

GF-7 星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波

左志强¹, 唐新明^{1,2}, 李国元², 李松¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072;
2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048)

摘要: 全波形星载激光测高仪通过向地表发射激光, 获得目标表面的后向散射完整波形, 可用于地表剖面高程信息及目标表面几何物理参数的反演。GF-7 星载激光测高仪部分原始波形存在噪声显著、波峰左偏/右偏和非饱和平峰等情况, 对提取有效信息造成干扰。针对 GF-7 星载激光测高仪全波形数据, 首先提出了一种波形背景噪声迭代去除方法, 然后对波形噪声特点及几何结构进行分析, 并进行量化描述, 最终设计了一种顾及波形噪声与结构异构的自适应高斯滤波器。在实验中, 将文中方法与已有经典波形滤波算法进行比较, 最终验证了文中方法在噪声去除、有效信号保留及非饱和平峰波形处理上的有效性。使用文中方法进行波形滤波后, 波形信噪比更高, 同时波形幅值下降量均在 3 倍的噪声标准差以内, 非饱和平峰波形滤波后波形高斯分解参数振幅、均值和标准差的分解精度分别为 (0.69 ± 2.34) mV, (0.007 ± 0.024) ns 和 (0.026 ± 0.069) ns。

关键词: GF-7 星载激光测高仪; 全波形; 自适应高斯滤波; 激光遥感

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200251

Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter

Zuo Zhiqiang¹, Tang Xinming^{1,2}, Li Guoyuan², Li Song¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: The full-waveform satellite laser altimeter is able to record the complete backscattered echo waveform from the target surface, which can be used for range measurement and geophysical parameters inversion of the target surface. Some received raw full waveforms of the GF-7 satellite laser altimeter contain significant noise, skewed wave peak, and unsaturated flat peak, causing interferences to the information extraction from waveform. Firstly, an iterative method for waveform background noise removal was proposed, then, the characteristics and geometric structure of the waveform noise were analyzed and quantitatively described, and finally, an adaptive Gaussian filter considering the noise and heterogeneity structure of the waveform was designed. Comparison between the proposed method and other existing classical filtering methods was made in the experiment, and the superior performance of proposed method was proved in noise removal, signal retention, and unsaturated flat peak waveform processing. The higher signal-to-noise ratio (SNR) of the filtered waveform was achieved using the

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-07-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41971425); 高分辨率对地观测系统重大专项应用共性关键技术项目 (11-Y20A13-9001-17/18, 11-Y20A11-9001-17/18)

作者简介: 左志强 (1992-), 男, 博士生, 研究方向为星载激光测高数据处理。Email: zhiqiang_zuo@whu.edu.cn

导师简介: 唐新明 (1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为国产卫星测绘数据处理与应用。Email: tangxinming99@qq.com

proposed method, and the amplitude decline of the waveform is within 3 times of the noise standard deviation. After the filtering of the waveform with unsaturated flat peak, the decomposition precision of the waveform Gaussian parameter amplitude, mean value and standard deviation are (0.69 ± 2.34) mV, (0.007 ± 0.024) ns and (0.026 ± 0.069) ns respectively.

Key words: GF-7 satellite laser altimeter; full waveform; adaptive Gaussian filtering; laser remote sensing

0 引言

星载激光测高作为一种主动遥感技术为人类提供了一种新的卫星遥感观测手段,通过测量所发射的激光的往返传输时间,结合卫星平台的轨道位置和姿态等信息,可计算得到分米甚至厘米级别精度的目标表面高程信息,已在地球、月球、火星及其他星球的观测中得到了应用^[1-4]。全波形星载激光测高仪发射激光束后,可获得目标表面的后向散射完整波形,不仅获得更加丰富的地表剖面高程信息,也可用于对目标表面几何物理属性进行反演分析^[5-7]。然而由于激光测高仪全波形数据混入探测器噪声、背景噪声、量子噪声、暗电流噪声和热噪声等,在进行精细化的波形分解、激光往返时间测量和地表参数反演前,需要准确地滤除原始波形数据中的噪声^[8-9]。

GF-7 卫星于 2019 年 11 月 3 日在酒泉卫星发射中心发射,搭载有国产首台民用双线阵亚米级光学立体相机和全波形星载激光测高仪,其中全波形星载激光测高仪用于提高双线阵光学相机立体测量高程精度。GF-7 星载激光测高仪包含两个激光器,各以 3 Hz 的频率向地表发射激光并接受回波,其中回波采样频率为 2 GHz,波长为 1064 nm;激光束落至地表后,形成光斑足印,直径小于 30 m(卫星轨道高度 500 km)。

通过对 GF-7 星载激光测高仪原始全波形数据进行统计分析,发现波形中不仅包含较多的噪声影响,也存在非饱和平峰、波峰左偏或右偏等情况,这些将对地表高程相关信息计算及几何物理参数反演有直接的影响,降低激光往返时间测量精度^[10-12],因此需要对 GF-7 星载激光测高仪全波形原始数据进行精准滤波,去除波形中混入的噪声,并最大程度保留有效信号。目前已有的用于星载激光测高仪全波形噪声滤除的方法主要有均值滤波^[13]、多项式平滑滤波^[14]、固定宽度的高斯滤波^[12]、傅里叶低通滤波^[15]和小波滤波^[16]等方法。参考文献^[17]提出平坦平面的星载

激光测高回波的均方根脉宽是高斯滤波器的最佳固定宽度,然而固定宽度的高斯滤波器无法同时满足最大程度去除波形噪声和保留有效信号:高斯滤波器标准差 σ 越大,对波形噪声抑制效果越好,但同时将减小回波信号幅值,展宽有效高斯信号,降低利用星载激光测高仪全波数据计算星地距离及反演目标表面几何物理参数的精度^[6];高斯滤波器固定宽度 σ 越小,将越能保留有效信号,然而对噪声的抑制较弱。傅里叶低通滤波在频率域内对波形数据进行滤波处理,不合适的截止频率将导致波形信号畸变。小波滤波可以在时域内显示频率和能量信息,然而需基于原始信号利用经验选定一个先验基函数,此类预设的先验基函数无法满足所有波形。参考文献^[18]针对星载激光测高全波形数据提出了一种自适应高斯滤波器,利用回波的白噪声方差及选定窗口内的回波信号标准差计算高斯滤波自适应宽度 σ ,对 ICESat/GLAS 激光测高全波形进行了滤波。参考文献^[19]提出了一种基于经验模态分解的全波形噪声抑制方法,基于波形数据自身的时间尺度特征来进行信号分解,无须设定先验基函数,然而相比上述方法花费时间较长。

