

对地观测星载激光测高系统高程误差分析

马 跃¹, 阳凡林¹, 卢秀山¹, 冯成凯¹, 李 松²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 星载激光测高系统通过接收卫星平台激光器发出的激光脉冲经地表反射的微弱回波, 计算卫星与地表的距离; 结合卫星轨道和姿态数据, 生成激光脚点精确地理位置和高程结果。其高程误差主要受器件、环境和目标参数影响, 目前还没有完整描述对地观测星载激光测高系统平面和高程误差的数学模型。简化并完善了针对固体地表的激光测距误差模型, 建立了完整的激光脚点平面和高程误差模型。利用高程精度和空间分辨率更高的机载 Lidar 数据评估了星载激光测高系统 GLAS 实测数据的高程偏差, 评估结果符合所建误差模型。在较平坦的冰盖表面, GLAS 系统高程精度可以达到设计值约 15 cm。研究内容对测高系统高程误差评估和系统参数设计具有参考意义。

关键词: 激光遥感; 激光测高; 测距误差; 高程误差; 机载激光雷达

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1042-06

Elevation error analysis of spaceborne laser altimeter for earth observation

Ma Yue¹, Yang Fanlin¹, Lu Xiushan¹, Feng Chengkai¹, Li Song²

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In space-borne laser altimeter system, the range between satellite and target was calculated by the weak received signal which was transmitted from laser device and reflected by earth surface, and the accurate location and elevation of laser footprint was acquired by combining satellite precise orbit with attitude data. The elevation error was mainly affected by the device noise, the environment and the target parameters, and there is no complete analyzing model of location and elevation error for spaceborne laser altimetry system. The error model of laser ranging for solid surface was simplified and improved. Meanwhile, the location and elevation error analysis model of laser footprint was established in this paper. Utilizing airborne lidar data with better spatial resolution and elevation accuracy, the elevation deviation of GLAS data were evaluated, and the result was consistent with the error model. It is proved that on the

收稿日期: 2014-07-20; 修订日期: 2014-08-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAB16B01); 海岛(礁)测绘技术国家测绘地理信息局重点实验室资助(2011B03);

国家“十二五”民用航天预先研究项目(卫星激光测量数据处理与冰层高度变化反演);

卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室经费资助(KLAMTA201408); 青岛市博士后研究人员应用研究项目

作者简介: 马跃(1986-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光遥感和光电检测方面的研究。Email: mayue19860103@163.com

flat surface of ice sheets the elevation accuracy of GLAS system can meet its design value of approximate 15 cm. This research is instructive for elevation error assessment and system parameters designing of laser altimeter system.

Key words: laser remote sensing; laser altimeter; range error; elevation error; airborne lidar

0 引 言

星载激光测高系统是一种主动式测量系统,通过接收卫星平台激光器发出的激光脉冲经地表反射的微弱回波,并精确计算激光脉冲在卫星和地面之间的渡越时间,得到卫星和地表的距离;结合卫星精密轨道和姿态数据,生成激光脚点精确地理位置和高程结果。ICESat 卫星搭载的 GLAS 系统于 2003 年发射升空,在轨运行 7 年,是目前为止唯一一颗用于全球地表观测的星载激光测高系统^[1-2]。其激光发散角在亚毫弧量级,水平分辨率远远高于微波雷达方式;位于大气透过窗口的 1064 nm 波长激光可以直接被冰盖和海洋表面反射,几乎没有穿透效应,设计高程精度 15 cm^[3-4]。这些优点使其广泛用于南北极冰盖变化监测、极区附近海冰变化监测、植被年际变化监测^[5]。

对地球观测 GLAS 系统的观测成果不仅包含器件本身所带来的误差,也包含如光束穿越大气产生的散射和折射,由章动和岁差等产生的固体潮汐等环境误差,以及由地表斜率或粗糙度等引起的目标误差;因此全面考虑各项影响并建立完整数学模型评估数据高程误差对于数据产品使用的有效性至关重要。然而,目前已有测距误差模型较为复杂^[6-9],还没有全面分析器件、环境和目标对测距影响的简化数学模型,GLAS 的算法理论基础文档中也没有给出完整描述星载激光测高系统平面和高程误差的数学模型,而是直接列出影响数值大小^[10]。因此,论文旨在简化并完善针对固体地表的激光测距误差模型,建立完整的激光脚点平面和高程误差模型,最后利用高程精度和空间分辨率更高的机载 Lidar 数据评估星载激光测高系统 GLAS 实测数据的高程偏差,与所建误差模型作对比验证。

