

多特征参数约束的星载激光高程控制点提取

梅永康^{1,2}, 谢俊峰^{2*}, 陈伟¹, 刘仁^{2,3}

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100)

摘要: 星载激光点位高程精度是其辅助光学立体影像复合测绘的基础。针对光学影像立体测绘对激光高程控制点精度的需求,提出了一种基于多特征参数约束的星载激光高程控制点提取方法。该方法利用全波形数据包含的目标地物垂直结构信息,分析高精度激光高程控制点特征,基于数据的有效性、波形的峰值个数、回波特征参数实现逐级约束筛选。选取信噪比、峰度和偏度作为评价指标,通过全波形数据回波特征参数的计算、统计与分析,确定其信噪比、峰度和偏度阈值,最终高效提取出可用于星载激光高程控制点的有效波形数据。以我国高分七号数据为试验对象,选取草地、戈壁、道路、水体、沙地、耕地六种典型地物样本,确定适用于提取高分七号高程控制点的信噪比、峰度与偏度的阈值。以江苏地区机载 LiDAR 点云数据为参考,验证分析高程控制点提取和阈值设定的准确性,试验结果表明:基于多特征参数约束算法,利用设定的适用于 GF-7 卫星的参数阈值,可以高效、准确地从原始波形数据中提取出有效波形用于高精度高程控制点生产。以与参考数据高程差 0.32 m 为高程精度要求,提取准确性平均为 90.34%,所提取的激光高程平均测量精度优于 0.5 m。

关键词: 回波特征; 高程控制点; 全波形数据; 星载激光; 高分七号

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210997

Elevation control points extraction of spaceborne lasers with multi-feature parameter constraints

Mei Yongkang^{1,2}, Xie Junfeng^{2*}, Chen Wei¹, Liu Ren^{2,3}

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Land Satellite Remote Sensing Application Center, MNR, Beijing 100048, China;

3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The point elevation accuracy of spaceborne laser is the basis of its auxiliary optical stereoscopic image composite surveying and mapping. This study proposes a method for extracting elevation control points of spaceborne lasers based on multi-feature parameters constraints in response to the requirements for the accuracy of laser elevation control points in optical image stereo mapping. This method utilizes the vertical structure information of the target objects contained in the full-waveform data to analyze the characteristics of the high-precision laser elevation control points, and realizes the constraint screening step-by-step based on the validity of

收稿日期:2021-12-21; 修订日期:2022-01-26

基金项目:国家自然科学基金(41571440,41771360,41971426); 十三五航天预研项目(D040105,D040106); 重点研发计划(SQ2019YFE-020224); 北京金桥工程种子基金(ZZ19013); 高分测绘应用示范项目二期(42-Y30B04-9001-19/21)

作者简介:梅永康,男,硕士生,主要从事星载激光雷达波形数据的处理、分析与应用方面的研究。

通讯作者:谢俊峰,男,研究员,博士,主要从事星载激光测高仪几何检校与数据处理、星载激光数据应用、卫星定姿等方面的研究。

data, the number of waveform peaks and echo characteristic parameters. The signal-to-noise ratio, kurtosis and skewness are selected as evaluation indexes. Through the calculation, statistics and analysis of the echo characteristic parameters, the thresholds are determined, and finally the valid waveform data that can be used for spaceborne laser elevation control points can be extracted efficiently. Taking the laser data of GF-7 as an example, such six typical feature samples as grassland, gobi, road, water body, sandy, and cultivated land are selected to determine the suitable thresholds of echo characteristic parameters for GF-7. Taking the airborne LiDAR point cloud data in Jiangsu area as a reference to verify and analyze the extraction accuracy, the experiment results show: based on the multi-feature parameters constraint algorithm, using the set parameter thresholds suitable for the GF-7, the valid waveform can be extracted from the original waveform data efficiently and accurately for the production of high-precision elevation control points. Taking the elevation difference of 0.32 m from the parameter data as the elevation accuracy requirement, the average extraction accuracy is 90.34%, and the average measurement accuracy of the extracted laser elevation is better than 0.5 m.

Key words: echo characteristics; elevation control point; full-waveform data; spaceborne laser; GF-7

0 引言

在共建“一带一路”扩大开放的大背景之下,随着全球无控测图的慢慢推进,地面控制点的需求与日俱增,获取高程控制点的传统方法需要大量的人力物力,成本高、耗时长、外业测量困难,且易受地形、天气等其他因素影响。星载激光雷达运行轨道高、观测范围广、数据获取效率高,受天气背景干扰小,可以进行全天时的观测^[1]。随着星载激光测高仪的定位精度不断提高,激光足印直径也在不断减小,且星载激光数据覆盖范围广、数据量大,利用星载激光数据进行控制点的提取已经成为目前获取高程控制点的新方法^[2]。

目前,星载激光雷达系统包括线性探测体制和单光子体制。线性探测体制下,激光探测器发射的脉冲与入射光强呈线性关系,其输出电压值形成随时间变化的回波信号,经采样后,每一个脉冲都能获得随采样时间变化的回波波形,能够获得丰富的目标信息,作用距离远、探测时间短,理论上单发脉冲即可完成测距^[3]。对于线性体制激光雷达,美国于 2003 年发射了世界首颗对地观测的冰、云和陆地高程卫星 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite, ICESat), 星上装载的地面高程激光测量系统 (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS) 采用脉冲激光测距方式,测距精度达到 0.15 m^[4]; 2018 年, NASA 发射的 GEDI 卫星也是一颗线性体制的激光测高卫星,主要用于全球植被生物量测量,研究碳循环和全球气候变化等^[5],进一步表明

了激光波形数据的重要性和潜力大;我国于 2019 年 11 月 3 日发射了高分七号卫星,是我国首颗全波形对地观测激光测高卫星,利用先进的波形采样技术实现了 0.1 m 的高程测量精度^[6]。

针对星载激光高程控制点的提取研究,国内外有不少学者进行了相应探讨。王密等基于 ICESat-2/ATLAS 全球激光数据产品,研究了基于参考高程数据和属性参数提取 ICESat-2 全球高程控制点的方法,并证明该方法能够在保证数据保留率的同时有效提高高程精度^[7]。王晋等以 SRTM 估算的地形坡度作为限制条件,结合激光高程点自身质量评价信息,自动提取高质量 ICESat 激光高程点^[8]。李国元等提出了一种多准则约束的激光高程控制点筛选算法,先后利用 SRTM-DEM 数据、GLAH14 产品中的测距属性参数和 GLAH01 的波形特征参数辅助 GLAS 数据进行单峰值高程控制点筛选,结果表明经多准则约束筛选后的激光点具有很高的精度^[2]。Gonzalez J H 等利用 ICESat 测高数据,定义合适的全球 ICESat 选择策略,对 TanDEM-X 的高程值进行筛选,提高了 TanDEM-X 卫星生成 DEM 的精度^[9]。Dongchen W 等针对 ASTER 立体数据地面控制点不可用的问题,利用 ICESat/GLAS 的测高数据与 ASTER 立体数据融合,进行南极高精度地形信息提取,显著提高了 ASTER-DEM 的精度^[10]。H. Duong 等人针对 ICESat/GLAS 测高数据中错误较大的激光点,利用高程使用标记、增益值和饱和度改正标记剔除参数,并与

