第 XX 卷第 XX 期
XXXX 年 XX 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. XX, No. XX
XX, XXXX

文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-12

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

基于自然地表的星载单光子激光测高数据地形轮廓匹配不确定度分析

周文鑫[1], 周思寒[1], 韩启金[2], 栾 超[3], 王 恒[1], 赵朴凡[4], 李 松[1,5*]

(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;
3. 北京控制与电子技术研究所,北京 100045;
4. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉 430079;
5. 武汉量子技术研究院,湖北 武汉 430010)

摘要:卫星激光测高技术能获取地面目标的准确三维坐标,是一种高精度的对地观测手段。激光测高数据目前已被广泛应用于地形测绘、极地监测、林业调查等领域。基于自然地表的地形轮廓匹配方法将激光测高仪实测的地形轮廓与参考地形数据进行匹配,来确定激光测高数据的位置误差,是目前常用的激光测高仪在轨几何标定和精度检校方法。然而,地形匹配的效果受场地地形、激光数据轨迹长度、激光脚点间隔等多种因素的影响,相关研究尚处于起步阶段。文章针对参与匹配的激光数据轨迹长度以及激光脚点间隔两项影响因素开展研究,通过对目前观测密度最高的ICESat-2卫星的实测数据进行截取和抽稀,构建了一系列激光测高数据集并在北美地区开展了大量实验。通过对实验数据的统计,给出了激光数据轨迹长度以及激光脚点间隔与地形匹配不确定度之间的定量关系。

关 键 词:星载激光测高;单光子激光测高仪;地形匹配;不确定度分析

中图分类号:TP733　　**文献标识码**:A

Uncertainty analysis of terrain profile matching using spaceborne single-photon lidar data over natural surfaces

ZHOU Wen-Xin[1], ZHOU Si-Han[1], HAN Qi-Jin[2], LUAN Chao[3], WANG Heng[1], ZHAO Pu-Fan[4], LI Song[1,5*]

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;
3. Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 100045, China;
4. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
5. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430010, China)

Abstract: Satellite laser altimetry technology enables the acquisition of accurate three-dimensional coordinates of ground targets, serving as a high-precision method for Earth observation. Laser altimetry data have been widely applied in areas such as terrain mapping, polar region monitoring, and forestry surveys. The terrain profile matching method based on natural surfaces aligns the measured terrain profiles from laser altimeters with reference terrain data to determine the positioning errors of laser altimetry measurements. This approach is currently one of the most commonly used methods for the on-orbit geometric calibration and accuracy validation of laser altimeters. However, the effectiveness of terrain matching is influenced by various factors, including surface relief, along-track length of laser altimetry data, and the spacing of laser footprints. Related research is still in its early stages. This paper focuses on two key factors affect-

收稿日期:2025-01-23,**修回日期**:2025-03-20　　**Received date**:2025-01-23,**Revised date**:2025-03-20

基金项目:航天系统部装备预先研究项目;国家自然科学基金(42371440、41971302)

Foundation items: Supported by the Equipment Pre-research Project of Aerospace Systems Department, the National Natural Science Foundation of China (42371440, 41971302)

作者简介(Biography):周文鑫(1998—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究领域为星载激光测高仪在轨标定. E-mail: zwx1218@whu. edu. cn

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

ing terrain matching: the along-track length of the laser data and the spacing of laser footprints. Using the ICESat-2 satellite, which provides the highest observation density among current missions, we extracted and downsampled its measurement data to construct a series of laser altimetry datasets. Extensive experiments were conducted over regions in North America. Based on statistical analysis of the experimental results, this study quantifies the relationship between terrain matching uncertainty, laser data track length, and footprint spacing.

Key words: spaceborne laser altimetry, single-photon laser altimeter, terrain matching, uncertainty analysis

引言

卫星激光测高技术是一种主动式的遥感手段，它根据激光脉冲的飞行时间获得卫星与地表目标间的精确距离值[1]，结合卫星位姿信息可以获得目标的精确三维坐标。美国冰、云和陆地高程2号卫星（Ice, Cloud and Land Elevation Satellite-2, ICESat-2）是目前最先进的激光测高卫星之一[2]，其搭载的单光子激光测高仪能以远超传统线性激光测高仪的激光脉冲发射频率进行对地观测，从而在沿轨方向上获得极高密度的地表高程信息[3]，在地形测绘[4-6]、极地监测[7-8]、林业调查[9-10]等研究领域获得了广泛的应用。

目前，自然地表的地形轮廓匹配方法是一种被广泛应用于星载激光测高仪的在轨几何标定以及精度检校的方法[11-13]。该方法将激光测高仪实测的地形轮廓与参考地形数据如数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）进行匹配，从而确定实测地形轮廓中各激光脚点的整体位置偏移量。地形轮廓匹配方法最早由Filin等人针对冰、云和陆地高程卫星（Ice, Cloud and Land Elevation Satellite, ICESat）所搭载的地球科学激光测高系统（Geoscience Laser Altimeter System, GLAS）的在轨标定任务所设计[14]，但由于这一方案需要大面积建设具备一系列特定坡度的地面场地，因而事实上并不具备可实施性[15]。唐新明、谢俊峰、易洪等人按照这一思路，利用自然地表在坡度上的遍历性，成功将地形轮廓匹配方法应用于我国资源三号01星以及高分七号所搭载的线性体制激光测高仪的粗标定中[16-19]。该方案将测高仪实测地形轮廓与30 m分辨率的DEM进行匹配，能够将激光脚点定位误差降低至几十米的量级，为后续使用地面探测器进行的精标定作业提供有力支撑。

单光子体制的激光测高仪具有极高的对地观测密度，能有效降低匹配所需的场地面积，因而基于地形匹配的方法在单光子激光测高数据的标定和检校中的应用更为广泛。南亚明、赵朴凡等人设计了一系列针对单光子激光测高仪的地形匹配在轨标定方法，可在10~20 km场地范围内实现精确的在轨几何标定[20-22]。Neuenschwander[23]、Schenk[24]、Magruder[25-26]、Malambo[27]、Liu[28]等人利用高精度机载激光雷达数据或数字表面模型（Digital Surface Model, DSM），通过地形匹配的方式在北美以及南极等多地对ICESat-2数据产品开展了大量的平面和高程精度检验工作。

在上述的研究工作，研究人员多次提到了基于自然地表的地形匹配方法的实施效果受场地地形、激光脚点数目、激光脚点间隔等多种因素的影响。例如，对于激光脚点间隔较大的线性激光测高仪，要达到较为理想的匹配效果，地形匹配所使用的激光数据在地表的轨迹长度往往要达到百公里以上[13,16,29]，而对于激光脚点密度更高的单光子激光测高仪往往在10~20 km的长度内就可以实现较好的匹配效果[21]。目前，对于场地地形、激光脚点数目、激光脚点间隔等因素对地形匹配不确定度（或称为地形匹配结果的精度）的影响主要以定性研究为主，缺少定量的分析与研究。针对这一问题，本文利用目前具备最高观测密度的ICESat-2实测数据，采用数据截取和抽稀的方式构建不同轨迹长度和激光脚点间隔的数据集，开展了大量实验。通过对实验结果的统计，定量分析参与匹配的激光数据轨迹长度以及激光脚点间隔对地形匹配不确定度的影响，为后续地形匹配方法的合理应用提供了指导。

