

# 基于波形匹配的高分七号星载激光测高仪山地区域 脚点定位方法研究

伍煜<sup>1</sup>, 王恒<sup>1</sup>, 韩启金<sup>2</sup>, 龙小祥<sup>2</sup>, 马跃<sup>1</sup>, 李庆鹏<sup>2</sup>, 赵朴凡<sup>1</sup>, 李松<sup>1\*</sup>

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072;

2. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

**摘要:**提出了一种基于波形匹配的激光脚点定位方法,该方法以机载激光雷达点云数据作为参考,通过对观测弧段内激光脚点的单点波形匹配和系列脚点相关系数联合处理的方式,精确计算激光指向和距离信息,实现了对高分七号卫星激光脚点在起伏山区的精确定位。使用美国犹他州山地区域的机载激光雷达点云作为当地实测现场数据,对基于论文方法高分七号星载激光测高仪的精确定位数据进行了实验验证。在平均坡度达到 $20^\circ$ 的犹他州实验区域,观测弧段内高分七号激光脚点高程精度从精确定位前的 $(2.45\pm 2.93)$  m 提升至 $(0.27\pm 0.61)$  m。试验结果表明,该方法可以有效提升高分七号星载激光测高仪观测成果在起伏山区的精度。

**关键词:**高分七号卫星;激光测高仪;激光指向;波形匹配;相关系数联合处理

中图分类号: TP733 文献标识码: A

## A waveform matching-based method of improving laser footprint geolocation for GaoFen-7 spaceborne laser altimeter in mountainous areas

WU Yu<sup>1</sup>, WANG Heng<sup>1</sup>, HAN Qi-Jin<sup>2</sup>, LONG Xiao-Xiang<sup>2</sup>, MA Yue<sup>1</sup>, LI Qing-Peng<sup>2</sup>,  
ZHAO Pu-Fan<sup>1</sup>, LI Song<sup>1\*</sup>

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This paper proposed a geolocation method for laser footprints based on the waveform matching. Specifically, for a single laser footprint, the simulated waveform based on airborne lidar point cloud data as prior measurements was matched with the captured waveform of the GaoFen-7 SLA. Within a laser track, the correlation coefficient of the matching results in successive footprints was calculated to further estimate the laser pointing and ranging information and re-geolocate the laser footprints in mountainous areas. A study area (the Utah State in USA) with local airborne lidar data was selected to verify the proposed method. With the mean surface slope of approximately  $20^\circ$ , the elevation accuracy of GaoFen-7's laser footprints were improved from  $(2.45\pm 2.93)$  m to  $(0.27\pm 0.61)$  m, which proved the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** GaoFen-7 satellite, spaceborne laser altimeter, pointing angle, waveform matching, correlation coefficient combined treatment

## 引言

星载激光测高仪(Spaceborne Laser Altimeter,

SLA)是一种主动卫星遥感测量设备,其获取的地表高程精度可达厘米至分米量级<sup>[1]</sup>,已被广泛地应用于地理测绘、水文监测、冰川监测和植被生物量监

收稿日期:2022-05-18,修回日期:2022-08-31

Received date:2022-05-18, Revised date:2022-08-31

基金项目:对地高分国家科技重大专项(11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A11-9001-17/18)

Foundation items: Supported by the National Science and Technology Major Project (11-Y20A12-9001-17/18, 42-Y20A11-9001-17/18)

作者简介(Biography):伍煜(1993-),男,江苏南京人,博士研究生,主要研究领域为星载激光测高仪标定。E-mail: wuyu\_nanking@whu.edu.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: ls@whu.edu.cn

测等领域。卫星激光脚点数据还可以作为高程控制点,为大比例尺无控立体测图提供重要保障。自2001年起美国与欧洲已经发射多颗对地观测星载激光测高仪,激光作为一种新型的对地观测手段在全球越来越被广泛的应用<sup>[2]</sup>。近年来,随着激光测高技术不断发展,我国于2019年相继发射了高分七号(GF-7)以及高分十四号(GF-14)卫星,它们均搭载了具备全波形记录功能的激光测高仪<sup>[3]</sup>。未来陆地生态系统碳卫星等搭载星载激光测高仪的卫星也将陆续发射,与GF-7/GF-14号卫星一起构建我国对地激光观测网络<sup>[4]</sup>。

GF-7号卫星的星载激光测高仪共搭载4台激光器,其中两台主激光器(分别为波束一和波束二)默认开机,另外两台为备用激光器<sup>[5]</sup>。此外,GF-7号星载激光测高系统还搭载了两台足印相机(Laser Footprint Camera, LFC)和一台光轴监视相机(Laser Optical Axis Surveillance Camera, LOASC),足印相机在激光器出光时刻对地面进行同步曝光,光轴监视相机用于在星上监测两个波束激光光轴变化。通常情况下,两个波束以3 Hz的频率工作,沿轨方向前后两个激光脚点间隔2.4 km,两个波束夹角为 $1.4^\circ$ ,垂轨方向两个波束间距约为12.25 km。GF-7号星载激光测高仪工作模式如下图1所示<sup>[6]</sup>:

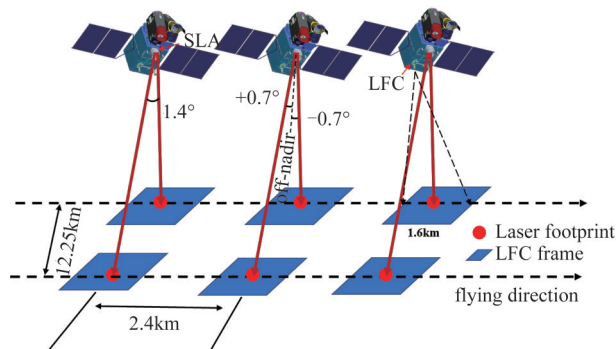


图1 GF-7号卫星星载激光测高仪对地观测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GF-7 satellite laser altimeter for Earth observation

星载激光测高仪的核心数据产品激光脚点的三维坐标,保障脚点坐标精度是测高仪测量的数据产品进行广泛科学应用的基础<sup>[7]</sup>。为此,中国资源卫星应用中心在2020年夏季开展了对GF-7号星载激光测高仪的首次在轨标定作业,通过布设地面探测器的方式获取激光脚点地面真值,代入在轨标定几何模型中,解算激光指向角和测距改正值。经过标定后,星载激光测高仪在内蒙古苏尼特地区高程

精度优于0.15 m,平面精度优于5.0 m<sup>[8]</sup>。目前基于探测器的标定作业每年开展一次。由于激光载荷的指向随时间所发生的变化,以及测距精度受到地形影响,测高仪的系统误差并非稳定不变的。在远离标定轨的境外山地地区,这一现象将体现得更为明显<sup>[9]</sup>。

