

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.012

# 改进的激光雷达回波信号去噪方法\*

朱玲嫔<sup>1</sup> 常建华<sup>1,2</sup> 李红旭<sup>1</sup> 徐帆<sup>1</sup> 刘秉刚<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;

2. 南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

**摘要:** 激光雷达回波信号的强度随距离的平方衰减,当探测距离较大时,信号将淹没在较强的噪声之中。因此,如何有效地从强背景噪声中提取出有用信号至关重要。利用经验模态分解将激光雷达回波信号进行分解,根据本征模态函数与回波信号之间的相关性,结合软阈值与粗糙惩罚技术,有效地提高了激光雷达回波信号去噪的效果。实验结果表明,当加入5 dB高斯白噪声时,该方法的输出信噪比为16.67 dB,均方根误差为 $1.49 \times 10^{-11}$ 。相比于其他去噪方法,该方法具有较高的信噪比及较低的均方根误差,从而证明了此方法的有效性。

**关键词:** 激光雷达回波信号;经验模态分解;软阈值;粗糙惩罚

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Improved de-noising method of lidar echo signal

Zhu Lingyan<sup>1</sup> Chang Jianhua<sup>1,2</sup> Li Hongxu<sup>1</sup> Xu Fan<sup>1</sup> Liu Binggang<sup>1</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The intensity of the lidar echo signal decays with the square of the distance. When the detection distance is large, the signal will be submerged in the strong noise. Therefore, it is crucial to extract valid signal efficiently from strong background noise. In this paper, the lidar echo signal is decomposed through the empirical mode decomposition. According to the correlation between the intrinsic mode function and the echo signal, the effect of lidar echo signal de-noising is improved effectively by combining with soft threshold and roughness penalty techniques. The experimental results of this method show that the output signal-to-noise ratio is 16.67 dB and the root mean square error is  $1.49 \times 10^{-11}$  when 5 dB Gaussian white noise is added. Compared with other de-noising techniques, this method achieves the higher signal-to-noise ratio and the lower root mean square error, thereby the effectiveness of this method is proved.

**Keywords:** lidar echo signal; empirical mode decomposition; soft threshold; roughness penalty

## 0 引 言

激光雷达是随着激光器和雷达技术的发展而产生的一种光学遥感设备,广泛应用于云和气溶胶的垂直结构、大气边界层、水蒸气和平流层臭氧等方面的探测<sup>[1-4]</sup>。在实际应用中,激光雷达后向散射回波信号的强度随距离

的平方衰减,当探测距离较大时,信号极其微弱<sup>[5]</sup>。同时,由于激光雷达系统中存在各类噪声以及外部环境中的背景光的影响,回波信号会很容易淹没在这些噪声之中<sup>[6]</sup>。因此,对激光雷达回波信号进行去噪至关重要<sup>[7-8]</sup>。

常用的去噪方法主要有傅里叶变换、滑动平均、小波变换以及经验模态分解等。傅里叶变换广泛应用于处理

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04

\* 基金项目:国家自然科学基金(11374161)、江苏省重点研发计划(BE2016756)、江苏高校优势学科II期建设工程、江苏省高校品牌专业建设工程资助项目

线性平稳信号,但由于该方法不具有时频分析的局域性,对非线性、非平稳信号去噪时会导致失真<sup>[9]</sup>。滑动平均是一种非递归的低通滤波方式,可对噪声进行简单、粗糙的滤除,然而它以降低激光雷达回波信号的时间和空间分辨率为代价<sup>[6]</sup>,从而使回波信号的去噪效果不理想。小波变换在一定程度上弥补了傅里叶变换的不足,具有良好的时频局域性,可用于处理非线性、非平稳信号,但其存在基函数的选择问题,自适应性较差<sup>[10-11]</sup>。

经验模态分解(EMD)是由 Huang 等人于 1998 年提出的一种新的适用于处理非线性、非平稳信号的方法<sup>[12]</sup>,具有较强的自适应性,能有效克服小波变换的基函数选择问题。EMD 按时域中各固有尺度的波动对信号进行分解,得到一系列本征模态函数(IMFs)。如今,该方法在激光雷达回波信号去噪方面已得到一些应用。通常情况下,回波信号中的噪声主要存在于前几个 IMFs (高频分量)中<sup>[13]</sup>,噪声滤除工作主要针对这些分量。Wu 等人<sup>[9]</sup>在处理回波信号时将前五项分量直接去除,实现了信号噪声的有效去除。但是,在强干扰情况下,信号分解后会产生模态混叠,简单地去除前几项分量会丢失有用信号。为保障有用信号的完整性,阈值法、Savitzky-Golay 滤波等多种技术被提出<sup>[14-17]</sup>。然而,在噪声滤除过程中忽略对后几项分量的处理,会使重构的回波信号中依然含有噪声。