基于 GF-7 星载激光测高仪原始全波形数据,首先提出了一种波形背景噪声精确滤除方法,并针对 GF-7 全波形的噪声特点、波峰左偏/右偏与波形非饱和平峰,设计了一种标准差自适应的高斯滤波器,对波形进行了有效滤波:在最大程度保留有效信号的同时对波形进行了噪声去除;并利用真实波形模拟非饱和平峰波形,使用文中方法对模拟波形进行滤波,检验滤波后波形高斯分解参数幅值、均值、标准差的分解精度;最后将文中方法与已有部分经典滤波方法的滤波结果进行对比,验证所提方法的普适性与精度。

1 全波形噪声均值及标准差估计

星载激光测高仪全波形噪声可认为是非零均值

高斯白噪声,包含探测器噪声、前置放大器噪声、背景噪声、量子噪声、暗电流噪声和热噪声,其中除了背景噪声是非零均值噪声,其他噪声均可认为是零均值噪声,精确估计噪声均值及标准差可有效滤除背景噪声,并保留真实有效信号^[6,9]。对于星载激光测高仪,地球表面和云层反射的太阳背景辐照产生的噪声是主要的背景噪声源,噪声功率为^[9]:

$$P_B = I_S A_R T_A^2 (r/\Omega) R_o T_R F_B \quad (1)$$

式中: I_S 为大气层外的太阳光辐照度,约为 $6.6 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ \AA})$ (在波长 1064 nm 处)($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$); A_R 为接收面积(m^2); T_A 为激光大气气溶胶透过率; r/Ω 为目标后向散射截面(sr^{-1}),其中 r 为地表反射率, Ω 为后向散射立体角; R_o 为接收器视场角(sr); T_R 为接收器透射率; F_B 为带通滤波带宽(\AA)。若根据理论模型计算背景噪声,需要目标地表后向散射截面等先验信息,并且需要获取激光传输路径上的大气气溶胶浓度信息,而 GF-7 激光测高仪目前未能在波形中记录大气气溶胶的相关信息,因此难以根据模型直接计算背景噪声值。此节提出一种迭代去除 GF-7 原始波形背景噪声的方法,并最终完成对全波形噪声均值及方差的估计,避免经验性背景噪声滤除方法的可能误差(如取波形的前端或后端部分计算背景噪声)。以回波波形为例,GF-7 星载激光测高仪全波形数据采样频率为 2 GHz,回波波形记录序列通常为 400 ns,即回波波形记录 800 个波形强度离散采样点数据,可表示为:

$$WI_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 800) \quad (2)$$

背景噪声迭代去除方案如下:

$$(1) \text{ 若 } WI_k < \frac{\sum_{i=1}^{800} WI_i}{800}, \text{ 其中 } 1 \leq k \leq 800, \text{ 记录 } WI_k,$$

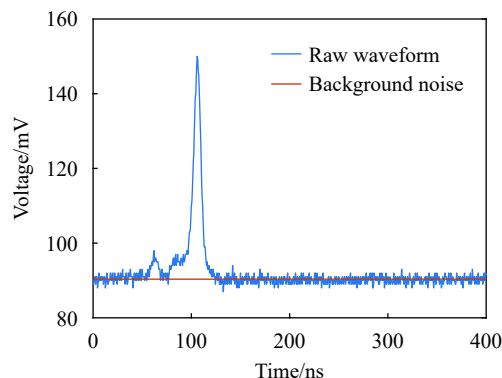
计算 WI_k 序列数据均值作为背景噪声初值 (Background Noise) 记作 BGNoise, 计算 WI_k 序列数据标准差为噪声标准差初值, 记作 NoiseStd;

(2) 若 $WI_j < \text{BGNoise}$, 其中 $1 \leq j \leq 800$, 记录 WI_j , 计算 WI_j 序列数据均值; 若 $\text{Abs}(\text{BGNoise} - \text{Mean}(WI_j)) < 3\text{NoiseStd}$, 认为步骤 (1) 中计算的背景噪声及标准差有效, 否则认为背景噪声初值比真值过高或过低, 设定 $\text{BGNoise} = \text{Mean}(WI_j)$, $\text{NoiseStd} = \text{Std}(WI_j)$;

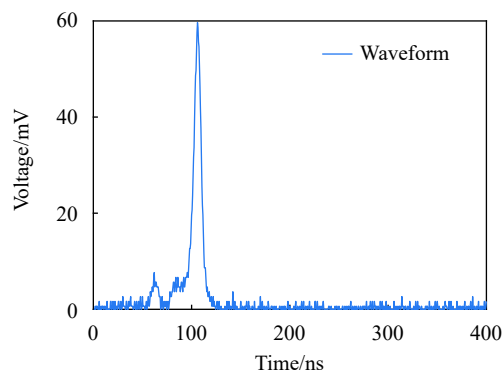
(3) 若 $\text{BGNoise} > \text{NoiseStd}$, 对波形进行背景噪声去除; 若 $WI_k > \text{BGNoise}$, 设定 $WI_k = WI_k - \text{BGNoise}$;

若 $WI_k < \text{BGNoise}$, 设定 $WI_k = 0$;

(4) 若 $\text{BGNoise} > \text{NoiseStd}$, 记录得到的 BGNoise, 继续循环步骤 (1)~(3); 若 $\text{BGNoise} < \text{NoiseStd}$, 迭代终止, 此时 NoiseStd 为原始波形的噪声标准差; 将已记录 BGNoise 序列数据进行相加, 为原始波形的背景噪声值。如图 1 所示为某一 GF-7 回波波形背景噪声去除结果。



(a) 全波形原始波形与背景噪声 (红色线)
(a) Raw full waveform and its background noise (red line)



(b) 去除背景噪声后的波形
(b) Full waveform without background noise

图 1 GF-7 星载激光测高仪全波形数据与背景噪声去除

Fig.1 Background noise removal of full waveform data of GF-7 satellite laser altimeter

