

自然资源陆地卫星激光测高标准产品高程精度评价

陈继溢¹, 唐新明^{1,2}, 李国元^{1,2}, 刘诏¹, 周晓青^{1,2}

1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;

2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 卫星激光测高技术能够获取高精度地表高程分布信息, 在对地观测领域具有独特的优势。中国近年来陆续发射的高分七号卫星和资源三号03星均搭载了激光测高系统, 用于全球高程控制点获取。随着高分七号卫星、资源三号03星稳定在轨运行, 并持续获取激光测高数据, 中国首次在激光测高领域形成相关数据产品, 即自然资源卫星激光测高标准产品 (SLA03)。本文以平原、有森林覆盖的山地两个不同类型区域的高精度机载点云数据为参考, 对中国自然资源卫星激光测高标准产品的高程精度进行综合评价。结果显示: 在使用合适的阈值剔除人工建筑、树木冠层的激光点后, 高分七号卫星SLA03数据在平原地区高程精度RMSE达到0.653 m, LE90为1.055 m, 其中60%以上精度优于0.3 m, 而在有森林覆盖的山地下降至1.210 m (RMSE) 和2.002 m (LE90); 资源三号03星SLA03数据在平原地区达到1.312 m (RMSE) 和2.389 m (LE90), 其中50%以上精度优于0.5 m, 有森林覆盖的山地则为1.661 m (RMSE) 和2.999 m (LE90)。另外, 高分七号卫星SLA03数据受季节因素影响较为明显, 主要由植被生长引起。相关结论能够指导自然资源卫星激光测高标准产品的深入应用, 并为后续卫星激光测高载荷设计与参数论证提供支撑。

关键词: 遥感, 卫星激光测高, 高分七号卫星, 资源三号03星, 高程精度, 激光测高标准产品

中图分类号: TP236/P2

引用格式: 陈继溢, 唐新明, 李国元, 刘诏, 周晓青. 2024. 自然资源陆地卫星激光测高标准产品高程精度评价. 遥感学报, 28(3): 704-716

Chen J Y, Tang X M, Li G Y, Liu Z and Zhou X Q. 2024. Terrain height assessment of satellite laser altimetry standard products for natural resources. National Remote Sensing Bulletin, 28 (3) : 704-716 [DOI: 10.11834/jrs.20233021]

1 引言

卫星激光测高技术作为一种新型主动遥感技术, 为对地观测提供了新的机遇。对地观测卫星激光测高技术能够快速获取全球高精度高程控制点甚至三维地形, 同时在极地冰盖测量、植被高度及生物量估算以及湖泊水库水位测量等方面都可以发挥重要作用 (李国元和唐新明, 2017)。近年来中国对地观测卫星激光测高技术得到了快速发展。2016年发射的资源三号02星搭载了我国首个试验性对地观测激光测高载荷, 主要用于激光器测高性能测试和辅助光学遥感影像立体测图试验 (唐新明等, 2016; Li等, 2018; 李国元等, 2019; Zhang等, 2019)。继02星之后, 2020年发

射的资源三号03星搭载了业务化的激光测高系统, 尽管没有全波形采集功能, 但测高性能仍有较大改进, 辅助立体测的高程图精度满足1:5万比例尺制图的要求 (李国元等, 2022; Zhou等, 2022)。2019年11月, 中国首颗用于1:10000比例尺立体测图卫星——高分七号卫星成功发射, 搭载了具有全波形采集功能的两波束激光测高系统 (Tang等, 2020; 李国元等, 2021; Chen等, 2022a)。随着高分七号卫星、资源三号03星稳定在轨运行, 并持续获取全球范围内的激光测高数据, 中国首次在激光测高领域形成相关数据产品, 即自然资源卫星激光测高标准产品 (SLA03) (唐新明等, 2022)。

在自然资源卫星激光测高标准产品生产研制

收稿日期: 2023-02-01; 预印本: 2023-10-21

基金项目: 高分遥感测绘应用示范系统(二期)(编号:42-Y30B04-9001-19/21); 国家自然科学基金(编号:41971425)

第一作者简介: 陈继溢, 研究方向为卫星激光测高数据处理和应用。E-mail: chenjiy@lasac.cn

通信作者简介: 唐新明, 研究方向为卫星测绘数据处理与应用。E-mail: tangxinming99@qq.com

过程中，特别是针对高分七号卫星激光测高数据，研究人员开展了一系列卓有成效的研究工作。么嘉祺等（2021）提出了一种阈值约束的椭圆拟合光斑质心提取算法，分析了高分七号卫星激光指向的稳定性。郭金权等（2022）依据波形背景噪声、峰度和偏度、信噪比和高斯特征参数等质量评价参数对波形数据进行质量评价，并对波形数据地形地物特征提取方面的潜力进行分析。梅永康等（2022）利用高分七号卫星激光全波形数据包含的目标地物垂直结构信息，基于数据有效性、波形峰值个数、回波特征参数实现逐级约束筛选，以信噪比、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，提取出可用于星载激光高程控制点的数据。左志强等（2020），谢俊峰等（2020），Zhang等（2020）等研究了国产卫星全波形数据全波形分解方法，针对性地开展了全波形处理的算法优化。这些研究都对SLA03数据产品的业务化生产具有很好地指导作用，但都无法直接反映产品的精度水平。

尽管在轨测试时开展了初步评估（唐新明等，2021；李国元等，2022；陈新阳等，2023），然而，一方面，在轨测试主要面向几何定标参数的优化，通常选择地形平坦且无地物的区域，卫星激光测高载荷在轨定标的精度不能代表最终产品的精度；另一方面，在轨测试所选的试验区域和样本数量都较少，而SLA03数据产品分布于全球范围，地形多样、地物复杂，在轨测试的精度验证并不全面。并且，随着卫星在轨运行时间延长，激光测高标准产品精度是否稳定也未可知。作为遥感产品的一种，SLA03数据产品的真实性检验是评价产品质量、可靠性和适用性的唯一手段，也是提高产品精度、改善产品质量的主要依据，更是推动产品应用范围和应用水平的重要保障（晋锐等，2017）。因此，开展高分七号卫星、资源三号03星卫星激光测高精度综合评价对SLA03数据产品的全面了解和未来卫星激光测高载荷的参数论证有十分重要的意义。

2 研究区与数据

2.1 研究区

本文研究区域位于美国艾奥瓦州、宾夕法尼亚州。艾奥瓦州IA（the State of Iowa）位于美国中西部地区，介于密西西比河与密苏里河之间，除

西北一隅地势较高外，绝大部分地区为坦荡开阔的平原。艾奥瓦州属温带大陆性气候，四季分明。该州土壤肥沃，农产丰富，素有“美国粮仓”之称。测区位于艾奥瓦州中北部，南北长约220 km，东西宽约230 km，测区内基本上都是耕地。

宾夕法尼亚州PA（the Commonwealth of Pennsylvania）分3部分，中部是纵贯南北的阿巴拉契亚山区，东南部分布着肥沃的平原，西部是海拔600 m的高原。州境东西有特拉华河与俄亥俄河流过。宾夕法尼亚州地处温带阔叶落叶林气候，林地覆盖着全州过半的土地，林间栖息着各种飞禽走兽，有1/3面积为耕地。测区位于宾夕法尼亚州西部，东西宽约145 km，南部长约255 km，测区东部为山地，西部主要为林地，林地之间混杂着一些耕地。

2.2 研究数据

为方便激光测高标准产品的管理以及与光学立体影像的联合使用，SLA03产品在生产过程中按一定的规则对整轨获取的数据进行切分，形成多个最长约70 km的条带数据产品。对于2波束3 Hz的高分七号卫星，一个条带最多有60个激光点；而对1波束2 Hz的资源三号03星，一个条带最多只有20个激光点。另外，高分七号卫星SLA03产品还包含具有地理定位信息的激光足印影像（Chen等，2022b），平面定位精度优于5.0 m（ 1σ ）。受云层或地表反射信号太弱等影响，存在无法获取激光回波信号的无效观测数据，导致部分激光点缺失。SLA03数据产品主要有数据主体文件、元数据文件、空间分布文件、激光三维坐标文件。激光测高标准产品按照产品前缀、卫星编号、轨道号、中心经纬度、获取时间等统一命名（李国元等，2022；唐新明等，2022）。SLA03数据产品可在自然资源卫星遥感云服务平台网站（[http://sasclouds.com/chinese/home/\[2023-02-01\]](http://sasclouds.com/chinese/home/[2023-02-01])）上查询。

