

GLAS 全波形数据的高斯分解与高斯小波基分解对比分析

黄冬梅¹, 徐基衡¹, 宋巍¹, 王振华¹, 刘向锋^{2*}

¹上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 大光斑激光测高的全波形数据分解是获取待测物体有效信息的关键环节。目前,大光斑激光测高的全波形数据分解方法主要采用高斯分解和小波分解。但是,对于不同地物反射的回波信号,这两种方法的分解效果与精度不明确。针对地球科学激光测高系统(GLAS)全波形数据,利用高斯分解与高斯小波基分解对平坦和斜坡区域中几种典型地物的波形数据进行分解,并采用最佳拟合优度与达到最佳拟合优度拟合次数等指标进行定性、定量比较与分析。实验结果表明:在最佳拟合优度上,高斯分解和高斯小波基分解数值接近,但随着地物复杂程度增加,高斯分解达到最佳拟合优度拟合的次数少于高斯小波基分解。

关键词 遥感; 全波形激光测高; 波形分解; 全波形数据; 全波形数据; 高斯分解; 高斯小波基分解

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.112801

Comparison and Analysis of Gaussian Decomposition and Gaussian Wavelet Decomposition for GLAS Full Waveform Data

Huang Dongmei¹, Xu Jiheng¹, Song Wei¹, Wang Zhenhua¹, Liu Xiangfeng^{2*}

¹ College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

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

Abstract Full waveform data decomposition is critical to obtain the effective information of tested object from the large-spot laser altimetry data. Gaussian decomposition and wavelet decomposition are two universal methods to achieve the full waveform data decomposition in the large-spot laser altimetry currently. However, the decomposition effect and accuracy are ambiguity for different echo signals of ground objects. In this paper, the two methods are applied to the full waveform data of the Geoscience Laser Altimeter System (GLAS), and the waveforms of several typical ground objects in flat and slop areas are decomposed. The results are analyzed and compared qualitatively and quantitatively according to the index of goodness-of-fit and the iteration times of achieving the best goodness-of-fit. The results show that the Gaussian decomposition and Gaussian wavelet decomposition are nearly same for the accuracy of best goodness-of-fit. With the increase of the complexity of the ground objects, the iteration times of achieving the best goodness-of-fit with the Gaussian decomposition is less than that with the Gaussian wavelet decomposition.

Key words remote sensing; full waveform laser altimetry; waveform decomposition; full waveform data; Gaussian decomposition; Gaussian wavelet decomposition

OCIS codes 280.3640; 010.3640; 350.4010

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-05-19; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(41671431, 41501419)、上海市科委部分地方院校能力建设项目(15590501900, 17050501900)

* E-mail: xiangfeng_liu@163.com

1 引言

激光测高仪是一种主动遥感技术,通过记录激光脉冲从发射到接收被目标反射回来的光信号之间的飞行时间,并结合测高仪位置与激光指向角来获得激光足印的地理位置及属性特征,进而提供准确的地面高程及地表覆盖信息^[1]。传统离散回波记录系统对每次的回波仅在线记录多个离散回波且存储几个回波(如第一个或最后一个回波)^[2],而全波形激光测高系统以给定的采样间隔(如 1 ns)记录对发射激光脉冲及其与目标作用形成的后向散射能量随时间变化的整个回波信号^[3-5]。虽然传统激光测高系统可以实时确定并记录多个回波,但全波形激光测高系统记录了允许在后处理中(即波形分解)检测的每个回波,不仅能得到传统每个回波提供的目标三维点云和强度信息,还能获取根据每个回波物理量推导得到反射面额外的、更详细的特征信息(如信号幅度、回波宽度、后向散射截面等)^[5],因此对复杂几何物体具有较高的测量精度^[6]。搭载在 ICESat 上的地球科学激光测高系统(GLAS)是目前世界上唯一的星载大光斑激光雷达,其可以对冰原粗糙度和厚度、云和大气性质^[7-9]、地貌、植被高度、海洋地形和地表反射率等进行测量^[10]。

由于全波形激光测高系统受传感器参数和复杂的目标特性的影响^[11],不同的地物目标得到的回波信号之间差距很大,若多个高度的地物目标间距很近,则系统接收的回波信号为多个波形分量叠加的结果,并伴随着各种噪声的影响,因此,必须对回波数据进行有效分解和处理,才能将每个地物目标的回波从接收到的波形数据中一一分离。对全波形回波信号的处理是获取有效信息的关键,且处理方法和处理精度将影响后期数据的应用^[11]。对此,国内外科研工作者们提出了很多波形数据分析方法,如峰值检测法^[12]、波形分解法^[1,5]、反卷积法^[6,13]、相关法^[14]等。其中,高斯模型作为波形分量建模模型,通过调整其形状参数能有效地处理展宽或尖峰形态的波形分量。高斯模型已被广泛地应用于多种激光测高系统的波形处理与分析中。Persson 等^[15]将高斯分解法(加权高斯函数的和)用于小光斑全波形机载 LiDAR 系统 TopEye Mark II 波形数据的分析。Wagner 等^[5,12]从理论角度阐述了高斯分解法,并使用两种传统的脉冲检测法(重心法和一阶导数零交叉法)估计分量个数。Ma 等^[16]依据高斯分解法的理论,采用改进的 EM 脉冲检测算法和一阶导

