

发展三极观测激光测高卫星的探讨

高小明^{1,2}, 李国元^{1,2,3*}, 郭金权^{1,2}, 欧阳斯达¹, 樊文锋¹

- (1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
2. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁阜新 123000;
3. 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)

摘要: 南极、北极和青藏高原素有地球三极之称, 正经历着巨大变化的“三极”区域既是影响研究全球气候变化的关键区, 又是保障国家安全利益的重要战略特殊区。激光测高卫星具有快速获取全球地表高精度三维信息的特点, 在极地区域相比其他类卫星其优势更加明显。为满足新形势下“三极”区域遥感观测研究的需求, 立足于激光测高卫星, 总结了国内外已有激光测高卫星在极地观测方面的现状, 分析了激光测高卫星在极地区域的观测需求, 探讨了激光测高卫星在极地区域的可观测要素, 提出了我国发展极地观测激光测高卫星的相关建议, 并对未来极地遥感卫星体系建设给出了初步设想及展望。

关键词: 三极观测; 激光测高卫星; 高程测量; 变化监测; 高分七号

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200233

Discussion on the development of laser altimetry satellite for tri-polar regions observation

Gao Xiaoming^{1,2}, Li Guoyuan^{1,2,3*}, Guo Jinqun^{1,2}, Ouyang Sida¹, Fan Wenfeng¹

- (1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;
2. College of Surveying and Geographical Sciences, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, China;
3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China)

Abstract: Antarctica, Arctic and Qinghai Tibet Plateau are known as the three poles of the earth. The "tri-polar" regions, which are undergoing great changes, are not only the key areas affecting the study of global climate change, but also the important strategic special areas to protect national security interests. Compared with other polar satellites, it has obvious advantages in obtaining high-precision 3D earth surface information. In order to meet the needs of remote sensing observation and research in the "tri-polar" region under the new situation, based on the laser altimetry satellite, the status of the existing laser altimetry satellites in polar observation was summarized. The observation requirements in polar region were analyzed, and the observable elements of laser altimetry satellite in polar region were discussed. Moreover, the development of laser altimetry satellite for polar observation in China was proposed, the preliminary ideas and prospects for the future construction of polar remote sensing satellite observation system were discussed.

Key words: tri-polar observation; laser altimetry satellite; elevation measurement; change monitoring; GF-7 satellite

收稿日期:2020-06-12; 修订日期:2020-09-13

基金项目:国家重点研发计划战略性国际科技创新合作重点专项(2016YFE0205300); 国家自然科学基金(41971425)

作者简介:高小明(1981-),女,副研究员,主要从事自然资源卫星规划等方面的研究。Email: gaoxm@lasac.cn

通讯作者:李国元(1984-),男,副研究员,博士,主要从事卫星激光测高数据处理、卫星遥感水资源调查监测等相关方面的研究。

Email: ligy_lasac@foxmail.com

0 三极重要性及卫星遥感的优势

南极、北极和以珠穆朗玛峰为代表的青藏高原地区是地球的“三极”。“三极”蕴藏着全球最大的淡水资源,特别是青藏高原第三极被誉为“亚洲水塔”、“中华河源”^[1]。“三极”区域油气、矿藏等自然资源丰富,是全球资源、能源开发潜在的战略储备区域,对我国长远发展、国家利益和安全战略具有特殊的重要意义。极地与网络、深空、深海被称为“新疆域”、战略地位显著。同时“三极”是全球气候变暖最为剧烈的地区和全球气候系统多圈层相互作用的典型区,也是影响全球气候与环境变化的关键区和敏感区,其在全球能量和水分循环中发挥着重要作用。因此,“三极”研究是地球系统科学多圈层耦合研究及“未来地球”自然-社会科学交叉研究的制高点,国内外科学家正在呼吁开展“三极”科学研究计划。

极地的特殊地理位置和特殊的自然环境,人类难以接近,因此,进行极地考察,认识了解极地,人类进行了一个漫长的过程。随着卫星遥感的不断发展,给极地监测考察技术带来了生机,极大地改善了人们对极地圈众多特征及其他圈层相互作用过程的认知,深化了极地若干领域的研究内容^[2]。卫星遥感的全天时、全天候、大面积、多尺度、周期性、长期观测等优势,不受地理位置、人为条件、恶劣环境等因素的限制,在极地的研究和检测中有着不可替代的优越性。在极地研究中,极地冰雪物质总量计算、冰流速、冰

