

激光与光电子学进展

GLAS 全波形数据的小波与经验模态分解降噪

王振华¹, 刘晓丹¹, 刘向锋^{2*}

¹上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

²中国科学院上海市技术物理研究所, 上海 200083

摘要 受系统性能、传播介质散射、探测目标特性等因素的影响,地球科学激光测高系统(GLAS)获得的全波形数据存在不同程度的噪声,从而影响 GLAS 对地物垂直结构参数的提取与激光测距精度。因此,分析对比了高斯滤波、小波阈值降噪和经验模态分解(EMD)方法的降噪效果,并进一步对比了小波软阈值降噪和小波改进阈值降噪方法以及 EMD-小波阈值降噪和 EMD-Hurst 降噪方法的性能。在六种典型地物数据上的实验结果表明,除 EMD-小波阈值降噪外,小波阈值降噪和 EMD-Hurst 降噪方法的降噪结果均优于高斯滤波;高斯滤波、小波阈值降噪和 EMD 降噪三类降噪方法均对无坡度的田地降噪效果最佳。此外,小波改进阈值降噪方法的效果优于小波软阈值降噪方法,其信噪比(SNR)提高了 10.70%~45.72%,均方根误差(RMSE)降低了 32.04%~81.94%。EMD-Hurst 方法的降噪效果优于 EMD-小波阈值降噪方法,其 SNR 提高了 6.38%~65.70%,RMSE 降低了 13.53%~33.33%。

关键词 遥感; 星载激光测高; 全波形数据; 降噪方法; 小波变换; 经验模态分解

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2328001

Wavelet and Empirical Mode Decomposition Denoising for GLAS Full Waveform Data

Wang Zhenhua¹, Liu Xiaodan¹, Liu Xiangfeng^{2*}

¹Department of Information, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

²Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract The full waveform data obtained by the geoscience laser altimeter system (GLAS) has different degrees of noise due to the system performance, the scattering of the propagation medium and the characteristics of the detection target, which affects the extraction of vertical structure parameters and the laser ranging accuracy of the GLAS. Therefore, the noise reduction effects of Gaussian filtering, wavelet threshold denoising and empirical mode decomposition (EMD) methods are analyzed and compared in this paper, and the performance of wavelet soft threshold denoising and wavelet improved threshold denoising methods as well as EMD-wavelet threshold denoising and EMD-Hurst noise reduction methods are further compared. The experimental results on six typical feature data show that the denoising results of wavelet threshold denoising and EMD-Hurst denoising methods are better than Gaussian filtering except EMD-wavelet threshold denoising. All three types of denoising methods, Gaussian filtering, wavelet threshold denoising and EMD denoising, have the best denoising effect on flat without slope. In addition, the wavelet improved threshold denoising method is better than the wavelet soft threshold denoising method, the signal-to-noise ratio (SNR) is increased by 10.70%~45.72% and root mean squared error (RMSE) is reduced by 32.04%~81.94%. The EMD-Hurst method is better than the EMD-wavelet threshold denoising

收稿日期: 2021-02-18; 修回日期: 2021-03-20; 录用日期: 2021-03-26

基金项目: 上海市科委地方能力建设项目(19050502100)、上海市海洋局科研项目(沪海科 2020-05)

通信作者: *xiangfeng_liu@163.com

method, the SNR is increased by 6.38%–65.70% and the RMSE is reduced by 13.53%–33.33%

Key words remote sensing; space borne laser altimetry; full waveform data; noise reduction method; wavelet transform; empirical mode decomposition

OCIS codes 280.3640; 140.3538; 300.6360

1 引言

星载平台具有飞行高度高、不受国界限制,受地面、天气等外界因素干扰小,能全天候对地观测等优势,在地表形貌测量和属性信息的提取中得到了广泛应用^[1-2]。星载激光测高仪基于卫星平台向地面持续发射激光脉冲,同时接收回波信号,是一种精确型主动式测距载荷^[3]。该测高仪通过测量激光从卫星到地面的往返时间差,计算激光单向传输的距离,结合精确测量的卫星轨道、姿态信息与严密几何模型获取光斑脚点的地理位置^[4]。全波形数据是发射高斯激光脉冲经大气传播被地面反射后返回的所有回波信号的总和,包含激光测高系统以极小时间间隔记录的地物场景信息,可提供丰富的地表结构信息。2003年,美国发射的ICESat卫星搭载了地球科学激光测高系统(GLAS),以获取激光雷达测高数据^[5]。GLAS数据的回波波形由发射脉冲和激光光斑内的地物及地面共同决定,包含了地物的详细特征信息及地物垂直分布和各类地物的属性信息,是地物分类的重要判断依据^[6]。

