

高分七号卫星激光测高数据大型湖泊水位测量精度评估

李国元, 唐新明

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: 卫星激光测高数据在湖泊水位测量方面具有重要的应用价值和独特优势, 本文针对国产高分七号卫星上装备的线性体制全波形激光测高仪, 开展在大型湖泊水位测量方面的应用探讨。介绍了高分七号卫星的基本参数, 并与其他类卫星做了对比, 分析了影响湖泊水位测量精度的卫星侧摆、大气散射、回波波形饱和等因素, 研究了湖泊水面激光点的提取方法, 结合 ICESat、ICESat-2 在青海湖和哈拉湖上的激光点开展了对比分析, 并利用 RTK-GPS 测量方式对呼伦湖冰面激光点进行了实地精度验证。结果表明, 高分七号卫星湖面激光点虽然稀疏, 但内部一致性较好, 其中青海湖面高分七号两波束激光高程标准偏差分别为 0.056 m 和 0.080 m, 与 ICESat 的 0.079 m 相当; 相邻时间在哈拉湖同一湖面的高分七号两个波束与 ICESat-2 的高程均值相差分别为 -5.2 cm 和 -8.0 cm; 经实地测量评价两波束的湖面激光点绝对高程精度分别为: -0.030 ± 0.109 m 和 -0.195 ± 0.049 m。高分七号激光测高仪测量湖泊水位从精度上是可行的, 但还存在激光重频率偏低、观测能力弱等问题。相关结论对于拓展高分七号卫星激光测高数据在大型湖泊水位测量的应用以及后续激光测高卫星的立项论证均具有参考价值。

关键词: 高分七号, 卫星激光测高, ICESat-2, 湖泊水位, 精度评估

引用格式: 李国元, 唐新明. 2022. 高分七号卫星激光测高数据大型湖泊水位测量精度评估. 遥感学报, 26(1): 138-147

Li G Y and Tang X M. 2022. Accuracy evaluation of large lake water level measurement based on GF-7 laser altimetry data. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 138-147 [DOI: 10.11834/jrs.20221195]

1 引言

中国湖泊数量众多、类型多样、资源丰富、生态环境脆弱, 广泛分布在青藏高原、云贵高原、蒙新高原、东北平原、东部平原等五大湖区。据第二次全国湖泊调查统计, 中国面积大于 1 km² 的湖泊共有 2693 个, 总面积为 81414.66 km², 约占全国总面积的 0.85%, 其中超过一半位于青藏高原区域 (中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2019; Zhang 等, 2019a)。湖泊水位对气候变化和人类活动的响应非常敏感, 是湖泊动态变化监测的一个重要内容 (Vörösmarty 等, 2000)。传统的湖泊水位获取方式是通过地面水文监测站, 虽然具有测量精度高、观测频次连续等优点, 但也存在因地域及成本问题无法大规模建立水文站的问题, 卫星遥感在湖泊水位监测方面具有重要的应用价值

(金建文等, 2020)。

近年来, 对分布在环境恶劣的青藏高原或者偏远地区的大型湖泊, 卫星测高技术因其独特的优势而受到广泛的关注 (李建成等, 2007; 高永刚等, 2008; Michailovsky 等, 2012; Kleinherenbrink 等, 2014; 赵云等, 2017; 田山川等, 2018; 廖静娟等, 2018)。相比于卫星雷达测高 (廖静娟, 2020), 卫星激光测高的地面足印更小, 且受湖岸及波浪干扰概率更低, 在湖库水面测高方面更具有优势 (李国元, 2017; 葛莉等, 2017; Phan 等, 2012; Song 等, 2015; Zhang 等, 2019b)。国内外学者利用 2003 年—2009 年的 ICESat (Ice, Cloud and Land Elevation Satellite) 卫星的 GLAS (Geoscience Laser Altimetry System) 激光测高数据开展了长江中下游湖泊水位监测 (吴红波等, 2012)、青藏高原 154 个湖泊的水位变化 (Phan 等, 2012)、

收稿日期: 2021-04-12; 预印本: 2021-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41971425, 41871382); 自然资源卫星遥感预研与立项论证(编号:AA2113)

第一作者简介: 李国元, 1984 年生, 男, 副研究员, 研究方向为卫星激光测高及水资源遥感。E-mail: ligy@lasac.cn

中国十大湖泊水量变化 (Zhang 等, 2013)、青海湖 2003 年—2009 年面积及蓄水量变化 (杨雄丹等, 2020) 等具体应用研究。针对 2018 年美国发射成功的全球生态动力学调查系统 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) 多波束激光测高数据 (谢栋平等, 2018), 用瑞士 8 个天然湖泊的水位实测数据评估其在湖泊水位测量中的性能, 发现 GEDI 测量湖泊水位的精度在 0.15—0.32 m, 具有水位监测应用潜力 (Fayad 等, 2020)。清华大学宫鹏教授团队结合雷达测高卫星 SARAL (Satellite for ARGOS and ALTIKA) 和 ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite) 卫星, 从测量精度、时间频次以及覆盖能力等 3 个角度进行对比分析, 证明了 2018 年的新型激光测高卫星 ICESat-2 在湖泊及水库水位测量方面具有明显优势 (Yuan 等, 2020; 谢栋平等, 2020)。

由于之前国内没有高精度的对地观测卫星激光测高数据, 因此利用国产卫星激光测高数据测量湖库水位的研究在国内基本为空白。2019-11-03 成功发射的国产高分七号卫星装备了全波形线性体制的激光测高仪, 在 2016 年资源三号 02 星的试验性激光测高载荷数据处理技术基础上 (李国元和唐新明, 2017; 李国元等, 2019), 实现了国内激光高程测量水平的新进步, 但能否用于湖泊水位监测, 湖泊水位的绝对测量精度如何, 之前并

