合适掩膜信号的难点,不具有通

用性。2013年熊兴隆提出了极点均值型经验模式分解^[11],它给予固有模态函数一个新的定义,并对分解时求包络平均的方法做了改进,很好地避免了包络拟合误差的产生,但它依然无法消除原信号有间断事件时的混叠问题。

脉冲、间歇等间断事件带来的模态混叠,归根究底是因为其影响到了信号的 EMD 分解过程,产生了分解误差。因此,在 EMD 分解之前将这些间歇现象去掉,就可以从根本上抑制由此产生的模态混叠。形态滤波是一种基于数学形态学的非线性滤波方法,其基本思想是用一个具有一定形状的结构元素作为探针去量度信号的几何特征结构,再进行匹配或局部修正,有效提取信号的边缘轮廓并保持信号的主要形态特征。形态滤波能够非常好地滤除峰值、低谷脉冲以及高斯白噪声,平滑信号中的间歇信号,且不会对原信号造成实质性的污染。文中提出了一种形态滤波与 EMD 相结合的组合算法,即使用自适应多尺度^[12-13]形态滤波器对信号进行初步处理,剔除信号中的间断事件,降低其干扰,之后再应用 EMD 去噪。实验结果表明,该方法可以有效地抑制模态混叠,并取得了较为理想的去噪效果。

1 形态滤波与 EMD 组合算法去噪原理

1.1 产生模态混叠的原因

在使用 EMD 对激光雷达能见度仪回波信号进行去噪处理时会产生模态混叠,造成去噪结果失真,按此反演得到的能见度也就失去了其意义。EMD 分解其筛分取决于信号中极值点的存在与分布。当原信号含有脉冲、间歇等间断事件时,这些脉冲及间歇会造成信号局部极值点的异常,使其分布不均匀,从而导致三次样条插值求取的包络为间断事件的局部包络和真实信号包络的组合。经该包络计算出的均值再筛选出的 IMF 分量就同时包含了信号的固有模式和间歇现象的固有模式,或者说包含了相邻特征时间尺度的固有模式。这样,IMF 中有用信号成分

与噪声成分混杂在一起,无法适用于去噪处理。

因此,如何有效地在对信号做 EMD 分解前去除间断事件,成为解决模态混叠问题的关键。

1.2 使用形态滤波去除间断事件

文中组合算法使用形态滤波器来有效的去除间断事件。使用形态滤波需要考虑两个问题:一个是如何根据基本形态运算的特点将其结合为需要的组合形态滤波器;另一个是如何选取合适的结构元素,使去噪效果更为优良。

1.2.1 运算方式的选取

基本的形态运算包括腐蚀、膨胀、形态开和形态闭运算。其中,形态开可以抑制信号中的峰值脉冲噪声,去除信号上边缘的毛刺和孤立点。形态闭可以抑制信号中的低谷噪声脉冲,去除信号下边缘的毛刺和孤立点。同时,由于形态滤波的平滑作用,能够较好地将近断事件滤除掉。单独使用开、闭运算会分别因为其收缩性和扩张性而导致统计偏倚现象,因此,为了同时发挥开、闭算子的优势,通常采用形态开、形态闭的级联形式来构造开-闭和闭-开组合形态滤波器(公式(1))用于去噪处理。

$$y(k)=(f \circ g \cdot g \cdot f \circ g \circ g)/2 \quad (1)$$

1.2.2 结构元素的选取

结构元素的设计决定于要处理信号的形状,只有与结构元素的尺寸和形状相匹配的信号基元才能被有效保留。综合考虑信号的复杂性及计算的简单性,文中选择了直线型结构元素,由于直线型结构元素不涉及到高度信息,因此文中提到的尺度均指的是长度尺度。