2.2.1 高分七号卫星SLA03数据

艾奥瓦测区高分七号卫星SLA03数据产品获取于2020年9月至2022年8月，共计35轨101个条带，在点云覆盖范围内的激光点共计2533个。宾夕法尼亚测区高分七号卫星SLA03数据产品获取于2020年5月至2022年9月，共计32轨109个条带，在点云覆盖范围内的激光点共计2918个。高分七号卫星SLA03数据分布和机载点云范围如图1所示。

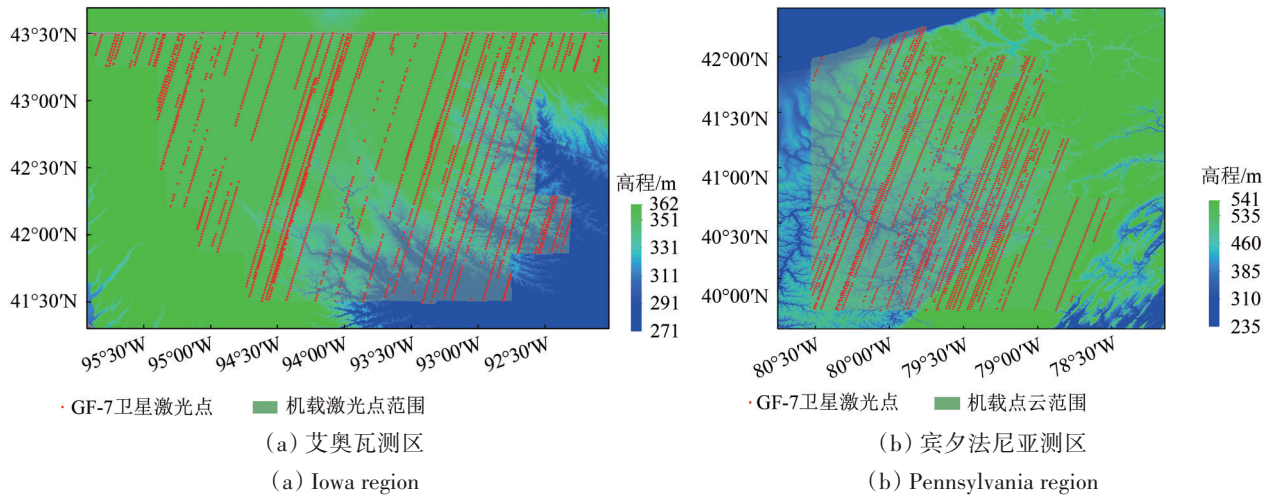


图1 高分七号卫星SLA03数据和参考点云数据分布图
 Fig.1 The distribution of GF-7 SLA03 data and reference LiDAR data

2.2.2 资源三号03星SLA03数据

艾奥瓦测区的资源三号03星卫星SLA03数据产品获取于2020年8月至2022年9月，共计43轨125个条带，在点云覆盖范围内的激光点共计1298个。

宾夕法尼亚测区的资源三号03星SLA03数据产品获取于2020年9月至2022年7月，共计21轨70个条带，在点云覆盖范围内的激光点共计582个。资源三号03星SLA03数据分布和机载点云范围如图2所示。

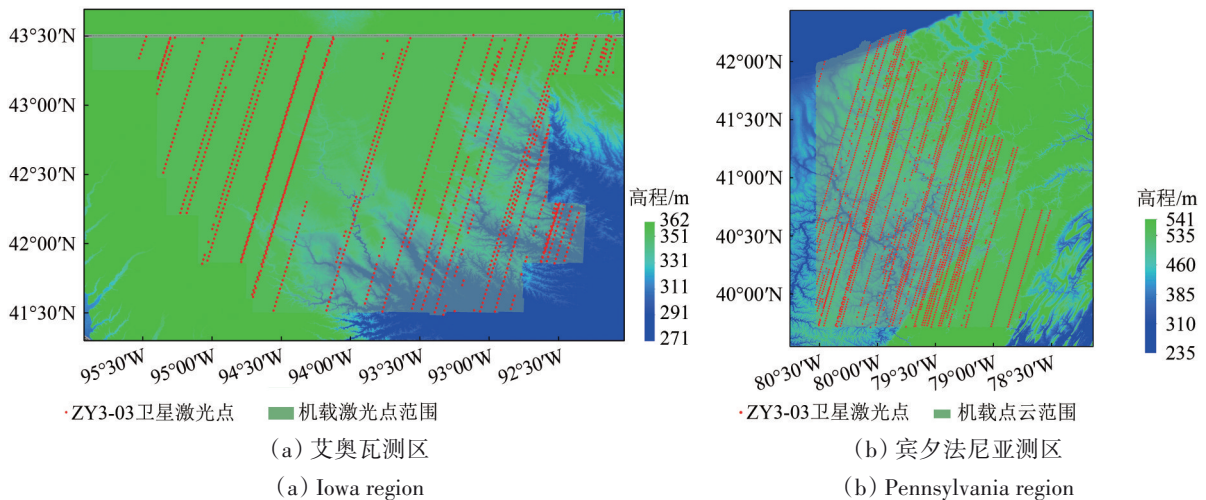


图2 资源三号03星SLA03数据和参考点云数据分布图
 Fig.2 The distribution of ZY3-03 SLA03 data and reference LiDAR data

2.2.3 参考机载点云数据

本文的参考数据为机载点云数据，均从美国地质调查局USGS (U.S. Geological Survey) 网站 (<https://apps.nationalmap.gov/lidar-explorer/#/> [2023-02-01]) 下载。点云数据平面坐标采用1983年北美基准NAD83 (2011) (North American Datum of 1983) 框架下的UTM投影，高程系统采用1988年北美高程基准NAVD88 (North American Vertical Datum

1988)。艾奥瓦测区的机载点云获取时间为2020年4月至12月，大部分数据在4月份获取。该区域点云数据以1 km×1 km的格网存储，平均点云密度约为2.5 pts/m²。宾夕法尼亚测区机载点云数据获取时间为2019年11月至2020年5月。该区域点云数据以1.5 km×1.5 km的格网存储，平均点云密度约为5.0 pts/m²。2个测区的机载点云数据获取的时间都比较新，现势性较好。根据官方提供的

技术报告, 在非植被的开阔地形, 点云数据在 95% 的置信水平上达到 7.15 cm 的绝对高程精度 (USGS_IA_NorthCentral_2020_D20_Project_Report, USGS_PA_WesternPA_2019_D20_WP_Report)。

3 研究方法

3.1 基准与坐标框架转换

为准确评估自然资源卫星激光测高标准产品地表高程精度, 首先将激光测高数据和参考数据转换到统一的坐标框架。数据处理过程中采用美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 提供的 VDatum 软件 (v4.4.2) (<https://vdatum.noaa.gov/welcome.html> [2023-02-01]) 进行平面和高程的转换。

3.2 参考高程获取

考虑到卫星激光测高数据在人工建筑、植被冠层的高程精度不确定性较大, 并且地面高程对后续激光高程控制点应用更有实际意义, 本文利用参考点云中分类为地面的点云进行 SLA03 数据产品的高程精度评价。根据机载点云的分类信息, 提取激光地面光斑足印范围内且分类为地面的点, 其中高分七号卫星激光地面光斑直径约为 20 m, 资源三号 03 星激光地面光斑直径约为 44 m (Tang 等, 2022)。计算所选取的机载点云的高程均值, 与 SLA03 数据产品中提供的激光点高程进行对比统计, 评价 SLA03 数据产品的高程精度。