1 地形匹配原理与不确定度评估方法

1.1 地形匹配基本原理

自然地表地形匹配方法以高精度的先验地形数据DEM作为参考，将由先验地形数据得到的理论地形轮廓与卫星实测的地形轮廓进行匹配，依据残差最小原则来估计出地面激光脚点的整体几何偏移（即系统误差）。

地形匹配的基本原理如图1所示，将组成激光测高仪实测地形轮廓的激光脚点记作点集P，如式

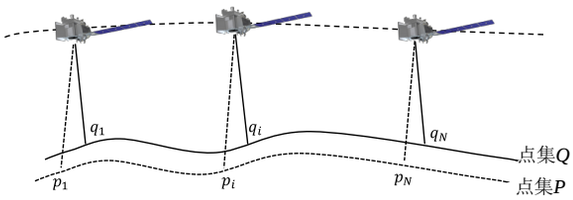

图1　自然地表地形轮廓匹配的实现原理

Fig. 1　Principle of terrain profile matching based on natural surfaces

(1)所示:

$$P = \{ (x_i, y_i, z_i), i = 1,2,3,\cdots,N \} \quad , \quad (1)$$

集合P中共有N个离散脚点,其中,(x_i, y_i, z_i)为集合P中第i个激光脚点的三维坐标。而由参考DEM所得到的理论地表高程轮廓可表示为集合Q:

$$Q = \{ (x_i, y_i, h_i) \mid h_i = D(x_i, y_i), (x_i, y_i) \in P, i = 1,2,3,\cdots,N \} \quad , \quad (2)$$

其中,$D(x_i, y_i)$表示参考DEM在平面坐标(x_i, y_i)处的高程值。在激光测高仪实际工作过程中,由于系统误差的存在,激光测高数据中激光脚点坐标(x_i, y_i, h_i)与其真值之间会存在一定的系统偏移,将这一偏移量记作(dx, dy, dz),则在地形匹配中作为参考真值的DEM高程轮廓Q变为如下形式:

$$Q = \{ (x_i + dx, y_i + dy, h_i + dz) \mid h_i = D(x_i + dx, y_i + dy), (x_i, y_i) \in P, i = 1,2,3,\cdots,N \} \quad , \quad (3)$$

此时,可依据激光测高仪实测地形轮廓P与由DEM得到的参考地形轮廓Q之间的相似程度来估计激光脚点坐标的系统偏移量。通常选择两者之间的均方根误差(RMSE)最小作为评价两者相似程度的标准。即存在一组偏移量(dx, dy, dz),满足下式:

$$(dx, dy, dz) = \underset{(dx, dy, dz)}{\operatorname{argmin}} \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(z_i - h_i - dz)^2}, \{ z_i \in P, h_i \in Q \}, \quad (4)$$

式中,h_i是由DEM得到的第i个光斑的理论高程值,它是平面位置$(x_i + dx, y_i + dy)$处的DEM高程,也是关于(dx, dy)的函数。显然,两者之间的RMSE越小,说明集合P和Q在几何上的相似程度越高。为了求解式(4),需要在dx、dy、dz三个方向上进行搜索,为了降低运算复杂度,不妨令$dz \equiv \overline{(z_i - h_i)}$,则式(4)所示的三元优化问题简化为式(5)所示的二元优化问题:

$$(dx, dy) = \underset{(dx, dy)}{\operatorname{argmin}} \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[(z_i - h_i) - \overline{(z_i - h_i)}\right]^2}, \quad (5)$$

此时,直接将理论高程轮廓和实测高程轮廓之间的残差标准差作为误差评判标准。图2的曲面直观显示了不同平面偏移量对应的激光点高程误差分布。

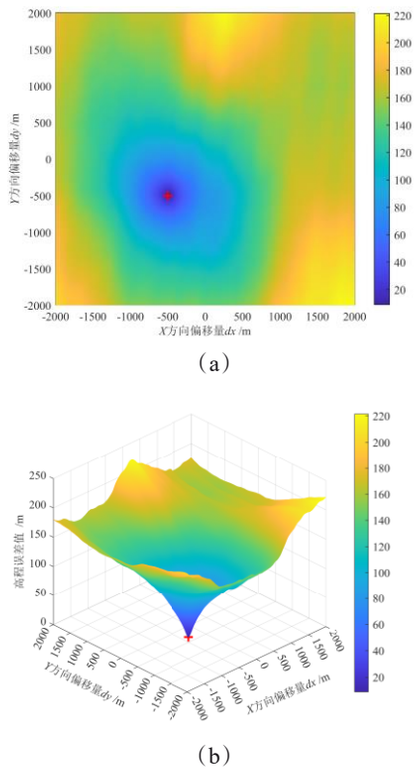

图2　高程误差分布:(a) 俯视图;(b) 侧视图

Fig. 2　Elevation error distribution: (a) top view; (b) side view

不同平面偏移量对应着不同的高程误差。高程误差越小,说明激光测高仪实测地表高程轮廓P与由DEM得到的理论高程轮廓Q相似程度越高。可以明显看到,误差分布中存在一个极小值(红色"+"),此处对应的一组偏移量即为与实际地理位置最接近的偏移量,也即式(5)中需要求解的(dx, dy)。可见地形匹配的实现就是通过不断调整偏移量的取值,使得理论地形轮廓与卫星实测地形轮廓趋于一致,最终寻找到一组最优偏移量的过程。

1.2　地形匹配不确定度评估方法

为了进一步评估各影响因素对地形匹配的影响,本研究中采用地形匹配不确定度作为衡量指标。本节提出了一种地形匹配不确定度的理论评估方法。如1.1节所示,理论上存在一组偏移量(dx, dy),即图2所示的高程误差分布图中的极小值

点，能够使得$P \to Q$。理想情况下，图2所示的高程误差分布为一个光滑的曲面，因而存在唯一的极小值点。但实际情况中由于激光测高数据和参考DEM中存在一定的随机误差，导致高程误差随平面偏移量的分布不再是一个光滑的曲面，如图3(a)所示，沿图中红线方向在(a)所示高程误差分布图中取得了一个剖面(图3(b))，图3(c~d)为局部放大图。从图3(d)中可见，理论上该剖面数据对应的高程误差关于dx的分布曲线是一条光滑平整的曲线，然而由于随机误差的存在，实际匹配得到的极小值点与理想曲线的极小值点之间存在一定误差，实际匹配结果将产生一定的不确定度。