AHN 数据之间进行比较与精度分析,得到精度较高的测高数据^[11]。以上学者虽然都取得了一定的成效,但他们一般都借助其他地形数据如 DEM 数据进行筛选除,存在一定的复杂性;同时,他们大多仅针对某一种卫星的情况进行提取,存在一定的局限性,对后续工作的开展受用度偏低,文中充分发挥全波形数据的优势,不依赖其他参考数据,针对这一类卫星提出了一种具有高效率、广泛性、准确性的多特征参数约束的星载激光高程控制点提取方法。充分考虑了由于平坦地区激光高程精度高,且回波数据包含目标地物的垂直结构信息等特性,只采用原始星载激光波形数据,基于有效性筛选、峰值数筛选、回波特征参数筛选逐级进行高程控制的提取。同时,利用高分七号卫星波形数据进行试验分析,提出适用于高分七号卫星的回波特征参数阈值,并以江苏地区机载 LiDAR 点云数据为参考,验证分析高程控制点提取和参数设定的准确性,为后续星载激光测高点的提取提供一定的技术支持。

1 多特征参数约束算法

文中从星载激光原始波形数据入手,基于波形数据的回波特性分析,提出一种多特征参数约束的星载激光高程控制点提取方法,高效便捷地实现从大量星载激光点中提取出高精度的高程控制点,可用于后续开展辅助光学立体影像复合测绘或区域网平差等工作。首先从回波波形数据的有效性入手,考虑了有效数据筛选,作为算法的第一级筛选,剔除掉所有后续不能使用的点;考虑到地形条件,为选取均匀平坦地区的激光点,利用有效的波形数据进行单峰值数据筛选,作为文中算法的二级筛选;最后,考虑地物因素,筛选出地物复杂度低、粗糙度低的波形数据,利用信噪比、峰度、偏度三种参数,通过试验分析确定出具体的阈值,通过参数阈值筛选出符合高精度的高程控制点。算法的整体流程如图 1 所示。

(1) 基于有效性筛选:当激光脉冲穿过云层时,会受到云量、水汽等大气作用导致一些采样点没有回波信息,这些激光点在后续的处理中都是完全不可用的,因此笔者首先需要剔除无回波信息的数据。由于激光器硬件的设定,当激光足印点落在高反射率的地

表或者穿过云层发生前向散射时,会在波形顶部出现连续相同且采样值饱和的波形数据,即“平顶”现象;同时,由于激光器使用的可变增益放大器带宽不足,波形会呈现一种突然向下变形的形状,即“负冲”现象^[12]。这两种现象明显改变了波形数据的高斯特性,对后续高程控制点的提取存在一定的影响,即可作为无效数据予以剔除。如图 2 所示,从左到右依次为无回波现象、“平顶”现象、“负冲”现象,将这些数据进行剔除,可以保证筛选出有效数据,用于下一步的筛选。

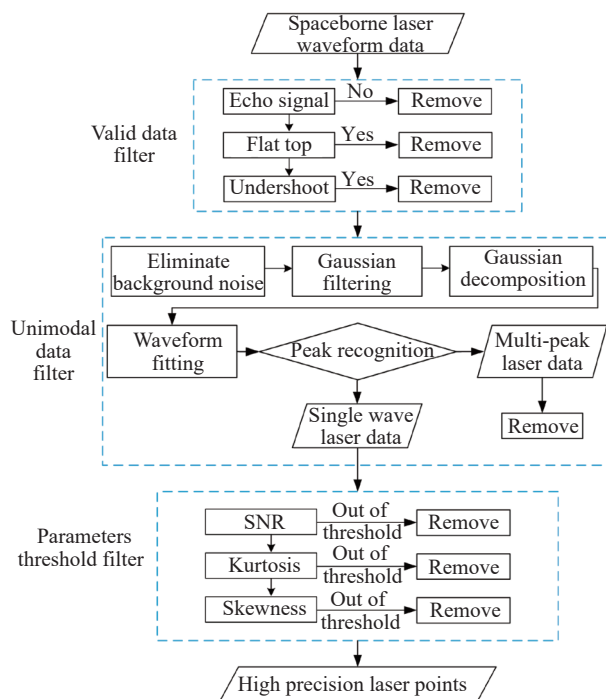


图 1 多特征参数约束算法流程图

Fig.1 Flowchart of multi-feature parameters constraints algorithm

(2) 基于峰值数筛选:对于有效的星载大光斑激光雷达数据,由于足印一般较大,如 ICESat/GLAS 卫星激光足印约为 70 m,高分七号卫星的约为 30 m,当地面存在植被、山地、地形起伏等较为复杂情况的时候,波形中所反映的高程信息不能准确表达地面信息。对于平坦地物和斜坡模型,对于地面控制点而言,其回波波形表现为单个高斯波形;对阶梯型和林区等复杂模型,其回波波形表现为多个高斯波形^[13]。如图 3 所示,图 (a) 为单波峰波形,图 (b) 为多波峰波形,地物类型分别为草地、山地。研究表明,在波形展宽较小、坡度平缓的地区,激光点测高精度较高;在坡

