

引文格式:宋越,李厚朴,翟国君.机载激光测深波形去噪算法对比分析[J].测绘学报,2021,50(2):270-278. DOI:10.11947/j. AGCS. 2021.20200094.



SONG Yue, LI Houpu, ZHAI Guojun. Comparative analysis of airborne laser bathymetric waveforms denoising algorithms [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(2): 270-278. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2021.20200094.

## 机载激光测深波形去噪算法对比分析

宋 越<sup>1</sup>, 李厚朴<sup>1</sup>, 翟国君<sup>2</sup>

1. 海军工程大学导航工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061

## Comparative analysis of airborne laser bathymetric waveforms denoising algorithms

SONG Yue<sup>1</sup>, LI Houpu<sup>1</sup>, ZHAI Guojun<sup>2</sup>

1. Department of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Tianjin Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China

**Abstract:** Denoising fitting of airborne laser bathymetry data is a key step in extracting the bottom terrain. The algorithm effects of wavelet adaptive threshold denoising, empirical model denoising (EMD) and joint denoising are compared in this paper, and then multivariate Gaussian fitting is used to test the denoising effect. The optimal denoising algorithm and parameter selection are obtained by comparison, and it is realized that the high-precision extraction of seabed features. This study has shown that: when the sounding data is denoised by wavelet threshold, the fixed threshold wavelet denoising effect is superior to other denoising effects, and the denoising decomposition level is more than 6 layers, which tends to be stable. The average accuracy of the algorithm reaches 8.218 2 after the fifth-order Gaussian fitting of the denoising data. The algorithm has strong robustness, it can meet the technical requirements of blue-green laser practical application, and provides a reference for accurately extracting seafloor feature information.

**Key words:** airborne laser bathymetry; wavelet adaptive threshold denoising; empirical model denoising; multiple Gaussian function fitting

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41974005; 41871376; 41771487); The Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Hubei Province of China (No. 2019CFA086)

**摘 要:**对机载激光测深数据进行去噪拟合是提取水底地形的关键步骤。本文对比了小波自适应阈值去噪、经验模型去噪(EMD)以及联合去噪的效果,利用多元高斯拟合对去噪效果进行检验。对比得到了最优去噪算法及最优参数选择,实现对海底特征的高精度提取。结果表明:在测深数据进行小波阈值去噪时,固定阈值小波去噪效果优于其他去噪效果,去噪分解层级6层以上趋于稳定,对去噪数据进行五阶高斯拟合后平均精度达到8.218 2。本文算法具有较强的稳健性,能够满足蓝绿激光实际应用的技术要求,为精确提取海底特征信息提供参考。

**关键词:**机载激光测深;小波自适应阈值去噪;经验模型去噪;多元高斯函数拟合

**中图分类号:**P229

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-1595(2021)02-0270-09

**基金项目:**国家自然科学基金(41974005;41871376;41771487);湖北省杰出青年科学基金(2019CFA086)

机载激光测深是近 20 年发展起来的一种主动式海洋测量技术<sup>[1-4]</sup>,适用于水深浅于 50 m 的海域,具有测量精度高、机动性强、成本低等优点,能够覆盖船只无法到达的极浅区域。机载激光测深系统是利用对水体具有较强穿透能力的蓝绿色

激光(532 nm)进行水域扫描,获取全波形水面、水体和水底的反射数据,从而提取水底地形、水体浑浊度等信息。

机载激光测深精度主要受到测深系统位置精度和扫描回波的提取精度影响。为提高位置精

度,文献[5]结合卫星定位和惯导系统,推导出激光脚点在成图坐标系中的定位模型;文献[6]建立了参数加权最小二乘平差模型,对测深系统位置精度进行检校;文献[7]利用遥感数据对测量海域测深系统参数进行评测,提高平台作业质量从而提高定位精度。在提取高精度扫描回波方面,需要从机载激光全波形数据中精确提取水面和水底反射信号,但由于受到水体散射、噪声等因素影响,无法精确提取水面和水底反射时间间隔<sup>[8-11]</sup>。目前,国内外学者相继开展对机载激光全波形数据的去噪拟合研究,在机载激光全波形数据去噪方面,文献[12]认为应该利用高通滤波将信号中的高频信号剔除,从而达到去噪目的;文献[13]利用启发式规则来识别海面与海底反射;文献[14]利用分层异构模型进行拟合去噪;文献[15]采用去卷积法和平均差方函数法对波形预处理,通过包含距离、导数和极值约束的逐级检测确定信号的初始位置。以上方法均对回波噪声起到一定抑制效果。然而,不同去噪方法各有其优势,高通滤波选取的过滤尺度直接影响去噪效果<sup>[16]</sup>;在小波软阈值去噪中阈值、分解层级等参数选取不当,同样影响去噪效果<sup>[17]</sup>。因此,去噪算法有待进一步优化。波形处理是检验去噪效果的重要手段,并且能够提取出较为理想的波形特征信息。波形处理方法较成熟的有:峰值探测法、波形分解法和去卷积算法<sup>[18-20]</sup>。峰值探测法可直接提取峰值信息,效率较高,但易受到噪声和粗差的影响,精度较低。波形分解法是对水面、水体、水底反射回波用不同函数分别进行拟合<sup>[20-21]</sup>,拟合精度得到一定提升,但计算量较大。去卷积算法是根据信号产生的物理过程,还原原始信号,会出现信息丢失、过度分割等问题<sup>[22]</sup>。