波形匹配可用于获取地面脚点位置,其基本原理将脚点附近区域地表不同位置的仿真计算激光回波波形与星载激光测高仪实测波形对比,寻找与实测波形最相似的仿真波形,并将最接近的仿真波形所对应的中心点坐标当作激光脚点的“真值”。有三个方面的因素会直接影响基于波形匹配确定的脚点定位精度,分别是波形仿真器精度、波形匹配准则和地表的地形特征,除此之外,脚点的尺寸也会对匹配效果产生一定的影响。

2018年,张文豪等人设计了一种精细的波形仿真器,以相关系数为约束,并使用GLAS星载激光测高仪数据进行了单个光斑波形匹配实验<sup>[10]</sup>。GLAS系统70 m的光斑尺寸覆盖于地表特征明显的高山地区时,取得了良好的匹配效果,基于单个光斑的波形匹配达到了2 m的平面定位精度;2021年李国元等人针对GF-7号星载激光测高仪采用地形与波形相结合的方式对脚点进行定位,实现了平坦区域0.3 m的高程精度和11.6 m的水平精度<sup>[11]</sup>。

由波形匹配结果确定地面脚点位置的效果很大程度上依赖于地形特征<sup>[12]</sup>。当光斑覆盖范围内的地形特征丰富时,采用相关系数就可以取得比较好的匹配效果,但是这种情况其实并不普遍。高分七号卫星地面光斑直径为21.5 m左右,仅为GLAS系统的1/3,相对而言匹配的难度更大。为了解决这一问题,提高算法的可用性和稳定性,本文提出了单点匹配、多脚点联合处理的方式降低波形匹配对地形要求,能够充分利用不同地形对激光脚点不同方向上的定位能力的差异,获取准确的地面激光脚点坐标、提升激光数据的定位精度。

## 1 基本原理与处理流程

### 1.1 研究区域和数据情况

GF-7号星载激光测高仪的两个波束具有相同的工作方式,受篇幅限制,本文所有的研究内容均以波束一为例。实验和验证区域分别选用了美国犹他州南部和怀俄明州山地地区,高程范围在1 300~3 500 m之间,平均坡度为 $20^\circ$ ,属于山地地形。GF-7号卫星7209号和7279号轨道分别于

2021年2月19日和2021年2月22日过顶该区域,星下点轨迹如图2所示。研究区域的地表先验数据是由机载激光雷达点云生成的0.5 m分辨率的高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM), DEM使用经典克里金插值算法生成<sup>[13]</sup>,用于生成DEM的机载激光雷达点云来自美国地质调查局(The United States Geological Survey, USGS)。点云高程精度优于0.1 m,平面精度为0.06 m,点云密度为8 pts/m<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。机载激光雷达工作波长为1 064 nm,与GF-7号星载激光测高仪工作波长一致,因此本文中使用的机载激光雷达点云的强度信息作为地表目标在卫星工作波段的相对反射率。

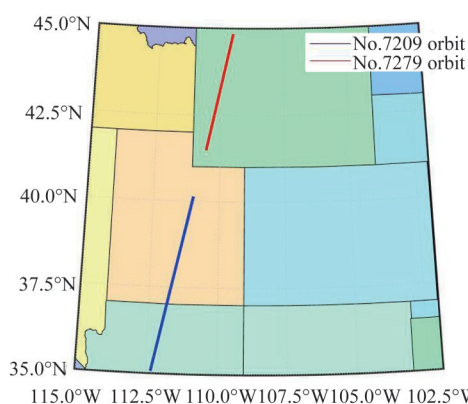


图2 实验用美国高分七号卫星过境区域与激光脚点轨迹  
Fig. 2 Study area in USA and the laser track of GF-7 spaceborne laser altimeter

本文中所使用各类数据及参数如表1所示。需要注意的是卫星的位置、发射激光能量空间分布、发射波形与接收波形信息数据,均为星上各测量系统的实测值,其他参数为卫星及载荷的设计参数<sup>[15]</sup>。

在实际处理过程中,如果直接使用整个实验区域内的DEM进行波形匹配,将会导致算法效率严重下降,为了减小波形匹配的搜索范围、降低计算量,本文使用了唐新明等人提出的基于金字塔搜索的地形匹配算法<sup>[16]</sup>初步确定激光脚点的大致范围,使用该方法后,波形匹配搜索区域降低至150 m×150 m。

## 1.2 波形匹配基本原理

波形匹配方法主要包含波形仿真和匹配准则两个过程,其中基于张文豪等的研究,波形仿真过程简化了大气传输链路(不考虑折射、前向散射、湍流效应)。模拟星载激光测高仪的发射脉冲激光经

表1 美国机载激光雷达点云与GF-7号星载激光测高仪参数表

Table 1 Statistics of airborne lidar point cloud data in USA and parameters of GF-7 spaceborne laser altimeter

参数类型	参数名称	参数指标
美国机载激光雷达点云参数	点云密度	8 pts/m <sup>2</sup>
	高程精度	0.1 m
	平面精度	0.06 m
	工作波长	1 064 nm 波段
GF-7号星载激光测高仪参数	轨道高度	505.984 km
	激光地面脚点直径	~21.2 m@2σ
	发射激光空间能量分布	实测
	激光发射和接收波形	实测
	卫星位置	实测

过衍射后达到地面,并被地物目标反射,反射激光再次经过衍射后被卫星接收系统接收全过程<sup>[17]</sup>。激光脉冲达到地面的能量 $S_1(t)$ 如下式所示:

$$S_1(t) = \frac{\eta_1 T_a}{d} \int |a(x,y)|^2 |f(t-\psi)|^2 dx dy, \quad (1)$$

其中 $d$ 是星载激光测高仪与地面目标的距离, $\eta_1$ 为发射系统效率, $(x,y)$ 是地表平面坐标, $|a(x,y)|^2$ 是发射激光空间能量分布, $T_a$ 是单程大气透过率。 $f(t)$ 是入射激光脉冲的时间分布, $\psi(x,y)$ 是由地表起伏和激光脚点水平分布引起的时延,可以表示为:

$$\psi(x,y) = \frac{2d}{c} + \frac{x^2 + y^2}{cd} - \frac{2\xi(x,y)}{c}, \quad (2)$$