激光雷达回波信号通常包含多种类型的噪声,如果类似于传统的形态滤波器仅使用单一尺度的结构元素,则会因为它只对应一个特定的噪声而无法将所有的噪声滤除,去噪效果必然不好。考虑到脉冲、间歇等都是分布在两个相邻极点之间,因此,若以局部极值点作为确定结构元素的主要依据,则能够自适应地构成一系列尺度匹配于原信号的结构元素,避免主观因素造成的误差,从而达到更为精准且优良的滤波效果。

基于此思想,首先求得原信号的极值点分布,进而得到相邻极值点间距的最大值与最小值。做求奇处理后,再从最小值到最大值以步长 2 生成一系列长度尺寸,作为文中所用结构元素的尺度。

1.3 EMD 分解后去噪

EMD 能将一个信号的能量按照时域各种固有尺度的波动进行分解,得到一系列频率从大到小的固有模态函数(IMF)。EMD 分解后,高频 IMF 主要反映噪声信息,低频 IMF 和冗余项主要反映数据的特征信息和趋势。所以 EMD 去噪的原理就是剔除高频 IMF,然后利用剩下的 IMF 以及冗余项对信号进行部分重构,即:

$$y_j(k)=\sum_{i=j}^K \text{IMF}_i(k)+r(k) \quad (2)$$

其中, j 值的确定可以通过对每个重构信号的 SNR 和 RMSE 进行计算,综合考虑得到最佳的重构起点。

2 形态滤波与 EMD 组合算法基本步骤

在前文叙述的基础上,列出文中所用去噪方法的具体步骤:

(1) 得到信号极大值位置序列 Max 及极小值位置序列 Min,并根据每个序列计算出相邻极大值间隔 d_{pi} 以及相邻极小值间隔 d_{vi} 。

(2) 求出极值间隔的最大值和最小值:

$$\lambda_{\min}=\text{ceil}\left(\min\left(\frac{\min(d_{pi})}{2}, \frac{\min(d_{vi})}{2}\right)\right) \quad (3)$$

$$\lambda_{\max}=\text{ceil}\left(\max\left(\frac{\max(d_{pi})}{2}, \frac{\max(d_{vi})}{2}\right)\right) \quad (4)$$

然后得到需要的直线型结构元素集合:

$$\lambda=\{\lambda_i|2\lambda_{\min}+1, 2\lambda_{\min}+3, \dots, 2\lambda_{\max}+1\} \quad (5)$$

(3) 用结构元素 λ_i 对信号 $f(k)$ 进行多尺度形态学滤波,每个结构元素得到对应的结果 $y_i(k)$,并对其进行加权平均,得到最终的形态滤波器处理结果:

$$y(k)=\sum_{i=1}^N w_i y_i(k), \text{ 其中, 权值 } w_i \text{ 定义为 } w_i=\frac{1}{e_i} / \sum_{i=1}^N \frac{1}{e_i},$$

$$e_i=\sum_{k=1}^N |y_i(k)-f(k)|。$$

(4) 对 $y(k)$ 进行 EMD 分解,得到一系列固有模态函数,去掉反映噪声特征的高频 IMF,再用其余的 IMF 以及冗余项重构信号,得到去噪结果。

3 仿真实验

3.1 仿真信号实验

在实验中,为了对信号处理效果进行有效的评估,引入如下几个定义:

(1) 均方根误差:

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [f_n(k) - f(k)]^2} \quad (6)$$

(2) 输入信噪比:

$$\text{SNR}_{\text{input}} = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^K f^2(k)}{\sum_{k=1}^K [|f_n(k) - f(k)|]^2} \quad (7)$$

(3) 输出信噪比:

$$\text{SNR}_{\text{output}} = 10 \lg \frac{\sum_{k=1}^K f^2(k)}{\sum_{k=1}^K [|y(k) - f(k)|]^2} \quad (8)$$

式中: $f(k)$ 为原始信号; $f_n(k)$ 为含噪声信号; $y(k)$ 为去噪后信号。降噪后, 信噪比越大, 均方根误差越小, 降噪效果越好。为方便叙述, 实验中称直接使用 EMD 对信号进行去噪为 Direct-EMD, 而文中所述方法去噪为形态-EMD。