本文利用小波软阈值去噪和EMD去噪法,研究两种方法最优参数选择,以及找到联合去噪效果的最优方案,旨在进一步提高去噪精度。由于仿真数据能够放大原始回波信号传播过程中的特点,对去噪算法效果更为敏感,方便对去噪算法进行对比研究,因此先利用仿真数据进行信号的去噪算法比较研究,再用实测数据进行去噪拟合,验证算法对数据的实际效果。

## 1 波形特征及信号模型构建

### 1.1 机载激光测深波形特征

机载激光回波信号由水面反射回波、水体散射回波、水底反射回波以及噪声4部分组成<sup>[23-24]</sup>,

因此机载激光回波信号可表示为4部分信号的叠加。用式(1)表示为

$$y = f(t) = f(t)_s + f(t)_c + f(t)_b + f(t)_N \quad (1)$$

式中, $f(t)_s$ 表示水面反射回波; $f(t)_c$ 表示水体散射回波; $f(t)_b$ 表示水底反射回波; $f(t)_N$ 表示噪声; $y$ 为 $t$ 时刻回波的振幅。由于数据处理中提取的为第2段原始波形,即海表回波和海底回波的完整回波波形,不包含发射器的出光波形,介质不均匀主要来自水体的影响,实际会造成回波波形波宽变宽、面积增大等, $f(t)_N$ 主要包括背景噪声和传感器内部噪声,机载激光测深作业限于50 m以上浅海域,测量精度要求较高,因此,需要对原始波形数据在保留有效回波信号的基础上进行最大限度的去噪处理。

### 1.2 信号模型构建

一般认为水面反射回波服从高斯函数,水底反射如果在平坦浅海区域也可近似看作服从高斯函数,而水体反射回波服从B样条函数。文献[25]研究了高斯函数与B样条函数之间的相似关系,建立了如下逼近公式

$$B_n(x) \approx \sqrt{\frac{6}{\pi(n+1)}} \exp\left[-\frac{6x^2}{n+1}\right] \quad (2)$$

因此,可以将无误差仿真数据进行如下表示

$$f(t) = A_s e^{-(t-\mu_s)^2/2\sigma_s^2} + A_c \sqrt{\frac{6}{4\pi}} \exp\left[-\frac{6(t-\mu_c)^2}{4}\right] + A_b e^{-(t-\mu_b)^2/2\sigma_b^2} \quad (3)$$

式中, $\mu_s$ 、 $\mu_c$ 、 $\mu_b$ 分别为水面反射、水体散射、水底反射回波波形的对称轴; $\sigma_s$ 、 $\sigma_b$ 分别为水面反射、水底反射回波波形的半幅波宽。水体反射回波信号用三次B样条近似函数的变形函数来代替,最后将初始仿真信号加入高斯随机噪声得到试验仿真数据。本文采用采样间隔为1 ns,采样点数为300进行去噪仿真分析,加入噪声后得到的仿真信号如图1所示。

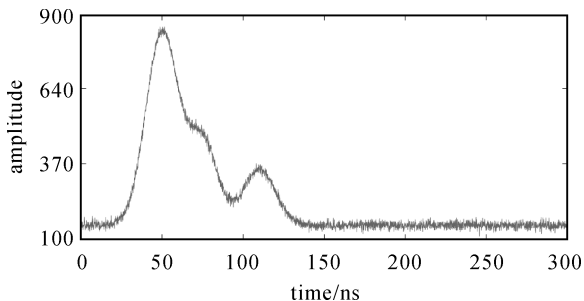


图1 加入噪声的仿真数据

Fig.1 The simulation data with noise

## 2 波形去噪拟合算法

波形去噪是机载激光测深数据处理的关键步骤,本文对小波软阈值去噪法、EMD去噪法,与联合去噪法进行对比试验,反复调节各试验参数以达到最佳去噪效果。再利用实测数据进行去噪拟合,从而对去噪算法的实际效果做出评判。流程如图2所示。

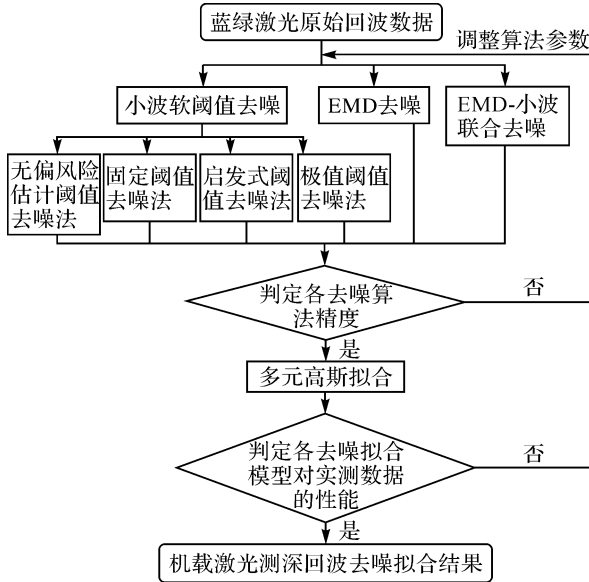


图2 本文算法流程

Fig.2 Flow diagram of new algorithm

### 2.1 小波阈值去噪

由于小波变换为线性变换,因此经过正交变换后的回波信号可最大限度去除原始信号间的相关性。噪声经过正交变换后仍然为噪声,分布在各尺度上,不破坏各分量信号的有效信息,为去除噪声和最大保留有效信息提供基础。