度陡峭、林区等波形表现变形严重的地区,其测高精度明显较差^[14]。因此,文中设定单峰数据筛选,筛选

出高斯分量个数为 1 的数据,提取出激光点位于平坦地区的单峰值波形数据。

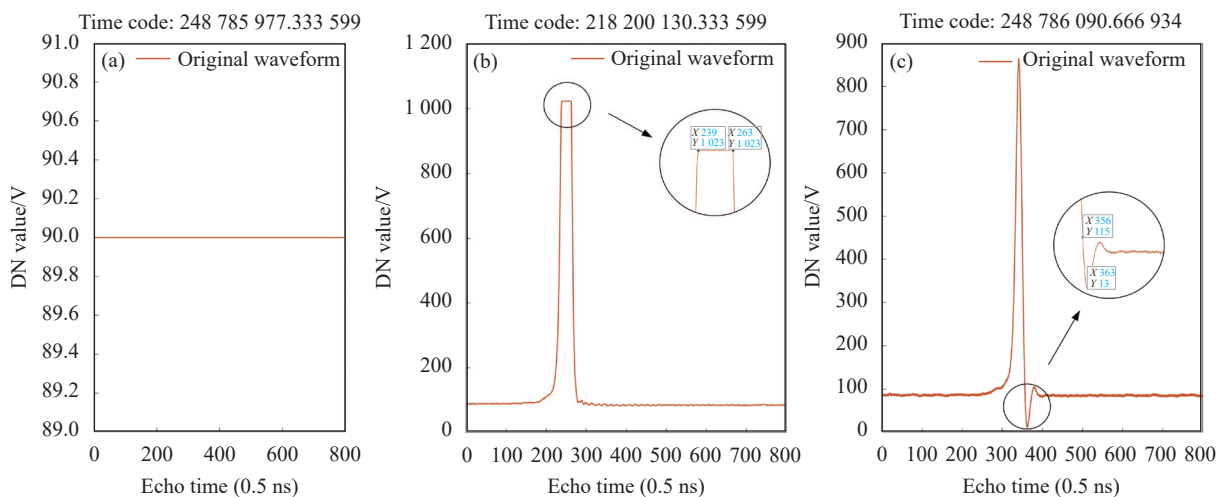


图 2 无效数据现象示意图

Fig.2 Schematic of invalid data phenomenon

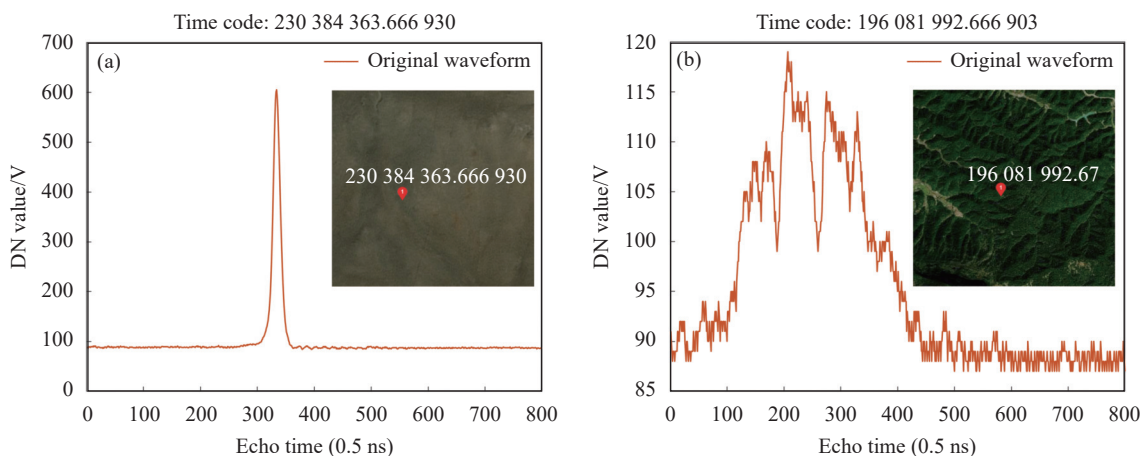


图 3 原始波形强度计数显示

Fig.3 Display of the original waveform intensity count

(3) 基于回波特征参数筛选:虽然单峰值的波形数据可以表征平坦地物,由于地面目标的反射率不同、地形起伏不定、大气条件多变等因素,激光测高数据的质量也高低不定,本级筛选基于这一思路利用回波波形的特征参数进行进一步的筛选,确保数据的高精度性。考虑到激光测高数据的质量,信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)可作为质量评价的一个重要指标,通过设定信噪比阈值,剔除掉一些波形数据质量极差、噪声较为严重的激光点。由于一些激光足印点落在均匀低矮灌木、河堤、草丛等地物较为粗糙的

区域,这些激光点波形反映为单峰值且波形质量适中,但由于地物的复杂性使波形与标准高斯分布相差较多,存在一定的展宽等现象。在理想情况下,对于较为平坦的裸地,激光测高仪回波的脉冲信号为单一的高斯型信号,因此在全波形回波特征分析时,文中算法考虑高斯函数的特性,采用描述数据分布形态的统计量——峰度(kurtosis)和偏度(skewness)。

通过对不同星载激光数据的试验统计与分析,确定出信噪比、峰度、偏度阈值,对高斯分量为 1 的波形数据进行参数阈值范围的筛选,保证提取出符合测

量精度的高程控制点。

1.1 基于有效性筛选

根据输入的波形数据读取每个激光点的采样值 $f(i)$, 每个采样值都相等的时候判定为无回波信息数据; 查找到波形数据的最大值和最大值的个数, 当最大值等于卫星采样值设定最大阈值 Max_Thr 且最大值个数大于 2 的时候, 判定为该激光点出现“平顶”现象; 计算波形数据的背景噪声均值 m_n 和背景噪声标准差 σ_n , 当激光点采样值连续低于背景噪声均值减去 4 倍背景噪声标准差时, 判定该激光点出现“负冲”现象。其原理公式如下所示:

$$f(i) \begin{cases} \equiv C, & \text{无回波信号} \\ = Max_Thr \text{ 且连续,} & \text{“平顶”现象} \\ < m_n - 4\sigma_n \text{ 且连续,} & \text{“负冲”现象} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 为常数; 背景噪声均值 $m_n = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$; 背景噪声标准差 $\sigma_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - m_n)^2}{n - 1}}$ 。

1.2 基于峰值数筛选

文中利用基于波峰自动识别的全波形数据高斯分解算法对原始波形进行分解, 在进行波形数据的分解之前, 由于传感器本身、大气散射等因素, 还需要对数据进行一定的预处理。全波形数据信号中并不完全都是有效的波形信号, 波形中会出现较小峰值等毛刺现象, 即存在一定的背景噪声^[15]。文中采用传统的星载激光雷达数据处理方法, 将背景噪声阈值作为判断背景噪声或有效信号的标准, 即如果波形采样值小于背景噪声阈值, 则认为该采样点为背景噪声, 予以剔除。将波形采样值减去背景噪声阈值, 把小于 0 的采样值设置为 0, 把大于 0 的采样值减去背景噪声阈值作为新的采样值, 以此组成一组新的波形数据, 该处理只将波形数据的数值进行改变和处理, 并未改变波形的形状和特性。原理转换公式如公式 (2), 其中, 文中使用经验公式, 采用背景噪声均值 m_n 加上 k 倍的背景噪声标准差 σ_n 确定背景噪声阈值^[16]。:

$$V(i) = \begin{cases} 0, & f(i) - E_n < 0 \\ f(i) - E_n, & f(i) - E_n > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V(i)$ 为噪声剔除后的采样值; $f(i)$ 为原始波形采样值; 背景噪声阈值 $E_n = m_n + k\sigma_n$ 。