数零交叉法得到回波脉冲的位置和宽度。Lin 等^[17]在高斯分解法的基础上,提出了严格高斯检测法,指出目标个数的错误估计对后续应用的影响不可恢复。Zhu 等^[18]在高斯分解法的基础上,提出了渐进波形分解法,并通过局部最大值确定一个高斯分量,将其从波形数据中分离出来,接着在上次分离剩下的波形数据中求最大值,确定下一个高斯分量,直到最大值小于给定的阈值为止。赖旭东等^[19]在高斯分解法的基础上,采用逐层剥离的策略。段乙好等^[20]提出一种用平面曲线离散点集拐点的快速查找算法检测波形数据中的拐点。赵泉华等^[21]为了实现可变数波形分解,提出了一种自动确定波形分解数的方法,并通过对不同区域 GLAS 波形数据进行分解完成定性和定量分析。另外,小波变换在时频两域都具有表征信号局部特征的能力和分辨率分析的特性,既具备短时傅里叶变换局部化的思想,又克服了窗口大小不随频率变化的缺点,具有自适应性^[22-23]。这些特点使小波变换在信号处理和分析化学等领域得到了广泛的应用,尤其是在非平稳信号、微弱信号、瞬态信号及奇异信号的检测中显示出独特的优越性^[24]。Shao 等^[25]和 Jiao 等^[26]的研究中证实小波变换可有效地从叠加波中检测出目标个数。邱赛等^[27]的研究表明 Symlets 小波基中 sym7 小波基更适用于大光斑激光雷达。段乙好等^[28]针对小光斑机载激光雷达全波形数据中叠加波难以解析和实测波形数据普遍存在的展宽或尖峰形态的问题,提出一种基于小波变换与广义高斯模型的组合法。

GLAS 激光器发射的是高斯脉冲信号,其接收的反射信号也可认为是由高斯分量组成,因此,采用高斯小波基作为小波分解的核函数。目前,对高斯分解和高斯小波基分解在不同地形和植被条件下回波信号的分解精度与效率等方面缺乏全面的了解。本文系统地对比并分析了高斯分解和高斯小波基分解对 GLAS 在平坦区域和斜坡区域的裸地、草地、林地、建筑物、梯田等几种典型地物的波形数据的分解情况,并采用最佳拟合优度、达到最佳拟合优度的拟合次数等指标进行定性、定量的比较与分析。

2 全波形回波数据的预处理

GLAS 全波形数据的分解是从回波数据中分离出目标地物的回波信号,提取特定的地物空间信息^[29]。由于全波形数据中记录了地物特征及地形起伏现象,因此回波波形中存在多个小波峰。另外,

在激光信号传播过程中受仪器、环境、目标等因素的影响,数据存在大量的噪声,GLAS 原始波形图如图 1 所示。

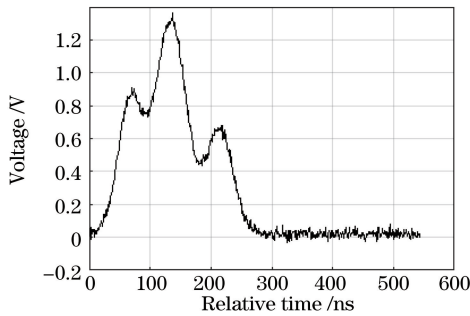


图 1 GLAS 原始波形图

Fig. 1 Diagram of GLAS original waveform

为了能从原始的全波形回波信号中准确分解出对应的波形分量,需要在波形分解前对波形进行正则化、滤波、去除背景噪声等预处理。全波形数据处理结果如图 2 所示。具体步骤为:

1) 基于波形正则化的不同回波波形归一化处理。在激光信号传播过程中,由于受到仪器和环境的影响,接收的回波能量会发生一定的变化。为在同一个标准下对接收到的不同回波能量进行整体比较与处理,可采用波形正则方法对全波形数据进行归一化处理。正则化处理的波形图如图 2(a) 所示。

2) 基于波形滤波的回波波形去噪处理。为了抑制原始波形噪声对波形数据的影响,同时在波形分解中有效确定相关初始参数,要对波形进行平滑

处理。激光测高系统发射的激光脉冲是高斯信号,且接收的全波形信号也由高斯分量组成,因此通常采用高斯滤波对回波信号中的噪声进行去噪处理,滤波化处理的波形图如图 2(b) 所示。

3) 基于噪声估计的去除回波波形背景噪声处理。由于仪器本身及大气反射、散射等因素的影响,波形中包含了一定噪声,即背景噪声,背景噪声的估计对提取地物的真实有效信号并准确确定波形中有效回波的起始、结束位置以及波形分析处理有一定的帮助^[29]。通常可以选取回波波形数据的前 N 帧,以平均值和标准差作为背景噪声的均值和标准差,进而确定背景噪声阈值。将波形中小于阈值的部分设为零,将大于阈值的波形数据减去阈值量作为新的电压值,组成有效的新波形数据,去除背景噪声的波形如图 2(c) 所示。其中,背景噪声阈值可表示为^[30]

$$m_N = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{N}, \quad (1)$$

$$S_N = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(V_i - m_N)^2}{N}}, \quad (2)$$

$$T_N = m_N + 4 \times S_N, \quad (3)$$

式中: m_N 为前 N 帧数据的平均值; N 为全波形数据的帧数; V_i 为第 i 时刻波形归一化后的电压值; S_N 为前 N 帧数据的标准差; T_N 为波形背景噪声阈值。GLAS 全波形数据信号由 544 帧数据组成,通常情况下会取前 150 帧数据计算背景噪声阈值。