显然，匹配结果的不确定度与高程误差分布图中随机误差量级以及高程误差分布的趋势相关，当极小值点附近的曲面梯度越大，且随机误差越小时，匹配不确定度就越小。

如图4所示，将高程误差分布图中所包含的随机误差记为σ_{match}，它是理想高程误差分布与实际高程误差分布之差。实际应用中，理想高程误差分布可以通过对实际高程误差分布进行曲面拟合而得到。将理想高程误差分布中极小值点的高程误差值记作$\hat{e}_{\min}$，那么在纵轴$\left[\hat{e}_{\min} - 3\sigma_{\text{match}}, \hat{e}_{\min} + 3\sigma_{\text{match}}\right]$区间内，理想高程分布曲线在横轴上的投影，就是由$\sigma_{\text{match}}$所带来的地形匹配结果$dx$的不确定度(记作$\sigma_{dx}$)，$\sigma_{dy}$同理。同时可以看出，在先验地形数据和激光数据的随机误差较大且地形起伏较小的区域，匹配结果不确定度更低。

由上述分析可知，地形匹配结果的不确定度与匹配中输入数据的随机误差σ_{match}量级以及匹配中高程误差分布的趋势有关。因而在实际使用中，通过曲面拟合的方式确定随机误差σ_{match}量级以及高程误差分布趋势。

如图5所示，通过曲面拟合的方式，可以获得高程误差的分布趋势，这一趋势对应于图4中的理想高程误差曲线。在此基础上，实际高程误差与拟合曲面之间的差别可作为随机误差σ_{match}，计算方法如式(6)所示，其中，e_k是根据式(5)计算得到的在不同平面偏移(dx, dy)处的高程误差值，$\hat{e}_k$是拟合之后的

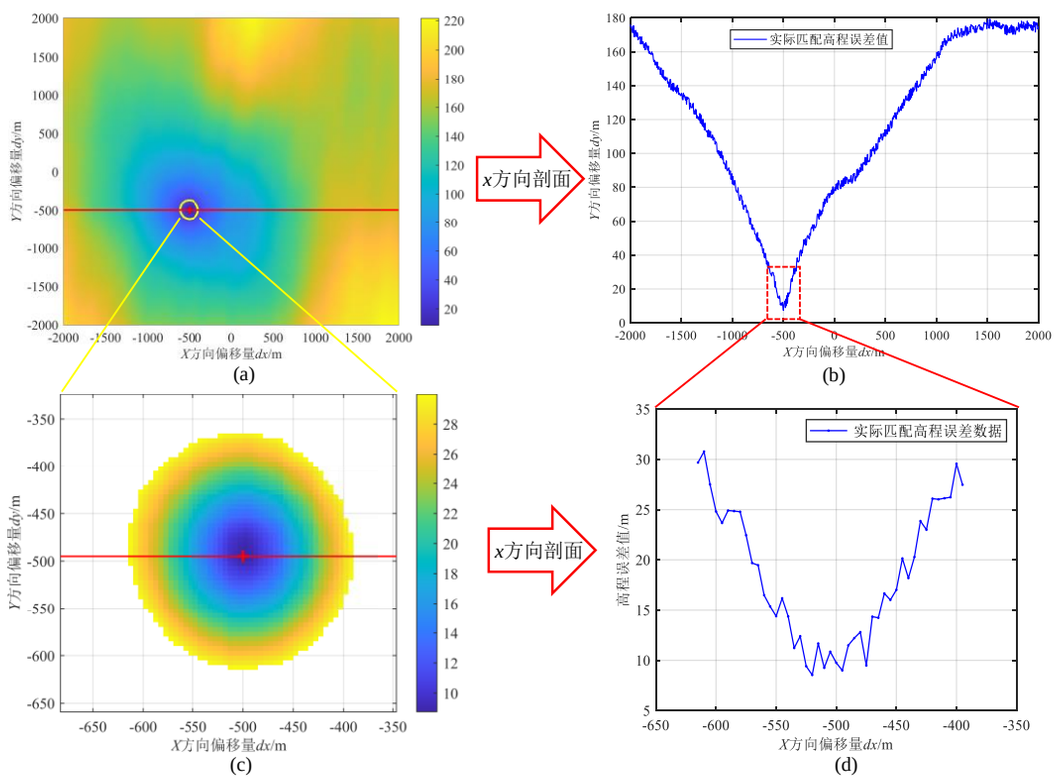

图3 极小值点附近x方向上实际高程误差分布：(a) 总体高程误差分布；(b) 极小值点处x方向误差分布；(a) 极小值点附近高程误差分布；(b) 极小值点处x方向剖面误差分布局部图

Fig. 3 Distribution of actual elevation errors in the x-direction near the local minimum point: (a) overall elevation error distribution; (b) error distribution in the x-direction at the minimum point; (c) elevation error distribution near the minimum point; (d) partial profile of x-direction error distribution at the minimum point

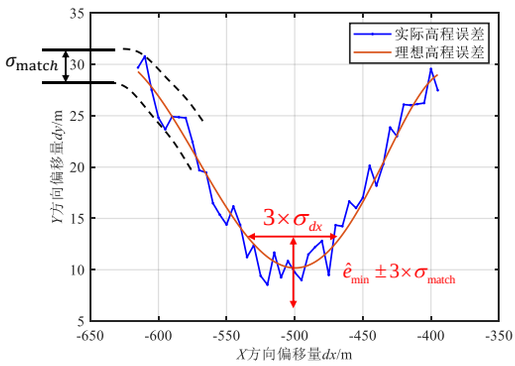

图4　随机误差 σ_{match} 和高程误差分布趋势对匹配不确定度大小的影响

Fig. 4　Random error σ_{match} and elevation error distribution trend affecting the magnitude of matching uncertainty

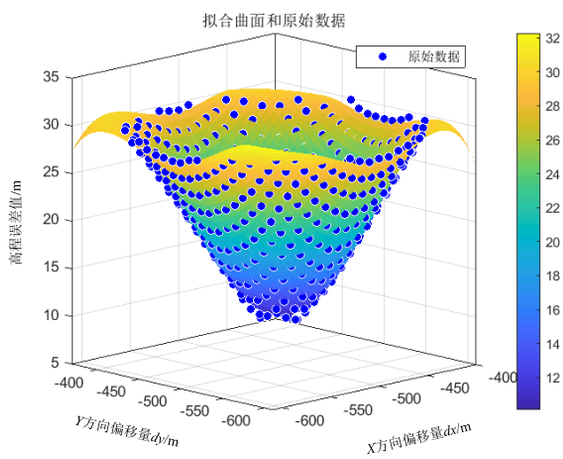

图5　拟合曲面和原始高程误差分布曲面

Fig. 5　Fitted surface and original elevation error distribution surface

高程误差值。

$$\sigma_{match}=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}\left(e_k-\hat{e}_k\right)^2},k=1,2,3,\cdots,M\ ,\quad(6)$$

其中,M 为在不同平面偏移点(dx,dy)参与拟合的高程误差值的个数,即图5中蓝色点的个数。依据上述原理计算地形匹配不确定度的具体流程如图6所示。

2　实验方案与数据

2.1　实验方案

本文通过对不同区域的地形匹配结果进行统计,分析了激光数据的轨迹长度和激光脚点间隔对地形匹配不确定度的影响,构建不同轨迹长度和激光脚点间隔的激光测高数据的方法如下。