由于复杂地形、大气、传感器本身等因素影响,

波形还包含大量噪声, 因此波形数据预处理还包括对回波波形进行平滑滤波。由于激光测高仪发射的脉冲信号为高斯型信号, 理想的回波波形也是高斯分布, 所以文中进行波形滤波的方法为高斯滤波。将标准回波波形数据作为高斯滤波模板, 直接和初始回波波形进行卷积运算, 从而完成对初始回波数据的平滑滤波作用^[16], 公式如下所示:

$$f(t) \otimes g(t)^{(1)} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \sigma_i}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}} e^{-\frac{(t-t_i)^2}{2(\sigma^2 + \sigma_i^2)}} \quad (3)$$

式中: $g(t)$ 为标准高斯函数; $f(t)$ 为总的有效回波信号; σ 和 t 分别是标准高斯分布的脉宽和高斯峰值位置; A_i 、 t_i 和 σ_i 分别是第 i 个高斯分量的高斯振幅、高斯位置及高斯脉宽; \otimes 为卷积计算符号。

预处理之后的波形较为平滑, 将某一处的采样值与其左右相邻的采样值进行比较, 若是该值比其左右相邻的值都大, 若满足公式 (4), 则判定 $f(i)$ 为峰值点。文中选择王兵团提的一种确定平面曲线离散点集拐点的快速算法^[17], 求取回波波形的拐点。采用峰值点剔除掉无效拐点, 根据两个拐点和一个峰值确定一个高斯分量, 再利用脉宽合并和面积合并原则, 通过最小二乘法拟合, 确定出真实波形分解后的高斯分量。通过高斯分解后的波形数据, 可以筛选出高斯分量个数为 1 的单峰值数据, 用于下一步的筛选。

$$\begin{cases} f(i) > f(i-1) \\ f(i) < f(i+1) \end{cases} \quad (4)$$

1.3 基于回波特征参数筛选

选择筛选后的单峰值数据进行回波强度信噪比的计算^[18], 文中采用背景噪声均值和标准差的计算方法, 计算公式如下所示:

$$SNR = 10 \lg \frac{I_{\max} - m_n}{\sigma_n} \quad (5)$$

式中: I_{\max} 为回波波形强度值的最大值; m_n 、 σ_n 分别为背景噪声均值和标准差。

单峰值数据中依然存在一定的非有效信号, 不能直接利用全部采样值进行回波特征参数的计算。根据激光脉冲形成波形的原理, 在激光脉冲到达目标地物之前, 波形中产生的信号是由大气背景和系统本身所引起的, 在探测目标地物之后, 传感器仍会产生一部分由收集信号工作引起的非有效信号, 即真实有效

的回波信号包括开始位置 ($pBeg$) 和结束位置 ($pEnd$)。因此,文中算法使用波形的全高 ($wEcho$) 来确定波形的样本数,如图 4 所示。从波形数据的第一个采样值开始,当第一次出现波形采样值大于背景噪声阈值的时候,则认为该采样值为回波信号的起始位置;相应地,从波形数据的最后一个采样值往前,当第一次出现波形采样值大于背景噪声阈值的时候,则认为该采样值为回波信号的结束位置^[6]。从前沿位置到峰值的距离称之为前沿长度,同理从峰值位置到后沿的距离称为后沿距离。前、后沿长度决定了波形的对称性,反映了地形的起伏、坡度与地表的粗糙度^[19]。

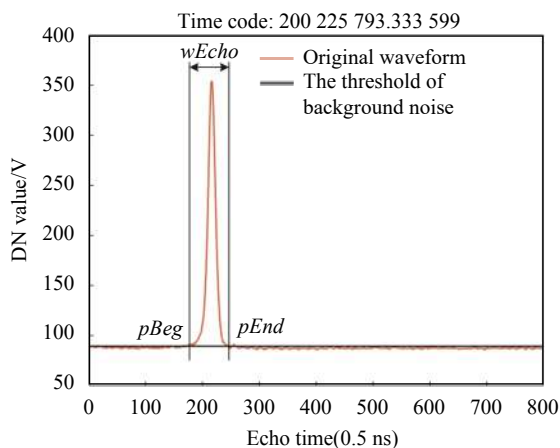


图 4 波形全长示意图

Fig.4 Schematic diagram of the full-length waveform

峰度描述的是总体中所有取值分布形态的陡缓程度,由地物反射率所决定;偏度是描述的是总体取值分布的对称性,由地形条件和地表粗糙度所决定^[20],计算公式如公式(6)~(7)所示。对于满足标准高斯分布的统计数据,其峰度值为 3、偏度值为 0,因此波形数据中该指标的值越接近标准值,表明其高斯特性保留越好。

$$k = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{\sigma_N^4} \quad (6)$$

$$Sk = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{\sigma_N^3} \quad (7)$$

式中: N 表示样本个数; X_i 为波形采样值; \bar{X} 为波形样

本均值; σ_N 为波形样本的标准差。

利用卫星激光原始数据、检校后激光指向、精姿精轨数据,在修正大气延迟误差、潮汐误差等误差后精确计算激光地面脚点坐标^[21],利用原始波形与卫星影像目视解译,选择定位后位置周围平面精度范围内为同一均匀平坦地物的采样点,结合全球 30 m 地表覆盖数据 (<http://www.globeland30.org>) 进行地物类型的判断,对其信噪比、峰度、偏度进行统计分析。为了让阈值拥有普适性,由于不同星载激光数据参数值不同,文中通过具体试验分析来处理数据中的异常值,通过异常值确定具体的参数阈值。样本均值可以看出样本的集中趋势,而样本的方差及标准差可以支持分析样本的离散趋势。文中算法采用计算这些参数的最值与均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE),以最小值减去两倍均方根误差作为阈值的最小值,以最大值加上两倍均方根误差作为阈值的最大值^[22-23]。

2 试验与验证

2.1 试验数据

2.1.1 阈值分析试验数据

试验选择我国第一颗全波形对地观测激光测高卫星,高分七号卫星激光测高仪按 0.5 ns 间隔采样,记录从地面返回来的波形数据及能量,其激光测高系统由四台激光器、两台足印相机、一台光轴监视相机共同组成,基本信息如表 1 所示^[6]。

表 1 高分七号卫星激光测高仪参数

Tab.1 Laser altimeter parameters of GF-7

| Parameter | Value |
|---|---------------------------------|
| Laser beam | 2 |
| Laser working wavelength/ μm | 1.064 |
| Laser divergence angle/ μrad | ≤ 60 |
| Laser ranging range/km | 450-550 |
| Receiving telescope aperture/mm | 600 |
| Laser repetition rate | 3 Hz (6 Hz at calibration mode) |
| Sampling rate/GSps | 2 |
| Spot size/m | 15 |
| Ranging accuracy/m | ≤ 0.1 |
| Transmitting pulse energy/mJ | ≤ 180 |
| Transmitting pulse width/ns | 4-8 |
| Laser emission efficiency | 99.4% |
| Laser receiving efficiency | 79.0% |