盖高程变化等尤为重要,而激光测高卫星能够以更高的精度高、更大的空间范围、更长的时间尺度对极地冰盖地形及其变化进行连续监测而被广泛关注。

1 研究现状及极地观测要素

1.1 激光测高原理与应用

卫星激光测高是一种在卫星平台上搭载激光测高仪,并以一定频率向地面发射激光脉冲,通过测量激光从卫星到地面再返回的时间,计算激光单向传输的精确距离,再结合精确测量的卫星轨道,姿态以及激光指向角,最终获得足印点高程的技术与方法^[3-4]。

激光测高技术应用广泛,不仅在森林树高生物量估算、陆地湖泊水位测量、浅海水下地形测量方面发挥重要作用,还能在极地冰盖测量、海冰厚度、冰川变化等方面提供高精度观测数据,大气通道的激光雷达则能为极地区域的臭氧、二氧化碳等气体变化提供宏观的监测手段。

1.2 激光测高卫星极地观测现状

美国于 2003 年成功发射了世界上第一颗对地观测激光测高卫星 ICESat/GLAS,在冰川和海冰的高程及厚度变化、全球高程控制点获取、森林生物量估算等方面取得了重要的科研应用成果,之后于 2018 年 9 月又成功发射了采用光子计数探测体制的 ICESat-2 卫星,并在同年 12 月成功发射了搭载了多波束地基激光测高系统的全球生态系统动力学调查 GEDI,国内外相关激光测高载荷指标如表 1 所示。

表 1 国内外主要激光测高载荷主要技术指标与用途

Tab.1 Main technical indicators and uses of major laser height measurement loads at home and abroad

Satellite name	Launch time	Collecting method	Beam number	Footprint diameter/m	Footprint spacing/m	Polar observation capability	Main applications
ICESat-1	2003	Full wave-form	1	70	170	Within 86°	Polar change monitoring, terrain and forest height measurement, etc
ICESat-2	2018	Single photon	6	10	0.7	Within 88°	Polar change monitoring, terrain and forest height measurement, etc
GEDI	2018	Full wave-form	4	25	60	Within 51.6°	Forest biomass estimation
LIST	2025	Single photon	1 000	5	0.7	/	High precision measurement of surface elevation
ZY3-02	2016	Full wave-form	1	75	3 600	Within 83°	Laser altimetry experimental load
GF-7	2019	Full wave-form	2	<30	2 400	Within 83°	Elevation control point acquisition
Landcarbon monitor	2021	Full wave-form	5	25-30	200	/	Forest carbon storage monitoring, elevation control point acquisition

极地应用方面, ICESat 系列卫星发挥了不可替代的作用^[5]。ICESat-1/GLAS 作为一颗近地激光测高卫星, 相比星载雷达高度计提供了更加精确的观测数据, 如图 1 所示。虽然遇到了激光器硬件问题, 但运行时间仍长达 7 年, 相较于其他机载激光雷达, 在节省经济支出的同时, 开展了更长时间序列的测量任

务。ICESat-2/ATLAS 作为 ICESat-1 的后续, 其硬件设施和数据处理算法都有了大幅度的优化改进, 多波束, 高重频, 短脉宽和单光子计数技术的使用, 极大提升了对地观测结果的精度和可靠性^[6]。在未来的很长一段时间内, ICESat-2 采集的高程数据都会作为极地研究的重要数据, 并得到广泛应用。