其中 $\xi(x,y)$ 是 $(x,y)$ 处的地表高程, $c$ 是真空中光速。地表反射激光脉冲再次经过大气衍射到达星载激光测高仪接收系统后的接收信号 $S_2(t)$ 可以用下式表示:

$$S_2(t) = \frac{\eta_2 A_R T_a}{d} g(x,y) \cdot S_1(t), \quad (3)$$

其中 $\eta_2$ 为接收系统效率, $g(x,y)$ 是地面目标在1064 nm波段相对反射率分布函数, $A_R$ 是接收系统有效孔径面积。激光回波信号经过雪崩光电二极管管(Avalanche Photodiode Detectors, APD)后,激光回波信号 $S(t)$ 可以用下式表示:

$$S(t) = \frac{\eta A_R T_a^2}{h \nu d^2} \int g(x,y) \cdot |a(x,y)|^2 \cdot |f(t-\psi)|^2 dx dy, \quad (4)$$

式中, $h\nu$ 是光子能量, $\eta$ 是收发系统的综合效率,包含了星载激光测高仪收发系统效率、APD光电转换效率, $\eta$ 可以用下式表示:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot G \cdot e \cdot R_L, \quad (5)$$



其中 $\eta_3$ 为APD量子转换效率, $G$ 为APD增益系数, $e$ 为电子电量, $R_L$ 为电路负载。

以GF-7号星载激光测高仪各项硬件参数为例,入射激光脉冲的时间波形分布 $f(t)$ 采用实测发射激光波形,入射激光的空间截面能量分布 $I_a(x, y)$ 采用星上光轴监视相机中实测的光斑能量分布,通过光斑地面直径等比换算成到达地表的光斑能量分布。收发系统的综合效率 $\eta$ 各类参数和接收系统有效孔径面积 $A_r$ 均采用星载激光测高仪设计值,晴天时的单程大气透过率 $T_a$ 通常设置为0.7,测高系统与目标之间的距离 $d$ 为505.984 km,地面目标反射率分布函数 $g(x, y)$ 和地表高程轮廓 $\xi(x, y)$ 由当地DEM提供。仿真采用参数无法与实际参数完全一致,导致实测波形与仿真波形强度不匹配,为了方便比较实测波形与仿真波形的特征,本节中各波形采用归一化的方式。

以相关系数作为仿真波形与实测波形相似程度的判据,相关系数越大,表明仿真波形与实测波形越相似,该位置是激光脚点实际落点的概率也越高<sup>[18]</sup>。相关系数方式计算如下所示<sup>[19]</sup>:

$$\rho = \frac{\text{Cov}(S'(t), R'(t))}{\sigma_{S'(t)} \sigma_{R'(t)}} \quad (6)$$

其中, $R'(t)$ 为归一化实测波形, $S'(t)$ 为归一化仿真波形, $\sigma$ 为对应统计标准差, $\rho$ 为两个波形的相关系数。 $S'(t)$ 的长度需与 $R'(t)$ 相同,取400 ns长度。

### 1.3 激光脚点处理流程

在山地区域不同平面位置的高程差异很大,脚点高程精度直接受其平面位置的影响。例如在30°的斜坡上,1 m的平面误差就会引起0.57 m的高程误差。在山地或丘陵地带,由于缺乏捕获地面脚点的手段,激光脚点的平面精度较差,直接影响脚点

高程精度,所以需要波形匹配的方式来获取地面脚点的真实位置,以提升脚点高程精度。GF-7号星载激光测高仪的激光回波波形反应了地面光斑内不同地物的高程差异、地表坡度、反射特性等特征<sup>[20]</sup>。波形匹配的基本原理是利用地表高分辨率DEM与星载激光测高系统参数,对激光脚点处于不同位置时的激光回波波形进行仿真,通过将这一系列仿真波形与卫星实测的激光回波进行对比,寻找与实测波形最相似的仿真波形,从而确定激光脚点的实际位置。本文将短弧段内连续多个光斑的波形匹配结果进行叠加,得到这些激光脚点在平面上的系统偏移最终确定最佳匹配脚点坐标。将最佳匹配脚点坐标带入在轨标定模型和脚点定位模型最终求解得到高精度的激光脚点坐标。通过波形匹配方法提升脚点高程精度的具体流程如下图2所示:

如图3所示,生成以激光脚点初始平面位置为中心, $n$ 行 $n$ 列的DEM(论文使用 $n=300$ ,DEM边长150 m,格网间距0.5 m)。仿真中激光脚点直径设置为21.5 m,波形匹配遍历范围为128 m×128 m区域。每条轨道中有效激光脚点总个数为 $m$ , $(i, j)$ 表示激光脚点(激光脚点中心)在平面上相对于初始激光脚点(初始激光脚点由粗标定得到)的偏移量, $i$ 对应 $x$ 方向, $j$ 对应 $y$ 方向,初始激光脚点位置为(0, 0)。 $i$ 和 $j$ 的取值范围为 $[-128, 128]$ , $i$ 和 $j$ 计算初值均从-128开始。 $S^k(i, j)$ 表示第 $k$ 个激光光斑( $k=1, 2, \dots, m$ )的中心坐标平面偏移 $(i, j)$ 时对应的激光回波仿真结果。 $M^k(i, j)$ 则表示第 $k$ 个激光光斑在偏移为 $(i, j)$ 时的仿真激光回波 $S^k(i, j)$ 与对应的第 $k$ 个光斑的实测激光回波(记为 $R^k$ )之间的相关系数。 $M_k$ 为第 $k$ 个激光脚点的相关系数矩阵。将所有 $m$ 个激光脚点的相关系数矩阵叠加后得到联合相关系

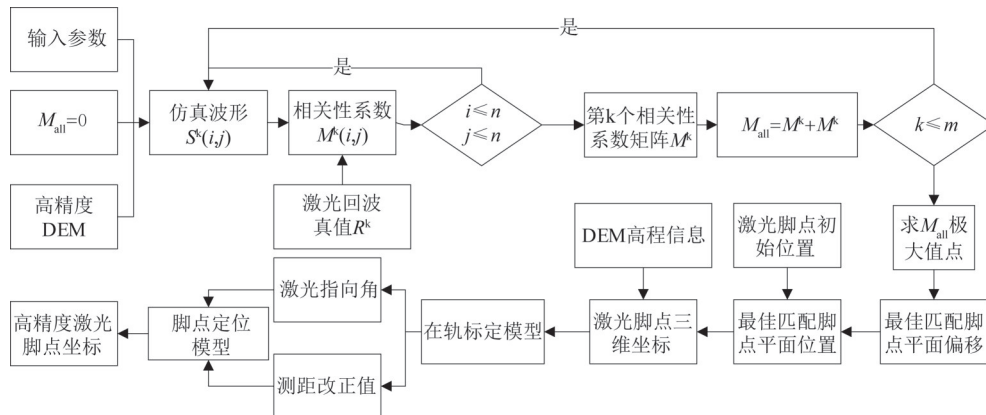


图3 波形匹配方法提升激光脚点高程精度流程图

Fig. 3 Flowchart of improving laser footprints elevation accuracy by waveform matching method

