

从全球激光点云到三维数字地球空间框架： 全球精确测绘进阶之路

方勇^{1,2*}, 龚辉^{1,2}, 张丽^{1,2}, 胡海彦^{1,2}

¹西安测绘研究所, 陕西 西安 710054;

²地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054

摘要 激光点云数据具有测量精度高、处理效率高、三维视觉强、应用领域广等特点,将是新一代国家全球测绘数据库核心数据集之一。星载激光对地观测技术快速发展,为获取全球三维点云数据提供了可能,为构建高精度三维数字地球空间信息框架提供了一条快速有效的技术途径。首先分析了当前全球高精度三维测绘现状及面临的问题,然后给出了基于全球激光点云的三维数字地球空间信息框架快速构建的技术体系,主要包括星载光子计数体制激光点云数据探测、处理、应用等技术流程。最后分析了基于点云快速构建的三维数字地球框架的特点和优势,指出了下一步发展需要关注的主要问题和方向。

关键词 全球激光点云; 全球控制点库; 全球三维高程数据; 三维数字地球空间框架; 全球测绘数据库

中图分类号 P237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1200002

From Global Laser Point Cloud Acquisition to 3D Digital Geospatial Framework: The Advanced Road of Global Accurate Mapping

Fang Yong^{1,2*}, Gong Hui^{1,2}, Zhang Li^{1,2}, Hu Haiyan^{1,2}

¹*Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

²*State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

Abstract Laser point cloud data has the characteristics of high measurement accuracy, fast processing efficiency, strong three-dimensional (3D) vision, and wide application fields. It will be one of the core data sets of the new generation national global topographic database. The rapid advancement of spaceborne laser earth observation technology allows the collection of global 3D point cloud data, as well as a quick and efficient technical method for constructing a high-precision 3D digital geospatial information framework. Herein, we first examined the current state and the issues of global high-precision 3D mapping. Further, the rapid construction setup of 3D digital earth spatial information framework based on global laser point cloud was proposed, mainly including the technical processes of spaceborne photon laser point cloud data detection, processing, and application. Finally, the characteristics and benefits of the rapid construction of 3D digital earth framework, based on point cloud, as well as the main problem and future development directions that must be addressed were discussed.

Key words global laser point cloud; global control point library; global 3D elevation data; 3D digital geospatial framework; global topographic database

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-17; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家科技重大专项(GFZX04040202)

通信作者: *yong.fang@vip.sina.com

1 引 言

三维数字地球空间框架是覆盖全球的均匀分布的具有准确位置特性的空间数据集的全称,主要由高精度三维控制点、地形信息、影像模型及特征矢量信息等构成,可以为全球目标定位和各级地理信息快速测制及更新提供几何控制基础,也可为各类境外任务行动提供空间基准和位置服务,是实施“一带一路”倡议和“走出去”国家战略急需的基础地理信息资源,也是我国全球地理信息资源建设的重点任务。其概念来自测绘学向地球空间信息服务科学发展的总体趋势,是传统测绘数据库核心数据集建设由区域向全球、二维向三维、静态向动态拓展的必然要求^[1]。数字地球空间信息框架已经经历了二维矢量地图、二维正射影像地图、三维地形模型的发展阶段,进一步向真三维的数字地球框架建设发展,其中高精度的三维控制点云、全球数字表面高程图(模型)和目标三维模型将是重点建设内容^[2]。为此,本文在介绍国内外相关领域发展基础上,针对先进对地观测技术发展趋势,尤其是星载激光测量技术最新进展^[3-6],提出了一种快速构建全球高精度三维空间信息框架的技术体系和流程,并对其特点和优势进行了分析,对下一步重点建设内容进行了研讨。