2 自适应高斯滤波

全波形星载激光测高仪发射激光经过一次菲涅耳衍射,入射至地球表面经过目标反射,再经过一次菲涅耳衍射,最终到达望远镜视场并被接收,经过信号增益、光电转换和采样等过程得到数字化的离散全波形数据^[6],若忽略噪声对波形的影响,回波波形可表示为多个 Gaussian 分量的叠加^[20]:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

式中: A_i , μ_i 和 σ_i 分别为第*i*个 Gaussian 分量的幅值、均值和均方根脉宽。然而由于实际存在的噪声, 真实回波波形应表示为 $r(t) = f(t) + N(t)$, 其中 $N(t)$ 即为*t*时刻的噪声信号。第 1 节中对回波波形中的背景噪声进行了去除, 剩余噪声为独立的零均值高斯白噪声, 独立的高斯分布相加, 结果仍为高斯分布, 则在*t*时刻零均值噪声:

$$N(t) \sim N(0, \sigma_N^2) \quad (4)$$

由于高斯函数的对称性, 对全波形数据进行高斯滤波, 等价于卷积过程, 假设高斯滤波函数为 $g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$, 则对全波形数据进行滤波在连续空间可表示如下:

$$h(t) = r(t) * g(t) = N(t) * g(t) + \sum_{i=1}^n \frac{A_i \sigma_i}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}} e^{-\frac{(t-\mu_i)^2}{2(\sigma^2 + \sigma_i^2)}} \quad (5)$$

对波形有效信号进行高斯卷积后, 仍然为 Gaussian 分量的叠加, 且分量均方根脉宽变大, 为 $\sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}$, 振幅减小为 $\frac{A_i \sigma_i}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}}$, 波形整体更加“扁平”。对噪声

序列进行高斯滤波 ($N(t)g(t)$), 滤波后噪声方差经公式推导为:

$$\sigma_N'^2 = Var[N(t) * g(t)] \approx \frac{\sigma_N^2}{2\sigma\sqrt{\pi}} \quad (6)$$

可发现随着高斯滤波器标准差 σ 的增加, 滤波后噪声方差减少, 对噪声的抑制作用增强, 然而由公式 (5) 可知随着 σ 的增加, 将导致有效高斯波形的变形, 因此有效的高斯滤波器应在噪声明显区域的 σ 较大, 以抑制噪声, 而在有效信号区域的 σ 较小, 减少滤波过程对有效信号的影响。

文中基于波形数据的噪声及几何结构特点, 在设计自适应滤波器时分别考虑了 GF-7 星载激光测高仪全波形数据的波形噪声、波峰左偏/右偏和非饱和平峰三个因素。

(1) 波形噪声特点

如图 2 所示, 窗口 A 中波形部分在较短的时间内, 信号震荡频繁, 包含较多的噪声信号, 有效信号较少, 窗口 B 中波形为主要为有效波形信号, 无波动震荡, 文中使用滤波窗口内的波形的折点数目 (如图 3 所示) 及波形强度标准差对滤波窗口内的波形的噪声作量化描述。

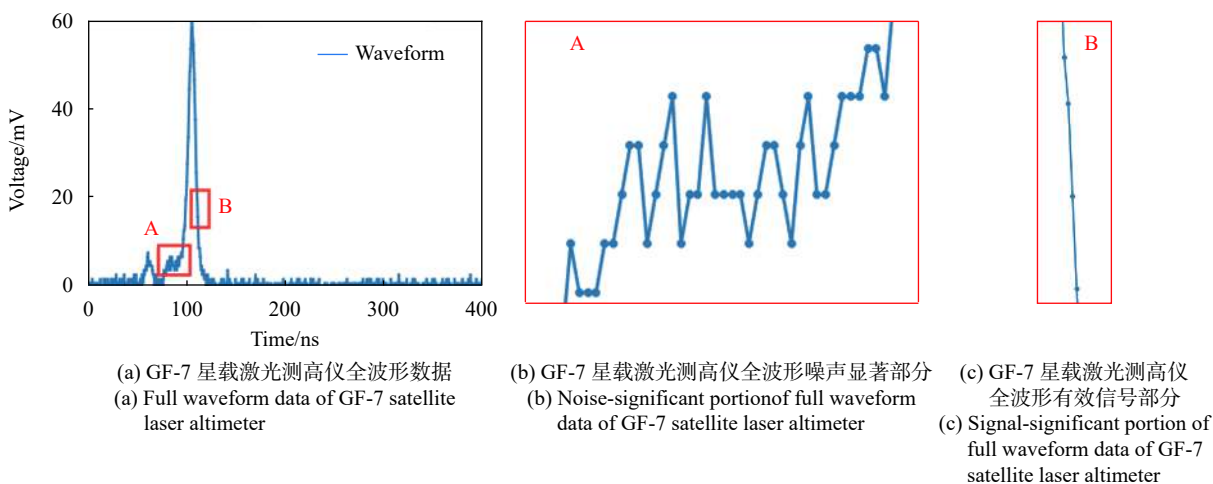


图 2 GF-7 星载激光测高仪全波形数据、噪声及有效信号

Fig.2 Full waveform data, its noise and effective signal of GF-7 satellite laser altimeter

图 3 内包含滤波窗口内所有变化折点的形态分布, 在图 2 窗口 A 内, 波形噪声明显, 包含折点数目较多, 且此时窗口内波形强度值标准差较小; 在图 2 窗

口 B 内, 有效信号部分较强, 包含折点数目较少, 且此时强度值标准差较大; 对滤波窗口波形离散点的折点数目进行统计, 若当前点满足图 3 中的一种, 则折点

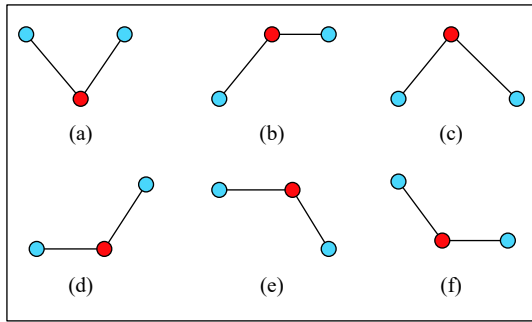


图 3 离散全波形中折点类型, 红色点为当前点 (Current), 强度值为 WI_C , 蓝色点为相邻时间的两个离散点 (Former, Later), 强度值分别为 WI_F 和 WI_L : (a) $WI_C < WI_F$ 且 $WI_C < WI_L$; (b) $WI_C > WI_F$ 且 $WI_C = WI_L$; (c) $WI_C > WI_F$ 且 $WI_C > WI_L$; (d) $WI_C = WI_F$ 且 $WI_C < WI_L$; (e) $WI_C = WI_F$ 且 $WI_C > WI_L$; (f) $WI_C < WI_F$ 且 $WI_C = WI_L$