1 激光测距误差模型

由于接收回波时间重心与光速乘积的一半即激

光测距值,则时间重心标准差与光速乘积的一半则表示距离误差。

1.1 目标特性影响

根据激光测高系统回波信号理论模型,利用概率统计方法可得由目标特性参数引起的回波信号时间重心的方差,其中包含 $\text{Var}(T_{pr})$ 、 $\text{Var}(T_{ps})$ 和 $\text{Var}(T_{pp})$,分别表示目标粗糙度、倾斜度和在目标是斜面时指向角对测距误差的影响^[7]。

$$\text{Var}(T_{pr}) = \left(\frac{F}{N} + \frac{1}{K_s} \right) \frac{4\text{Var}(\Delta\xi)\cos^2 S_{//}}{c^2 \cos^2(\beta + S_{//})} \quad (1)$$

$$\text{Var}(T_{ps}) = \left(\frac{F}{N} + \frac{1}{2K_s} \right) \frac{4z^2 \tan^2 \theta_r}{c^2 \cos^2 \beta} \cdot \left[\tan^2(\beta + S_{//}) + \frac{\tan^2 S_{\perp} \cos^2 S_{//}}{\cos^2(\beta + S_{//})} \right] \quad (2)$$

$$\text{Var}(T_{pp}) = \frac{4z^2(1 + \tan^2 \theta_r)^2}{c^2 \cos^2 \beta} [\tan^2(\beta + S_{//}) \cdot \text{Var}(\Delta\beta_{//}) + \frac{\tan^2 S_{\perp} \cos^2 S_{//} \cos^2 \beta}{\cos^2(\beta + S_{//})} \cdot \text{Var}(\Delta\beta_{\perp})] \quad (3)$$

式中: N 为回波光子数; F 为 APD 探测器噪声系数,通常在 3~7 之间; K_s 为接收孔径面积与散斑相关面积的比值, $K_s = \pi A_R (2 \tan \theta_r / \lambda)^2$; $\Delta\xi$ 为目标表面粗糙度; β 为天底方向与激光指向夹角; z 为卫星轨道高度; c 为光速; θ_r 为光束发散角; $S_{//}$ 和 S_{\perp} 分别表示沿轨和垂轨方向地表斜率, $\text{Var}(\Delta\beta_{//})$ 和 $\text{Var}(\Delta\beta_{\perp})$ 分别表示沿轨和垂轨方向光束指向角误差。通过公式(1)~(3)可以看出,地表斜率影响所有三项目标特性误差,假设地表斜率为一维分布,且与指向角、指向角误差方向都相同,如图 1 所示,即 $S = S_{//}$, $S_{\perp} = 0$; $\Delta\beta = \Delta\beta_{//}$, $\Delta\beta_{\perp} = 0$;在地

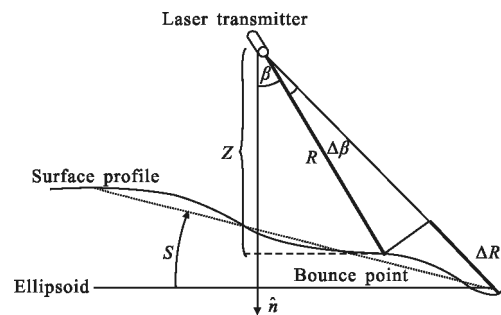


图 1 地表一维斜率分布时测距误差示意图

Fig.1 Ranging error schematic of one-dimensional surface slope

表为斜面时指向角误差将导致额外的测距误差 ΔR_{pp} , 而如果指向角很小且地表为平面时, 这项影响可以忽略。上述三项对距离影响为 $\Delta R = \text{std}(T) \cdot c/2$; 事实上, 对于发散角只有亚毫弧量级的激光测高系统, 公式(3) $\tan^2\theta_r$ 影响很小, 可以忽略, 则由地表参数影响的测距误差可以简化为:

