

# ICESat 卫星及其在南极 Dome A 地区的应用

鄂栋臣<sup>1</sup> 徐莹<sup>1</sup> 张小红<sup>2</sup>

(1 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 概述了 GLAS 高度计的在轨性能, 分析了其数据产品的精度。利用高精度的 ICESat 卫星测高数据, 以及第 21 次中国南极科学考察内陆冰盖考察 GPS 的实测资料, 验证了此次考察中南极内陆冰盖 Dome A 最高点可能区域选取的正确性, 并分析了 Dome A 最高点位置测定的准确性。

**关键词:** GLAS 高度计; 在轨性能; ICESat; Dome A

**中图法分类号:** P228.3

ICESat 卫星是世界首颗星载激光高度计实验卫星, 星上搭载有地球科学激光高度计 GLAS (geoscience laser altimeter system)。ICESat 卫星是 NASA 地球探测卫星之一, 主要用来确定极地冰盖总量的年际及长期变化, 从而估计其对全球海平面变化的影响<sup>[1]</sup>。尽管 ICESat 是为满足极地研究的需要设计的, 它同时也支持了许多不同学科的应用研究, 如冰川学、大气科学、气象学和地貌学等学科。本文在分析 ICESat 在轨性能及其测高数据精度的基础上, 对星载激光测高技术应用于我国内陆冰盖考察地区建立冰面 DEM 问题进行了探索和研究。

## 1 ICESat 卫星在轨情况

ICESat 卫星处于近极地低轨道, 轨道高度约 600 km, 轨道倾角 94°, 地面脚点直径仅为 60 m, 相邻脚点间距约 172 m。在两极地区, ICESat 卫星恒指向参考轨迹以补偿轨道自然漂移并使轨迹尽可能精确重复, 以获得高质量的测量值。

2003 年 2 月 20 日 15 时 18 分 MST 时间(美国地区时间), 1 号激光器在挪威斯瓦尔巴特群岛上空激活。38 d 后, 1 号激光器停止工作。经调查, 是激光器使用的二极管泵浦阵列出现了制造上的缺陷<sup>[2]</sup>, 在发射前期测试中该症状没有明显

表现出来。

为延长激光器使用寿命, ICESat 的工作计划修改为剩下的两个激光器每年完成 3 个 33 d 的作业任务。这样, GLAS 的工作周期从每年 100% 降为 27%。激光器的工作时段如表 1 所示。其中, 2 号激光器 L2a 工作时段后的所有任务都重复 L2a 期间 91 d 重复周期中最后 33 d 子循环。

表 1 激光器工作时段表

Tab. 1 Laser Operation/Science Campaign Summary

激光器工作时段	开始日期	结束日期	重复轨道/d
L1	2003-02-20	2003-03-29	8
L2a	2003-09-25	2003-10-04	8
L2a	2003-10-04	2003-11-18	91/33+
L2b	2004-02-19	2004-03-21	91/33
L2c	2004-05-18	2004-06-21	91/33
L3a	2004-10-03	2004-11-08	91/33
L3b	2005-02-17	2005-03-24	91/33
L3c	2005-05-20	2005-06-23	91/33
L3d	2005-10-21	2005-11-24	91/33
L3e	2006-02-22	2006-03-27	91/33

目前 3 个激光器的所有工作时段中, 所测数据质量最好的为 2 号激光器 L2a 工作时段。在此期间, 所有仪器都按照预期计划正常工作, 并且激光器精确指向地面参考轨迹, 故该时段内所获得的数据精度最优, 地面轨迹覆盖密度最大。而其他时段内, 总有某些仪器处于非正常作业状态, 如

1号激光器测量期间,激光器的指向偏离冰面上的参考轨迹,导致重复轨迹间距达几百至上千米。另外,有些时段内的532 nm波段激光能量较低,从而影响到大气测量值等数据的质量<sup>[3]</sup>。因此,目前大多数实验都采用2号激光器L2a工作时段内所测量的数据进行。

尽管仪器故障延迟了整个校正工作完成的时间,利用版本21的L2a工作时段数据并结合其他工作时段数据,已经重新处理了整个数据库,完成了各种检校实验。Fricker等利用GPS地面测量验证,在Salar De Uyuni盐湖,版本21的L2a时段数据在经过饱和度改正后绝对精度约2 cm<sup>[4]</sup>。Martin等使用美国西部和南极洲Dry Valley的NASA ATM (air-borne topographic mapper)测量数据独立生成的精确地面模型表明,版本21的L2a时段数据测距误差小于2 cm,指向误差小于2 arcsec(1- $\sigma$ )<sup>[5]</sup>。