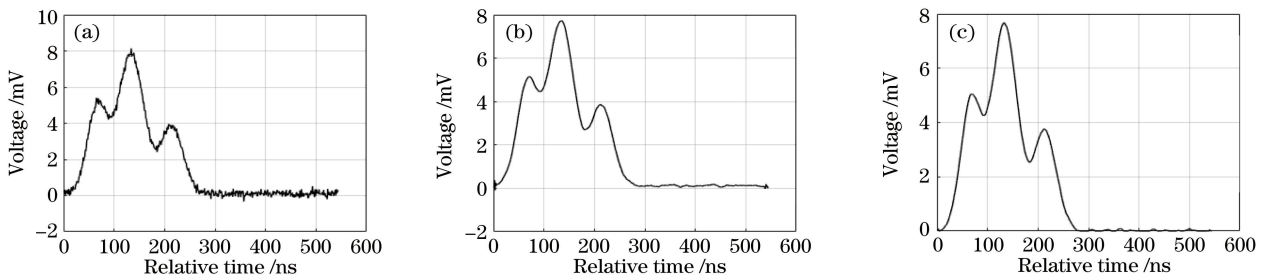


图 2 全波形数据处理结果。(a)正则化处理的波形图;(b)滤波化处理的波形图;(c)去除背景噪声的波形图

Fig. 2 Results of full waveform data processing. (a) Regularized waveform;

(b) filtered waveform; (c) waveform after removing background noise

3 高斯波形分解与高斯小波基波形分解

3.1 全波形回波数据的高斯分解

高斯分解是一个将原始回波信号拟合为多个高斯函数曲线叠加的过程^[29]。激光测高系统通常发射高斯分布的脉冲信号,通过复杂地物反射回来后的全波形回波信号是多个回波信号的叠加,可认为

是多个高斯信号的叠加。回波波形的高斯模型可表示为^[29]

$$W(t) = \varepsilon + \sum_{m=1}^{N_p} A_m \exp\left[-\frac{(t - t_m)^2}{2\sigma_m^2}\right], \quad (4)$$

式中: $W(t)$ 为在 t 时刻的波形的振幅; ε 为高斯波的偏差(噪声影响); N_p 为波形中峰值的个数; A_m 、 t_m 和 σ_m 分别为第 m 个回波的波形振幅、峰值位置和波形脉宽。

在 Gaussian 分解中采用奇偶拐点法确定波形分量, 这里处理的过程主要为:

1) 对波形数据求解二阶导数, 二阶导数为零的位置为拐点。

2) 根据拐点位置判定波形分量的峰值、峰值位置以及波形分量的脉宽, 波形分量的峰值是位于两个拐点之间的最大值, 相应地确定峰值位置, 波形分量脉宽取值取拐点离峰值位置最近的值。

3) 根据判定的波形分量数目, 通常 GLAS 数据最多能够识别 6 个波形分量, 当超过 6 个时, 按脉宽和面积大小原则进行合并, 直至波形分量数目少于或等于 6 个。Gaussian 分解的示意图如图 3 所示。

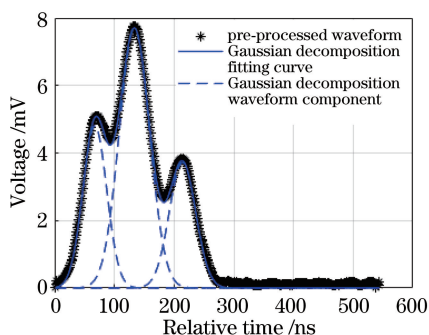


图 3 Gaussian 分解的示意图

Fig. 3 Schematic of Gaussian decomposition

3.2 全波形回波数据的高斯小波基分解

小波分解算法是通过小波分析将回波波形分解成多个小波函数, 从而进行特征参数的提取, 其基本

思想是从一个具有正则性、局部性和震荡性的基本小波函数出发, 经伸缩和平移得到的一个函数族, 该函数族可表示为^[31]

$$h_{a,b}(x) = |a|^{-\frac{1}{2}} h\left(\frac{x-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0, \quad (5)$$

式中: h 为基本小波函数; $h_{a,b}$ 为伸缩和平移后得到的函数族; a 、 b 分别为缩放比例和平移距离。

回波波形数据是激光光斑内不同目标反射信号叠加的过程, 不同目标会产生相应的回波信号, 由于不同目标的空间尺度(即大小)不一样, 回波信号可视为不同脉宽 σ 的高斯波形叠加的结果, 在研究过程中发现: 尺度过大(大于 10)无法体现大目标的特征尺度, 尺度过小(小于 2)无法体现微小目标的分布特征。为了使层次感更加清楚, 采取递增尺度为 GLAS 的全波形数据进行高斯小波基分解, 选择 5 个不同尺度, 分别为 2、4、6、8 和 10。不同尺度下的小波分析图如图 4 所示。小波基尺度的不同反映对回波信号刻画的程度不同, 尺度越大越能够对整个波形进行宏观展示, 尺度越小越能描述波形的细小特征。根据每个尺度不同的逼近强度得到峰值位置信息, 并利用标准差对得到的峰值信息进行筛选。当小波分析的过程中, 起始和结束位置的波峰强度差距很大时, 可以采用 1 倍标准差进行峰值信息筛选, 这样可以很好地保留 GLAS 全波形数据信息, 其他情况下采用 3 倍标准差进行峰值信息筛选, 这样可以剔除因噪声而产生的峰值信息^[32]。

