

## 二、项目简介

### 项目简介（限1000字）

卫星激光测高作为一种新型对地观测技术，在测绘、林业、水利等领域具有广泛的应用价值。国外先后发射了ICESat/GLAS、ICESat2/ATLAS以及GEDI等激光测高系统。我国的资源三号02星、高分七号分别于2016年5月和2019年11月成功发射，陆地生态系统碳监测卫星也将于2021年发射。但国内因起步较晚，卫星激光测高数据处理并没有形成完整的理论体系，也尚无产品分级及应用标准，对后续国产激光测高卫星的应用与发展形成制约。

项目围绕卫星激光测高数据处理理论体系构建，研究了严密几何模型构建、大气散射延迟改正、波形精细化模拟仿真、产品分级和质量控制等关键技术，研发了卫星激光测高数据处理相关软件、制定了相关标准，开展了资源三号02星激光数据处理等具体实践，取得了如下创新成果：1)国内首次构建了卫星激光测高严密几何模型，系统研究了卫星轨道姿态参数、激光指向角及测距值、光行差、大气及潮汐等各类误差源；2)首次提出了基于指数函数模型的大气散射改正算法，填补了国内在该领域的研究空白，进一步提高了卫星激光测高数据的精度和可利用率；3)提出了顾及发射波形、地表反射率、光斑形状的精细化模拟仿真方法，实现了高分七号卫星在轨波形数据的有效模拟；改进了基于回波波形数据的树高估测模型，为陆地生态系统碳监测卫星应用指标论证提供了支撑；4)系统研究了卫星激光测高产品分级和质量控制体系标准化，构建了卫星激光测高产品从波形数据质量、环境影响因子、光斑影像质量等方面的具体评价指标和定量计算方法。

项目出版专著2部，论文56篇、其中SCI/EI论文26篇，申请专利6项(已授权3项)，软件著作权7项，研制标准2项；获得顶尖期刊论文领跑者F5000、全国激光雷达大会优秀论文奖等多个奖励，构建了覆盖全国面积大于1km<sup>2</sup>的大型湖泊水位激光数据集。成果在资源三号02卫星应用系统中得到具体应用，在全球地理信息资源建设、青海大型湖泊水位变化监测、东北长白山森林参数反演等方面得到推广应用。

总体而言，项目成果首次形成了涵盖几何定位模型、误差分析、模拟仿真、大气改正、潮汐改正、高程控制点提取以及湖泊水位和林业树高测量的卫星激光测高数据处理理论体系，部分成果属于首创，具有重要的科学引领价值。项目在测绘、林业、水利等领域开展的应用实践，能为后续激光测高卫星的立项论证及行业规模化应用提供重要参考。

### 三、科技创新

#### 科技创新（限5000字）

##### 1、立项背景

卫星激光测高在高精度控制点获取、林业树高和生物量估算、极地冰盖和海冰厚度测量、大型湖库水位测量、云高测量等方面具有实际应用价值。带有激光测高仪的资源三号02星、高分七号卫星已成功发射，计划发射的陆地生态系统碳监测卫星和资源三号03星都将配备激光测高载荷。但本项目立项前，国内尚无对地观测卫星激光测高数据处理完整的理论体系，特别是在严密几何模型构建、大气散射改正、波形精细化模拟仿真方面还存在薄弱环节甚至空白，产品分级及应用也没有相关标准，对卫星激光测高数据高精度处理与规模化应用形成制约。此外，国内激光测高仪特性与国外相比还有一定的区别，如何针对国产卫星激光测高仪的特点，结合应用需求开展数据处理理论研究非常必要，也是未来大规模业务化应用的重要基础和前提。

项目围绕对地观测新技术卫星激光测高数据处理理论体系构建，研究了卫星激光测高严密几何模型构建、大气散射延迟改正、大光斑全波形精细化模拟仿真、产品分级和质量控制体系构建等关键技术，研发了卫星激光测高数据处理相关软件、制定了相关标准，开展了资源三号02星激光数据处理等具体实践，显著提高了我国在卫星激光测高领域的理论和数据处理水平。

