

## 新型多波束陆海激光雷达探测卫星技术发展研究

汪自军<sup>1</sup>, 张 扬<sup>1\*</sup>, 刘 东<sup>2</sup>, 王晓波<sup>1</sup>, 袁金如<sup>1</sup>, 潘 超<sup>3</sup>,  
赵一鸣<sup>3</sup>, 韩晓爽<sup>3</sup>, 周雨迪<sup>2,4</sup>, 刘 群<sup>2,4</sup>, 王 成<sup>5</sup>

- (1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109;
2. 浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;
3. 北京遥测技术研究所, 北京 100094;
4. 浙江大学宁波研究院, 浙江 宁波 315100;
5. 中国科学院空天信息创新研究院 数字地球重点实验室, 北京 100094)

**摘 要:** 从国家未来战略需求出发, 对发展陆海激光雷达需求进行了分析, 介绍了陆海激光雷达的特点和国内外星载激光雷达卫星发展的现状, 提出了未来星载陆海激光雷达卫星的发展方向, 以及在轨预期数据的应用产品, 给出了星载海洋激光雷达关键技术及解决途径, 阐述了“十四五”期间陆海激光雷达的应用前景。

**关键词:** 海洋光学; 星载激光雷达; 海洋遥感; 激光测高; 测绘

**中图分类号:** P412.25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211041

## Research on the development of detection satellite technology in the novel multi-beam land and ocean lidar

Wang Zijun<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1\*</sup>, Liu Dong<sup>2</sup>, Wang Xiaobo<sup>1</sup>, Yuan Jinru<sup>1</sup>, Pan Chao<sup>3</sup>, Zhao Yiming<sup>3</sup>,  
Han Xiaoshuang<sup>3</sup>, Zhou Yudi<sup>2,4</sup>, Liu Qun<sup>2,4</sup>, Wang Cheng<sup>5</sup>

- (1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;
2. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China;
4. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;
5. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Started with needs of the national strategy, the necessity of China's oceanographic lidar developing was analyzed, the characteristics of the oceanographic lidar and domestic and overseas' development of the spaceborne lidar's were summarized, the future spaceborne ocean lidar's development direction was put forward and expected on-orbit data application products was proposed. The key technology and solution of the spaceborne ocean lidar were discussed, the application prospect of developing the marine lidar was given during the 14th five year plan.

**Key words:** ocean optics; spaceborne lidar; ocean remote sensing; laser altimetry; surveying and mapping

收稿日期: 2021-04-05; 修订日期: 2021-06-22

作者简介: 汪自军, 男, 副总研究员, 博士, 主要从事气象环境卫星遥感技术方面的研究。

通讯作者: 张扬, 男, 博士, 主要从事卫星总体激光雷达载荷研制与遥感应用方面的研究工作。

## 0 引言

多波束新型陆海激光雷达探测技术在全球测图、海洋测绘、极地测绘、陆海环境遥感等方面具有重要应用价值,是陆地与海洋测绘、环境探测行业转型升级的重要支撑技术。根据最新的发展,已在全球森林生物量估算、农作物长势监测等方面提供更直接的解决方案,为有效应对气候环境变化提供重要保障。多波束新型陆海激光雷达探测技术,主要用于测量陆地高程、浅海地形、陆-海生物量估算,也可以获取海洋光学参数剖面、海水温度剖面、海洋动力学特征、浅海水深等信息,与被动遥感相结合可以构成地球三维立体观测能力<sup>[1-4]</sup>。

在我国《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015~2025年)》中明确提出要发展多波束激光测量技术,在《卫星测绘“十三五”发展规划》中提出要发展单光子激光测高卫星,并开展卫星指标论证。随着我国“一带一路”建设的不断深入,高精度、快速、高效获取和监测地理、环境信息资源显得越来越重要。在山水林田湖草的全要素管理和监测方面,国产遥感卫星面临更大的挑战和更高的要求:监测要素要从国土资源拓展到自然资源,从平面监测拓展到立体监测;监测范围要从内陆拓展到近海甚至大洋,甚至从陆地拓展到极地;监测精度要从 1 : 50 000 拓展到 1 :

5 000 甚至到 1 : 2 000;特别是测高精度要从米级拓展到厘米级,以及探测海洋 50 m 以上的内部结构,对提高海洋多维信息的获取能力极为重要。由于星载激光遥感在高精度高程测量、全球陆海环境探测方面具有独特的优势,因此,发展能满足陆地、沿海滩涂、潮间带、浅海、海岛礁、海洋环境等高精度综合测量需求的新一代陆海激光卫星探测技术是适应新形势、满足新需求的必然选择<sup>[1,4-9]</sup>。

## 1 陆海激光雷达探测需求分析

### 1.1 基础测绘需求

测绘一般包括基础测绘、详细测绘和精确测绘三类。由于多波束激光测绘卫星的激光特性使得它能够用于精确高程测绘,并辅助其他测绘数据。它是测绘体系中的重要组成部分,可与其他测绘数据进行融合,提高测绘效能<sup>[4]</sup>。

精确测绘相比于基础测绘、详细测绘,在测绘技术指标体系方面对高程提出了更高的要求,如表 1 所示。绘制 1 : 10 000 和 1 : 5 000 比例尺地形图,高程指标参数从 3 m 提高到 1 m。由于激光波长很短,方向性强,频率高,波束发散角小,受外界干扰影响小,激光多波束测绘卫星相对其他测绘手段较易实现地形的精确测绘,平面精度优于 2.5 m,高程精度优于 0.5 m,满足 1 : 5 000 的测图要求<sup>[5-7]</sup>。

表 1 基础测绘、详细测绘、精确测绘对比

Tab.1 Comparison of basic surveying and mapping, detailed surveying and mapping and accurate surveying and mapping

Capability type	Basic surveying and mapping	Detailed mapping	Accurate mapping
Detection range	Global	Key areas	Target area
Uncontrolled ground target location/m	Plane	≤25	≤10/3
	Altitude	≤3	≤1
Ground pixel resolution/m	3-5	≤2	0.6-1/0.3-0.5
Topographic map scale	1 : 50 000	1 : 2.500 00	1 : 10 000/1 : 5 000
DEM grid/m	50/25	25/12.5	10/5 or 2
Gravity field accuracy (resolution)	2/3 mGal (160 km)	2/3 mGal (80 km)	3 mGal (10 km)
Magnetic field accuracy/nT	3-5	2	2
Update cycle of geographic information	Needed	1-3 a	Needed