小波变换后分为高频系数和低频系数。高频系数反映信号的噪声、突变等情况,低频系数反映信号的整体变化趋势和相关性等,故将小波变换后的高频信号进行小波阈值处理,阈值处理函数可分为硬阈值处理法和软阈值处理法。

软阈值处理法公式为

$$w_{\lambda} = \begin{cases} [\text{sign}(w)](|w| - \lambda) & |w| \geq \lambda \\ 0 & |w| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中, $w$  为小波分解系数; $\lambda$  为设定的阈值; $\text{sign}(w)$  表示取  $w$  值的正负号。

软阈值处理是对小波系数进行“收缩”处理,从而使输入和输出的曲线具有良好的连续性。大量试验以及国内外研究也发现,软阈值函数去噪

优于硬阈值函数去噪<sup>[14]</sup>,故本文选用小波软阈值去噪法。小波去噪阈值主要分为以下4种。

#### 2.1.1 无偏风险估计阈值(rigsure)

将原始信号取绝对值从小到大排列,再各自取平方,取第  $k$  个元素的平方根作为阈值,则该阈值产生的风险为

$$\text{risk}(k) = [N - 2k + \sum_{i=1}^k f(i) + (N - k)f(N - k)]/N \quad (5)$$

式中, $N$  为总数据量; $k$  表示第  $k$  个元素。因此将风险最小的元素作为无偏风险估计阈值。

#### 2.1.2 固定阈值(sqtwolog)

$$\lambda = \sqrt{2 \log N} \quad (6)$$

#### 2.1.3 启发式阈值(heursure)

$$\text{crit} = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \frac{\ln N}{\ln 2} \right)} \quad (7)$$

$$\text{eta} = \left[ \sum_{j=1}^N |S_j|^2 - N \right] / n \quad (8)$$

当  $\text{eta} < \text{crit}$ , 选择固定阈值,当  $\text{eta} > \text{crit}$  时选择无偏风险阈值。

#### 2.1.4 极值阈值(minimaxi)

$$\lambda = \begin{cases} 0.3936 + 0.1829 \left( \frac{\ln N}{\ln 2} \right) & N > 32 \\ 0 & N < 32 \end{cases} \quad (9)$$

本文将对4种阈值方法进行逐一试验,旨在找到对机载激光回波信号去噪最优阈值算法。

### 2.2 经验模型(EMD)去噪

实现经验模型分解,待分解信号需满足:①信号可分为多个本征模函数;②本征模函数(IMF)既可以是线性函数也可以是非线性函数;③任意时刻,原信号可看做若干本征模函数的叠加。IMF 需要满足:①IMF 信号中,极值点个数与零点个数的差值至多为1;②任意阶 IMF 的上下包络均值为零。

从原始信号中提取全部极大值和极小值,利用三次样条函数对极大值拟合出上包络线  $e_{\text{up}}(t)$ ,对极小值拟合出下包络线  $e_{\text{down}}(t)$ ,则上下包络线的均值作为原始信号的均值包络线  $m_1(t)$

$$m_1(t) = \frac{e_{\text{up}}(t) + e_{\text{down}}(t)}{2} \quad (10)$$

再用原始信号减去均值包络线得到第1层分解系数  $c_1(t)$ 。重复以上步骤直至残差信号  $r_N(t)$  为单调函数或常量时停止分解。故 EMD 分解后的最终表达式为

$$x(t) = \sum_{i=1}^N c_i(t) + r_N(t) \quad (11)$$

式中,  $x(t)$  为原始信号;  $c_i(t)$  为分解得到的 IMF;  $r_N(t)$  为分解残差。

### 2.3 小波阈值分解与 EMD 模型联合去噪

小波阈值分解和 EMD 模型在信号去噪方面都有广泛应用, 本文将利用两种方法进行联合去噪。针对去噪算法的特点拟定 3 种方案: ① 先进行 EMD 去噪, 将 EMD 去噪后最优重构数据进行小波阈值去噪; ② 先进行 EMD 分解, 对分解得到的 IMF 值进行小波阈值去噪, 最后将去噪后 IMF 值进行重构; ③ 先进行小波阈值去噪, 去噪后数据进行 EMD 分解与重构。

### 2.4 基于最小二乘的波形数据多元高斯拟合

对原始回波进行去噪后会降低噪声对回波的影响外, 同时也降低了回波分辨率。波形拟合能够提高浅水混叠信号以及海底较弱回波分辨率, 且波形拟合是检验去噪效果好坏的一种手段。传

统方法较为烦琐且由式(3)可知, 三次 B 样条函数、双指数函数其基本形态依然是高斯函数, 三次 B 样条函数、双指数函数可以看作是多个高斯函数的组合形式。故本文将去噪后的实测数据进行基于最小二乘的多元高斯拟合, 其基本模型为

$$g(x) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-(x-\mu_i)^2/2\sigma_i^2} + b \quad (12)$$

式中,  $n$  为待定的高斯函数个数。

## 3 试验与分析

### 3.1 小波阈值去噪试验

采用 4 种软阈值小波去噪方式对前文得到的仿真数据进行去噪。

为使去噪后对比效果更加明显, 图 3 为 4 种去噪方法经过 5 层小波分解去噪后与原始无噪声信号作差的去噪偏差图。图中, 无偏风险估计阈值去噪法表现略差; 启发式阈值去噪法与固定阈值去噪法效果相当, 且均优于极值阈值去噪效果。