Fig.3 Types of the knuckle point in full waveform, and the red point is the current point (Current), the intensity is WI_C , the blue points are the chronologically adjacent with current point, and the intensities are WI_F and WI_L respectively: (a) $WI_C < WI_F$ and $WI_C < WI_L$; (b) $WI_C > WI_F$ and $WI_C = WI_L$; (c) $WI_C > WI_F$ and $WI_C > WI_L$; (d) $WI_C = WI_F$ and $WI_C < WI_L$; (e) $WI_C = WI_F$ and $WI_C > WI_L$; (f) $WI_C < WI_F$ and $WI_C = WI_L$

数目加 1, 假设折点数目为 N , 滤波窗口内的离散点强度值标准差为 $IntensitySTD$, 则决定滤波器设计的因素之一为:

$$\text{Factor1} : NL = \frac{N}{IntensitySTD} \quad (7)$$

(2) 波峰左偏/右偏

GF-7 星载激光测高仪全波形数据中部分波形的波峰存在左偏或右偏, 如图 4 所示, 对波形进行高斯滤波, 波形的波峰位置主要为有效信号, 若滤波器宽度过小则难以对波峰左偏或右偏进行有效抑制, 文中提出以滤波窗口内的波形中心点将波形分为左右两部分并分段计算斜坡角, 如图 5 所示, 利用斜坡角信息描述波形波峰左偏或右偏的程度, 最终用于约束高斯滤波器宽度。由图 5 看出, 文中计算滤波器窗口内波形左偏或右偏的参数如下:

$$\text{Factor2} : DL = \max \left(\frac{\alpha + \beta + \gamma}{\psi + \omega + \theta}, \frac{\psi + \omega + \theta}{\alpha + \beta + \gamma} \right) \quad (8)$$

若 DL 大于 1 则表明, 滤波窗口内的波形存在左偏或右偏的情况, 高斯滤波器的标准差 (σ) 将会增加。

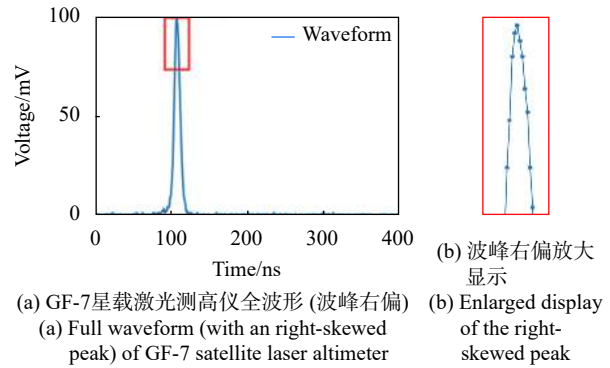


图 4 存在波峰右偏的 GF-7 星载激光测高仪全波形数据
Fig.4 Full waveform data of GF-7 satellite laser altimeter with a right-skewed peak

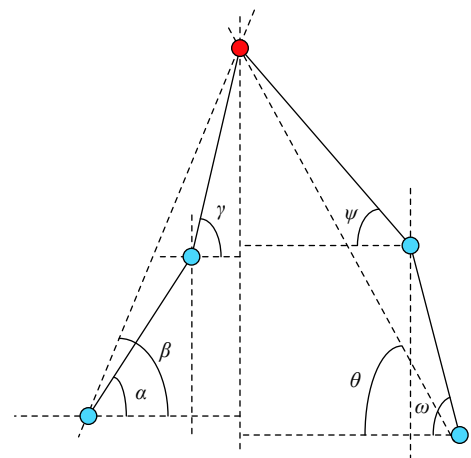


图 5 波形波峰左偏/右偏示意图: 滤波窗口内波形中心点为红色点, 蓝色点为滤波窗口内的相邻点, $\alpha, \beta, \gamma, \psi, \omega, \theta$ 为以中心点向左和向右将波形分为两部分并分段计算得到的斜坡角

Fig.5 Diagram of the left-skewed or right-skewed peak of the waveform peak in filtering window: the center point of the waveform in the filtering window is the red point, and the blue points are the adjacent points in the same filtering window. The waveform was divided into two parts with center point as the reference, and the $\alpha, \beta, \gamma, \psi, \omega$ and θ are the slope angles calculated from the left and right parts respectively

(3) 非饱和平峰

GF-7 星载激光测高仪全波形数据中, 存在部分波形波峰为非饱和平峰 (GF-7 星载激光测高仪设定波形饱和阈值为 1024), 即波形最大峰值在远小于饱和阈值时, 波形波峰位置出现了平峰。如图 6 所示, 波形的波峰位置处为平峰, 有三个点强度相同, 非饱和平峰将会降低利用波形进行星地距离测量精度, 文

中利用滤波窗口内的波形峰度对高斯自适应滤波器进行约束:

$$\text{Factor3: } KL = \frac{\text{Kurtosis}}{1.8} (KL \geq 1) \quad (9)$$

其中 1.8 对应均匀分布的峰度, 基于高斯滤波窗口内的波形计算峰度, 若峰度值小于 1.8, $KL=1$ 。

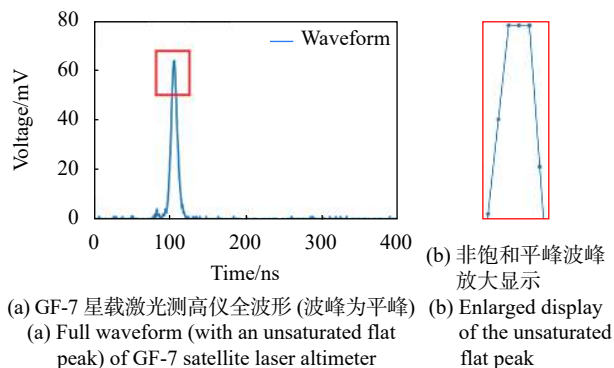


图 6 存在波峰为非饱和平峰的 GF-7 星载激光测高仪全波形数据
Fig.6 Full waveform data of GF-7 satellite laser altimeter with an unsaturated flat peak