3.3 高程精度评估

本文用于 SLA03 产品激光点高程精度评价的统计指标包括: (1) 平均偏差 Bias, 可以反映激光高程的总体偏差; (2) 平均绝对误差 MAE, 可以反映激光点高程的与真实高程的接近程度; (3) 均方根误差 RMSE, 可以反映激光点高程的整体精度; (4) 第 90 百分位线性误差 LE90 (the 90th Percentile Linear Error), 可以反映 90% 置信度的激光点高程误差大小。上述指标的计算公式如下所示:

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - h_i^{\text{ref}}) \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i - h_i^{\text{ref}}| \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - h_i^{\text{ref}})^2} \quad (3)$$

$$\text{LE90} = \text{quantile}_{90}(|h_i - h_i^{\text{ref}}|) \quad (4)$$

式中, h_i 为 SLA03 产品的激光点高程值, h_i^{ref} 为机载点云提供的参考高程值, N 为参与评价的激光点数。值得注意的是, 有少量 SLA03 数据的高程错误明显过大, 其原因是参考高程使用了地面高程, 而这些 SLA03 数据的高程对应于树冠或建筑顶部。这将导致最终评价结果严重偏离实际精度水平, 不应纳入可信的评价。因此, 在精度评估过程中有必要将这样的数据作为异常数据予以排除。本文以 20 m 为阈值剔除这类粗差点。

3.4 SLA03 数据高程精度分析

为综合分析 SLA03 数据产品的高程精度, 分别根据载荷、时相等进行分类统计。首先, 根据高分七号卫星 SLA03 数据产品中激光器标识将其按不同的激光器进行分类高程精度统计, 分析高分七号卫星两波束激光测高高程精度差异。然后, 对高分七号卫星、资源三号 03 星 SLA03 数据产品分别统计各个月度的高程精度, 分析时序精度差异。

4 结果与分析

4.1 高分七号卫星 SLA03 数据产品精度分析

4.1.1 总体精度分析

高分七号卫星 SLA03 数据产品在艾奥瓦测区和宾夕法尼亚测区的高程精度统计如表 1 所示。SLA03 数据的高程与参考机载点云高程的相关性如图 3 所示。根据测区数据统计及表 1 可见, 艾奥瓦和宾夕法尼亚测区分别剔除了 3 个和 241 个高差绝对值 > 20 m 的异常激光点。由图 3 可见, 两个测区高分七号卫星 SLA03 数据的高程与参考机载点云高程具有很好的相关性, 决定系数 R^2 值都高于 0.99; 并且, 相比参考机载点云高程, 高分七号卫星 SLA03 数据的高程总体偏大, 其原因是激光测高所获取的高程包含了地表植被或建筑的高度。从表 1 统计结果看, 艾奥瓦测区 SLA03 数据高程精度远优于宾夕法尼亚测区, 这与两个测区的地形特点和地表类型密切相关。艾奥瓦州测区地处平原地带, 为美国农业大洲, 地表植被多为低矮农

作物；宾夕法尼亚测区大部分为有森林覆盖的山地，并且植被为常绿阔叶林，郁闭度比较高，故该测区高程整体偏高约1.6 m，平均绝对误差达到约2.3 m。

表1 高分七号卫星SLA03数据高程精度统计表
Table 1 The accuracy statistical table for SLA03 data of the GF-7 satellite

测区	激光点数	Bias/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	dh <0.3 m		dh <0.5 m	
						点数	所占比例/%	点数	所占比例/%
艾奥瓦测区	2530	0.393	0.538	1.549	1.120	1539	60.8	1864	73.7
宾夕法尼亚测区	2677	1.569	2.270	4.991	6.636	848	31.7	1221	45.6

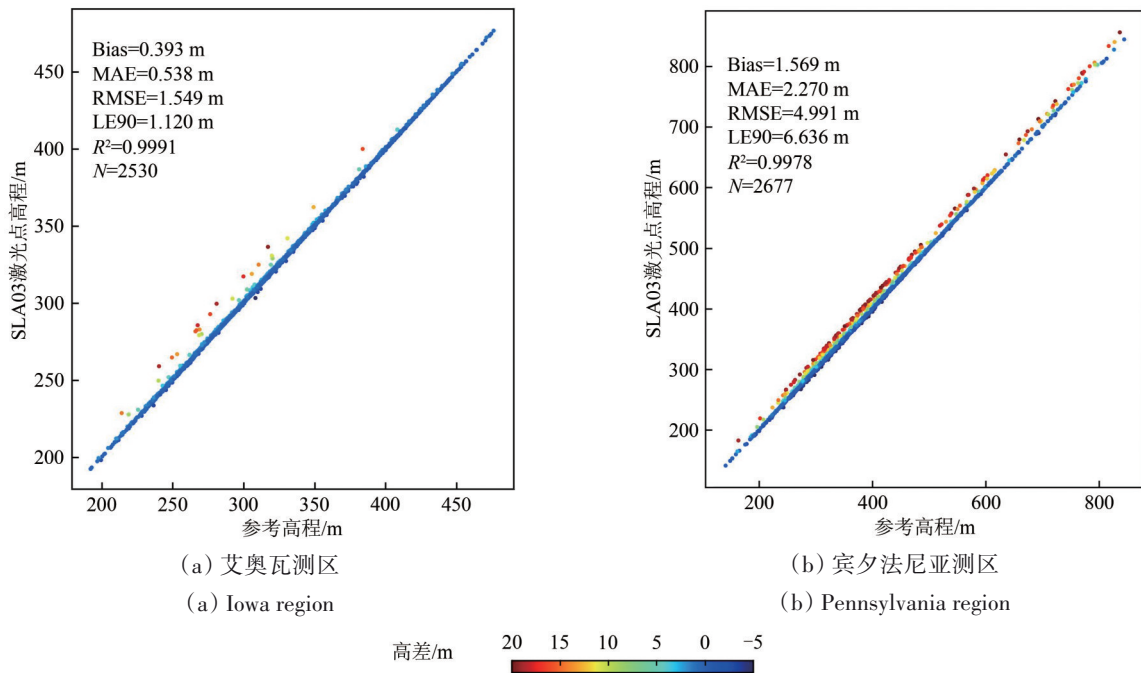


图3 高分七号卫星SLA03数据高程与参考高程相关示意图

Fig.3 The correlation of terrain height for SLA03 data of the GF-7 satellite and reference LiDAR data

高分七号卫星激光测高系统的主要应用是为光学遥感影像1:10000比例尺立体测图提供高程控制点，尤其是在平原地区，故激光点的绝对高程精度尤为重要。为此，筛选高程精度优于0.3 m和0.5 m的激光点。由表1可见，艾奥瓦测区绝对高程精度优于0.3 m和0.5 m的激光点占比分别达到60.8%和73.7%；而在宾夕法尼亚测区，对应的比例分别降至31.7%和45.6%。因此，地形地物对激光点绝对高程精度的影响非常大，平原低矮植被区域比有森林覆盖的山地潜在可用的点数比例要高得多。

为更好地评价SLA03数据地表高程测量精度，使用一定的阈值进行筛选。经测试，当阈值为5 m时，筛选后激光点数量曲线正好是拐点，激光点的误差均值曲线也正好趋于稳定。此时2个测区高分七号卫星SLA03数据的精度统计如表2所示，误

差分布直方图及核密度分布如图4所示。由表2可见，艾奥瓦测区高程精度优于5 m的激光点占总点数的比例高达98.8%；宾夕法尼亚测区受地形、植被影响，只有对应比例88.5%。宾夕法尼亚测区整体高程偏差仅为0.077 m，MAE、RMSE和LE90的值也急剧下降至0.806 m、1.210 m和2.002 m，说明绝大部分位于林区树冠或者高层建筑的激光点被滤除；艾奥瓦测区滤除高差在5 m以上的激光点后，整体高程精度也有较大的提升，RMSE达到0.653 m，LE90接近1.0 m。由图4可见，两个测区误差分布直方图都十分接近高斯分布；宾夕法尼亚测区激光点误差分布直方图更规则；艾奥瓦测区绝对高差在0—2.5 m有一定程度的聚集。从表2中可以看到，该测区激光点高差整体偏差达到0.257 m，说明采用5 m阈值过滤后，低矮植被的对激光点高程精度的影响仍然存在。