本文在ICESat-2实测数据的基础上,通过数据截取的方式构建了大量地面轨迹长度为20 km、40 km、60 km的激光测高数据集作为地形匹配的输入。单轨ICESat-2数据的长度一般大于3 500 km,本文采用滑动截取的方式来获得多组固定轨迹长度的激光测高数据。如图7所示,以20 km的沿轨距离为例,按照20 km的固定长度的滑动窗从一整轨ICESat-2数据中进行截取,每次截取滑动窗范围内的信号光子事件组成一组激光测高数据,作为地形匹配输入数据。以滑动间隔2 km、窗长20 km为例,一轨3 500 km的ICESat-2数据最多能够截取出(3 500-20)/2=1 740组激光测高数据。

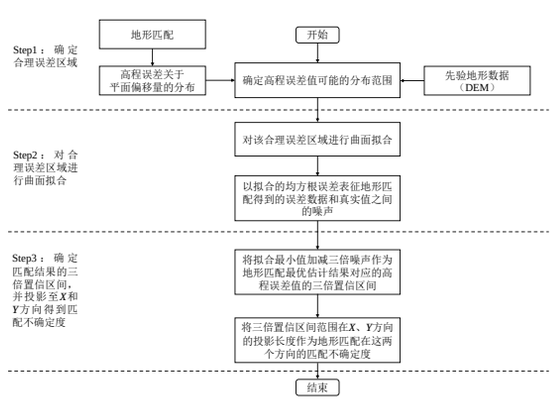

图6　地形匹配不确定度计算流程

Fig. 6　The terrain matching uncertainty calculation process

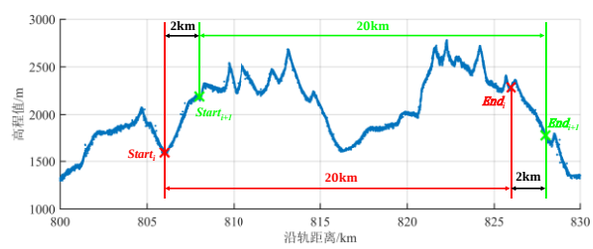

图7　轨迹截取示意图

Fig. 7　Schematic diagram of track extraction

截取时具体的实现公式如下:

$$t_{start}^{ic}=\underset{t}{\operatorname{argmin}}\left|\vec{t}-\left(t_1+2*i_c/v\right)\right|\quad,\quad(7)$$

$$t_{end}^{ic}=\underset{t}{\operatorname{argmin}}\left|\vec{t}-\left(t_{start}^{ic}+l_c/v\right)\right|\quad,\quad(8)$$

在实际的数据截取过程中,以光子事件的时间标签作为截取的依据,如式(7)和式(8)所示,式中 i_c 表示第 i 次截取,t_{start}^{ic} 和 t_{end}^{ic} 分别为第 i 次截取的起点和终点的时间标签。l_c 为想要截取的沿轨距离,v 为ICESat-2卫星轨道速度,约为7.612 3 km/s,$\vec{t}$是一个列向量,表示该轨ICESat-2数据中所有信号光子的时间标签。

由于不同激光测高仪具有不同的激光脚点间

隔，因此有必要分析激光脚点间隔对地形匹配的影响。本文通过对高密度激光测高数据进行抽稀的方式获取不同激光脚点间隔的激光测高数据，仍然使用ICESat-2观测数据作为原始数据，ICESat-2卫星的飞行速度约7.6123 km/s，激光发射重复频率为10 kHz，地面光斑的沿轨方向间隔约为0.761 23 m[30]。点云数据抽稀的具体实现步骤如下：

Step1：将激光数据划分成若干个抽稀小段

记抽稀间隔长度为l_s，根据ICESat-2卫星飞行速度v，计算出相邻脚点沿轨间隔l_s对应的卫星飞行时间$t_s = l_s/v$。激光数据中共包含N个被识别为地面的信号光子，将激光数据按照相邻脚点沿轨间隔l_s进行划分，一共可以划分成M个沿轨长度为l_s的抽稀小段，此时将每一个点云光子携带的时间标签t_i除以t_s并向上取整，结果p_i即为地面光子在抽稀过程中被划分到的抽稀小段的序号：

$$p_i = \lceil (t_i - t_1)/t_s \rceil, i = 1,2,3,\cdots,N, \tag{9}$$

对集合$\vec{p} = \{p_i | p_i \in Z^+\}_{i=1}^N$进行去重操作得到集合$\vec{P} = \{1, 2, 3, \cdots M\}$，此时该集合内的元素表示每一个抽稀小段的序号。由于云层遮挡等原因，激光数据可能会出现部分缺失，因此当某一个抽稀小段内没有地面光子时，集合$\vec{P}$并不完全等同于正整数集合$\{1, 2, 3, \cdots, M\}$。

Step2：生成抽稀之后的脚点三维坐标序列

抽稀之后，每一个抽稀小段内最多只会有一个地面光子，而抽稀的过程就是将每一个抽稀小段内所有地面光子的三维坐标求取平均值，作为抽稀之后的光子点云的三维坐标序列$[\vec{X}^{\text{spa}}, \vec{Y}^{spa}, \vec{Z}^{\text{spa}}]$：

$$\begin{cases} \vec{X}^{\text{spa}} = \left\{ X_k^{\text{spa}} | X_k^{\text{spa}} = \sum_{i=p_i} X_i, X_i \in \vec{X} \right\} \\ \vec{Y}^{\text{spa}} = \left\{ Y_k^{\text{spa}} | Y_k^{\text{spa}} = \sum_{i=p_i} Y_i, Y_i \in \vec{Y} \right\} \\ \vec{Z}^{\text{spa}} = \left\{ Z_k^{\text{spa}} | Z_k^{\text{spa}} = \sum_{i=p_i} Z_i, Z_i \in \vec{Z} \right\} \end{cases}, \tag{10}$$

其中，$[\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}]$为原始激光数据中地面光子的三维坐标序列。

Step3：生成抽稀之后的时间标签序列

根据集合$\vec{P}$，为每一个抽稀小段的光子赋予一个新的时间标签$t_k^{\text{spa}} = t_s \cdot P_k$，此时得到抽稀之后的光子时间标签序列$\vec{t}_k^{\text{spa}} = \{t_k^{\text{spa}}\}_{k=1}^M$。

图8以将一轨3 km长度的点云数据的脚点间隔抽稀为10 m为例，展示点云抽稀的具体实现过程。

图8(a)为一条3 km长度的地表光子点云数据，其相邻脚点之间的间隔约为0.76 m，图8(b)为某一10 m抽稀间隔内的点云数据的局部放大图。按照本文的点云抽稀方法，将8图(b)中所有光子的经纬高坐标求取平均值，得到该抽稀间隔内的抽稀脚点坐标。

2.2 研究区域与数据

本文的实验区域主要选择在美国中西部和加拿大西南部地区，覆盖范围为125°W至85°W，27.5°N至60°N。其中美国西部和加拿大西南部主要为山区，包含落基山脉、海岸山脉等一系列山脉，平均海拔2 000~3 000 m，平均坡度为10°~25°，包含了裸露岩地、植被灌木、冰川积雪等地表覆盖类型，而美国中部为广阔的内陆平原，地势平坦，多为丘陵和农田所覆盖。