综合 (1)~(3) 内对 GF-7 星载激光测高仪波形噪声及几何特点的分析及定量描述, 文中设计了自适应高

斯滤波器 $g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$ 的标准差如下:

$$\sigma = NL \cdot \sqrt{KL} \cdot DL^{0.25} \cdot e^{|DL-1|} \quad (10)$$

规定 $\sigma \in [0.1 \text{ ns}, 15 \text{ ns}]$, 当滤波窗口处于有效信号明显区域时, NL 值极小, 如图 2(b) 所示, 此时 $NL=0$, 此时 $\sigma = 0.1 \text{ ns}$; 若在噪声明显区域, 如图 2(a) 所示, 此时 NL 值较大, σ 也较大, 对噪声平滑程度加强。若 $DL = 1$, 表示滤波窗口内, 波形无左偏或右偏情况, 此时 σ 值无变化; 在有效信号区域 DL 值增加, 然而由于 NL 对 σ 的约束, 此时 σ 仍较小; 在噪声明显区域, 若 DL 值较大, 此时 σ 将扩大, 增强对噪声的平滑。在文中给定滤波窗口内, 经过统计, KL 值不大于 5.06, 对噪声明显区域及有效信号区域的滤波 σ 值变化影响较小, 然而在波形波峰处, 如图 6(b) 所示, 若滤波窗口以波峰中点为中心, 此时窗口内波形 KL 值小于以波峰左侧点或右侧点为中心的滤波窗口内的波形 KL 值。

3 实验结果与分析

针对 GF-7 星载激光测高仪全波形数据的噪声及

几何结构特点, 文中首先提出了一种背景噪声自适应迭代去除方法, 并设计了一种自适应高斯滤波器。本节将首先对所提出的背景噪声去除方法进行定量评价, 然后对文中提出的自适应高斯滤波方法做定性与定量化的分析, 并将文中方法与已有经典滤波方法: 均值滤波、固定宽度的高斯滤波器进行比较, 验证文中方法的有效性。

3.1 波形滤波评价指标

文中对背景噪声去除及波形滤波方法的评价可分为以下内容: 背景噪声估计的精度评价; 波形滤波后的噪声情况; 对有效信号的保留程度; 非饱和平峰滤波后的峰值位置是否合理及波形分解后的 Gaussian 分量均值精度。具体评价指标如下:

(1) 为对原始波形背景噪声估计进行精度评价, 文中从完整波形中人工选取不包含有效信号的波形计算背景噪声, 并作为真值, 并将文中方法与已有的典型背景噪声估计方法进行比较。

(2) 在对滤波方法的噪声滤除效果定量评价中使用信噪比参数 SNR 及滤波后的波形噪声标准差。其中 SNR 定义为:

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{\sum_{i=1}^N (WI_i - S_i)^2} \right) \quad (11)$$

式中: N 为全波形中离散点的数量; $WI_i (1 \leq i \leq N)$ 为原始波形序列数据 (已去除背景噪声); $S_i (1 \leq i \leq N)$ 为滤波后的波形序列数据。噪声标准差计算采用第 1 节中的计算方法。

(3) 对波形滤波过程中是否最大程度保留波形的有效信号, 文中比较滤波前后的波形峰值 (最大幅值) 变化, 并比较变化值是否过大, 超过噪声滤除阈值 (参考第 1 中节的噪声标准差计算值)

(4) 对滤波后全波形数据的保真性评价使用了波形分解的 Gaussian 分量的脉宽。

(5) 为评价非饱和平峰滤波后的波峰位置是否合理, 实验中选取了尖峰波形 (正常波峰) 进行波峰模拟置平, 比较滤波后波峰的位置是否与其真实位置相符, 并使用真实波形高斯分解参数幅值、均值、标准差评价滤波后波形的高斯分解参数的精度。

为完成对波形滤波方法的上述部分评价, 需要对

波形进行高斯拟合,文中参考文献 [12] 对 GF-7 星载激光测高仪全波数据实现了高斯分解。

3.2 实验结果

GF-7 星载激光测高仪全波形记录采样频率为 2 GHz, 激光器发射波形脉宽为 3~4 ns, 为保证滤波效果, 文中设定滤波窗口大小为 13, 即窗口内包含 13 个波形离散点记录。实验数据为过境江苏的 GF-7 星载激光测高仪全波形数据。实验中选取均值滤波和固定宽度的高斯滤波与文中滤波方法进行比较。当星载激光测高仪发射激光落于平坦平面地表时, 回波脉宽展宽极小^[5], 可忽略不计, 因此文中设定固定宽度高斯滤波器的宽度为 3.5 ns (最佳固定宽度高斯滤波器), 为作更充分对比, 将固定宽度为 1.5 ns 的高斯滤

波器实验结果一并列入比较。实验具体可分为三部分: 背景噪声估计实验; 噪声滤波与信号保真实验; 非饱和平峰处理实验。

(1) 背景噪声估计

为对文中提出的背景噪声自适应迭代滤除方法进行定量评价, 文中从完整波形中人工选取不包含有效信号的波形计算背景噪声, 并作为真值, 如图 7(a) 所示为 GF-7 星载激光测高仪真实原始回波波形, 波形中 0.5~90 ns、140~400 ns 均为不包含有效信号的波形, 认为该区域为噪声部分, 其均值为背景噪声真值。文中任意选取了 8 个 GF-7 星载激光测高仪真实回波波形, 如表 1 所示, 使用文中方法及典型背景噪声估计方法 (取波形后端 50, 100 及 150 个采样点) 计算背景