受系统探测器自身以及云层、大气散射和其他外界因素的影响,GLAS数据存在背景噪声、热噪声和量子噪声等一系列噪声信号,且地物场景越复杂,噪声信号越多。因此,应用GLAS数据前必须对其进行降噪处理。梁敏等^[7]通过设定不同的高斯函数宽度和高斯滤波模板长度,对全波形数据进行高斯滤波。左志强等^[8]提出了一种波形背景噪声迭代去除方法,设计了一种自适应高斯滤波方法,对GF-7全波形数据进行滤波。李吉贺等^[9]利于小波硬阈值降噪法对GLAS数据进行降噪处理。马鹏阁等^[10]提出了小波域脉冲激光雷达回波信号滤波方法。邱赛等^[11]对比分析了DB1小波基和SYM7小波基,并用小波软阈值降噪方法实现了降噪处理。吴红波等^[12]采用小波软阈值降噪方法对GLAS数据进行降噪,结果表明,小波软阈值降噪方法能较好地保留回波波形中的有用信息。赵未莲^[13]提出了一种软硬阈值折衷降噪方法。Long等^[14]提出了一种自适应小波阈值降噪方法,在传统阈值法的基础上调整两个参数使阈值函数具有连续性、可控

性和灵活性。李振兴等^[15]提出了一种基于经验模态分解(EMD)的小波阈值降噪方法,避免了小波阈值降噪方法对高频分量损失严重的问题。Boudraa等^[16]提出了一种基于EMD和小波软阈值函数的降噪方法,并将其与Savitzky-Golay(S-G)滤波器、中值滤波器和平均滤波器的本征模态函数(IMF)进行了对比。Chang等^[17]提出了一种基于EMD和软阈值的激光雷达信号降噪方法。Zhang等^[18]针对全波形数据降噪中传统滤波器依赖滤波参数的问题,提出了一种基于EMD和Hurst分析的自适应降噪方法。曲从善等^[19]利用EMD方法对不同Hurst指数的分数阶高斯噪声信号进行分解,该方法是一种具有自适应能力的降噪方法。

目前,对多种降噪方法的区别及全波形数据的降噪效果还缺少系统地分析与对比。因此,本文利用ICESat/GLAS采集到的几种典型地物全波形数据,对高斯滤波、小波阈值降噪和EMD降噪方法进行了对比分析,并进一步对比了小波软阈值降噪和小波改进阈值降噪方法以及EMD-小波阈值降噪和EMD-Hurst降噪方法的性能。

2 GLAS全波形数据的降噪方法

GLAS全波形数据包含详细的地物信息,对其进行处理不仅可获取地物目标的典型特征参数,也可以获取丰富的垂直结构信息。但受仪器本身、天气、大气散射以及其他因素的影响,GLAS全波形数据不可避免地存在噪声,如探测器噪声、背景噪声、量子噪声、组件噪声,这些噪声均可视为服从高斯分布的白噪声^[20]。噪声会严重影响GLAS全波形数据应用的精度,因此,对GLAS全波形数据的降噪处理具有重要意义。目前,针对GLAS全波形数据的降噪方法主要有高斯滤波^[21]、小波阈值降噪^[22]和EMD降噪^[23]等。高斯滤波是传统的降噪方法,可有效去除波形数据中的噪声,但需要经过测试选择恰当的高斯模板和标准差。小波阈值降噪能有效保留信号的特征,但需要根据信号特征预先确定小波基函数。EMD降噪根据信号自身特征对其进行分解后再处理,降噪中没有不确定参数,整个过程具有自适应性。

2.1 高斯滤波

星载激光测高系统获取全波形数据时发射的脉冲信号大多为高斯函数分布,因此,接收到的全波形数据信号可认为是由多个高斯分量叠加而成^[10],受噪声影响的全波形数据可表示为

$$w(t) = \sum_{i=1}^N A_i \exp\left[-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right] + n(t), \quad (1)$$

式中, $w(t)$ 为全波形数据, N 为高斯分量的数量, A_i 、 μ_i 和 σ_i 分别为第 i 个高斯分量的振幅、峰值和均方根脉冲宽度, $n(t)$ 为噪声信号。高斯滤波函数 $g(t)$ 可表示为

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

对 GLAS 数据进行高斯滤波实际上就是对 $g(t)$ 和 $w(t)$ 进行卷积,可表示为

$$h(t) = w(t) * g(t). \quad (3)$$

2.2 小波阈值降噪

小波变换分为连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT),其在时域和频域均具有较好的局部信号特征和多分辨率特性,可以很好地保留原始信号特征^[24-25]。GLAS 数据由离散点构成,更适合用 DWT 进行处理。小波阈值降噪方法主要包括小波硬阈值降噪^[24]、小波软阈值降噪(WTD-Soft)^[25]和小波改进阈值降噪(WTD-Improved)^[26]等方法。小波硬阈值降噪中小波系数在阈值处不连续,导致小波系数重构时产生振荡,降噪效果欠佳。因此,采用小波软阈值降噪和小波改进阈值降噪方法对 GLAS 数据进行处理。