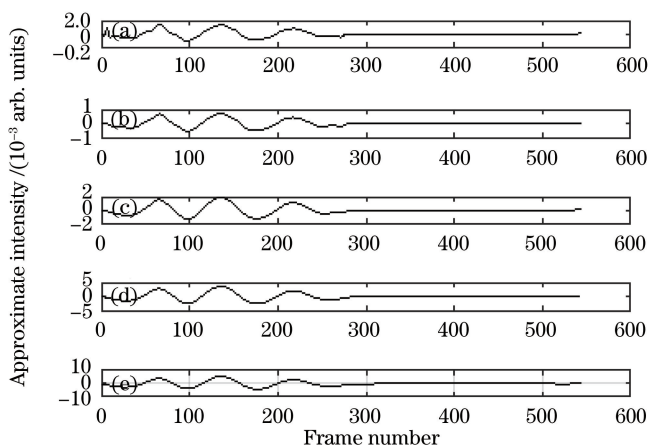


图 4 不同尺度下的小波分析图

Fig. 4 Wavelet analysis diagrams at different scales

3.3 两种分解的比较方法及度量指标

经过 Gaussian 滤波后的波形数据存在一定的展宽, 并且各个波形分量的波峰幅值有所减小, 对后面的

数据应用有所影响, 例如不利于高度信息的提取, 因此需要对分解出来的波形分量进行拟合优化^[29]。为了能够用最小化误差的平方和去寻找波形分量的

匹配参数,采用拟合优化方法为非线性最小二乘法,该方法当拟合结果与目标结果相差较大时,每次迭代的迭代系数变化将会增大,使其能够快速接近目标结果。该方法的步骤为^[33]:

1) 确定 GLAS 全波形数据回波波形的模型,其表达式如(4)式所示。

2) 给定分解出来的波形分量的参数值为

$$\mathbf{C} = [\epsilon \quad A_1 \quad t_1 \quad \sigma_1 \quad \cdots \quad A_m \quad t_m \quad \sigma_m], \quad (6)$$

式中: \mathbf{C} 为回波波形模型中各初始参数值构成的矩阵,矩阵内参数数量 M 为 $(3m+1)$ 个。

3) 确定预处理后的 GLAS 全波形回波波形数据以及帧数 N , 预处理后的全波形数据构成的矩阵为

$$\mathbf{O} = [o_1 \quad o_2 \quad \cdots \quad o_N]. \quad (7)$$

4) 根据分解所得的波形分量的参数值通过回波波形模型得到初始波形值。初始参数值根据回波波形模型得到初始波形值构成的矩阵为

$$\mathbf{W} = [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_N]. \quad (8)$$

5) 计算 GLAS 原始全波形回波波形数据与初始波形值得到残差。原始全波形回波波形数据与初始波形值得到的残差矩阵为

$$\mathbf{L} = \mathbf{O} - \mathbf{W} = [l_1 \quad l_2 \quad \cdots \quad l_N]. \quad (9)$$

6) 根据最小二乘原理得到分解所得的波形分量参数值的平差值为

$$\Delta x = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L}, \quad (10)$$

式中: Δx 为波形分量参数值的平差值;矩阵 \mathbf{A} 的表达式为

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial W_1}{\partial \epsilon} & \frac{\partial W_1}{\partial A_m} & \frac{\partial W_1}{\partial t_m} & \frac{\partial W_1}{\partial \sigma_m} \\ \frac{\partial W_2}{\partial \epsilon} & \frac{\partial W_2}{\partial A_m} & \frac{\partial W_2}{\partial t_m} & \frac{\partial W_2}{\partial \sigma_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial W_N}{\partial \epsilon} & \frac{\partial W_N}{\partial A_m} & \frac{\partial W_N}{\partial t_m} & \frac{\partial W_N}{\partial \sigma_m} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: $\partial \mathbf{W} / \partial \mathbf{C}$ 为根据模型得到的波形值对波形分量的参数值求偏导数。

7) 将(4)式在 \mathbf{C} 的参数值每一处按照泰勒级数展开(忽略二次及以上),可以近似得到

$$\mathbf{W}_n^{i+1} = \mathbf{W}_n^i + \sum_{m=1}^M \frac{\partial \mathbf{W}_n^i}{\partial \mathbf{C}_m} (\mathbf{C}_m^{i+1} - \mathbf{C}_m^i), \quad (12)$$

式中: \mathbf{W}_n^i 为第 n 帧数据第 i 次迭代的波形值。

8) 利用 $\mathbf{C}_n^{i+1} = \mathbf{C}_n^i + \Delta x$ 得到改正后的波形分

量的参数值。

9) 计算每次迭代后的拟合优度,即拟合值对观测值的拟合程度,其度量指标可采用可决系数 R^2 表示为

$$R^2 = 1 - \frac{S}{T}, \quad (13)$$

式中: T 为未解释变差; S 为已解释变差。 R^2 最大值为 1,值越接近 1 表明对观测值的拟合程度越好。 S 和 T 分别表示为

$$S = \sum_{i=1}^N (W_i - \bar{O})^2, \quad (14)$$

$$T = \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2, \quad (15)$$

式中: \bar{O} 为预处理后的全波形数据的平均值。每次迭代要满足以下条件:改正后的波形分量的参数值必须大于零。

10) 重复步骤 4)-9),直到满足给定迭代次数,选取最佳拟合优度。

为了比较高斯分解和高斯小波基分解的精度和效率,采用最佳拟合优度、达到最佳拟合优度的拟合次数进行对比,并观察拟合结束后每个波形分量的参数(波峰、波峰位置、波形分量脉宽)是否符合实际情况。

4 全波形回波数据的两种分解方法的比较与分析

4.1 典型地物的回波波形实验数据

为详细地比较与分析高斯分解和高斯小波基分解方法对不同地形和植被条件下回波信号的分解精度与效率,分别选取 GLAS 在平坦区域和斜坡区域的裸地、草地、林地、建筑物、梯田等几种典型地物的回波波形数据进行测试。几种典型地物的激光脚点分布情况与原始回波波形情况如图 5 和图 6 所示,这几种典型地物的激光脚点位置与原始回波波形的激光脚点位置用 GLA14 中地理坐标在 Google Earth 影像上表示(红色椭圆标示大致范围),原始回波波形是 GLA01 中接收的回波电压值按时间序列分布的。