本文所使用的激光测高数据来自ICESat-2卫星的164轨ATL03级数据产品，其包含了激光脚点的经纬度和高程坐标。实验所使用的激光数据轨迹及ATL03数据产品分别见图9和表1。

作为地形匹配的另一项重要输入，本文所使用的参考DEM数据为NASA和日本经济产业省(METI)联合发布的ASTER GDEM v3数据集[31](Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model)。该数据

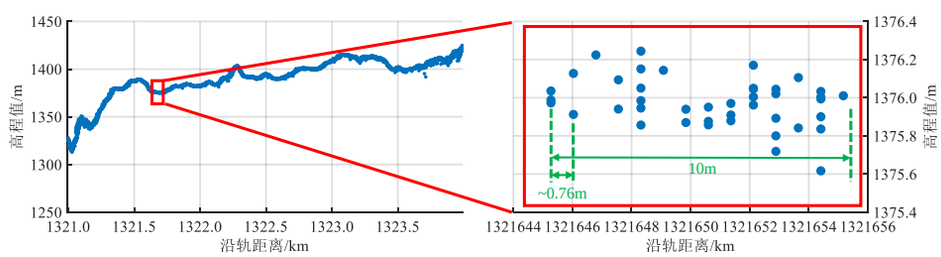

图8 点云数据抽稀中间过程：(a) 3 km的未抽稀点云数据；(b) 10 m抽稀间隔的局部放大图：(a) (b)

Fig. 8 Intermediate steps of point cloud data downsampling: (a) 3 km original point cloud data; (b) local magnified view after downsampling at 10 m intervals

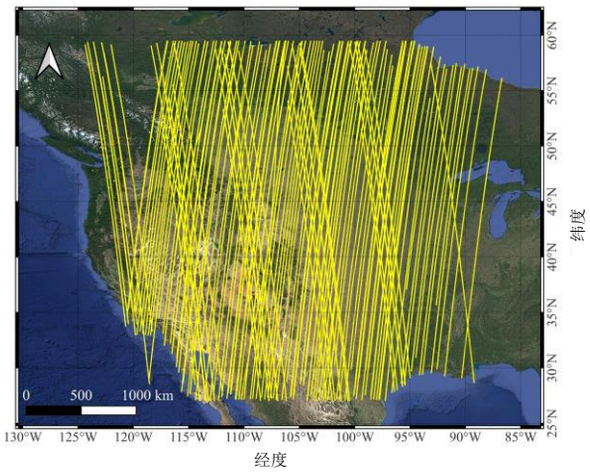

图9　实验使用的ICESat-2轨迹图

Fig. 9　ICESat-2 track map used in the experiment

表1　本文使用的激光测高数据

Table 1　Laser altimetry data used in this study

项目	数据产品	数据集	变量名	变量完整名称和描述
光子事件的地理坐标	ATL03	/gtx/heights	lat_ph lon_ph h_ph	光子事件的经纬度和高程坐标（WGS84椭球）
激光脉冲发射时刻	ATL03	/gtx/heights	delta_time	GPS时间下的激光脉冲发射时刻
信号光子的置信度	ATL03	/gtx/heights	signal_conf_ph	光子事件被判别为信号的置信度等级

集涵盖了从北纬83度到南纬83度的所有地球陆地表面，提供了约30 m（1 arc sec）的空间分辨率的数字高程数据。该数据的标称垂直精度约为17 m（LE95）[32]，而水平精度则为30 m（LE90）[33]。

3　结果与分析

本研究中分析了地面轨迹的沿轨长度和点云数据抽稀间隔对地形匹配效果的影响，根据大量匹配数据的统计分析结果得到结论。

轨迹长度直接决定了激光测高仪覆盖的区域范围，更长的轨迹在匹配时能够提供更多的地形特征信息，有利于地形匹配算法的稳定收敛，也有利于提高地形匹配结果的不确定度，同时带来的计算压力将会对星载处理器造成不小的资源占用和数据处理负担。总的来说，轨迹越长，地形匹配的稳定性和不确定度就更高。

本研究使用了164条ICESat-2轨迹数据进行统计分析，从原始ICESat-2数据中按照第二节的方案抽取了多组在20 km、40 km、60 km轨迹长度的激光数据，并使用这些激光数据作为输入计算地形匹配结果的不确定度（按第一节所示方法）。以具体数据为例，展示实验的分析过程。在164条ICESat-2轨迹中，选取轨迹编号为0059-17-gt2r（参考地面轨迹号-轨道圈号-波束号）的轨迹，从该轨迹位于美国内华达州境内的部分中，选取出三组长度分别为20 km、40 km和60 km的激光数据，图10~12分别展示了这三组激光数据在30~150 m脚点间隔下的地形匹配的高程误差分布情况，图中横轴和纵轴分别为平面偏移量 dx 和 dy。

由图10~12可见，随着地形匹配所使用的激光数据轨迹长度的减小以及激光脚点间距的增加，高程误差分布图中极小值点附近的随机误差明显增大，依据第一节所述匹配不确定度的影响因素，这意味着地形匹配结果的不确定度将显著增加。特别是在极端情况下，如激光数据轨迹长度20 km、激光脚点间隔150 m时，高程误差分布出现了多极值点的情况，这意味着此时地形匹配算法将无法正常收敛。

图13中定量地展示了图10~12所示地形匹配结果的不确定度大小。从结果来看，随着脚点间隔的增大、参与匹配的激光数据轨迹长度的减小，匹配不确定度随之增加，这意味着更长轨迹和更小脚点间隔更利于提高匹配的稳定性和不确定度。然而，当激光脚点间隔降低至与参考DEM分辨率（30

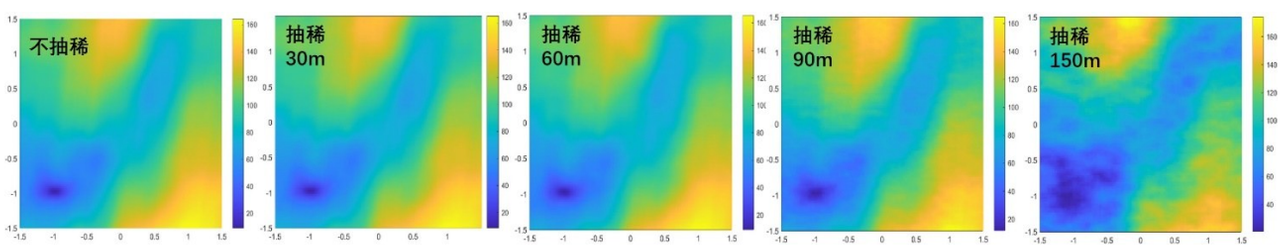

图10　20 km轨迹长度下不同抽稀间隔的高程误差分布图

Fig. 10　Elevation error distribution at different decimation intervals for a 20 km track