根据算法流程, 试验随机选取了 GF-7 卫星四轨数据, 共计八个波束, 分别为 2085 轨、2086 轨、2088 轨和 3419 轨, 共计 7625 个激光点。该数据激光足印点主要分布于中国境内, 少量分布于俄罗斯、蒙古国等境外地区。按照算法设计依次对其进行有效性筛选和峰值个数筛选, 每轨数据筛选前总点数、有效点数和单峰值点数基本信息如表 2 所示。

表 2 试验数据基本信息

Tab.2 Basic information of experimental data

| Orbit | Beam 1 | | | Beam 2 | | |
|-------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| | Total points | Valid points | Unimodal points | Total points | Valid points | Unimodal points |
| 2085 | 648 | 551 | 179 | 648 | 454 | 271 |
| 2086 | 938 | 849 | 424 | 939 | 819 | 503 |
| 2088 | 1125 | 679 | 473 | 1125 | 649 | 448 |
| 3419 | 1101 | 504 | 219 | 1101 | 518 | 240 |

2.1.2 验证数据

文中选择江苏地区高精度的机载 LiDAR 点云数据进行准确性验证试验, 该数据面积约为 11492 km², 点云密度为 1.3 个/m², 高程精度优于 0.1 m, 几何精度优于 1 : 2000 比例尺测图。对于经过该地区的高分七号卫星激光数据, 文中选择第 672、5973、11430 和 11583 轨数据开展试验, 其数据覆盖范围如图 5 所示, 数据基本信息如表 3 所示。

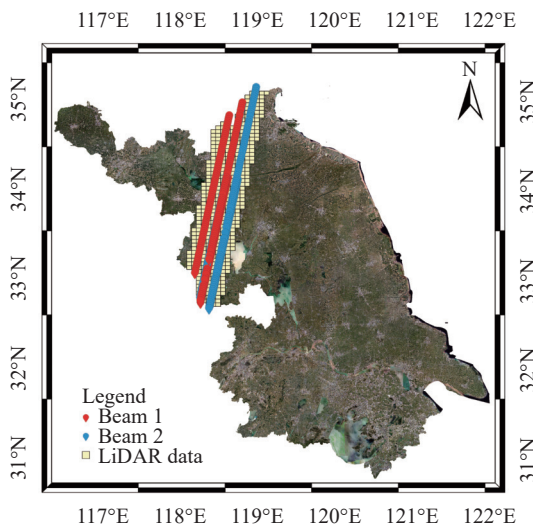


图 5 高分七号星载激光验证数据

Fig.5 Verified data of GF-7 spaceborne laser

表 3 验证数据基本信息

Tab.3 Basic information of the verified data

| Orbit | Beam 1 | Beam 2 | Acquisition time |
|-------|--------|--------|------------------|
| | Points | Points | |
| 672 | 53 | 65 | 2019.12.17 |
| 5973 | 74 | 96 | 2020.11.30 |
| 11430 | 65 | 55 | 2021.11.19 |
| 11583 | 99 | 98 | 2021.11.29 |

2.2 试验与分析

2.2.1 试验结果与分析

根据算法流程, 对该四轨激光点数据的 5023 个有回波的数据依次进行峰值数筛选处理, 对处理得到的 2757 个单峰值数据分析。经校验验证后, 高分七号两波束激光的平面精度分别为 (3.896±1.029) m 和 (3.286±0.337) m^[24], 故将定位后位置周围 4 m 范围内为同一均匀平坦地物确定为该激光足印落点的地物类型。为找出可以普遍适用于高分七号卫星高程控制点提取的特征参数阈值, 考虑到地表反射率较高和较低的地物, 文中选取草地、戈壁、道路、水体、沙地、耕地六种典型平坦均匀地物, 通过目视解译选择了波形质量较好、地形较为平坦的点, 经过人工选点后, 选择了 620 个用于确定阈值范围的点对每个激光点的回波特征参数进行统计与分析, 绘制了每种地物的信噪比、峰度、偏度的变化图, 如图 6 所示, 从图 (a)~(f) 地物类型依次为草地、戈壁、道路、水体、沙地、耕地, 其中, 横坐标为点的序号, 纵坐标为参数值。同时, 根据回波特征参数的统计分析, 统计各个特征参数在不同地物中的上下限, 如表 4 所示。

通过六种平坦地物回波特征参数折线图对比分析, 可以看出, 信噪比、偏度、峰度三个指标的数据变化趋势较为一致。因此笔者将选取的六种典型地物的信噪比、峰度、偏度进行两两之间相关系数 *r* 的计算, 其散点图如图 7 所示, 从图 (a)~(c) 依次为信噪比与峰度、信噪比与偏度、峰度与偏度, 相关系数分别为 0.79、0.76 和 0.93。由信噪比与其他两个参数的相关系数和信噪比的本质可知, 信噪比的选取能够达到剔除掉波形数据质量极差、噪声较为严重的激光点的目的。由于峰度与偏度高度相关, 笔者将散点图中偏离正常相关趋势的点中选择两个进行分析。点 1 为 (峰度 1.67, 偏度 0.42), 点 2 为 (峰度 5.89, 偏度 2.03)。

