

基于地面红外探测器的星载激光测高仪在轨几何定标

李国元^{1,2}, 唐新明^{1,2}, 樊文锋¹, 窦显辉¹, 马 跃³

- (1. 国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心, 北京 100048;
2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023;
3. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 高精度在轨几何定标是星载激光测高仪有效应用的基础, 在参考国外冰、云和陆地高程卫星 (Ice, cloud and land Elevation Satellite, ICESat) 卫星搭载的地球科学激光测高系统 (Geo-science Laser Altimeter System, GLAS) 几何定标的基础上, 提出了一种基于地面红外探测器的星载激光测高仪几何定标方法。采用资源三号 02 星上搭载的国内首台试验性对地观测激光测高仪的真实数据开展了实验验证。实验结果表明: 地面红外探测器能有效捕捉到激光测高仪对地发射的激光信号, 几何定标方法能有效消除指向角的系统误差项, 标定后平面绝对精度可提高到 15.0 m 左右, 而华北某地高精度地形数据验证表明其绝对高程精度可提高到 1.09 m, 少量点高程误差小于 0.5 m。虽然精度水平离国外 GLAS 还有一定差距, 但相关结论能为后续国产激光测高卫星的优化设计、数据处理与应用提供参考。

关键词: 几何定标; 红外探测器; 星载激光测高仪; 激光指向

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1117004

On-orbit geometric calibration of satellite laser altimeter using ground-based IR detectors

Li Guoyuan^{1,2}, Tang Xinming^{1,2}, Fan Wenfeng¹, Dou Xianhui¹, Ma Yue³

- (1. Satellite Surveying and Mapping Application Centre, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Beijing 100048, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: High precision on-orbit geometric calibration is an indispensable step for space-borne laser altimeter, and which is the foundation for effective application. Considering the geometric calibration method of foreign Geo-science Laser Altimeter System (GLAS) loaded on Ice cloud and land Elevation Satellite (ICESat), an algorithm of satellite laser altimeter geometric calibration was proposed, which used the ground infrared detectors to capture the laser signal transmitted from the satellite. Experiment was carried out using ZY3-02 satellite, which was equipped with domestic first laser altimeter for earth observation. The result shows that the ground infrared detectors can effectively capture the laser signal

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41601505); 国家高分专项高分遥感测绘应用示范系统项目(AH1601-8); 国家测绘地理信息局 2017 年基础测绘科技项目(2017KJ0204)

作者简介: 李国元(1984-), 男, 注册测绘师, 博士, 主要从事卫星激光测高方面的研究。Email: ligy@sasmac.cn

transmitted from the satellite, the geometric calibration method can eliminate the pointing angle systematic error and improve the height accuracy of laser footprint dramatically. After geometric calibration, the absolute planimetry accuracy can be improved to 15.0 m, and the vertical accuracy is about 1.09 m and a small amount of points even better than 0.5 m according to the experimental region of North China using high accuracy DEM as referenced dataset. Although the disparity of accuracy is clear compared with GLAS, the conclusion can provide a reference for the optimization design, data processing and application of the subsequent domestic laser altimetry satellite.

Key words: geometric calibration; infrared detector; satellite laser altimeter; laser pointing

0 引言

当前,我国的对地观测遥感卫星发展迅猛,已经逐步形成了环境减灾、气象、海洋、资源等卫星系列,在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》、国家陆海观测卫星规划以及测绘卫星发展规划中,都明确提出要发展对地观测的激光测高卫星。其中,计划在2018年左右发射的高分七号以及陆地生态系统碳监测卫星中就包括激光测高仪^[1]。