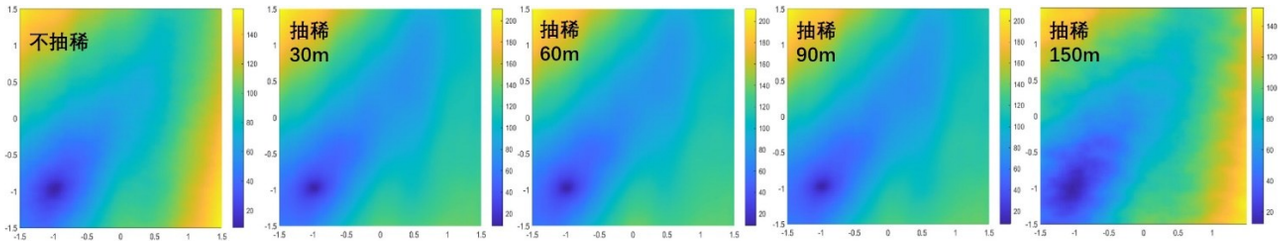

图11 40 km轨迹长度下不同抽稀间隔的高程误差分布图

Fig. 11 Elevation error distribution at different decimation intervals for a 40 km track

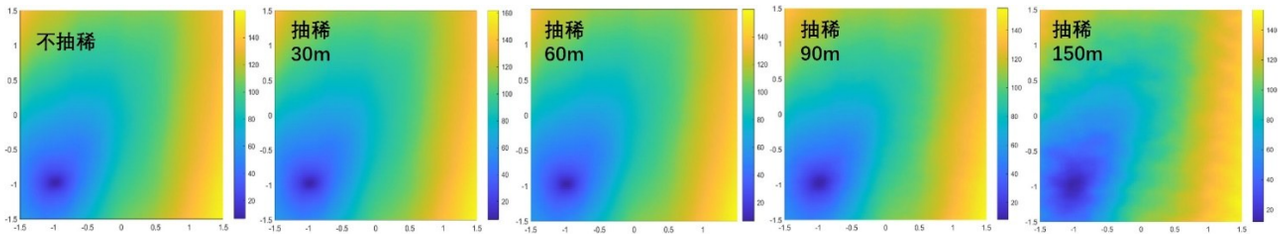

图12 60 km轨迹长度下不同抽稀间隔的高程误差分布图

Fig. 12 Elevation error distribution at different decimation intervals for a 60 km track

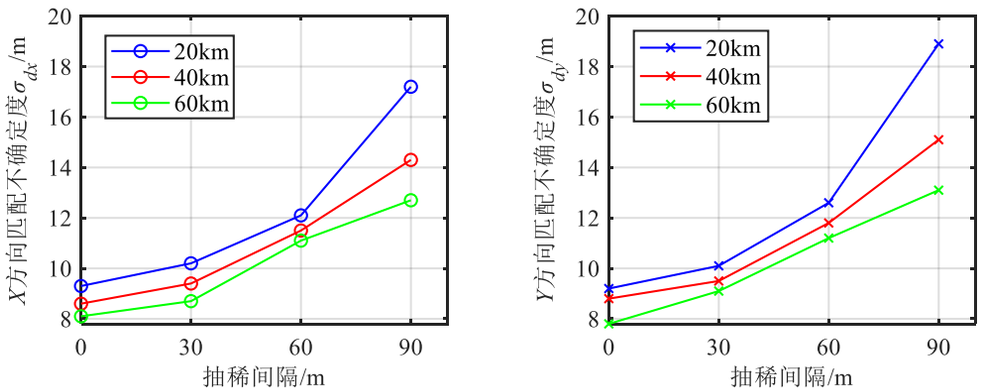

图13 20 km、40 km、60 km三种轨迹长度下不同抽稀间隔的匹配不确定度

Fig. 13 Matching uncertainty at different decimation intervals for 20 km, 40 km, and 60 km tracks

m)一致时,其对地形匹配结果的不确定度的影响大幅下降。

本文对图9中所示的164轨ICESat-2数据的地形匹配不确定度按照第二节所述方案进行了统计分析。图14与图15分别展示了在不同激光数据轨迹长度以及不同激光脚点间隔下,地形匹配结果的不确定度分布情况。图14以箱线图展示了激光数据轨迹长度为20 km、40 km、60 km时地形匹配结果不确定度的统计结果,20 km、40 km、60 km条件下分别使用了541353、466503、487679组数据进行实验和统计,图14显示了不同条件下匹配结果的不确定度的最大值、最小值、平均值、中位数以及75%和25%分位的范围。

图15则以箱线图展示了激光脚点间隔为30 m、

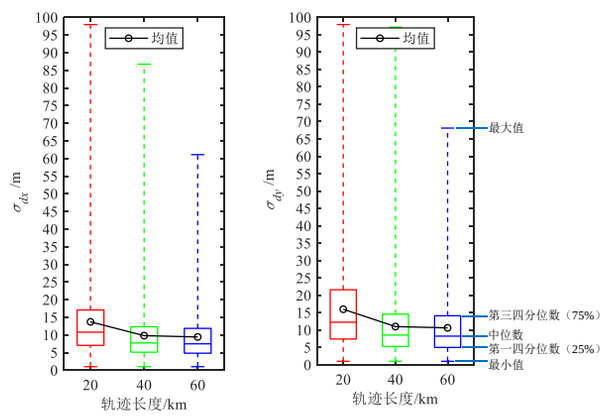

图14 20 km、40 km、60 km轨迹长度下的地形匹配不确定度分布情况

Fig. 14 Distribution of terrain matching uncertainty for 20 km, 40 km, and 60 km tracks

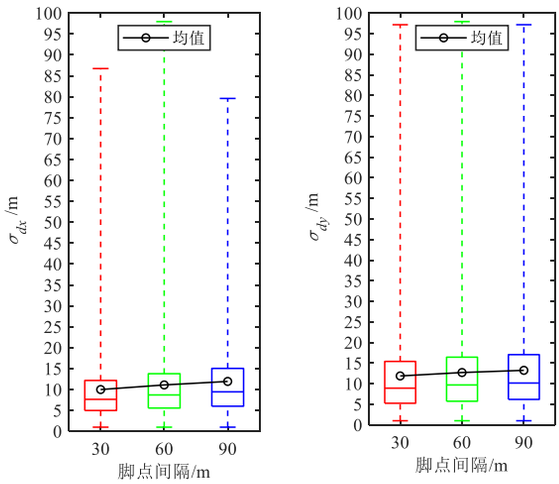

图 15　30 m、60 m、90 m 脚点间隔下的地形匹配不确定度分布情况

Fig. 15　Distribution of terrain matching uncertainty for footprint intervals of 30 m, 60 m, and 90 m

60 m、90 m 时地形匹配结果不确定度的统计结果，30 m、60 m、90 m 条件下分别使用了 511453、497009、487046 组数据进行实验和统计。

由箱线图可以看到，当轨迹长度在 20 km 时，地形匹配结果（dx 和 dy）的不确定度约为 7.1~17.0 m 和 7.4~21.6 m。轨迹长度在 40 km 时，地形匹配结果的不确定度约为 5.1~12.3 m 和 5.3~14.6 m。轨迹长度在 60 km 时，地形匹配结果的不确定度约为 4.8~11.9 m 和 4.9~14.1 m。同时，随着激光数据轨迹长度的增加，四分位距（箱体长度）显著下降，表示地形匹配算法的稳定性显著上升。