激光多波束测绘卫星能形成 1 : 50 000 以上,甚至全球高精度高程控制点,并与侦察卫星图像数据融合,使其图像定位精度可产生质的飞跃,可大幅提升我国在轨数十颗光学卫星、SAR 卫星的平面定位精

度和高程精度,从而增强侦察卫星测绘能力,从体系规划上实现侦测一体<sup>[4-9]</sup>。

### 1.2 应急测绘需求

地球的表面是动态,地表拥有水文的、生物的进

程,上升、侵蚀和沉积作为调节是相互影响的。表面地形影响气流、沉降模式以及控制水和泥流分布。结果,地形控制泥流深度、泥流水分和植被空间模式。而且,它影响自然灾害的分布,如山崩、洪水和地震。通过分析高分辨率地形数据可理解哪一个地壳力释放改变了地球表面和地质构造。时间序列的高精度地形数据可用来观察地球表面通过山崩、洪水、侵蚀、大地震、海啸的重构<sup>[7-9]</sup>。直到最近,粗糙的地形测绘分辨率是理解改变地球表面的力和动态过程的一个主要的障碍。

依赖精确的地形数据可预测山体滑坡、洪水、海啸迅速增大、火山碎屑流和泥石流发生的时间和地点。利用全球目前测绘 30~90 m 分辨率, 10 m 垂直精度的有效地形数据对这些预测是不够的。全球高分辨率地形数据也将推进这些风险评估的科学性。精确的地形测量将有助于发现活动的断层(包括隐伏断层),因此有利于更好地评估地震灾害。时间序列的高精度地形数据将有助于测量世界范围内的地表土层流失,有助于判定大地震的滑动区域。激光多波束测绘也将产生全球森林的林段结构数据,因此将提升火灾风险评估达到一个空前的水平<sup>[4-9]</sup>。

### 1.3 近海浅海地形探测需求

近海浅海地形探测主要由两部分组成:沿岸地形测量和水深测量。海岸地形包括海岸线以上陆地地形、潮间带滩涂地形和浅海水下地形三部分<sup>[6-7]</sup>。当前近海岸水深及浅海地形测量主要采用三种模式,海岸线以上部分以地形图转绘为主,海岸线至零米线(潮间带)区域采用人工实地测量与船载水深测量相结合的测量模式,零米线以下(浅海)区域采用单波束或多波束水深测量技术。近年来,机载激光测深技术发展很快,有效弥补了以舰船为平台的传统声学测量方法在浅海作业存在的缺陷,国内在应用刚刚起步,但对境外区域无能为力<sup>[8-9]</sup>。

当前近海岸水深及浅海地形测量所采用的技术手段特点及存在的问题是:(1)人工实地测量作业方式劳动强度大,作业效率低,条件艰苦,环境危险;(2)目前采用的技术手段只适用于境内海岸带和测量人员可到达区域的测绘,对于境外乃至全球或境内测量人员无法到达的区域无法施测;(3)干出滩测量以半潮线为界,分别采用人工实地测量和船载声纳水深测量,然后将两种测量成果拼接。特殊的地理环境造

成两种作业方式均受到严重制约,无法发挥其技术特点,使滩涂测量成为海洋测绘作业难度最大、技术能力最薄弱的环节,形成技术瓶颈;(4)受海潮作用和人为开发建设,沿岸地形动态变化,影响海图的现势性要求,受制于数据源匮乏、高精度测量技术手段有限,对境外海图编绘存在数据盲区,海图要素特别是高程信息的标注极为困难,使得在海洋生态环境监测、资源考察等过程中船舶航行航路规划受到制约<sup>[6-9]</sup>。

### 1.4 海洋次表层剖面探测需求

蓝绿波段激光可穿透海洋次表层水体,利用激光遥感技术可以获取海洋光学参数剖面、海水温度剖面、浅海水深等信息,是目前星载遥感实现海洋次表层剖面探测的唯一手段,与被动遥感相结合可以构成地球三维立体观测能力。星载激光雷达也可对上混合层叶绿素、悬移质等要素进行探测,能在三维空间尺度上监测浮游植物,并提供一种亚-中尺度生物-物理耦合进行系统观察的方法,这对全球碳循环以及上层海洋动力过程的理解具有重要意义,增强对海洋信息的获取能力<sup>[1, 10-12]</sup>。

## 2 星载测绘激光雷达发展

### 2.1 国外现状

目前国外在轨或已发射的部分搭载了激光雷达/激光测高计的搭载平台和相应激光雷达/激光测高计的有:LITE、MGS 卫星、ICESat-1 卫星、MESSENGER、LRO 卫星等,对地测绘的激光雷达卫星主要有 ICESat 系列等。

#### 2.1.1 ICESat-1

冰川、云层及陆地高程卫星 ICESat-1(如图 1 所示)于 2003 年 1 月 13 日在加利福尼亚州的范登堡空军基地由德尔塔 II7320 运载火箭发射,它是属于地球观测系统(EOS)计划中的。ICESat-1 卫星的主要任务是测量极地的冰盖总量,研究冰盖总量对海平面变化的影响;测量云和气溶胶的分布和垂直结构,其中云参数的观测包括多层云的高度、云顶和云底的高度、散射截面的垂直廓线和薄云的光学厚度。气溶胶的观测包括气溶胶检测、霾层的高度、消光截面的廓线及气溶胶光学厚度等;测量冰面(如格陵兰和南极冰层)、陆地地形和植被的冠盖高度,了解表面粗糙度、反射率、植被高度和冰雪面的特征<sup>[1]</sup>。