$$\Delta R_{pr} = \sqrt{\left(\frac{F}{N} + \frac{1}{K_s}\right)} \frac{\text{std}(\Delta\xi)\cos S}{\cos(\beta+S)} \quad (4)$$

$$\Delta R_{ps} = \sqrt{\left(\frac{F}{N} + \frac{1}{2K_s}\right)} \frac{z \tan \theta_r}{\cos \beta} \cdot \tan(\beta+S) \quad (5)$$

$$\Delta R_{pp} = \frac{z \tan(\beta+S) \Delta \beta}{\cos \beta} \quad (6)$$

1.2 器件噪声影响

由测高系统硬件噪声影响导致的测距误差可以表示为^[11]:

$$\text{Var}(T_r) = \left(\frac{N_0 T_r^3}{12N^2 \Delta t} + \frac{\Delta t^2}{12} \right) + \left[\frac{FN_B T_r^3}{12N^2 \Delta t} + \frac{(FN_D + N_T + N_A) T_r^3}{12N^2 \Delta t} \right] \quad (7)$$

式中: T_r 为回波信号的全脉宽, 通常取 4 倍回波信号脉宽 σ_s , 以保证回波信号能够被完整采集; Δt 表示数字化仪的采样间隔; N_B 、 N_D 、 N_T 、 N_A 和 N_0 分别表示辐射背景噪声、探测器暗电流噪声、热噪声、前置放大噪声和量化噪声, 具体表达式详见参考文献[11]。

器件噪声影响主要表现在接收回波波形信号方面, 通过相应的信号处理算法, 由器件影响的距离误差可以被减弱, 对于 GLAS 系统, 起主导作用为采样噪声影响, 约 4 cm 左右^[11]; 对于固体地表目标, 由大气和潮汐等环境因素影响的距离误差经过相应算法修正后残差约为 2~3 cm^[10]; 而地表斜率和粗糙度这类没有先验知识的环境误差则没有消除方法, 需要根据上述误差模型分析在不同目标特性参数时影响程度, 特别的, 当地表斜率 1° 和指向角误差 $1.5''$ 时, 则三项影响分别为 1 cm, 1.5 cm 和 7.5 cm, 综合 RSS 距离误差约 9 cm。

$$M = \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \varphi & -\sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ \sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \kappa & \cos \varphi \cos \kappa \end{bmatrix} \quad (9)$$

留至一次项, 且假定在各项误差相互独立的情况下, 根据误差传播定律和误差合成理论, 推导得出 X、Y 和 Z 三个方向均方根误差表达式:

$$\Delta X^2 = \Delta X_0^2 + [R \cos \omega \cos \varphi (\cos \kappa \cos \beta - \sin \kappa \sin \beta)]^2 \Delta \varphi^2 + \{R[\sin \beta (\cos \omega \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa) + \cos \beta (\cos \omega \sin \kappa - \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa)]\}^2 \Delta \omega^2 +$$

2 激光脚点高程误差模型

在测量参考坐标系中, 如图 2 所示, 测高系统激光发射参考点为原点 O, Z 轴指向地心方向, X 轴指向卫星的飞行方向, Y 轴垂直于卫星轨道平面, XYZ-O 构成右手系, 其激光脚点坐标 $[X, Y, Z]^T$ 满足:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} 0 \\ -R \sin \beta \\ R \cos \beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \\ \Delta Z_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: 向量 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 为由 GPS 系统确定的卫星质心坐标, M 表示卫星飞行姿态矩阵, 满足公式(9); $[0, -R \sin \beta, R \cos \beta]^T$ 表示激光指向矢量坐标, 第三项表示激光参考点与卫星质心的固定偏移量, 第四项表示星上 GPS 相位中心与卫星质心固定偏移量, 最后两项是常数向量。