而当激光脚点间隔在 30 m 时，地形匹配结果（dx 和 dy）的不确定度约为 4.9~12.1 m 和 5.3~15.4 m。激光脚点间隔在 60 m 时，地形匹配结果的不确定度约为 5.6~13.8 m 和 5.7~16.4 m。激光脚点间隔在 90 m 时，地形匹配结果的不确定度约为 6.0~15.1 m 和 6.2~17.1 m。

综上，在使用 30 m 分辨率参考 DEM 进行匹配时，建议保证所使用的激光数据轨迹长度不低于 40 km，激光脚点间隔不超过 30 m，如此，地形匹配结果的不确定度大多保持在 16 m 以下。

同时，本研究还定量分析了随机误差 σ_{match} 量级对于地形匹配不确定度的影响，图 16~18 为 164 轨 ICESat-2 数据在 20 km、40 km、60 km 三种轨迹长度以及 30 m、60 m、90 m 抽稀间隔情况下进行地形匹配之后得到的不确定度和随机误差 σ_{match} 量级之间的关系。

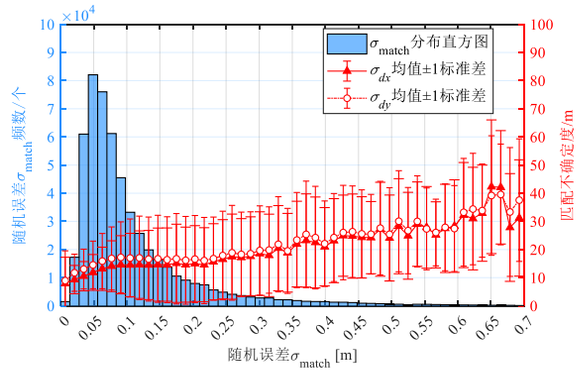

图 16　20 km 轨迹长度下随机误差 σ_{match} 量级对匹配不确定度大小的影响

Fig. 16　Effect of random error magnitude σ_{match} on matching uncertainty at a trajectory length of 20 km

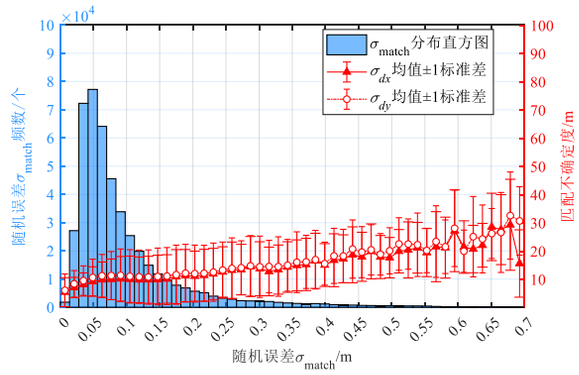

图 17　40 km 轨迹长度下随机误差 σ_{match} 量级对匹配不确定度大小的影响

Fig. 17　Effect of random error magnitude σ_{match} on matching uncertainty at a trajectory length of 40 km

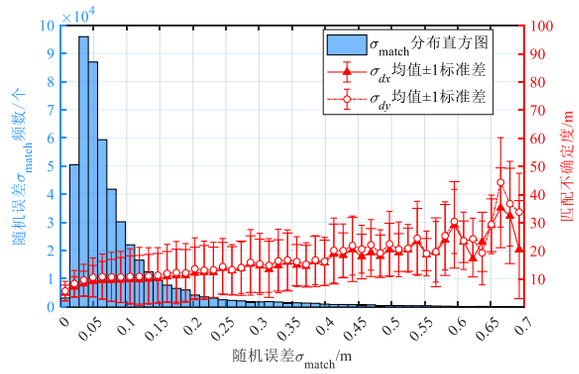

图 18　60 km 轨迹长度下随机误差 σ_{match} 量级对匹配不确定度大小的影响

Fig. 18　Effect of random error magnitude σ_{match} on matching uncertainty at a trajectory length of 60 km

由图可知，20 km、40 km 和 60 km 三种轨迹长度下，随机误差 σ_{match} 主要集中在 0.03~0.11 m 范围。

随着轨迹长度的增加，σ_{match}频数峰值对应的σ_{match}值呈下降趋势。此外，随机误差σ_{match}增大时，地形匹配不确定度的均值和离散程度亦相应增大。

图19~21为激光数据在抽稀间隔30 m、60 m、90 m的情况下，随机误差σ_{match}量级对匹配不确定度大小的影响。

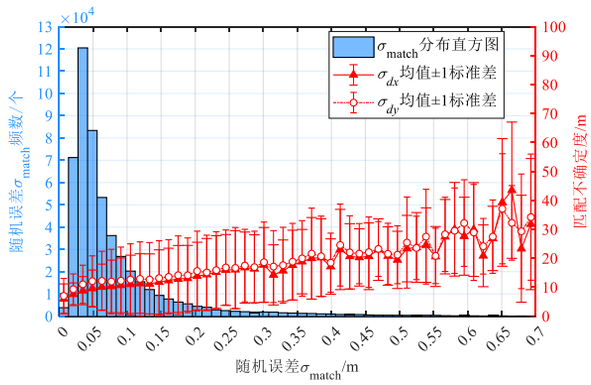

图19 30 m抽稀间隔下随机误差σ_{match}量级对匹配不确定度大小的影响

Fig. 19 Effect of random error magnitude σ_{match} on matching uncertainty with a 30 m subsampling interval

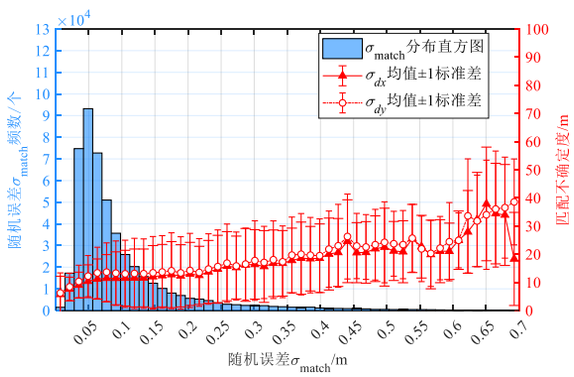

图20 60 m抽稀间隔下随机误差σ_{match}量级对匹配不确定度大小的影响

Fig. 20 Effect of random error magnitude σ_{match} on matching uncertainty with a 60 m subsampling interval

图示结果表明，30 m、60 m和90 m三种抽稀间隔条件下，随机误差σ_{match}主要集中在0.03~0.1 m范围。当抽稀间隔增大时，σ_{match}频数峰值对应的σ_{match}值也随之上升。与此同时，随机误差σ_{match}增大将导致地形匹配不确定度的均值以及离散性同步增大。