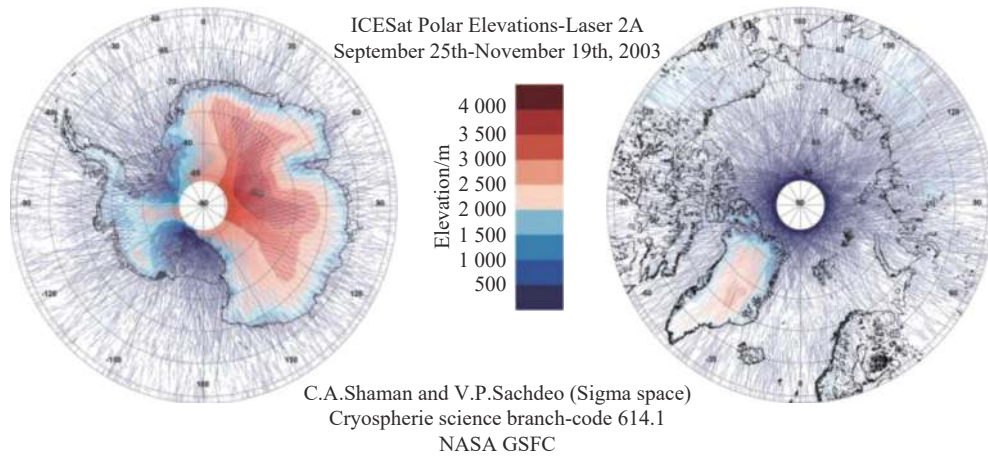


图 1 ICESat-1 测高数据极地应用分析^[7]

Fig.1 Polar application analysis of ICESat-1 altimetry data^[7]

相较于美国在激光测高领域的绝对领先, 我国虽起步较晚, 但是发展速度较快。我国于 2016 年成功发射了搭载试验性激光测高载荷的资源三号 02 星, 为之后的激光测高载荷的研发与应用打下了良好基础^[4]; 2019 年成功发射了搭载具有业务化能力的激光测高载荷的高分七号卫星, 已有的实验表明, 高分七号激光测高载荷运行稳定、质量良好、精度达到预期目标, 可以有效提取地表面高程信息。高分七号及计

划发射的陆地碳卫星都搭载了具有全波形记录能力的激光测高仪, 部分指标与 ICESat 相似, 也可以获取极地区域的冰盖高程、海冰厚度等相关信息, 图 2 为高分七号于 2019 年 11 月 21 日获得的极地区域第一轨激光测高数据。高分七号还配置了前后视相机, 可生成极地区域高精度 DEM, 但该卫星不是专门用于极地观测的, 激光重频率也偏低, 对极地的观测效能大打折扣。

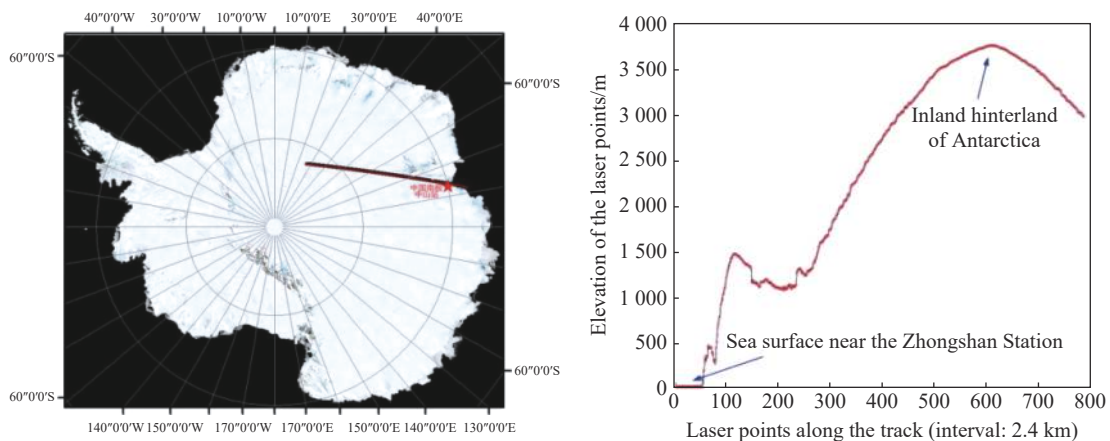


图 2 高分七号极地区域第一轨测高数据示意图 (拍摄日期: 2019 年 11 月 21 日)

Fig.2 Elevation profile data of the first track obtained by the GF-7 in the polar region (captured time: 21st Nov, 2019)

1.3 激光测高卫星极地观测要素

1.3.1 极地冰盖高程测量

极地地区对全球气象、气候变化起着重要作用, 极地冰雪圈与大气和海洋相互作用直接影响大气环流和气候变化。通过测量极地冰面冰盖高程的变化, 可以估算冰盖物质总量变化及对海平面变化贡献, 进而分析极地冰雪圈变化与全球气候变化之间的关系, 预测全球气候变化趋势并制定决策。