作为全球首颗对地观测激光雷达卫星,ICESat 取

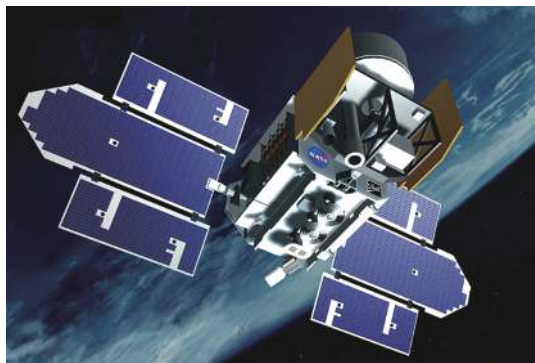


图 1 ICESat-1 卫星图

Fig.1 ICESat-1 satellite image

得了很多开创性的成果。采用单波束激光获取了全球(南北纬 86°范围内)的高程分布曲线图。提供了统一基准高程数据集,具有目前世界上最高的高程测量精度,经过严密的地面控制点筛选,高程精度优于 0.1 m、水平精度优于 10 m。但是由于其载荷 GLAS 采用“单波束无扫描”的工作方式,每个激光脉冲仅能获得一个脚点的距离信息,只能通过卫星位置及姿态调整来获得覆盖一定面积的高程数据,因此作业效率非常低<sup>[13-14]</sup>。另外,ICESat 自发射以来,激光器的寿命与可靠性影响了 GLAS 系统的使用。第一台激光器只工作了 37 天便失效,第二台激光器由于能量急剧衰减的问题,将每月一次的探测模式调整为每年两次,2009 年 10 月第三台激光器停止工作。为此美国专门建立了长寿命激光器的测试站,在改进激光器设计后进行了相关试验验证,地面激光器样机寿命延长到了几十亿次<sup>[13-14]</sup>。

### 2.1.2 ICESat-2

按照“十年观测 (Decadal Survey)”项目要求,ICESat-2 作为 ICESat-1 的继任者,于 2018 年发射,搭载了先进地形激光测高系统 (ATLAS),其目标是为两极冰层变化分析提供更高精度的地形数据。不仅要为多学科应用提供支持,而且将为各学科的发展提供保障。在极地冰雪环境遥感测量方面的主要科学目标仍然是:(1)冰盖变化;(2)海冰厚度。对于冰盖变化,ICESat-2 将通过高程观测,为控制冰盖物质平衡提供重要的且独一无二的视角<sup>[1]</sup>。这些观测将有力地支持未来几十年南北极冰盖对海平面变化贡献及其与气候状况的关系模型的研究。ICESat-2 将提供一个近似三维的观测,解析其中的自然和干扰变化,在模型中引入了海洋学和大气科学观测数据,这些观测对科学理解控制海冰变化机制、提高气候预测能力具有重要意义。增强了对坡度、断裂、地表植被垂直结构、碳含量、生物数量的探测,可大幅提高探测精度和分辨率<sup>[12-14]</sup>。

### 2.1.3 GEDI

美国于 2018 年发射全球生态系统动力学探测激光雷达 (GEDI) 到国际空间站,GEDI 搭载了全球首台用于高分辨率森林垂直结构与地形测量的多波束线性体制的激光测高仪,主要用于热带和温带地区的森林冠层高度、垂直结构、地面高程等的精准测量,如图 2 所示<sup>[2-3]</sup>。

GEDI 量化了地球植被中的生物量,从而量化了植被中的碳储量,并估算了土地利用和气候变化产生

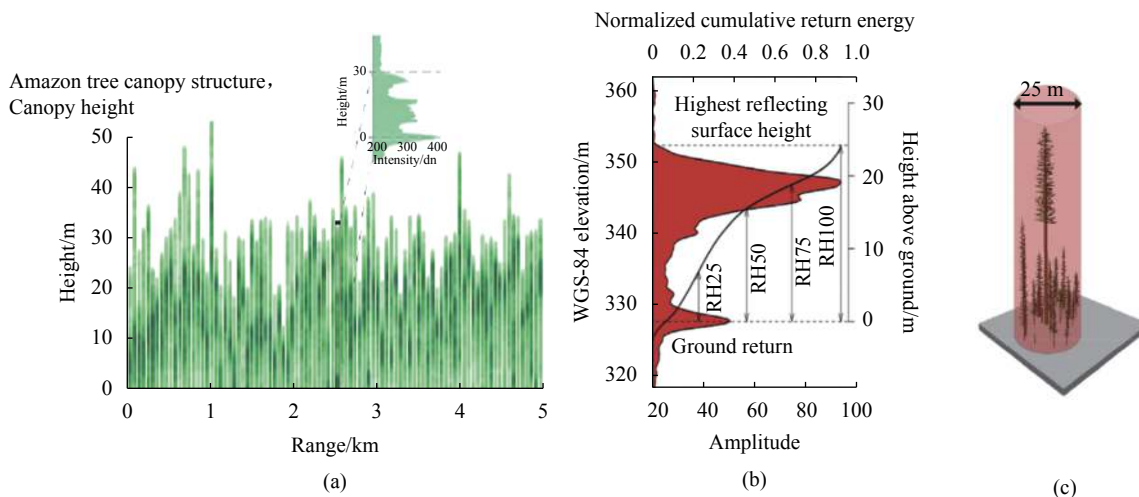


图 2 GEDI 获得植被垂直分布<sup>[2-3]</sup>

Fig.2 Vertical distribution of vegetation obtained by GEDI<sup>[2-3]</sup>

的碳通量。由此,可以计算在未来气候和土地利用情景下森林的碳汇潜力。通过利用 GEDI 提供的植被垂直结构信息,可以表征大量生物的栖息地质量。如此一来,GEDI 不仅可以解决有关植被碳汇估算的问题,还可以通过垂直结构测量指导改善栖息地质量,最终实现生物多样性的保护。

GEDI 包含 3 个相同的近红外掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG) 激光器,以 242 Hz 脉冲重频率,10 mJ 的能

量,向地面发射波长 1064 nm 的短脉冲激光 (14 ns)。发射激光的光束发散角为 56 mrad,其中两个激光器为全功率,1 个激光器被分成两个光束,共产生 4 个光束。光束偏转单元 (BDUs) 通过改变 1.5 mrad 的激光束指向,实现激光光斑在地面上快速移动 600 m,最终产生 8 个地面轨迹。GEDI 大光斑激光轨迹总幅宽 4.2 km,沿轨间距 60 m,垂轨间距 600 m,光斑平均大小为 25 m,如图 3 所示<sup>[2-3]</sup>。