1) 小波软阈值降噪

小波软阈值降噪方法的原理:当原始信号经小波分解后产生的各尺度小波系数绝对值大于阈值时,用该小波系数减去阈值;否则,将该小波系数置为零。具体定义为

$$w_s = \begin{cases} \text{sgn}(w)(|w| - T), & |w| \geq T \\ 0, & |w| < T \end{cases}, \quad (4)$$

式中, w_s 为阈值经软阈值函数量化后各尺度的小波系数, w 为小波分解后各尺度的小波系数, T 为阈值, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。相比小波硬阈值降噪,小波软阈值降噪具有较好的连续性,但当 $|w| > T$ 时, w_s 和 w 存在恒定偏差,边缘信号存在损失,从而影响降噪信号与原始信号的逼近程度。

2) 小波改进阈值降噪

小波硬阈值降噪方法重构信号时会产生振荡,

而小波软阈值降噪方法的降噪结果过于平滑,存在信号失真现象^[27]。针对两种小波阈值降噪方法的不足,李克粉等^[28]提出了一种小波改进阈值降噪方法,可表示为

$$w_1 = \begin{cases} \text{sgn}(w) \left\{ \frac{|w| - aT}{\exp\left[b\left(\frac{|w| - T}{T}\right)\right]} \right\}, & |w| \geq T \\ 0, & |w| < T \end{cases}, \quad (5)$$

式中, w_1 为经改进阈值函数量化后各尺度的小波系数, a 和 b 为调节因子且 $a \in [0, 1]$, $b > 0$ 。当 $a = 0$ 时, (5) 式为小波硬阈值降噪;当 $a = 1$ 、 $b = 0$ 时, (5) 式为小波软阈值降噪,选取合适的参数能达到小波阈值降噪的最佳效果。小波改进阈值函数具有连续性,降噪信号既不会产生振荡现象又保留了有效信号,弥补了小波硬阈值降噪和小波软阈值降噪方法的缺陷。

2.3 EMD 降噪

EMD 是处理非线性、非平稳信号的有效方法,可克服小波变换中基函数选择困难的问题^[29]。EMD^[30]可将信号分解成多个不同特征尺度的 IMF 和残余项,可表示为

$$x(t) = \sum_{x=1}^n c_x(t) + r_n(t), \quad (6)$$

式中, n 为分解的 IMF 数量, $r_n(t)$ 为分解后的残余项, $c_x(t)$ 为第 x 个 IMF。EMD 分解的 IMF 满足两个特点:在整个数据段内, IMF 的极值点和过 0 点数量相等或相差 1;在任意时刻点上, IMF 局部极大值定义的上包络线和局部极小值定义的下包络线平均值为 0,即上下两条包络线关于时间轴对称。

将信号经 EMD 后的 IMF 按频率从高低依次排列,以反映信号的不同频率特征。对于全波形数据,噪声信号主要存在于高频信号中。通过对各 IMF 进行处理可实现波形降噪。EMD 降噪方法主要包括 EMD- P ^[21]、EMD-阈值降噪^[20]、EMD-小波阈值降噪(EMD-WTD)^[30]和 EMD-Hurst^[31]等方法。EMD- P 方法是去除前 P 个高频 IMF,在降噪过程中丢失了大量信号,造成一定程度的信号失真;EMD-阈值降噪方法先筛选出多个高频 IMF 进行阈值降噪,然后再重构数据,该方法在重构时会产生振荡或信号失真现象。因此,采用 EMD-小波阈值降噪和 EMD-Hurst 方法对 GLAS 数据进行降噪处理。

1) EMD-小波阈值降噪

EMD-WTD 中原始信号先经 EMD 得到若干个频率从高到低排列的 IMF 和一个残余项,不丢弃任何一个 IMF;然后利用(5)式的小波改进阈值函数对每个 IMF 进行阈值降噪,阈值降噪过程中用 DB4 小波基对每个 IMF 进行三层分解;最后将降噪后的各 IMF 和残余项叠加即可得到降噪信号。

2) EMD-Hurst 方法

EMD-Hurst 方法根据分解后每个 IMF 自身特性自适应选择并保留合适的 IMF,用 Hurst 指数分析各随机行为,实验采用去趋势波动分析(DFA)^[32]计算每个 IMF 的 Hurst 指数(H 值)。具体计算过程:首先计算每个 IMF 序列的累计离差,过滤掉 IMF 时间序列的平均值,并对序列进行重构,将 IMF 计算的累计离差进行等长度分割;然后对分割的每个区间用最小二乘法进行一阶线性拟合,计算每个区间过滤后的均方差,对所有等长度区间求均值并开方,计算得到 DFA 函数,该函数的斜率即为 H 值;最后,利用 H 值区分有效信号 IMF 和噪声信号 IMF,并去除噪声信号 IMF,叠加剩余的有效信号 IMF 和残余项得到降噪信号。