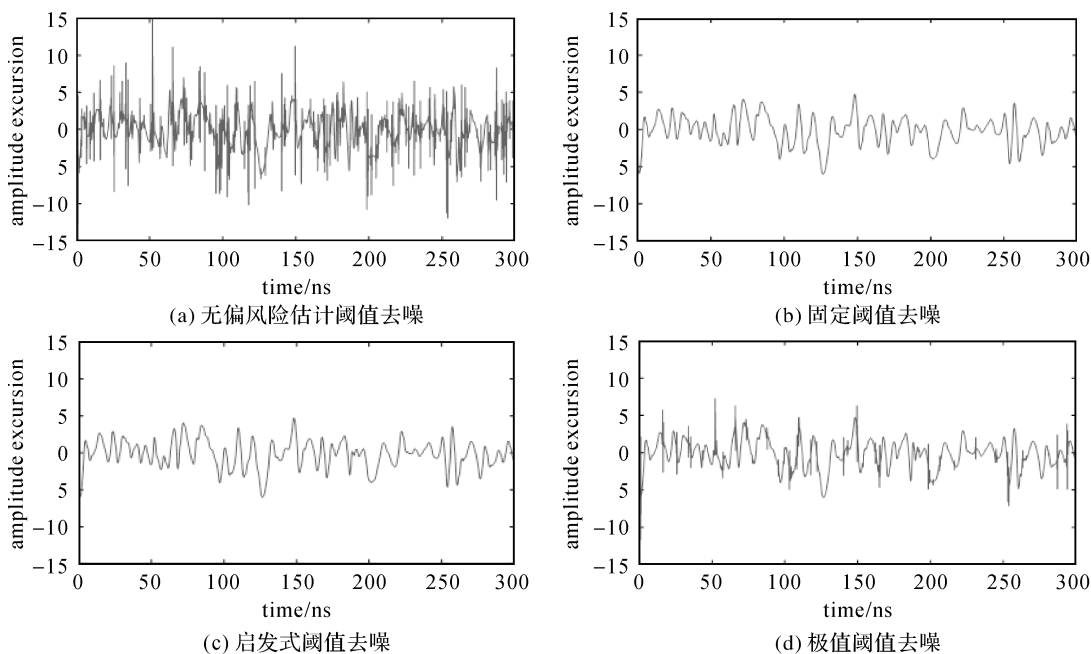


图 3 不同阈值去噪偏差图

Fig.3 Denoising deviation diagram of various threshold

由于小波分解层级是影响去噪效果的主要参数之一, 因此, 本文通过逐一增加分解层数来找到最佳去噪分解层, 其去噪精度好坏利用均方根差 (RMSE) 进行判断

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(t_i) - y_i)^2} \quad (13)$$

式中,  $N$  为信号采样数;  $f(t_i)$  为去噪信号;  $y_i$  为原始无噪声信号。

图 4 统计了 4 种小波阈值去噪算法一至十五阶分解层级的 RMSE 值, 从中可以看出 4 种小波软阈值去噪法在前六阶分解中精度迅速提高, 启发式阈值去噪六阶以后精度趋于平稳, 且精度最高; 其他去噪算法精度都有不同程度的下降。综上所述可知, 小波软阈值去噪法中, 启发式阈值对回波信号去噪最为理想, 将分解层数设为六阶去噪效果最优。