没有相关研究分析。针对国产激光测高仪的特点, 开展湖泊水位测量应用有哪些注意事项, 这些都是需要进行研究探讨的问题。本文采用高分七号卫星激光测高数据, 开展湖泊水位测量方面的精度评估, 希望能对于后续国产激光测高卫星型号的发展与湖泊水位监测规模化应用提供一些参考。

2 国产高分七号卫星激光测高数据介绍

如前所述, 美国先后发射了 ICESat、ICESat-2 以及 GEDI, 在卫星激光测高领域处于领先水平。特别是 2018-09-15 成功发射的新一代的冰云陆地高程卫星 ICESat-2 搭载了先进地形激光测高系统 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System), 采用 6 波束的 532 nm 激光脉冲, 每波束的重复频率高达 10 kHz、发散角约 35 μ rad, 地面激光足印直径 17.5 m, 沿轨向点间距约 0.7 m, 在湖泊水位监测方面具有广阔应用价值 (Yuan 等, 2020)。近几年来, 中国在该领域也取得了一定的进展, 在资源三号 02 星上首次实现了对地观测激光测高 (李国元等, 2017), 高分七号卫星激光测高仪虽然重频率离国外先进水平还有一定差距, 但在光斑直径等部分指标上优于国外同类卫星。表 1 列出了国内外对地观测卫星激光测高载荷的主要技术指标。

表 1 国内外对地观测卫星激光测高载荷主要技术指标

Table 1 Main technical parameters of laser altimeter loaded on earth observation satellite at home and abroad

卫星名称	国家	发射时间/年	数据采集方式	波束数	光斑直径/m	重频率/Hz	高程精度/m
ICESat	美国	2003	线性体制	1	70	40	0.15
ICESat-2	美国	2018	光子计数	6	17.5	10 k	0.10
GEDI	美国	2018	线性体制	14	25	241	0.30
LIST	美国	待定	光子计数	1000	5	10 k	—
资源三号 02 星	中国	2016	阈值探测	1	75	2	0.85
资源三号 03 星	中国	2020	阈值探测	1	50	2	0.30
高分七号	中国	2019	线性体制	2	19/21	3	0.10
陆地碳监测卫星	中国	2022	线性体制	5	25	40	—
陆海激光测量卫星	中国	待定	混合体制	>400	待定	待定	—

高分七号卫星的两波束激光测高仪指向在近似天底点方向的垂轨平面内, 并与天底点方向左右各成 0.7° 夹角, 地面激光点沿轨向的间距约 2.4 km、垂轨向约 12 km, 主要用于高精度的高程控制点获取, 提高同平台两线阵影像的立体测图精度 (Li 等, 2020), 详细技术参数如

表 2 所示。

高分七号卫星的激光测高仪虽然重频率偏低, 主要用于高程控制点获取, 但仍然有部分数据正好落在大型湖泊和水库上, 能用于水位测量等应用, 如图 1 所示, 红圈代表经在轨几何定标确认的激光实际落点位置。

表2 高分七号卫星激光测高仪基本参数
Table 2 The basic parameters of GF-7 Satellite Laser Altimeter

参数名称	数值
波长/nm	1064
激光器数量	4台(2主+2备)
发射频率/Hz	3
地面光斑大小	在轨测试值,波束1:19 m;波束2:21 m
波形采样频率	2 GHz,0.5 ns间隔
波形量化位数/bits	10
波形采样模式	高低增益分别采样
发射波形脉宽/ns	5—7

3 方法与试验

3.1 水位测量精度影响分析

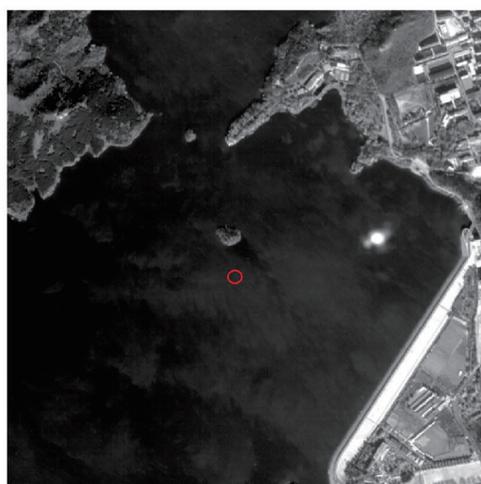
采用卫星激光测高数据进行湖泊水位测量及变化监测,对激光点的高程测量精度和可靠性要

求特别高。卫星侧摆、大气散射以及波形饱和等等对湖面上的激光点高程精度有明显的影响,必须对激光点进行质量控制,保留精度较高的点,并利用多点落在同一湖泊上进一步提高水位测量的精度和可靠性。

3.1.1 侧摆对水位测量精度的影响

地面上激光点高程反映的是特定平面位置上的高程值,当卫星无侧摆、激光完全垂直指向地面时,绝对平坦地区激光测高精度主要取决于测距精度。在卫星侧摆情况下,平面位置偏差也会影响激光测高精度,有一定坡度区域的测高精度退化会更加明显。如图2所示,卫星轨道高度近似为 H ,卫星侧摆下激光指向角为 θ ,激光指向角测量精度为 $\Delta\theta$,地形坡度为 S ,因卫星侧摆和地形起伏引起的高程误差 Δh 近似为式(1)(李国元等,2019)。