4 结论

星载光子计数体制激光测高仪的在轨几何标定对于保障激光测高数据精度至关重要。基于已有的地形匹配理论模型，本文以ICESat-2数据为原始数据，通过截取和点云抽稀得到大量不同轨迹长度和脚点间距激光数据集合，并根据对这些数据进行地形匹配的统计结果分析了这两者对地形匹配不确定度的影响。研究结果表明：增加轨迹长度可以增强匹配算法对地形起伏的解析能力，从而有效降低高程匹配误差。在实际应用中，通常需要权衡轨迹长度的选择，以达到匹配不确定度与计算效率的最佳平衡。同时，不同脚点间距的分析表明，较小的脚点间距能够捕获更精细的地形起伏特征，有助于提高匹配不确定度，但脚点间距过小会导致数据冗余。本文通过对20 km、40 km、60 km轨迹长度和30 m、60 m、90 m脚点间距的组合实验，发现在40 km轨迹长度以及30 m脚点间距的情况下，地形匹配不确定度大多保持在16 m以下。本文的研究成果为星载单光子激光测高仪的观测数据在地形匹配中的应用提供了实践指导。

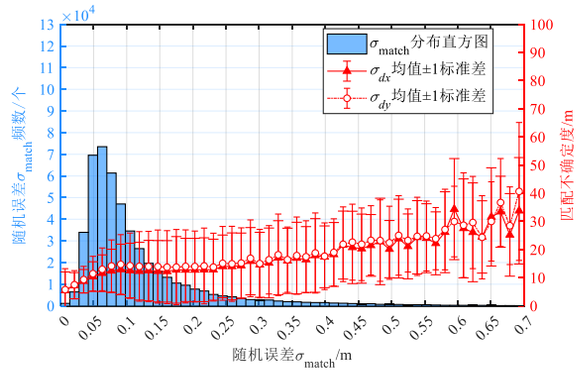

图21 90 m抽稀间隔下随机误差σ_{match}量级对匹配不确定度大小的影响

Fig. 21 Effect of random error magnitude σ_{match} on matching uncertainty with a 90 m subsampling interval

References

[1] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land [J]. Journal of Geodynamics, 2002, 34(3-4): 405-445.

[2] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260-273.

[3] Neumann T A, Martino A J, Markus T, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111325.

[4] Jie Y, Li S, Guo Q, et al. Stereo imagery adjustment constrained by building boundary points from ICESat-2 [J].

IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 1-5.

[5] Tang X, Zhou P, Guo L, et al. Integrating stereo images and laser altimetry points derived from the same satellite for high-accuracy stereo mapping[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 869.

[6] Ma Y, Xu N, Liu Z, et al. Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 250: 112047.

[7] Fricker H A, Arndt P, Brunt K M, et al. ICESat-2 meltwater depth estimates: application to surface melt on Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(8): e2020GL090550.

[8] Howat I M, Porter C, Smith B E, et al. The reference elevation model of Antarctica[J]. The Cryosphere, 2019, 13(2): 665-674.

[9] Mo L, Zohner C M, Reich P B, et al. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential[J]. Nature, 2023, 624(7990): 92-101.

[10] Lapola D M, Pinho P, Barlow J, et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation[J]. Science, 2023, 379(6630): eabp8622.

[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, 2022, 51(03): 401-412.
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[J]. 测绘学报, 2022, 51(03): 401-412.

[12] Chen Lin-Sheng, Zhou Mei, Teng Ge-Er, et al. Non-field on-orbit geometric calibration method for spaceborne laser altimeter based on curve matching[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(1): 113-119.
陈林生,周梅,腾格尔,等. 基于曲线匹配的星载激光测高仪无场在轨几何定标方法[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(01): 113-119.

[13] Tang Xin-Ming, Chen Ji-Yi, Li Guo-Yuan, et al. Error analysis and preliminary pointing angle calibration of laser altimeter on Ziyuan-3 02 Satellite [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(11): 1611-1619.
唐新明,陈继溢,李国元,等. 资源三号02星激光测高误差分析与指向角粗标定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11): 1611-1619.

[14] Wang X, Cheng X, Gong P, et al. Earth science applications of ICESat/GLAS: a review[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(23): 8837-8864.

[15] Filin S. Calibration of spaceborne laser Altimeters-an algorithm and the site selection problem[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1484-1492.

[16] Tang X, Xie J, Gao X, 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(3): 1053-1062.

[17] Xie J, Tang X, Mo F, et al. In-orbit geometric calibration and experimental verification of the ZY3-02 laser altimeter [J]. The Photogrammetric Record, 2018, 33(163): 341-362.

[18] 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.

[19] Yi Hong. Earth observation satellite laser altimeter footprint position and on-orbit calibration[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
易洪. 对地观测星载激光测高仪足印定位与在轨标定[D]. 武汉:武汉大学, 2017.

[20] Nan Y, Feng Z, Liu E, et al. Iterative pointing angle calibration method for the spaceborne photon-counting laser altimeter based on small-range terrain matching[J]. Remote Sensing, 2019, 11(18): 2158.

[21] Zhao P, Li S, Ma Y, et al. A new terrain matching method for estimating laser pointing and ranging systematic biases for spaceborne photon-counting laser altimeters[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2022, 188: 220-236.

[22] Nan Ya-Ming. Research on key technologies of active and passive fusion topography surveying with photon counting laser altimeter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
南亚明. 光子计数激光高度计主被动融合形貌测量关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.

[23] Neuenschwander A L, Magruder L A. Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: a first look[J]. Remote Sensing, 2019, 11(14): 1721.

[24] Schenk T, Csatho B, Neumann T. Assessment of ICESat-2's horizontal accuracy using precisely surveyed terrains in McMurdo Dry Valleys, Antarctica[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-11.

[25] Magruder L, Neuenschwander A, Klotz B. Digital terrain model elevation corrections using space-based imagery and ICESat-2 laser altimetry[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264: 112621.

[26] Magruder L, Neumann T, Kurtz N. ICESat-2 early mission synopsis and observatory performance[J]. Earth and Space Science, 2021, 8(5): e2020EA001555.

[27] Malambo L, Popescu S C. Assessing the agreement of ICESat-2 terrain and canopy height with airborne lidar over US ecozones[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 266: 112711.

[28] Liu A, Cheng X, Chen Z. Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 264: 112571.

[29] Zhang Hao, Xu Qi, Huang Pei-Qi, et al. High precision terrain-based on-orbit geometric calibration method for laser altimeter[J], Bulletin of Surveying and Mapping, 2024, 07: 41-47.
张昊,徐琪,黄佩琪,等. 高精度地形星载激光测高仪在轨几何标定方法[J]. 测绘通报, 2024, 07: 41-47.

[30] Luthcke S B, Thomas T C, Pennington T A, et al. ICESat-2 pointing calibration and geolocation performance [J]. Earth and Space Science, 2021, 8(3): e2020EA001494.

[31] Abrams M, Yamaguchi Y, Crippen R. ASTER Global

DEM (GDEM) version 3[C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022, 43: 593-598.

[32] Gesch D, Oimoen M, Danielson J, et al. Validation of the ASTER global digital elevation model version 3 over the conterminous United States [C]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, 41: 143-148.

[33] Abrams M, Crippen R. ASTER GDEM V3 (ASTER Global DEM) User Guide[R]. NASA Land Processes DAAC, 2019.