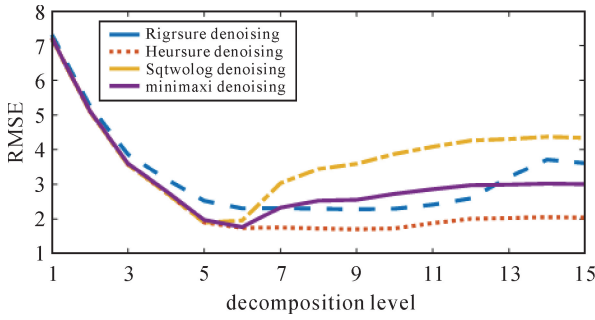


图4 小波阈值去噪分解层级精度比较

Fig.4 Comparison of accuracy of wavelet threshold denoising decomposition level

### 3.2 经验模型去噪试验

首先将本文得到的仿真数据进行 EMD 分解,得到八阶 IMF 值如图 5 所示。

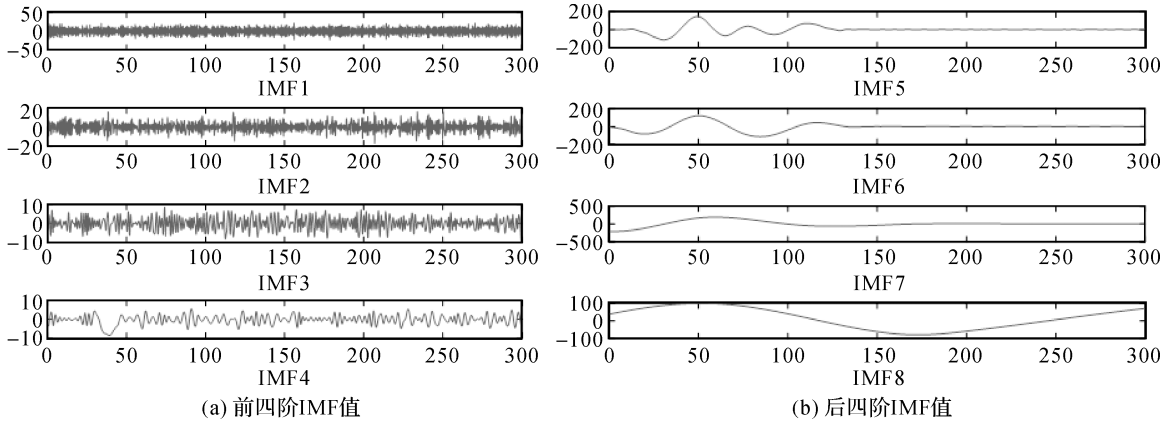


图5 经验模型八阶 IMF 分解量

Fig.5 Eighth-order IMF decomposition of EMD

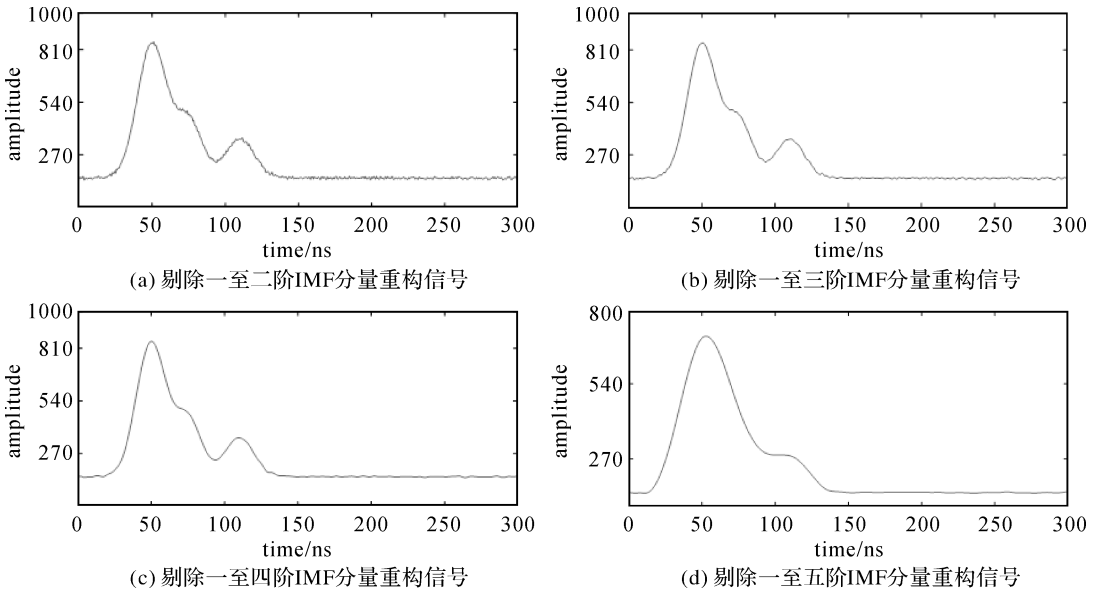


图6 逐一剔除 IMF 分量后的重构信号

Fig.6 Reconstructed signals after removing IMF components one by one

从图 5 可以看出,噪声主要集中在前四阶 IMF 值中,其中一阶 IMF 分量可以认为是纯噪声直接剔除,二至四阶分量认为是噪声与有效回波的混合层级。下面将逐一剔除每一层分量进行数据重构,观察数据变化。

从图 6 可以看出:将一阶和二阶 IMF 剔除后信号中仍然存在较大噪声,逐一剔除一至四阶 IMF 分量后,原始回波信号噪声得到了一定抑制,而剔除前五阶 IMF 后重构回波信号开始出现信号失真,图 6 中的图(d)出现了较大偏差。故将一阶 IMF 作为纯噪声剔除,二至四阶 IMF 分量可看作噪声与信号的过渡层根据数据采集量的大小作适当筛选,五阶之后的 IMF 分量作为有效信号回波予以保留。

表 1 给出了几种去噪方法的精度比较。从表 1 可以看出:启发式小波阈值去噪对激光回波去噪最为有效,精度达到 1.740 6,EMD 模型在剔

除前四阶 IMF 系数后精度可达到 2.030 9。为探究最佳波形去噪效果,下面将联合小波阈值去噪法和 EMD 去噪进行联合去噪。

表 1 多种去噪方法精度对比

Tab.1 Comparison of accuracy of various denoising methods

性能指标 / 算法	无偏风险估计 阈值去噪	固定阈值 去噪	启发式阈值 去噪	极值阈值 去噪	三至八阶 IMF 重构	四至八阶 IMF 重构	五至八阶 IMF 重构
RMSE	2.309 3	1.956 4	1.740 6	1.766 2	4.015 6	2.841 1	2.030 9

### 3.3 联合去噪试验

根据表 1 结果可知,方案 1:将用 EMD 经验

模型五至八阶 IMF 重构后的数据进行小波阈值去噪(表 2)。

表 2 方案 1:去噪效果对比

Tab.2 Option 1:Comparison of denoising effect

性能指标 / 算法	EMD 去噪后进行无偏 风险估计阈值去噪	EMD 去噪后进行 固定阈值去噪	EMD 去噪后进行 启发式阈值去噪	EMD 去噪后进行 极值阈值去噪	EMD 去噪,五至 八阶 IMF 重构
RMSE	2.030 9	2.030 9	2.030 9	2.030 9	2.030 9