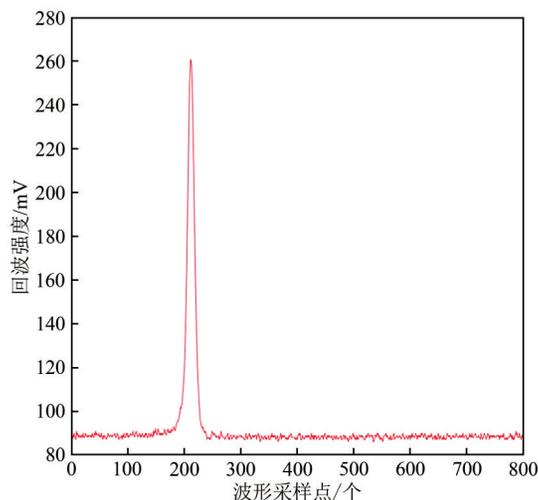
$$\Delta h = H\Delta\theta \tan(S + \theta) \quad (1)$$



○ 经过在轨几何定标确认的激光实际落点位置

(a) 水面足印影像

(a) Laser footprint image covering the water



(b) 水面激光点回波波形

(b) Echo waveform of laser point on the water

图1 高分七号卫星激光测高数据水体区域足印影像及回波波形

Fig. 1 The footprint image and echo waveform of GF-7 satellite laser altimetry data located on the water

当卫星在500 km轨道高度时,指向角测量误差与激光点平面和高程测量误差的对应关系如表3所示。地形坡度 $S=0^\circ$,指向角 $\theta=1^\circ$ 时,1"的指向角测量误差约引起0.042 m的高程偏差。叠加姿态测量误差后,目前高分七号卫星激光测高仪的绝对指向角测量精度约2.5",卫星轨道高度为500 km时对应地面点的平面精度约6.0 m。在无风的平静湖泊水库表面,其坡度可近似为 0° ,此时基于式(1),侧摆角为 1° 时,高程误差约0.106 m;侧

摆角为 2° 时,高程误差约0.212 m;若水面因风浪等影响有一定小坡度,则侧摆时高程测量精度会进一步下降。在同样的指向角测量误差下,卫星侧摆越大,激光点的高程测量误差越大。因此,为了保证水面高程测量精度,应选择侧摆角较小的数据,考虑到高分七号卫星本身具有左右 0.7° 的安装角,本文建议选择卫星侧摆小于 0.3° 的激光测高数据用于湖泊水位测量。

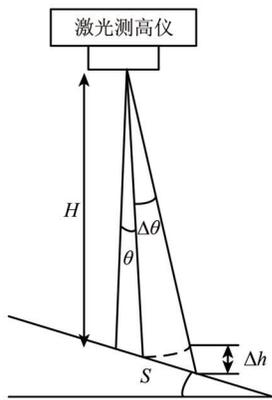


图2 侧摆和地形起伏引起激光点误差示意图

Fig. 2 The illustration of location error introduced by the sway and topographic relief

3.1.2 大气散射对水位测量精度的影响

激光传输路径上的云、气溶胶等除对激光能量有衰减外, 还会因散射产生距离向的延迟效应, 进而影响最终的高程测量精度。大气散射对激光测量精度的影响主要与云层高度、厚度、云相态, 气溶胶厚度等因素相关, 李国元等 (2020) 较详细地分析了大气散射对激光测高精度的影响, 湖泊水面的点受大气散射影响, 其测高精度会有明显退化。目前从高分七号激光实际回波波形中难以直接识别是否受大气散射影响, 但足印影像中

记录了激光落点附近是否有云雾影响, 可作为大气散射影响的一个参考, 以提高湖泊水位测量精度。

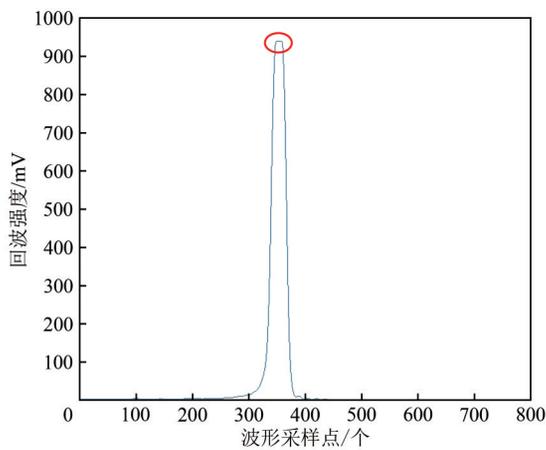
表3 指向角测量误差与激光点精度对应表

Table 3 The corresponding table of laser points accuracy and pointing measurement error

坡度及指向角/ (°)	指向角测量误差/ (")	平面误差/ m	高程误差/ m
S=0, θ=1	1	2.42	0.042
S=0, θ=1	2	4.85	0.085
S=0, θ=1	2.5	6.06	0.106
S=0, θ=2	2	4.85	0.169
S=0, θ=2	2.5	6.06	0.212
S=1, θ=2	2	4.85	0.254
S=1, θ=2	2.5	6.06	0.318

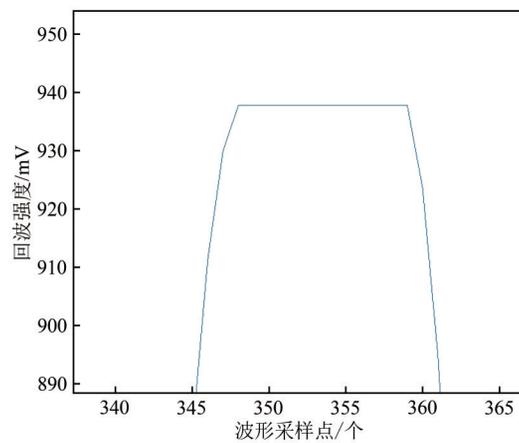
3.1.3 回波波形成饱和

卫星发射激光脉冲到达湖面然后返回的过程中, 因镜面反射或湖面结冰形成强反射, 可能产生耀斑效应, 此时回波波形易产生饱和, 进而影响激光点的高程测量精度。图3为高分七号卫星在呼伦湖上一个回波波形发生饱和的激光点, 该点主要是由于湖面结冰后对 1064 nm 的激光有较高的反射率并叠加镜面反射引起的。