数  $M_{\text{all}} = \sum_{1 \leq k \leq m} M_k$ , 并将  $M_{\text{all}}$  最大值点处的与  $(0,0)$  点平面偏移作为这一弧段数据的平面系统偏移。具体流程为:

(1) 根据卫星和激光载荷的实测数据、系数参数、激光脚点初始平面位置附近的高精度 DEM 获取不同位置的仿真回波波形  $S^k(i,j)$ ; (2) 不同位置仿真回波波形  $S^k(i,j)$  与激光载荷实测回波波形计算相关系数  $M^k(i,j)$ ; (3) 重复 1~2 步, 直到完全遍历第  $k$  个激光脚点对应的  $n \times n$  格网 DEM 中所有网格节, 得到当前激光脚点的相关系数矩阵  $M^k$ ; (4) 重复 1~3 步, 直到完全遍历当前轨道所有  $m$  个激光有效脚点, 得到最终相关系数矩阵和  $M_{\text{all}}$ ; (5) 求解  $M_{\text{all}}$  中极大值网格点的水平位置, 获取最大值位置与激光脚点初始位置的水平偏移。该偏移为最佳匹配激光脚点水平位置与激光脚点初始位置的系统偏移, 结合  $m$  个激光脚点初始位置, 最终得到  $m$  个最佳波形匹配激光脚点的水平位置; (6) 从高精度 DEM 中依次获取平面校正后  $m$  个激光脚点水平位置处的高程结果, 作为每个激光脚点波形匹配后的高程坐标, 最终得到  $m$  个激光脚点的三维坐标; (7) 将激光脚点三维坐标带入已有的在轨标定模型, 解算星载激光测高仪激光指向角与测距改正值。该步骤中带入在轨标定模型中的激光脚点三维坐标的数量一般不少于 15 个, 以获得比较准确的测距改正值; (8) 将步骤 7 中的激光指向角与测距改正值带入已有的脚点定位模型中, 重新计算该激光脚点坐标。

本方法不仅可以改正上述  $m$  个激光脚点的三维坐标, 也可以用于整轨所有激光脚点坐标的计算。由于计算过程涉及到对激光指向和测距误差的计算和改正, 因此计算结果可用于对激光载荷的在轨标定。

## 2 激光脚点精度提升效果验证

### 2.1 激光脚点单点匹配结果

以美国犹他州南部山地作为实验区域, 该区域山地以裸露山地为主, 地表仅覆盖高 1 m 左右的灌木, 对激光回波影响的相对较小。在过境的 556 号~596 号合计 41 个激光脚点中, 超过 70% 的脚点落在坡度超过  $20^\circ$  的坡地上, 且坡面朝向各异。实验区域内包含坡地、河谷、悬崖、山脊各种地形, 地表光斑内地物高程差异特征明显, 地表反射率相对一致, 实测激光回波出现了多回波的特征, 是波形匹配方法理想使用场景。

采用 1.3 节图 3 的技术流程, 依次得到 556~596 号激光点在不同位置的仿真波形, 并计算其与实测回波的相关系数。下面以 576 号激光脚点举例分析。其所在区域附近的真实 DEM、归一化实测回波、仿真波形和相关系数等高线图如图 4 所示。图 4(a) 中 576 号脚点附近为一处山脚, 山坡与地面之间存在一个明显的高程分界区域, A、B、C 三个椭圆形红色区域即为三个仿真波形对应激光光斑的覆盖区域, 黑色十字位置为激光脚点初始激光脚点的平面位置记为  $(0,0)$  点; 图 4(b) 中蓝色实线为归一化实测波形, 红色虚线为 A 点仿真波形, 黄色点线为 B 点仿真波形, 紫色点划线为 C 点仿真波形。图 4(b) 中不难看出, A 点落在地面与山坡边缘, 回波中有两个明显高程分量; B 点落在东侧山坡上, 波形展宽很大, 有两个明显峰值, 说明 B 点坡度较大, 地形陡峭; C 点落在西侧地面上, 左侧较小回波为地面树木回波, 波形总体能量集中展宽较小。

在局部放大图中, 可以看出 A 点仿真与实测波形相似度很高, 从时间轴上来看, A 点仿真波形对地面与山坡两个不同的高程差地物有着准确的反应; 从能量上来看, A 点仿真波形两个地物的能量峰值比例与实测波形一致, 说明光斑覆盖两个不同地物的面积比例关系正确。从波形展宽上来看, A 点仿真波形半高全宽与实测波形一直, 说明光斑内地形坡度接近。经过计算, A 点位置的仿真波形与实测波形的相关系数超过 98%, A 点很有可能是激光实际落点位置。

576 号脚点所在区域, 高程变化明显, 通过单个激光脚点的波形仿真计算相关系数方式, 可以大致判断脚点最可能的落点区域。576 号脚点所对应的相关系数等高线图如图 4(c) 所示, 为了方便观察, 相关系数等高线图仅取  $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$  范围。图 4(c) 中可以看出, 仅采用一个激光脚点通过波形匹配的方式计算相关系数, 其等高线图存在大面积的极值区域, 没有唯一解, 无法判断光斑的实际落点平面位置。仅针对 576 号脚点所在区域, 只能基本判定真实光斑落在了山坡和地面交界处。脚点所在位置地形分布直接影响了其极值区域的分布样式, 图 4(c) 中可以看出山坡沿南北分布, 故相关系数在南北方向变化较小, 但在东西方向变化很大, 两者关联程度很高。GF-7 号星载激光测高仪地面光斑尺寸较小, 尽管仿真波形已经与实测波形十分相似, 但是仍然无法确定脚点的最佳匹配位置。