2 全球高精度三维测绘现状

2.1 全球控制点库

目前商用控制点数据库主要由欧洲空客公司提供,主要包括基于光学和雷达影像生成的两类控制点。其中空客公司生产的全球控制点库(SRP V2)是 SPOT6/7 立体影像经过空中三角测量生成的全球三维地面控制点数据库,它是经同一地区不同视角、不同季节进行多次观测联合处理的影像特征点,精度经过验证,可通过配准不同来源遥感影像作为正射纠正几何控制基础,分辨率适用范围从米级到分米级。它主要包括影像切片文件和控制点信息文件(XML),特点是精度较高、点位数量多、点位分布较为均匀,覆盖全球除海洋和冰川外的范围,面积约 1.35 亿平方千米。主要技术参数包括:控制点密度为每 2 平方千米 1 个点,平面坐标采用 WGS84,精度为 3 m(CE90),高程采用 WGS84 椭球高和 EGM96 大地高两种参考基准,精度为 5 m(LE90),控制点影像分辨率为 2 m。整个数据价格

超过 2 亿人民币。

更高精度的全球控制点数据来自 TerraSAR-X 控制点,是由 2007、2010、2019 年发射的 3 颗 TerraSAR-X 卫星构成的星座获取的多视角雷达影像,通过雷达立体摄影测量原理生成。控制点组成主要包括道路交叉点、灯杆底部和可靠的强反射点等,1 个点一般包括 1~20 个控制点,平面和高程坐标精度范围为 0.2~1 m,平面坐标基准为 WGS84,高程基准为 EGM2008,这是目前公开报道具有最高三维定位精度的控制点数据。稍显不足的是点位分布受地物特征分布因素影响,均匀性差、价格较高,提供周期受到审批因素影响。

开源的全球控制点数据主要来自美国 ICESat-1 和 ICESat-2 采集的三维激光点数据。美国宇航局于 2003 年 1 月发射了第一颗激光测量卫星——冰、云和陆地高程卫星(ICESat-1),地球科学激光高度计系统(GLAS)作为主要载荷,主要任务是测量陆地地形、云层高度及垂直结构、极地冰盖等^[8]。ICESat-1 激光高度计在 6 年半的工作时间里获取了大量地球高精度表面数据,为诸多领域的科学研究和实际应用提供了宝贵数据源^[9-10]。其中在全球测绘领域,特别值得注意的是地表高程测量能力,测量数据可以构建精确的中等分辨率地球数字高程模型,或者与光学立体测绘/InSAR 测绘卫星成果联合处理,可以大幅提高三维地形模型的高程精度^[11]。多项研究表明,ICESat-1 获取的地表激光点可以作为辅助控制数据^[12-13],其高程测量精度达到 0.1 m 量级,显著提升了无控制条件下空中三角测量和测图精度,尤其在高程精度方面提升优势非常明显^[14]。我国在最新发展的高分七号和高分十四号高精度立体测绘卫星上加装了类似激光测高仪载荷^[15],为保证卫星条件下达到 1:1 万比例尺高程测量精度提供支撑。

鉴于 ICESat-1 卫星的突出表现,后续 ICESat-2 激光测量卫星任务成为美国国家研究委员会推荐在 2010—2020 年期间最优先发展的卫星观测任务之一^[16]。2018 年 9 月 ICESat-2 成功发射,主要载荷为先进地形激光测高系统(ATLAS),采用光子计数、高重复频率、微脉冲、多波束激光测量方案,地面足印 17 m,沿轨方向采样间隔 0.7 m,相对于 ICESat-1 的 70 m 足印和 167 m 沿轨采样间隔,极大提高了对地观测结果的精度和可靠性^[17-18]。在 ICESat-2 运行两年来,全球地表数据采集密度在沿

轨方向间距 70 cm,赤道上垂轨方向最大间距小于 2 km,为构建从区域到全球尺度高精度、高分辨率的地形高程模型提供了可能。

2.2 全球三维高程数据

精确的地形数据是三维数字地球空间信息框架的基础支撑^[19]。目前市场能够购买的商用全球数字表面模型(DSM)以欧洲空客防务与空间的WorldDEM为代表。它是TanDEM-X计划的产品,与TerraSAR-X一起测量全球数字高程模型,由空客防务与空间和德国宇航中心采用公私合营的合作方式完成,可根据全球商业用户的需求定制高程模型数据。它的主要技术指标包括:格网间距分为24,12,5 m;绝对高程精度优于4 m(LE90);相对高程精度20°坡度以下为2 m,20°坡度以上为4 m;5 m和12 m格网间距的绝对平面精度优于4 m(CE90),24 m格网间距的平面精度优于6 m;坐标系统采用WGS84和EGM2008。