高精度在轨几何定标是星载激光测高数据能有效应用的基础,已有多名学者开展相关研究。Luthcke等建议卫星在大洋上空时采用机动飞行的方式对激光测高仪的指向误差进行标定^[2]。Schutz研究了GLAS的在轨几何定标方法^[3]。Martin等采用精细的地形数据对激光测高仪的距离和指向偏差进行了标定^[4]。Magruder等采用地面红外探测和角反射器对GLAS激光测高仪的指向角和时间同步误差进行定标分析^[5]。Li提出了一种基于地形匹配的激光指向角粗标定方法^[6]。Sirota等对GLAS发射激光的指向确定方法进行了介绍,分析了系统误差^[7]。Li等结合GLAS激光测高数据与资源三号卫星影像有效提升了影像的无控高程精度,但要求参与平差计算的GLAS点精度优于1.0 m^[8]。朱剑锋对星载激光测高的系统误差及检校方法进行了综述介绍^[9]。黄朝围等对不同地形条件下星载激光测高的系统误差进行了分析^[10]。马跃等对激光测高仪姿态误差进行了检校研究,但停留在模拟仿真阶段^[11]。黄继鹏等设计了一个激光光斑测量系统,并对提高光斑测量精度的相关技术进行了仿真研究^[12];周辉等根据星载激光测高仪接收脉冲回波和噪声的分

布特点,建立了噪声对激光测距误差的影响模型^[13]。杨驰等分析了激光光斑为椭圆时测距误差大小^[14]。但由于国内之前没有发射过激光测高卫星,因此相关的几何标定研究大多在实验室论证、仿真分析阶段,迫切需要开展相应的实际研究分析。资源三号02星上搭载了一个试验性激光测高仪,正好为开展相关研究提供了数据支撑。

文中分析了卫星激光测高几何定位原理,以此为切入点,介绍了基于地面红外探测器的激光指向角和测距系统误差几何定标方法,并采用资源三号02星试验性激光测高载荷在华北地区的外场实验数据和高精度DEM数据进行了验证分析。

1 卫星激光测高几何定标方法

1.1 卫星激光测高几何定位原理

对地观测的星载激光测高仪通过发射系统向地面发射激光脉冲,经大气传输和地面反射后,再经卫星接收系统获得返回的激光脉冲信号,通过激光往返的时间和光速得到距离值,结合卫星的位置和姿态信息,即可求得地面激光足印点的三维空间坐标。参考文献[1]中给出了卫星激光测高卫星的严密几何模型,文中结合资源三号02星激光测高仪试验载荷的特点,将其几何定位原理通过公式(1)进行描述。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} = \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix}_{WGS84} + R_{J2000}^{WGS84} R_{Star}^{J2000} \begin{pmatrix} (\rho' + d\rho)\cos Ax \\ (\rho' + d\rho)\cos By \\ (\rho' + d\rho)\cos Cz \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中： $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ 为激光足印点在地心直角坐标下的三维

空间坐标； $\begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix}$ 为星载双频 GPS 天线相位中心在

激光工作时刻时的位置； R_{J2000}^{WGS84} 为 J2000 惯性坐标系与 WGS84 坐标系的旋转矩阵； R_{Star}^{J2000} 为姿态测量基准系到 J2000 坐标系的转换矩阵； $d\rho$ 为系统性测距改正常数，需要进行在轨标定。 $(T_x, T_y, T_z)^T$ 为卫星本体坐标系中激光参考点相对于 GPS 相位中心的偏移值，由实验室测定， $(\cos A_x, \cos B_y, \cos C_z)^T$ 为激光指向向量，即 A_x, B_y, C_z 为激光指向角，描述的是激光参考轴与姿态测量基准系三个轴向的夹角，由实验室测定，需要进行标定修正。

其中，指向角 A_x, B_y, C_z 三者相关，满足公式(2)：

$$\cos^2 A_x + \cos^2 B_y + \cos^2 C_z = 1 \quad (2)$$

因此，在星载激光测高仪几何标定过程中，共有三个独立参数，它们分别是指向角 A_x, B_y 和测距系统性误差 $d\rho$ ，文中对这三个参数进行了解算。

1.2 红外探测器的设计

目前的星载激光测高仪多采用中心波长为 1 064 nm 的近红外激光器，发射脉冲一般不超过 10 ns，而在激光传输过程中会受到大气衰减、太阳背景噪声、远距离激光束的扩散等多方面的影响，因此为有效捕捉到卫星发射到地面的激光脉冲信号，地面的红外探测器需要具有抗噪能力强、探测灵敏度高、带宽窄等多方面的特性。