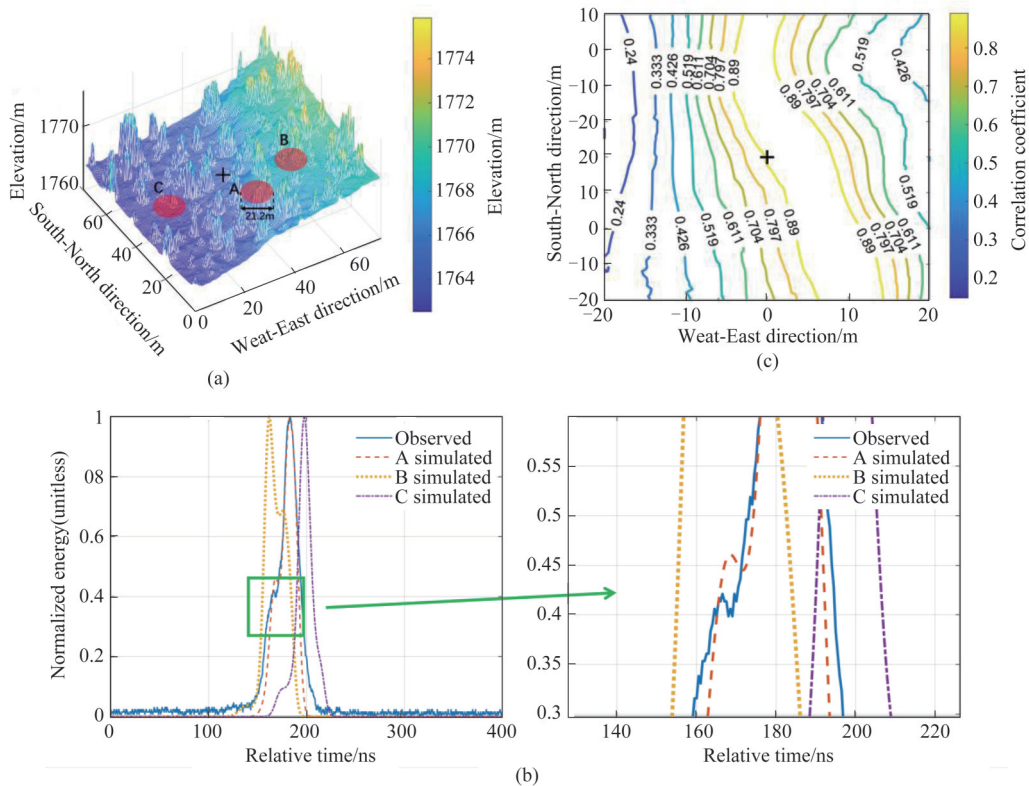


图4 研究区域中576号激光脚点样例 (a) 576号激光脚点附近的DEM, (b) 不同位置的归一化仿真波形与实测波形, (c) 576号脚点仿真波形与实测波形匹配后相关系数等高线图

Fig. 4 Sample of GF-7 No. 576 laser footprint in the study area (a) Local DEM near No.576 laser footprint, (b) normalized simulated waveforms and observed waveform of No.576 laser footprint at different positions, (c) correlation coefficient contour of No.576 laser footprint after the simulated and observed waveform matching.

## 2.2 激光脚点联合处理结果

为了解决小光斑条件下单点匹配区分度不高的问题,论文采用了对多个单点匹配结果联合解算的方式,充分利用不同地形在不同方向上的区分度,以找到最佳匹配位置。在南北方向高程差异明显的地区,其相关系数等高线图在南北方向区分度高。典型样式的相关系数等高线图如图5(a-c)所示,典型样式主要有斜向、纵向和横向三种,不同极值区域分布方向表示了采用相关系数评价方式在不同方向上的区分能力。由于GF-7号星载激光测高仪地面光斑直径较小,光斑内不同高程的地物数量有限,通常很难找到一个表面高程轮廓变化完美的地形,仅通过单个脚点匹配方式获取脚点水平真值的难度较大;从图中也可以看出虽然每一幅相关系数等高线图的极值区域不同,但是极值区域均覆盖右下区域。图5(d)为上述相关系数叠加结果,可以发现用少量特征明显的地形处的脚点相关系数矩阵进行叠加,就可以获得明显的极值区域,从而获得脚点最佳匹配位置。

一般而言在山地区域由于地表特征明显,通过足够数量的相关系数矩阵 $M^i$ 叠加,可以获得极值区域明显的联合相关系数矩阵 $M_{all}$ 的等高线图。 $M_{all}$ 中相关系数的最大位置,即为激光脚点坐标平面系统偏移的最佳匹配结果。将犹他州山地区域41个激光脚点联合相关系数矩阵叠加后如图6所示结果。

图6中相关系数分布网格分辨率为0.5 m,与DEM分辨率一致,网格中心黑色十字为激光脚点初始位置。将41个地面光斑相关系数累加后绘制等高线图的图像样式与图5(d)类似,等高线图中出现了明显的极值区域,且极值区域呈明显的单极点特征,相关系数之和的最大点即为极值区域中心点,图中用红色五角星标注。极值中心点对应41个激光脚点相关系数和为38.97,平均每个脚点的相关系数超过95%。

GF-7号星载激光测高仪激光器重频为3 Hz,41个激光点时间相隔仅为14 s,可以认为该弧段内41个激光脉冲的激光指向不变(对应相同的系统误差,但每次激光脉冲存在微小的随机误差)。因此,



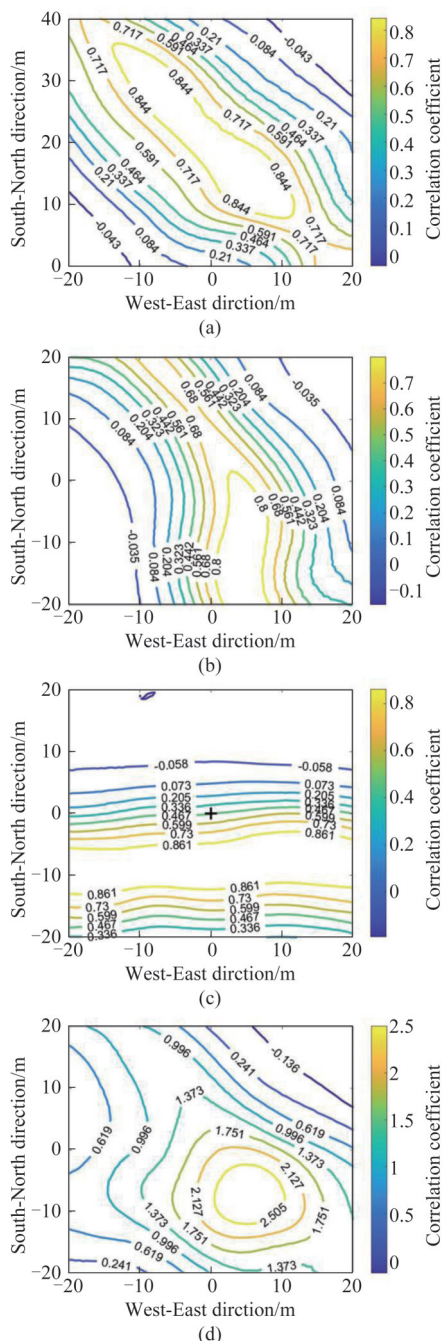


图5 三种波形匹配后典型相关系数等高线分布图及其叠加结果 (a) 斜向分布相关系数样式图, (b) 竖向分布相关系数样式图, (c) 横向分布相关系数样式图, (d) (a-c) 三图叠加结果

Fig. 5 Three correlation coefficient contours of single laser footprints after waveform matching and their superimposed result, (a) oblique distribution of correlation coefficient, (b) vertical distribution of correlation coefficient, (c) transverse distribution of correlation coefficient, (d) superimposed result of (a-c) coefficient contours