## 2 Dome A 最高点的确定

第21次中国南极科学考察队内陆冰盖考察路线范围为69°22'16" S ~ 80°22'00" S, 76°15'53" E ~ 77°59'26" E。2005年1月18日,测得南极内陆冰盖Dome A最高点位于80°22'00" S, 77°21'11" E, 高程为4 093 m。

此前,Dome A最高区域从未有人类涉足,没有任何现场实地观测数据可供参考,故本次考察选用200 m分辨率的南极洲测图计划数字高程模型(radarsat antarctic mapping project digital elevation model-RAMP DEM)对内陆冰盖最高点进行预测。RAMP DEM包含了多种数据源,有雷达测高数据、地图数据和地面测量数据等,主要为20世纪40~90年代间的数据。依据此DEM,首先找出内陆冰盖潜在的最高点,然后在该点周围扩大一定范围,选取长宽各100 km的范围作为Dome A区域。在所选区域内,RAMP DEM的垂直精度优于7.5 m。根据RAMP DEM选取的Dome A区域(如图1所示),发现最高点落在I和II两个可能的区域。区域I的中心坐标为(80°28'29" S, 76°50'14" E);区域II的中心坐标为(80°21'26" S, 77°20'53" E),两区域相距约15 km。

按照RAMP DEM提供的范围,内陆冰盖队到达Dome A最高区域后,首先利用全站仪搜索四周地平线,向地平线的最高处迁站过去,然后继续搜索,如此反复进行,最后确定一个高处作为营地。开展RTK测图工作时,剔除误差大于10 cm

的GPS碎部点,确定出最高点所在的较小的范围,最后步行采集数据,采样间隔设为1 m,精确确定出Dome A最高点的位置。实地考察测量确定的Dome A最高点落在RAMP DEM划定的可能区域II内。

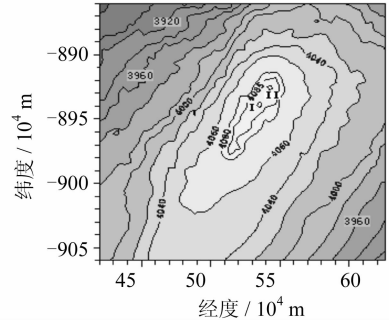


图1 Dome A区域高斯投影地形图(来源RAMP DEM,中央经线75° E,东偏500 km)

Fig.1 Contour Map of Dome A Based on RAMP DEM

## 3 利用ICESat数据验证Dome A最高区域

ICESat卫星数据包括15种标准数据产品,由戈达德航天中心的I-SIPS生成,可以从美国国家冰雪数据中心(NSIDC)获得。在两极地区,ICESat高程数据精度约15 cm,因此可以用ICESat卫星数据建立较精确的极地冰面三维模型。本文实验采用GLAS测高数据建立的冰面地形图来验证此次考察南极内陆冰盖Dome A最高点可能区域选取的正确性,并结合第21次中国南极科学考察队内陆冰盖考察GPS的实测资料分析GLAS高度计测量值的精度以及最高点位置测定的准确性。

实验选用的数据为ICESat卫星2号激光器L2a工作时段版本24的GLA12冰面测高数据。所选数据的区域范围为68°~86°S,75°~79°E,覆盖了第21次中国南极科考内陆冰盖考察中山站至Dome A沿线及Dome A地区。

ICESat数据使用的是Topex/Poseidon椭球。为方便与实测结果比较,实验中把ICESat数据都转化到实测的GPS坐标系WGS-84下。由于椭球差异带来的水平方向位移仅为数cm,故可以忽略不计,而高程差值表现为纬度的简单函数,可使用经验公式(1)来计算某点到两椭球面的高程差值:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = -((a_2 - a_1)\cos^2 B + (b_2 - b_1)\sin^2 B) \quad (1)$$

其中,  $\Delta h$  表示某点至两椭球面高程差;  $B$  表示大地纬度;  $h_1$ 、 $h_2$  分别为某点至椭球 1、2 表面的高程值;  $a_1$ 、 $a_2$  分别为椭球 1、2 的赤道半径;  $b_1$ 、 $b_2$  分别为椭球 1、2 的极半径。