2.4 评价指标

采用信噪比(SNR)和均方根误差(RMSE)对不同方法的降噪精度进行定量评价,信噪比越大,均方根误差越小,表明降噪效果越好。SNR 描述了信号中有效成分与噪声成分的比例关系,可表示为

$$R_{SN} = 10 \times \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{s=1}^L f^2(s)}{\sum_{s=1}^L [O(s) - f(s)]^2} \right\}, \quad (7)$$

式中, $O(s)$ 和 $f(s)$ 分别为原始信号和降噪信号, L 为信号长度。RMSE 表示观测值与真实值的偏差,能反映噪声大小与信号长度的比值,可表示为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^L [O(s) - f(s)]^2}{L}}. \quad (8)$$

3 测试结果与分析

3.1 实验数据与测试

实验数据为 ICESat/GLAS 产品中的 GLA01 和 GLA14 数据,GLA01 数据位于中国河南省内,其经纬度覆盖范围为 31°N~35°N、110°E~117°E,空间

分辨率为 60~70 m,采集时间为 2004 年 5 月 14 日。通过 GLA14 数据获取高程信息及经纬度等信息,并在 Google Earth 影像中截取典型地物图(椭圆为地物的大致范围)及激光光斑内的 GLAS 全波形数据。图 1 为典型的地物图及 GLAS 数据回波波形图。

3.2 实验结果及分析

选取无坡度林地、坡度林地、无坡度田地、坡度田地、无坡度建筑物和坡度建筑物六种典型地物的 GLAS 数据,分析并对比高斯滤波、小波阈值降噪和 EMD 降噪方法的性能。分别采用高斯滤波、WTD-Soft、WTD-Improved、EMD-WTD 和 EMD-Hurst 方法对 GLAS 数据进行降噪处理。结合 GLAS 全波形数据的特点,涉及小波阈值降噪的方法均选取 DB4 小波基对信号进行三层分解。其中,高斯滤波的高斯模板和标准差分别为 9 和 3;EMD-Hurst 中用 DFA-1(线性回归分析)计算 H 值。图 2 为基于高斯滤波、WTD-Soft、WTD-Improved、EMD-WTD 和 EMD-Hurst 方法的 GLAS 数据降噪结果的波形图,表 1 为 5 种方法对 GLAS 数据的降噪精度。对比不同地物类型的降噪精度发现,不同方法对无坡度田地的降噪效果均最优,高斯滤波、小波阈值降噪和 EMD 降噪均表现出最大的 SNR 值,其次是林地,最后是建筑物;对比三类降噪方法发现,小波阈值降噪方法具有最大的 SNR 值,其次是 EMD 降噪方法中的 EMD-Hurst 和高斯滤波,最后是 EMD 降噪方法中的 EMD-WTD。综合来看,小波改进阈值降噪方法的效果优于小波软阈值降噪方法,其 SNR 提高了 10.70%~45.72%,RMSE 降低了 32.04%~81.94%。EMD-Hurst 方法的降噪效果优于 EMD-小波阈值降噪方法,其 SNR 提高了 6.38%~65.70%,RMSE 降低了 13.53%~33.33%。

图 3 为基于高斯滤波、小波阈值降噪和 EMD 降噪的精度,可以发现,相比其他降噪方法,高斯滤波和 EMD-WTD 方法的降噪结果更加平滑,但其在降噪过程中丢失了有效波形信号和细节波峰,降噪效果较差;在图 3(c)、图 3(d)中仅高斯滤波方法的表现较差,其他方法在田地区域的降噪效果比林地区域和建筑物区域要好;由图 3(e)、图 3(f)可知,针对建筑物区域,高斯滤波和 EMD-WTD 降噪方法均造成了严重的信号失真,且在波峰处出现了明显过噪。综合来看,WTD-Soft、WTD-Improved 和 EMD-Hurst 方法的降噪效果较好,尤其是 WTD-