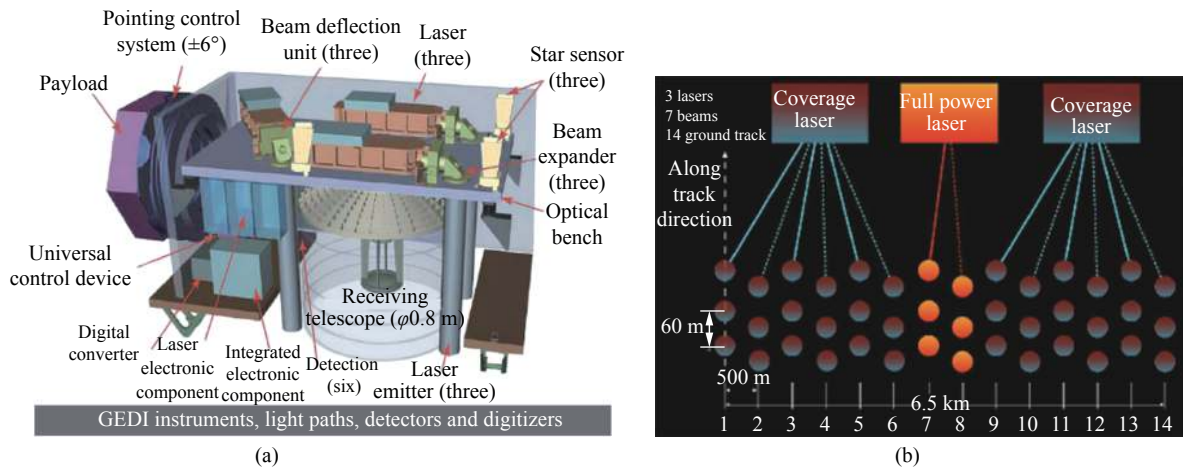


图 3 GEDI 激光器及地面探测光斑分布<sup>[2-3]</sup>

Fig.3 GEDI laser and spot distribution of ground detection<sup>[2-3]</sup>

GEDI 激光经地面、植被和云层反射,被其望远镜接收。在激光光子被导向检测器后,将光亮转换为电压,并以 1 ns 间隔记录为时间函数。然后再将其乘以光速转换为距离函数。在 GEDI 模拟激光雷达波形及其光斑对应区域树的分布图中,图左为 GEDI 激光雷达模拟波形,浅棕色部分表示冠层返回能量,深褐色部分表示地形返回能量,黑线是累积返回能量,从地面到冠层,依次标准化为 0~1。其中,相对高度 (RH) 表示相对于地面达到某个百分位数返回能量的高度。图右为图左波形对应的植被结构分布。结合 GPS 定位信息与星敏感器姿态信息,可以计算得出 GEDI 波形对应地面位置,水平精度为 9 m。从 GEDI 波形中,可以提取出四种类型结构信息:地貌、冠层高度、冠层覆盖面积和垂直结构。经过优化,GEDI 可进行全球热带和温带的森林垂直结构测量。其足印大小设计比较合理,既可以测量整棵树,同时也可以

## 2.2 国内研究现状

我国对地观测激光雷达经过多年发展,目前已成

功发射了 3 颗卫星,分别为:2016 年资源三号 02 星、2019 年高分七号 (GF-7),以及 2020 年 7 月发射资源三号 03 星。这 3 颗卫星都搭载了对地观测激光测高载荷,用于承担星下高程控制点的测距任务,辅助光学立体测绘相机,提高光学卫星影像无控立体测绘精度。

### 2.2.1 资源三号 02 星

2016 年 5 月 30 日 11 时 17 分于太原卫星发射中心,长征四号乙运载火箭成功将资源三号 02 星发射升空。资源三号 02 星是资源三号系列卫星的第 2 颗,该星质量为 2650 kg,设计寿命为 5 a。资源三号 02 星是 1 颗高分辨率立体测图业务卫星,它是在资源三号 01 星的基础之上优化而成的,搭载 3 台三线阵测绘相机、1 台多光谱相机和 1 台激光测距仪等有效载荷,前后视相机分辨率由 3.5 m 提高到优于 2.7 m,并拥有更优异影像融合能力、更高图像高程测量精度。资源三号 02 星是“国家民用空间基础设施中长期发展规划 (2015~2025 年)”确定发射的首颗业务卫星。资源三号卫星项目共规划了 4 颗卫星。2014~2020 年,双星进行在轨组网工作,立体影像分辨率将

达到 2.5 m, 为更新的 1:50 000 全球基础地理信息提供高精度、长期、稳定、连续的数据源, 可实现重点城

市地理信息 3 个月更新 1 次, 全国 1 年更新 1 次的任务要求<sup>[16-17]</sup>。资源三号 02 星立体测绘影像如图 4 所示。

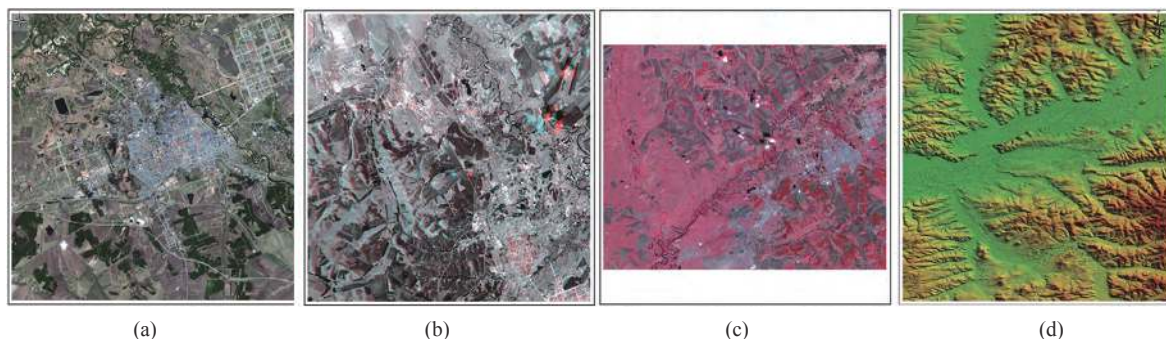


图 4 资源三号 02 星立体测绘影像。(a) 纠正的影像; (b) 立体影像; (c) 多光谱传感器校正后的影像; (d) 影像数字表面模型<sup>[16-17]</sup>