从系统误差角度, 每一个脚点的水平位置与对应的激光脚点初始位置水平偏移量均相同。通过上述相关系数矩阵叠加的方式, 可以获得激光脚点在平

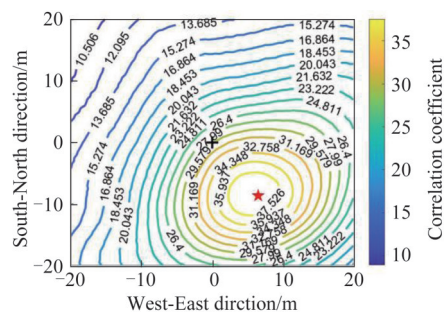


图6 41个激光脚点联合相关系数等高线图

Fig. 6 Correlation coefficient accumulation contour diagram of 41 laser footprints

面方向相对于激光脚点初始位置的系统偏移量(类似于将激光脚点在水平位置取平均值, 提取其中的系统误差), 进而逐个将激光脚点初始平面位置进行偏移, 得到每个激光脚点剔除系统误差后的水平位置。进一步根据平面偏移后的激光脚点在DEM网格中的真实高程, 获取每一个激光脚点的三维坐标。此外, 图6中结果也表明, 代入地形匹配的粗标定参数进行激光脚点坐标解算, 在平面方向还有10~15 m的系统偏差。

### 2.3 激光脚点精度交叉验证

线性体制星载激光测高仪在轨标定模型国内已经研究比较完善, 本文采用唐新明团队的星载激光测高仪在轨标定模型, 带入波形匹配方法获取的地面脚点计算指向角与测距改正值<sup>[13]</sup>, 将系统参数带入脚点定位模型计算得到高精度激光脚点。本文仅采用上一节方法计算得到的15个激光脚点“真值”坐标, 带入在轨标定模型当中, 计算GF-7号星载激光测高仪系统参数, 计算结果如表2所示。

表2 不同方法星载激光测高仪系统解算参数

Table 2 System parameters of SLA calculated by different methods

参数名称	地形匹配方法(粗标定)	波形匹配方法
横滚角 $r/(\prime)$	-2 567.18	-2 570.67
俯仰角 $p/(\prime)$	171.24	167.96
测距改正值 $\Delta L/m$	752.04	751.86

表2中直接计算了星载激光测高仪波束一在卫星本体坐标系下的指向角, 其中横滚角为-2 570.67"与图1中波束一的系统参数设计值0.7°(2520")结果近似。表中也可以发现对比两种系统参数, 测距改正值差异较小, 但是指向角差异较大, 在相同卫星姿轨参数情况下, 两种方法计算得到的激光脚点平面位置差异较大, 而高程差异较小。以15个脚点计

算的系统参数,进一步外推计算所有41个脚点坐标,根据脚点高程精度来判断本文波形匹配方法获得的激光脚点有效性,以及激光高程精度提升效果。

本文选取的机载激光雷达点云密度高,激光脚点中心与最邻近机载激光雷达点云平面距离在10 cm以内,故近似认为最邻近机载激光雷达点云高程即为激光脚点高程真值,将粗标定参数解算得到激光脚点初始位置三维坐标与高程真值进行对比,最终得到41个初始位置脚点高程与高程真值之间的残差如图7(a)中的蓝色折线所示。图7(a)中可以看出,仅以粗标定时激光指向角与测距改正值,计算得到的地面脚点初始位置高程与高程真值具有明显的差异,高程精度仅为2.45 m。最大偏差达到8 m,有超过40%的激光脚点高程误差超过1 m。很明显粗标定结果在犹他州山地地区高程偏差过大,粗标定的系统参数出现了较大的误差。将波形匹配方法计算得到的系统参数带入脚点定位模型,重新计算556号-596号41个激光脚点的三维坐标,利用波形匹配方法再计算后的激光脚点高程与真值高程之间的残差对比图如图7(a)中红色折线所示,再计算后激光脚点高程残差直方统计图如图7(b)所示。

图7(a)中可以看出,波形匹配方法再计算的激光脚点的高程残差大幅度减小,星载激光测高仪激光脚点高程精度得到了明显提升。图7(b)中可以看出经过再计算的激光脚点高程残差分布基本符合均值为零的正态分布特征,系统差得到了有效的抑制。说明波形匹配法获得脚点与实际激光落点一致性高,大部分脚点高程残差在0.5 m以内,少数脚点高程残差在1 m以上。GF-7号激光脚点在犹他州南部山地地区的平均高程残差为-0.27 m,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为0.61 m,90%以上的脚点高程精度在1 m以内,仅有2个点高程残差超过1 m。对比表2中两组系统参数可以发现,横滚角出现3.49°的偏差,俯仰角出现3.24°的偏差,测距改正值出现0.18 m的偏差。带入两种不同系统参数计算得到激光脚点的平面偏差较大,而激光脚点高程结果近似。指向角残差会导致的平面偏移,在山地地区米级的平面偏移往往会造成米级高程误差;因此,图6(a)中两者高程残差差距的原因是激光脚点的平面位置的不同,而并非高程值错误。若仅将粗标定脚点进行水平位置的修正,

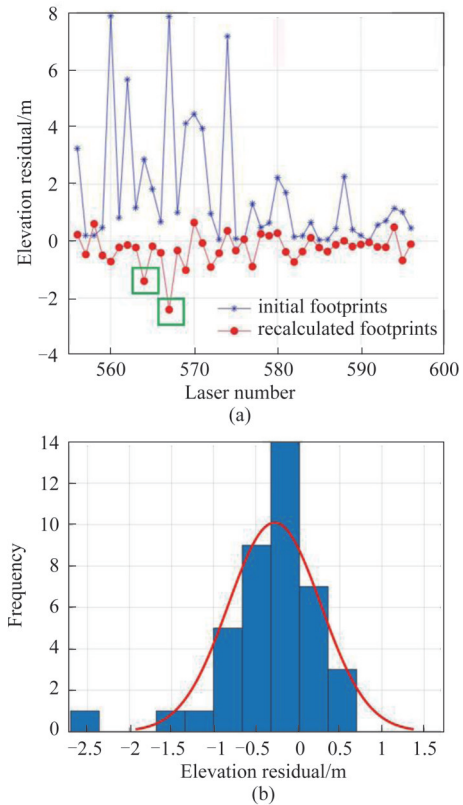


图7 激光脚点高程残差,(a)激光脚点高程残差对比,(b)再计算后激光脚点高程残差直方图

Fig. 7 Elevation residual of laser footprints,(a) elevation residual comparison of laser footprints, (b) elevation residual histogram after recalculation