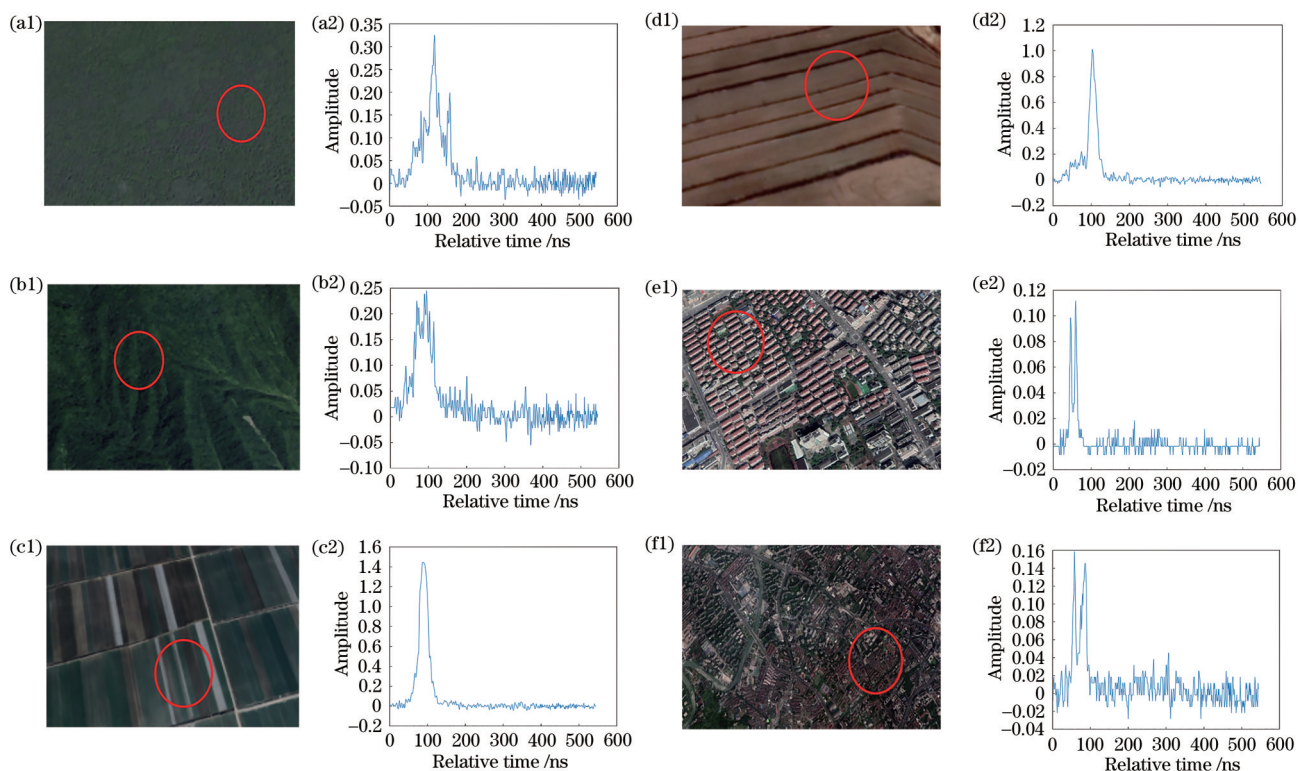


图 1 典型的地物图及 GLAS 数据的回波波形。(a) 无坡度林地; (b) 坡度林地; (c) 无坡度田地; (d) 坡度田地; (e) 无坡度建筑物; (f) 坡度建筑物

Fig. 1 Typical ground feature map and echo waveform of GLAS data. (a) Woodland without slope; (b) woodland with slope; (c) flat land without slope; (d) flat land with slope; (e) buildings without slope; (f) buildings with slope