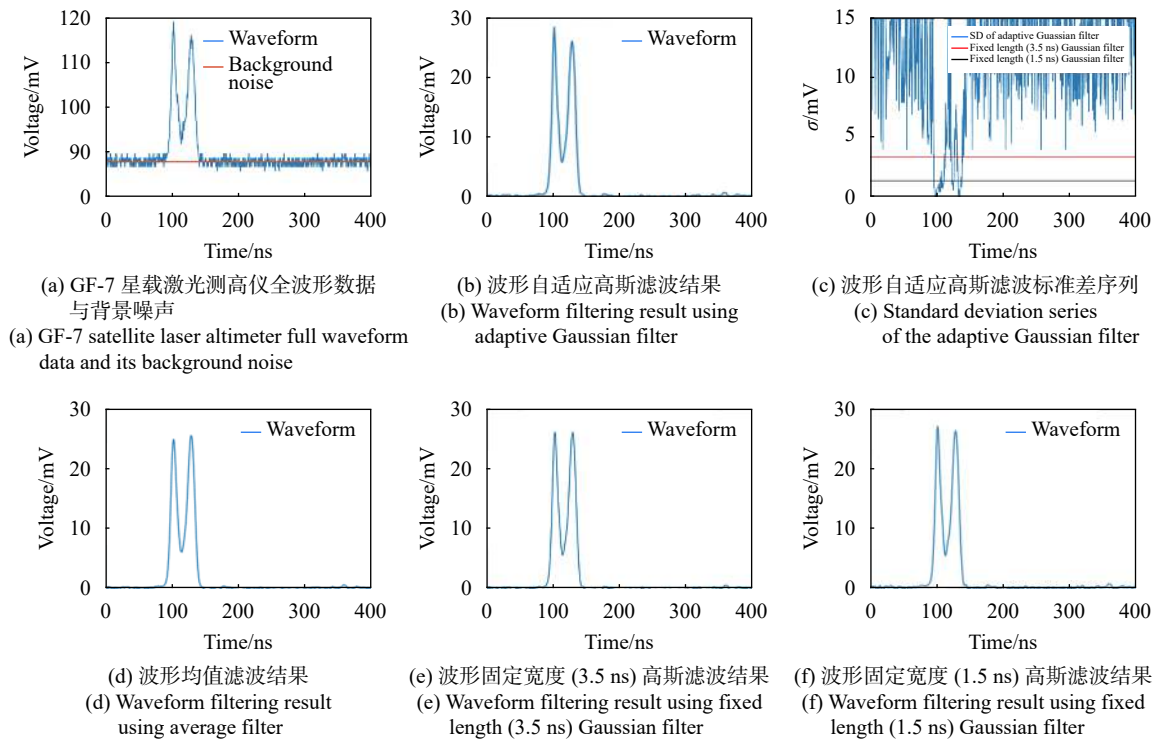


图 7 GF-7 星载激光测高仪全波形数据滤波结果: (a) 原始波形数据, 红色线为波形中的背景噪声值; (b) 所提出的波形自适应高斯滤波结果; (c) 使用本文方法及固定宽度的高斯滤波方法对波形滤波时的高斯滤波器标准差序列 (蓝色折线对应自适应滤波器高斯标准差序列, 红色线为固定宽度 (3.5 ns) 滤波器标准差, 黑色线为固定宽度 (1.5 ns) 滤波器标准差); (d) 波形均值滤波结果; (e) 固定宽度的高斯滤波结果, 滤波器固定标准差为 3.5 ns; (f) 固定宽度的高斯滤波结果, 滤波器固定标准差为 1.5 ns

Fig.7 Filtering result of GF-7 satellite laser altimeter full waveform: (a) raw full waveform and the red line indicates the background noise value of waveform; (b) waveform filtering result of our proposed adaptive Gaussian filtering method; (c) sequences of standard deviation (SD) using the proposed adaptive Gaussian filter and fixed length Gaussian filters (the blue polyline, red line, and black line are corresponding to the standard deviation of adaptive Gaussian filter, fixed length (3.5 ns) Gaussian filter and fixed length (1.5 ns) Gaussian filter respectively); (d) waveform filtering result using average filter; (e) waveform filtering result using Gaussian filter of fixed length of 3.5 ns; (f) waveform filtering result using Gaussian filter of fixed length of 1.5 ns

噪声,并与背景噪声真值进行比较。

可以发现文中方法对 GF-7 真实回波波形的背景噪声估计值与其真值更加接近,平均绝对误差为 0.08 mV,中误差为 0.11 mV,而取波形后端 50、100 和 150 个采样点计算的背景噪声值的平均绝对误差分别为 0.15 mV, 0.16 mV 和 0.15 mV,中误差分别为 0.15 mV, 0.17 mV 和 0.18 mV。

(2) 噪声滤波与信号保真

图 7(a) 为原始波形数据,其中红色线为背景噪声值 (88.13),波形中的零均值高斯白噪声整体标准差为 0.788,图 7(b)、(d)、(e)、(f) 展示了文中方法与其他方法对原始波形 (图 7(a)) 的滤波结果,图 7(c) 为文中提出的波形自适应高斯滤波及固定宽度的高斯滤波方法在对波形滤波时,分别在以不同位置为中心构造的滤波窗口内的波形高斯滤波器的标准差序列。容易发现文中结果明显优于波形均值滤波与固定宽度为 3.5 ns 的高斯滤波结果,原始波形中两个波峰幅值

差异存在明显差异,左侧波峰幅值 (30.87) 大于右侧波峰幅值 (27.87),然而在均值滤波后,左侧波峰值小于右侧波峰值,在固定宽度为 3.5 ns 的高斯滤波器对波形滤波后,左右侧波峰之间幅值几乎相同。从图 7(c) 可以发现文中提出的自适应高斯滤波方法在对波形进行滤波时自适应计算得到的滤波器标准差在噪声明显区域的标准差较大,而到有效信号区域标准差迅速减少,其中在有效信号区域,滤波器标准差 σ 最小的值达到了边界值 0.1 (远小于 1.5),在噪声区域滤波器 σ 最大值达到了边界值 15 (远大于 3.5),在滤除噪声的同时最大程度保留了有效信号,同时也说明若使用固定宽度滤波器对波形滤波以达到同样有效信号保留程度,则宽度 σ 需要设置为 0.1。

对滤波结果进行定量化比较分析如表 2 所示。对波形采用不同方法进行滤波后,文中滤波方法的滤波结果信噪比值最高,且波峰的保真性最高:在滤除零均值高斯白噪声后,认为波形波峰的幅值变化应该