ICESat 卫星所得数据呈离散型分布, 为了绘制冰面地形, 需要对数据进行网格化处理。由于所选区域时段内的 GLAS 测高数据较为丰富(如图 2), 并且沿线地势也比较平坦, 实验中采用 Surfer 软件对数据使用 Kriging 方法进行网格化内插, 插值结果较好。图 3 为绘制的实验区域中山站至 Dome A 沿线冰面地形图。

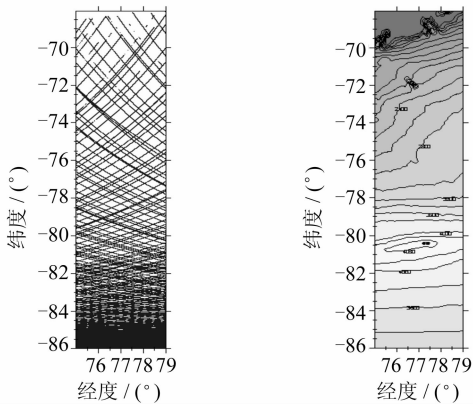


图 2 中山站至 Dome A 区域 ICESat 卫星数据覆盖轨迹图

Fig. 2 ICESat Data from Zhongshan Station to Dome A Area

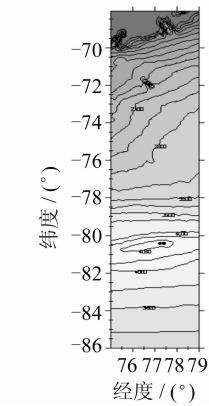


图 3 中山站至 Dome A 区域 ICESat 数据等值线图

Fig. 3 Zhongshan Station to Dome A Area's Contour by ICESat Data

从图 3 中选取 Dome A 区域进行高斯-克吕格投影, 以  $75^\circ \text{E}$  经线作为中央子午线, 并且东向偏移 500 km, 绘制等值线图(图 4)。其中高程值小于 4 080 m 的范围使用 10 m 的等高距, 高程值大于 4 090 m 地区使用 1 m 等高距。可见, 等值线为 4 092 m 时可得到南北两个高点区域, 分别与 RAMP DEM 定义的可能区域 I 和 II 对应, 并且可能区域 I 和 II 的中心点, 即图 4 中标示的两个十字点, 也与南北高点区域的中心一致。由此可以初步判断依据 RAMP DEM 所选取的 Dome A 最高点可能区域 I 和 II 是合理的。

对高程值大于 4 092 m 的 ICESat 数据进行分析, 得到高程值大于 4 092.33 m 的点均落在北高点区域, 即落在 RAMP DEM 定义的可能区域 II 内。由此判断内陆冰盖最高点位于可能区域 II 内, 即北高点区域内。该结果与实地考察测量结果一致。

ICESat 卫星轨道覆盖密度小于 GPS 地面实测数据密度, 因此对最高点的测量只能是粗略的。

在 ICESat 卫星实测数据中, 高程最大值为 4 092.41 m, 位于  $80^\circ 21' 46'' \text{S}$ 、 $77^\circ 20' 13'' \text{E}$ , 与实测 Dome A 最高点位置极为接近, 相距仅约 500 m。由于 Dome A 顶部区域相当平坦, 60 多  $\text{km}^2$  范围内高差仅为 2 m 多, 从而可进一步验证第 21 次南极科考测定的内陆冰盖 Dome A 最高点位置是准确的, 同时地面测量数据也验证了空间数据的精度和可靠性。