本文利用 EMD 对激光雷达回波信号进行分解,通过分析 IMF 分量与回波信号的相关性<sup>[18]</sup>,将分解的 IMFs 分为相关分量和不相关分量两个函数组。在此基础上,分别采用软阈值和粗糙惩罚技术对两个函数组进行去噪处理。最后,重构处理后的各分量以及残差,获得去噪后的回波信号。实验结果表明,该方法有效提高了激光雷达回波信号的去噪效果。

## 1 EMD 原理

EMD 能自适应地将信号  $x(n)$  分解为有限个 IMFs,每个 IMF 分量是一个由原信号的频率分量的子集构成的振荡信号。IMFs 需要满足两个准则:1)极值点以及过零点个数须相等或最多相差一个;2)由极值点确定的上下包络的均值须为零<sup>[19]</sup>。EMD 对 IMFs 的提取过程是一个筛选过程,如图 1 所示。最终,可将 IMFs 和残差相加即可获得原信号:

$$x(n) = \sum_{i=1}^L h^{(i)}(n) + res(n) \quad (1)$$

式中:  $h^{(i)}(n)$  为第  $i$  个 IMF 分量,  $L$  为提取的 IMFs 的个数,  $res(n)$  为残差。

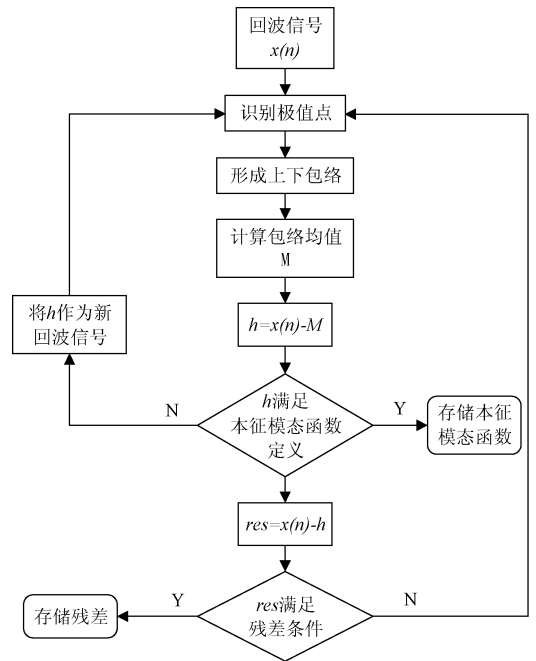


图 1 EMD 的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EMD

## 2 基于 EMD 的去噪原理

### 2.1 确定 IMFs 中的不相关分量与相关分量

在一个真实信号  $y(n)$  的基础上,加入噪声信号  $e(n)$ ,得到加噪后的信号:

$$x(n) = y(n) + e(n) \quad (2)$$

对于传统的 EMD 去噪方法(EMD-D),主要是将含有有用信号的相关分量进行重构,表示为:

$$x^*(n) = \sum_{i=k_{th}}^L h^{(i)}(n) + res(n) \quad (3)$$

式中:  $k_{th}$  由原信号  $x(n)$  与 IMF 分量间的相关性决定。重构信号也可表示为:

$$x_m^*(n) = x(n) - \sum_{i=1}^m h^{(i)}(n) \quad (4)$$

计算原信号  $x(n)$  与  $x_m^*(n)$  之间的相关系数  $\rho(m)$ <sup>[17]</sup>:

$$\rho(m) = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)x_m^*(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N x^2(n) \sum_{n=1}^N (x_m^*)^2(n)}} \quad (5)$$

式中:  $N$  为 IMF 分量的长度,  $m$  为  $\rho(m)$  开始小于常数  $C$  时对应的值。

$\rho(m)$  的值逐渐减小,直至达到一个最小值。通过设定  $C$  的值,确定  $k_{th}$  的位置,即第一个相关分量的位置:

$$k_{th} = \arg \underset{1 \leq m \leq L}{last} \{ \rho(m) \geq C \} + 1 \quad (6)$$

