

## 激光雷达信号去噪方法的对比研究

丁红波<sup>1,2</sup>, 王珍珠<sup>1,3\*</sup>, 刘东<sup>1,3</sup><sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 激光雷达回波信号是非线性非平稳信号,且易被各类噪声污染。为高精度提取有效信号信息,需选取合适的方法进行降噪处理。采用激光雷达回波仿真信号,对其添加泊松噪声,再利用小波变换(WT)、经验模态分解(EMD)、变分模态分解(VMD)及其改进和联合算法进行回波信号的去噪实验,最后通过对比分析,选取最适合激光雷达回波信号的降噪方法。实验结果表明,WT-VMD联合算法在不同原始信噪比下都具有最大的输出信噪比和最小的均方根误差,且去噪后信号曲线的平滑度较小,能很好地还原激光雷达回波原始信号,利于提高后续信号的反演精度。

**关键词** 遥感; 激光雷达; 去噪; 小波变换; 经验模态分解; 变分模态分解

**中图分类号** TN957.52; P413

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202141.2401001

## Comparison of De-Noising Methods of LiDAR Signal

Ding Hongbo<sup>1,2</sup>, Wang Zhenzhu<sup>1,3\*</sup>, Liu Dong<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** The echo signal of light detection and ranging (LiDAR) is nonlinear and non-stationary and is easily disturbed by various noises. In order to filter out noises and extract effective signal information, it is necessary to select appropriate methods for noise reduction processing. In this study, Poisson noise was added to the simulated LiDAR echo signal, and then de-noising experiments were carried out by wavelet transform (WT), empirical mode decomposition (EMD), variational mode decomposition (VMD), and their improved and combined algorithms. Afterward, we selected the optimal de-noising method for LiDAR echo signal through comparative analysis. The experimental results showed that the WT-VMD joint algorithm has the maximum output signal-to-noise ratio (SNR) and the minimum root-mean-square error (RMSE) under different original SNRs, with a small smoothness of the de-noised curve, and therefore it can restore the original LiDAR echo signal well and improve the accuracy of subsequent signal inversion.

**Key words** remote sensing; LiDAR; de-noising; wavelet transform; empirical mode decomposition; variational mode decomposition

**OCIS codes** 010.3640; 280.3640

**收稿日期:** 2021-03-29; **修回日期:** 2021-05-10; **录用日期:** 2021-06-18

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(41975038)、安徽省自然科学基金杰青项目(2008085J33)、安徽省重点研究与开发计划(202004b11020012)、“一带一路”国际科学组织联盟联合研究合作专项(ANSO-CR-KP-2020-09)、中国科学院青年创新促进会人才项目(2017482)

**通信作者:** \*zzwang@aiofm.ac.cn

## 1 引言

激光雷达作为传统雷达技术和现代激光技术的结合,具有时空分辨率高、探测范围广等优势,是探测大气垂直结构的有效遥感工具<sup>[1]</sup>,被广泛应用于云、气溶胶、边界层和能见度等大气和环境参数的测量中<sup>[2-3]</sup>。实际应用中,随着探测距离的增大,激光雷达回波的信号强度逐渐衰减,且与探测距离的平方呈倒数关系;探测过程中,远距离处原本就微弱的回波信号因受太阳背景光、系统光电探测器的暗电流、放大器的热噪声等因素的影响,常会完全淹没在噪声之中<sup>[4]</sup>。激光雷达信号会不可避免地受到噪声污染,故后续信号处理的精度和有效探测范围也将受到影响,因此对激光雷达后向散射信号进行降噪处理是一个非常重要的研究课题。

激光雷达信号因其噪声在时间上具有振幅连续、相位随机的特点,可以看作是典型的非线性非平稳信号。针对该类信号的处理,当前常用的去噪方法有小波变换(WT)、经验模态分解法(EMD)、变分模态分解法(VMD)。很多实验已经论证这些方法在弱信号噪声去除方面具有显著效果,一些研究通过将 these 方法应用到激光雷达信号去噪实验中表明,这些方法也具有一定的雷达信号噪声处理能力。2004 年 Fang 等<sup>[5]</sup>利用小波阈值法对激光雷达信号进行消噪,增加了激光雷达的有效探测距离。EMD 方法是 1998 年由 Huang 等<sup>[6]</sup>提出的一种具有较强自适应性的信号处理方法,2009 年郑发泰等<sup>[7]</sup>使用 EMD 方法对激光雷达信号进行降噪处理,证明该算法能有效抑制雷达信号中的噪声,这为后续消光系数的反演提供了高信噪比数据。VMD 可以很好地利用其维也纳滤波特性实现较好的平滑效果,2018 年徐帆等<sup>[8]</sup>实验对比了多种去噪方法,成功验证了 VMD 法在激光雷达回波信号中优异的去噪性能。

随着降噪研究的深入,各种改进算法被提出,且为了改善单一去噪算法的劣势,有学者尝试联合多种去噪算法进行信号处理,并取得了一定的研究成果<sup>[9-10]</sup>。本文选取 WT、EMD、VMD 及其改进算法和联合算法,进行详细的激光雷达回波信号噪声滤除实验,探究了各方法针对激光雷达信号噪声的表现差异,选取最佳的去噪方法应用于实际的激光雷达信号处理工作中。

## 2 去噪方法

针对激光雷达信号噪声问题,本文选取常见的

WT、EMD 和 VMD 三大类去噪算法,其中包括基于 EMD 改进的 EMD-DT (EMD direct thresholding) 和 EMD-IT (EMD interval thresholding) 方法。介绍各算法的去噪原理并对比其优缺点。同时提出三大类算法相互结合的四种联合算法 WT-EMD、EMD-WT、WT-VMD、VMD-WT。该研究为后续降噪实验提供了理论支持。