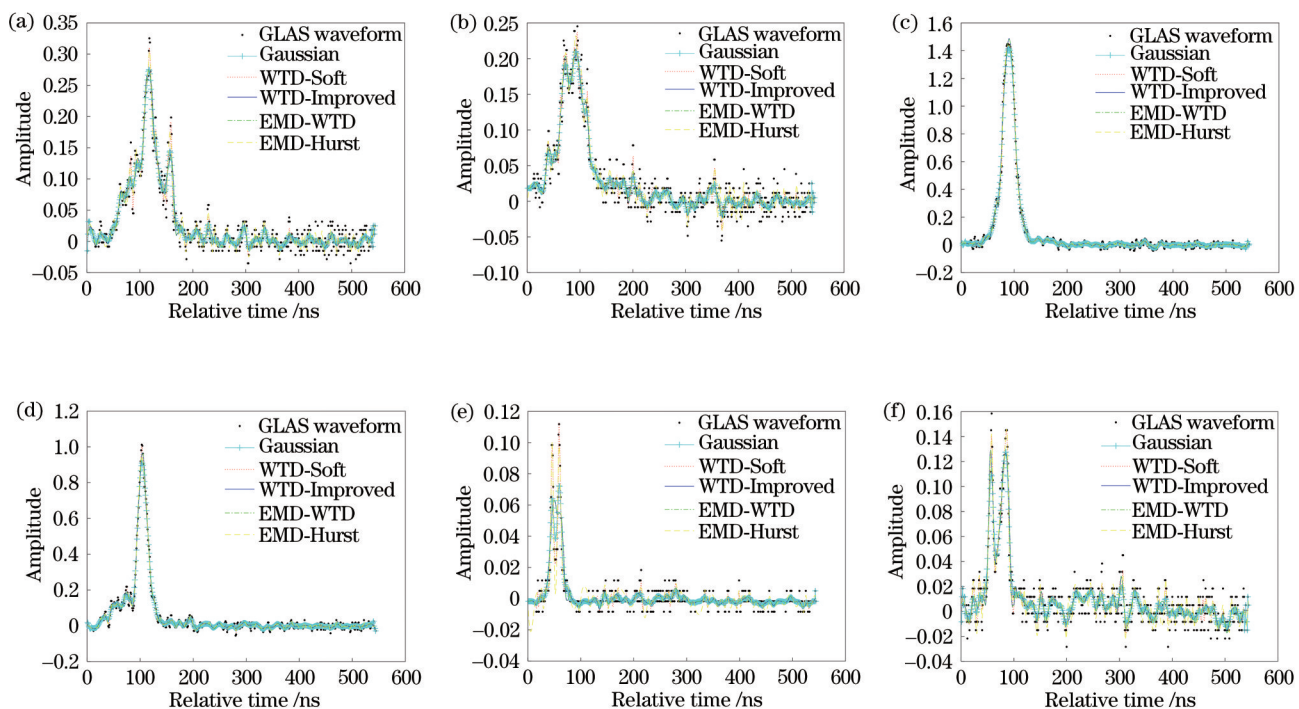


图 2 5 种方法对 GLAS 数据的降噪结果。(a) 无坡度林地; (b) 坡度林地; (c) 无坡度田地; (d) 坡度田地; (e) 无坡度建筑物; (f) 坡度建筑物

Fig. 2 Denoising results of 5 methods on GLAS data. (a) Woodland without slope; (b) woodland with slope; (c) flat land without slope; (d) flat land with slope; (e) buildings without slope; (f) buildings with slope

表 1 5 种方法对 GLAS 数据的降噪精度
Table 1 Noise reduction accuracy of 5 methods on GLAS data

Method	Precision index	Woodland without slope	Woodland with slope	Flat land without slope	Flat land with slope	Buildings without slope	Buildings with slope
Gaussian	SNR	30.5210	27.1948	51.2415	45.5369	18.4426	22.3167
	RMSE	0.0143	0.0155	0.0223	0.0174	0.0057	0.0096
WTD-Soft	SNR	37.6608	33.4901	63.8431	55.9938	32.6993	28.0127
	RMSE	0.0100	0.0113	0.0119	0.0103	0.0028	0.0072
WTD-Improved	SNR	47.4859	45.7251	70.7825	65.9482	36.1995	40.8214
	RMSE	0.0066	0.0066	0.0029	0.0070	0.0018	0.0013
EMD-WTD	SNR	27.4859	25.7251	50.7825	45.9482	12.1995	20.8214
	RMSE	0.0166	0.0166	0.0229	0.0170	0.0078	0.0103
EMD-Hurst	SNR	34.7496	29.4438	54.8620	48.8775	20.2148	28.1858
	RMSE	0.0116	0.0138	0.0186	0.0147	0.0052	0.0072

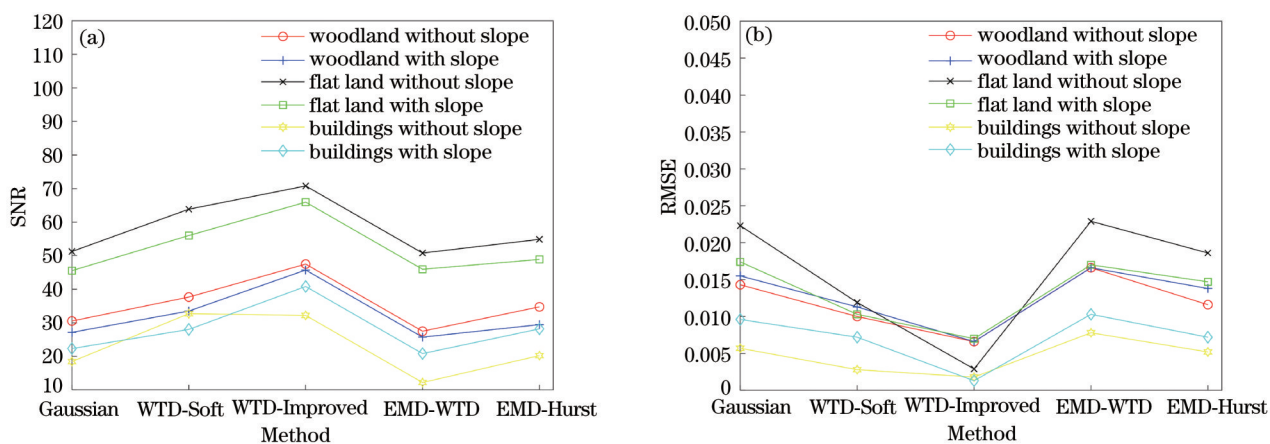


图 3 不同方法的降噪精度。(a) SNR; (b) RMSE

Fig. 3 Noise reduction accuracy of different methods. (a) SNR; (b) RMSE

Improved 方法, 在降噪的同时还能最大限度地保留有效信号。此外, 面向六种典型地物的降噪中, WTD-Improved 方法的降噪效果最佳, 原因是该方法弥补了小波硬阈值降噪后信号易产生振荡和 WTD-Soft 降噪后信号过于平滑的不足; 其次为 WTD-Soft 和 EMD-Hurst 方法; 高斯滤波降噪方法采用固定高斯模板和标准差高斯滤波器, 无法同时满足降噪和有效信号保留的要求; EMD-WTD 降噪方法对低频 IMF 进行了降噪, 造成了有效信号的丢失。