高程值不变也可以明显提升激光脚点的高程精度。进一步分析高程精度较差激光脚点的原因(如图7(a)中绿色方框标记的两个激光脚点),受制于篇幅仅分析高程误差超过1 m的564号、567号2个激光脚点,对应脚点的附近的DEM和回波波形如图8所示:

为了方便观察,DEM仅截取了以初始激光脚点位置为中心的80 m×80 m的范围,原始波形为星载激光测高数据包中实测激光回波数据,子波为星载激光测高数据包中波形分解处理流程得到的波形分解结果,横轴为时间,纵轴仅代表无量纲的能级等级。上图中可以明显看出,这两个激光脚点的激光回波具有多峰值特征,地面光斑内含有一些低矮植被,高程信息复杂。GF-7号星载激光测高仪的激光测距值是通过波形分解的方式获得,一般以峰值最大回波的时间重心为依据来计算光斑中心位置高程。因此测距精度依赖于波形提取的精度,质量较差的回波波形分解难度大,时间重心提取不准确,从而导致测距精度下降,最终表现为高程精度



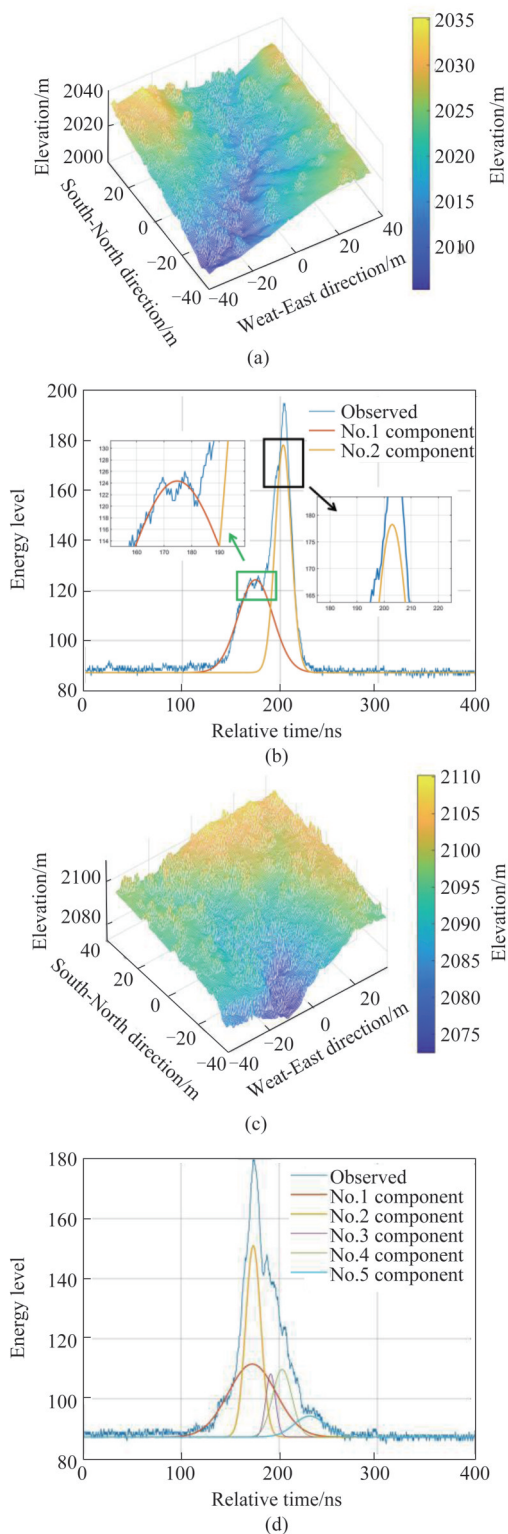


图8 高程精度较差的激光脚点信息 (a) 564号激光脚点DEM, (b)564号激光脚点实测回波与分解波形, (c) 567号激光脚点DEM, (d) 567号激光脚点实测回波与分解波形  
Fig.8 Information of laser footprints with poor elevation accuracy (a) DEM of No.564 laser footprint, (b) observed and divided waveforms of No. 564 laser footprint, (c) DEM of No.567 laser footprint, (d) observed and divided waveforms of No.567 laser footprint

不足。

564号的谷底地形和567号的凹陷山地会导致波形分解产生比较大的偏差<sup>[21]</sup>。对于564号激光脚点而言,激光脚点落在山谷谷底当中。如图8(b)中所示,564号激光回波被分解成了两个回波,在被绿色方框框选中的局部放大图中不难发现1号子波没有能正确的反应出原始回波在160~200 ns的双峰特征。在原始回波黑色方框处出现“毛刺”,由于缺少先验知识,从局部方法图中难以判断“毛刺”是地面某个地物的回波还是回波噪声。星载激光测高仪波形分解方法不可能适应所有地形,在复杂地形的情况下会出现误判,从而影响测距值的确定,最终导致脚点高程不准。

如图8(d)所示,567号脚点激光回波十分复杂,原始波形被分解为五个不同的子波。通常情况下,激光回波最后一个子波为地面回波幅值最大,然而567号脚点情况比较特殊,光斑落在了树木和不同高度的悬崖上。图8(d)中原始回波左侧凸起为树木波形,但是未能被成功识别,幅值最大回波则是悬崖上地面回波。原始回波右侧出现多个幅值较小回波,结合DEM可以发现悬崖高度不一,光斑内高程信息过于丰富,回波峰值最大处所对应的高程可能并非光斑中心高程。即567号脚点中心在悬崖下,而大部分光斑落在地面上,从而导致无法确定脚点中心对应高程。受到大气湍流等随机因素的影响,理论计算的激光脚点平面位置会与实际脚点位置不同。在地表高程丰富地区,很难判断脚点中心位置所对应的激光回波,更容易产生比较大的误差。虽然根据地形特征可以对单个波形进行测距修正,从而使其高程残差修正到1 m以内,但是修正方式依赖于地形的先验知识,无法应用于批量化激光数据处理。

#### 2.4 外推激光脚点精度验证

为了进一步验证本文方法的准确性,本文选取了2021年2月24日7279号轨道途径美国怀俄明州山地地区的激光数据。根据GF-7号卫星所搭载的激光载荷获取的卫星位置、姿态、激光测距、激光指向及对应的精确时刻等参数,分别计算利用地形匹配的粗标定与利用波形匹配的精标定得到脚点位置与高程真值进行比对,结果如下表3所示:

怀俄明州山地地区纬度高、山地绝对高程在2 500~3 500 m之间,星载激光测高仪实测地形为裸露地表夹杂雪地,波形较为复杂,所有激光回波均

表3 怀俄明州激光脚点高程残差表

Table 3 Elevation residual of laser footprints in Wyoming State

编号	本文脚点高程 残差/m	粗标定脚点高 程残差/m	子波个数
370	1.682	2.363	2
372	0.350	-0.782	5
374	3.739	2.600	5
375	-0.719	-2.991	5
376	-0.049	-0.726	3
397	2.472	0.926	5
399	-3.422	-3.160	5
400	-1.014	-2.925	2
401	-0.692	-2.241	2
403	0.364	-1.165	2
平均值/m	0.271	0.810 1	
RMSE/m	1.921	2.196	