### 2.1 小波变换(WT)

WT 法建立在傅里叶变换的基础之上,具有良好的时频域特性。WT 法将信号描述为一系列不同尺度的小波基函数的叠加,其小波分解结果是表征各频段分量与小波基函数关系的近似系数和细节系数。噪声表现为高频分量,对应于小波分解的细节系数。小波阈值去噪是在保留部分近似系数的基础上,利用阈值函数对细节系数进行置零或收缩,从而实现去除信号噪声的目的。小波阈值降噪需要采用与信号相近的小波基函数来进行分解,选取合适的分解层次和阈值以避免信号分离不彻底或信号有用信息被误滤,以及针对信号特性来确定硬阈值函数或软阈值函数的使用。其中硬阈值函数可以很好地保留信号边缘等局部特征,但易造成信号失真不连续;经软阈值函数处理的信号相对平滑,但可能存在高频信息丢失和边缘模糊等问题<sup>[11]</sup>。以上这些参数因需事先选择,导致去噪结果产生差异<sup>[12]</sup>。

### 2.2 经验模态分解(EMD)

#### 2.2.1 EMD-PR

EMD 方法可以自适应地对信号进行时频处理,将一组非平稳非线性信号分解成一系列按频率从高到低排列的本征模函数(IMFs,  $f_{\text{IMF}}$ ) 和一个残余量( $f_{\text{res}}$ ),即

$$x(t) = \sum_{i=1}^L f_{\text{IMF},i}(t) + f_{\text{res}}(t), \quad (1)$$

式中  $x$  为原始的含噪信号,被分解为  $L$  个本征模函数。

选择特定的 IMF 分量进行叠加,可构成高通、低通和带通滤波器<sup>[13]</sup>。由于噪声多包含于本征模函数的低阶模态(高频分量)中,故可通过直接舍弃部分高频分量来达到去噪的目的。该局部重构方法称为 EMD-PR (EMD partial reconstruction)<sup>[14]</sup>。基于 EMD-PR 法去噪后的重构信号可表示为

$$\tilde{x}(t) = \sum_{i=k_{\text{th}}}^L f_{\text{IMF},i}(t) + f_{\text{res}}(t), \quad (2)$$

式中  $k_{\text{th}}$  为判定阈值,即判定第  $k_{\text{th}}$  个 IMF 后的高阶模态为相关分量。

与 WT 相比,EMD 方法不需要事先设定基函数,可根据信号本身特性选择合适的模函数进行分解,同时不存在分解层次阈值函数等参数选取问题,具有自适应性和后验性。但 EMD 法可能会出现模态混叠、端点效应、停止条件难以判断等现象。

### 2.2.2 EMD-DT

使用经验模态分解信号时,低阶模态中也会含有少量信号信息,EMD-PR 方法易出现低阶 IMF 中的相关信息被滤除而高阶 IMF 中的噪声依旧保留的现象<sup>[15]</sup>。为了能提取更多有用信息,借鉴小波阈值去噪,对 IMF 函数上的每一个点都进行直接阈

值处理,称为 EMD-DT 方法<sup>[16]</sup>。设定阈值,当 IMF 函数大于阈值时认为该分量是由有用信号产生的,当小于阈值时该分量被判定为噪声,并将其作置零处理。基于 EMD-DT 方法去噪后的重构信号可表示为

$$\tilde{x}(t) = \sum_{i=M_1}^{M_2} \tilde{f}_{\text{IMF},i}(t) + \sum_{i=M_2+1}^L f_{\text{IMF},i}(t), \quad (3)$$

其中硬阈值函数的表达式为

$$\tilde{f}_{\text{IMF},i}(t) = \begin{cases} f_{\text{IMF},i}(t), & |f_{\text{IMF},i}(t)| > T_i \\ 0, & |f_{\text{IMF},i}(t)| \leq T_i \end{cases}, \quad (4)$$

软阈值函数的表达式为

$$\tilde{f}_{\text{IMF},i}(t) = \begin{cases} \text{sgn}[f_{\text{IMF},i}(t)](|f_{\text{IMF},i}(t)| - T_i), & |f_{\text{IMF},i}(t)| > T_i \\ 0, & |f_{\text{IMF},i}(t)| \leq T_i \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $M_1$  和  $M_2$  分别为低阶和高阶的 IMFs,  $T_i$  代表第  $i$  个 IMF 函数的阈值。

### 2.2.3 EMD-IT

使用 EMD-DT 方法时,由于每一点都需要进行阈值处理,当小于阈值被置零时,去噪后的信号可能会中断不连续,因此提出了 EMD-IT 方法<sup>[14]</sup>。即对于每一个 IMF 分量,将频域内两个相邻的过零点部分及其中间一个极值点作为一个模态单元  $\mathbf{z}_j^{(i)} = [z_j^{(i)} z_{j+1}^{(i)}]$ ,则每一个本征模态函数都可看作是由多

个模态单元组合而成的数据序列。当模态单元上的极值点  $f_{\text{IMF},i}(r_j^{(i)})$  大于阈值时极值点予以保留。在单个模态单元上进行阈值法处理,既能更好地滤除噪声,又能保留信号的完整性。

其硬阈值函数为

$$\tilde{f}_{\text{IMF},i}(\mathbf{z}_j^{(i)}) = \begin{cases} f_{\text{IMF},i}(\mathbf{z}_j^{(i)}), & |f_{\text{IMF},i}(r_j^{(i)})| > T_i \\ 0, & |f_{\text{IMF},i}(r_j^{(i)})| \leq T_i \end{cases}, \quad (6)$$