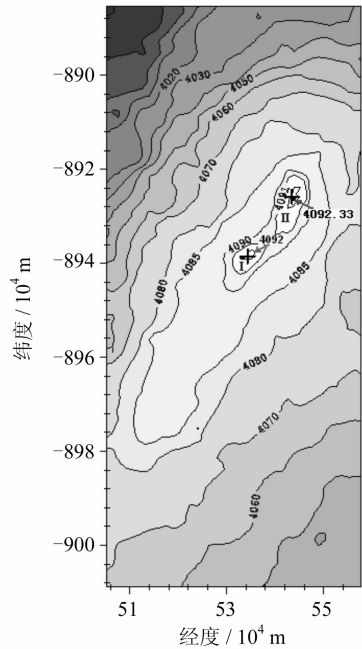


图 4 Dome A 区域 ICESat 数据等值线图

Fig. 4 Dome A Area's Contour by ICESat Data

## 4 结 语

本文分析了 ICESat 卫星的在轨性能及其测高数据, 利用 GLAS 高度计测量数据建立南极冰面地形完全能满足研究所需精度。其中以 2 号激光器 L2a 工作时段内的测量数据最优, 其地面轨迹覆盖率最大, 数据精度最高, 完全可以满足极地冰川动态监测和冰盖环境变化监测、分析及应用。

实验中首次采用 ICESat 卫星测高数据来验证第 21 次中国南极科考内陆冰盖考察测定的南极内陆冰盖 Dome A 最高点的正确性。由 ICESat 数据处理得到的 Dome A 区域冰面地形与考察选用的 RAMP DEM 模型一致, 从而验证了依据 RAMP DEM 确定的 Dome A 最高点可能区域选取的正确性。另外, 根据 Dome A 区域 ICESat 卫星数据生成地形图可知, 地面实测的 Dome A 最高点落在图中最高区域内, 并与最大高程点位置一致, 故可判断实际测定的 Dome A 最高点位

置是准确的。

同时,地面实测数据和空间测量数据的精度和可靠性也得到了验证。在 Dome A 区域内,RAMP DEM 的垂直精度优于 7.5 m,ICESat 高程数据的标称精度优于 15 cm,实测 GPS RTK 的采样点精度优于 10 cm。由于 GLAS 测高精度受地区影响,故利用 GLAS 测高数据与 Dome A 核心实测区的 GPS 地面测量数据进行比较,标准误差约为 16 cm。因此,对于 ICESat 卫星所测量的数据结果仍可视作可靠,精度仅为 dm 级。本文利用 ICESat 卫星数据验证了 RAMP DEM 的准确性以及考察队实测结果的可靠性;同时,实测的 GPS 地面测量值也验证了 ICESat 卫星测高数据的精度和可靠性。

### 参 考 文 献

[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] Abshire J B, Sun Xiaoli, Riris H, et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit Measurement Performance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S02

[3] Schutz B E, Zwally H J, Shuman C A, et al. Overview of the ICESat Mission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S01

[4] Fricker H A, Borsa A, Minster B, et al. Assessment of ICESat Performance at the Salar De Uyuni, Bolivia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21S06

[5] 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: L21S07

第一作者简介:鄂栋臣,教授,博士生导师。现主要从事极地测绘遥感信息领域的研究。  
E-mail:edc@whu.edu.cn

## ICESat's Performance and Its Application in Dome A Area in Antarctica

E Dongchen<sup>1</sup> XU Ying<sup>1</sup> ZHANG Xiaohong<sup>2</sup>

(1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The on-orbit measurement performance of GLAS is summarized, and the precision of the data products is analyzed. With the high-accuracy ICESat measurements and the GPS ground surveys in 21st CHINARE inner ice sheets research, the validity of Dome A area defined in 21st CHINARE and the measured high-point of Antarctic inner ice sheets is analyzed.

**Key words:** GLAS; on-orbit performance; ICESat; Dome A

**About the first author:** E Dongchen, professor, Ph.D supervisor. He is concentrated on the research in polar information engineering in surveying, mapping and remote sensing.

E-mail: edc@whu.edu.cn

### 欢迎订阅 2008 年《地球空间信息科学学报(英文版)》

《地球空间信息科学学报》为我国惟一的英文版测绘专业学术期刊,由 Springer 和武汉大学联合出版。其宗旨是:立足国内,面向国际,通过发表具有创新性和重大研究价值的测绘理论成果,促进国内外学术交流。本刊内容包括综述和展望、学术论文和研究报告、本领域重大科技新闻等,涉及测绘研究的主要方面,尤其是数字摄影测量与遥感、全球定位系统、地理信息系统及其集成等。收录本刊的数据库包括 CAS、PKU 等,读者对象为测绘及相关专业科研人员、教师、研究生等。

本刊为季刊,国内外公开发行人。邮发代号:38-348,国外代号:QR1556。A4 开本,80 面,定价 10 元/册,逢季末月 5 日出版。漏订的读者可与编辑部联系补订。