

## 星载激光遥感林业应用发展研究

岳春宇<sup>1,2</sup>, 郑永超<sup>1,3\*</sup>, 邢艳秋<sup>4</sup>, 庞 勇<sup>5</sup>, 李世明<sup>5</sup>, 蔡龙涛<sup>4</sup>, 何红艳<sup>1,2</sup>

- (1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;
2. 先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094;
3. 中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室, 北京 100094;
4. 东北林业大学森林作业与环境研究中心, 黑龙江哈尔滨 150040;
5. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

**摘要:** 林业测量调查是星载激光遥感的重要应用方向。迄今为止, 国外发展了多台套的星载激光载荷已经用于林业遥感。国内资源三号(02)星搭载的激光测距仪实验载荷实现了我国星载激光对地观测的突破, 即将发射的陆地生态系统碳监测卫星多波束激光雷达也将在林业遥感中取得重要应用。ICESAT-1/GLAS 系统全波形数据成功用于全球林地垂直结构调查, ICESAT-2/ATLAS 系统以光子探测的方式获取林地点云调查数据, 星载激光遥感林业应用从实验、演示验证、进入实用阶段。这期间多型星载激光雷达经过了技术体制的选择、参数的优化, 器件技术和处理技术的突破。本文综述了主要在轨服务林业遥感的星载激光雷达的配置和数据应用, 研究了星载激光雷达林业遥感的探测机制、技术体制、应用现状、适用范围等, 分析总结了各类星载激光雷达林业应用技术特点、发展演化趋势, 提出星载激光雷达载荷研制应根据任务应用需求、科学和工程目标, 充分发挥激光技术长项, 与其他载荷手段优化配置, 扬长补短, 展望了星载激光雷达林业遥感技术和应用的发展趋势、研究热点及其应用拓展。  
**关键词:** 星载激光雷达; 林业; 遥感; 发展研究

中图分类号: P236 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200235

## Technical and application development study of space-borne LiDAR in forestry remote sensing

Yue Chunyu<sup>1,2</sup>, Zheng Yongchao<sup>1,3\*</sup>, Xing Yanqiu<sup>4</sup>, Pang Yong<sup>5</sup>,  
Li Shiming<sup>5</sup>, Cai Longtao<sup>4</sup>, He Hongyan<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;
2. Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing 100094, China;
3. Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
4. Center of Forest Operation and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
5. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Forestry observation is an important direction of the development of space-borne LiDAR. So far, foreign space laser remote sensing payloads have been developed. The experimental LiDAR carried by Chinese ZY-3(02) satellite is a big breakthrough in earth observation of space-borne LiDAR in China, and the oncoming

收稿日期: 2020-06-25; 修订日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(41401411)

作者简介: 岳春宇(1983-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事从事航天摄影测量与遥感的相关设计及研究工作。Email: ycy1893@163.com

通讯作者: 郑永超(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电系统、激光遥感总体技术研究。Email: laser0371@163.com

multi-beam LiDAR of Chinese CE-1 satellite will be applied to forestry remote sensing. The vertical structure of forest was acquired by ICESAT-1/GLAS waveform, while point cloud of forest was obtained by ICESAT-2/ATLAS photons. The space-borne LiDAR forestry remote sensing gradually entered the practical stage, beyond the experimental stage. During this period, technical system, configuration, and techniques had improved. In this paper, the applications and technique developments of main forestry remote sensing space-borne LiDAR in use were analyzed, and the characteristics and development trend were summarized, based on the study of detection principle, technical system, observation condition, etc. Space-borne forestry observation LiDAR payloads should be designed according to scientific mission, application requirements and technical characteristics, using the advantages of space-borne LiDAR, and based on which the development trend and research focus of space-borne forestry observation technology and application were prospected.