(a) 出现饱和的回波波形

(a) Echo waveform with saturation



(b) 饱和波形局部放大图

(b) Local enlarged view of saturated echo waveform

图3 回波波形出现饱和的湖面激光点

Fig. 3 The laser point located on the lake with saturation waveform

3.2 高分七号卫星湖泊水面激光点提取方法

本文提出一种面向高分七号卫星激光测高数据的大型湖泊水面激光点提取方法, 该方法首先

基于湖泊边界矢量数据 HydroLAKES (Messenger 等, 2016), 结合激光点的经纬度位置信息, 初步判断哪些激光点落在湖泊上。考虑湖泊边界矢量数据

的本身误差以及湖泊边界季节性变化,进一步结合激光点在足印影像上的落点位置,剔除湖岸交界处判别为水面但实际落在陆地上的错误点。对于湖岸交界处判别为陆地上的点,可借助足印影像提取实际落在水面但被漏判的激光点,增加落在湖面上的激光点数量。结合激光点的回波波峰数、回波脉宽、回波波形信噪比、落在同一湖面上的点数等,对高分七号卫星激光测高数据进行筛选,具体流程如图4所示。

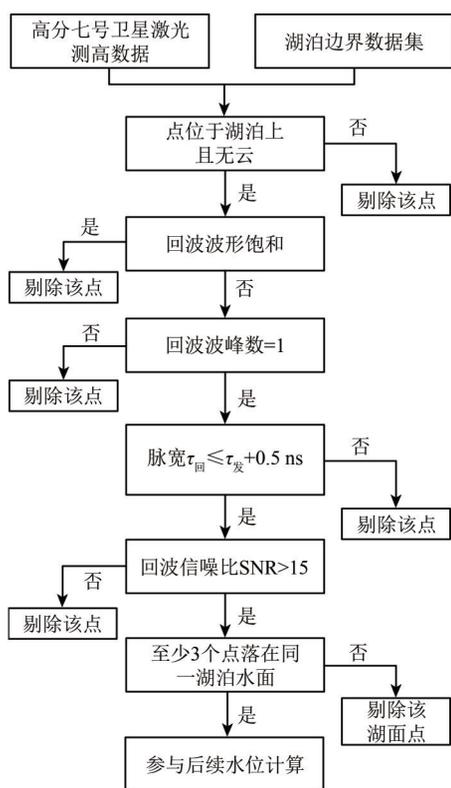


图4 高分七号卫星湖泊水面激光点提取流程图
Fig. 4 The workflow of extracting the GF-7 laser points on the lake

对于沿卫星轨道(南北向)较大的湖泊水库,如果有多个激光点落在同一个水面,则结合多点的平均值和标准偏差,借助粗差剔除法去掉高程存在较大偏差的激光点。中位数绝对偏差方法具有很强的粗差探测能力,可以有效识别湖泊水位高程异常值,其粗差探测计算方法如式(2)和(3)所示。

$$\text{MAD} = 1.4826M\left(\left|a_1 - M(a_1, \dots, a_n)\right|, \dots, \left|a_n - M(a_1, \dots, a_n)\right|\right) \quad (2)$$

$$H_{\text{outlier}} < M(a_1, \dots, a_n) - 3 \cdot \text{MAD} \text{ or } H_{\text{outlier}} > M(a_1, \dots, a_n) + 3 \cdot \text{MAD} \quad (3)$$

式中, a_1, \dots, a_n 是沿轨高程序列, M 是高程序列中位数; H_{outlier} 是高程粗差值。

3.3 精度分析

3.3.1 与 ICESat 和 ICESat-2 数据对比分析

本文取青海湖面 2008-10-05 的 ICESat 和 2020-09-28 的高分七号及 ICESat-2 卫星激光数据,其分布如图5所示。

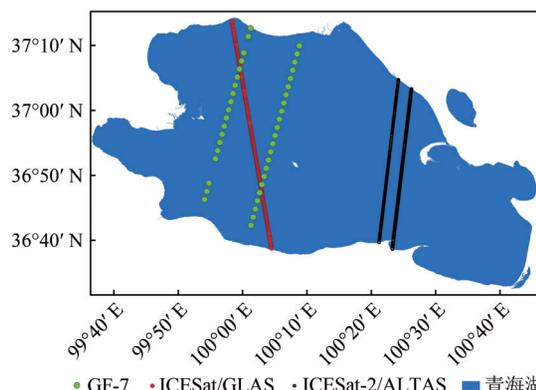


图5 青海湖区域的GF-7和ICESat/ICESat-2卫星激光测高点

Fig. 5 The distribution of GF-7 and ICESat/ICESat-2 laser altimetry points located on Qinghai Lake

由于高分七号卫星和ICESat-2激光点基准为WGS84椭球下的大地高,而ICESat激光点采用TOPEX/Poseidon(T/P)卫星椭球下的大地高,因此需要将三者的高程基准进行统一。首先将ICESat激光点高程归算到WGS84大地高,然后采用EGM2008大地水准面改正模型统一对3种卫星激光点进行基准转换,如式(4)所示。

$$H = H_g - \Delta h - \xi \quad (4)$$

式中, H 为大地水准面高, H_g 为激光点在T/P椭球下的大地高, ξ 为采用EGM2008模型计算的大地水准面改正值。 Δh 为T/P和WGS84两个椭球间的差距, $\Delta h = -\cos^2 B \Delta a - \sin^2 B \Delta b$, 其中 B 为纬度, Δa 、 Δb 为两个参考椭球长轴、短轴之间的差值。