目前开源的全球高程数据主要包括SRTM、ASTER Global DEM、ArcticDEM等^[20]。SRTM是美国航空航天局和国防部国家测绘局于2000年2月利用航天飞机干涉合成孔径雷达测量技术(InSAR)生成的30 m和90 m分辨率数字高程模型,从2014年起逐步向全球公开发布,覆盖包括中国在内的世界绝大部分地区,高程精度优于16 m。ASTER Global DEM是日本经济、贸易与工业部(METI)联合美国NASA采用摄影测量技术生产的分辨率为30 m的数字表面模型,基于“先进星载热发射和反辐射(ASTER)”数据计算生成,后续新增了光学立体像对数据,分别于2009年、2015年和2019年发布了三个版本,是目前覆盖全球南北纬83°范围陆地表面的高分辨率高程数据,高程精度约为12 m。ArcticDEM是2015年美国国家地理空间情报局(NGA)、伊利诺伊大学、明尼苏达大学和俄亥俄州立大学合作建立的特定地区高分辨率高程模型,他们采用BlueWaters超级计算机和WorldView系列卫星影像制作了整个北极陆地表面的三维模型,包括北纬60°以北的所有地区,格网间距分别为2,10,32,100,500,1000 m。2017年完成ArcticDEM后,2019年NGA和相关大学研究人员继续类似合作,启动EarthDEM项目,创建全球表面的数字高程模型,将在范围和质量上把数字高程模型扩大到地球其他区域。

2.3 面临的主要问题

根据以上分析,国际上全球尺度的三维测绘主要有卫星光学立体测绘和微波干涉测量两种方式。卫星激光雷达测量手段尚处于科学试验和初级阶段,效率相对还较低,尚不具备规模化业务运行能力。我国国家测绘地理信息局于2015年启动全球地理信息资源建设工程,利用资源三号卫星影像生产境内外DSM和数字高程模型(DEM)。现有基于光学立体影像或微波干涉测量数据的控制点和DSM/DEM生产流程存在的主要不足,一是高程精度不高,光学立体影像制作控制点高程精度仅能够满足1:5万比例尺测图要求,DEM和DSM高程精度也仅达到困难地区1:1万比例尺精度要求;二是产品制作自动化水平较低、人工交互工作量大、制作周期较长、生产效率不高等^[21],与当前面临的发展需求差距非常明显。随着先进对地观测技术快速发展和手段建设,目前高分辨率光学测绘卫星、分布式微波干涉测量卫星和激光测量卫星技术方面已取得长足发展,必将大幅提升我国全球三维测绘进程和能力水平。特别是星载激光雷达对地观测技术的迅猛发展为获取全球三维点云数据提供了可能,为构建高精度三维数字地球空间信息框架提供了一条快速有效的技术途径。

3 基于激光点云的三维数字地球空间信息框架构建

获取全球激光点云数据时首选的手段是采用航天载荷。20世纪初以来,星载激光雷达测量技术已经发展了两代^[22]。第一代以ICESat-1为代表,采用激光线性探测体制,特点是能量脉冲高、全波形探测、高程测量精度高、达到分米级^[23]。受限于体积功耗,一般为单波束或几波束,激光足印大,一定程度上影响平面定位精度,达到10 m左右^[24];同时采样频率低,一般为2~3 Hz,采集点密度较低,需要长周期连续观测才能实现全球密集覆盖。第二代以ICESat-2为代表,采用光子计数激光探测体制^[25-26],特点是微脉冲、多波束探测,在保持高程测量精度高的同时探测效能提高3个数量级,采样频率高,数据采样密度大幅提升,为实现全球高精度、高密度三维点云数据获取提供了有效技术途径^[18]。我国在国家科技重大专项“高分辨率对地观测系统”支持下,经过十余年时间,已经突破第二代星载激光雷达测量关键技术,为发展自主激光测绘卫星奠定了坚实基础。图1给出了全球激光点云快速