Fig.4 Stereo mapping image of ZY-3-02 satellite. (a) Corrected image; (b) Stereo image; (c) Corrected image with multi-spectrum sensors; (d) Digital surface model of image<sup>[16-17]</sup>

资源三号 02 星发射后, 将与 2012 年发射的资源三号 01 星共同在轨运行, 实现了 2 颗资源三号测绘卫星组网运行, 可使同一地点的重访周期由 5 d 缩短至 3 d 之内, 全球覆盖的周期缩短一半, 与 01 星形成有效互补, 具备连续、稳定、快速获取高分辨率立体影像和多光谱数据的能力。激光测高仪用于开展地表高程信息获取试验。星载激光测高仪作为一种精确的主动式测距载荷, 其获取的高精度地表高程信息可与光学立体影像联合实现复合测绘<sup>[16-17]</sup>。

### 2.2.2 高分七号

2019 年 11 月 3 日, “高分七号”卫星在太原卫星发射中心顺利发射入轨, 高分七号卫星运行于太阳同步轨道, 平均轨道高度 505 km, 卫星质量不大于 2800 kg。有效载荷包括双线阵立体测绘相机、双波束激光测高仪、数据传输、数传天线等 4 个分系统。其中, 相机能够获取 5 谱段高空间分辨率立体测绘遥感数据, 地面像元分辨率优于 0.8 m, 幅宽优于 20 km; 测高仪可向目标地物发射高能量密度的激光脉冲波束, 并接收由地物返回的激光回波, 从而获取地物的高程信息卫星设计寿命为 8 a<sup>[1, 18]</sup>。

高分七号卫星采用激光和测绘相机复合测绘新体制, 也是民用测图精度最高的卫星, 卫星不仅能获取平面影像, 还可形成立体像, 在激光测高数据的支持下, 实现我国民用 1:10 000 比例尺高精度卫星的立体测图, 满足测绘、住建、统计、交通等用户在基础测绘、全球地理信息保障、城乡建设监测评价、农业

调查统计等方面对高精度立体测绘数据的迫切需求<sup>[18]</sup>。图 5 为来自国家国防科技工业局重大专项工程中心的测绘影像图。

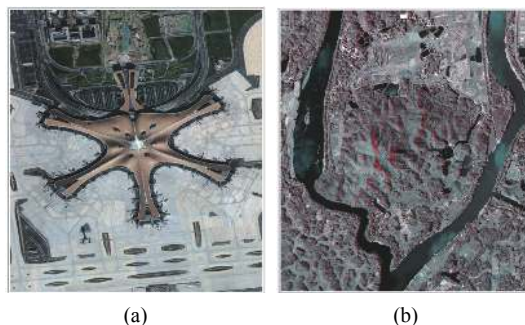


图 5 高分七号立体测绘影像。(a) 彩色融合正射影像; (b) 立体影像  
Fig.5 Gaofen-7 stereo mapping image. (a) Color fusion orthophoto; (b) Stereo image

目前, 卫星处于在轨测试阶段, 从初步测试结果来看, 平面精度可优于 5 m, 高程精度有望达到 1.5 m, 能够高效绘制地面 1:10 000 地形模型。我国低轨遥感卫星分辨率由高分专项实施前最高 2.1 m 提高到 0.65 m, 静止轨道遥感卫星分辨率由千米级提高到 50 m, 低轨遥感卫星设计寿命由 3 a 大幅提高到 8 a, 已基本形成涵盖不同空间分辨率、覆盖宽度、谱段、重访周期的高分数据体系, 与其他卫星遥感数据相配合, 为高分遥感应用奠定了坚实基础, 极大提高了我国天基对地观测水平<sup>[1, 18]</sup>。

### 2.2.3 资源三号 03 星

2020 年 7 月资源三号 03 星发射成功, 是我国空

间基础设施“十三五”规划的卫星任务之一,与目前在轨的资源三号 01 星、02 星共同组成了我国立体测绘卫星星座。该星主要用于获取高分辨立体影像和多光谱数据,为地理国情监测、国土资源调查、防灾减灾、农业水利、城市规划建设等领域提供应用服务。资源三号 03 星在资源三号 02 星技术状态的基础上进行了继承和适当优化。星上搭载了三线阵立体测绘相机、多光谱相机、激光测高仪等有效载荷,正视全色相机分辨率为 2.1 m,前后视相机分辨率优于 2.7 m,多光谱相机分辨率优于 6 m。前后视相机的基高比为 0.89,立体影像重叠度优于 90%;卫星影像有效覆盖宽度大于 50 km;激光测高仪单点测高精度预计优于 1 m,点间隔约 3.6 km。设计寿命由资源三号 02 星的 5 a 延长至 8 a。

### 2.3 发展趋势

综上所述,国内外激光雷达卫星的技术发展趋势可归纳为:(1)发射方式由单波束发展为多波束(几十到上千波束)、多波长;(2)接收幅宽增大,由单点单波束向大幅宽多波束发展;(3)激光重复频率不断提高,单脉冲能量下降,总功耗能量提高;(4)有效接收口径不断增大;(5)接收由模拟探测发展为模拟与单光子复合探测。

## 3 关键技术分析

目前,上海航天技术研究院联合北京遥测技术研究所和浙江大学正在积极论证新型陆海激光探测卫

星,对卫星的技术指标和关键技术进行了初步梳理。认为轨道采用低倾角的太阳同步轨道设计,有效载荷为海洋探测激光雷达,配备被动光学或微波载荷;星载激光雷达具备单脉冲大能量探测与高频同时输出,其中单脉冲大能量激光采用全固态激光器技术,单脉冲能量百毫焦量级,由衍射光学单元(DOE)进行分光多波束(几波束)发射;高频激光采用光纤激光器技术,由光纤阵列实现多波束分光(百波束以上)发射。接收口径 1.5 m 以上,采用偏振与光致荧光检测技术,后向散射信号采用模拟与单光子探测。在轨预期可获取地面高程、陆地生物量、滩涂与潮间带、浅海地形、以及海洋次表层光学剖面信息<sup>[1,3-10]</sup>。