##### 2、科技含量

创新点一：国内首次构建了卫星激光测高严密几何模型，系统化研究了卫星轨道姿态参数、激光指向角及测距值、光行差、大气及潮汐等各类误差源。发表的严密几何模型论文成果入选顶尖期刊论文领跑者F5000。

旁证材料：① 鉴定验收意见（2份，见附件1、附件8）；② 软件著作权登记证（1项，见附件2）；③ 知识产权证明（专利1份，见附件13）；④ 论文（5篇，见附件18）；⑤ 专著（1部，见附件16）；

作为测量精度要求亚米级甚至厘米级的对地观测新技术，卫星激光测高严密几何模型构建及各类误差源分析是重要的理论基础，特别是大气、潮汐以及地形影响与月球和火星激光测高具有显著的区别，属于对地观测时需重点关注的问题。项目完整构建了天地一体化的严密几何模型，分析了涵盖卫星姿态和轨道、激光指向、大气、潮汐以及地形等各类误差源，形成了较系统的理论体系，有效指导了卫星激光测高的高精度处理。

项目系统性地构建激光足印点从激光参考坐标系经卫星本体系统、轨道坐标系、天球惯性坐标系到地面坐标系的严密几何模型，研究了大气延迟改正、潮汐改正及波形处理方法，重点分析了光行差、硬件安装误差对激光足印点的几何定位精度影响，定量提出了为保障卫星激光测高精度对有关参数的具体指标要求。项目研究了ICESat/GLAS的数据处理方法，同时针对国内资源三号02星上搭载的首台对地观测的卫星激光测高试验载荷，重点分析了理论精度和误差源。经分析资源三号02星激光点的理论测高精度为0.743m(1倍sigma,坡度为1度)，平面精度为14.2m；坡度为2度的平地理论高程精度为0.849m，经实际验证测高精度为0.898m，其中少部分点优于0.5m。相关成果

实现了我国在该领域的重要突破，入选顶尖期刊论文领跑者F5000和全国激光雷达大会优秀论文。

创新点二：首次提出了基于指数模型的大气散射改正算法，填补了国内在该领域的研究空白，进一步提高了卫星激光测高数据的精度和可利用率， $COD \leq 2$ 时大气散射改正精度优于0.05m，ICESat/GLAS激光点在湖泊水域及平地区域，受云影响的激光点可用率提高40%以上。

旁证材料：① 鉴定验收意见（1份，见附件1）；② 知识产权证明发明专利（1份，见附件14）；③ 相关论文（2篇，见附件18）；查新报告（1份，见附件3）；

目前已有的大气改正处理算法主要考虑的是清洁大气条件下折射延迟影响，对云雾霾等引起的大气散射延迟基本没有涉及，而对地观测的卫星激光测高不可避免地会受云雾霾的影响，特别是我国目前处于雾霾多发时期，因雾霾而引起的激光测高精度退化不容忽视，对最终激光足印点的精度以及可利用率产生显著影响。

本项目针对该问题进行攻关，结合ICESat/GLAS数据，研究了基于波形数据的云雾检测算法，有效提高被云雾霾影响的激光点识别概率；综合斜率法和 Fernald 等经典算法实现基于波形数据的云光学厚度COD量化分级，利用蒙特卡洛模拟仿真法，建立COD值与因散射而引起的测距误差值 $d_p$ 之间的模型关系，对被云雾霾影响的激光点质量进行有效定量标记；提出了基于指数函数模型的大气散射改正方法，采用验证场和指数函数，对散射引起的测距误差进行修正，最大限度地挖掘出虽被“污染”但改正后仍可用的激光点。不同于国外的蒙特卡洛半解析模拟改正法，本方法在有效反演光学厚度的前提下，能实现大规模的工程化应用。经验证，包含大气传输段后向散射信息的ICESat/GLAS激光点，在云光学厚度 $COD \leq 2$ 时，散射改正精度能达到5cm，其中 $COD \leq 1$ 时改正精度能到3cm，在湖泊水域及平地区域受云影响的点经散射改正后，精度发生退化的点减少40%以上，即从原本受云散射影响的激光点中进一步挖掘出约40%的点使用，激光点的可用率得到有效提高。相关成果填补了该领域的研究空白，对于提高湖泊水位测量精度以及高程控制点的提取数量具有实际应用价值。