构建三维数字地球空间信息框架的技术体系。技术体系主要包括全球光子激光点云探测、数据处理

和数据应用 3 部分,最终目标是形成全球点云数据库,为全球测绘数据库的建设和更新提供支撑。

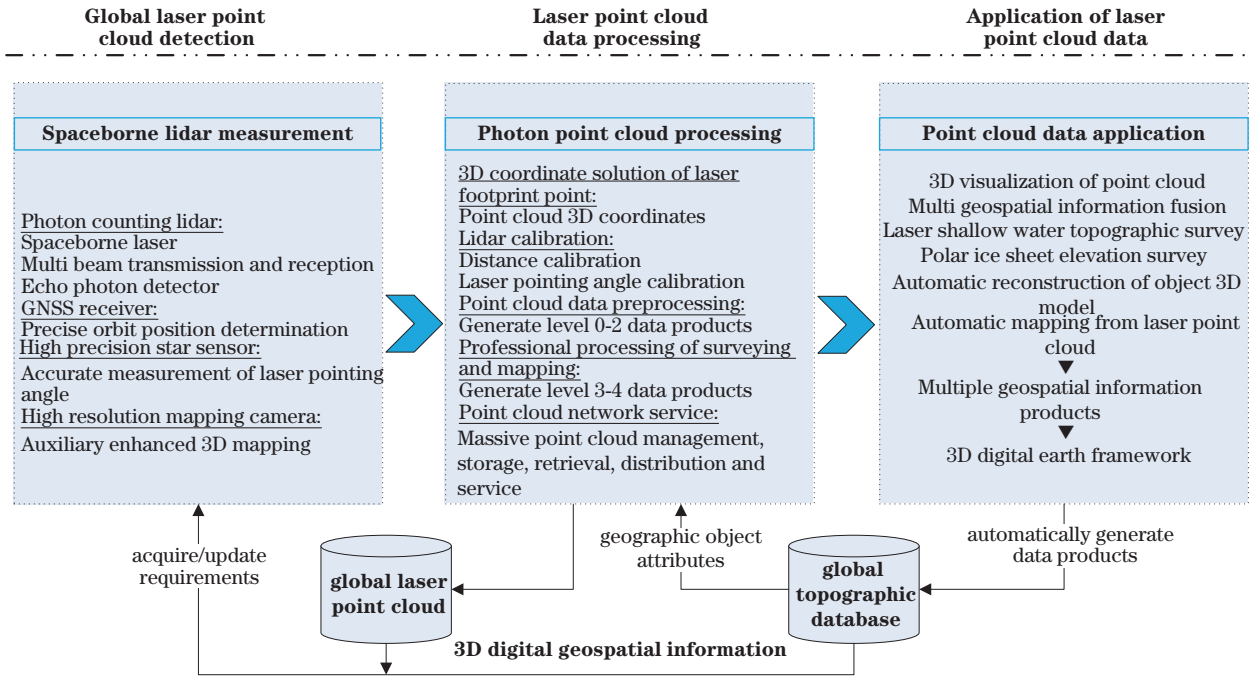


图 1 基于全球激光点云快速构建三维数字地球空间信息框架的技术体系图

Fig. 1 Setup diagram of 3D digital geospatial information framework based on global laser point cloud

3.1 全球激光点云探测

星载激光雷达测量通过星载激光器以一定频率向地面发射激光脉冲,激光束穿越大气后经目标散射,产生微弱的后向散射回波;该回波被星载激光雷达上的望远镜接收,经过光电信号转换、时间测量计算,得到激光器到探测目标之间的距离值;再结合卫星姿态、平台位置、激光指向等信息,最终获得激光足印点精确的三维空间坐标。该过程主要涉及长寿命星载激光器、多波束激光发射接收和光子级别信号探测、精密轨道位置测定、激光指向精度确定、主被动辅助三维测量等关键技术,技术特点是在数百千米工作高度下要求激光指向确定精度达到亚角秒级,距离测量精度达到厘米级,地表激光足印点三维坐标测量精度平面达到米级,高程达到分米级;同时为了提高全球测绘效率和精度,采用新体制光子计数激光雷达,激光足印尺寸从几十米降低到米级,采样频率从几赫兹提高到万赫兹,其探测效能较第一代线性探测体制激光雷达提高上千倍,为快速获取高密度、高质量点云提供了支撑。不同于传统光学或微波遥感测绘通过成像实现三维重建的间接测量模式,星载激光雷达测量属于直接测量模式,主动获取地表高程信息,减少了后处理环节,提高了地表三