### 3.1 载荷技术

#### 3.1.1 新型星载高功率海洋激光技术

激光器是激光雷达探测的核心部件,直接制约了载荷的性能以及寿命。目前,532 nm 探测波段主要受到激光器成熟度的影响,并非海洋探测的最佳波段,亟需发展 460~505 nm 之间的新型高功率、长寿命空间激光器。由中国科学院上海光学精密机械研究所陈卫标团队在国际上率先提出:使用单频种子激光器+光纤放大器+块状功率放大器+腔外倍频+腔外和频+光参量振荡器的 MOPA 空间激光器技术方案,可实现新型空间高功率 486 nm 单频激光高功率输出,进一步提升海洋穿透能力<sup>[1,10,19-20]</sup>。图 6 示出新型星载高功率激光器技术路线。

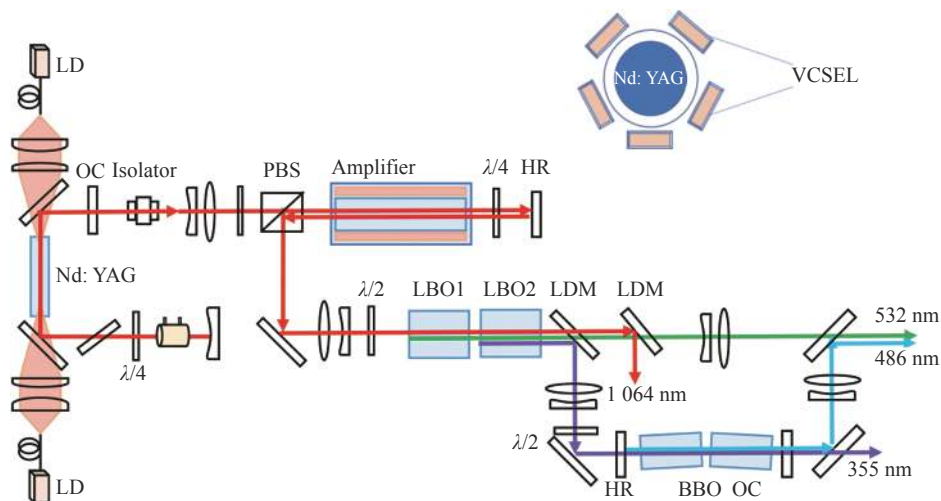


图 6 新型星载高功率激光器技术路线<sup>[19]</sup>

Fig.6 Technology route of new type spaceborne high power laser<sup>[19]</sup>

### 3.1.2 长寿命、多波束、高重频激光技术

为满足高精度、远距离、多波束、多波长的探测需求,激光器需要大功率、多波长、高光束质量的窄脉冲激光输出。星载激光器的寿命、功率、线宽、光束质量等参数相互制约,影响着星载激光雷达的整体性能,受空间环境的条件限制,星载激光雷达的激光器必须确保长期稳定工作。因此,该项目的激光光源需同时满足复杂的空间环境变化,在轨长期稳定工作,高精度、远距离、多波束、多波长探测是需要攻关的技术难点之一,也是确保成功的关键。

高重频多波束单频激光技术研制难点主要集中在高稳定单频光纤种子、多波束大能量光纤激光放大和近光纤化结构这三方面,拟采用低噪声窄线宽单频光纤激光技术,在现有单频半导体种子源基础上,设

计 DBR 结构线型谐振腔,采用高质量的高掺杂浓度石英光纤提高单位长度增益,采用光纤低损耗熔接技术降低整体腔内损耗,实现短腔单频激光输出,具有结构稳定、可靠性强的特点。

### 3.1.3 模拟与光子计数复合探测技术

针对陆地、海洋多要素探测的应用需求,在卫星轨道,激光经过远距离的大气衰减和海水散射,需要系统具备较高的探测灵敏度;同时,由于目标散射特性变化,对探测回波信号的动态范围也提出了很高的要求。因此,面对多种探测要素,拟采用空间大动态单光子模拟一体化多通道探测技术。

大气、海洋探测要素特征及对载荷的要求如图 7 所示。

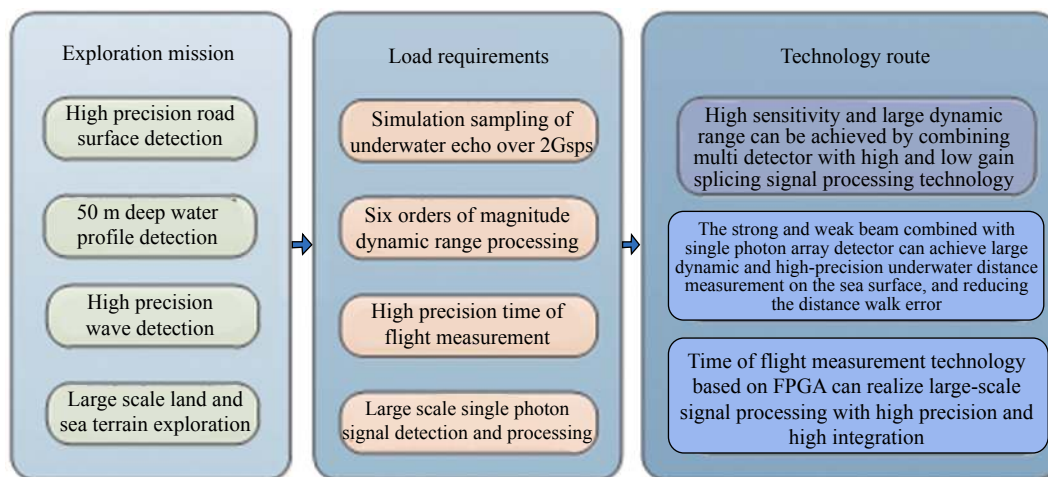


图 7 模拟与光子计数复合探测技术路线

Fig.7 Technology route of simulation and photon counting combined detection

为实现陆海回波大动态、高精度测量,同时满足大幅宽大动态范围的单光子探测,拟采用的技术路线如下:

(1) 单光子阵列探测器降低死时间,提高探测效率和探测精度;

(2) 通过区分强弱波束的单光子探测通道,采用 2×2 的单光子探测器探测弱波束回波单光子,采用 4×4 单光子阵列探测器实现对强回波单光子探测,提高测距精度,同时降低距离游走误差;

(3) 通过基于 FPGA 的高精度的单光子飞行时间测量技术实现对大规模回波的高效率、高精度飞行时间测量;