ICESat-1 在运行期间获得了大量的极地冰盖高程数据, 已有大量研究通过交叉点法、重复轨道法等数据处理方法解算出南极冰盖、格陵兰岛冰盖等极地冰盖高精度长时间变化序列, 结合冰后回弹模型、粒雪层密度模型结算出极地冰盖物质质量变化, 可靠地估计出冰盖对海平面的贡献值。ICESat-2 产品中的 ATL06 数据专门应用于陆地冰盖高程获取, ATL06 数据产品算法可以更加准确地获取冰盖高程信息, 捕获到空间尺度约 40 m 内的表面高程变化信息, 并且记录沿轨坡度, 为表面高程获取、长时间序列高程变化监测提供精确的坡度变化信息, ICESat-2 所提供的高精度, 高空间分辨率的观测结果, 将极大地改进对起伏较大冰面和冰盖边缘地区的观测精度, 为极地冰盖质量变化研究提供前所未有的机遇^[8]。

1.3.2 海冰厚度测量

研究表明, 受全球气候变化的影响, 北极海冰的覆盖面积与厚度在近几十年间呈下降趋势, 已接近有史以来的最低水平; 南极海冰因其季节性特征而表现出具有很高不确定性的变化趋势。常规的光学影像可以得到海冰的覆盖情况和面积信息, 但无法对海冰厚度进行直接测量; 海冰自身的穿透特性也使得雷达高度计等手段受限。激光测高技术的应用很好地解决了这一问题, 利用测高数据计算海冰干舷高, 反演海冰厚度及估算海冰总体质量, 为研究预测海冰变化、分析海冰与海洋间相互作用提供了有力的帮助。

除去分析气候变化之外, 北极海冰的逐年融化, 为探测与开采北极能源、开辟北极航道提供了契机, 且已经成为部分国家的国家级战略目标^[9]。可以预见, 未来北极内航行船舶数量将持续增加, 大量商用货船、科研考察船、军用舰艇会使用北极航道, 为保障北极航道的安全和维护国家利益, 就需要对北极海冰进行大范围、高精度、实时的监测预警, 形成自主化的监测预报系统服务国家战略需求, 如图 3 所示展示了 2018 年 10 月至 2019 年 3 月 ICESat-2 卫星激光测高数据反演的北极海冰干舷高的变化。

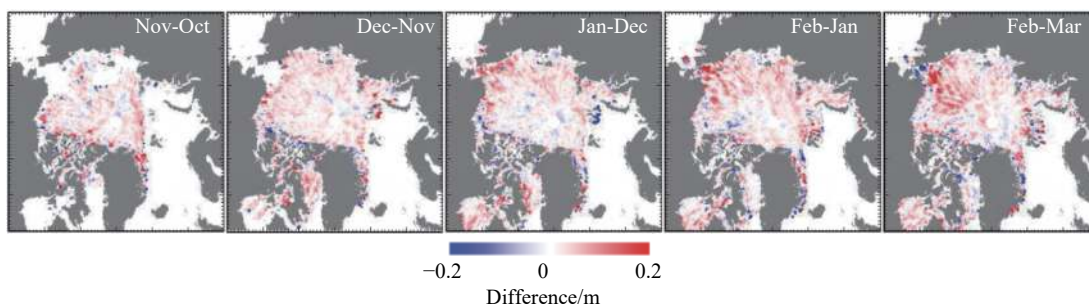


图 3 利用 ICESat-2 激光测高数据获取的 2018 年 10 月至 2019 年 3 月北冰洋海冰干舷高的变化^[10]

Fig.3 Changes in the freeboard height of the Arctic Ocean sea ice from October 2018 to March 2019 obtained using ICESat-2 laser altimetry data^[10]

1.3.3 积雪厚度反演

北极海冰上的雪层是气候系统的重要组成部分, 雪的隔热作用减缓了冰的生长速度与融化速度。但对积雪深度的了解目前比较有限, 而且是基于 20 世纪中叶进行的实地测量和过去十年进行的调查研究。

ICESat-2 激光测高数据与 CryoSat-2 雷达测高数已被组合应用于海冰表面积雪深度的获取, 依据两种

测高手段的穿透能力不同, 将 ICESat-2 激光测高数据获取的空气-雪界面高度与 CryoSat-2 雷达测高获取的冰-雪界面高度进行差分, 以获取海冰表面积雪深度。虽然相应的算法还不成熟, 但两种测高数据的组合为积雪深度反演提供了一个重要可能^[11]。