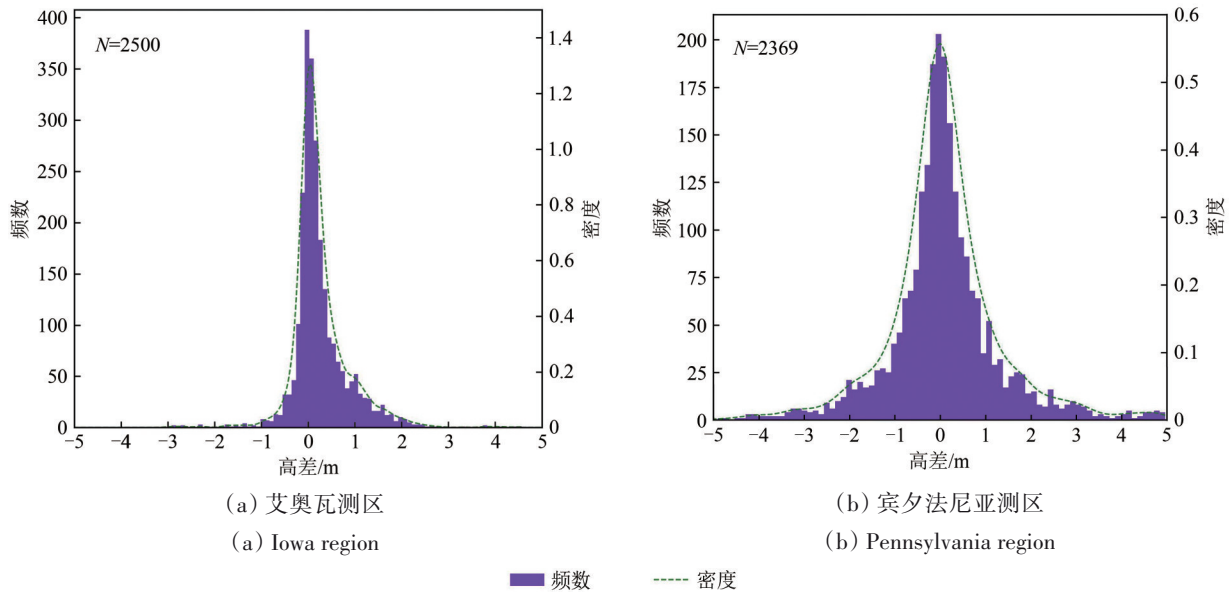


图4 高分七号卫星SLA03数据高程误差直方图和密度图($|dh|<5\text{ m}$)

Fig.4 The histogram and density of elevation errors for SLA03 data of the GF-7 satellite with $|dh|<5\text{ m}$

表2 高分七号卫星SLA03数据高程精度统计表($|dh|<5\text{ m}$)

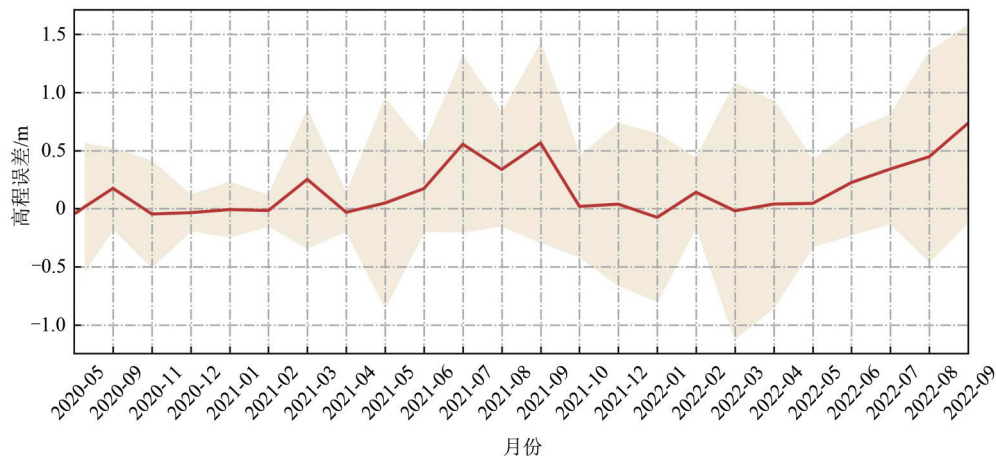
Table 2 The accuracy statistical table for SLA03 data of the GF-7 satellite with $|dh|<5\text{ m}$

测区	激光点数	比例/%	Bias/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	$ dh <0.3\text{ m}$		$ dh <0.5\text{ m}$	
							点数	所占比例/%	点数	所占比例/%
艾奥瓦测区	2500	98.8	0.257	0.399	0.653	1.055	1539	61.6	1864	74.6
宾夕法尼亚测区	2369	88.5	0.077	0.806	1.210	2.002	848	32.1	1221	46.3

4.1.2 激光高程精度随时间变化分析

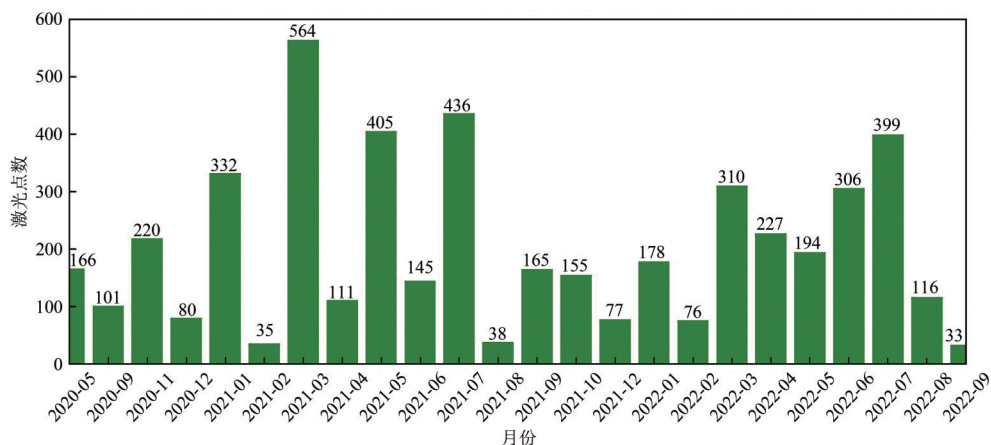
对高程误差在5 m以内的激光点，分别统计各个月份的激光点精度及激光点数量，如图5所示。从图5中可以看出，每年从4月份开始，高分七号卫星SLA03数据产品的高程误差增大，而从10月份开始回落到较好的精度。考虑到两个测区都位

于北半球，而4月—10月北半球为春末到初秋时节，是植被生长最为旺盛的季节，因此这一规律跟季节变化有很强的相关性。另外，个别月份如21年7月、21年9月、22年9月误差偏大，主要原因是当月的数据中宾夕法尼亚测区的数据比例较大。



(a) 高程精度月度变化趋势

(a) The monthly changing trends of terrain height errors



(b) 各个月度激光点数

(b) The number of laser points for each month

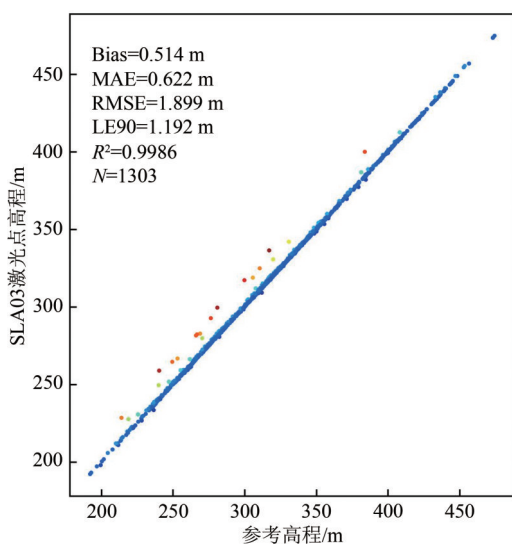
图5 高分七号卫星SLA03数据精度变化趋势图($ldhl < 5$ m)Fig. 5 The changing trends of terrain height errors for SLA03 data of the GF-7 satellite with $ldhl < 5$ m