式中:  $last$  表示在  $\rho(m)$  中, 最后一个  $\geq C$  的值,  $C$  的取值范围为  $[0.75, 0.85]$ , 本文  $C$  选为 0.85;  $L$  为 IMF 分量的个数。

通过上述方法确定  $k_{th}$  的位置, 将前  $k_{th} - 1$  项 IMF 作为不相关的分量, 剩余 IMF 则为相关分量。

### 2.2 对于不相关分量的处理

在强干扰情况下, 利用 EMD 对后向散射信号进行分解, 信号与噪声会被提取到一个 IMF 分量中, 采用 EMD-D 去噪往往会丢失有用信号。利用软阈值对不相关分量进行处理可提取被淹没的有用信号<sup>[16]</sup>, 其处理方法如下:

$$c_i(n) = \begin{cases} sgn(h^{(i)}(n)) (|h^{(i)}(n)| - T_i), & |h^{(i)}(n)| > T_i \\ 0, & |h^{(i)}(n)| \leq T_i \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $h^{(i)}(n)$  为第  $i$  个 IMF 分量。  $T_i$  为阈值, 表示为:

$$T_i = \frac{median(|h^{(i)}(n) - median(h^{(i)}(n))|)}{0.6745} \sqrt{2 \ln N} \quad (8)$$

式中:  $N$  为 IMF 分量的长度。

### 2.3 对于相关分量的处理

对于相关分量, 采用粗糙惩罚进行平滑处理。粗糙惩罚是为了克服最小二乘法的不稳健而引入的, 其基本原理是在最小二乘的基础上加入一个惩罚项作为光滑模型<sup>[20]</sup>:

$$S = \min \sum_{n=1}^N (f_n - f_n^*)^2 + \lambda \int (f^{**}(x))^2 dx \quad (9)$$

式中:  $f_n$  为第  $i$  个 IMF 分量的第  $n$  个点,  $f_n^*$  为第  $i$  个 IMF 分量的第  $n$  个点平滑后的值,  $\lambda$  为惩罚系数,  $f^*(x)$  为待估函数,  $f^{**}(x)$  为  $f^*(x)$  的二阶导数。粗糙惩罚的主要作用是控制拟合函数的光滑性, 使平滑结果在不失真和平滑之间达到平衡<sup>[20]</sup>。利用粗糙惩罚对相关 IMF 分量进行处理, 不仅能对回波信号进行平滑, 还可以有效防止失真, 达到更好的去噪效果。

## 3 仿真分析

### 3.1 激光雷达回波信号仿真

激光雷达回波信号中的噪声主要包括散粒噪声、热噪声以及背景光噪声等<sup>[10]</sup>。背景光噪声可以通过硬件电路进行降噪, 如滤光片, 其余噪声可当作高斯白噪声进行处理。根据激光雷达方程, 利用 MATLAB 对真实信号进行仿真, 在此基础上加入 5 dB 的高斯白噪声得到激光雷达回波信号(图 2), 激光雷达方程为:

$$P(r) = \frac{cE_0 Y(r) A_r \beta(r) T^2(r) T_i T_r}{2r^2} \quad (10)$$

式中:  $r$  为光速;  $E_0$  为发射的激光脉冲能量, 单位为 J;  $Y(r)$  为激光雷达几何重叠因子;  $A_r$  为接收望远镜的有效接收面积;  $\beta(r)$  为后向散射系数;  $T^2(r)$  为大气透过率;  $T_i, T_r$  为发射和接收光学系统的总透射率。

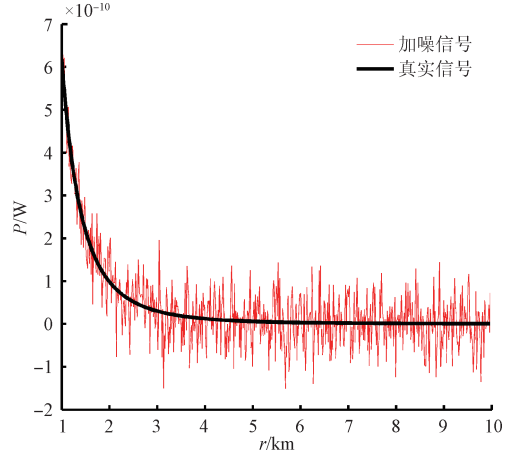
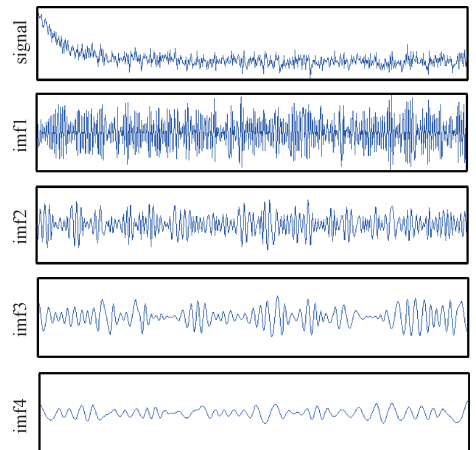