创新点三：研究回波波形数据的模拟机理与方法，提出了顾及发射波形、地表反射率、光斑形状的精细化模拟仿真方法，适应波形采样间隔0.5ns和10bits量化精度，实现了高分七号卫星在轨波形数据的有效模拟，一般地形条件下模拟结果的相关系数大于0.95、复杂地形地物条件下相关系数大于0.8；改进了基于星载回波波形数据的树高估测模型，模型决定系数 $R^2$ 为78%，均方根误差RMSE为2.5m。

旁证材料：① 鉴定验收意见（2份，见附件1、附件5）；② 知识产权证明发明专利（1份，见附件15）；③ 相关论文（5篇，见附件18），专著（1部，见附件17）；查新报告（1份，见附件3）；

回波波形是线性体制激光测高卫星的核心数据之一，回波波形的仿真分析对卫星指标论证、数据处理具有重要的参考价值。本文基于已有激光回波模拟方法，对实际环境中地物反射率、发射波形以及激光断面阵列LPA(Laser Profile Array)对激光回波仿真精度的影响进行分析，提出了一种精细化波形仿真方法，综合考虑发射波形特征、激光雷达数据强度值反演地表真实的反射率、激光光斑影像中获得的光斑几何特

征参数等因素，显著提高了波形仿真的精度。提出的顾及发射波形、地表反射率、光斑形状的波形精细化模拟仿真方法，实现了高分七号卫星在轨波形数据的有效模拟，模拟结果在一般地形条件下相关系数大于0.95，复杂地形地物条件下相关系数大于0.8。

回波波形是森林参数反演及碳汇估算的关键数据，本研究以现有的波形数据处理理论为基础，深入研究了基于星载波形数据反演森林结构参数的机理与方法，推进了相关研究成果的应用。受地形坡度影响，利用现存树高估测模型估测森林冠层高时，估测精度较低。为提高森林树高估测精度，提出了不依赖DEM数据的地形坡度参数概念，建立了基于星载激光雷达回波波形长度、光斑直径和地形坡度参数的树高估测模型，其决定系数 $R^2$ 为78%（平坡地区模型 $R^2$ 优于90%），均方根误差RMSE为2.5m，很大程度上削弱了地形坡度造成的估测误差。在此基础上，联合MODIS、环境一号等多光谱和高光谱遥感影像数据，利用神经网络方法建立了森林地上生物量反演模型，提高了森林地上生物量的估测精度，并实现了区域连续性估测。相关结论及具体方法，对于开展线性体制的激光测高卫星林业应用具有参考价值。

创新点四：系统研究了卫星激光测高产品分级和质量控制体系标准化，构建了卫星激光测高产品从波形数据质量、环境影响因子、足印影像以及光斑影像质量等方面的具体评价指标和定量计算方法，形成了产品质量控制体系。

旁证材料：① 鉴定验收意见(1份，见附件1)；② 相关论文(2篇，见附件18)；③ 标准立项及征求意见函(1份，见附件9)，行标（送审稿）(2项，见附件10、11)；

作为一种新型对地观测数据，研究科学的数据处理流程、产品分级及数据质量评价标准，将是保证激光测高产品可靠性和可用性的重要前提，但目前国内没有相关标准体系，国外也没有直接可借鉴的成果。