1.3.4 青藏高原水资源测量

作为“亚洲水塔”, 青藏高原及周边地区 (包括帕米尔高原, 兴都库什, 喀喇昆仑和喜马拉雅山脉) 覆盖

有冰川 46000 多条, 总面积约 10 万平方千米, 对亚洲地区水资源压力的缓解具有重要意义, 特别为中国西部较干旱地区的水资源安全, 生态系统安全和社会经济发展提供了重要保障。全面认识青藏高原及周边地区冰川、冰湖、湖泊变化及其影响, 对阐明冰川与气候及人类活动的相互作用关系, 明确冰川未来变化趋势与提出应对措施具有重要的科学与社会意义^[12]。

以 ICESat-1 为主的激光测高数据已被应用于青藏高原冰川研究中, 包括对冰川厚度变化监测分析、

冰川总质量估算、冰湖水位获取及稳定性评估等方面。由于青藏高原冰川坡度较大, 全波形大足印的激光测高数据受坡度影响, 常会丢失数据或精度降低, 所以能够应用于冰川研究的全波形测高数据总量并不多, 但以 ICESat-2 为代表的新一代单光子激光测高卫星, 由于其技术特性, 可以获取大量的测高数据且在大坡度地区保证了一定精度, 为青藏高原冰川研究提供了更有力的帮助, 如图 4 所示^[13]。

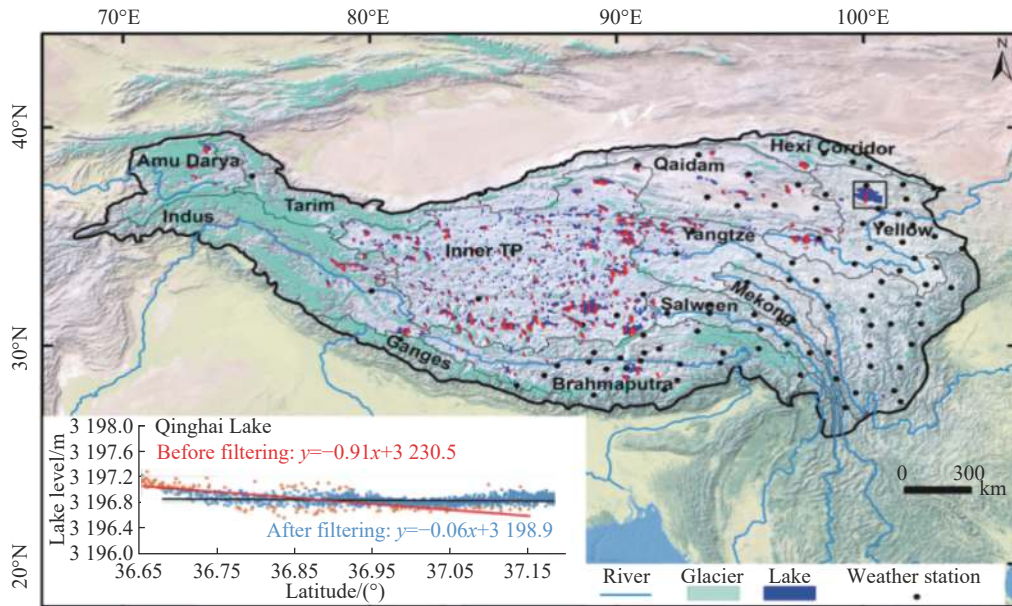


图 4 ICESat-2 在青藏高原湖泊中的轨迹 (红色线段) 以及 ICESat-2 获取的青海湖水位信息^[13]

Fig.4 ICESat-2 trajectory in the Tibet Plateau lake (red line) and the obtained water level information of Qinghai Lake^[13]

1.3.5 大气观测

大气中的水分子、臭氧、云、气溶胶等对极地区域的作用可分为两方面: (1) 通过散射和吸收入射的太阳辐射以及地球的长波辐射, 直接对气候产生影响, 称为直接辐射强迫作用; (2) 作为凝结核改变云的物理和光学特性以及降水效率, 影响着云、雾、雨、雪的形成, 从而影响着地-气系统的收支平衡, 对局部、区域乃至全球的气候产生重要的影响, 称为间接辐射强迫作用。但辐射强迫效应存在很大的不确定性。因此, 开展大气光学、微物理、化学特性以及垂直分布特征等研究, 对于人们了解全球变化过程和改善人类的生存环境而言有着重要的现实意义。云、气溶胶作为地球大气成分中的主要组成部分, 在地球大气系统的收支平衡中扮演着非常重要的角色, 伴随的气候