图2 激光雷达回波信号仿真

Fig.2 Simulation of lidar echo signal

### 3.2 激光雷达回波信号去噪

利用 EMD 对激光雷达回波信号进行分解, 其分解结果如图 3 所示。根据式(6)得到 IMF 分量与回波信号之间的相关系数曲线(图 4), 从而确定了  $k_{th}$  的位置 ( $k_{th} = 6$ ), 则认为前 5 项分量为不相关分量, 后 3 项为相关分量。利用软阈值对前 5 项分量进行去噪, 采用粗糙惩罚对相关分量进行平滑, 进而获得去噪后的回波信号, 如图 5 所示。结果表明, 采用该方法去噪后, 回波信号不仅保留了真实信号的趋势, 而且获得了明显的去噪效果。



(a) 激光雷达回波信号与 IMF1~IMF4 分量  
(a) Lidar echo signal and modes from IMF1 to IMF4

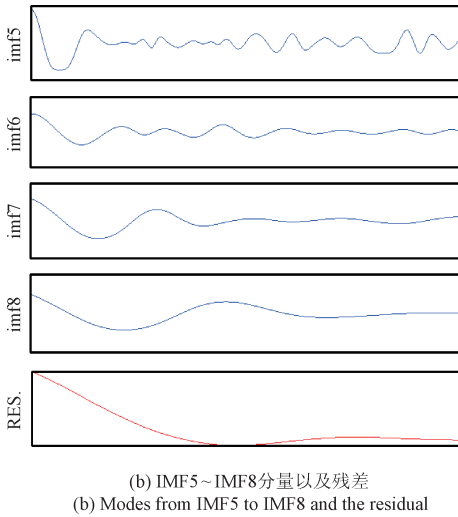


图 3 激光雷达回波信号的 EMD 分解结果  
Fig. 3 EMD decomposition results of lidar echo signal

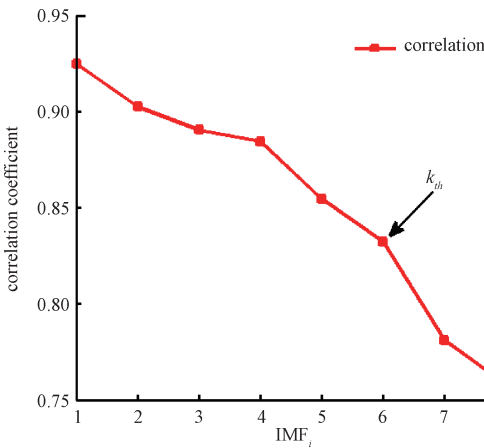


图 4 激光雷达回波信号中 IMFs 对应的相关系数  
Fig. 4 Correlation coefficient versus IMFs of lidar echo signal

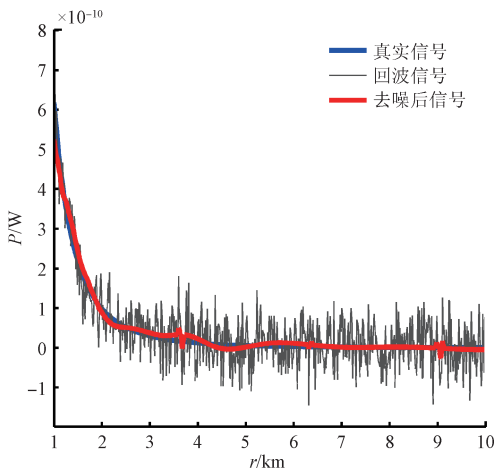


图 5 激光雷达回波信号去噪效果  
Fig. 5 De-noising result of lidar echo signal

为进一步验证本文所用方法 (EMD-STRP) 的有效性, 将其与 EMD-D 方法以及小波变换去噪 (WT) 方法进行比较。采用输出信噪比  $SNR_{out}$  以及均方根误差  $RMSE$  作为评价指标对 3 种方法去噪后的性能进行评估<sup>[6]</sup>。输出信噪比反映了方法的去噪能力, 得到的值越高, 表明该方法的降噪效果越好; 均方根误差反映了去噪后信号与原始信号的相似程度, 其值越小, 则两信号的相似程度越高。二者表示为:

$$SNR_{out} = 10 \log \left( \frac{\sum_{n=1}^N |y(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |y(n) - x^*(n)|^2} \right) \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y(n) - x^*(n))^2} \quad (12)$$