ICESat/GLAS数据也采用了线性体制的全波形采样记录模式,跟高分七号激光数据有一定的可比性,但考虑到两个卫星时间间隔较远、没有重复观测的湖面数据,因此主要对比分析了两者的内部一致性。ICESat-2则与高分七号在2020-09-28同一天经过青海湖,理论上湖面高程应该具有一致性,因此对两者进行了绝对高程精度对比分析。统计在同轨内连续多个激光点高程的标准偏

差, 除高分七号激光点进行筛选外, ICESat 和 ICESat-2 的激光点也采用了前述 3.2 节中的中位数绝对偏差方法进行了粗差点剔除, 三者的对比结果如表 4 所示。

表 4 青海湖 ICESat 和高分七号卫星激光点高程精度对比

Table 4 Elevation accuracy comparison of ICESat and GF-7 laser points located on the Qinghai Lake

卫星名称	ICESat	ICESat-2	GF-7	
激光器	GLAS(L3K)	ATLAS	波束 1	波束 2
获取日期	2008-10-05	2020-09-28	2020-09-28	2020-09-28
剔除前	点数	371	24	26
	高程均值/m	3195.361	3197.749	3197.583
	高程标准偏差/m	0.108	0.084	0.103
删除后	点数	305	19	23
	高程均值/m	3195.370	3197.733	3197.563
	高程标准偏差/m	0.079	0.051	0.080

从表 4 可以看出, 高重频的光子体制的 ICESat-2 在湖面的内部一致性最优, 达到了 0.045 m; ICESat 和高分七号同为全波形线性体制, 内部一致性分别为 0.079 m、0.051 m 和 0.080 m, 两者水平基本相当, 其中高分七号的波束 1 略优。此外, 同一天经过青海湖的高分七号和 ICESat-2 在绝对高程精度方面, 高分七号的波束 1 与 ICESat-2 分别为 3197.733 m 和 3197.798 m, 相差仅 6.5 cm, 但波束 2 与波束 1、ICESat-2 分别相差 17 cm 和 23.5 cm, 与文献 (Li 等, 2020) 中波束 2 的质量稍差的结论基本一致。

考虑到上述青海湖区高分七号与 ICESat-2 虽然在一个湖区但地理位置相差较远, 因此选取时间相近经过同一湖泊且激光落点位置相近的哈拉湖的 ICESat-2 和高分七号卫星激光测高数据, 进一步对比验证高分七号激光点的精度及水位测量能力。如图 6 所示, 绿色和红色分别代表高分七号和 ICESat-2 于 2020-06-26、2020-06-18 日经过哈拉湖区的激光点, 对比结果如表 5 所示。

从表 5 中可以看出, 哈拉湖区的高分七号激光

点较为稀疏, 但内部一致性较好, 两波束激光高程偏差分别为 3.5 cm 和 6.2 cm, 高分七号波束 1 与 ICESat-2 的多波束的高程偏差基本接近, 波束 2 略差但稍好于 ICESat-2 弱波束 gt2R 的高程偏差 9.3 cm。取 ICESat-2 的多波束平均值 4081.876 m 作为参考值, 高分七号的两个波束与该值的较差分别为: -5.2 cm 和 -8.0 cm。

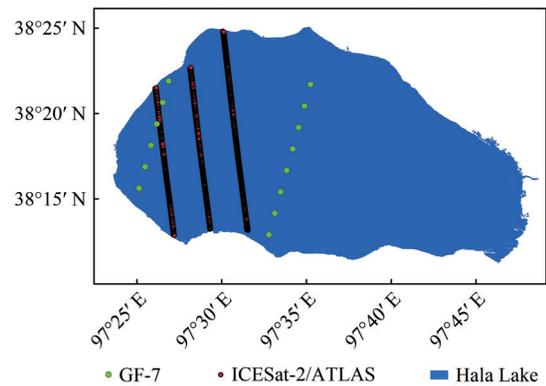


图 6 哈拉湖区的高分七号和 ICESat-2 激光点分布示意图
Fig. 6 The distribution of GF-7 and ICESat-2 laser altimetry points located on the Hala Lake

表 5 哈拉湖面高分七号和 ICESat-2 卫星激光高程精度对比表

Table 5 The accuracy comparison of GF-7 and ICESat-2 laser altimetry points located on the Hala Lake

卫星名称	ICESat-2						GF-7	
激光器	ATLAS						波束 1	波束 2
	gt1L	gt1R	gt2L	gt2R	gt3L	gt3R		
获取日期	2020-06-18						2020-06-26	
点总数	485	148	439	171	888	311	6	8
高程均值/m	4081.858	4081.827	4081.924	4081.862	4081.879	4081.860	4081.824	4081.796
高程标准偏差/m	0.033	0.029	0.035	0.093	0.038	0.037	0.035	0.062

3.3.2 绝对测量精度验证

为了验证高分七号卫星在湖泊表面的绝对测量精度，选取冬季结冰后的北方湖泊，结合高分七号激光的落点位置，用RTK-GPS的测量方式实地采集了若干个湖面高程值，其中RTK-GPS实地测量的绝对高程测量精度优于3 cm。图7 (a)展示的是高分七号第6252和6329轨分别于2020-12-18

和2020-12-23经过内蒙古呼伦湖区的激光点轨迹，由于为夜间升轨开机，无法获取同期的影像，当地气象记录显示呼伦湖在该时段已经全部结冰。图7 (b)为2021-02湖面冰冻实后外业实地测量时按激光落点位置在冰面放置的GPS接收机，其中激光落点平面误差优于6.0 m (李国元等, 2021)。