在仿真试验中, 定义原信号为 $f(t) = \sin(6\pi t) + \sin(10\pi t)$, 混入随机脉冲噪声、信噪比为 10 dB 的高斯白噪声后, 再加入一段高频小幅值正弦波 $f(t) = 0.1\sin(120\pi t)$, 然后分别进行 Direct-EMD 去噪和形态-EMD 去噪, 结果如图 1 所示。

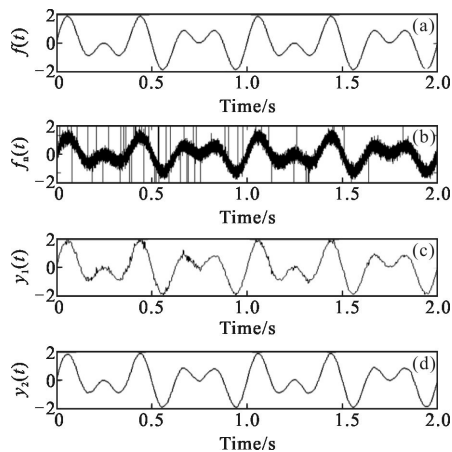


图 1 两种算法处理结果

Fig.1 Processing results of the two algorithms

图 1(a)~1(d) 依次为模拟信号 $f(t)$ 、含噪信号 $f_n(t)$ 、Direct-EMD 算法处理得到的去噪信号 $y_1(t)$ 以及用形态-EMD 算法去噪处理后的信号 $y_2(t)$ 。可以看出, $y_1(t)$ 有清楚的毛刺以及高频噪声存在, 证明所得结果并没有很好地将噪声与原信号分离开来, 去噪效果不理想。而 $y_2(t)$ 并没有毛刺出现, 整体很平滑, 非

常好地滤除了脉冲、间歇等干扰, 完成了去噪过程。表 1 为两种去噪方法得到的输出信噪比与均方根误差的仿真数据结果。

表 1 两种去噪算法性能比较

Tab.1 Performance of two denoising algorithms

	$f_n(t)$	$y_1(t)$	$y_2(t)$
SNR	7.469 4	21.914 5	30.804 6
RMSE	0.423 2	0.080 2	0.028 8

从表 1 中的数据可得到, 形态-EMD 算法具有显著的优势。去噪结果的信噪比相比于含噪信号提高了 23.34 dB, 相比于 Direct-EMD 去噪结果提高了 8.89 dB, 并且均方根误差从 0.0802 降低到了 0.0288。