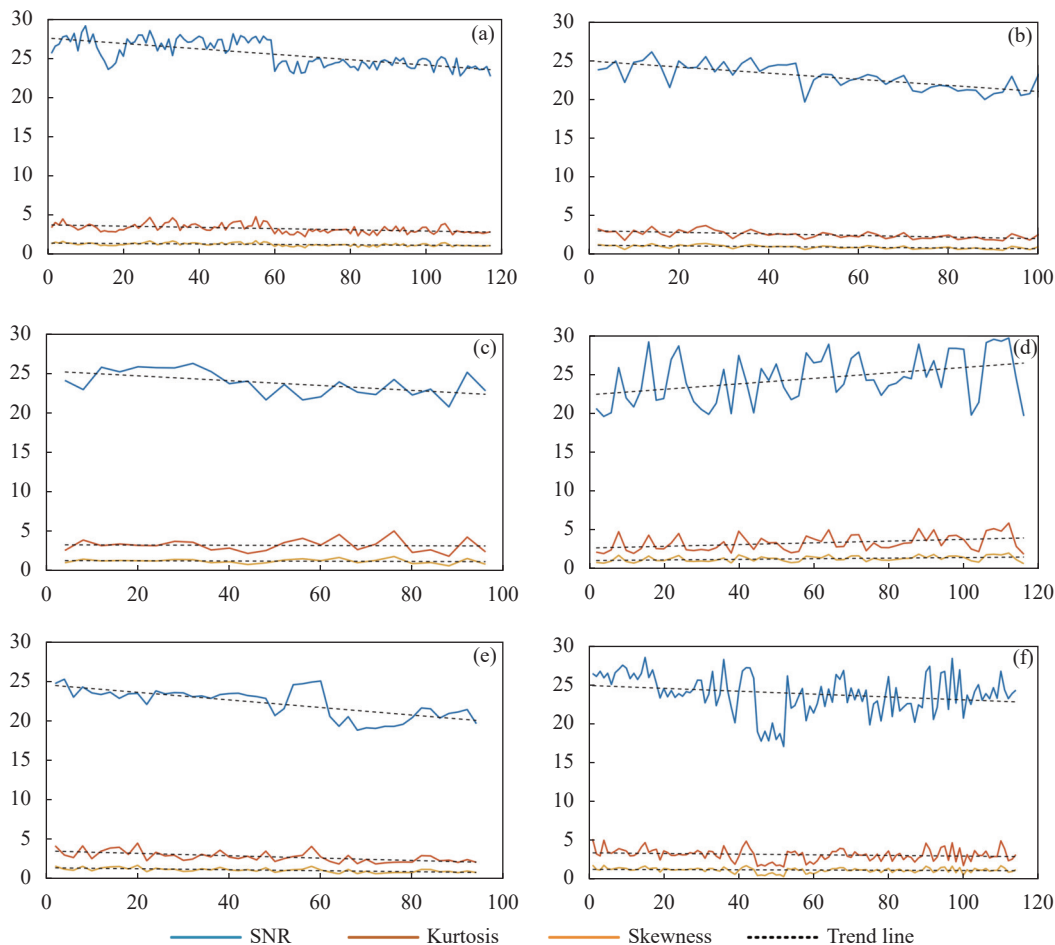


图 6 六种地物回波特征参数对比图表

Fig.6 Comparison chart of echo characteristic parameters about six ground objects

表 4 各个特征参数在典型地物类别统计

Tab.4 The min and max value of each characteristic parameter in typical feature type

| Feature type | SNR min | SNR max | Kurtosis min | Kurtosis max | Skewness min | Skewness max |
|--------------|---------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Grass land | 22.75 | 29.19 | 2.32 | 4.87 | 0.92 | 1.76 |
| Gobi | 19.67 | 26.11 | 1.84 | 3.79 | 0.66 | 1.49 |
| Land | 20.82 | 26.33 | 1.90 | 5.10 | 0.69 | 1.87 |
| Water body | 19.61 | 29.71 | 1.88 | 5.89 | 0.66 | 2.03 |
| Sand | 18.83 | 25.28 | 1.89 | 4.53 | 0.63 | 1.72 |
| Arable land | 17.19 | 28.66 | 1.67 | 5.24 | 0.42 | 1.86 |
| | 17.19 | 29.71 | 1.67 | 5.89 | 0.42 | 2.03 |

由表 4 可以看出, 三种参数的最小值均分布在耕地地物, 最大值均分布在水体地物。通过统计数据表明, 耕地在参数指标阈值范围较大, 考虑原因是高分七号每轨激光数据分布情况跨越南北方, 南北方种植

差异等所致。根据结果可知, 三种特征参数的最小值在同一个激光点, 最大值也在同一个激光点, 并且, 这两个点亦为在前面选择的偏离正常趋势的点, 其卫星影像和原始波形显示如图 8 所示。

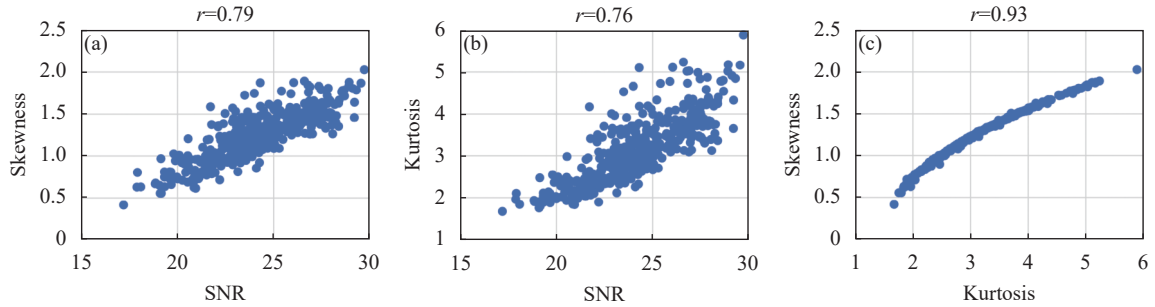


图 7 回波特征参数之间相关性散点图

Fig.7 Scatter diagram of correlation between echo characteristic parameters

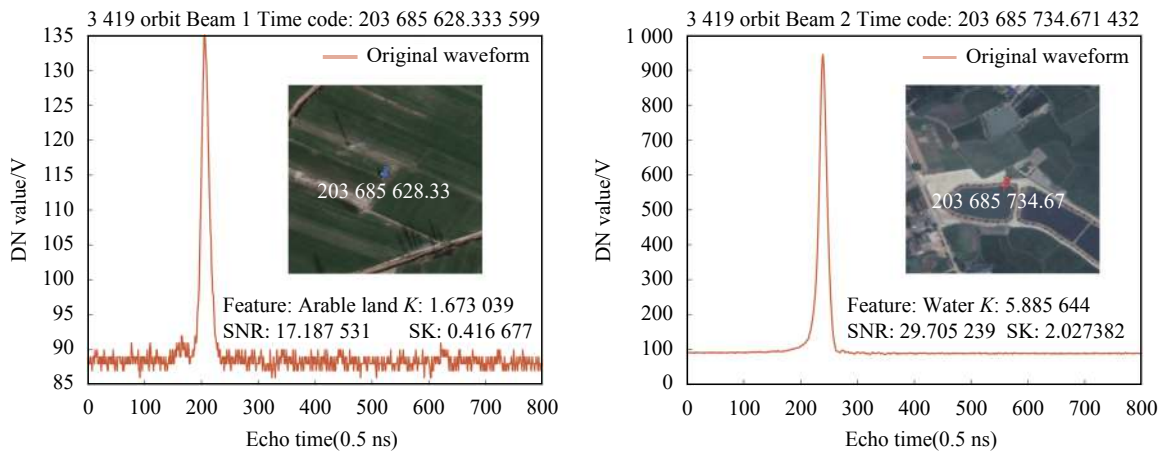


图 8 特殊点卫星影像和原始波形对照

Fig.8 Comparison between satellite image and original waveform about special points

可以看出,此耕地所在地形为区域边界,农作物情况较为复杂,地形较为复杂、地表较为粗糙,因此导致该激光点回波特征参数值均较小,应当作为参数下限之外予以剔除;在地物为水体时,因其反射率较高,通过公式和数据统计表明,峰值较大时,峰度的数值也越大,所以在水体中的峰度越大。考虑到这两个激光点的特殊性,将这两个点作为异常值处理进行剔除,再对上述得到的数据进行均值 (Mean Value) 和均方根误差 (RMSE) 的计算,结果如表 5 所示。