(4) 模拟多通道探测器实现高灵敏度、大动态范围的模拟陆海回波探测,通过电子学增益拼接技术,划分高低增益通道实现海洋剖面回波采样。

重点研究多元阵列探测器对提高系统探测精度、动态范围扩展方面的效果,并开展多要素一体化探测系统的设计,突破空间高灵敏度大动态单光子模拟一体化探测技术,以满足陆海探测的应用要求。

## 3.2 数据处理技术

### 3.2.1 潮间带识别

潮间带作为海陆相互作用的重要地带,资源丰富,受人类活动影响明显,是开发利用与科学研究的重要地带。因此,海洋环境保护、科学研究、防灾减



灾、资源开发与利用迫切需要准确获取潮间带的范围。但由于其特殊性,特别是缺乏高精度的地形数据,使得大范围潮间带识别存在诸多挑战。利用不同模态星载激光雷达同时获取高精度的陆地 DEM 和海底地形,进而实现大范围潮间带的精准识别<sup>[21]</sup>,其具体技术流程图如图 8 所示。

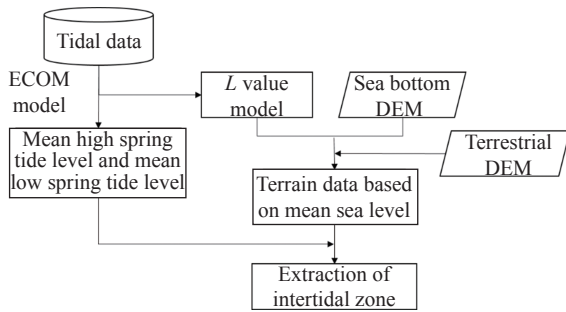


图 8 潮间带提取技术路线

Fig.8 Technical route of intertidal zone extraction

根据潮汐数据计算获取平均大潮高潮位与平均大潮低潮位,并构建数值模型;其次,利用数值模型,将基于理论深度基准面的海底地形数据转换至平均

海平面;再次,将海底地形数据与陆地地形数据进行融合;最后,提取出潮间带范围。将垂直基准统一后的海洋 DEM 数据与陆地 DEM 数据进行融合,获取海陆融合 DEM。由 ECOM 模式获取了平均大潮高潮位与平均大潮低潮位的网格数据,将海陆融合 DEM 数据与平均大潮高潮位和平均大潮低潮位比较,分别获得 DEM 与潮位数据的相交线,即为平均大潮高潮线与平均大潮低潮线,处于二者之间的范围即为潮间带<sup>[21-22]</sup>。

### 3.2.2 海洋剖面探测技术

蓝绿激光海洋垂直结构处理基于激光雷达预处理后的数据产品,采用数据网格化与退卷积技术,解决大气、海面、海水、海底等垂直结构层次之间的相互干扰,如水体多次散射等问题,反演大气、海面、海水、海底等结构层次的物理光学特性,主要包括海面高程与浪高、海底深度与底质分类,海水层次位置、分类与生物光学特性<sup>[1, 10-12, 20]</sup>。图 9 给出了激光遥感海洋光学剖面数据处理技术路线。

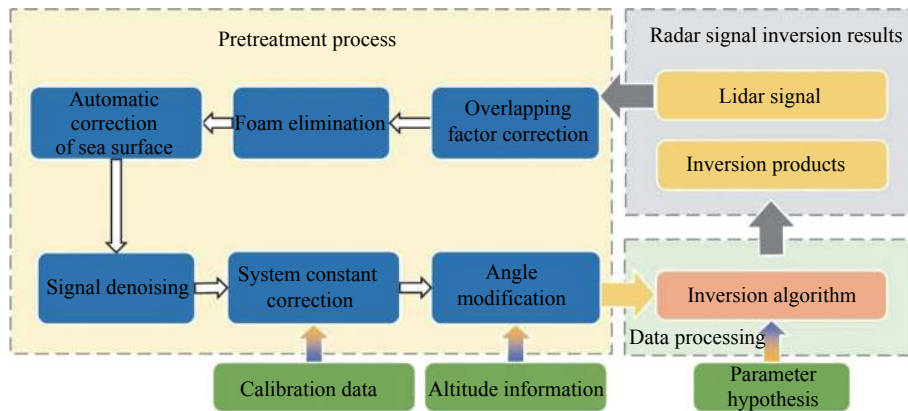


图 9 激光遥感海洋光学剖面数据处理技术路线

Fig.9 Technical route of data processing of ocean optical profile by laser remote sensing

### 3.2.3 森林植被参数反演技术

结合星载 LiDAR 模拟探测波形和光子计数数据的特点,根据表征森林冠层结构的特征参数探索星载 LiDAR 特征参数与森林冠层高度、间隙率、覆盖度、叶面积指数、生物量等森林植被参数之间的定量关系,建立兼顾传感器特性与地形因子影响的森林植被参数反演模型<sup>[2-3]</sup>;研究森林植被参数的不确定性

评价方法,评估星载 LiDAR 数据定位误差、信噪比、森林类型、地形、郁闭度等因素对森林植被参数反演精度的影响;利用主被动遥感协同分别构建不同生态地理分区和森林类型对应的森林植被外推模型,实现大范围高精度森林植被参数制图。总体流程图如图 10 所示<sup>[21-22]</sup>。