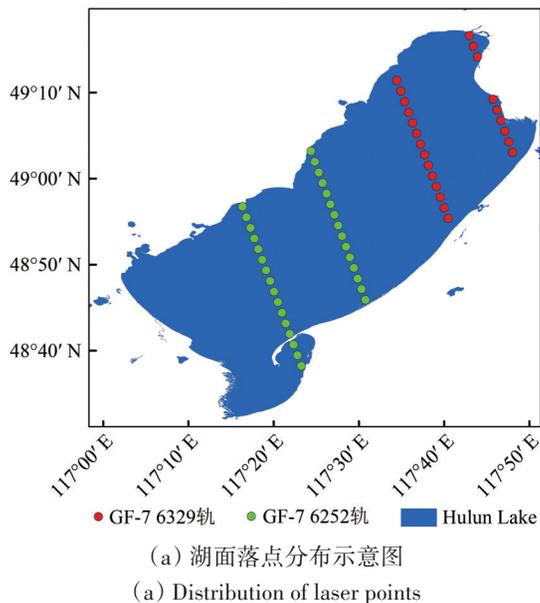


图7 呼伦湖面高分七号激光点及实地测量照片

Fig. 7 GF-7 laser points located on the Hulun Lake and the field surveying photo

由于高分七号激光点的间距较大，如果深入湖中心进行实地测量，交通和安全保障都有一定难度，因此最终选取了靠近湖岸且冰面平坦、波形没有饱和的6个激光点，统计绝对高程误差，结

果如表6所示。表6中高程误差均为负值，即激光点高程计算值比实测值偏低，特别是波束2，有可能包含了因测量时间不一致导致冰面膨胀而产生的部分误差。

表6 高分七号激光点湖面高程绝对精度统计表

Table 6 The absolute elevation accuracy statistical result of GF-7 laser points located on the Hulun Lake

	点号	激光点高程/m	实测高程/m	高程误差/m	统计结果/m
波束1	1127964749	533.317	533.271	-0.046	-0.030±0.109
	1127964745	533.370	533.308	-0.062	
	1127964741	533.433	533.298	-0.135	
波束2	1127964718	533.105	532.960	-0.145	-0.195±0.049
	1127964722	533.079	532.836	-0.243	
	1127964730	532.938	532.740	-0.198	

4 结论

作为中国首台业务化应用的对地观测激光测高仪，虽然其主要用途是获取高程控制点，辅助立体影像进行高精度测图，但开展高分七号卫星

激光测高数据在大型湖库水位测量方面的应用实践具有重要的科研和应用价值。通过本文的试验，可以得出如下结论：

(1) 高分七号卫星激光测高仪能有效获取大型湖泊的水位值，经实地测量评价两波束的绝对高程精

度分别为: $-0.030\text{ m}\pm 0.109\text{ m}$ 和 $-0.195\text{ m}\pm 0.049\text{ m}$, 波束 2 的绝对精度比波束 1 稍差一些。

(2) 与 ICESat 卫星在青海湖面的激光点相比, 高分七号卫星激光点湖面高程内部一致性相当, 高分七号两波束的湖面高程标准偏差分别为 0.056 m 和 0.080 m , ICESat 为 0.079 m , 其中高分七号的波束 1 指标略优。

(3) 与 ICESat-2 卫星对比, 高分七号卫星的湖面点显得更为稀疏, 相邻时间的哈拉湖同一湖面的高分七号两个波束与 ICESat-2 的绝对高程均值相差分别为 -5.2 cm 和 -8.0 cm 。

(4) 在卫星侧摆时其精度有较大退化, 激光指向角大于 1° 时额外引入的高程误差会超过 0.106 m , 建议为保证大型湖库水位测量精度, 应使用侧摆角小于 0.3° 的数据。同时应综合考虑大气散射、湖岸分界、波形饱和等其他因素的影响, 确保激光点的可靠性和精度。

卫星激光测高因其具有较高的高程测量精度及较小的足印直径, 在大型湖泊和水库水位测量方面具有独特的优势。为保证能有效测量湖泊水位值, 至少需要 3 个有效的激光点落在同一湖面上形成交叉验证, 而高分七号的激光点间距相对较大, 导致目前仅能测量南北向长度大于 2.4 km , 在水位测量方面的规模化应用还受到一定限制。

本文的研究结论说明, 利用国产高分七号卫星激光测高仪测量大型湖泊水位值从技术上是可行的、验证区的精度基本跟国外的相当, 但因激光重频率偏低导致规模化应用还比较困难, 若开展长周期变化监测则对激光的重频率、卫星的覆盖和重访能力提出了更高要求, 需在后续卫星论证过程中对相关参数进行优化设计, 实现最佳应用效果。未来随着国产陆海激光测量卫星以及新型激光三维成像卫星的立项与发射 (唐新明和李国元, 2019), 必能最终实现快速、精确、长周期地掌握湖泊和水库的水位及变化信息, 为水资源调查监测、生态文明建设以及应对全球气候变化提供更有力的支撑。