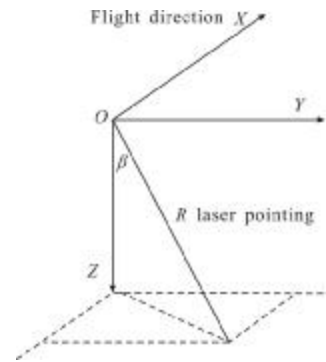


图 2 激光测高系统瞬时测量坐标系

Fig.2 Instantaneous measuring coordinate of laser altimeter

公式(9)中 ω 、 φ 和 κ 分别代表卫星飞行中 Z 轴偏航角 (Yaw)、Y 轴俯仰角 (Pitch) 和 X 轴横滚角 (Roll); 而 ICESat 卫星飞行姿态角在绝大多数情况趋近于零, 只在需要变换参考轨道(8 天或 91 天重复轨道)或者过境标定场时进行姿态机动调整。

根据公式(8)将 X、Y 和 Z 按泰勒公式展开并保

$$\{R[-\sin \beta (\sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa) + \cos \beta (\sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa)]\}^2 \Delta \kappa^2 + \{-R[\cos \beta (-\sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa) + \sin \beta (\sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa)]\}^2 \Delta \beta^2 + \{\sin \beta (\sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa) + \cos \beta (\sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa)\}^2 \Delta R^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y^2 = & \Delta Y_0^2 + [R \sin \omega \cos \varphi (\cos \kappa \cos \beta - \sin \kappa \sin \beta)]^2 \Delta \varphi^2 + \\ & \{R [\sin \beta (\sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa) + \\ & \cos \beta (\sin \omega \sin \kappa + \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa)]\}^2 \Delta \omega^2 + \\ & \{-R [\sin \beta (\cos \omega \sin \kappa - \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa) + \\ & \cos \beta (\cos \omega \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa)]\}^2 \Delta \kappa^2 + \\ & \{-R [\cos \beta (\cos \omega \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa) + \\ & \sin \beta (-\cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa)]\}^2 \Delta \beta^2 + \\ & [-\sin \beta (\cos \omega \cos \kappa + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa) + \\ & \cos \beta (\cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa)]^2 \Delta R^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z^2 = & \Delta Z_0^2 + [R \sin \varphi (\sin \kappa \sin \beta - \cos \kappa \cos \beta)]^2 \Delta \varphi^2 + \\ & [-R \cos \varphi (\sin \beta \cos \kappa + \cos \beta \sin \kappa)]^2 \Delta \kappa^2 + \\ & [-R (\cos \beta \cos \varphi \sin \kappa + \sin \beta \cos \varphi \cos \kappa)]^2 \Delta \beta^2 + \\ & (-\sin \beta \cos \varphi \sin \kappa + \cos \beta \cos \varphi \cos \kappa)^2 \Delta R^2 \end{aligned} \quad (12)$$

模拟数据表明当系统进行正常测量工作时,即三个姿态角趋近于零和 1°指向角时,按照 GLAS 系统 1"偏航、横滚和俯仰角误差、1.5"指向角误差、5 cm GPS 卫星定位误差,以及前文所述的典型地表约 9 cm 距离误差等影响脚点定位因素,使用该模型计算激光脚点定位误差,其平面误差约 5 m,高程误差约 15 cm,与参考文献[10]中 13 cm 结果接近。

3 误差模型验证

文中使用丹麦科技大学(DTU, Danmarks Tekniske Universitet)提供的于 2004 年 5 月 25 日 ALS(机载激光扫描测量系统, airborne laser scanning)对格陵兰岛沿岸附近冰盖和其以北的北冰洋海域海冰其中一段 20 km 长轨迹的测量数据。其测量轨迹地理位置范围为纬度 [83.21°, 83.34°], 经度 [311.84°, 312.67°], 与 ICESat 卫星 L2C 工作周期 Track0031 星下点轨迹重合,数据平面精度约 1 m,高程精度约 5 cm^[12],沿轨和垂轨方向点密度几乎均匀(约 1.2 m);因此,可以使用 ALS 数据生成 GLAS 系统激光光斑内的 DEM 图,如图 3 所示,并对 GLAS 高程数据进行误差分析。

由于 GLAS 高程数据基于 TOPEX 椭球,需转换至 WGS-84 椭球坐标;每个 GLAS 脚点直径 70 m 光斑内包含约 2000 个 ALS 激光雷达数据。表 1 和图 4 选择部分目标表面较为平坦,以及表面粗糙且有斜度的代表性数据列出详细数据,然后对所有脚点结果进行统计分析。