对于星载大光斑激光测高仪系统，激光脉冲经大气传输到达地面时，其峰值功率可用公式(3)表示为：

$$P_r = \frac{E_r T_r T_a A_r}{\tau S_g} \quad (3)$$

式中： E_r 为激光测高仪的发射能量； τ 为激光脉冲宽度； T_r 为发射系统的光学透过率； T_a 为单程大气光学透过率； A_r 为地面探测器的接收孔径面积； S_g 为地面激光足印光斑面积； P_r 为地面探测器的接收峰值功率。

红外激光短脉冲被动探测器包括为光学镜头、探测单元、控制单元和电源四个部分，其中探测单元是系统的核心部分。为了对激光脉冲的能量空间分

布进行捕捉显示，探测器还设置了八个不同的能量等级，即不同的入射能量驱动相应能级的 LED 显示。

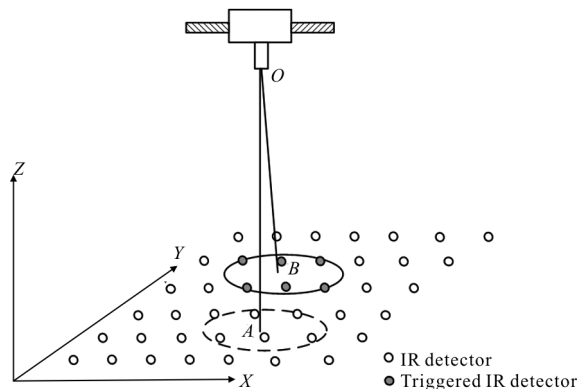


图 1 地面红外探测器的分布示意图

Fig.1 Distribution of ground based IR detectors

图 1 描述了地面红外探测的分布示意图， OA 为几何定标前计算的激光束方向， OB 为实际的激光指向， B 所在实心圆圈为实际的足印光斑位置，处在该圆内的红外探测器将被击中而使 LED 光源发光。图 2 表示野外使用的红外探测器实体照片(委托武汉大学电子信息学院定做)。



图 2 野外实验中使用的红外探测器

Fig.2 IR detector in the field experiment

1.3 系统误差参数解算

星载激光测高系统的激光足印点定位精度受诸多因素影响，其中最主要的误差来源包括：激光测距误差和指向角误差。激光测距误差主要造成垂直方向的误差，而指向角误差则是造成平面定位误差的主要原因。因此，在轨几何定标主要对激光指向角、测距系统误差进行定标，解算出该误差的系统值，分析其稳定性，为提高数据的整体质量服务。

公式(1)中共有三个独立的待求未知数，分别

是: $d\rho, Ax, By$, 变换为公式(4):

$$\begin{pmatrix} (\rho'+d\rho)\cos Ax \\ (\rho'+d\rho)\cos By \\ (\rho'+d\rho)\cos Cz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} + R^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{WGS84} - \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix}_{WGS84} \quad (4)$$

如果有两个激光足印点被探测到, 则可以采用最小二乘法对三个未知数进行求解, 得到精确的激光指向角和测距的系统性误差。

2 实验与分析

2.1 资源三号 02 星激光测高仪介绍

资源三号 02 星于 2016 年 5 月 30 日成功发射, 是我国首颗高精度民用立体测图卫星资源三号 01 星的后续星, 02 星上搭载国内首台对地观测激光测高仪试验载荷, 用于获取地表高精度的高程控制点数据, 辅助提高光学卫星影像无控立体测图精度。