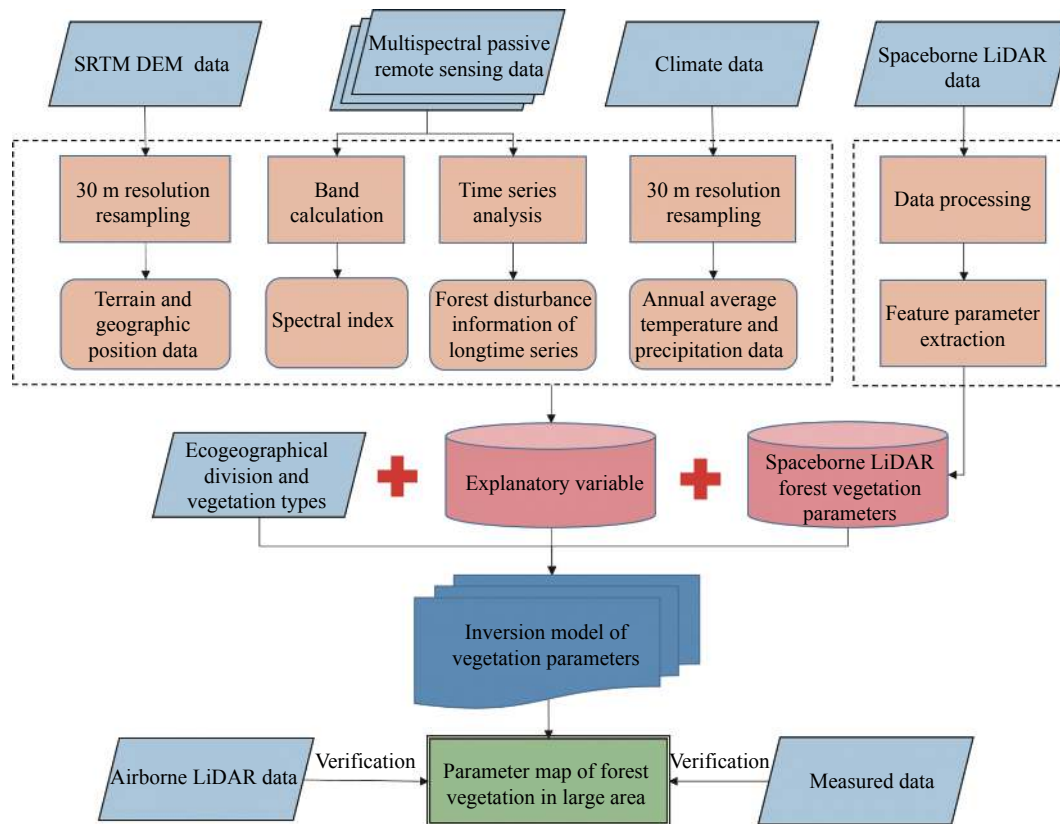


图 10 激光遥感陆地森林植被数据处理技术路线

Fig.10 Technical route of land forest vegetation data processing based on laser remote sensing

#### 4 结束语

陆海激光雷达探测技术是实现陆地测绘与生物量监测,以及海洋潮间带、浅海地形、次表层剖面探测的可行的、有效的手段,是星载多波束激光雷达卫星遥感技术的方向,将在陆地观测、海洋探测领域发挥重要作用。

通过若干年的共同努力研究,在充分继承我国激光遥感卫星及雷达技术良好的技术基础上,可以在“十四五”期间完成陆海激光雷达探测卫星的研制和应用,填补我国及国际的海洋激光遥感空白,极大地推进国家“一带一路”战略的建设。

#### 参考文献:

[1] Zhang Yang, Huang Weidong, Dong Changzhe, et al. Research on the development of the detection satellite technology in oceanographic lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20201045. (in Chinese)

[2] Ralph Dubayah, James Bryan Blair, Scott Goetz, et al. The

global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the earth's forests and topography [J]. *Science of Remote Sensing*, 2020, 1: 100002.

[3] Peter Potapov, Xinyuan Li, Andres Hernandez-Serna, et al. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and landsat data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253: 112165.

[4] Tan Xinming, Li Guoyuan. Thoughts about land and sea satellite laser altimetry [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(3): 15-19. (in Chinese)

[5] Quan Xuefeng, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Application and prospect of satellite laser altimetry data in polar region [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(10): 19-24. (in Chinese)

[6] Tang Xinming, Cong Nan. Present situation and development of surveying and mapping satellites in China [J]. *Space International*, 2011(2): 40-44. (in Chinese)

[7] Tang Xinming, Xie Junfeng, Zhang Guo. Development and status of mapping satellite technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 17-24. (in Chinese)

[8] Tang Xinming, Gao Xiaoming. The twelfth five-year

- development strategy research of mapping satellite and satellite surveying of China [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012, 10: 1-4. (in Chinese)
- [9] Li Manchun, Liu Yaolin, Tang Xinming, et al. Discussion on remote sensing monitoring for typical elements of physical geographic national condition [J]. *Geomatics World*, 2015, 22(5): 8-13. (in Chinese)
- [10] He Yan, Hu Shanjiang, Chen Weibiao, et al. Research progress of domestic airborne dual-frequency LiDAR detection technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082801. (in Chinese)
- [11] Hu Shanjiang, He Yan, Chen Weibiao, et al. Design of airborne dual-frequency laser radar systemy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0930001. (in Chinese)
- [12] Xu Peituo, Tao Yuting, Liu Zhipeng, et al. Comparison of oceanic lidar experiments and simulation results [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203007. (in Chinese)
- [13] Quan Xuefeng, Tang Xinming, Gao Xiaoming, et al. Application and prospect of satellite laser altimetry data in polar region [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 42(10): 15-20. (in Chinese)
- [14] Hu Liuru, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Quality assessment and accuracy optimization of DSM using GLAS laser altimetry data [J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 11(11): 39-43. (in Chinese)
- [15] Xie Dongping, Li Guoyuan, Tang Xinming. U.S. GEDI space-based laser altimetry system and its application [J]. *Space International*, 2018, 12: 40-44. (in Chinese)
- [16] Li Guoyuan, Tang Xinming. Analysis and validation of ZY-3 02 satellite laser altimetry data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 46(12): 1939-1949. (in Chinese)
- [17] 唐新明, 常晓涛, 李国元. 实现“一星多用”, 保障地理信息安全—资源三号测绘卫星影像应用综述[J]. *卫星应用*, 2014(6): 15-20.
- [18] 晓曲. 高分七号卫星[J]. *卫星应用*, 2019(11): 78.
- [19] Li Kaipeng, He Yan, Ma Jian, et al. A dual-wavelength ocean lidar for vertical profiling of oceanic backscatter and attenuation [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 1-20.
- [20] Chen Shuguo, Xue Cheng, Zhang Tinglu, et al. Analysis of the optimal wavelength for oceanographic lidar at the global scale based on the inherent optical properties of water [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 2705.
- [21] Li Hongpeng, Li Guoyuan, Cai Zhijian, et al. Full-waveform LiDAR echo decomposition method Journal of Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 89-98. (in Chinese)
- [22] Quan Xuefeng, Tang Xinming, Li Guoyuan, et al. Land cover classification application of satellite laser altimetry data: A case study in Beijing, China [J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(6): 6-11. (in Chinese)