4.1.3 两波束精度对比分析

为评估高分七号卫星激光测高仪两波束激光器的性能差异,分别统计两波束激光器获取的激光点高程精度,结果如图6所示。可以看到,除了统计数值略有差异外,单个波束精度规律与两波束总体规律基本一致。表3和表4显示了滤除高程 >5 m前后两波束激光点高程精度。因为高分七号卫星两波束激光器同时开机,所获取的激光点在两个测区的分布基本一致,故地形地物以及季节因素对两波束激光测高数据的影响较小,几乎可以忽略。

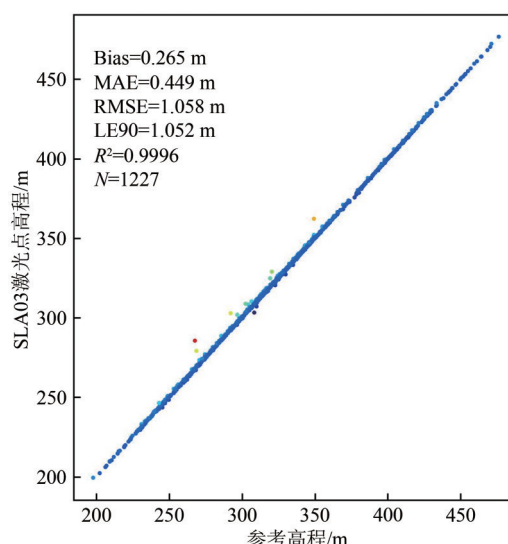
由表3可见,滤除高程误差 >5 m的激光点之前,艾奥瓦测区波束2精度优于 0.3 m或 0.5 m的激光点所占比例略高,各项精度指标略优于波束1。宾夕法尼亚测区波束1精度优于 0.3 m或 0.5 m的激光点所占比例更大,各项精度指标却不及波束2。

由表4可见,在滤除高程误差 >5 m的激光点之后,艾奥瓦测区两波束精度优于 0.3 m或 0.5 m的激光点所占比例接近,各项精度指标波束2占优;宾夕法尼亚测区波束1精度优于 0.3 m或 0.5 m的激光点所占比例明显更大,各项精度指标的优势却比较微弱。故可以推断,高分七号卫星激光测高仪器波束2精度略优于波束1,但优势比较小。



(a) 艾奥瓦测区(波束1)

(a) Iowa region (Beam 1)



(b) 艾奥瓦测区(波束2)

(b) Iowa region (Beam 2)

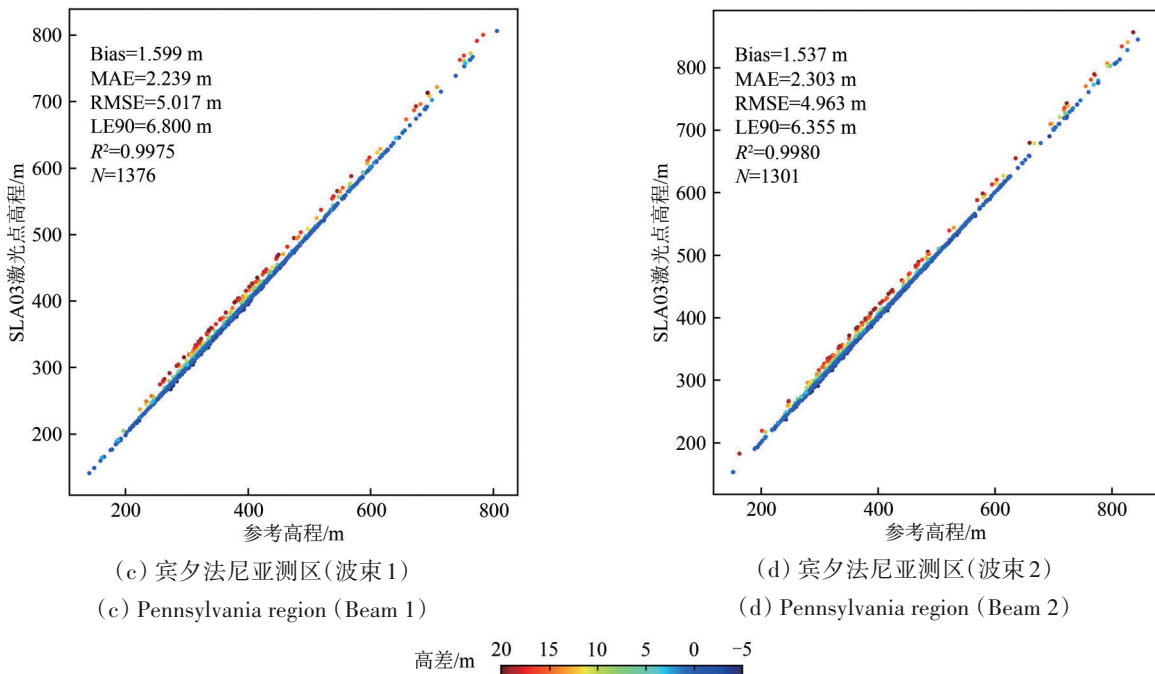


图6 高分七号卫星不同波束激光测高数据高程与参考高程相关性示意图

Fig.6 Correlation between elevation and reference elevation for data from different laser beams of the GF-7 satellite

表3 高分七号卫星不同波束SLA03数据高程精度统计表

Table 3 The accuracy statistical table of SLA03 data for different laser beams of the GF-7 satellite

测区	波束	点数	Bias/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	dh <0.3 m		dh <0.5 m	
							点数	所占比例/%	点数	所占比例/%
艾奥瓦测区	B1	1303	0.514	0.622	1.899	1.192	785	60.2	935	71.8
	B2	1227	0.265	0.449	1.058	1.052	754	61.5	929	75.7
宾夕法尼亚测区	B1	1376	1.599	2.239	5.017	6.680	480	34.9	661	48.0
	B2	1301	1.537	2.303	4.963	6.355	368	28.3	560	43.0

表4 高分七号卫星不同波束SLA03数据高程精度统计表(|dh|<5 m)

Table 4 The accuracy statistical table of SLA03 data for different laser beams of the GF-7 satellite with |dh|<5 m

测区	波束	点数	Bias/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	dh <0.3 m		dh <0.5 m	
							点数	所占比例/%	点数	所占比例/%
艾奥瓦测区	B1	1282	0.303	0.413	0.684	1.107	785	61.2	935	72.9
	B2	1218	0.207	0.385	0.620	1.033	754	61.9	929	76.3
宾夕法尼亚测区	B1	1218	0.099	0.758	1.159	1.906	480	39.4	661	54.3
	B2	1151	0.053	0.857	1.261	2.056	368	32.0	560	48.7

4.2 资源三号03星SLA03数据产品精度分析

4.2.1 总体精度分析

资源三号03星SLA03数据产品在艾奥瓦测区和宾夕法尼亚测区的高程精度统计如表5所示，SLA03数据的高程与参考机载点云高程的相关性如图7所示。根据测区数据统计及表5可见，艾奥瓦和宾夕法尼亚测区分别剔除了1个和56个高差绝对

值>20 m的激光点。由图7可见，两个测区资源三号03星SLA03数据高程与参考机载点云高程也具有很强的相关性，决定系数 R^2 值都高于0.99。与高分七号卫星SLA03数据类似，艾奥瓦测区SLA03数据高程精度远优于宾夕法尼亚测区。不同的是，资源三号03星SLA03数据中，比参考高程低的比例更多。其原因很可能是资源三号03星卫星激光测高系统仅采集若干个离散信号，偶然误差更显著。

表5 资源三号03星SLA03数据高程精度统计表

Table 5 The accuracy statistical table for SLA03 data of the ZY3-03 satellite

测区	点数	Bias/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	dh <0.5 m		dh <1.0 m	
						点数	比例/%	点数	比例/%
艾奥瓦测区	1297	0.094	1.151	2.198	2.826	630	48.5	923	71.1
宾夕法尼亚测区	526	2.751	3.824	6.779	15.399	134	25.5	245	46.6