资源三号 02 星激光测高仪试验性载荷的基本参数见表 1, 其主要参数包括: 重频率为 2 Hz, 即地

表 1 资源三号 02 星激光试验载荷基本参数信息

Tab.1 Basic information of ZY3-02 satellite laser altimeter

Parameter	Value	Parameter	Value
Transmitted pulse width/ns	6.5	Footprint size/m	>50
Repetition/Hz	2	Orbit height/km	505.984
Power/W	45	Wavelength/nm	1 064
Weight/kg	40	Divergence angle/mrad	0.1
Single pulse energy/mJ	175	Field of receiving view/mrad	0.5
Effective aperture/mm	210	Laser channel number	1
Effective distance/km	480-520	Ranging accuracy/m	1 (slope<2°)

面间隔约为 3.5 km, 地面足印光斑大小设计指标为 50 m, 激光的中心波长为 1 064 nm, 属于近红外激光, 设计的平地测距精度优于 1.0 m, 无全波形记录功能。

2.2 实验数据

在采用红外探测器之前, 首先利用基于地形的粗标定方法, 大致确定了激光指向角偏差^[6], 实现激光足印点平面位置精度在 90 m 以内。经轨道预报和坐标推算, 选取了以预报的足印位置为中心点、垂轨向 400 m、沿轨向 600 m 的范围作为一个足印点的探测器铺设范围, 资源三号 02 星在 2016 年 8 月 9 日、14 日和 29 日三次分别经过试验区, 对应激光测高仪的第 1 081、1 157 和 1 385 轨数据, 共有三个激光足印点被有效探测到。图 3 为外场一个激光足印光斑被有效探测的发光示意图, 圆圈中的数字代表红外探测器发光显示的能级, 每个格网大小约 20 m, 取中间能级最大的点作为光斑的中心。第 1 081 轨的激光足印轨迹如图 4 所示, 右侧为局部放大图, 相邻点间隔约 3.5 km。

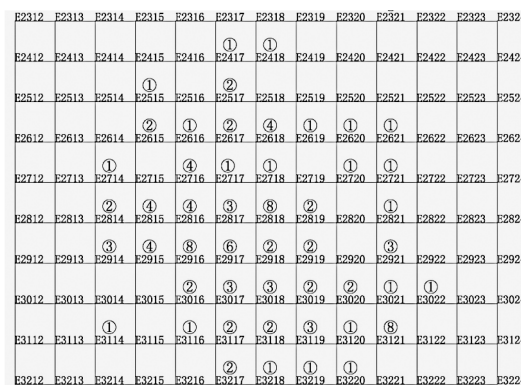


图 3 捕获激光足印点的红外探测器发光分布示意图

Fig.3 Lighting schematic of the IR detectors for capturing the laser footprint point

在标定后的绝对几何精度验证方面, 平面精度采用激光足印的被击中的探测器位置作为参考, 而对高程的验证则采取了与探测区相隔一定时间和距离的华北某地高精度的 DEM 数据作为参考。该 DEM 数据格网大小为 2.0 m, 平面精度优于 1.0 m,

高程精度为平地优于0.4 m,山地优于 0.7 m。该区域大地高度的高程值范围为 (-16.613 m,11.617 m),属于典型的华北平原区。2016 年 9 月 4 日资源三号 02 星第 1 476 轨正好经过该区域,激光测高仪开机获得了部分有效激光测高数据,如图 5 所示。



图 4 第 1 081 轨激光足印点分布示意图

Fig.4 Laser footprint points distribution of the orbit No.1 081

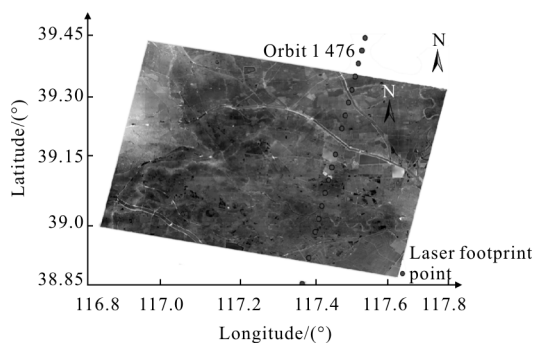


图 5 华北某地参考 DEM 及资源三号 02 星激光足印点示意图

Fig.5 Distribution of referenced DEM and ZY3-02 laser altimeter footprint points in North China