表 5 回波参数统计计算

Tab.5 Statistical calculation of echo parameters

| | Mean value | RMSE |
|--------------|------------|------|
| SNR min | 20.34 | 1.36 |
| Kurtosis min | 1.97 | 0.18 |
| Skewness min | 0.71 | 0.11 |
| Skewness max | 1.74 | 0.14 |

根据算法设计,文中试验选择均值减去或加上 2 倍均方根误差作为回波特征参数的阈值,据此,适用于高分七号激光波形数据的控制点提取标准为:单峰值激光点数据、信噪比 $SNR > 17.62$ 、峰度 Kurtosis > 1.61 、偏度 Skewness 范围 $0.49 \sim 2.02$ 。

2.2.2 准确性验证结果与分析

根据多特征参数约束算法,将四轨验证数据进行高程控制点提取。精确计算激光地面脚点坐标,并根据激光点周围高精度机载 LiDAR 点云内插激光点地面真实高程。由于文中在进行控制点提取时,通过算法流程筛选后激光足印点基本都落在均匀平坦地物,这些地表的坡度基本都在 2° 以下,对于高程精度验证的影响可以忽略不计。对比激光自身高程与真实高程间差值,最后计算整轨高分七号激光点筛选前后的高程差平均值和均方根误差。一般而言,激光控制点的误差等于参考点误差的平方与高程差平方之和的

开方^[25]。由于高分七号卫星目标为实现 1 : 10000 比例尺无控立体测图,其测图需满足 0.3 m 的高程精度^[26],且文中参考数据高程精度为 0.1 m,故文中以高程差位于±0.32 m 范围内作为点数准确性判断的高程精度要求,统计各级约束条件筛选前后的点数,判断符合高程精度要求的点数及在筛选后点中的占比。

通过表 6 可以定量评估根据算法筛选前后与高精度机载 LiDAR 数据对比结果,高程差平均值从 0.153~1.977 m 减少到 0.037~0.476 m,均方根误差从

0.604~2.921 m 降低到 0.288~1.489 m 之间,平均降低了大约 62%。可以看出,经每一级筛选后高程精度都有所提升,一些高程差极大的点都被过滤,最终筛选后的每一波束高程差平均值都在±0.5 m 以内。

由表 7 可以看出,在保证高程精度的同时,数据的保留情况也较好,最终的每一波束的数据保留率平均为 60.18%,符合文中设定的精度要求的激光点平均占比为 90.34%。验证结果表明:文中提出的算法和设定的阈值能够高效、准确地提取出高精度高程控制点。

表 6 筛选前后高程精度验证结果

Tab.6 Verification results of elevation accuracy before and after screening

| Orbit | Beam | Elevation difference/m | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------------------------|-------|-------|--------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | | Mean value/m | | | RMSE/m | | | Min/m | | | Max/m | | |
| | | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 672 | 1 | -0.47 | -0.44 | -0.24 | 2.92 | 2.71 | 1.49 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 5.67 | 2.59 | 0.55 |
| | 2 | -0.80 | -0.49 | -0.38 | 2.80 | 0.63 | 0.44 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 21.82 | 3.13 | 1.14 |
| 5973 | 1 | -0.95 | -0.90 | -0.48 | 0.84 | 0.71 | 0.29 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 3.41 | 2.84 | 1.06 |
| | 2 | -1.98 | -1.03 | -0.42 | 2.45 | 0.58 | 0.45 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 8.65 | 2.29 | 1.17 |
| 11430 | 1 | -0.22 | -0.16 | -0.09 | 0.92 | 0.69 | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.18 | 1.90 | 0.83 |
| | 2 | 0.28 | 0.10 | 0.06 | 2.81 | 0.88 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.32 | 2.84 | 0.97 |
| 11583 | 1 | 0.15 | 0.08 | 0.04 | 0.60 | 0.61 | 0.54 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 2.89 | 1.95 | 0.97 |
| | 2 | 0.38 | 0.19 | 0.15 | 1.74 | 0.69 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9.25 | 3.95 | 1.40 |

注: ①基于有效性筛选后数据; ②基于峰值个数筛选后数据; ③基于回波特征参数筛选后数据

表 7 筛选前后点数情况验证结果

Tab.7 Verification results of laser points before and after screening

| Orbit | | Laser points | | | | | Percentage | |
|-------|--------|--------------|----|----|----|----|------------|---------|
| | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ |
| 672 | Beam 1 | 53 | 50 | 37 | 29 | 25 | 54.72% | 86.21% |
| | Beam 2 | 65 | 60 | 50 | 28 | 28 | 43.08% | 100.00% |
| 5973 | Beam 1 | 74 | 73 | 63 | 48 | 40 | 64.86% | 83.33% |
| | Beam 2 | 96 | 94 | 83 | 77 | 66 | 80.21% | 85.71% |
| 11430 | Beam 1 | 65 | 64 | 59 | 44 | 42 | 67.69% | 95.45% |
| | Beam 2 | 55 | 53 | 45 | 37 | 36 | 67.27% | 97.30% |
| 11583 | Beam 1 | 99 | 86 | 79 | 50 | 46 | 50.51% | 92.00% |
| | Beam 2 | 98 | 91 | 72 | 52 | 43 | 53.06% | 82.69% |

注: ①筛选前验证区域内总点数; ②基于有效性筛选后有效点数; ③基于峰值个数筛选后单峰值点数; ④基于回波特征参数筛选后阈值范围内点数; ⑤符合文中设定精度要求内点数; ⑥筛选后点数的保留率; ⑦符合精度点数在筛选后的占比

根据筛选结果可知,每个参数的设定都起到了一定的作用。如图 9(a) 所示,该波形数据满足文中设定

的信噪比范围,但峰度不在阈值范围内。由卫星影像可知,该点位于耕地区域边缘,地表反射率较低、地形

条件较为复杂,高程精度较低,不符合文中设定的高精度高程控制点,故予以剔除。如图 9(b)所示,该波形数据信噪比和峰度均在阈值要求范围内,但其偏度较低,由卫星影像可知,该点位于地表较为粗糙、地形