从两种算法分解得到的 IMF 中分别取其最后四阶 IMF 及冗余项来进行分析, 如图 2、图 3 所示。

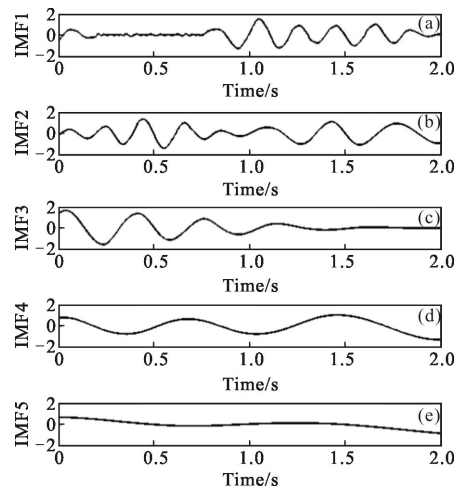


图 2 Direct-EMD 所得后五阶 IMF

Fig.2 Last 5 IMFs of Direct-EMD

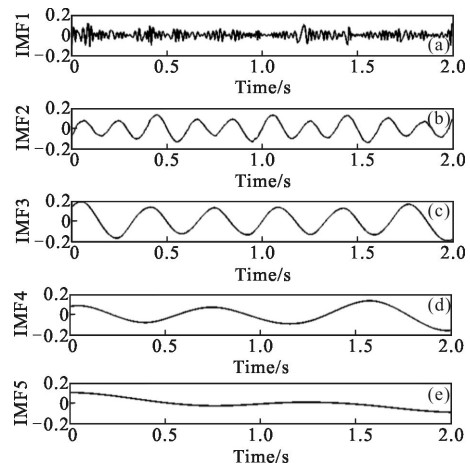


图 3 形态-EMD 所得后五阶 IMF

Fig.3 Last 5 IMFs of Morphological-EMD

由图 2 可得,在 IMF1、IMF2 及 IMF3 中,同一个 IMF 中出现了两种不同的频率特征,有明显的模态混叠现象。这是因为含噪信号中有大量随机脉冲、间歇,使得 EMD 分解时出现了分解误差。而在图 3 中,经过形态滤波器预处理后再进行 EMD 分解的效果则好很多,波形清楚且没有发生混杂,非常好地分离开了噪声成分及有用信号成分。

3.2 激光雷达回波信号去噪实验

实验数据来源于自行研制的同轴后向散射式激光雷达能见度仪,由激光发射单元、光学接收单元、信号采集单元和数据处理单元构成,探测距离约 6 km。具体参数见表 2。

表 2 能见度仪系统参数

Tab.2 Parameters of visibility measurement system

	Item	Parameter
Transmitter	Wavelength/nm	905
	Pulse width/ns	100
	Energy/ μ J	20
	PRF/kHz	5
	Diameter/mm	50
Receiver	FOV/mrad	1.2
	Filter-bandwidth/nm	5
Detector	Detector	SPCM
Acquisition	Acquisition	MCS-pci
Control cell	Embedded-computer	PCM-3370

实验数据采用的是 2009 年 5 月 5 日天津机场附近清晨 5 点的激光雷达回波信号,如图 4 所示,横坐标表示探测距离 r ,纵坐标表示系统内部光子计数器统计到的光子数 n ,由于背景噪声的影响,信号波形起伏明显。

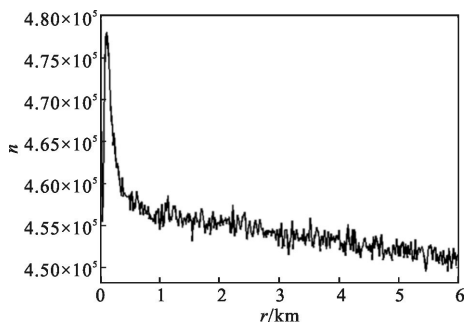


图 4 激光雷达回波信号

Fig.4 Return signals of lidar

用 Direct-EMD 算法与形态-EMD 算法分别对此雷达回波信号做去噪处理,而且均是去掉第一阶高频

IMF 分量后再重构信号,去噪结果如图 5、图 6 所示。

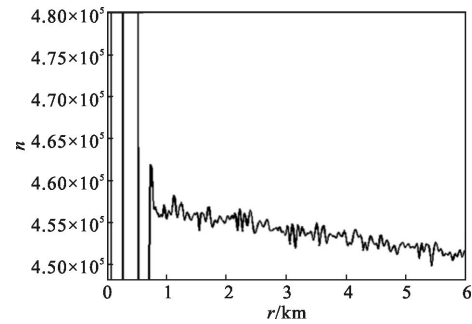


图 5 Direct-EMD 的去噪结果

Fig.5 Result of Direct-EMD denoising

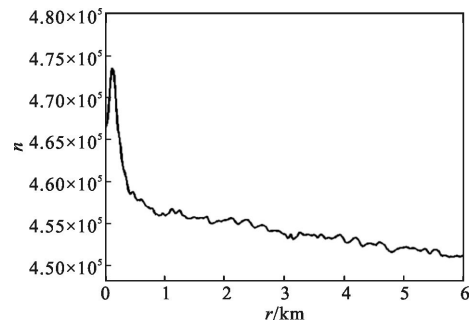


图 6 形态-EMD 的去噪结果

Fig.6 Result of Morphological-EMD denoising

可以看出,在去掉第一阶高频 IMF 后,Direct-EMD 去噪结果已经出现了很严重的失真,0~1 km 的回波数据,完全无法进行有效反演。而 1~6 km 的数据跟原回波信号类似,依然有较大的起伏。