不同地物反射回来的波形具有不同的特征,即使相同地物在平坦区域和斜坡区域反射回来的波形也存在一定差异。由图 5 和图 6 可见,裸地和草地的回波波形是单一波峰,回波林地和梯田的回波波形具有多个波峰,存在波形叠加;与平坦区域相比,斜坡区域回波波形的幅宽将变大。另外,地物复杂

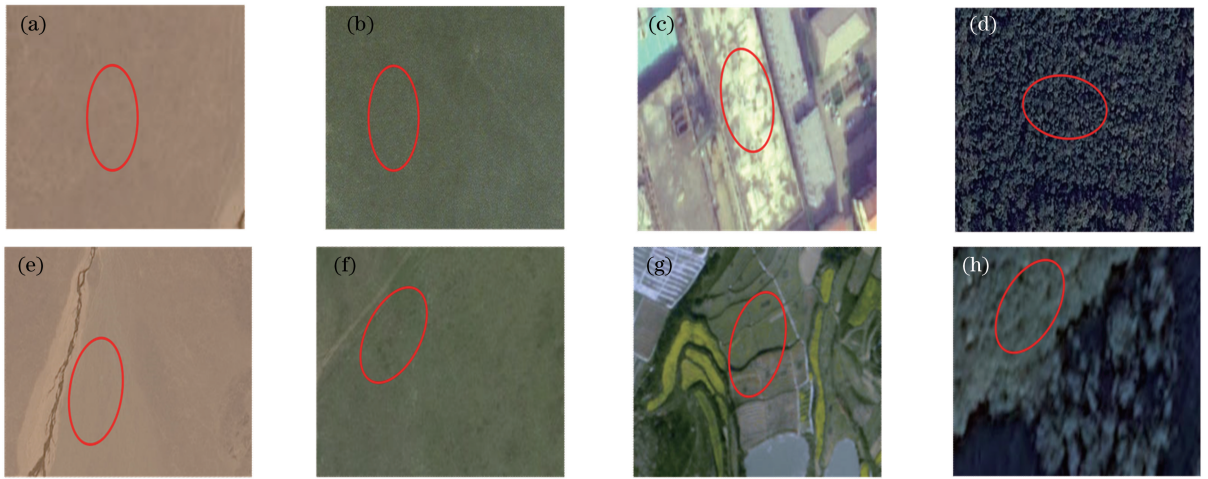


图5 几种典型地物的激光脚点分布情况。(a)平坦区域裸地;(b)平坦区域草地;(c)城镇区域建筑;(d)平坦区域林地;
(e)斜坡区域的裸地;(f)斜坡区域的草地;(g)丘陵区域梯田;(h)斜坡区域的林地

Fig. 5 Laser foot point distributions of several typical ground objects. (a) Barren of flat area; (b) grassland of flat area; (c) buildings of town area; (d) woodland of flat area; (e) barren of slope area; (f) grassland of slope area; (g) terraces of hilly area; (h) woodland of slope area

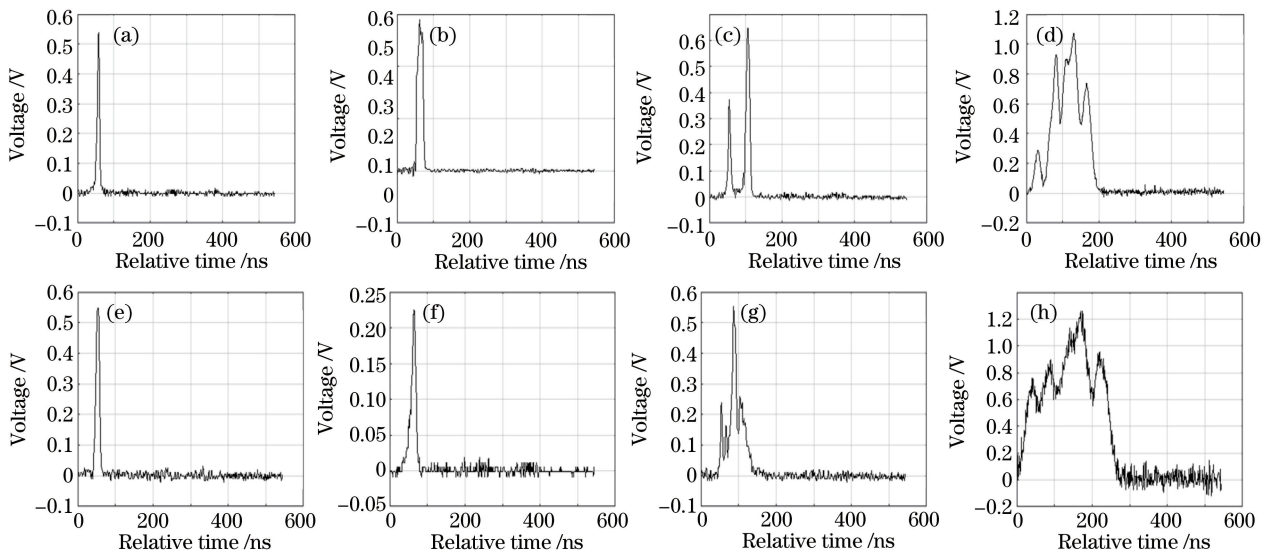


图6 几种典型地物的原始回波波形情况。(a)平坦区域裸地;(b)平坦区域草地;(c)城镇区域建筑;(d)平坦区域林地;
(e)斜坡区域的裸地;(f)斜坡区域的草地;(g)丘陵区域梯田;(h)斜坡区域的林地