4 结 论

星载激光测高系统通过持续向地面发射激光脉冲并接收自地面返回的激光脉冲实现激光测距, GLAS 数据包含激光脉冲到达地面并返回激光测高仪全过程的详细信息, 可提供激光光斑内详细的地物特征。受自身及外界因素影响, GLAS 数据中存

在噪声, 在应用之前需对其进行降噪处理。根据 GLAS 数据的特性, 对基于信号时频域特征的 WTD 和 EMD 两类降噪方法与传统的高斯滤波方法进行了分析和对比。实验结果表明, 高斯滤波虽为传统的信号降噪方法, 但对 GLAS 数据的降噪结果并不理想, 降噪效果仅优于 EMD-WTD 方法; WTD 方法在降噪过程中保留了信号的完整性, 但该方法需要预先确定基函数和阈值等参数, 降噪结果具有不确定性, 但对 GLAS 数据的降噪效果较好; EMD 降噪无需选定基函数, 具有较好的自适应性, 在该类降噪方法中 EMD-Hurst 的降噪效果较好。实验虽然系统分析了高斯滤波、WTD 和 EMD 三类降噪方法的性能, 但由于选用的数据有限, 不能代表所有的 GLAS 数据的降噪结果, 因此针对具有非平稳信号特征的 GLAS 数据, 如何根据更多地物类型的 GLAS 数据, 选择更高效的降噪方法是亟待研究的课题。

参考文献

- [1] Men H T, Li G Y, Chen J Y, et al. Research on the refined simulation method of laser altimetry satellite echo waveform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0110004.
门华涛, 李国元, 陈继溢, 等. 激光测高卫星回波波形精细化模拟仿真方法研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0110004.
- [2] Yang J X, Zhu Y D, Wang Q, et al. Influence of surface reflectance and aerosol optical depth on performance of spaceborne integral path differential absorption lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0910001.
杨巨鑫, 朱亚丹, 王勤, 等. 地表反射率及气溶胶光学厚度对星载路径积分差分吸收激光雷达性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0910001.
- [3] Jiang D, Qin Y C, Wang X P. Sensitivity analysis of atmospheric delay corrections for satellite-borne laser altimeter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 230101.
江丹, 覃驭楚, 王小平. 星载激光测高仪大气延迟校正的敏感性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230101.
- [4] Hu G J, Fang Y, Zhang L. Development of spaceborne lidar and analysis of its application prospect in surveying and mapping[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2015, 17(2): 34-37.
胡国军, 方勇, 张丽. 星载激光雷达的发展与测绘应用前景分析[J]. 测绘技术装备, 2015, 17(2): 34-37.
- [5] Yu Z Z, Hou X, Zhou C Y. Progress and current state of space-borne laser altimetry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 020006.
于真真, 侯霞, 周翠芸. 星载激光测高技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020006.
- [6] Wang C H, Li X, Peng H. Research on simulation and analysis of spaceborne full waveform laser altimeter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102801.
王春辉, 李旭, 彭欢. 星载全波形激光测高仪仿真分析技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102801.
- [7] Liang M, Ma K. Study on the method of echo signal denoising based on gauss filter[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(1): 40-42.
梁敏, 马凯. 基于高斯滤波的回波信号去噪方法的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(1): 40-42.
- [8] Zuo Z Q, Tang X M, Li G Y, et al. Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20200251.
左志强, 唐新明, 李国元, 等. GF-7 星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200251.
- [9] Li J H, Hu D Y, Cen J, et al. Estimating forest canopy height using lidar data based on wavelet denoising[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(10): 10-15.
李吉贺, 胡德勇, 岑建, 等. 小波去噪激光雷达数据树冠高度反演[J]. 测绘科学, 2015, 40(10): 10-15.
- [10] Ma P G, Liu Y, Qi L, et al. Wavelet filter algorithm for echo signal of pulsed lidar at low SNR[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(4): 26-29, 45.
马鹏阁, 柳毅, 齐林, 等. 低信噪比下脉冲激光雷达回波信号小波域滤波算法[J]. 电光与控制, 2011, 18(4): 26-29, 45.
- [11] Qiu S, Xing Y Q, Li L C, et al. ICESAT-GLAS data processing based on wavelet transform[J]. Forest Engineering, 2012, 28(5): 33-35, 59.
邱赛, 邢艳秋, 李立存, 等. 基于小波变换的 ICESAT-GLAS 波形处理[J]. 森林工程, 2012, 28(5): 33-35, 59.
- [12] Wu H B, Xing Y Q, Xing T, et al. Method of extracting ICESat/GLAS complete waveform data based on wavelet transform[C]//National Advanced Symposium on Lidar Earth Observation Beijing: Chinese National Committee of International Society for Digital Earth/Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2010: 420-425.
吴红波, 邢艳秋, 邢涛, 等. 基于小波变换提取 ICESat/GLAS 完整波形数据的方法[C]//全国激光雷达对地观测高级学术研讨会. 北京: 国际数字地球学会中国国家委员会、中科院对地观测与数字地球科学中心, 2010: 420-425.
- [13] Zhao W L. Threshold speech signal denoising based on wavelet transform[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2005, 7(4): 73-75.
赵未莲. 基于小波变换的阈值语音信号降噪[J]. 重庆科技学报(自然科学版), 2005, 7(4): 73-75.
- [14] Long S H, Zhou G Q, Wang H Y, et al. Denoising of lidar echo signal based on wavelet adaptive threshold method[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, XLII -3/W10: 215-220.