同样是去掉了第一阶高频 IMF,在使用形态-EMD 处理雷达回波信号后,可以看出,较好地分离且剔除了噪声,并在一定程度上保持了信号的细节信息,取得了相对不错的去噪效果。

为评估其去噪效果,使用季承荔、周军^[14]提出的方法来计算激光雷达回波信号信噪比廓线。计算结果如图 7 所示。

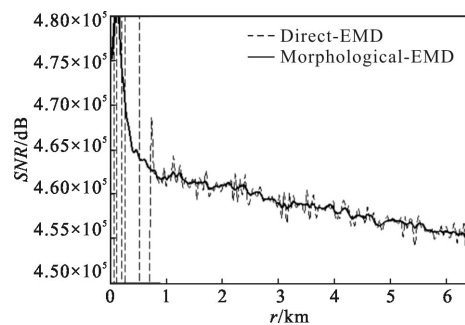


图 7 两种算法所得信噪比廓线

Fig.7 SNRs of two denoising algorithms

两个去噪结果计算得到的信噪比廓线变化趋势与它们的后向散射回波信号廓线的变化趋势基本相同。取 6 km 以后的数据求得其平均信噪比, Direct-EMD 所得结果为 58.142 8 dB, 而形态-EMD 所得结果为 58.256 2 dB, 信噪比提高了 0.113 4 dB。这是由于实验选用的真实回波信号为累积 100 万个脉冲后所得, 因此原回波信号信噪比较高, 导致去噪效果提升不明显。但可以看出, 文中算法较好地解决了 Direct-EMD 去噪的失真问题。

再次选用 2009 年 3 月 25 日天津机场附近测得的一组回波信号进行去噪实验, 结果如图 8 所示。

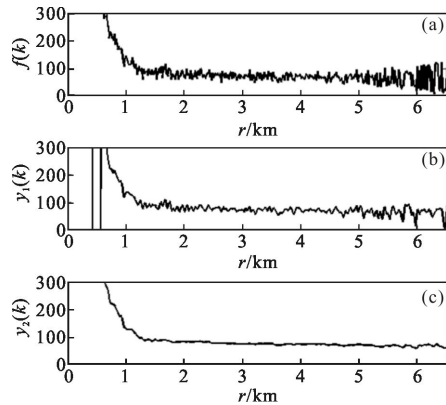


图 8 两种算法去噪结果

Fig.8 Denoising results of the two algorithms

图中 $f(k)$ 为原始回波信号, $y_1(k)$ 和 $y_2(k)$ 分别为 Direct-EMD 去噪结果与形态-EMD 去噪结果。从图中依然可以看到, Direct-EMD 的去噪结果不理想, 0.7 km 之前的数据有严重失真。而使用文中形态-EMD 组合算法去噪后依然保持了原信号的变化趋势, 没有失真现象。