维信息获取整体效率。

3.2 点云数据处理

根据光子点云数据处理流程,产品定义设计可以分为 5 级,主要包括原始遥测数据(0 级)、格式解码数据(1 级)、点云定位数据(2 级)、标准数据产品(3 级)和专题数据产品(4 级)。其中 0、1、2 级为预处理产品,3、4 级为专业处理产品,涉及的主要技术流程包括激光足点三维坐标解算、激光雷达测距和指向参数地面标定、点云数据预处理、测绘专业处理及网络化服务等。1 级处理中,对原始包数据进行解码、格式转换、编目,得到标准格式数据,主要包括经过仪器延迟等校正得到的光子飞行时间数据,利用精密位姿数据和定标数据得到的激光发射位置和指向数据。2 级处理中,经大气、各种潮汐等系统误差改正,得到激光足印的经度、纬度和高程值,并对点云进行去噪和预分类处理^[27],包括(2A)未去噪点云和(2B)去噪后点云。3 级处理中,经平差、格网化等处理得到控制点数据、目标区 DSM、极地 DSM 产品,包括(3A)控制点数据、(3B)DSM、(3C)DEM、(3D)目标三维模型。4 级处理中,针对特定的应用需求,融合光学、微波影像以及 DSM 等多源数据生成面向特定应用的专题产品,及提取点云中的极地

冰盖、大气、植被、湖泊等信息,通过测绘专业处理得到对应的其他专题产品。

3.3 点云数据应用

激光点云作为物理世界全球三维数字化的直接表达,其应用领域较为广泛^[28],主要包括海量全球激光点云三维可视化、多元信息融合、浅海地形测量、极地高程测量、目标自动三维重建及基于点云的数字制图等,实现了多元化空间信息产品生产,为三维数字地球框架建设提供支持。海量点云数据存储管理检索与可视化是最直接且有效的应用,目前支持全球百 PB 级数据量规模三维点云的存储管理与可视化应用已有成功解决方案,比如 Bentley Pointools 和 Euclidean Geoverse MDM 等产品,其三维引擎具有秒级加载无限量规模空间数据的特性,以实现快速应用;其次点云控制测量实现多源数据融合应用。云控制摄影测量目前已经在多个系统建设和工程应用中得以实现,点云支持下多源地形信息和三维模型融合将是下一步研究的重要方向,为快速建立大范围精度一致、信息类型更为丰富的三维信息框架提供了一条有效途径;另外对于点云制图,实现从激光点云中自动获取三维信息并转换为具有结构与功能的地理实体表达,成为重大应用方向。密集点云与全自动处理可以应用于城市三维建模、海岸带地形测量、极地高程图测制、道路基础设施维护监测和森林资源调查等领域,生成的多元地理空间信息产品包括建筑物三维模型、数字地面模型和数字地表模型、林业专题产品等,可为全球测绘数据库建设和专题要素信息更新提供支持。

4 基于激光点云构建三维数字地球空间信息框架优势分析

4.1 星载激光雷达测量技术优势

全球激光点云主要采用星载激光雷达测量技术获取,星载激光雷达测量技术优势主要体现在两方面。

1) 全球控制点采集。星载激光雷达测量手段具有高精度“点”测量属性,平面精度可以达到米级,高程精度达到分米级,是现有规划中高程测量精度最高的遥感卫星。因此其观测数据能够直接作为全球基础控制点来源,可以满足 1:1 万、1:5 千比例尺测图控制精度要求,服务于我国资源、高分系列等卫星,提升遥感定位精度。由于其具有对云层、植被一定的穿透能力,还具有精度高、全天时、覆盖面积广等

特点,将成为采集全球控制点最有效的方法。

2) 全球高程信息采集。当前星载激光雷达测量已经发展到第二代—光子计数/单光子探测体制,采样频率从线性体制的 2~3 Hz 大幅提高到 10 kHz,同时波束数量从 2~3 波束提高到百波束并扫,采集效率提升数十万倍,这为直接获取全球具有高精度、高密度的数字高程图带来了可能,对于全球测绘而言具有划时代意义。其获取的高程数据较微波干涉测量精度要高,比较 ICESat 数据和 SRTM 时就很明显,同时激光测量在人迹罕至、测绘困难的极地和陆地冰川地区也可以实施高精度测量^[3,29]。