从表 2 可以看出,经过 EMD 去噪后再进行小波阈值去噪,效果不明显精度保持不变,可见将 IMF 前四阶高频信号去除后,已将大量噪声剔除,同时也损失了一部分有效信息,再由小波阈值去噪时,无法探测出剩余噪声且失去的有效信息无法补偿,因此并未对精度有所提高。

方案 2:先进行 EMD 分解,对分解得到的

IMF 值进行小波阈值去噪,最后将去噪后 IMF 进行重构。由于回波信号 EMD 分解有八阶 IMF 值,每阶 IMF 都用启发式阈值去噪法进行处理(从前文可知启发式阈值去噪法最优),而处理后与处理前的 IMF 值重构组合数较多。本文进行了大量试验,表 3 列出了组合后较为明显的去噪方案。

表 3 方案 2:去噪效果对比

Tab.3 Option 2:Comparison of denoising effect

性能指标 / 算法	i5+i6+i7+i8+ 残差	f5+f6+f7+f8+ 残差	f5+i6+i7+i8+ 残差	i4+i5+i6+i7+i8+ 残差	f4+f5+f6+f7+f8 + 残差
RMSE	2.030 9	2.030 7	2.030 7	2.841 1	2.839 2

注:f<sub>n</sub> 表示经小波处理后的 IMF;in 表示未经小波处理后的 IMF;n 表示 IMF 对应的层级。

从表 3 可以看出,仅对第 5 层 IMF 值小波阈值去噪重构的信号与 5 至 8 层均小波去噪重构的精度一致,是因为 IMF 值从六阶以后为低频信号,小波阈值去噪对其去噪并不明显,而对五阶以下 IMF 值有一定去噪效果,且从表 3 的第 5 列和第 6 列精度比较可以看出,阶数越低小波阈值去噪效果越明显。

方案 3:先进行小波阈值去噪,再进行 EMD 去噪(表 4)。

由于小波去噪后信息量的减少,方案 3 仅得到了五阶 IMF 值。从表 4 看出,五阶 IMF 值均无法剔除,否则将造成有效信号的大量流失。

表 4 方案 3:去噪结果

Tab.4 Option 3:Denosing results

性能指标/ 算法	一至五阶 IMF 重构	二至五阶 重构	启发式阈值去噪 (未经 EMD 去噪)
RMSE	1.740 6	46.932 6	1.740 6

综合 3 种方案可以看出,因为小波阈值去噪对数据的缩放尺度大于 MD 去噪的尺度,小波阈值去噪效果略优于 EMD 去噪,在经过小波阈值去噪后,EMD 去噪已无法再对数据进行进一步去噪;EMD 去噪后丢失的有效信息在小波去噪中无法找回,因此方案 1 效果不佳;可以考虑在 EMD 分解得到 IMF 值后,对高频 IMF 值进行小

波分解,小波阈值去噪处理的高频层级越多,重构后精度提高越明显。该方法能够自由对信号中的噪声进行“拆解”与去噪,并灵活对各分量进行重构,通过逐层分解去噪,能够在信息量巨大时提取更多有效信息,且精度与小波阈值去噪相当,为测深回波信号处理提供新思路。

### 3.4 实测数据去噪拟合试验

为了检验去噪算法的性能和对实测数据的效果,利用2018年3月南海某海域机载激光原始波形数据进行去噪拟合试验。试验采用Mapper5000测深系统,使用4通道高速波形采集卡完成海面回波和3通道海洋波形采集,每通道采样频率达到1GSa/a,数字分辨率为10bit。数据采集期间,海域水质较好,飞行行高约为300m,激光脉冲扫描天顶角设置为 $\pm 15^\circ$ 。

#### 3.4.1 波形去噪拟合阶数对比试验

经过仿真数据试验对比分析后,本节将利用4种小波阈值去噪算法(无偏风险估计阈值去噪法、固定阈值去噪法、启发式阈值去噪法、极值阈值去噪法)以及联合去噪中效果较好的方案2算法进行实测数据的去噪,再对去噪数据进行多元高斯拟合,讨论其最佳高斯拟合阶数。其中,从实测数据中选取了10组具有典型特征的波形进行去噪试验。

表6 不同去噪算法拟合性能指标对比(激光峰值间隔平均75ns)

Tab.6 Comparison of fitting performance indexes of different denoising algorithms(the average laser peak interval is 75 ns)

性能指标	无偏风险估计 阈值去噪法	固定阈值 去噪法	启发式阈 去噪法	极值阈值 去噪法	联合 去噪法
RMSE	12.044 9	11.710 6	11.937 8	11.913 4	12.565 7
$R^2$	0.988 7	0.979 2	0.988 8	0.988 9	0.971 1
STD	$2.775 8 \times 10^{-15}$	$1.565 6 \times 10^{-14}$	$8.993 7 \times 10^{-14}$	$6.662 0 \times 10^{-15}$	$1.743 2 \times 10^{-14}$

表7 不同去噪算法拟合性能指标对比(激光峰值间隔平均165ns)

Tab.7 Comparison of fitting performance indexes of different denoising algorithms(the average laser peak interval is 165 ns)

性能指标	无偏风险估计 阈值去噪法	固定阈值 去噪法	启发式阈 去噪法	极值阈值 去噪法	联合 去噪法
RMSE	4.067 1	4.528 0	4.616 7	4.649 1	3.995 8
$R^2$	0.945 9	0.949 1	0.975 4	0.955 0	0.955 1
STD	$8.305 3 \times 10^{-14}$	$8.205 4 \times 10^{-14}$	$8.105 4 \times 10^{-15}$	$6.362 2 \times 10^{-14}$	$4.541 3 \times 10^{-14}$