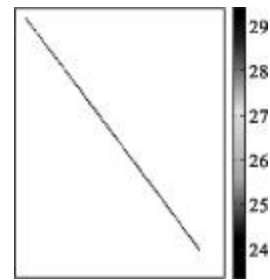


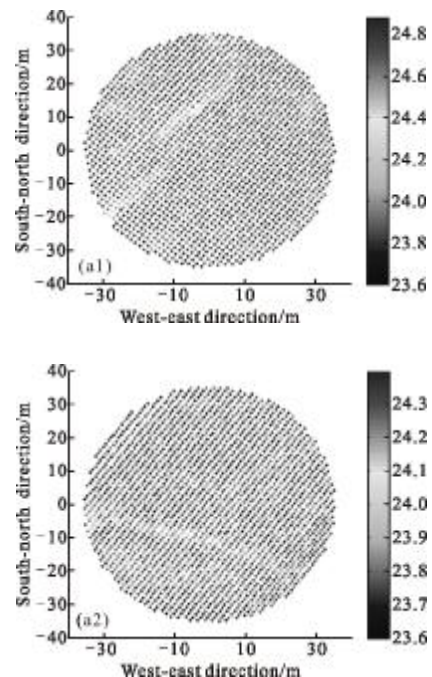
图 3 ALS 数据形成 GLAS 脚点 DEM

Fig.3 DEM of GLAS footprint generated by ALS data

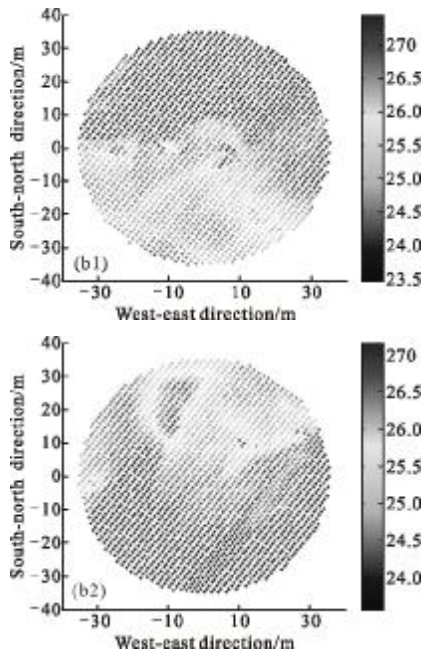
表 1 GLAS 与 ALS 脚点高程对比

Tab.1 Elevation comparison of GLAS and ALS

UTC/s	Slope / (°)	Roughness/cm	GLAS elevation /m	ALS elevation /m	Deviation/cm	Model error/cm
759.374	0.049	9.0	23.773	23.799	-2.6	9.6
761.049	0.026	5.1	23.671	23.745	-7.4	9.6
759.699	1.311	62.1	24.216	24.422	-20.6	19.5
760.949	1.715	72.1	24.213	24.213	-22.9	22.8



(a) 斜率与粗糙度较小的 GLAS 激光脚点
(a) GLAS footprint with slight slope and roughness



(b) 斜率与粗糙度较大的 GLAS 激光脚点
 (b) GLAS footprint with slight larger and roughness

图 4 不同斜率和粗糙度的 GLAS 脚点 DEM

Fig.4 GLAS footprint DEM with different slope and roughness

表 1 中 UTC 时间省略了前 6 位数字, 真实 UTC 时间需要加 138763000; 测量时指向角都为 0.319° ; ALS 高程为 GLAS 脚点内 2000 个 ALS 测量点的平均高程, 偏差为 GLAS 与 ALS 平均高程之差; 表 1 上下两栏数据分别对应图 4(a)、(b), 其粗糙度和斜率计算结果很好地反应了图中 DEM 的真实情况。利用所得脚点内斜率和粗糙度信息, 以及 GLAS 系统参数, 代入前文中公式(4)~(6)计算距离误差, 并将距离误差和姿态、位置误差代入公式(12)高程误差模型, 计算的均方根误差显示在最后一列, 模型误差与实际偏差有较好的一致性。然后, 统计全部 106 个 GLAS 脚点内斜率和粗糙度信息, 所有脚点斜率在 $0^\circ\sim 2^\circ$ 之间, 粗糙度在 0~1 m 之间(与前述 1° 斜率的典型冰盖地表接近, 因此高程误差直接使用 15 cm 做近似值), 计算 GLAS 实测高程结果偏差, 其结果如图 5 和表 2 所示。