Fig. 6 Original echo waveforms of several typical ground objects. (a) Barren of flat area; (b) grassland of flat area; (c) buildings of town area; (d) woodland of flat area; (e) barren of slope area; (f) grassland of slope area; (g) terraces of hilly area; (h) woodland of slope area

程度加大,所对应的全波形数据噪声也明显增加。

4.2 高斯分解与高斯小波基分解的结果与分析

实验中,首先对选取的典型地物的波形数据进行波形预处理,再分别采用高斯分解和高斯小波基分解对分解出来的波形分量用非线性最小二乘法进行拟合。几种典型地物的预处理后的波形情况及高斯分解和高斯小波基分解的波形分量拟合结果图如图7所示,黑色“*”表示预处理后的波形,蓝

色的实线与虚线分别表示高斯分解拟合曲线和高斯分解出来的波形分量,红色实线和虚线分别表示高斯小波基分解拟合曲线和高斯小波基分解的波形分量。

由图7可以看出,高斯分解和高斯小波基分解所得的波形分量以及拟合后的波形基本一致。不同地物下,高斯分解和高斯小波基分解所得结果的分析比较见表1~4。

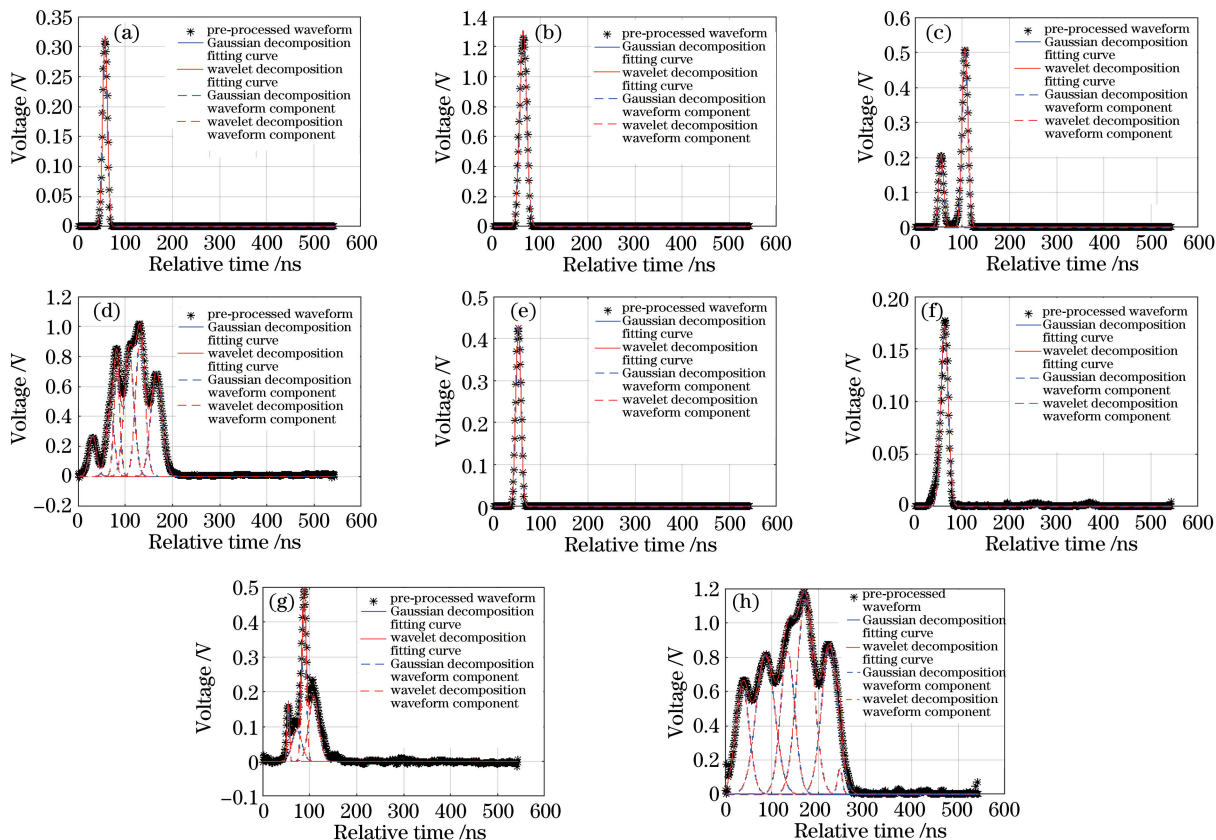


图 7 几种典型地物的预处理后波形情况及高斯分解和高斯小波基分解的波形分量拟合结果图。(a)平坦区域裸地;(b)平坦区域草地;(c)城镇区域建筑;(d)平坦区域林地;(e)斜坡区域的裸地;(f)斜坡区域的草地;(g)丘陵区域梯田;(h)斜坡区域的林地
 Fig. 7 Pre-processed waveforms of several typical ground objects and fitting results of waveform component of Gaussian decomposition and Gaussian wavelet decomposition. (a) Barren of flat area; (b) grassland of flat area; (c) buildings of town area; (d) woodland of flat area; (e) barren of slope area; (f) grassland of slope area; (g) terraces of hilly area; (h) woodland of slope area

表 1 高斯分解和高斯小波基分解对裸地数据的分析与比较

Table 1 Analysis and comparison of barren with Gaussian decomposition and Gaussian wavelet decomposition for the barren

Item	(a) Flat area		(e) Slope area	
	Gaussian	Gaussian wavelet	Gaussian	Gaussian wavelet
Best fit	0.9996	0.9996	0.9984	0.9984
Number of best fits	6	6	11	11
A_1	0.3179	0.3179	0.4305	0.4305
t_1	57.2468	57.2468	53.0020	53.0020
σ_1	5.0350	5.0350	5.5769	5.5769