表8 不同去噪算法拟合性能指标对比(激光峰值间隔平均215ns)

Tab.8 Comparison of fitting performance indexes of different denoising algorithms(the average laser peak interval is 215 ns)

性能指标	无偏风险估计 阈值去噪法	固定阈值 去噪法	启发式阈 去噪法	极值阈值 去噪法	联合 去噪法
RMSE	8.675 2	8.416 0	8.584 2	8.475 2	11.417 6
$R^2$	0.988 0	0.988 6	0.988 1	0.988 3	0.979 9
STD	$1.152 5 \times 10^{-13}$	$6.029 1 \times 10^{-14}$	$2.187 4 \times 10^{-14}$	$3.375 4 \times 10^{-14}$	$1.632 2 \times 10^{-14}$

表5给出了5种去噪方法高斯拟合后的最优阶数。从表5可以看出无偏风险估计阈值去噪法拟合精度最差,固定阈值去噪法、启发式阈值去噪法和极值阈值去噪法的精度相当,在3.800至4.000之间波动,联合去噪法拟合后最优精度可以达到3.397,但需要七阶高斯拟合,相对计算量加大。

表5 不同去噪算法的高斯拟合均方根误差

Tab.5 Root mean square error of Gaussian fitting of different denoising algorithms

高斯拟合 阶数	无偏风险 估计阈值 去噪法	固定阈值 去噪法	启发式阈 值去噪法	极值阈值 去噪法	联合 去噪法
五阶	4.046	3.953	3.998	5.620	5.696
六阶	5.507	5.483	5.456	3.844	3.812
七阶	5.633	5.368	5.324	3.819	3.397

#### 3.4.2 波形去噪拟合性能

本节将水面反射峰值和水底反射峰值间隔不同的数据分为峰值间隔平均在75、165和215ns的3组,每组5000条原始波形数据。对3组数据进行去噪试验,再利用3.4.1节中拟合精度较高的五阶高斯拟合算法对去噪数据进行拟合。拟合性能见表6—表8。

为检验各去噪算法的实际效果,引入以下两个指标,进行性能判定。

#### (1) 拟合优度 $R^2$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f(t_i) - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (14)$$

式中,  $f(t_i)$  表示拟合信号;  $y_i$  去噪信号;  $\bar{y}_i$  表示去噪信号均值。  $R^2$  越接近 1, 说明拟合效果越好。

#### (2) 相关性系数标准差 STD

STD 是相关系数 CORR 的标准差, 反映算法的稳定性。 STD 越接近零其算法稳健性越好

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{CORR}_i - \overline{\text{CORR}})^2}{n}} \quad (15)$$

式中,  $\overline{\text{CORR}}$  表示每一段波形相关系数平均值;  $n$  表示试验波形数目。 相关系数 CORR 的表达式为

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{i=1}^N (f(t_i) - \overline{f(t_i)})(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (f(t_i) - \overline{f(t_i)})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (16)$$

式中,  $f(t_i)$  表示拟合信号;  $\overline{f(t_i)}$  表示平均拟合信号;  $y_i$  表示去噪回波信号;  $\bar{y}_i$  表示去噪回波信号平均值。

从表 6—表 8 中可以看出: 不同峰值间隔下的精度有所起伏, 但固定阈值去噪法在每组数据中的去噪效果均优于其他阈值去噪法, 去噪效果稳定; 联合去噪法在 165 ns 间隔下的去噪拟合精度明显优于其他去噪法, 而在峰值间隔为 75 ns 和 215 ns 的去噪拟合试验中联合去噪法拟合精度低于其他去噪算法, 可见其稳定性略低于其他去噪算法; 5 种算法经过五阶高斯拟合后 STD 都极低, 可见 5 种算法具有较强的稳健性。

## 4 结论

仿真数据试验中, 启发式阈值与固定阈值去噪效果相当, 且可将小波分解层级设 6 层; 而小波阈值 EMD 联合去噪法能够自由对信号中每一层分量去噪, 通过逐层分解去噪, 能够在信息量巨大时提取更多有效信息, 为测深回波信号处理提供新思路。