表 1 GF-7 原始全波形背景噪声估计

Tab.1 Estimation of the background noise of GF-7 raw full waveform

Case	Truth-value /mV	Proposed method /mV	Typical method: mean intensity of sampling points (50, 100,150) at the end of the full waveform		
			50 mV	100 mV	150 mV
1	88.18	88.13	88.35	88.37	88.33
2	88.11	88.11	88.12	88.07	88.00
3	87.89	88.10	87.50	87.48	87.60
4	88.03	88.02	87.96	87.95	87.98
5	88.01	88.02	87.90	87.99	88.01
6	88.15	88.11	88.11	88.08	88.09
7	88.22	88.20	88.25	88.18	88.19
8	87.98	88.28	87.60	87.53	87.42

表 2 GF-7 星载激光测高仪全波形滤波结果评价

Tab.2 Evaluation of the full waveform filtering results of GF-7 satellite laser altimetry

	SNR	Variation (compared with 30.87) of peak value of waveform 1		Variation (compared with 27.87) of peak value of waveform 2		Noise STD of filtered waveform	Intensity STD of 100 points at the end of filtered waveform
		Variation	$\leq 3\sigma_{\text{Noise}}(2.364)$	Variation	$\leq 3\sigma_{\text{Noise}}(2.364)$		
Proposed method	19.87	2.23	Yes	1.83	Yes	0.221	0.192
Mean filtering	17.35	6.04	No	2.42	No	0.216	0.218
Fixed-width Gaussian filtering (3.5 ns)	18.5	4.79	No	1.8	Yes	0.223	0.193
Fixed-width Gaussian filtering (1.5 ns)	19.40	3.82	No	1.54	Yes	0.225	0.204

注: σ_{Noise} 为原始波形仅去除背景噪声后的剩余零均值高斯白噪声的标准差,值为 0.788; STD 为标准差

在噪声标准差的 3 倍以内,此波形存在两个波峰,文中方法滤波后波峰幅值变化均在预期范围之内,而用于比较的均值滤波方法、固定宽度的高斯滤波方法均存在过平滑的情形,造成波形有效信号的部分失真。

实验同时计算了滤波后的波形噪声标准差与波形后端 100 个离散点强度 (50 ns) 的标准差以检验不同滤波方法的抑制噪声性能:可以发现,相比其他滤波方法,基于文中滤波方法后波形的噪声标准差较小(仅次于均值滤波),波形后端 100 个波形点强度的标准差最小。同时将固定宽度为 3.5 ns 与固定宽度为

1.5 ns 的高斯滤波方法的波形滤波结果进行比较,也发现随着固定滤波宽度的减少,对波形的噪声抑制作用减弱,与理论相符。

(3) 非饱和平峰波形处理

对 GF-7 星载激光测高全波数据某一轨数据进行统计,516 个回波波形中有 198 个回波存在非饱和平峰。实验中选取了尖峰波形(正常波峰)进行波峰模拟置平,如图 8 所示,比较滤波后波峰的位置是否与其真实位置相符,并比较滤波波形高斯分解后的参数与真实波形高斯分解后的参数是否相符。

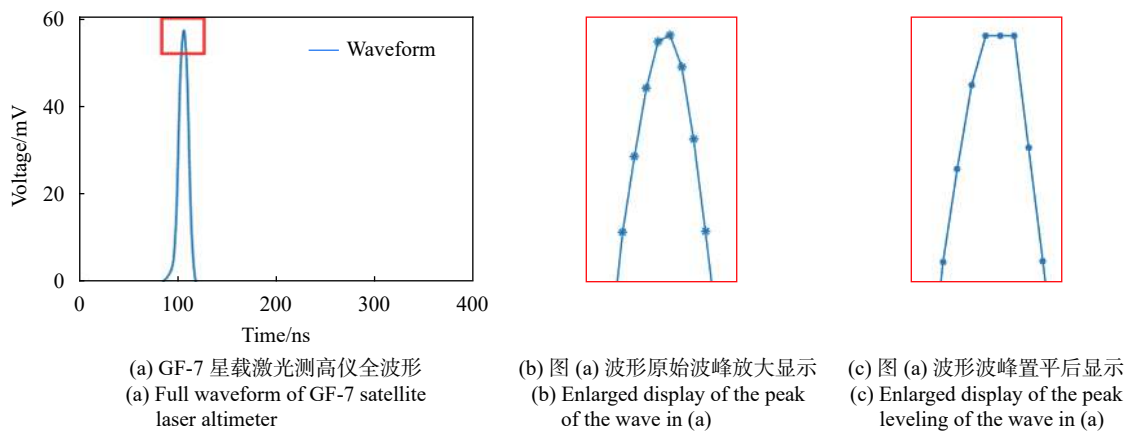


图 8 GF-7 星载激光测高原始波形(已去除背景噪声)波峰模拟置平,原始波形最大幅值为 58.33 mV,对波峰进行模拟置平后,幅值为 58.12 mV
Fig.8 Peak simulation leveling of raw full waveform (without background noise) of GF-7 satellite laser altimeter, and the maximum amplitude of raw waveform is 58.33 mV while the amplitude of the leveling peak is 58.12 mV

图 8(c) 所示为波峰模拟置平结构,原始波形波峰幅值为 58.33 mV,置平后,波峰处幅值为 58.12 mV,分别使用文中滤波方法、均值滤波、固定宽度为 3.5 ns 和 1.5 ns 的高斯滤波器对波峰置平的模拟波形进行滤波,并进行高斯分解,与真实波形及分解参数进行对比,结果如表 3 所示。可以发现对模拟的非饱和平峰波形进行滤波后,相比其他滤波方法,文中方法对非饱和平峰模拟波形进行滤波后,波形高斯分解后幅值、均值和均方根脉宽均与真值更加接近,这将有助于精确的星地距离计算及地形参数反演^[21]。

为更加充分验证文中方法的有效性,另选取 58 个真实波形进行波峰模拟置平,比较使用不同滤波方法后波形参数的精度,如表 4 所示,可发现基于文中方法进行波形滤波后的波形高斯分解精度(振幅、均值、脉宽)显著优于均值滤波与固定宽度(3.5 ns 和 1.5 ns)高斯滤波等方法滤波后的波形高斯分解精

度。基于文中方法滤波后再对波形进行高斯分解,Gaussian 分量振幅分解精度为 (0.69 ± 2.34) mV,均值分解精度为 (0.007 ± 0.024) ns,均方根脉宽分解精度为 (0.026 ± 0.069) ns。