其软阈值函数为

$$f_{\text{IMF},i}(\mathbf{z}_j^{(i)}) = \begin{cases} \text{sgn}(f_{\text{IMF},i}(\mathbf{z}_j^{(i)}))(|f_{\text{IMF},i}(\mathbf{z}_j^{(i)})| - T_i), & |f_{\text{IMF},i}(r_j^{(i)})| > T_i \\ 0, & |f_{\text{IMF},i}(r_j^{(i)})| \leq T_i \end{cases}. \quad (7)$$

## 2.3 变分模态分解(VMD)

VMD 方法也是一种自适应的信号处理方法,其通过迭代搜寻变分模态的最优解,不断更新各个模态函数及其中心频率,从而将含噪信号分解成一系列具有稀疏性、有限带宽的 BLIMFs (Band Limited IMFs)<sup>[17]</sup>,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^K u_i(t). \quad (8)$$

与 EMD 相反,VMD 方法能够实现信号从低频到高频的分解,因噪声隐藏于高阶 BLIMFs 中,故该方法可选择低阶模态函数直接重构后进行去噪,简称 VMD-PR(VMD partial reconstruction)。

$$\tilde{x}(t) = \sum_{i=1}^{k_{\text{th}}} u_i(t). \quad (9)$$

与 WT 方法相比,VMD 不需要考虑基函数和阈值的选择问题;与 EMD 方法相比,其收敛速度

快、鲁棒性强,且因为中心频率的有限窄带宽特性能够有效避免严重模态混叠现象<sup>[18]</sup>。但 VMD 并不适用于所有的非平稳信号,某些非平稳信号需要经过预处理之后才可以使用 VMD 法进行分解。

## 2.4 联合去噪法

当前主流的降噪方法多是利用 WT 法、EMD 法和 VMD 法先分解信号,再对信号进行噪声滤除。这些方法都存在各自的优缺点,尝试结合不同的降噪算法,通过联合去噪来改善单一去噪方法的去噪效果。

EMD-WT:采用 EMD 方法分解含噪信号,选取相关分量分别进行小波去噪处理,最后重构信号。

WT-EMD:对原始含噪信号进行整体的小波阈值去噪,去噪后的信号采用 EMD 法分解,选择相关分量进行叠加。



VMD-WT:对原始含噪信号进行 VMD 处理,选取相关模态分别进行小波阈值去噪,最后叠加 WT 处理后的相关模态。

WT-VMD:原始信号经过小波阈值降噪处理后,再使用 VMD 法进一步分解,然后选取有效模态来重构,完成二次去噪过程。

### 3 实验与分析

为了选取最适用于激光雷达数据的滤噪方法,本研究模拟了含有噪声的激光雷达回波信号,采用仿真信号进行多种算法去噪效果的对比实验并评判不同算法的去噪优劣性;采用多组累积脉冲数据,对应不同的信号噪声含量,确保选取的滤噪方法在低信噪比和高信噪比条件下都能具有较强的鲁棒性。

#### 3.1 仿真激光雷达回波信号

激光雷达方程为<sup>[19]</sup>

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

式中,  $P(r)$  是接收到的回波功率,  $c$  是光速,  $E_0$  是发射的激光脉冲能量,  $Y(r)$  是几何重叠因子,  $A_r$  是望远镜接收面积,  $\beta(r)$  是  $r$  处目标的后向散射系数,  $T(r)$  是大气透过率,  $T_t$  和  $T_r$  分别为发射和接收光学系统的透过率。

激光雷达系统接收到的后向散射信号的光电子数  $N_s$  与探测回波功率之间的关系为

$$N_s(r) = \frac{\eta\lambda}{hc} P(r) \Delta t, \quad (11)$$

式中  $\eta$  是探测器的量子效率;  $\lambda$  是激光发射波长;  $h$  是普朗克常数,  $h = 6.626276 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $\Delta t = 2\Delta r/c$  是激光雷达的采集时间,  $\Delta r$  是激光雷达的距离分辨率。

激光雷达在探测过程中回波信号会受到天空背景光  $N_b$  及探测器暗计数  $N_d$  的噪声污染<sup>[20]</sup>。天空背景光及探测器暗计数可表示为

$$\begin{cases} N_b = \frac{\eta\lambda}{hc} P_b \pi \left(\frac{\theta_r}{2}\right)^2 \Delta\lambda A_r T_r \Delta t, \\ N_d = \xi \cdot \Delta t \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $P_b$  是天空背景辐射光亮度,一般白天设为  $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ,晚上为零;  $\theta_r$  是接收望远镜的视场;  $\Delta\lambda$  是滤光片的半宽度;  $\xi$  是探测器的暗计数。因此实际探测器接收到的总光子数  $N(r)$  可表示为

$$N(r) = N_s(r) + N_b + N_d. \quad (13)$$

实验验证激光雷达在光子计数模式下工作时,

其产生的噪声光子数符合泊松分布特征<sup>[21-22]</sup>。故利用激光雷达方程及回波光子数计算方法可模拟激光雷达理想的回波信号,在仿真信号上添加泊松噪声可模拟激光雷达实际接收的回波含噪信号。

表 1 激光雷达系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of LiDAR system

| System parameter                | Value |
|---------------------------------|-------|
| Pulse energy / $\mu\text{J}$    | 10    |
| Receiver diameter/mm            | 200   |
| Field of view / $\mu\text{rad}$ | 200   |
| Total optical transmittance     | 0.1   |
| Filter bandwidth / nm           | 0.3   |
| Range resolution / m            | 30    |
| Detection quantum efficiency    | 0.1   |
| Dark counts per second          | 500   |