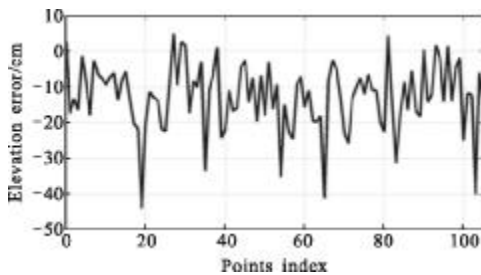


图 5 所有 GLAS 脚点与 ALS 高程偏差

Fig.5 Elevation deviation between GLAS and ALS data

表 2 GLAS 与 ALS 高程偏差与模型误差

Tab.2 Elevation deviation and model error between GLAS and ALS

RMS deviation/cm	Model error/cm
15.8	15.0

统计结果显示, GLAS 脚点高程结果均方根偏差 15.8 cm, 高程偏差均在模型误差 3σ 以内, 很好地符合了前文所建立的误差模型; 另外由于 ALS 本身也存在高程误差, 两者存在差异在合理范围之内。

4 结论

文中简化并完善星载激光测高系统固体地表测距误差模型, 建立完整星载激光测高系统高程误差模型, 利用脚点高程精度和空间分辨率更高的机载 Lidar 数据生成 GLAS 脚点 DEM, 用于计算脚点斜率和粗糙度等地表参数, 并与 GLAS 系统高程数据进行对比, 其结果很好地符合了所建立的误差模型。在较平坦的冰盖表面, GLAS 系统平面误差约为 5 m, 高程误差约 15 cm。这些结论和模拟方法对于星载激光测高系统的参数设计和测量误差评判具有重要意义。

参考文献:

- [1] Ma Yue, Li Song, Zhou Hui, et al. Noise suppression method for received waveform of satellite laser altimeter based on adaptive filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3263-3268. (in Chinese)
马跃, 李松, 周辉, 等. 基于自适应滤波星载激光测高仪回波噪声抑制方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3263-3268.
- [2] Ma Yue, Li Song, Weng Yinkan, et al. Hydrostatic delay correction for satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 909-914. (in Chinese)
马跃, 李松, 翁寅侃, 等. 星载激光测高仪大气干项延迟校正[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 909-914.
- [3] Schutz B E. Overview of the ICESat Mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21S01-1-4.
- [4] Jin Chenfei, Hu Peng, Zhang Siqi, et al. Analysis of weak signal processing of gain-modulated laser radar with double thresholds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2447-2452. (in Chinese)

- 靳辰飞, 胡 鹏, 张思琦, 等. 增益调制激光雷达弱信号的双阈值处理分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2447-2452.
- [5] Kurtz N T, Markus T. Satellite observations of Antarctic sea ice thickness and volume [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(08): C08025-1-9.
- [6] Gardner C S. Target signatures for laser altimeters: an analysis[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(3): 448-453.
- [7] Gardner C S. Ranging performance of satellite laser altimeters [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 1061-1072.
- [8] Martin C F, Thomas R H, Krabill W B, et al. ICESat range and ranging bias estimation over precise surveyed terrain[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): L21S07-1-4.
- [9] Magruder L A, Webb C E, Urban T J, et al. ICESat altimetry data product verification at White Sands space harbor [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 147-155.
- [10] Schutz B E. Laser footprint location (Geolocation) and surface profiles[R]. Texas: University of Texas at Austin, 2002.
- [11] Ma Yue. The data processing and error analysis for satellite laser altimeter [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)
- 马跃. 星载激光测高系统数据处理和误差分析 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [12] Hvidegaard S M. Airborne ice altimetry methods for calibration and validation of CryoSat results [D]. Copenhagen: Niels Bohr Institute & University of Copenhagen and Danish National Space Center, 2005.