项目根据数据处理级别、地理定位精度以及覆盖范围，对地观测卫星激光测高数据产品分为原始激光数据、能量校正产品、基础测高产品、标准测高产品、足印级专题要素高程测量产品、格网级专题要素高程测量产品、高程变化监测产品以及专题反演产品等类别，并重点研究了标准测高产品的处理流程及指标要求；从波形、大气、足印影像等多方面提出了激光测高数据有效性、相机监视参数质量、足印影像质量评价、回波波形特征数据质量评价指标，围绕指标具体计算方法开展深入研究，建立国产激光测高卫星数据质量控制体系，形成了《对地观测卫星激光测高数据产品》和《对地观测卫星激光测高数据质量评价方法》两项标准，经征求武汉大学、中科院空天信息创新研究院、住房与城乡建设部卫星遥感中心、中国水利科学研究院等数十名专家的意见及国内自然资源系统40余家单位的意见，收集整理近200条建议，目前已经进入送审稿阶段，即将经审批后形成正式行标文件。同时本着理论研究与应用实践相结合的原则，两个标准的相关成果在资源三号02星以及高分七号卫星在轨测试期间已经得到业务化应用，指导构建了广义卫星激光高程控制点数据库、全国大型湖泊水位监测数据集，最大限度地支撑国产卫星激光测高产品的标准化应用。目前依托GLAS和ATLAS数据，构建了覆盖全国面积大于1km<sup>2</sup>的大型湖泊卫星激光测高数据集，总数据

共45万余条，跨度为2003-2009和2018-2019年。

### 3. 与国外同类技术比较及不足

以美国为代表的西方发达国家虽然于2003年和2018年先后发射了ICESat/GLAS、ICESat2/ATLAS激光测高卫星，国际空间站上也搭载了GEDI激光测高载荷，但主要处于科研探索应用阶段，相关理论没有形成体系，而且随新技术发展在不断更新完善。相比而言，本项目在严密几何模型构建方面，相关成果属于国内首次，与国外同类先进水平基本相当，其中光行差改正方面本项目研究更深入。在大气散射改正方面，国外尚处于探索阶段、无成熟的理论和模型，主要采用半解析的蒙特卡洛仿真模型，项目提出的指数函数改正模型属于国内首创，填补了国内空白、且比国外相关技术更具有实际工程应用价值。波形精细化模拟仿真及质量控制体系充分考虑了国产卫星特点，国外目前没有相关标准规范，成果属于国内首次。

项目研制过程中高分七号卫星虽然成功发射，但由于目前该卫星一直处于在轨测试期间，受多方影响外场在轨定标工作及绝对精度验证无法有效开展，因此目前仅针对在轨测试期间的激光测高数据开展了相关处理，初步结果表明高分七号卫星激光测高精度有望实现平地优于0.3m甚至更高的指标，具体有待后续验证分析。此外，我国目前还没有专门的激光测高卫星，已有型号搭载的激光测高仪主要以线性体制为主，而新一代的单光子激光技术已经突飞猛进，本项目在研制过程中虽然也开展了光子体制激光测高卫星立项预研相关的研究，但受限于认知水平和卫星数据的不足，对单光子激光新技术把握还不够透彻，还有一些新的技术难题需要攻关研究。

### 4. 总体评价

总体而言，项目成果首次形成了涵盖几何定位模型、误差分析、大气改正、潮汐改正、高程控制点提取以及湖泊水位和林业树高测量的卫星激光测高数据处理理论体系，部分成果属于首创，具有重要的科学引领价值。项目在测绘、林业、水利等领域开展的应用实践，能为后续激光测高卫星的立项论证及行业规模化应用提供重要参考。

2020年3月28日，中国地理信息产业协会组织专家对项目成果进行评价：“评价委员一致认为，项目成果具有先进性和创新性，推动了地理信息行业科技进步，总体技术达到国内领先、国际先进水平。”

## 四、推广应用情况

### 1、推广、应用情况及社会评价（限 2000字）

项目研制的卫星激光测高数据处理软件和相关数据成果在支撑全球地理信息资源建设、大型湖泊水位变化监测预警、林业树高测量及碳汇估算方面得到应用实践和推广。形成的卫星激光测高数据处理理论体系，对于国内在该对地观测新技术领域的发展具有科学引领作用，相关成果在测绘、林业、水利应用示范，能有效支撑后续激光测高卫星立项论证和未来国产激光测高卫星的规模化应用，科技价值以及经济与社会效益累计近六千万元。