由于单脉冲回波信号强度太弱,在激光雷达实际应用中,通常使用多次脉冲累加平均结果来提高信号信噪比。图 1 为仿真模拟了 10 次、100 次、1000 次脉冲的累积光子数分布。10 次脉冲累积曲线,波动较大,在 2 km 左右的高度上就已经无法获取有用信息,而 1000 次脉冲累积曲线较为稳定,有效探测距离可以达到 5 km 以上。由此可知,增加脉冲累积数可以很好地解决激光雷达回波信号有效探测距离不足的问题,且同一探测距离上,随着脉冲次数的增多,回波信号波动减弱,即信噪比不断提高。

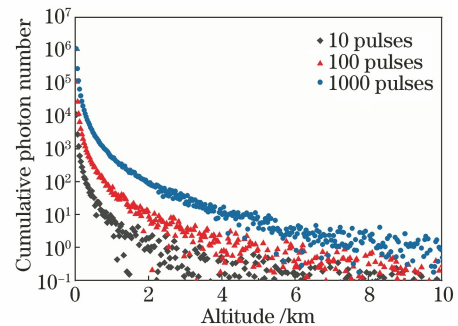


图 1 累积脉冲含噪信号的仿真结果

Fig. 1 Simulation results of cumulative pulse signals with noise

#### 3.2 仿真信号去噪实验

为了评判信号滤噪效果,常用的评价指标有信噪比和均方根误差。信噪比即原始干净信号功率与噪声功率的比值,是用来度量信号中噪声大小的传统参数,其值越高代表噪声占比越小,去噪效果越好。均方根误差是原始干净信号与去噪后信号之间方差的平方根,体现了信号高频细节信息,其值越小说明去噪信号与原始信号越接近。

$$R_{SN} = 10 \times \lg \left( \frac{\sum_n f^2(n)}{\sum_n [f'(n) - f(n)]^2} \right), \quad (14)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n [f'(n) - f(n)]^2}, \quad (15)$$

其中  $f(n)$  是原始信号,  $f'(n)$  是去噪后的估计信号。

除此之外,由于仿真的原始激光雷达信号是光滑曲线,从信号图形角度可选择平滑度指标来评估去噪效果。平滑度是去噪信号与原始信号之间一阶差分的方差根比值,反映了曲线的平滑程度,其值越趋于 0 代表曲线越光滑。平滑度(smoothness)可表示为

$$r = \frac{\sum_{n=1} [f'(n+1) - f'(n)]^2}{\sum_{n=1} [f(n+1) - f(n)]^2}. \quad (16)$$

采用各类不同的去噪方法分别对 10 次、100 次、1000 次累积脉冲的仿真结果进行噪声滤除处理,并计算去噪后信号的信噪比、均方根误差和平滑度,以此评估各类降噪方法的降噪性能。

累积脉冲只有 10 次时(图 2 和表 2),信号噪声含量大,原始输入信噪比只有 4.3427 dB。去噪实验中虽然所有方法都对噪声进行了一定限度地滤除,但小波阈值去噪效果最差,近距离处信号仍含有大量噪声尖峰;WT-VMD 方法的效果最好,可将输出信噪比提高为原本的 4 倍。尽管 EMD-PR 处理后的信号曲线较为平滑,但其端点明显小于实际值,存在较大误差。EMD-DT 和 EMD-IT 在 EMD-PR 的基础上进行了改进,其均方根误差也相应地有所减小。

表 2 10 次累积脉冲信号去噪后的评价指标

Table 2 Evaluation index of 10-pulse cumulative signal after denoising

| Method          | RMSE   | SNR /dB | Smoothness |
|-----------------|--------|---------|------------|
| Original signal | 0.5952 | 4.3427  | 229.0331   |
| WT              | 0.3431 | 9.1280  | 76.0482    |
| EMD-PR          | 0.2781 | 10.9523 | 0.4930     |
| EMD-DT          | 0.2569 | 11.6395 | 6.5856     |
| EMD-IT          | 0.2208 | 12.9550 | 2.2844     |
| EMD-WT          | 0.2781 | 10.9530 | 0.4928     |
| WT-EMD          | 0.2329 | 12.4928 | 2.0597     |
| VMD-PR          | 0.1434 | 16.7026 | 0.4143     |
| VMD-WT          | 0.1435 | 16.7010 | 0.4079     |
| WT-VMD          | 0.1391 | 16.9703 | 0.4168     |

图 3 和表 3 为 100 次累积脉冲模拟信号降噪的实验结果。相比累积 10 次的去噪结果,随着累积脉

冲次数的增多,信号原始输入信噪比增加,WT-EMD 和 EMD-IT 方法能更好地展现滤噪性能,其与最优去噪方法 WT-VMD 之间的差距减小。EMD-PR 和 EMD-WT 虽然保留了原始信号的趋势,但仍然存在端点误差大的问题,且 EMD-WT 也并未对 EMD-PR 有任何改善效果,其均方根误差几乎与 EMD-PR 持平。与 VMD-PR 相比,在此基础上的联合算法 VMD-WT 的曲线信噪比下降。

表 3 100 次累积脉冲信号去噪后的评价指标

Table 3 Evaluation index of 100-pulse cumulative signal after denoising

| Method          | RMSE   | SNR /dB | Smoothness |
|-----------------|--------|---------|------------|
| Original signal | 2.2222 | 12.9004 | 23.1526    |
| WT              | 1.6279 | 15.6037 | 11.1812    |
| EMD-PR          | 1.2519 | 17.8847 | 0.4357     |
| EMD-DT          | 1.2836 | 17.6673 | 1.5045     |
| EMD-IT          | 1.1363 | 18.7260 | 0.6524     |
| EMD-WT          | 1.2519 | 17.8848 | 0.4357     |
| WT-EMD          | 1.2116 | 18.1689 | 1.5918     |
| VMD-PR          | 1.2309 | 18.0314 | 0.4313     |
| VMD-WT          | 1.2316 | 18.0266 | 0.4248     |
| WT-VMD          | 1.0861 | 19.1189 | 0.4633     |