**Key words:** space-borne LiDAR; forestry; remote sensing; development study

## 0 引言

森林是陆地生态系统的主体,承担着调节气候和涵养水源等生态服务功能,对维护区域生态与环境及全球碳平衡、缓解全球气候变化发挥着不可替代的作用,其本身及变化对陆地生物圈及其他地表过程有着重要影响<sup>[1]</sup>。传统的森林资源调查需要外业实地观测,如使用全站仪测量树高等,仅能获得单个点位上的测量结果。虽然在地面收集的样地点森林调查数据精度较高,但是难以获取大面积的调查数据,存在耗时久、费用高、效率低等问题,不能满足森林资源调查和生态过程监测大范围、高覆盖、多时相、时空连续观测等要求。

卫星遥感观测范围大,可定期重复观测,是目前大面积森林调查的重要手段,可以弥补传统方式的不足,有效减少外业调查和计量的人力时间耗费,并且能在保证精度的同时保证数据的空间完整性与时间一致性<sup>[2]</sup>。近年来蓬勃发展的星载激光雷达(Light

Detection and Ranging, LiDAR)在森林冠层垂直结构调查方面具有独特的优势,成为国内外业界关注的热点<sup>[1]</sup>。

文中综述了目前几型服务林业遥感的星载激光雷达配置和数据应用情况,研究了星载激光雷达林业遥感的探测机制、技术体制、应用现状、适用范围等,分析总结了星载激光雷达林业应用技术特点、应用优势和短板、发展趋势,提出星载激光雷达载荷研制应根据任务应用需求、科学和工程目标,充分发挥激光技术长项,与其他载荷手段优化配置,扬长补短,展望了星载激光雷达林业遥感技术和应用的发展趋势、研究热点及其应用拓展。

## 1 星载激光雷达林业遥感技术

星载激光雷达是一种新兴的主动遥感技术,通过发射激光脉冲,并接收激光脉冲到达森林后返回的能量来获取森林垂直结构信息<sup>[1]</sup>,主要分为线性全波形和光子两种探测体制,原理如图 1 所示。

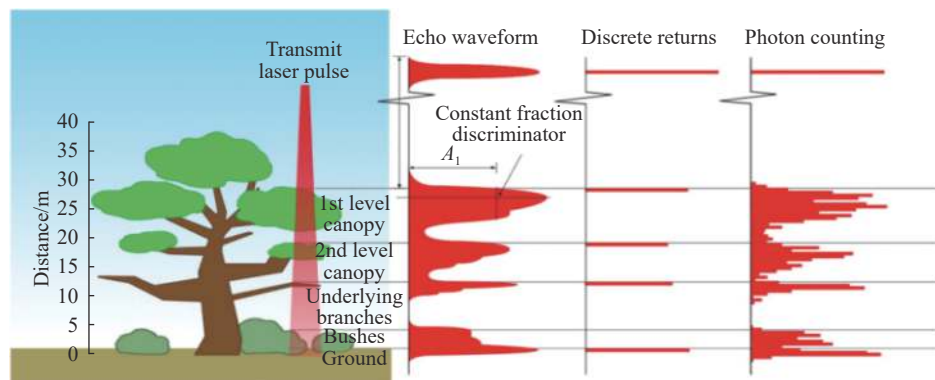


图 1 不同种类激光数据反演森林结构参数示意图

Fig.1 Different LiDAR data for forestry retrieval

激光雷达可以获取用于调查森林的生物物理和化学特性(参数)信息,进而进行郁闭度、树高、树种组成、胸径株数密度、蓄积量/生物量、叶绿素含量、森林病虫害等森林调查参数估测,可以调查森林火灾损失评估,新造林地监测,森林采伐等森林干扰监测,也可以用于森林三维场景建模。