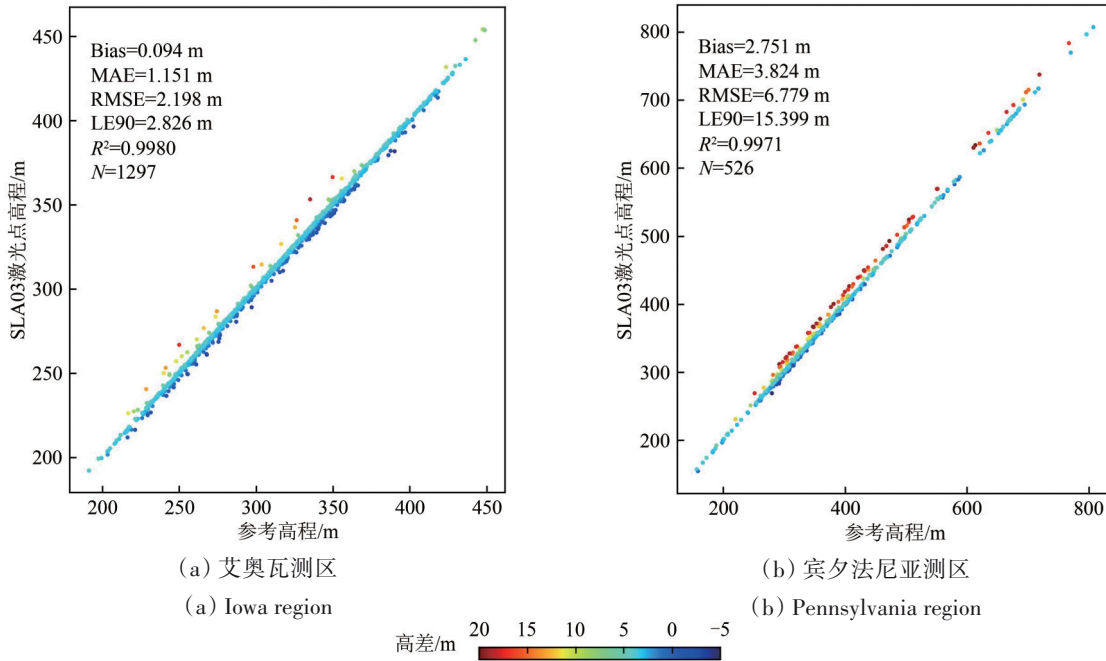


图7 资源三号03星SLA03数据高程与参考高程相关性图示

Fig.7 The correlation of terrain height for SLA03 data of the ZY3-03 satellite and reference LiDAR data

同样地，考虑高程误差在5 m以内的点，资源三号03星SLA03数据高程精度统计如表6所示，误差分布直方图及核密度分布如图8所示。由表6中可见：过滤掉高程误差在5 m以上的点后，各项精度指标均大幅提升。2个测区的整体偏差非常小，宾夕法尼亚测区达到0.12 m左右，艾奥瓦测区更是优于0.02 m。艾奥瓦测区高程精度更好，MAE在

1.0 m以内，RMSE和LE90分别达到1.3 m和2.4 m左右。宾夕法尼亚测区受植被影响，MAE达到约1.2 m，RMSE和LE90分别优于1.7 m和3.0 m。表中数据显示，资源三号03星SLA03数据在平原地区高达95.8%的激光点高程精度优于5 m，在有森林覆盖的山地则只有78.9%。表8也反映，艾奥瓦测区激光高差误差比宾夕法尼亚测区更集中，精度更好。

表6 资源三号03星SLA03数据高程精度统计表(|dh|<5 m)

Table 6 The accuracy statistical table for SLA03 data of the ZY3-03 satellite with |dh|<5 m

测区	点数	比例/%	Bias/m	MAE/m	RMSE/m	LE90/m	dh <0.5 m		dh <1.0 m	
							点数	比例/%	点数	比例/%
艾奥瓦测区	1243	95.8	-0.017	0.849	1.312	2.389	630	50.7	923	74.3
宾夕法尼亚测区	415	78.9	0.122	1.196	1.661	2.999	134	32.3	245	59.0

对比高分七号卫星和资源三号03星SLA03数据，在过滤掉高程误差在5 m以上的激光点后，资源三号03星SLA03数据产品高程整体偏差(Bias)甚至优于高分七号卫星，但MAE、RMSE、LE90等指标均比高分七号卫星更低，这恰好说明高分七号卫星激光测高系统在地表高程测量方面更为敏感，性能更优越。

4.2.2 激光高程精度随时间变化分析

对资源三号03星SLA03数据高程误差在5 m以内的激光点，分别统计各个月份的激光点精度及激光点数量，结果如图9所示。从图9中未能看到类似高分七号卫星激光点高差精度跟季节很强相关性特点，一方面因为部分月份激光点数量较少，数据不够典型；另一方面也与资源三号03星

激光测高系统本身测量性能有关。由于没有全波形采集功能, 并且地面光斑足印较大, 从资源三

号 03 星 SLA03 数据中无法识别并分辨植被生长对激光高程精度的影响。

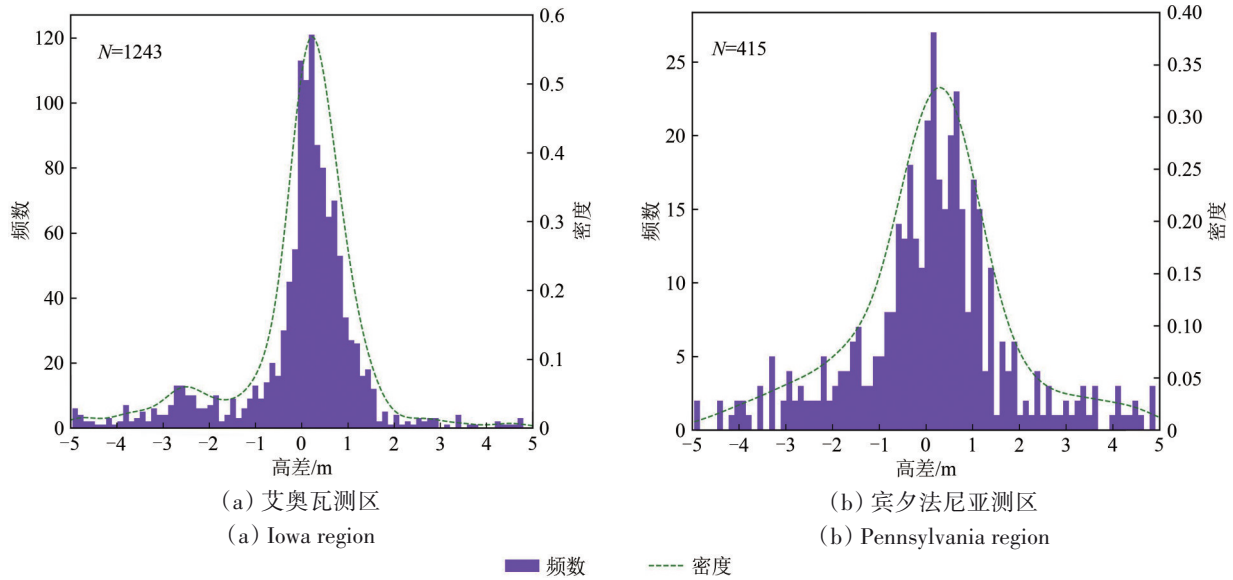
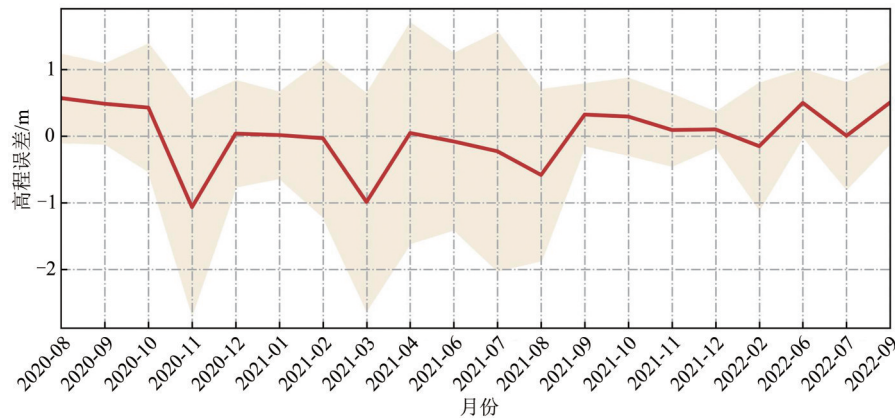