效应是当今科学界的研究热点之一^[14]。

激光测高卫星不仅可以获得地表面高程信息, 已有研究证明其还具有探测气溶胶、云等大气分子的能力。ICESat-1/ICESat-2 已经应用于探测极地区域的云、气溶胶等信息^[15], 与同步的极地高程信息相结合, 更加有利于分析大气环境与极地变化的相互作用, 为分析预测大气环境提供依据。

2 发展国产极地激光测高卫星的具体建议

依据“三极”特殊的地理位置及气候条件, 借鉴美国 ICESat-1/ICESat-2 的成功经验, 分析了极地观测对激光测高的具体需求, 为我国发展极地激光测高卫星提出如下几点建议:

- (1) 发展多波束高重频激光测高卫星。多波束高

重频的设定,可以大大提高激光测高卫星获取数据的能力。最新的 ICESat-2 激光测高卫星具有 3 对共 6 个波束,每对由强弱 2 个光束组成,相较于 ICESat-1,ICESat-2 的 6 波束设定使其数据获取范围更大,产生的升降轨交叉点个数更多,更有利于极地区域大面积的地表变化监测;单光子技术产生的高重频脉冲,使其数据沿轨分辨率更高,获得的地形数据更准确。

(2) 大轨道倾角、近极地观测。南北极区域位置特殊,同属高纬度地区,目前绝大多数遥感卫星对高纬度地区的过境能力有限,造成极点区域一定范围内的数据缺失。美国在 1963 发射的 Transit 5E-1 是全球唯一一颗严格 90° 极地轨道卫星。ICESat-1 的轨道倾角为 94°,ICESat-2 的轨道倾角为 92°,在发展国产激光测高卫星时,一定要考虑轨道倾角即数据获取的范围,争取做到更大范围的过境覆盖,填补高纬度数据空白。

(3) 高指向控制精度,确保卫星重复轨迹及分季监测。利用激光测高数据分析极地变化一般使用重复轨道法或交叉点法,重复轨道法因其覆盖面积大、数据量多等优势而被大量学者采用,但重复轨道方法受限于重复轨道间的距离,ICESat-1 重复轨道间的距离可达百米,虽然可利用坡度参数进行改正,但其准确度也会有所下降。为避免产生轨道偏差就需要高精度的指向控制,以保证轨道间的严格重复。控制卫星进行南北极分季监测,北半球夏季监测北极、冬季监测南极,经过第三极时拍摄青藏高原地区,观测资源全部向三极地区倾斜,以三极观测为主。

(4) 高精度测量能力、高灵敏的大气探测能力,对于极地变化监测精度是根本,已有的研究表明南极冰盖消融为每年几个厘米,而计算海冰厚度时需要依靠干舷高进行转换,转换比例约为十分之一,很小的误差就会造成最终结果较大的偏差,因此发展极地激光测高卫星要追求高精度,争取优于厘米级,以期更准确地进行极地变化监测及未来预估。

(5) 一定的连续观测周期。极地区域需要长期性、持续性的关注与研究,因此在发展极地激光测高卫星时要注意卫星的设计寿命,保障卫星的健康运行。ICESat-1 在发射之后发现激光器设计存在缺陷,虽然通过 3 个激光器的备用切换以及观测时长的有效控制,运行了 7 年之久,但相较于完全健康运行时

的观测能力仍大打折扣。而至少 3~5 年连续观测能力,是有效监测极地冰盖高程变化的重要基础。

(6) 构建业务化的数据处理、产品生产体系。迅速形成极地观测产品、高精度定标和标准化处理是成熟的业务化数据处理体系的必然要求。在卫星发射成功之后,后期的数据处理、产品生产也是重要一步。参考 ICESat-1/ICESat-2 的数据处理、产品发布,建议采取相似策略,利用原始激光测高数据,针对不同地物,采用不同数据处理算法,生成不同观测类别的极地激光测高专题产品对外发布。

3 未来极地遥感卫星体系的初步设想及展望

极地作为未来“新疆域”的重要组成部分,其战略意义及科研价值非常重要。发展极地遥感卫星观测体系,是充分发挥遥感卫星的优势,服务重大战略需求的必然选择。目前的自然资源陆地卫星由于轨道倾角限制、拍摄及数传能力限制,对南北极的覆盖能力与应用需求有较大差距。