目前应用于林业的星载激光雷达系统,有搭载在 ICESat-1 (Ice,Cloud and Elevation Satellite) 卫星上的 GLAS (Geosciences Laser Altimeter System) 系统<sup>[3]</sup>、搭载在 ICESat-2 卫星上的 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) 系统<sup>[4]</sup>,部署在国际空间站(International space station,ISS)上的 GEDI (The Global Ecosystem Dynamics Investigation) 系统<sup>[5]</sup>。日本的 MOLI (Multi-footprint Observation Lidar and Imager) 系统也即将发射并部署在 ISS<sup>[6]</sup>。而我国将在 2021 年发射陆地生态系统碳监测卫星,搭载的多波束激光雷达载荷主要服务于林业调查。

### 1.1 星载全波形激光雷达

全波形激光雷达接收目标的激光回波信号,完整采样,形成全波形数据,能够完整的记录目标垂直方向各位置与激光发射脉冲作用后,返回的能量信息。

#### 1.1.1 GLAS 系统

ICESat-1 卫星于 2003 年 1 月 13 日在加利福尼亚州范登堡空军基地发射,是全球首个激光测高卫星,主要科学目标为测量南极和格陵兰岛冰盖高程变化所引起的冰总量平衡变化情况。同时,该卫星还可用于测量海面、海水、陆地表面的高程,测量冰块、水面和陆地表面的粗糙度、各种陆地植被高,测量云层和气溶胶层的高度<sup>[3]</sup>。ICESat-1 沿着近圆的近极轨道飞行,可覆盖地表 86°N-86°S 以及两极的大部分区域,具体参数见表 1。

2009 年 10 月 11 日 GLAS 停止采集数据,期间共获得光斑个数 1984210719 个。GLAS 工作示意图如图 2 所示。

ICESat/GLAS 数据产品可分为 3 个级别(0-2 级),共 15 种标准数据产品 (GLA01-GLA15),具体见表 2。

林业应用中常用到的数据为 GLA01、GLA05、GLA06 和 GLA14。GLA01 为发射与接收的波形数据文件, GLA05 为波形校正数据, GLA06 为高程数据, GLA14 为全球陆地表面测高数据。

表 1 ICESat/GLAS 参数

Tab.1 ICESat/GLAS Parameters

Parameters	Details
Orbit	600
Operating frequency/Hz	40
Working beam number	1
Wavelength/nm	1064/532
Ranging accuracy/m	0.3
Footprint diameter/m	70
Distance between footprint/m	170

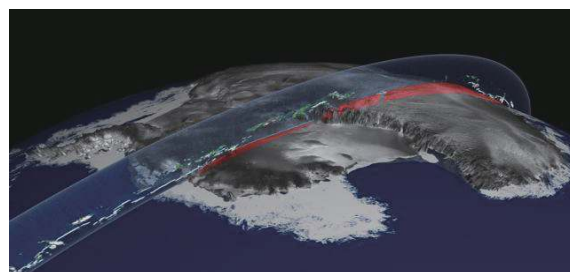


图 2 GLAS 工作示意图<sup>[7]</sup>

Fig.2 GLAS in-orbit<sup>[7]</sup>

表 2 ICESat-GLAS 数据产品

Tab.2 ICESat-GLAS products

Product level	Data	Standard product
Level 0	Original data	
Level 1	1A product: satellite engineering data	GLA01-GLA04
	1B product: raw LiDAR data	GLA05-GLA07
Level 2	Application data	GLA08-GLA15

#### 1.1.1.1 GLAS 数据林业应用

##### (1) 反演森林冠层高度

GLAS 波形长度对应回波信号开始到地面的距离,直接反映了植被的高度信息<sup>[8]</sup>。由于地面的坡度、粗糙度会使脉冲宽度变宽,影响植被冠层高度估算精度。Lefsky 等<sup>[9]</sup>利用 GLAS 波形和数字高程模型数据 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM (Digital Elevation Model) 估测了巴西热带阔叶林、美国田纳西州温带阔叶林和俄勒冈州温带针叶林的最大冠层高度,估测精度得到了有效提升。庞勇<sup>[10]</sup>在 Lefsky 等<sup>[9]</sup>基础上增加了波形前缘的上升斜率,进行森林冠层高度反演,证实了 GLAS 数据反演的树高结果与地面调查得到的土地覆盖类型结果较为一致。Xing 等<sup>[11]</sup>考虑地表粗糙度后发现,最大冠层高度和