实测数据去噪拟合中, 利用高阶高斯函数进行拟合, 能够快速实现对波形数据的处理工作, 且进一步验证了仿真试验中去噪算法的有效性。固

定阈值去噪法具有较强稳健性且精度最高, 联合去噪法稳定性相对较差, 但依然能够满足回波测深数据精度要求。

研究表明: 小波固定阈值去噪算法精度较高, 且算法稳定计算量小, 并给出了详细去噪拟合参数, 为机载测深回波数据的特征提取提供了较为准确、可靠的算法保证。

## 参考文献:

- [1] BALTSAVIAS E P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 164-198.
- [2] GLENNIE C L, CARTER W E, SHRESTHA R L, et al. Geodetic imaging with airborne LiDAR: the earth's surface revealed[J]. Reports on Progress in Physics, 2013, 76(8): 086801.
- [3] 王越. 机载激光浅海测深技术的现状和发展[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(3): 38-42, 67.  
WANG Yue. Current status and development of airborne laser bathymetry technology[J]. Journal of Geomatics, 2014, 39(3): 38-42, 67.
- [4] 刘焱雄, 郭锴, 何秀凤, 等. 机载激光测深技术及其研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1185-1194.  
LIU Yanxiong, GUO Kai, HE Xiufeng, et al. Research progress of airborne laser bathymetry technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1185-1194.
- [5] 李凯, 张永生, 童晓冲, 等. 定角圆锥扫描式机载激光测深系统定位模型与精度评价[J]. 测绘学报, 2016, 45(4): 425-433. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150161.  
LI Kai, ZHANG Yongsheng, TONG Xiaochong, et al. Positioning model and accuracy evaluation of conical scanning airborne laser bathymetry system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(4): 425-433. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150161.
- [6] 申中华, 张永生, 李凯. 圆扫描式机载激光测深系统检校模型及仿真分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(8): 943-951. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150532.  
SHEN Erhua, ZHANG Yongsheng, LI Kai. The calibration model and simulation analysis of circular scanning airborne laser bathymetry system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(8): 943-951. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150532.
- [7] 丁凯, 李清泉, 朱家松, 等. 运用 MODIS 遥感数据评测南海北部区域机载激光雷达测深系统参数[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 180-187. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170536.  
DING Kai, LI Qingquan, ZHU Jiasong, et al. Evaluation of airborne LiDAR bathymetric parameters on the Northern South China sea based on MODIS data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 180-



187. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170536.
- [8] KUMPUMÄKI T, RUUSUVUORI P, KANGASNIEMI V, et al. Data-driven approach to benthic cover type classification using bathymetric LiDAR waveform analysis[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13390-13409.
- [9] WANG Chisheng, LI Qingquan, LIU Yanxiong, et al. A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101(2): 22-35.
- [10] 姚春华, 陈卫标, 臧华国, 等. 机载激光测深系统的最小可探测深度研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(10): 1406-1410.  
YAO Chunhua, CHEN Weibiao, ZANG Huaguo, et al. Study of the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1406-1410.
- [11] DE DOMINICIS L, DE COLLIBUS M F, FORNETTI G, et al. Improving underwater imaging in an amplitude-modulated laser system with radio frequency control technique [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2010, 5: 10004.
- [12] BILLARD B, WILSEN P J. Sea surface and depth detection in the WRELADS airborne depth sounder [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(13): 2059-2066.
- [13] GUENTHER G C, BROOKS M W, LAROCQUE P E. New capabilities of the "SHOALS" airborne LiDAR bathymeter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73(2): 247-255.
- [14] 亓超, 宿殿鹏, 王贤昆, 等. 基于分层异构模型的机载激光测深波形拟合算法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 114-121.  
QI Chao, SU Dianpeng, WANG Xiankun, et al. Fitting algorithm for airborne laser bathymetric waveforms based on layered heterogeneous model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 114-121.
- [15] 王丹苒, 徐青, 邢帅, 等. 一种由粗到精的机载激光测深信号检测方法[J]. *测绘学报*, 2018, 47(8): 1148-1159. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170466.  
WANG Dandi, XU Qing, XING Shuai, et al. A coarse-to-fine signal detection method for airborne LiDAR bathymetry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(8): 1148-1159. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170466.
- [16] 刘超, 王坚, 许长辉, 等. 基于经验模态分解的 GPS/伪卫星组合基线解算模型[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(8): 996-1000.  
LIU Chao, WANG Jian, XU Changhui, et al. Integration of GPS/Pseudolites baseline solution based on empirical mode decomposition [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(8): 996-1000.
- [17] 孙磊, 张志利, 谭立龙, 等. 采用小波阈值的时变光栅莫尔信号去噪方法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 576-580.  
SUN Lei, ZHANG Zhili, TAN Lilong, et al. Denoising method of dynamic grating Moiré signal based on wavelet threshold[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 576-580.
- [18] 王丹苒, 徐青, 邢帅, 等. 机载激光测深去卷积信号提取方法的比较[J]. *测绘学报*, 2018, 47(2): 161-169. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170501.  
WANG Dandi, XU Qing, XING Shuai, et al. Comparison of signal extraction method for airborne LiDAR bathymetry based on deconvolution [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(2): 161-169. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170501.
- [19] MALLET C, BRETAR F. Full-waveform topographic LiDAR: state-of-the-art[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 1-16.
- [20] 丁凯. 单波段机载测深激光雷达全波形数据处理算法及应用研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.  
DING Kai. Research on the single-wavelength airborne LiDAR bathymetry full-waveform data processing algorithm and its application[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018.
- [21] RONCAT A, BERGAUER G, PFEIFER N. B-spline deconvolution for differential target cross-section determination in full-waveform laser scanning data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(4): 418-428.
- [22] WAGNER W, ULLRICH A, DUCIC V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(2): 100-112.
- [23] WANG C K, PHILPOT W D. Using airborne bathymetric LiDAR to detect bottom type variation in shallow waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(1): 123-135.
- [24] ABDALLAH H, BAGHDADI N, BAILLY J S, et al. WaLiD: a new LiDAR simulator for waters[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 744-748.
- [25] UNSER M, ALDROUBI A. Polynomial splines and wavelets: a signal processing perspective [M] // CHUI C K. *Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications*. New York: Academic Press, 1992:91-122.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-03-17

修回日期: 2020-07-31

第一作者简介: 宋越(1996—),男,硕士生,研究方向为机载激光浅海测深技术及应用。

First author: SONG Yue (1996—), male, postgraduate, majors in airborne laser shallow sea bathymetry technology and application.

E-mail: songyue199602@163.com

通信作者: 李厚朴

Corresponding author: LI Houpu

E-mail: lihoupul985@126.com