表 2 高斯分解和高斯小波基分解对草地的分析与比较

Table 2 Analysis and comparison of grassland with Gaussian decomposition and Gaussian wavelet decomposition for grassland

Item	(b) Flat area		(f) Slope area	
	Gaussian	Gaussian wavelet	Gaussian	Gaussian wavelet
Best fit	0.9956	0.9956	0.9829	0.9829
Number of best fits	12	13	15	16
A_1	1.3081	1.3081	0.1722	0.1722
t_1	63.5842	63.5842	64.1403	64.1403
σ_1	7.3381	7.3381	7.7079	7.7079

由表 1~4 可以得出结论:平坦区域和斜坡区域的裸地、草地、城镇区域的建筑物、丘陵区域的梯田

以及平坦区域的林地,高斯分解和高斯小波基分解的最佳拟合优度一样,分解所得的波形分量参数值

基本一致;斜坡区域的林地的高斯分解比高斯小波基分解的最佳拟合优度高;平坦区域和斜坡区域的草地、林地以及丘陵区域的梯田,高斯分解达到最佳拟合优度的拟合次数均少于高斯小波基分解。造成这些结果的原因是在地物的特征相对简单、环境因素干扰相对小的情况下,高斯分解和高斯小波基分解都能达到良好的分解效果且两者分解的结果基本一致,可以互证两者分解的有效性。当地物受环境因素干扰相对较大时,高斯小波基分解因尺度限制

初始参数估计不如高斯分解的准确,另外高斯小波基分解抗噪性也低于高斯分解,造成最佳拟合优度没有高斯分解的高,达到最佳拟合优度的拟合次数也相对较多。另外,由表可见,斜坡区域的地物分解拟合后最佳拟合优度没有平坦区域的高,达到最佳拟合优度的拟合次数也比平坦区域的多。这是由于复杂地区自身起伏的特征性会导致反射回去的激光脉冲信号含有更多的噪声,对分解的效果产生了一定的影响。

表3 高斯分解和高斯小波基分解对建筑物和梯田的分析与比较

Table 3 Analysis and comparison of buildings and terraces with Gaussian decomposition and Gaussian wavelet decomposition for buildings and terraces

Item	(c) Buildings of town area		(g) Terraces of hilly area	
	Gaussian	Gaussian wavelet	Gaussian	Gaussian wavelet
Best fit	0.9981	0.9981	0.9920	0.9920
Number of best fits	7	7	23	27
A_1	0.2102	0.2102	0.1543	0.1544
t_1	55.5157	55.5157	54.7382	54.7377
σ_1	5.3176	5.3176	2.3166	2.3157
A_2	0.5109	0.5109	0.0887	0.0881
t_2	106.0804	106.0804	73.1692	73.1642
σ_2	6.1192	6.1192	10.2630	10.2476
A_3			0.4396	0.4397
t_3		88.2443	88.2433	
σ_3			4.5835	4.5835
A_4			0.1862	0.1862
t_4		108.9126	108.9099	
σ_4			10.5683	10.5702

表4 高斯分解和高斯小波基分解对林地的分析与比较

Table 4 Analysis and Comparison of woodland with Gaussian Decomposition and Gaussian Wavelet Decomposition for woodland

Item	(d) Flat area		(h) Slope area	
	Gaussian	Gaussian wavelet	Gaussian	Gaussian wavelet
Best fit	0.9936	0.9936	0.9627	0.9620
Number of best fits	13	15	18	26
A_1	0.2703	0.2704	0.6179	0.6175
t_1	31.1673	31.1663	37.2468	37.2567
σ_1	7.9296	7.9292	15.0350	15.0345
A_2	0.4386	0.4390	0.8081	0.8087
t_2	68.1117	68.1112	86.5842	86.5850
σ_2	8.5277	8.5280	20.3381	20.3371
A_3	0.6991	0.6996	0.8333	0.8335
t_3	82.4950	82.4948	134.0692	134.0696
σ_3	6.2467	6.2465	15.1450	15.1449
A_4	0.8217	0.8220	1.1265	1.1366
t_4	108.0550	108.0549	171.9490	171.9488
σ_4	10.4792	10.4800	18.1254	18.1256
A_5	0.9413	0.9410	0.8582	0.8588
t_5	131.9899	131.9901	224.5302	224.5348
σ_5	9.7386	9.7389	17.7649	17.7659
A_6	0.7040	0.7038	0.1492	0.1502
t_6	166.1897	166.1892	246.1238	246.1312
σ_6	11.8452	11.8447	5.1204	5.1219

5 结 论

针对高斯分解和高斯小波基分解方法处理不同地物反射的回波信号的分解效果与精度不明确的问题,分别采用高斯分解和高斯小波基分解,定性、定量地比较了8种典型地物的回波信号的分解效果。实验结果表明,高斯分解和高斯小波基分解在分解平坦区域的地物时最佳拟合优度相同,达到最佳拟合优度的拟合次数基本一样;而在噪声相对较大以及地形相对复杂的情况下,高斯分解分解复杂地物的回波信号处理结果比高斯小波基分解具有更高的最佳拟合优度,达到最佳拟合优度的拟合次数更少。讨论中,在小波分解中只选取高斯小波基作为核函数,但是小波分解中小波基不是唯一的,采取哪个基函数以及分解尺度的选择,都会产生不同的小波分解结果,在今后的研究中应尽量选择多种小波基作为核函数,并采用不同分解尺度对GLAS全波形数据进行小波分解,比较不同小波基在小波分解方法中的优劣。此外,由于这里只选取了8种典型地物进行分析比较,在后续的工作中,可以更加详细地对更多不同地物进行分析,从而能够较为全面地分析出在具体地物的回波信号分解处理中应选择哪种分解。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Lemmens M. Airborne lidar sensors [J]. GIM International, 2007, 21(2): 24-27.
- [3] Chauve A, Mallet C, Bretar F, *et al.* Processing full-waveform lidar data: modelling raw signals[C]// International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2007. Espoo, Finland, 2007: 102-107.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Jutzi B, Stilla U. Range determination with

waveform recording laser systems using a Wiener Filter[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 61(2): 95-107.