2.3 结果与分析

在实验过程中,采用国家环境预报中心(National Centers of Environmental Prediction, NCEP)大气参数对激光测距的大气延迟改正值进行了修正,同时对指向角定标前、粗定标、精定标后的激光足印点高程精度进行了对比分析,其中定标前为完全采用实验室的测量结果,粗定标为采用了基于地形匹配方法的结果,精定标为采用被击中的红外探测器和文中定标方法的结果。

由于平面精度验证比较困难,因此采用的是被击中的探测器作为检查点,即将被击中的探测器的位置作为激光足印点的真实位置,分别统计定标前后平面位置的偏差,如表 2 所示。

表 2 标定前后被探测到的激光足印点平面位置误差统计表

Tab.2 Planimetric error statistical result of laser footprint points which were captured before and after calibration

Point ID	Planimetric error/m		
	Before calibration	Coarse calibration	After calibration
A6809	8 066.29	95.46	12.46
E2818	8 047.11	86.34	16.61
W1909	8 065.10	84.87	14.91

高程对比实验中,采用根据激光足印点位置及光斑大小统计光斑范围内所有的 DEM 高程值的平均值,根据外场初步检校结论,足印光斑大小按 120 m 计算,最终高程误差统计结果如表 3 所示。

表 3 资源三号 02 星第 1 476 轨部分激光足印点高程误差统计表

Tab.3 Elevation error statistical result of laser footprint points of ZY3-02 No. 1 476 orbit before and after calibration

Point ID	Elevation error/ m		
	Before calibration	Coarse calibration	After calibration
494	80.71	-3.77	-1.19
500	86.06	-3.46	-0.08
501	89.79	-2.75	0.53
502	79.98	-6.23	-1.78
503	71.42	-7.15	1.04
504	78.91	-5.43	0.33
505	84.16	-4.12	-1.18
508	89.09	-3.74	1.45
Maximum error	89.79	7.15	-1.78
Minimum error	71.42	2.75	-0.08
RMS	82.71	4.80	1.09

从表 2 可知,实验室原始测量值具有很大的误差,而且是显著的系统性的常数误差,几何标定后可以大幅提高激光测高的结果,平面偏差基本在 8 km 左右,标定后平面位置误差可到 15.0 m 左右,表 3 则表明在华北某实验区高程精度能够从原始的

82.71 m 提高提升到 1.09 m, 少量点高程误差小于 0.5 m。

3 结 论

星载激光测高仪的几何定位精度特别是高程精度是其能否有效应用的基本前提, 文中围绕激光测高卫星在轨几何定标开展了初步的研究, 并采用资源三号 02 星上搭载的试验性激光载荷进行了实验分析, 得到如下结论:

(1) 资源三号 02 星激光测高仪的实验室定标结果与实际偏差很大, 平面误差在 8 km 左右, 在轨几何定标显得非常必要;

(2) 资源三号 02 星试验性激光测高仪基本能如期工作, 能获得一些有效的激光高程点, 采用地面红外探测器可以捕捉到激光足印光斑信号;

(3) 其指向角系统性偏差通过地面红外探测器进行精确修正定标后平面精度优于 15.0 m, 平坦地区高程精度接近 1.0 m, 理论上可以用于 1:50000 测图的高程控制点使用^[15]。

但文中试验样本偏少, 而且资源三号 02 星激光测高仪为试验性载荷, 无全波形数据, 因此其距离的测量精度存在一定不确定性, 而在 ICESat/GLAS 系统中的激光测距精度通过全波形分析可以达到 0.1 m。因此, 该实验的定标结果仅供参考, 后续还需要深入的分析及验证。