GLAS 波形长度之间存在对数关系,并由此在 Lefsky 模型的基础上提出改进模型,估测最大树冠高度的符合度  $R^2$  为 74%。池泓等<sup>[12]</sup>利用 GLAS 波形特征参数,采用多元逐步回归方法对 3 种森林类型(针叶林、阔叶林和针阔混交林)建立了激光雷达波形指数与光斑内实测平均树高的回归模型。

## (2) 反演森林类型

目前,应用星载雷达数据来反演森林类型的研究较少。Hieu 等<sup>[13]</sup>利用 GLAS 波形能量特征,区分了森林与其他土地类型,但无法对森林类型进一步识别。Duong 等<sup>[14]</sup>通过分析比较夏冬季 GLAS 波形能量,区别了针叶林、阔叶林和混交林 3 种森林类型,但总体分类精度仍不理想。Zhang 等<sup>[15]</sup>对我国东北寒温带森林,利用 GLAS 波形高斯分解特征参数,采用支持向量机分类法,对针叶林和阔叶林总体分类精度最高为 90.57%,针叶林、阔叶林和混交林总体分类精度最高为 76.56%,而混交林森林类型分类精度为 0%。

## (3) 胸高断面面积估算

王蕊等<sup>[16]</sup>利用回归估计方法分析 GLAS 波形特征参数与森林胸高断面面积的相关关系,建立预测模型对森林胸高断面面积进行估测,综合分析最终确定波形长度估测模型可稳定准确地估测出胸高断面面积。

## (4) 森林郁闭度估算

Harding 和 Carabajal<sup>[17]</sup>研究表明, GLAS 回波中冠层能量与总能量的比值可以作为冠层郁闭度的一个度量。Neuenschwander 等<sup>[18]</sup>利用 GLAS 波形中冠层回波总能量与地面回波总能量的比值估测了森林郁闭度,结果表明,该能量比是估测森林郁闭度的一个理想指标。

## (5) 叶面积指数估算

利用 GLAS 数据反演森林叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)的研究较少。骆社周等<sup>[19]</sup>通过高斯分解 GLAS 波形,精确地计算了冠层与地面的回波能量,比值得到激光穿透指数 LPI(Laser Penetration Index),与实测 LAI 回归分析,结果精度达到 0.64( $R^2=0.84$ )。

### 1.1.1.2 GLAS 林业应用的特点

GLAS 是首台应用于林业遥感的星载激光雷达,利用激光脉冲的穿透性,接收连续采样回波信号,获得全波形数据,观测森林的垂直结构。通过对波形数据分解等处理,进一步发展了森林冠层高度、树木胸高断面面积、森林郁闭度、叶面积指数估测和森林分类

等算法。尤其在树高的估算上,取得了较高精度并被广泛应用。

但是 GLAS 光斑之间的间隔较大,无法实现森林垂直结构参数区域性估测,且激光脉冲能量在光斑内呈高斯分布,回波信号不能完整体现光斑内林木信息。当光斑内林木密度较大时,激光脉冲不能穿过冠层到达地面,无法估测森林结构参数。另外 GLAS 波形数据受仪器背景噪声、大气噪声等因素影响较大,给波形处理造成困难。2009 年 10 月 11 日 ICESat 停止运行,无法再提供数据。