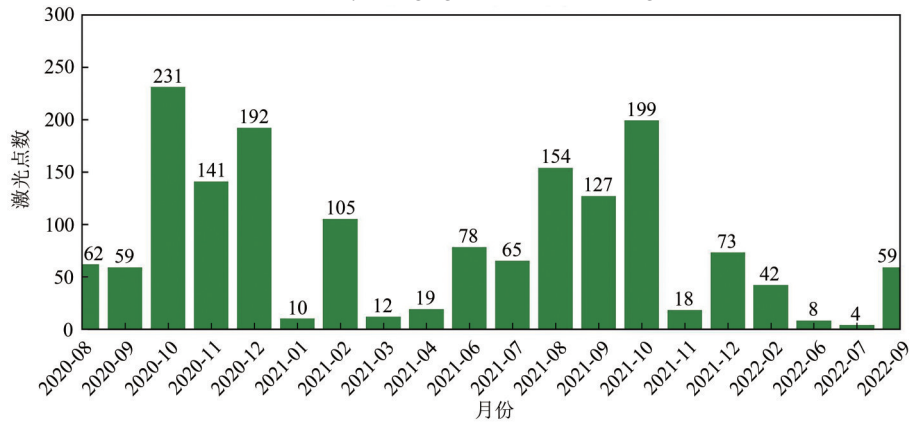
图8 资源三号03星SLA03数据高程误差直方图和密度图($|dh| < 5$ m)

Fig.8 The histogram and density of elevation errors for SLA03 data of the ZY3-03 satellite with $|dh| < 5$ m



(a) 高程精度月度变化趋势

(a) The monthly changing trends of terrain height errors



(b) 各个月度激光点数

(b) The number of laser points for each month

图9 资源三号03星SLA03数据精度变化趋势图($|dh| < 5$ m)

Fig.9 The changing trends of terrain height errors for SLA03 data of the ZY3-03 satellite with $|dh| < 5$ m

5 结论

由于现有的精度验证工作有限,对高分七号卫星和资源三号03星获取并生产的SLA03数据产品的高程精度开展综合验证是十分必要的。本文通过对位于平原和山林两个不同类型测区的SLA03数据产品的高程精度进行综合验证,可以得到以下结论:

(1) 尽管理想情况下卫星激光测高高程精度能达到很高的水平,但地形地物对卫星激光点高程精度有很大的影响,会引起系统性的偏差,特别是在有森林覆盖的山地。高分七号卫星SLA03数据产品的高程精度(RMSE)在平原和山林区域分别达到1.6 m和5.0 m以内,资源三号03星分别为2.2 m和6.8 m。在使用合适的阈值滤除绝大部分位于人工建筑、树木冠层等非地表的激光点后,高分七号卫星SLA03数据在平原地区高程精度RMSE优于0.7 m,LE90在1.0 m左右,而在有森林覆盖的山地下降至1.2 m(RMSE)和2.0 m(LE90)。资源三号03星SLA03数据则分别达到1.3 m(RMSE)和2.4 m(LE90),有森林覆盖的山地为1.7 m(RMSE)和3.0 m(LE90)。可以使用AWAD 30、SRTM等全球DSM作为参考对粗差点进行初步剔除。

(2) 从立体测图高程控制应用的角度,高分七号卫星SLA03数据在平原地区有潜力作为1:10000比例尺高程控制点的比例达到60%以上。资源三号03星SLA03数据在平原地区有潜力作为1:50000比例尺高程控制点的比例达到70%以上。但用作控制点前,需要对SLA03数据进行额外的处理和筛选,才能满足精度条件。

(3) 高分七号卫星两波束SLA03产品的激光高程精度并没有明显的差异。季节因素对高分七号卫星激光测高数据高程精度有较为明显的影响,主要是由植被生长引起;而资源三号03星SLA03产品的高程精度低于高分七号卫星,对季节变化不敏感。

本文的研究能为后续卫星激光测高高程产品的生产提供指导,并支撑未来新型卫星激光测高载荷的参数如波束数、发射重频、地面足印大小等论证。下一步研究包括不同地形、不同地表覆盖条件下激光高程精度分析,并结合地形特征提取准确可靠的激光高程控制点,从而更好地为光学遥感影像立体测图高程控制服务。

志 谢 本文使用的机载点云数据由美国地质调查局(USGS)获取、处理和发布,数据基准与坐标框架转换使用了美国国家海洋和大气管理局(NOAA)研发的VDatum软件。

参考文献(References)

- Chen X Y, Qiao Z Y, Long X X, Li Q P, Liu X T, Zhong H M, Wang X Y and Wang J H. 2023. Construction of ageo-location Model and Verification of GF-7 spaceborne laser altimetry. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(5): 1228-1237 (陈新阳, 乔志远, 龙小祥, 李庆鹏, 刘啸添, 钟慧敏, 王小燕, 王建华. 2023. 高分七号卫星星载激光定位模型构建与验证. *遥感学报*, 27(5): 1228-1237 [DOI: 10.11834/jrs.20221251])
- Guo J Q, Li G Y, Pei L, Yao J Q and Nie S. 2022. Preliminary study on echo saturation identification and altimetry error correction of laser altimetry satellite waveform. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(8): 1674-1684 (郭金权, 李国元, 裴亮, 么嘉棋, 聂胜. 2022. 激光测高卫星波形饱和识别与测高误差改正初步研究. *遥感学报*, 26(8): 1674-1684 [DOI: 10.11834/jrs.20219342])
- Jin R, Li X, Ma M G, Ge Y, Liu S M, Xiao Q, Wen J G, Zhao K, Xin X P, Ran Y H, Liu Q H and Zhang R H. 2017. Key Methods and experiment verification for the validation of quantitative remote sensing products. *Advances in Earth Science*, 32(6): 630-642 (晋锐, 李新, 马明国, 葛咏, 刘绍民, 肖青, 闻建光, 赵凯, 辛晓平, 冉有华, 柳钦火, 张仁华. 2017. 陆地定量遥感产品的真实性检验关键技术与试验验证. *地球科学进展*, 32(6): 630-642 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2017.06.0630])
- Li G Y, Gao X M, Chen J Y, Zhao Y M, Mo F and Zhang Y. 2019. Data quality analysis of ZY-3 02 satellite laser altimeter. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1159-1166 (李国元, 高小明, 陈继溢, 赵严铭, 莫凡, 张悦. 2019. 资源三号02星激光测高数据质量分析. *遥感学报*, 23(6): 1159-1166 [DOI: 10.11834/jrs.20197548])
- Li G Y and Tang X M. 2017. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(12): 1939-1949 (李国元, 唐新明. 2017. 资源三号02星激光测高精度分析与验证. *测绘学报*, 46(12): 1939-1949 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170174])
- Li G Y, Tang X M, Chen J Y, Me J Q, Liu Z, Gao X M, Zuo Z Q and Zhou X Q. 2021. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(10): 1338-1348 (李国元, 唐新明, 陈继溢, 么嘉棋, 刘诏, 高小明, 左志强, 周晓青. 2021. 高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证. *测绘学报*, 50(10): 1338-1348 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210025])
- Li G Y, Tang X M, Gao X M, Wang X, Fan W F, Chen J Y and Mo F. 2018. Integration of ZY3-02 satellite laser altimetry data and stereo images for high-accuracy mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 84(9): 569-578 [DOI: 10.14358/PERS.84.9.569]
- Li G Y, Tang X M, Zhou P, Chen J Y, Liu Z, Dou X H, Zhou X Q and