随着技术的发展, 卫星激光测高数据将在全球高程控制点获取、极地冰盖监测、全球植被生物量计量、困难地区数字地形测量等方面得到广泛的应用。希望文中的相关研究结论能对以后国产激光测高卫星的业务化发展和应用提供一定的技术参考。

参考文献:

[1] Tang Xinming, Li Guoyuan, Gao Xiaoming, et al. The rigorous geometric model of satellite laser altimeter and preliminarily accuracy validation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45 (10): 1182-1191. (in Chinese)
唐新明, 李国元, 高小明, 等. 卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1182-1191.

[2] Luthcke S B, Rowlands D D, McCarthy J J, et al.

Spaceborne laser altimeter pointing bias calibration from range residual analysis [J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2000, 37(3): 374-384.

[3] Schutz B E. GLAS altimeter post-launch calibration/validation Plan [R]. Austin, USA: Center for Space Research, University of Texas at Austin, 2001.

[4] Martin C F, Thomas R H, Krabill W B, et al. ICESat range and mounting bias estimation over precisely surveyed terrain [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 242-257.

[5] Magruder L, Silverberg E, Webb C, et al. In situ timing and pointing verification of the ICESat altimeter using a ground based system [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 365-370.

[6] Li Guoyuan, Tang Xinming, Gao Xiaoming, et al. Pointing angle calibration of ZY3-02 satellite laser altimeter using terrain matching [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-1/W1: 205-210.

[7] Sirota J M, Bae S, Millar P, et al. The transmitter pointing determination in the Geoscience Laser Altimeter System [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): 231-238.

[8] Li Guoyuan, Tang Xinming, Gao Xiaoming, et al. ZY-3 block adjustment supported by GLAS laser altimetry data [J]. *The Photogrammetric Record*, 2016, 31(153): 88-107.

[9] Zhu Jianfeng, Wang Yu, Hu Yu, et al. Systematic error analysis and calibration of satellite laser altimeter [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014, 39 (s1): 137-140. (in Chinese)
朱剑锋, 王昱, 胡煜, 等. 星载激光测高的系统误差分析与检校[J]. 测绘通报, 2014, 39(s1): 137-140.

[10] Huang Chaowei, Li Guoyuan, Li Shanshan, et al. Systematic error analysis of satellite laser altimeter on different terrain [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(1): 44-49. (in Chinese)
黄朝围, 李国元, 李姗姗, 等. 不同地形条件下的星载激光测高系统误差分析[J]. 测绘科学, 2016, 41(1): 44-49.

[11] Ma Yue, Yang Fanlin, Yi Hong, et al. Calibration method of on-orbit attitude systematic error for spaceborne laser altimeter of earth observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2401-2405. (in Chinese)

- 马跃, 阳凡林, 易洪, 等. 对地观测星载激光测高仪在轨姿态系统误差检校方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2401-2405.
- [12] Huang Jipeng, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Precise position measuring system for laser spots [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2013, 21(4): 841-848. (in Chinese)
- 黄继鹏, 王延杰, 孙宏海, 等. 激光光斑位置精确测量系统 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 841-848.
- [13] Zhou Hui, Li Song, Wang Liangxun, et al. Influence of noise on range error for satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (8): 2256-2261. (in Chinese)
- 周辉, 李松, 王良训, 等. 噪声对星载激光测高仪测距误差的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2256-2261.
- [14] Yang Chi, Hu Wenyi, Luo Min, et al. Effect of elliptic Gaussian footprint on range and range error for satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0717003. (in Chinese)
- 杨驰, 胡文怡, 罗敏, 等. 椭圆高斯足印对星载激光测高仪测距值及其误差的影响 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45 (7): 0717003.
- [15] 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)
- 李国元, 唐新明, 张重阳, 等. 多准则约束的 ICESat/GLAS 高程控制点筛选 [J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 96-104.