综上,为了解决 GLAS 数据在轨应用的问题,对后续的星载激光雷达设计,需要减小光斑尺寸,降低地形等因素的影响,增大工作频率,进而增加数据覆盖率。

### 1.1.2 GEDI 系统

2014 年马里兰大学与 NASA 戈达德太空飞行中心合作,建造并测试了全球生态系统动力学调查(GEDI)高分辨率激光测距系统,并于 2018 年在国际空间站(ISS)部署,部署年限为两年。GEDI 是一种大地测量级光探测和测距(激光雷达)系统,由三个激光器组成,两个全功率激光器,另外一个激光器分成两个光束,共产生四个光束。每个光束在光路上进行光学抖动,光束抖动单元快速改变输出激光束的偏转 1.5 mrad,以创建总共 8 个地面轨道,轨道间距约为 600 m,总轨道宽度为 4.2 km(足迹之间的平均沿轨距离为 60 m,占地面积平均为 25 m,因此沿轨道覆盖几乎连续<sup>[5,20]</sup>,GEDI 在地面采样模式如图 3 所示。具体参数见表 3。

GEDI 可获取 51.6°N 和 51.6°S 纬度之间的激光雷达波形。另外,GEDI 最大旋转角度为 6°,可在 ISS 地面轨道两侧指向向外延伸 40 km,实现尽可能完整地地球表面采样,填补云层等造成的区域间隙。GEDI 以 1 ns (15 cm) 为间隔记录波形数据,预计将在其 24 个月的名义任务期内产生约 100 亿次无云观测。

GEDI 科学数据产品主要为描述地球三维特征的足迹和网格数据集。依据数据处理阶段的不同,GEDI 数据分为较低级别产品(L1 和 L2)和较高级别(L3 和 L4),如图 4 所示。GEDI 1 级数据产品是地理定位波形。2 级数据产品是级冠层高度和轮廓足迹级产品,用于提供冠层高度和轮廓度量。3 级数据产品是冠层高度网格级产品,通过空间插值冠层高度、

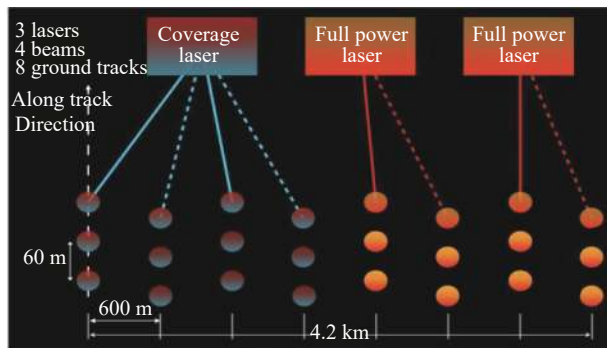


图 3 GEDI 的地面采样模式<sup>[5]</sup>

Fig.3 Sampling on the ground of GEDI<sup>[5]</sup>

表 3 GEDI 参数

Tab.3 GEDI parameters

Parameters	Details
Orbit/km	370-460
Operating frequency/Hz	242
Working beam number	4
Wavelength/nm	1 064
Footprint diameter/m	25
Distance between footprint/m	600/60

ATBD#	Data products	Product leads	Resolution
L1A-2A	1A: raw waveforms, 2A: ground elevation, canopy top height, relative height (RH) metrics	Michelle Hofton Bryan Blair	25 m (~82 ft) diameter
L1B	Geolocated waveforms	Scott Luthcke Tim Rebold Taylor Thomas Teresa Perrin Igor	25 m (~82 ft) diameter
L2B	Canopy cover fraction (CCF), CCF profile, leaf area index (LAI), LAI profile	Hao Tang John Armston	25 m (~82 ft) diameter
L3	Gridded Level 2 metrics	Scott Luthcke Terence Sabaka Sandra Preaux	1 km (~0.6 mile) grid
L4A	Footprint level above ground biomass	Jim Kellner Laura Duncanson John Armston	25 m (~82 ft) diameter
L4B	Gridded above ground biomass density (AGBD)	Sean Healey Paul Patterson	1 km (~0.6 mile) grid
Demonstrative products	Prognostic ecosystem model outputs	George Hurtt	Grid size: variable
Demonstrative products	Enhanced height/biomass using fusion with TanDEM-X	Lola Fatoyinbo Seung-Kuk Lee	Grid size: variable
Demonstrative products	Enhanced height/biomass and biomass change using fusion with landsat	Matt Hansen Chenquan Huang	Grid size: variable
Demonstrative products	Biodiversity/habitat model outputs	Scott Goetz Patrick Jantz Pat Burns	Grid size: variable