志 谢 本文在呼伦湖面高分七号激光点实测数据得到了黑龙江测绘地理信息局的朱李忠、刘沼辉、韩慧军等外业测量人员的支持, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- Fayad I, Baghdadi N, Bailly J S, Frappart F and Zribi M. 2020. Analysis of GEDI elevation data accuracy for inland waterbodies altimetry. *Remote Sensing*, 12(17): 2714 [DOI: 10.3390/rs12172714]
- Gao Y G, Guo J Y and Yue J P. 2008. Lake level variations measurement with satellite altimetry. *Science of Surveying and Mapping*, 33(6): 73-75, 29 (高永刚, 郭金运, 岳建平. 2008. 卫星测高在陆地湖泊水位变化监测中的应用. *测绘科学*, 33(6): 73-75, 29) [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.06.024]
- Ge L, Xi X H, Wang C and Khuon K N. 2017. Research progress of ICESat-1/GLAS in lake level monitoring. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(1): 14-19 (葛莉, 刁晓环, 王成, Khuon K N. 2017. ICESat-1/GLAS 数据湖泊水位监测研究进展. *遥感技术与应用*, 32(1): 14-19) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.1.0014]
- Jin J W, Li G Y, Sun W, Yang X D, Chang X T, Liu K and Liu Y. 2020. Application status and prospect on water resources investigation and monitoring by satellite remote sensing. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 7-10 (金建文, 李国元, 孙伟, 杨雄丹, 常晓涛, 刘克, 刘瑶. 2020. 卫星遥感水资源调查监测应用现状及展望. *测绘通报*, (5): 7-10) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0135]
- Kleinherenbrink M, Ditmar P G and Lindenbergh R C. 2014. Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction. *Remote Sensing of Environment*, 152: 38-50 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.014]
- Li G Y, Tang X M, Chen J Y, Yao 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, 刘沼, 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)
- Li G Y. 2017. *Earth Observing Satellite Laser Altimeter Data Processing Method and Engineer Practice*. Wuhan: Wuhan University (李国元. 2017. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践. 武汉: 武汉大学)
- 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)
- Li G Y, Guo J Q, Tang X M, Ye F H, Zuo Z Q, Liu Z, Chen J Y and Xue Y C. 2020. Preliminary quality analysis of GF-7 satellite laser altimeter full waveform data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2020: 129-134 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-129-2020]
- 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, Fan W F, Dou X H and Ma Y. 2017. On-orbit geometric calibration of satellite laser altimeter using ground-based IR detectors. *Infrared and Laser Engineering*, 46(11): 1117004 (李国元, 唐新明, 樊文锋, 窦显辉, 马跃. 2017. 基于地面红外探测器的星载激光测高仪在轨几何定标. 红外与激光工程, 46(11): 1117004) [DOI: 10.3788/IRLA201746.1117004]
- Li G Y, Yao J Q, Zhao Y M, Li Z Q, Li X and Tang H Z. 2020. Progress and prospect of atmospheric scattering correction for laser altimetry satellite. *Infrared and Laser Engineering*, 49(11): 20200234 (李国元, 么嘉棋, 赵一鸣, 李正强, 李旭, 唐洪钊. 2020. 激光测高卫星大气散射延迟改正现状 & 展望. 红外与激光工程, 49(11): 20200234) [DOI: 10.3788/IRLA20200234]
- Li J C, Chu Y H, Jiang W P and Xu X Y. 2007. Monitoring level fluctuation of lakes in Yangtze River basin by altimetry. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 32(2): 144-147 (李建成, 褚永海, 姜卫平, 徐新禹. 2007. 利用卫星测高资料监测长江中下游湖泊水位变化. 武汉大学学报(信息科学版), 32(2): 144-147) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2007.02.013]
- Liao J J. 2020. Space-Borne Radar Altimetry Data Processing and Land Application. Beijing: Science Press (廖静娟. 2020. 星载雷达高度计数据处理及陆地应用. 北京: 科学出版社)
- Liao J J, Shen G Z and Zhao Y. 2018. Dataset of global lake level changes using multi-altimeter data (2002-2016). *Journal of Global Change Data and Discovery*, 7(3): 295-302 (廖静娟, 沈国状, 赵云. 2018. 多源雷达高度计全球典型湖泊水位变化数据集(2002-2016). 全球变化数据学报(中英文), 7(3): 295-302) [DOI: 10.3974/geodp.2018.03.07]
- Messenger M L, Lehner B, Grill G, Nedeva I and Schmitt O. 2016. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 7: 13603 [DOI: 10.1038/ncomms13603]
- Michailovsky C I, McEnnis S, Berry P A M, Smith R and Bauer-Gottwein P. 2012. River monitoring from satellite radar altimetry in the Zambezi River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7): 2181-2192 [DOI: 10.5194/hess-16-2181-2012]
- Nanjing Institute of Geography and Limnology Chinese Academy of Sciences. 2019. The investigation report on lakes in China. Beijing: Science Press (中国科学院南京地理与湖泊研究所. 2019. 中国湖泊调查报告. 北京: 科学出版社)
- Phan V H, Lindenbergh R and Menenti M. 2012. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 17: 12-22 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.015]
- Song C Q, Ye Q H, Sheng Y W and Gong T L. 2015. Combined ICESat and CryoSat-2 altimetry for accessing water level dynamics of Tibetan Lakes over 2003-2014. *Water*, 7(9): 4685-4700 [DOI: 10.3390/W7094685]
- Tang X M and Li G Y. 2019. Thoughts about land and sea satellite laser altimetry. *Aerospace Shanghai*, 36(3): 15-19 (唐新明, 李国元. 2019. 陆海激光卫星高程测量的思考. 上海航天, 36(3): 15-19) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.03.002]
- Tian S C, Hao W F, Li F and Luo T W. 2018. Waveform analysis and retracking of lake level monitoring by satellite altimeter considering the difference between land and lake reflection. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(4): 498-507 (田山川, 郝卫峰, 李斐, 罗天文. 2018. 顾及陆湖反射差异的卫星测高监测湖泊水位的波形分析与重定. 测绘学报, 47(4): 498-507) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170348]
- Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J and Lammers R B. 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*, 289(5477): 284-288 [DOI: 10.1126/science.289.5477.284]
- Wu H B, Guo Z M and Mao R J. 2012. Monitoring lake water level changes in the middle and lower Yangtze River Basin based on ICESat-GLAS altimetry data. *Resources Science*, 34(12): 2289-2298 (吴红波, 郭忠明, 毛瑞娟. 2012. ICESat-GLAS测高数据在长江中下游湖泊水位变化监测中的应用. 资源科学, 34(12): 2289-2298)
- Xie D P, Li G Y, Wang J M, Guo J Q, Yao J Q and Yang C. 2020. An overview of the application prospect of new laser altimetry satellite ICESat-2 in geoscience. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 43(12): 38-42, 45 (谢栋平, 李国元, 王建敏, 郭金权, 么嘉棋, 杨超. 2020. 新型激光测高卫星 ICESat-2 在地学中的应用前景综述. 测绘与空间地理信息, 43(12): 38-42, 45) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2020.12.010]
- Xie D P, Li G Y, Zhao Y M, Yang X D, Tang X M and Fu A M. 2018. U.S. GEDI space-based laser altimetry system and its application. *Space International*, (12): 39-44 (谢栋平, 李国元, 赵严铭, 杨雄丹, 唐新明, 付安民. 2018. 美国 GEDI 天基激光测高系统及其应用. 国际太空, (12): 39-44) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2018.12.008]
- Yang X D, Li G Y, Wang P X, Chang X T and Yao J Q. 2020. Monitoring of Qinghai Lake changes with spaceborne laser altimetry and remote sensing images. *Science of Surveying and Mapping*, 45(5): 79-87 (杨雄丹, 李国元, 王佩贤, 常晓涛, 么嘉棋. 2020. 星载激光测高结合遥感影像的青海湖变化监测. 测绘科学, 45(5): 79-87) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2020.05.012]
- Yuan C, Gong P and Bai Y Q. 2020. Performance assessment of ICESat-2 laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China. *Remote Sensing*, 12(5): 770 [DOI: 10.3390/rs12050770]
- Zhang G Q, Chen W F and Xie H J. 2019b. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and Landsat missions. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 13107-13118 [DOI: 10.1029/2019GL085032]
- Zhang G Q, Xie H J, Yao T D and Kang S C. 2013. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data. *Chinese Science Bulletin*, 58(31): 3815-3829 [DOI: 10.1007/s11434-013-5818-y]
- Zhang G Q, Yao T D, Chen W F, Zheng G X, Shum C K, Yang K, Piao S, Sheng Y W, Yi S, Li J L, O'Reilly C M, Qi S H, Shen S S P, Zhang H B and Jia Y Y. 2019a. Regional differences of lake evolu-