表 3 非饱和平峰模拟全波形的滤波

Tab.3 Filtering of full waveform simulated with unsaturated flat peak

Filtering results	Peak location/ns	Peak value/mV	Gaussian filtering parameters		
			A_i /mV	μ_i /ns	σ_i /ns
Real waveform	106	58.33	59.069	106.103	4.80
Proposed method	106	57.55	57.650	106.099	4.89
Mean filter	106	54.95	54.735	106.16	5.19
Gauss(3.5 ns)	106	55.93	56.086	106.16	5.06
Gauss(1.5 ns)	106	56.59	57.104	106.139	4.96

表 4 非饱和平峰模拟全波形滤波后高斯分解精度评价

Tab.4 Precision evaluation of the Gaussian decomposition of full waveform with simulated unsaturated flat peak (filtered using different methods)

	Difference between Gaussian parameters with its corresponding truth-value					
	$ A_i - A_{i_true} $		$ \mu_i - \mu_{i_true} $		$ \sigma_i - \sigma_{i_true} $	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
Proposed method	0.69	0.78	0.007	0.008	0.026	0.023
Mean filter	4.37	3.35	0.038	0.027	0.348	0.114
Gauss (3.5 ns)	2.37	2.40	0.025	0.019	0.173	0.091
Gauss (1.5ns)	1.34	1.60	0.023	0.017	0.084	0.064

4 结 论

GF-7 星载激光测高仪全波形原始数据部分存在噪声严重、波峰左偏/右偏、非饱和平峰等情况,文中针对 GF-7 星载激光测高仪全波形数据提出了一种背景噪声自适应迭代去除方法,并设计了一种自适应高斯滤波方法:首先对波形噪声特点及波形几何结构进行分析,并做量化的描述,最终设计了一种顾及波形噪声与结构异构的自适应高斯滤波器,该滤波方法也适用于其他星载激光测高仪全波形噪声的滤除。将文中方法与均值滤波方法、固定宽度(3.5 ns 和 1.5 ns)高斯滤波方法进行实验对比分析,可以发现文中方法在噪声去除及有效信号保留上均优于对比方法。使用文中方法进行波形滤波后,波形信噪比值更高,同时波形幅值下降量均在三倍的噪声标准差以内。为了验证文中方法对 GF-7 星载激光测高仪非饱和平峰全波形数据滤波的有效性,实验对 58 个真实波形数据进行波峰模拟置平,使用不同滤波方法对模拟非饱和平峰波形进行滤波后,基于波形滤波结果进行了高斯分解,通过将波形高斯分解结果与真实波形高斯分解结果进行对比:基于文中方法进行波形滤波后的波形高斯分解精度(振幅、均值、脉宽)显著优于均值滤波、固定宽度(3.5 ns 和 1.5 ns)高斯滤波等方法滤波后的波形高斯分解精度,其中振幅分解精度为 (0.69 ± 2.34) mV, 均值分解精度为 (0.007 ± 0.024) ns, 均方根脉宽分解精度为 (0.026 ± 0.069) ns。

参考文献:

[1] Thomas N, Spohn T, Barriot J-P, et al. The BepiColombo Laser Altimeter (BELA): concept and baseline design [J]. *Planetary*

and Space Science, 2007, 55(10): 1398-1413.

[2] Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission [J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1-4): 209-241.

[3] Smith D E, Zuber M T, Frey H V, et al. Mars orbiter laser altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23689-23722.

[4] Abshire J B, Sun X, Riris H, et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: on - orbit measurement performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(L21S02): 1-4.

[5] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 1061-1072.

[6] Gardner C. Target signatures for laser altimeters: an analysis [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(3): 448-53.

[7] Tang Xinming, Li Guoyuan. Earth Observing Satellite Laser Altimeter Data Processing Method and Engineer Practice[M]. Beijing: Science Press, 2019.
唐新明, 李国元. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.

[8] Li Guoyuan, Tang Xinming. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12): 1939-1949. (in Chinese)
李国元, 唐新明. 资源三号02星激光测高精度分析与验证[J]. *测绘学报*, 2017, 46(12): 1939-1949.

[9] Bufton J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft[C]//Proceedings of the IEEE, F, 1989.

[10] Zhou H, Chen Y, Hyypää J, et al. An overview of the laser ranging method of space laser altimeter [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 86(2): 147-158.

[11] Sun X, Abshire J B, Borsa A A, et al. ICESAT/GLAS Altimetry

- Measurements: Received Signal Dynamic Range and Saturation Correction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017, 55(10): 5440-5454.
- [12] Brenner A C, Zwally H J, Bentley C R, et al. Derivation of Range and Range Distributions From Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights, Algorithm Theoretical Basis Document V5.0 [M]. US: NASA Goddard Space Flight Center, 2011: 125.
- [13] Wang C, Tang F, Li L, et al. Wavelet analysis for ICESat/GLAS waveform decomposition and its application in average tree height estimation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 10(1): 115-119.
- [14] Azadbakht M, Fraser C S, Zhang C, et al. A signal denoising method for full-waveform LiDAR data[C]//Proceedings of the ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Antalya, Turkey, F, 2013.
- [15] Zhao R, Li X, Sun P. An improved windowed Fourier transform filter algorithm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 74(12): 103-107.
- [16] Cai X, Liu J, Han Q, et al. Denoising to the pulsed laser radar return waves based on pulses accumulation and wavelet filter[C]//Proceedings of the Infrared, Millimeter-Wave, and Terahertz Technologies II, F, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [17] Zhou Hui. Laser footprints information inversion and positioning of satellite laser altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. 周辉. 星载激光测高仪激光脚点信息反演与定位[D]. 武汉: 武汉大学, 2007.
- [18] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, 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. (in Chinese) 马跃, 李松, 周辉, 等. 基于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.
- [19] Zhang Z, Liu X, Shu R, et al. A novel noise reduction method for space-borne full waveforms based on empirical mode decomposition [J]. *Optik*, 2020, 163581(12): 1-13.
- [20] 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.
- [21] Urban T J, Schutz B E, Neuenchwander A L. A survey of ICESat ccoastal altimetry applications: Continental coast, open ocean island, and inland river [J]. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2008, 19(2): 1-19.