图 4 GEDI 数据产品<sup>[5]</sup>

Fig.4 Products of GEDI<sup>[5]</sup>

LAI 和垂直叶面轮廓, 以及对 2 级足迹级估算进行网格化。4A 和 4B 级数据产品是地上碳估计的足迹级和网格级产品, 是 GEDI 产品的最高级别, 把足迹度量转换为地上生物量密度的足迹估计, 在把这些估计值用于统计理论条件下每年生物量平均增长量及其在 1 km 范围内的不确定性<sup>[5, 20]</sup>。

GEDI 的主要任务是生成高分辨率地球三维结构; 精确测量森林冠层高度, 冠层垂直结构和表面高程; 从根本上提高碳和水循环过程, 生物多样性和栖

息地的表征能力。

### 1.1.2.1 GEDI 数据林业应用

#### (1) 森林生物保护

GEDI 能够为世界温带和热带生态系统中的植被冠层垂直结构提供全球一致性测量数据。所测数据为受威胁和濒危物种的保护和管理提供了信息, 特别是在生物多样性热点地区, 如亚马逊流域, 中非和东南亚物种丰富的湿润森林。GEDI 数据能够识别受威胁物种和濒危物种种群所在的森林区域, 通过描述剩

余的高保护价值区域的结构和质量,以及它们与适当栖息地的走廊之间的连接程度,为大规模的保护规划提供支持。

(2) 碳监测

将森林视为由单独树木或群组的植被并建立模型,可以通过冠层高度、树冠形态、叶面积指数、生物量和其他植被特征的信息来提高模型预测的准确性,例如异质景观中的碳通量。生态系统模型可以量化再生热带森林的气候减缓效益,了解不同森林采伐策略的碳动态,或估计不断变化的火灾对碳储量的影响。由于树冠高度和结构是许多植被模型的重要组成部分,GEDI 数十亿个密集间隔的观测可以提高这些模型的整体准确性和空间细节,大大提高了它们作为政策,规划和研究工具的实用性。

(3) 火灾监测

激光雷达能够直接测量与燃料负荷相关的植被结构,使其非常适合远距离估算大面积的燃料参数,用于火灾监测。这些估算可以补充燃料特性的观测数据,从而描述景观区域尺度的燃料负荷。将离散 GEDI 数据与空间连续光谱数据(如 Landsat)相结合,用于推导某些度量(例如,冠层高度和冠层覆盖),可以生成中等分辨率的植被影像分布图,并为支持火灾决策提供数据支撑。

1.1.2.2 GEDI 林业应用特点

GDEI 目前具有最高分辨率和灵敏性,能够生成中低纬度完整的数据格网,精确测量森林垂直结构和表面高程,给大范围碳和水循环过程和生物多样性提供数据。

1.1.3 MOLI 系统

日本航天探索局(JAXA)即将发射“多足迹观测激光雷达和成像仪(MOLI)”,主要目标是从空间获得

准确的全球测量冠层高度,以改善生物量估计。MOLI 被设计安装在国际空间站(ISS)上日本实验舱(JEM,被称为“Kibo”)的暴露设施上。MOLI 携带了一个激光发射器和一个多波段光学成像仪,获取植被辐射和激光观测数据,用于数据融合分析<sup>[6]</sup>。MOLI 的详细参数见表 4。

表 4 MOLI 参数

Tab.4 MOLI parameters

Parameters	Value
Orbit/km	400
Operating frequency/Hz	150
Working beam number	2
Wavelength/nm	1 064
Height accuracy/m	3
Footprint diameter/m	25
Distance between footprint/m	50/15

MOLI 的任务暂定为测量精度为±2~3 m 的冠层高度;测量植被指数,生成冠层高度和生物量的地图数据;测量部分地区(80 km 格网)不确定性水平优于 20%(95% 置信区间)的平均碳含量。