tion across China during 1960s - 2015 and its natural and anthropogenic causes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 386-404 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.038]
Zhao Y, Liao J J, Shen G Z and Zhang X L. 2017. Monitoring the wa-

ter level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing*, 21(4): 633-644 (赵云, 廖静娟, 沈国状, 张学良. 2017. 卫星测高数据监测青海湖水位变化. *遥感学报*, 21(4): 633-644) [DOI: 10.11834/jrs.20176217]

Accuracy evaluation of large lake water level measurement based on GF-7 laser altimetry data

LI Guoyuan, TANG Xinming

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: Lake level elevation and variation are important indicators for the global climate change, and satellite altimetry especially the laser altimetry data is a valuable data source. GF-7 laser altimeter as the first business application load with full-waveform can be used to measure the lake level, except for elevation control points. To evaluate the GF-7 satellite laser altimetry data on the lake, the basic parameters are introduced, and the relative and elevation accuracy of ICESat and ICESat-2 laser points located on large lakes is compared. The absolute elevation accuracy is analyzed by the field surveying result.

A method to extract the GF-7 satellite laser altimetry points located on a large lake with high precision and reliability is presented, and the side-sway of the satellite, the atmospheric scatter, and echo waveform saturation that influence the elevation accuracy are discussed. The laser point with 1° side-angle can induce 0.106 m elevation error and the points on the lake less than 0.3° side-angle can be used to measure the lake level. The unique footprint image of GF-7 satellite is introduced to extract the laser points located on the lake. It can be used to judge the location of the laser point, whether it is in the lake or on the land and whether it is influenced by the cloud or dense fog and haze. Moreover, the saturation of echo waveform and the error elimination by median absolute deviation are introduced to ensure the reliability of the laser points.

The absolute elevation accuracies of beam 1 and beam 2 are -0.030 ± 0.109 m and -0.195 ± 0.049 m, respectively, according to the field RTK-GPS surveying on the frozen Hulun Lake. The internal consistency of GF-7 laser points is better than that of ICESat laser points on Qinghai Lake, and beam 1 is slightly better than beam 2, with standard deviation of 0.056 and 0.080 m, respectively, which are equal to ICESat's 0.079 m. Compared with ICESat-2, the lake surface points of GF-7 are sparser, but the accuracy is the same. The mean difference between the two beams of GF-7 and ICESat-2 in the same area of Hala Lake in adjacent time is -5.2 and -8.0 cm, respectively.

The laser altimeter of GF-7 satellite can effectively obtain the water level of large lakes, and the relative and absolute elevation accuracy of GF-7 satellite laser altimetry points after extraction is equal to the ICESat and ICESat-2 laser points in the large lake. Under certain conditions, GF-7 laser altimeter can measure lake water level in terms of accuracy, but some problems, such as low repetition frequency of laser and weak observation ability, still exist. The conclusion can be viewed as reference for the next generation laser altimetry satellite, such as the land and sea laser satellite of China. Also, the combined of different satellite laser altimetry data on the lake maybe an effective way for the future application.

Key words: GF-7, satellite laser altimetry, ICESat-2, lake water level, accuracy evaluation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41971425, 41871382); Natural Resources Remote Sensing Satellite pre-Research and Project Demonstration (No. AA2113)