建议除立足于自然资源陆地观测卫星现状外,还需要进一步突出极地重点要素观测、聚焦极地核心数据获取,实现对海冰范围、密集度、厚度的连续观测和监测,服务于北极航道开辟,实现大范围冰盖厚度变化及物质平衡的长期监测,服务于全球气候变化分析,实现青藏高原地区水、气、冰的有效观测、冰川三维变化监测,充分保护中华水塔。

建议可考虑先期发射“自然资源极地一号”卫星系列,分别搭载或同步搭载多波束激光测高仪和中高分辨率的宽幅光学相机,设计近极轨观测,结合一定角度的卫星侧摆,实现光学影像对目前南北极漏洞区的全面覆盖,激光高程上对极地冰盖、海冰等变化的连续有效监测。长期而言,争取构建三极区域高分辨率立体、中等分辨率宽幅可见光、中等分辨率宽幅微波雷达卫星、激光测高卫星的多源、长周期观测体系,为三极观测提供中国数据、掌握国际话语权。

参考文献:

- [1] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian water tower change and its impacts [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203-1209. (in Chinese)
姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国

- 科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [2] Zhang Xin, E Dongchen. Progress in application of modis for remote sensing in polar regions[J]. *Advances in Polar Science*, 2010, 21(1): 100-112.
- [3] Tang Xinming, Li Guoyuan. The development and prospective of laser altimeter satellite [J]. *Space International*, 2017(11): 13-18. (in Chinese)
唐新明, 李国元. 激光测高卫星发展与展望[J]. *国际太空*, 2017(11): 13-18.
- [4] Li Guoyuan, Tang Xinming. Analysis and validation of ZY-302 satellite laser altimetry data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(12): 1939-1949. (in Chinese)
李国元, 唐新明. 资源三号02星激光测高精度分析与验证[J]. *测绘学报*, 2017, 46(12): 1939-1949.
- [5] Yang Fan, Wen Jiahong. ICESat and ICESat-2 applications: progress and prospect [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2011, 23(2): 138-148. (in Chinese)
杨帆, 温家洪. ICESat与ICESat-2应用进展与展望[J]. *极地研究*, 2011, 23(2): 138-148.
- [6] Benjamin Smith, Helen A Fricker, Nicholas Holschuh, et al. Land ice height-retrieval algorithm for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019: 233.
- [7] NASA: National Aeronautics and Space Administration-ICESat. Last visiting on April 2014[EB/OL]. <http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/>.
- [8] Brunt K M, Neumann T A, Smith B E. Assessment of ICESat-2 ice sheet surface heights, based on comparisons over the interior of the Antarctic ice sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 13072-13078.
- [9] Tang Xinming, Li Guoyuan. Thoughts about land and sea satellite laser altimetry [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(3): 15-19. (in Chinese)
唐新明, 李国元. 陆海激光卫星高程测量的思考[J]. *上海航天*, 2019, 36(3): 15-19.
- [10] Kwok R, Markus T, Kurtz N T, et al. Surface height and sea ice freeboard of the Arctic Ocean from Icesat-2: characteristics and early results [J]. *Geophysical Research Oceans*, 2019, 124(10): 6942-6959.
- [11] Kwok R, Kacimi S, Webster M A, et al. Arctic snow depth and sea ice thickness from ICESat-2 and CryoSat-2 freeboards: a first examination [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020: 125.
- [12] Yao Tandong, Yu Wusheng, Wu Guangjian, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks the Tibetan Plateau and surroundings [J]. *China Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2770-2782. (in Chinese)
姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2770-2782.
- [13] Zhang G, Chen W, Xie H. Tibetan Plateau's lake level and volume changes from NASA's ICESat/ICESat-2 and landsat missions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 13107-13118.
- [14] Wang Tianhe, Sun Mengxian, Huang Jianping. Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China [J]. *Trans Atmos Sci*, 2020, 43(1): 144-158. (in Chinese)
王天河, 孙梦仙, 黄建平. 中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 144-158.
- [15] Yao Jiaqi, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Research on cloud detection and related algorithms of laser altimetry satellite ICESat-2[J]. *Laser & Opto-electronics Progress*, 2020, 57(13): 131701. (in Chinese)
么嘉棋, 唐新明, 李国元, 等. 激光测高卫星ICESat-2云检测及其相关算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131701.