当累积脉冲达到 1000 次时(图 4 和表 4),信号噪声比例偏小,平滑度极大地减小。此时各类降噪方法之间的去噪结果差距变小,但 WT-VMD 法依然具有最优的去噪能力,VMD-WT 方法也保持最佳的曲线平滑度。WT-EMD 的降噪效果有较大的改善,输出信噪比达到 28.9572 dB,仅次于 WT-VMD。由于 EMD 法更容易在高信噪比条件下出现模态混叠现象,此时联合 WT 进行二次去噪在一定程度上改善了单一的 EMD-PR 方法,能够提取到更多的有效信息。

表 4 1000 次累积脉冲信号去噪后的评价指标

Table 4 Evaluation index of 1000-pulse cumulative signal after denoising

| Method          | RMSE   | SNR /dB | Smoothness |
|-----------------|--------|---------|------------|
| Original signal | 6.2409 | 23.9313 | 2.9217     |
| WT              | 4.1941 | 27.3835 | 1.6554     |
| EMD-PR          | 4.3630 | 27.0404 | 0.9976     |
| EMD-DT          | 3.8825 | 28.0538 | 0.8848     |
| EMD-IT          | 3.7577 | 28.3377 | 0.8562     |
| EMD-WT          | 4.1262 | 27.5251 | 0.9582     |
| WT-EMD          | 3.4990 | 28.9572 | 0.8313     |
| VMD-PR          | 3.6385 | 28.6177 | 0.7929     |
| VMD-WT          | 3.5971 | 28.7171 | 0.7887     |
| WT-VMD          | 3.2952 | 29.4786 | 0.7903     |

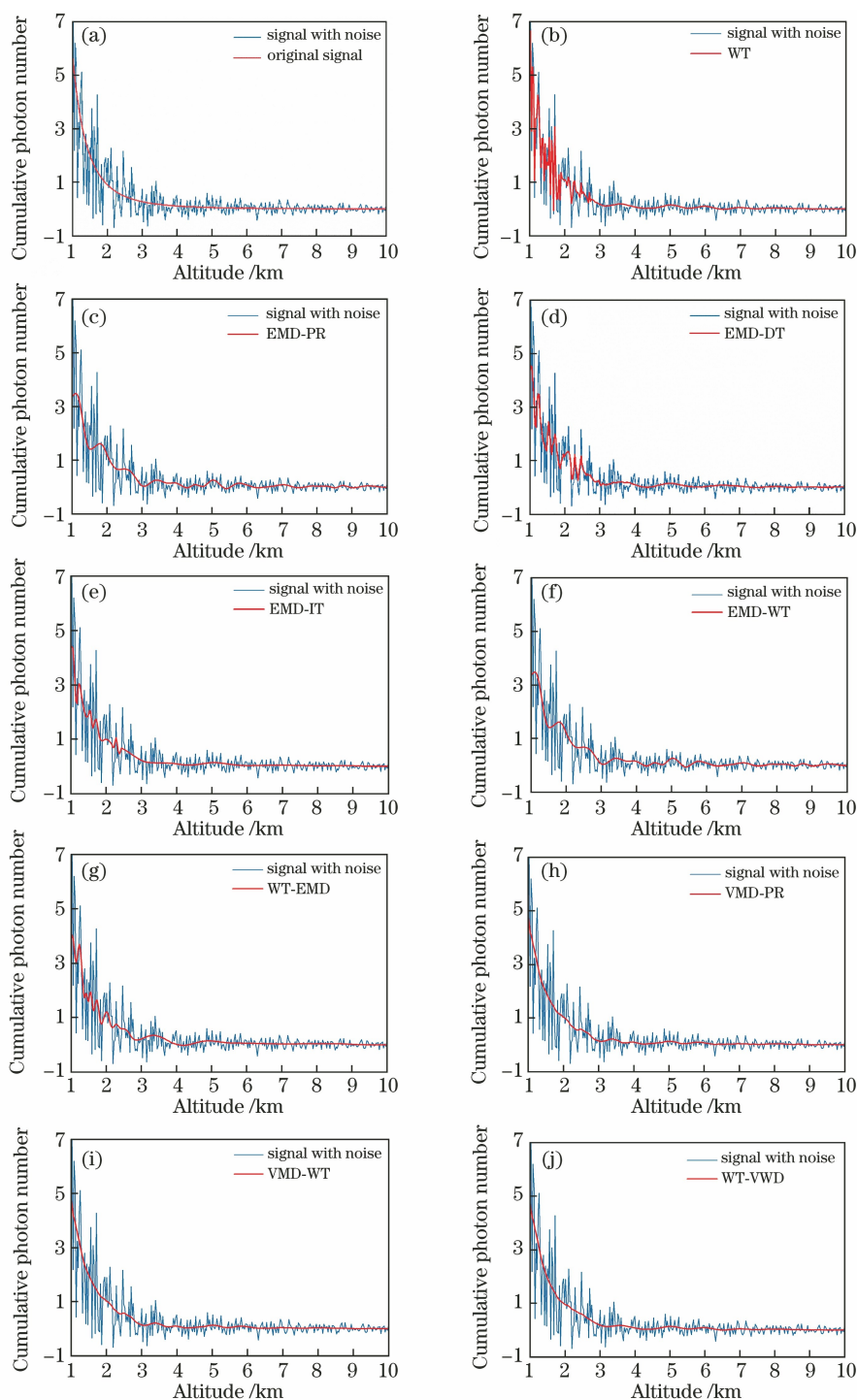


图 2 10 次累积脉冲仿真信号的去噪实验结果。(a)原始信号;(b) WT;(c) EMD-PR;(d) EMD-DT;(e) EMD-IT;  
(f) EMD-WT;(g) WT-EMD;(h) VMD-PR;(i) VMD-WT;(j) WT-VMD