1.1.3.1 MOLI 数据林业应用

JAXA 为 MOLI 的激光发射器建立了地面试验模型来评估激光性能。由于地形坡度直接影响森林结构参数估测精度,MOLI 通过检测多个足印的时间差估计地表的倾斜角,以估计足迹内地面高度的差异。MOLI 足迹示意图如图 5 所示。估算地面倾斜度概念示意图如图 6 所示。

为了把激光雷达数据和光学图像数据进行融合分析,需要在图像 1 个像素内获得 3~5 个激光雷达观测数据。为了减小由于地面倾斜而引起的误差,选用

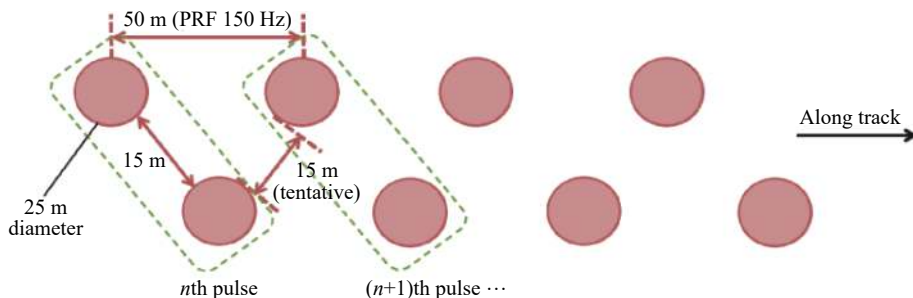


图 5 MOLI 足迹示意图<sup>[6]</sup>

Fig.5 Footprint of MOLI<sup>[6]</sup>

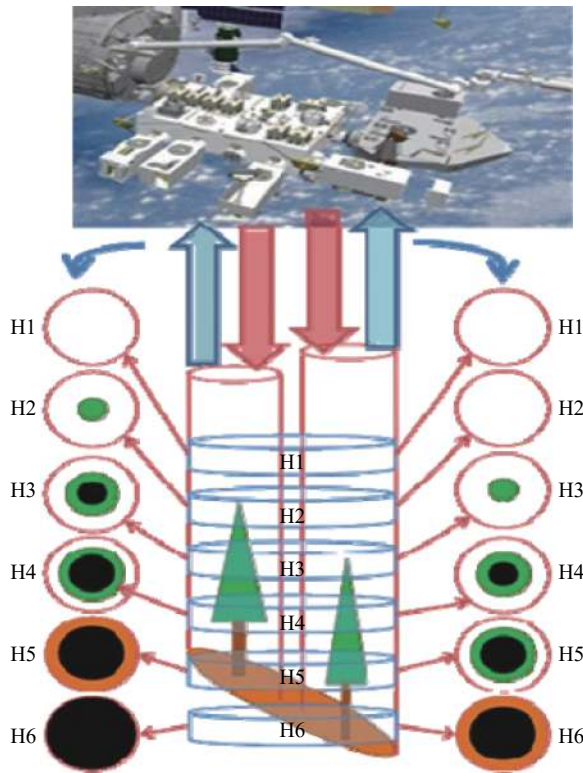


图 6 估算地面倾斜<sup>[6]</sup>  
Fig.6 Slope estimation<sup>[6]</sup>

直径约为 20 m 的光斑大小, 以实现 $\pm 2\sim 3$  m 的高度估计精度。此外, 要准确地检测树顶, 直径需要大于被测树的树冠, 需考虑到树冠的平均直径, 所以将 MOLI 的每个足印的直径设置为 25 m。