式中:  $y(n)$  为原始信号,  $x^*(n)$  为去噪后的信号,  $N$  为信号的长度。

实验结果表明, 利用 3 种方法对激光雷达回波信号进行去噪后, 虽然都基本保留了真实信号的趋势, 但 WT 方法去噪后的平滑效果明显劣于 EMD-STRP 和 EMD-D 方法, 3 种方法去噪后的效果, 如图 6 所示 (图 6 中红色曲线表示激光雷达回波信号, 黑色曲线表示利用各方法去噪后的信号)。由表 1 的数据可知, EMD-STRP 方法的输出信噪比达到 16.67 dB, 其均方根误差为  $1.49 \times 10^{-11}$ 。相比于 EMD-D 方法, 利用 EMD-STRP 方法去噪后的输出信噪比提高了 6 dB, 均方根误差降低了  $1.49 \times 10^{-11}$ , 表明该方法能够很好地保留有用信号的完整性, 去噪后的信号更加接近真实信号, 其准确性更高; 相比于 WT 方法, 采用 EMD-STRP 方法, 输出信噪比提高了

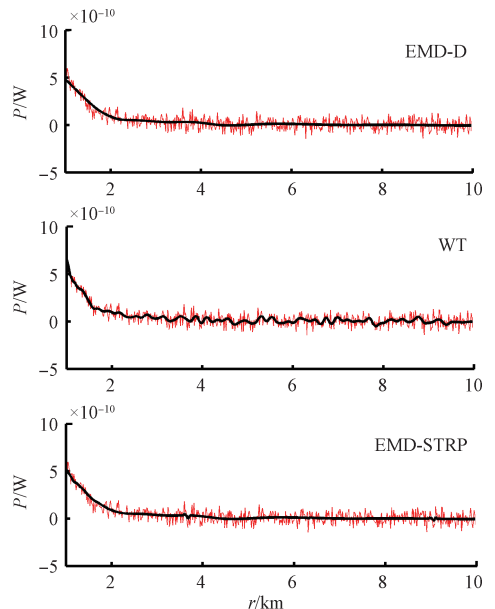


图 6 3 种方法的去噪效果  
Fig. 6 De-noising results of three methods

3.43 dB,均方根误差降低了  $1.72 \times 10^{-12}$ ,表明该方法的平滑效果更好,去噪效果更明显。综上所述,本方法在激光雷达回波信号噪声滤除方面具有一定的优越性。

表1 3种去噪方法的性能

Table 1 Performance of three de-noising methods

方法	$SNR_{out}/dB$	$RMSE(\times 10^{-11})$
EMD-D	10.67	2.98
WT	13.24	2.21
EMD-STRP	16.67	1.49

## 4 结论

激光雷达回波信号的强度随距离的平方衰减,当探测距离较大时,信号将淹没在较强的噪声之中<sup>[5]</sup>。因此,如何有效地从强背景噪声中提取出完整的有用信号至关重要。本文利用EMD对激光雷达回波信号进行分解,根据IMFs与回波信号的相关性,确定相关分量和不相关分量。在此基础上,采用软阈值和粗糙惩罚技术分别对不相关分量以及相关分量进行处理。最后,重构处理后的各分量以及残差,获得去噪后的回波信号。实验结果表明,当加入5 dB高斯白噪声时,相比于EMD-D和WT方法,利用EMD-STRP方法对回波信号去噪后,得到的输出信噪比高达16.67 dB,其均方根误差为  $1.49 \times 10^{-11}$ 。实验结果表明,该方法可在保留有用信号完整性的基础上,有效提高了回波信号的信噪比,进而证明了该方法在激光雷达回波信号去噪方面的有效性。

## 参考文献

[1] KOVALEV V A, EICHINGER W E. Elastic lidar: Theory, practice, and analysis methods [C]. Elastic lidar: theory, practice, and analysis methods. Newyork: John Wiley, 2005.

[2] WANG W, GONG W, MAO F, et al. Long-term measurement for low-tropospheric water vapor and aerosol by Raman lidar in Wuhan [J]. Atmosphere, 2015, 6(4):521-533.