Fig. 2 Experimental results of de-noising of 10-pulse cumulative simulation signals. (a) Original signal; (b) WT;  
(c) EMD-PR; (d) EMD-DT; (e) EMD-IT; (f) EMD-WT; (g) WT-EMD; (h) VMD-PR; (i) VMD-WT; (j) WT-VMD

### 3.3 对比与分析

当累积脉冲次数较多,即原始信号信噪比较高时,各类去噪方法都能有效去除大部分噪声信息;若累积脉冲减少,即信噪比降低,不同方法之间降噪能力的差异增大。

从去噪评价指标方面来看,VMD 的相关方法(VMD-PR、VMD-WT、WT-VMD)无论是在信噪比、均方根误差还是平滑度方面,都优于 WT 和 EMD 的相关方法,其中 WT-VMD 方法占据绝对优势,在不同大小的原始信号信噪比下,都具有最佳的

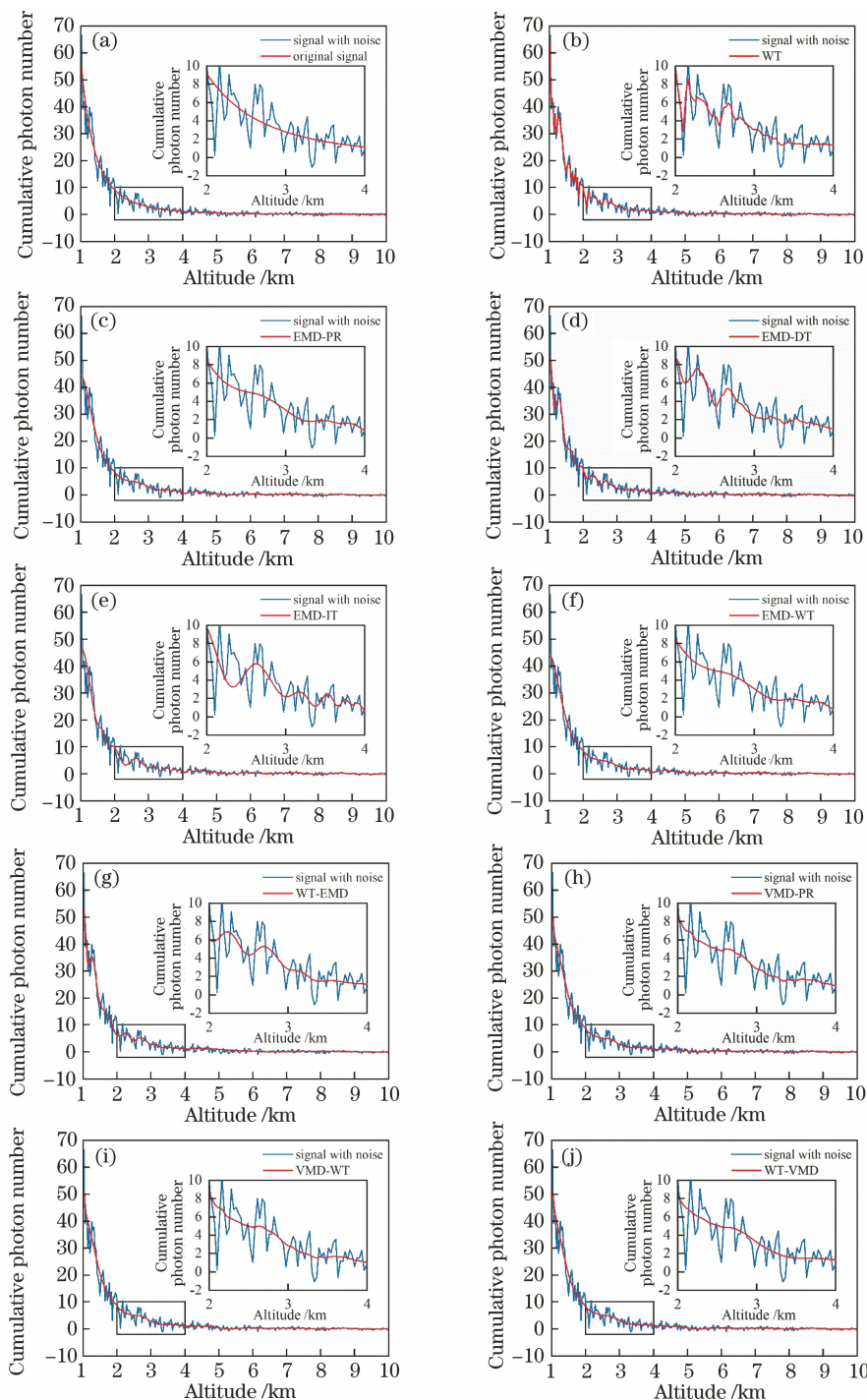


图 3 100 次累积脉冲仿真信号的去噪实验结果。(a)原始信号;(b) WT;(c) EMD-PR;(d) EMD-DT;(e) EMD-IT;  
(f) EMD-WT;(g) WT-EMD;(h) VMD-PR;(i) VMD-WT;(j) WT-VMD

Fig. 3 Experimental results of de-noising of 100-pulse cumulative simulation signals. (a) Original signal; (b) WT;  
(c) EMD-PR; (d) EMD-DT; (e) EMD-IT; (f) EMD-WT; (g) WT-EMD; (h) VMD-PR; (i) VMD-WT; (j) WT-VMD