- Wang X. 2022. Laser altimetry data processing and combined surveying application of ZY3-03 satellite. *Infrared and Laser Engineering*, 51(5): 20210356 (李国元, 唐新明, 周平, 陈继溢, 刘诏, 窦显辉, 周晓青, 王霞. 2022. 资源三号03星激光测高数据处理与复合测绘应用. *红外与激光工程*, 51(5): 20210356) [DOI: 10.3788/IRLA20210356]
- Mei Y K, Xie J F, Chen W and Liu R. 2022. Elevation control points extraction of spaceborne lasers with multi-feature parameter constraints. *Infrared and Laser Engineering*, 51(9): 20210997 (梅永康, 谢俊峰, 陈伟, 刘仁. 2022. 多特征参数约束的星载激光高程控制点提取. *红外与激光工程*, 51(9): 20210997) [DOI: 10.3788/IRLA20210997]
- Tang X M, Li G Y, Chen J Y and Liu Z. 2022. Product Specification for Natural Resources Satellite Laser Altimetry Data V1.0. Beijing: Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources (唐新明, 李国元, 陈继溢, 刘诏. 2022. 自然资源卫星激光测高产品手册 V1.0. 北京: 自然资源部国土卫星遥感应用中心)
- Tang X M, Li G Y, Gao X M and Chen J Y. 2016. The rigorous geometric model of satellite laser altimeter and preliminarily accuracy validation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(10): 1182-1191 (唐新明, 李国元, 高小明, 陈继溢. 2016. 卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证. *测绘学报*, 45(10): 1182-1191) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150357]
- Tang X M, Xie J F, Liu R, Huang G H, Zhao C G, Zhen Y, Tang H Z and Dou X H. 2020. Overview of the GF-7 laser altimeter system mission. *Earth and Space Science*, 7(1): e2019EA000777 [DOI: 10.1029/2019EA000777]
- Tang X M, Xie J F, Mo F, Dou X H, Li X, Li S L, Li S, Huang G H, Fu X K, Liu R, Zhu G B, Ouyang S D, Tang H Z and Chen H. 2021. GF-7 dual-beam laser altimeter on-orbit geometric calibration and test verification. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(3): 384-395 (唐新明, 谢俊峰, 莫凡, 窦显辉, 李新, 李少宁, 李松, 黄庚华, 付兴科, 刘仁, 朱广彬, 欧阳斯达, 唐洪钊, 陈辉. 2021. 高分七号卫星双波束激光测高仪在轨几何检校与试验验证. *测绘学报*, 50(3): 384-395) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200397]
- USGS_IA_NorthCentral_2020_D20_Project_Report, https://prd-tnm.s3.amazonaws.com/StagedProducts/Elevation/metadata/IA_NorthCentral_2020_D20/USGS_IA_NorthCentral_2020_D20_Project_Report.pdf, ataccessed 2022-10-21
- USGS_PA_WesternPA_2019_D20_WP_Report, https://prd-tnm.s3.amazonaws.com/StagedProducts/Elevation/metadata/PA_WesternPA_2019_D20/USGS_PA_WesternPA_2019_D20_WP_Report.pdf, ataccessed 2022-10-21
- Xie J F, Yang C C, Mei Y K and Han B M. 2020. Full waveform decomposition of spaceborne laser based on genetic algorithm. *Infrared and Laser Engineering*, 49(11): 20200245 (谢俊峰, 杨晨晨, 梅永康, 韩保民. 2020. 基于遗传算法的星载激光全波形分解. *红外与激光工程*, 49(11): 20200245) [DOI: 10.3788/IRLA20200245]
- Yao J Q, Li G Y, Chen J Y, Zhou X Q, Guo A Y, Huang G H, Tang X M and Ai B. 2021. Analysis on the change of GF-7 satellite laser altimeter spot centroid position. *Infrared and Laser Engineering*, 50(S2): 20210539 (么嘉祺, 李国元, 陈继溢, 周晓青, 国爱燕, 黄庚华, 唐新明, 艾波. 2021. 高分七号卫星激光测高仪光斑质心位置变化分析. *红外与激光工程*, 50(S2): 20210539) [DOI: 10.3788/IRLA20210539]
- Zhang G, Xu K, Jia P, Hao X Y and Li D R. 2019. Integrating stereo images and laser altimeter data of the ZY3-02 satellite for improved earth topographic modeling. *Remote Sensing*, 11(20): 2453 [DOI: 10.3390/rs11202453]
- Zhang Z J, Xie H, Tong X H, Zhang H W, Tang H, Li B B, Wu D, Hao X L, Liu S J, Xu X, Liu S C, Chen P, Feng Y J, Wang C and Jin Y M. 2020. A combined Deconvolution and Gaussian decomposition approach for overlapped peak position extraction from large-footprint satellite laser altimeter waveforms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 2286-2303 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2992618]
- Zhou P, Tang X M, Li D D and Wang X. 2022. Combined block adjustment of stereo imagery and laser altimetry points of the ZY3-03 satellite. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 6506705 [DOI: 10.1109/LGRS.2022.3151473]
- Zuo Z Q, Tang X M, Li G Y and Li S. 2020. Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter. *Infrared and Laser Engineering*, 49(11): 20200251 (左志强, 唐新明, 李国元, 李松. 2020. 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*, 49(11): 20200251) [DOI: 10.3788/IRLA20200251]

Terrain height assessment of satellite laser altimetry standard products for natural resources

CHEN Jiyi¹, TANG Xinming^{1,2}, LI Guoyuan^{1,2}, LIU Zhao¹, ZHOU Xiaoqing^{1,2}

1.Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;

2.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Satellite laser altimetry technology, with its ability to acquire highly accurate vertical distribution information, possesses unique advantages in the field of Earth observation. Currently, different satellite laser altimetry systems are operating in orbit both domestically and

internationally. In recent years, China has launched the GF-7 satellite and ZY3-03 satellite, both equipped with laser altimetry systems, which are primarily employed for acquiring global laser elevation control points. With the steady operation of these satellites in orbit and the continuous acquisition of laser altimetry data, China has, for the first time, formed related data products in the field of laser altimetry, called Satellite Laser Altimetry standard (SLA03) data products for natural resources. To better understand the accuracy level of the products and guide the subsequent application and optimization, a comprehensive accuracy evaluation must be conducted. Based on the high-accurate airborne LiDAR data gathered in plain areas and mountainous regions with forests, thousands of laser points are collected to comprehensively evaluate the terrain height accuracy of the SLA03 data products for natural resources in this paper. After coordinate transformation and data conversion, the SLA03 data and reference data are unified into the same coordinate framework. Then, taking the size of the laser ground spot into consideration, the reference terrain elevations are obtained based on the points classified as ground from the LiDAR data. Multiple accuracy metrics, including overall bias, Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and 90th percentile Linear Error (LE90), are utilized for elevation accuracy assessment. Results show that, after eliminating the laser points located at tree canopies or buildings using a proper threshold, the height accuracy of the SLA03 data products from the GF-7 satellite is 0.653 m in RMSE and 1.055 m in LE90 in plain areas, with over 60% under 0.3 m, but decreases to 1.210 m (RMSE) and 2.002 m (LE90) in mountainous regions with forests. The accuracy of the SLA03 data products from the ZY3-03 satellite is 1.312 m (RMSE) and 2.389 m (LE90) in plain areas with more than 50% under 0.5 m, while in the mountainous regions with forests, it declines to 1.661 m (RMSE) and 2.999 m (LE90). The potential for elevation control points in the plains is above 60% for both the GF-7 and ZY3-03 satellites, but additional screening is required before use. The elevation accuracy of SLA03 products from the GF-7 satellite is obviously affected by seasonal factors, which are mainly caused by vegetation growth. Meanwhile, the elevation accuracy of SLA03 products from the ZY3-03 satellite is inferior to that of the GF-7 satellite, hindering the former satellite from effectively distinguishing the impact of seasonal changes in vegetation. The relevant conclusions will guide the effective application of SLA03 products and provide support for the design and parameter argumentation of subsequent satellite laser altimetry systems.

Key words: remote sensing, satellite laser altimetry, the GF-7 satellite, the ZY3-03 satellite, elevation accuracy, the SLA03 data product

Supported by Special Fund for High Resolution Images Surveying and Mapping Application System (No. 42-Y30B04-9001-19/21); National Natural Science Foundation of China (No. 41971425)