有起伏的耕地区域,不符合文中设定的高程精度要求,反映为波形有一定的拖尾现象,利用偏度上限的设定将其剔除。

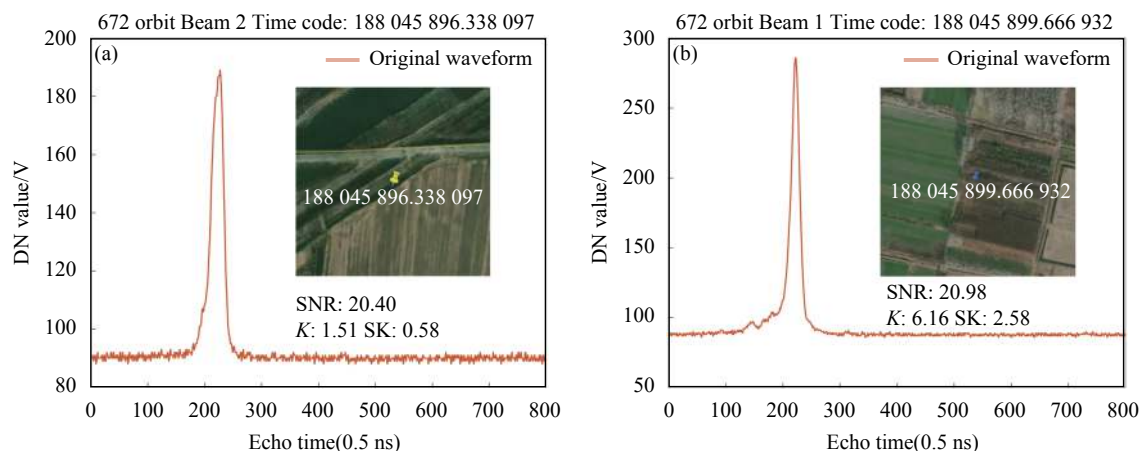


图 9 卫星影像和原始波形对照

Fig.9 Comparison between satellite image and original waveform

3 结论与展望

为从大量的高分七号激光点中提取出高精度控制点,文中提出了一种基于多特征参数约束的星载激光高程控制点提取方法,可作为获取国内外高程控制点的新途径。以我国高分七号卫星为试验对象,先后通过有效数据筛选、单峰数据筛选、参数阈值筛选,统计分析其回波特征参数,提出适应于高分七号卫星激光数据的阈值,并利用高分七号激光数据和机载 LiDAR 点云数据验证提取出控制点的高程精度和阈值的准确性。证明文中的算法可以在高效便捷的同时提取出精度质量高的激光点,可广泛用于全球高程控制点的提取,形成以下结论与展望:

(1) 根据点数验证结果可知,经文中算法进行逐级筛选,符合文中 0.3 m 高程测量精度的点数占比在逐步增加,平均占比从第一步有效数据筛选后的 61.34% 增加到最后的 90.34%;通过机载 LiDAR 参考数据与高分七号卫星激光数据高程差统计结果可得,高程差平均值由有效数据筛选后的 0.153~1.977 m 范围提升到 0.037~0.476 m 范围,高程精度得到了明显的改善,每轨数据的平均高程差都在±0.5 m 以内。

(2) 文中在单峰数据筛选中剔除掉了复杂地形情况,只考虑了平坦地区,导致提取出的激光点密度偏

低。然而,对于陡坎等阶梯状的地物类型,反映出的回波波形多为双波峰数据,根据控制点标准,这些也可被用来生产高程控制点。如何在多峰值数据中提取出高精度控制点,将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] Wang Zijun, Zhang Yang, Liu Dong, et al. Research on the development of detection satellite technology in the novel multi-beam land and ocean lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20211041. (in Chinese)
- [2] Li Guoyuan, Tang Xinming, Zhang Chongyang, et al. Multi-criteria constraint algorithm for selecting ICESat/GLAS data as elevation control points [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(1): 96-104. (in Chinese)
- [3] Liu Bo, Yu Yang, Jiang Shuo. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(7): 190167. (in Chinese)
- [4] Schutz B E, Zwally H J, Shaman C A, et al. Overview of the ICESat Mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 97-116.
- [5] Liu Aobo, Cheng Xiao, Chen Zhuoqi. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264(6): 112571. (in Chinese)

- [6] Tang Xinming, Xie Junfeng, Mo Fan, et al. GF-7 dual-beam laser altimeter on-orbit geometric calibration and test verification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(3): 384-395.
- [7] Wang Mi, Wei Yu, Yang Bo, et al. Extraction and analysis of global elevation control points from ICESat-2/ATLAS data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 184-192. (in Chinese)
- [8] Wang Jin, Zhang Yong, Zhang Zuxun, et al. ICESat laser points assisted block adjustment for mapping satellite-1 stereo imagery [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 359-369. (in Chinese)
- [9] Gonzalez J H, Bachmann M, Scheiber R, et al. Definition of ICESat selection criteria for their use as height references for TanDEM-X [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2750-2757.
- [10] E Dongchen, Shen Q, Ying X U, et al. High-accuracy topographical information extraction based on fusion of ASTER stereo-data and ICESat/GLAS data in Antarctica [J]. *Science in China*, 2009, 52(5): 714-722.
- [11] Duong H, Lindenbergh R, Pfeife N, et al. ICESat full-waveform altimetry compared to airborne laser scanning altimetry over the netherlands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(10): 3365-3378.
- [12] Guo Jinquan, Li Guoyuan, Zuo Zhiqiang, et al. Full waveform data quality and characteristic analysis of GF-7 satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 20200387. (in Chinese)
- [13] Li Song, Zhou Hui, Shi Yan, et al. Theoretical model for return signal of laser altimeter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(1): 33-39. (in Chinese)
- [14] Yang Chenchen, Xie Junfeng, Han Baomin, et al. Analysis of correlation between ICESat/GLAS measurement accuracy and echo waveform [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(2): 327-335. (in Chinese)
- [15] Xie Junfeng, Yang Chenchen, Mei Yongkang, et al. Full waveform decomposition of spaceborne laser based on genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20200245. (in Chinese)
- [16] Cui Chengling. Research on forest tree height extraction for the laser altimeter satellite full waveform data[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [17] Wang Bingtuan. Quick locating algorithm for turning points in discrete point set of plane curve [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2001, 25(6): 85-87. (in Chinese)
- [18] Nie S, Wang C, Li G, et al. Signal-to-noise ratio-based quality assessment method for ICESat/GLAS waveform data [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(10): 103104.
- [19] Lefskya M A, Keller M, Panga Y, et al. Revised method for forest canopy height estimation from Geoscience Laser Altimeter System waveforms [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1(1): 6656-6659.
- [20] Garren S T, Osborne K M. Robustness of T-test based on skewness and kurtosis [J]. *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, 2021, 36(2): 102-110.
- [21] Xie Junfeng, Liu Ren, Wang Zongwei, et al. In-orbit geometric calibration and accuracy evaluation of GaoFen-7 spaceborne laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20200396. (in Chinese)
- [22] Yue Lili. Study on statistical test method of outliers of observation data[D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- [23] Ling Yun. The study of data quality assessment methods[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2015. (in Chinese)
- [24] Li Guoyuan, Tang Xinming, Chen Jiyi, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(10): 1338-1348. (in Chinese)
- [25] Zheng Qi. Laser tracker measurement accuracy analysis and high precision establishment of three-dimensional control network[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (in Chinese)
- [26] Tang X, Xie J, Liu R, et al. Overview of the GF-7 Laser Altimeter System Mission [J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(1): e2019EA000777.