降噪性能,且噪声越多时其优势发挥得越明显。

WT 法的去噪效果最差,整体的小波阈值去噪只能削弱曲线的突起,仍残留大量噪声信息,去噪不彻底。且随着噪声的增多,小波法在滤除噪声方面能力不足越凸显。

由 EMD-PR 方法得到的曲线平滑度虽然小,但信噪比较低时 EMD-PR 方法可能出现信号端点大幅偏移现象,造成信号失真,高信噪比情况下则容易出现模式混叠现象。基于 EMD 的改进方法(EMD-DT、EMD-IT),其去噪能力明显强于原始的 EMD-



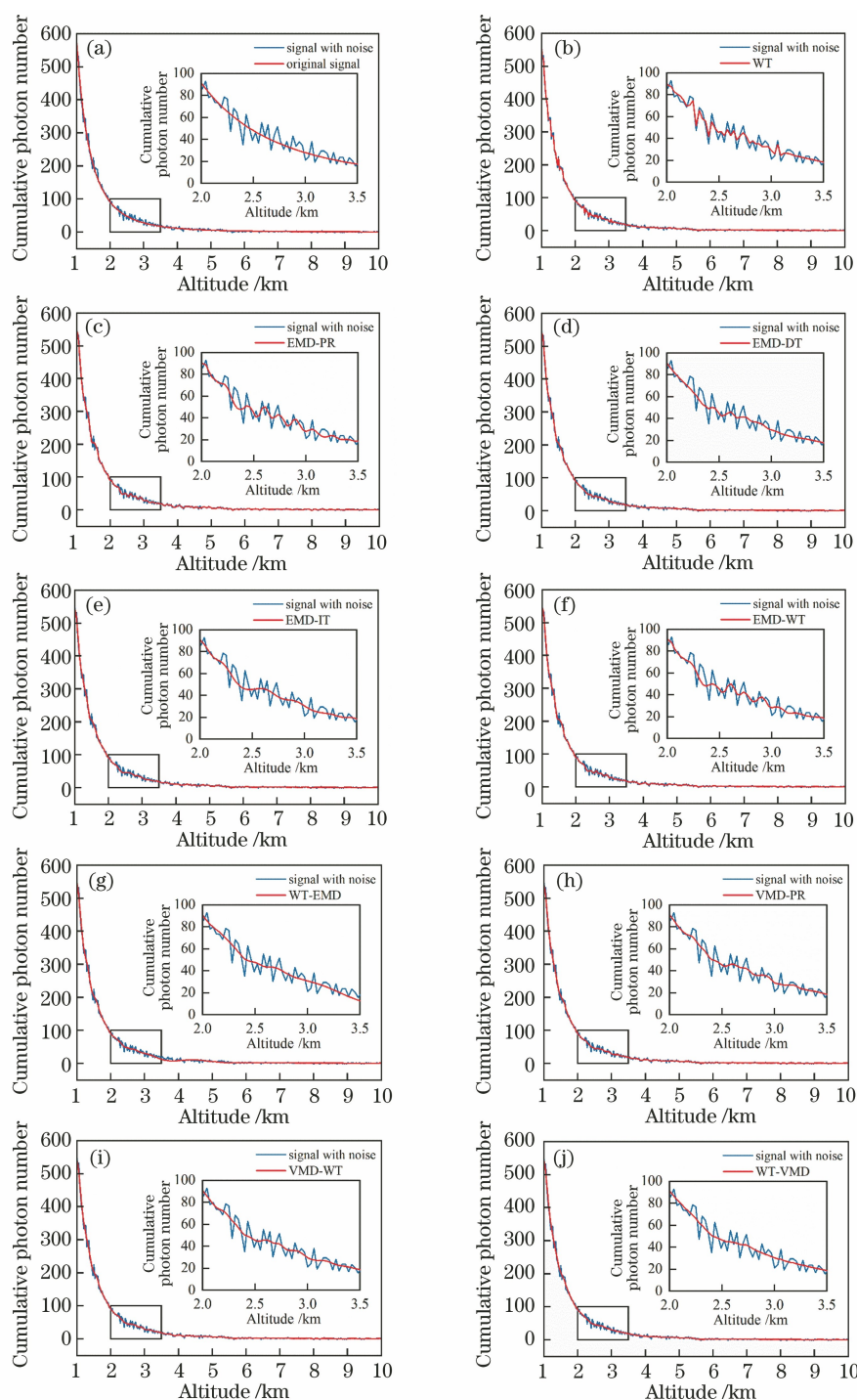


图 4 1000 次累积脉冲仿真信号的去噪实验结果。(a)原始信号;(b) WT;(c) EMD-PR;(d) EMD-DT;(e) EMD-IT;  
(f) EMD-WT;(g) WT-EMD;(h) VMD-PR;(i) VMD-WT;(j) WT-VMD

Fig. 4 Experimental results of de-noising of 1000-pulse cumulative simulation signals. (a) Original signal; (b) WT;  
(c) EMD-PR; (d) EMD-DT; (e) EMD-IT; (f) EMD-WT; (g) WT-EMD; (h) VMD-PR; (i) VMD-WT; (j) WT-VMD

PR 法,其中 EMD-IT 滤除的噪声更多,去噪后的曲线也更为平滑,该优势在低信噪比条件下更为显著。

联合去噪方法中,WT-EMD 和 WT-VMD 法的滤噪能力在 WT、EMD-PR 和 VMD-PR 的基础上得到了明显提升。但并非所有的联合去噪方法都明

显优于单一去噪法。由于信号经 EMD/VMD 处理后部分有用信号隐藏在被舍弃的高频分量中,直接对有效信号含量高、噪声信息含量少的低频分量进行小波阈值处理并不能达到二次有效去噪的目的,故相对于单一去噪方法,EMD-WT、VMD-WT 的去