4.2 基于激光点云构建三维数字地球框架优势

基于激光点云构建三维数字地球框架,相对于现有摄影测量手段具有以下优势:一是高程精度提升 5~10 倍;二是数据处理高度自动化;三是整体获取成本大幅降低。已有大量研究报道基于点云的地理实体重建在城市环境、道路和森林得到较为广泛应用,另外在点云直接可视化、点云语义标注、海量点云数据在线存储与检索等方面也得到长足发展,甚至有学者建议直接利用三维点云数据代替目前 3D 城市建模。相对于微波干涉测量手段,星载激光雷达测量除了不具备全天候观测能力外,在高程精度、快速测绘和极地测绘方面均具有相当优势^[30]。三种星载三维遥感测绘手段的相互特点比较如表 1 所示,通过对比可知,三种手段各有优势,同时也存在短板,在并行发展中需要互为补充。

表 1 星载三维遥感测绘手段比较

Table 1 Comparison of spaceborne three-dimensional remote sensing surveying and mapping methods

Condition	LiDAR	InSAR	Optical stereo
All-time	✓	✓	
All-weather		✓	
Good visual performance	✓		✓
High-resolution		✓	✓
High plane positioning accuracy	✓		✓
High elevation positioning accuracy	✓		
High relative positioning accuracy		✓	
Automatic rapid mapping processing	✓		
Polar/glacial mapping	✓		
Timely/widely covered		✓	✓

5 结束语

星载激光雷达对地观测技术的迅猛发展为快速采集全球地表三维点云提供了有效手段,而激光点云数据具有的优势和特点使其将成为下一代全球测绘数据库建设的核心数据集组成,为高精度全球控制网格构建和数字高程图高效测制奠定了基础,为快速构建高精度三维数字地球空间框架提供了支撑。同时面向全球激光点云应用需求和总体设计,还需要加强研究,不断优化技术流程,重点关注以下几方面问题。

1) 全球点云密度。激光测量与外业实地测量具有相似之处,均为单点测量,但是由于激光点云数据的无序性,因此不同应用对于点云密度均有相应要求。对于区域/国家级的机载点云密度,一般为 6~10 点/平方米,以芬兰全国为例,面积 33.8 万平方千米,共有 6400 亿个点,数据量约为 11 TB。而对于地面移动激光雷达点云数据,密度可能超过 1000 点/平方米。一般地,点云密度与应用环境密切相关。对于全球三维框架建设而言,目前星载激光点云间距达到 5~10 m,应该是一个合理区间,兼顾了测绘效率和平台性能。

2) 点云自动化制图。从星载点云数据提取多元空间信息包括地形、建筑物、植被等,需要进一步提高自动化程度和准确率,为三维数字地球空间信息框架建设提供有效支撑。激光点云数据自动分为地面点和非地面点,可靠的地面点是快速生成数字地面模型的关键;非地面点包含了地表目标结构信息,从中自动重建地物目标三维框架模型目前仍有很大挑战。

3) 多传感器集成。为了获取更为精细地表三维信息,多传感器集成融合将是星载对地观测技术发展的必然选择,实现星载激光雷达测量数据的高精度和光学/微波成像技术的高分辨率结合,充分发挥多种探测手段优势^[13,31-33]。激光雷达测量数据与成像传感器数据之间自动精准匹配,以及两者之间精度差异的整体平差策略等,这些都是进一步要研究解决的问题。

4) 快速应用模式。点云数据是地表的离散表达,直接叠加正射影像进行快速三维显示具有比仅采用矢量地图更直观的可视化能力,在此基础上进一步叠加专题信息,可以满足部分应急情况下快速应用需求。这种模式相对于点云三维模型重建具