为多峰回波。由于受到云层、地面机载激光雷达点云数据影响,部分脚点无激光回波或无地面机载激光雷达点云数据,故表3中激光脚点编号不连续。机载激光雷达激光点云采集时间为2020年4月13日-2020年4月20日之间,与GF-7号卫星实际过境时间存在季节差异。通过GF-7号卫星同时拍摄的卫星影像可以看出,卫星过境时,部分山地被雪覆盖,激光测高仪实测高程会与真值高程产生误差,故会存在少数偏离较大的脚点。上述激光点平均高程残差为0.271 m, RMSE为1.921 m,高程残差与犹他州山地计算得到的高程残差类似,但是RMSE明显增大。与粗标定后的激光脚点高程数据相比,在复杂山地的情况下,激光脚点的高程精度得到了明显的提升。

### 3 结论

山区地形复杂,激光脚点高程精度严重依赖于脚点的平面位置精度,也即激光指向的精度。为提高高分七号卫星测高成果的适用性,本文提出了对山地多个激光脚点采用单点波形匹配、多点相关系数联合处理的方案,降低了波形匹配方法对地形特征的要求,解决了小尺寸光斑波形匹配方法精度不足的问题,实现了GF-7号星载激光测高仪在山地激光脚点水平和高程精度的提升。在美国犹他州山地区域,本文方法处理后的激光脚点高程精度可以达到0.27 m,激光脚点定位精度优于地形轮廓匹配法。本文提出的方法是一种便捷的激光脚点坐标“真值”获取方法,可以用于星载激光测高仪在轨

标定中解算激光指向角和测距改正值,提升激光数据在山地的精度。

### References

- [1] Schutz B E, Zwally H, Shuman C, *et al.* Overview of the ICESat mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(21):97-116.
- [2] Li G Y, Tang X M, Yuan X, *et al.* Vertical accuracy assessment of ZY-3 digital surface model using ICESAT/GLAS laser altimeter data[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-1/W1:23-28.
- [3] Tang X M, Xie J F, Liu R, *et al.* Overview of the GF laser altimeter system mission[J]. *Earth and Space Science*, 2019, **7**(2):1-11.
- [4] LI Guo-Yuan. Earth observing satellite laser altimeter data processing method and engineer practice[D]. Wuhan University(李国元.对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践,武汉大学),2018.
- [5] Tang X M, Yao J Q, Li G Y, *et al.* The influence of cloud scattering on satellite laser altimetry data and its correction[J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(13):4064-4075.
- [6] LI Shao-Ning. Research on Geometric Calibration of Earth Observation Satellite Laser Altimeter[D]. Wuhan University, 2017.
- [7] Luthcke S B, Rowlands D D, McCarthy J J, *et al.* Spaceborne laser-altimeter-pointing bias calibration from range residual analysis[J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2012, **37**(3):374-384.
- [8] XIE Jun-Feng, LIU Ren, WANG Zong-Wei, *et al.* In-orbit geometric calibration and accuracy evaluation of GaoFen-7 spaceborne laser altimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*(谢俊峰,刘仁,王宗伟,等.高分七号星载激光测高仪在轨几何检校与精度评估.红外与激光工程) 2021, **50**(8):188-198.
- [9] Luthcke S B, Thomas T C, Pennington T A, *et al.* ICESat-2 pointing calibration and geolocation performance[J]. *Earth and Space Science*. **8**(3):1-11.
- [10] ZHANG Wen-Hao, LI Song, ZHANG Zhi-Yu, *et al.* Using waveform matching to precisely locate footprints of a satellite laser altimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*(张文豪,李松,张智宇.利用波形匹配实现卫星激光测高脚点精确定位的方法.红外与激光工程) 2018, **47**(11):243-250.
- [11] LI Guo-Yuan, TANG Xin-Ming, ZHOU Xiao-Qing, *et al.* The method of GF-7 satellite laser altimeter on-orbit geometric calibration without field site[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*(李国元,唐新明,周晓青,等.高分七号卫星激光测高仪无场几何定标法.测绘学报) 2022, **51**(03):401-412.
- [12] ZUO Zhi-Qiang, TANG Xin-Ming, LI Song, *et al.* Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*(左志强,唐新明,李松,等. GF-7星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波.红外与激光工程) 2020, **49**(11):132-142.
- [13] Zhang T, Xu X, Xu S. Method of establishing an underwater digital elevation terrain based on kriging interpolation

- [J]. *Measurement*, 2015, **63**:287-298.
- [14] Kaufmann J. Lidar base specification version 2.1[R]. Denver: USGS, 2019, 10:5-10.
- [15] CAO Hai-Yi, DAI Jun, XU Chi, *et al.* ZY-3 series satellites and their applications[J]. *Satellite Application* (曹海翊,戴君,徐驰,等。资源三号系列卫星及其应用概况。卫星应用), 2020(10): 11-13.
- [16] Tang X M, Xie J F, Gao X M, *et al.* The in-orbit calibration method based on terrain matching with pyramid-search for the spaceborne laser altimeter[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, **12**:1053-1062.
- [17] WANG Hong, MA Yue, LI Song, *et al.* Impact of beam divergence angle on forest echo from satellite laser altimeter[J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (王虹, 马跃, 李松, 等。光束发散角对星载激光测高仪森林回波的影响。红外与毫米波学报), 2018, **37**(1):112-118.
- [18] Hancock S, Armston J, Hofton M, *et al.* The GEDI Simulator: A large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of spaceborne missions [J]. *Earth and Space Science*, 2019, **6**(2):294-310.
- [19] WANG Cheng, YANG Xue-Bo, XI Xiao-Huan, *et al.* Evaluation of footprint horizontal geolocation accuracy of spaceborne full-waveform LiDAR based on digital surface model [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, **13**:2135-2144.
- [20] XIE Jun-Feng, HUANG Geng-Hua, LIU Ren, *et al.* Design and data processing of China's first spaceborne laser altimeter system for earth observation: GaoFen-7 [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, **13**: 1034-1044.
- [21] YANG Xue-Bo, WANG-Cheng, XI Xiao-Huan, *et al.* Wavelet transform of Gaussian progressive decomposition method for full-waveform LiDAR data[J]. *J. Infrared Millim. Waves.* (杨学博,王成,习晓环,等。大光斑LiDAR全波形数据小波变换的高斯递进分解。红外与毫米波学报), 2017, **36**(6):749-755.