项目研制之前，国内因起步较晚，卫星激光测高数据处理相关研究并没有形成完整的理论体系，也尚无对地观测卫星激光测高数据处理、产品分级以及应用的统一标准，国外也处于探索阶段没有成型的可以直接采用，这对国产卫星激光测高应用与发展形成了制约。通过项目的研制，基本建立了卫星激光测高模拟仿真、几何建模、数据处理、产品分级以及质量控制的成套技术理论体系，这对于我国在激光测高卫星领域的技术进步和未来发展具有重要的牵引作用。项目成果在自然资源部国土卫星应用中心的资源三号02星应用系统中得到具体应用，实现了资源三号02星激光测高数据的自主化、业务化处理，在高分七号卫星、陆地生态系统碳监测卫星的指标论证及模拟仿真方面提供了技术支撑，目前支撑了高分七号卫星在轨测试期间激光测高数据的处理与分析。项目的软件及整理的资源三号02星和ICESat/GLAS等激光数据成果在全球地理信息资源建设项目、青海省大型湖泊水位变化监测及预警、东北长白山森工集团森林资源调查等方面得到推广应用。

自然资源部第一地形测量大队基于提取的ICESat/GLAS和资源三号02星激光控制点数据，开展了中亚土库曼斯坦和哈萨克斯坦共160万平方公里范围的DSM精度验证及精度优化；青岛国测海遥信息技术有限公司采用了激光严密几何模型及误差理论成果，开展了临沂蒙阴某矿区轻小型无人机LiDAR监测应用，有效提高了数据质量和精度；住房和城乡建设部遥感应用中心、同济大学等高分卫星用户或共性关键技术承担单位利用项目组的高分七号卫星激光模拟仿真技术成果和数据集开展了应用示范，有效支撑了高分七号卫星发射前的技术预研和攻关；江苏省测绘工程院利用提取后的ICESat/GLAS和资源三号02星激光测高数据开展1:50000立体测图控制验证，并在太湖、洪泽湖区开展湖泊水位监测应用示范；青海地调院卫星遥感中心利用大型湖泊水位监测软件开展了青海省域的大型湖泊水位监测及预警应用，为三江源地区湖泊水位变化监测及生态保护提供了重要客观数据支撑；长白山森工集团下属林场利用森林参数反演技术开展长白山去森林覆盖度和蓄积量的变化监测，形成了卫星激光测高数据在林业生物量反演方面的应用方案。为国家地理信息中心的全球地理信息资源建设、老挝测绘局1:50000测图提供了经精度优化的影像产品，显著提高了影像的无地面控制的高程测量精度，能有效减少1:50000测图时的外业控制点采集工作量；

项目公开发表的专著和高质量论文专利等成果，凝练形成了卫星激光测高数据处理理论体系，并实现了在卫星激光测高领域的科技引领，多篇论文专利被高引或获得重要学术会议优秀论文奖。其中《卫星激光测高严密几何模型构建及精度验证》论文

被评为中国精品科技期刊顶尖学术论文(领跑者F5000)，“多准则约束的激光高程控制点筛选算法”被评为第三届全国激光雷达大会优秀论文，英文论文被美国NASA数据中心NSIDC引用并被纳入成果库，《全球广义激光高程控制点库应用解决方案》获得首届国家高分卫星应用方案二等奖，其他相关成果分别被评为全国高分辨率对地观测学术年会优秀论文和青年创新基金、全国激光雷达大会和中国测绘学会年会优秀论文奖等。相关成果被中国航天科技集团卫星总体部、上海技术物理研究所、武汉大学、解放军测绘工程大学等多家单位的专家和技术人员关注和引用，有力地推动了激光测高卫星数据处理与应用技术的进步和发展。

地理信息科技进步奖