有更高的效率和灵活性。因此需要关注比如三维游戏引擎一样的技术研发,包括适用于全球点云数据的承载平台、开发环境和工具,以及对标准接口的建设发展。

参 考 文 献

- [1] 李德仁. 从测绘学到地球空间信息智能服务科学[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1207-1212.
Li D R. From geomatics to geospatial intelligent service science[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1207-1212.
- [2] Virtanen J P, Kukko A, Kaartinen H, et al. Nationwide point cloud: the future topographic core data[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(8): 243.
- [3] 李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 58-63.
Li R, Wang C, Su G Z, et al. Development and applications of spaceborne LiDAR[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(14): 58-63.
- [4] 方勇, 曹彬才, 高力, 等. 激光雷达测绘卫星发展及应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20201044.
Fang Y, Cao B C, Gao L, et al. Development and application of lidar mapping satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20201044.
- [5] 朱笑笑, 王成, 习晓环, 等. ICESat-2 星载光子计数激光雷达数据处理与应用研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200259.
Zhu X X, Wang C, Xi X H, et al. Research progress of ICESat-2/ATLAS data processing and applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20200259.
- [6] 何钰. 基于月面 CCD 影像和激光测高数据的月球形貌测绘技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
He Y. Study on lunar topography surveying and mapping based on lunar CCD imagery and laser altimeter data[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012.
- [7] 方勇. 星载 SAR 图像空间信息提取技术研究与实践[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2001.
Fang Y. Research and practice of spaceborne SAR image spatial information extraction technology[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2001.
- [8] 陈国栋, 王鹏, 赵伟. 基于交叉点不符值的 ICESat 冰盖测高精度估计[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35

- (3): 226-230.
- Chen G D, Wang P, Zhao W. Accuracy estimation of ICESat altimetry over ice sheet based on crossover differences[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 35(3): 226-230.
- [9] 胡国军, 方勇, 张丽. 星载激光雷达的发展与测绘应用前景分析[J]. *测绘技术装备*, 2015, 17(2): 34-37.
Hu G J, Fang Y, Zhang L. Development of spaceborne lidar and analysis of surveying and mapping application prospect[J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2015, 17(2): 34-37.
- [10] 陈柏行, 朱庆, 胡翰. 基于 GLAS 激光测高数据的 ZY-3 全球 DEM 精度评估方法[J]. *地理信息世界*, 2019, 26(6): 70-73.
Chen B H, Zhu Q, Hu H. ZY-3 global DEM accuracy evaluation method based on GLAS laser altimetry data[J]. *Geomatics World*, 2019, 26(6): 70-73.
- [11] 魏子卿. 关注 ICESat[M]//《大地测量与地球动力学进展》论文集. 武汉: 湖北省科学技术协会, 2004: 64-67.
Wei Z Q. Pay attention to ICESat[M]//Proceedings on the progress of geodesy and geodynamics. Wuhan: Hubei Association for Science & Technology, 2004.
- [12] 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.
Li G Y, Tang X M, Zhang C Y, 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.
- [13] 王晋, 张勇, 张祖勋, 等. ICESat 激光高程点辅助的天绘一号卫星影像立体区域网平差[J]. *测绘学报*, 2018, 47(3): 359-369.
Wang J, Zhang Y, Zhang Z X, et al. ICESat laser points assisted block adjustment for mapping satellite-1 stereo imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 359-369.
- [14] 张祖勋, 陶鹏杰. 谈大数据时代的“云控制”摄影测量[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1238-1248.
Zhang Z X, Tao P J. An overview on “cloud control” photogrammetry in big data era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1238-1248.
- [15] 唐新明, 谢俊峰, 莫凡, 等. 高分七号卫星双波束激光测高仪在轨几何检校与试验验证[J]. *测绘学报*, 2021, 50(3): 384-395.
Tang X M, Xie J F, Mo F, et al. GF-7 dual-beam laser altimeter on-orbit geometric calibration and test verification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(3): 384-395.
- [16] Leigh H W, Magruder L A, Carabajal C C, et al. Development of onboard digital elevation and relief databases for ICESat-2[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2011-2020.
- [17] 宫鹏, 黄华兵. 激光雷达技术在我国地形测图中应用前景广阔[J]. *地理信息世界*, 2008, 6(6): 45-48.
Gong P, Huang H B. Prospect of the application of LiDAR technology for topographical mapping in China[J]. *Geomatics World*, 2008, 6(6): 45-48.
- [18] 曹彬才, 方勇, 高力, 等. 利用机载点云检核 ICESat-2/ATLAS 激光测高数据精度[J]. *测绘科学技术学报*, 2020, 37(1): 50-55.
Cao B C, Fang Y, Gao L, et al. Verification of ICESat-2/ATLAS laser altimetry data accuracy using airborne point cloud[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37(1): 50-55.
- [19] 李振洪, 李鹏, 丁咚, 等. 全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(12): 1927-1942.
Li Z H, Li P, Ding D, et al. Research progress of global high resolution digital elevation models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1927-1942.
- [20] 单杰, 邓非, 陶鹏杰. 众源影像摄影测量[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Shan J, Deng F, Tao P J. Crowdsourced image photogrammetry[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [21] 胡翰, 丁雨淋, 朱庆, 等. 面向全球 DEM 生产的点云智能滤波与 DEM 泊松编辑方法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(3): 374-383.
Hu H, Ding Y L, Zhu Q, et al. Precision global DEM generation based on adaptive surface filter and Poisson terrain editing[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 374-383.
- [22] 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.
Ma Y. The data processing and error analysis for satellite laser altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [23] 李松, 肖建明, 马跃, 等. 星载激光测高系统的大气折射延迟改正模型研究[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(1): 7-11.
Li S, Xiao J M, Ma Y, et al. Study on atmospheric refraction delay correction for satellite laser altimeter system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1): 7-11.