噪能力很难提升。相反,先对信号使用 WT 法滤去大部分噪声之后再使用 EMD/VMD 进行处理,可以保留更多信号的有效分量,提高去噪信号的信噪比。

## 4 结 论

基于激光雷达方程仿真模拟 10 次、100 次、1000 次累积脉冲含噪信号,进行多种去噪算法的滤波对比实验,采用均方根误差、信噪比和平滑度三个指标来评价算法在不同原始信噪比下的降噪效果,实验结果展示了不同去噪方法之间去噪能力的差异性。改进算法通常优于基础的局部重构算法,EMD-DT 和 EMD-IT 可以保留更多原始信号的特性;联合算法中先进行小波整体去噪再进行 EMD/VMD 分解作二次去噪,相比 EMD-WT 和 VMD-WT 法能更高效地去除信号噪声;VMD 法及其相关算法,其滤除噪声的能力明显强于小波变换和 EMD 等相关算法,在三个降噪评级指标上都发挥稳定;在不同输入信噪比下,WT-VMD 算法都充分展现了其滤波优势及平滑曲线的优越性能,保持了与原始信号的高相似性,适用于具有非线性非稳态特点的激光雷达信号。因此针对激光雷达回波信号,应优先选择 WT-VMD 方法进行去噪处理,以提高有效探测距离和后续反演的精度。

## 参 考 文 献

- [1] Mao J D. Noise reduction for lidar returns using local threshold wavelet analysis[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2012, 43(1/2/3/4/5): 59-68.
- [2] Wang Z Z, Li J, Zhong Z Q, et al. LiDAR exploration of atmospheric boundary layer over downtown of Beijing in summer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 96-100.  
王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层[J]. *应用光学*, 2008, 29(1): 96-100.
- [3] Zhou J, Yue G M, Qi F D, et al. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 140-148.  
周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, 15(2): 140-148.
- [4] Zhou Z R, Hua D X, Yang R, et al. De-noising method for Mie scattering lidar echo signal based on wavelet theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 70701002.
- [5] Fang H T, Huang D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. *Optics Communications*, 2004, 233(1/2/3): 67-76.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [7] Zheng F T, Hua D X, Zhou A W. Empirical mode decomposition algorithm research & application of Mie lidar atmospheric backscattering signal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(5): 1068-1074.  
郑发泰, 华灯鑫, 周阿维. Mie 散射激光雷达大气回波信号经验模式分解算法的研究与应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1068-1074.
- [8] Xu F, Chang J H, Liu B G, et al. De-noising method research for lidar echo signal based on variational mode decomposition[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(11): 1443-1448.  
徐帆, 常建华, 刘秉刚, 等. 基于 VMD 的激光雷达回波信号去噪方法研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(11): 1443-1448.
- [9] Liu Y Q, Deng H W, Wu L B, et al. Study on signal denoising of microseismic monitoring based on combined variational mode decomposition and wavelet threshold method [J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(2): 98-103.  
刘玉桥, 邓红卫, 吴路波, 等. 基于 VMD 联合小波阈值去噪法的微震监测信号去噪研究[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(2): 98-103.
- [10] Zhang Y D, Hou M, Liu Z L, et al. Empirical mode decomposition with wavelet de-noising[C]// 2010 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, October 29-31, 2010, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2010: 183-186.
- [11] Li X, Wang L X, Duan Z Q. Application of improved adaptive wavelet noise reduction in laser gyroscope signal processing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210401.  
李想, 汪立新, 段志强. 改进自适应小波降噪在激光陀螺仪信号处理中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210401.
- [12] Wang T, Shen Y H, Yao J Q. Research on laser radar echo signal denoising based on wavelet threshold method[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(1): 63-68.

- 王涛, 沈永辉, 姚建铨. 基于小波阈值法的激光雷达回波信号去噪研究[J]. 激光技术, 2019, 43(1): 63-68.
- [13] Boudraa A O, Cexus J C. EMD-based signal filtering [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2196-2202.
- [14] Yang G L, Liu Y Y, Wang Y Y, et al. EMD interval thresholding denoising based on similarity measure to select relevant modes[J]. Signal Processing, 2015, 109: 95-109.
- [15] Wu Q, Liu Y. De-noising method for gyroscope signal based on improved ensemble empirical mode decomposition [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 150601.  
吴倩, 刘昱. 基于改进集合经验模态分解的陀螺信号降噪方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 150601.
- [16] Kopsinis Y, McLaughlin S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1351-1362.
- [17] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [18] Gao W X, Li X Z, Zheng H L, et al. Application of particle swarm annealing optimization BVMD method in spatial frequency decomposition of ultra-precision machined surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1122001.  
高炜祥, 李星占, 郑华林, 等. 基于粒子群退火优化 BVMD 方法的超精密加工表面空间频率分解[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1122001.
- [19] Russell P B, Swissler T J, McCormick M P. Methodology for error analysis and simulation of lidar aerosol measurements[J]. Applied Optics, 1979, 18(22): 3783-3797.
- [20] Nakajima T Y, Imai T, Uchino O, et al. Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by spaceborne elastic scattering lidar[J]. Applied Optics, 1999, 38(24): 5218-5228.
- [21] Tao Z M, Chen Y, Chu D L, et al. Study on quantum noise of photodetector [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(1): 62-66.  
陶宗明, 陈宇, 储德林, 等. 光电探测器的量子噪声特性研究[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(1): 62-66.
- [22] Xie G Y. Noise analysis for optoelectronic detector [J]. Information Technology, 2008, 32(11): 8-10.  
解光勇. 光电探测器噪声特性分析[J]. 信息技术, 2008, 32(11): 8-10.