- [7] Shen J, Cao N W. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610003.
沈吉, 曹念文. 米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610003.
- [8] Song X Y, Cao N W, Yang S P. Influence factors on atmospheric aerosol optical property inversion in nanjing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 040101.
宋秀瑜, 曹念文, 杨思鹏. 探究影响南京地区大气气溶胶光学特性反演的因素[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 040101.
- [9] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics of boundary layer height in jing-jin-ji area based on lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010101.
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010101.
- [10] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, *et al.* Overview of the ICESat mission [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(21): L21S01.
- [11] Hovi A, Korhonen L, Vauhkonen J, *et al.* LiDAR waveform features for tree species classification and their sensitivity to tree- and acquisition related parameters [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 224-237.
- [12] Wagner W, Ullrich A, Melzer T, *et al.* From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35(B3): 201-206.
- [13] Zhou T, Popescu S C, Krause K, *et al.* Gold—a novel deconvolution algorithm with optimization for waveform LiDAR processing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 129: 131-150.
- [14] Roncat A, Wagner W, Melzer T, *et al.* Echo detection and localization in full-waveform airborne laser scanner data using the averaged square difference function estimator [J]. Photogrammetric Journal of Finland, 2008, 21(1): 62-75.
- [15] Persson Å, Söderman U, Töpel J, *et al.*

- Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data [C] // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, September 12-14, Enschede, Netherlands. [S. l. : s. n.], 2005, 36 (part 3): W19.
- [16] Ma H C, Li Q. Modified EM algorithm and its application to the decomposition of laser scanning waveform data [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 35-41.
- [17] Lin Y C, Mills J P, Smith-Voysey S. Rigorous pulse detection from full-waveform airborne laser scanning data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(5): 1303-1324.
- [18] Zhu J F, Zhang Z X, Hu X Y, *et al.* Analysis and application of LiDAR waveform data using a progressive waveform decomposition method [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 3812: 31-36.
- [19] Lai X D, Qin N N, Han X S, *et al.* Iterative decomposition method for small foot-print LiDAR waveform [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4): 319-324.
赖旭东, 秦楠楠, 韩晓爽, 等. 一种迭代的小光斑 LiDAR 波形分解方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4): 319-324.
- [20] Duan Y H, Zhang A W, Liu Z, *et al.* A Gaussian inflexion points matching method for Gaussian decomposition of airborne LiDAR waveform data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 102801.
段乙好, 张爱武, 刘诏, 等. 一种用于机载 LiDAR 波形数据高斯分解的高斯拐点匹配法 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102801.
- [21] Zhao Q H, Li H Y, Li Y. Gaussian mixture model with variable components for full waveform LiDAR data decomposition and RJMCMC algorithm [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(12): 1367-1377.
赵泉华, 李红莹, 李玉. 全波形 LiDAR 数据分解的可变量高斯混合模型及 RJMCMC 算法 [J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1367-1377.
- [22] Xu Y S, Weaver J B, Healy D M, *et al.* Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1994, 3(6): 747-758.
- [23] Lazaro J C, San Emeterio J L, Ramos A, *et al.* Influence of thresholding procedures in ultrasonic grain noise reduction using wavelets [J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8): 263-267.
- [24] 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.
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]. 光电与控制, 2011, 18(4): 26-29.
- [25] Shao X G, Cai W S, Sun P Y. Determination of the component number in overlapping multicomponent chromatogram using wavelet transform [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1998, 43(1/2): 147-155.
- [26] Jiao L, Gao S Y, Zhang F, *et al.* Quantification of components in overlapping peaks from capillary electrophoresis by using continuous wavelet transform method [J]. Talanta, 2008, 75(4): 1061-1067.
- [27] 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.
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.
- [28] Duan Y H, Zhang A W, Liu Z, *et al.* A combination method of wavelet transform and generalized Gaussian model for airborne laser scanning waveform decomposition [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122802.
段乙好, 张爱武, 刘诏, 等. 一种用于机载激光雷达波形分解的小波变换与广义高斯模型组合法 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122802.
- [29] Wang C, Xi X H, Luo S Z, *et al.* Satellite-borne laser radar data processing and application [M]. Beijing: Science Press, 2015: 45-55.
王成, 习晓环, 骆社周, 等. 星载激光雷达数据处理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 45-55.
- [30] Cui C L. Research of forest tree height extraction for the laser altimeter satellite full waveform data [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016: 16-17.
崔成玲. 激光测高卫星全波形数据的森林树高提取研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016: 16-17.
- [31] Parrish C E. Exploiting full-waveform lidar data and multiresolution wavelet analysis for vertical object detection and recognition [C] // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 23-28 July. Barcelona. New York:

IEEE, 2008: 2499-2502.

- [32] Tang F X, Li L W, Wang C. Method for waveform data decomposition of spaceborne laser radar based on wavelet analysis: CN101833087. B[P]. 2012.
唐福鑫, 李利伟, 王成. 基于小波分析的星载激光雷

达波形数据分解的方法: CN101833087. B[P]. 2012.

- [33] Marquardt D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431-441.