- [24] 易洪, 李松, 马跃, 等. 基于足印探测的激光测高仪在轨标定[J]. 物理学报, 2017, 66(13): 134206.
Yi H, Li S, Ma Y, et al. On-orbit calibration of satellite laser altimeters based on footprint detection [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(13): 134206.
- [25] 李铭. 基于光纤光学的光子计数激光雷达技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
Li M. Research on technologies of photon counting lidar based on fiber optics[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [26] 郭颖. 光子计数三维成像激光雷达关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
Guo Y. Research on key technologies of photon counting 3D imaging lidar[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [27] 曹彬才, 方勇, 江振治, 等. ICESat-2 ATL08 去噪算法实现及精度评价[J]. 测绘通报, 2020(5): 25-30.
Cao B C, Fang Y, Jiang Z Z, et al. Implementation and accuracy evaluation of ICESat-2 ATL08 denoising algorithms[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5): 25-30.
- [28] Neumann T A, Martino A J, Markus T, et al. The ice, cloud, and land elevation Satellite-2 mission: a global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 233: 111325.
- [29] 高小明, 李国元, 郭金权, 等. 发展三极观测激光测高卫星的探讨[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200233.
Gao X M, Li G Y, Guo J Q, et al. Discussion on the development of laser altimetry satellite for tri-polar regions observation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20200233.
- [30] 李鑫, 廖鹤, 赵美玲, 等. 激光测绘卫星对不同地形地貌探测能力分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(12): 1238-1244.
Li X, Liao H, Zhao M L, et al. Research on LiDAR surveying satellite detection capacity for different terrains[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(12): 1238-1244.
- [31] 杜全叶, 麦晓明, 褚福侠, 等. 基于 ICP 算法的非常规航空影像与机载 LiDAR 数据配准[J]. 遥感信息, 2014, 29(6): 16-20.
Du Q Y, Mai X M, Chu F X, et al. Registration between unconventional aerial images and LiDAR data based on ICP[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(6): 16-20.
- [32] 曹彬才, 方勇, 江振治, 等. ICESat-2 激光卫星与光学遥感影像融合水深测量[J]. 海洋测绘, 2020, 40(5): 21-25.
Cao B C, Fang Y, Jiang Z Z, et al. Water depth measurement from the fusion of ICESat-2 laser satellite and optical remote sensing image[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2020, 40(5): 21-25.
- [33] 和会, 王泽民, 闻洪峰. 利用卫星激光测高数据对星载 SAR 干涉测量 DEM 进行倾斜改正的研究[J]. 遥感信息, 2009, 24(4): 85-88.
He H, Wang Z M, Wen H F. Study on InSAR DEM inclination correction with ICESat satellite altimetry data[J]. Remote Sensing Information, 2009, 24(4): 85-88.