同样的, 分别计算其信噪比廓线, 如图 9 所示。再利用 6 km 后的数据求平均信噪比, Direct-EMD 所得结

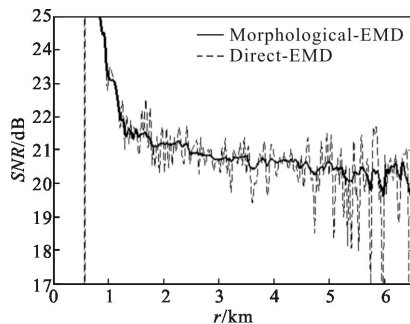


图 9 两种算法所得信噪比廓线

Fig.9 SNRs of two denoising algorithms

果为 16.6635 dB, 而形态-EMD 所得结果为 20.019 9 dB, 信噪比提高了 3.356 4 dB, 信噪比改善达 20.14%。

4 结论

提出了一种形态滤波与 EMD 相结合的组合去噪算法。通过对信号局部极值点的计算, 自适应地产生结构元素来对信号进行多尺度形态滤波, 然后再做 EMD 去噪, 有效地抑制了模态混叠, 使其可以适用于信号降噪。通过对模拟信号的仿真实验以及真实激光雷达回波信号的消噪实验检验了其有效性。

文中对于分解后 IMF 的处理还略有不足。直接去掉若干高频 IMF 后重构信号固然可以有效地去除噪声, 但是高频 IMF 里仍然含有少量的信号信息, 如果能够行之有效地将高频 IMF 里的噪声与信号分离开来再进行重构, 必然可以提高去噪的精度, 这也是下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] Zhou Zhirong, Hua Dengxin. Improvement of the signal to noise ratio of Lidar echo signal based on wavelet de-noising technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(8): 961-966.
- [2] 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.
- [3] Tian Pengfei, Cao Xianjie, Liang Jiening, et al. Improved empirical mode decomposition based denoising method for lidar signals[J]. *Optics Communications*, 2014, 325: 54-59.
- [4] Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and hibert spectrum for nonlinear and non-stationary time seris analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1998, 45: 903-955.
- [5] Huang N E, Shen Z, Long S. A new view of nonlinear water waves: The hilbert spectrum [J]. *Aunu Rev Fluid Mech*, 1999(1): 417-457.
- [6] Guo Tengxiao, Ding Xuequan, Dong Xiaoqiang, et al. New method of preprocessing IR remote sensing spectrum signals based on EMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3196-3200. (in Chinese)
郭腾霄, 丁学全, 董晓强, 等. 基于 EMD 的红外遥测光谱

- 信号预处理新方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3196-3200.
- [7] Huang N E, Wu M, Long S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis[J]. *Proc R Soc Lond A*, 2003, 459: 2317-2345.
- [8] Deering Ryan, Kaiser James F. The use of a masking signal to improve empirical mode decomposition[C]//ICASSP IEEE Int Conf Acoust Speech Signal Process Proc, 2005: 485-488.
- [9] 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.
- [10] Zhao Ling, Liu Xiaofeng, Qin Shuren, et al. Use of masking signal to improve empirical mode decomposition[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(9): 13-17. (in Chinese)
赵玲, 刘小峰, 秦树人, 等. 消除经验模态分解中混叠现象的改进掩膜信号法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9): 13-17.
- [11] Xiong Xinglong, Li Meng, Jiang Lihui, et al. Extrema-mean empirical mode decomposition and its application of denoising[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1628-1634. (in Chinese)
熊兴隆, 李猛, 蒋立辉, 等. 极点均值型经验模式分解及其去噪应用[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1628-1634.
- [12] Jiang Lihui, Li Meng, Xiong Xinglong, et al. De-noising method based on multiscale morphological filter optimized by detection factor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 654-658. (in Chinese)
蒋立辉, 李猛, 熊兴隆, 等. 探测因子优化的多尺度形态滤波器去噪方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 654-658.
- [13] Zhao Mingbo, He Jun, Tian Junsheng, et al. Ladar data filtering method based on improved progressive multi-scale mathematic morphology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0328001-0328001. (in Chinese)
赵明波, 何峻, 田军生, 等. 基于改进的渐进多尺度数学形态学的激光雷达数据滤波方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0328001-0328001.
- [14] Ji Chengli, Zhou Jun. Simulation of signal and signal-to-noise ratio received by an airborne dual-wavelength Mie lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(4): 250-261. (in Chinese)
季承荔, 周军. 机载双波长米散射激光雷达大气回波信号与信噪比的模拟计算 [J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(4): 250-261.