- [15] Li Z X, Xu H Z. A wavelet threshold de-noising algorithm based on empirical mode decomposition[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(9): 325-328, 337.
李振兴, 徐洪洲. 基于经验模态分解的小波阈值降噪方法研究[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(9): 325-328, 337.
- [16] Boudraa A O, Cexus J C. EMD-based signal filtering [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(6): 2196-2202.
- [17] Chang J H, Zhu L Y, Li H X, et al. Noise reduction in lidar signal using correlation-based EMD combined with soft thresholding and roughness penalty[J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 290-295.
- [18] Zhang Z J, Liu X F, Shu R, et al. A novel noise reduction method for space-borne full waveforms based on empirical mode decomposition[J]. *Optik*, 2020, 202: 163581.
- [19] Qu C S, Lu T Z, Tan Y. A modified empirical mode decomposition method with applications to signal denoising[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(01): 67-73.
曲从善, 路廷镇, 谭莹. 一种改进型经验模态分解及其在信号消噪中的应用[J]. *自动化学报*, 2010, 36(1): 67-73.
- [20] Ma Y, Li S, Zhou H, et al. Noise suppression method for received waveform of satellite laser altimeter based on adaptive filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3263-3268.
马跃, 李松, 周辉, 等. 利用自适应滤波星载激光测高仪回波噪声抑制方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3263-3268.
- [21] Hofton M A, Minster J B, Blair J B. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1989-1996.
- [22] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613-627.
- [23] Zhang Y K, Ma X C, Hua D X, et al. An EMD-based denoising method for lidar signal[C]//2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, October 16-18, 2010, Yantai, China. New York: IEEE Press, 2010: 4016-4019.
- [24] Sun G D, Qin L A, Cheng Z, et al. Application of wavelet noise reduction for simulated signals of imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 090102.
孙国栋, 秦来安, 程知, 等. 小波去噪在成像激光雷达仿真信号中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090102.
- [25] Li H D, Li Q. Wavelet denoising based on technique of threshold[J]. *Computer Technology and Development*, 2009, 19(7): 56-58.
李海东, 李青. 基于阈值法的小波去噪算法研究[J]. *计算机技术与发展*, 2009, 19(7): 56-58.
- [26] Wu G W, Wang C M, Bao J D, et al. A wavelet threshold de-noising algorithm based on adaptive threshold function[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1340-1347.
吴光文, 王昌明, 包建东, 等. 基于自适应阈值函数的小波阈值去噪方法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1340-1347.
- [27] Du H F, Cong S. The study on wavelet de-noising under the environment of Matlab[J]. *Computer Simulation*, 2003, 20(7): 119-122.
杜浩藩, 丛爽. 基于 Matlab 小波去噪方法的研究[J]. *计算机仿真*, 2003, 20(7): 119-122.
- [28] Li K F, Wang Z. Application of improved wavelet threshold denoising in speech recognition[J]. *Computer Technology and Development*, 2013, 23(5): 231-234.
李克粉, 王直. 改进的小波阈值去噪在语音识别中的应用[J]. *计算机技术与发展*, 2013, 23(5): 231-234.
- [29] 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.
- [30] Chen W P, Pan Z W. Denoising of wavelet threshold filtering based on empirical mode decomposition[J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2010, 27(4): 397-400.
陈卫萍, 潘紫薇. 基于经验模态分解的小波阈值滤波去噪[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 27(4): 397-400.
- [31] Zhang Z J, Xie H, Tong X H, et al. Denoising for satellite laser altimetry full-waveform data based on EMD-Hurst analysis[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2020, 13(11): 1212-1229.
- [32] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2002, 316(1/2/3/4): 87-114.