[3] MAO F, GONG W, SONG S, et al. Determination of the boundary layer top from lidar backscatter profiles using a Haar wavelet method over Wuhan, China[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49(7):343-349.

[4] CAO X, WANG Z, TIAN P, et al. Statistics of aerosol extinction coefficient profiles and optical depth using lidar measurement over Lanzhou, China since 2005-2008[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 122(6): 150-154.

[5] ZHOU Z, HUA D, WANG Y, et al. Improvement of the

signal to noise ratio of Lidar echo signal based on wavelet de-noising technique [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 961-966.

[6] 毛建东, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 基于小波包分析的激光雷达信号消噪算法的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 220-227.

MAO J D, HUA D Y, WANG Y F, et al. Noise reduction in lidar signal based on wavelet packet analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 220-227.

[7] TAN Z H, WAN Y, XIANG T, et al. Self-adaptive blind super-resolution image reconstruction [C]. 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP 2010). IEEE Press, 2010.

[8] FANG H T, HUANG D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform [J]. Optics Communications, 2004, 233(1-3): 67-76.

[9] WU S H, LIU Z, LIU B. Enhancement of lidar backscatters signal-to-noise ratio using empirical mode decomposition method [J]. Optics Communications, 2006, 267(1): 137-144.

[10] 焦宏伟, 秦石乔, 王省书, 等. 基于经验模态分解的三维成像激光雷达信号去噪方法[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 71-75.

JIAO H W, QING SH Q, WANG X SH, et al. Three-dimensional imaging lidar signal denoising method based on empirical mode decomposition [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 71-75.

[11] YAN R, GAO R X, CHEN X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications[J]. Signal Processing, 2014, 96(5): 1-15.

[12] 武哲, 杨绍普, 刘永强. 基于多元经验模态分解的旋转机械早期故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 241-248.

WU ZH, YANG SH P, LIU Y Q. Rotating machinery early fault diagnosis method based on multivariate empirical mode decomposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 241-248.

[13] CHEN L, SONG H B. The estimation of instantaneous frequency of seismic signal [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(1): 206-214.

[14] MAO Y, QUE P. Noise suppression and flaw detection of ultrasonic signals via empirical mode decomposition[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2007, 43(3): 196-203.

[15] ZHANG Y, MA X C, HUA D, et al. An EMD-based denoising method for lidar signal [C]. International

- Congress on Image and Signal Processing, IEEE, 2010: 4016-4019.
- [16] GONG W, LI J, MAO F Y, et al. Comparison of simultaneous signals obtained from a dual-field-of-view lidar and its application to noise reduction based on empirical mode decomposition [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(5): 1-4.
- [17] DUAN Y, SONG C. Relevant modes selection method based on Spearman correlation coefficient for laser signal denoising using empirical mode decomposition [J]. Optical Review, 2016: 1-14.
- [18] ZHANG S Y, LIU Y Y, YANG G L. EMD interval thresholding denoising based on correlation coefficient to select relevant modes [C]. Control Conference, IEEE, 2015: 4801-4806.
- [19] 孙文军, 芮国胜, 张驰, 等. 机械故障的级联共振和EMD联合参数辨识方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 352-360.
- SUN W J, RUI G SH, ZHANG CH, et al. Identification method of mechanical fault based on CBSR and EMD joint parameter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 352-360.
- [20] 徐海坤, 曹创华, 柳建新, 等. 粗糙惩罚法在CSAMT数据处理中的应用——以湖南某地温泉勘察为例[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(3): 304-310.
- XUE H K, CAO CH H, LIU J X, et al. The application

of roughness penalty smoothing method to dealing with CSAMT data: A case study of one hot spring exploration in Hunan [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(3): 304-310.

### 作者简介



朱玲彦, 2015年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为南京信息工程大学硕士研究生, 主要研究方向为激光大气探测。  
E-mail: yanling4107@163.com

**Zhu Lingyan** received B. Sc. from Nanjing University of Information Science and Technology in 2015. Now she is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. Her main research interest is laser atmospheric detection.



常建华(通讯作者), 分别在2000年和2005年于东南大学获得学士学位和博士学位, 现为南京信息工程大学教授, 主要研究方向为固体激光器、激光大气探测、光电传感器等。  
E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

**Chang Jianhua** (Corresponding author) received B. Sc. and Ph. D. both from Southeast University in 2000 and 2005, respectively. Now he is a professor in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes laser atmospheric detection, solid state lasers, and photoelectric sensor.