### 1.1.3.2 MOLI 林业应用特点

MOLI 充分考虑了激光观测数据中地形对森林结构参数估测的影响, 工作频率为 150 Hz, 可以通过多个足印的观测修正地面倾斜角度。同时考虑了与光

学图像的融合应用, 设置光斑大小为 25 m, 可以与同时获取的可见光图像高精度配准, 多角度挖掘森林信息。但是 MOLI 激光雷达足迹离散设置, 无法对全球地表进行观测, 需要与其他卫星数据进行融合分析, 生成全球数据产品。

### 1.2 星载光子激光雷达

光子激光雷达采用微脉冲光子计数技术, 实现目标返回能量单光子级别的探测。ICESat-2 于 2018 年 9 月 15 日成功发射, 并于 2019 年 5 月 30 日对外公布光子云数据<sup>[21]</sup>。ICESat-2 搭载了先进地形激光高度计系统 ATLAS, 该系统主载荷采用微脉冲光子计数技术, 具有高重频、高灵敏性的特性, 减小激光光斑大小, 增加了工作频率, 通过接收返回的光子信号描述地表的冠层情况<sup>[22]</sup>, 具体参数见表 5。

表 5 ICESat-ATLAS 参数  
Tab.5 ICESat-ATLAS parameters

Parameters	Value
Orbit/km	500
Operating frequency/Hz	10 000
Working beam number	6
Wavelength/nm	532
Height accuracy/m	0.24
Footprint diameter/m	17
Distance between footprint	2.3 km/90 m/0.7 m

ICESat-2-ATLAS 的科学任务包括是极地冰盖监测, 海冰厚度监测和植被冠层高度测量<sup>[22]</sup>。图 7 为 ICESat-2/ATLAS 激光足印示意图。

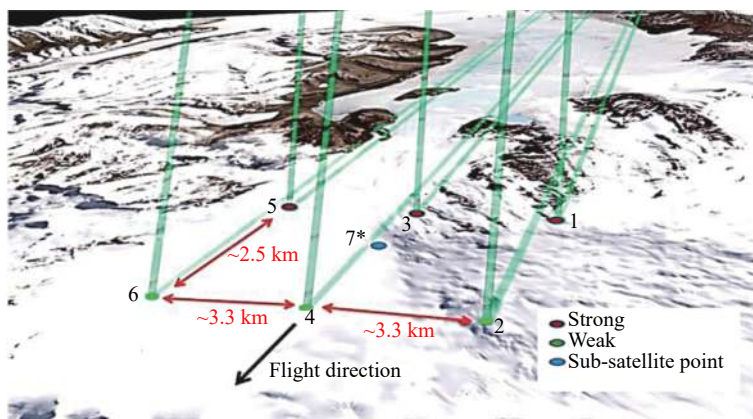


图 7 ICESat-2/ATLAS 足印示意图<sup>[22]</sup>  
Fig.7 Footprint of ICESat-2/ATLAS in orbit<sup>[22]</sup>

### 1.2.1 ATLAS 数据林业应用

ATLAS 特征参数包括三类:一类是光子云高度相关统计参数,包括光子云最大高度 ( $H_{\max}$ )、光子云平均高度 ( $H_{\text{mean}}$ )、光子云高度标准差 ( $H_{\text{SD}}$ ) 和光子云变异系数 ( $H_{\text{CV}}$ );二类是光子云高度百分位数;三类是光子云激光穿透指数 LPI。第一类和第二类参数主要用于估测森林冠层高度,是反演森林生物量及森林碳储量的主要参数。第三类参数主要用于反演森林郁闭度等森林结构参数<sup>[23]</sup>。全波形传感器记录了激光回波信号的整个时间分布。光子计数系统则记录与单个光子检测相关的到达时间,该时间可能会在反射信号的垂直分布内任何位置发生。如果光子计数激光雷达系统记录了多个事件(例如数百次或更多),则反射光子的垂直分布将类似于完整波形。

根据 ATLAS 光子云技术特性,可分别建立冠层光子模型与地面光子模型。冠层光子模型与地面光子模型做差,得出光子云数据的冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM),为后续的森林生物量及森林碳储量反演提供数据<sup>[24]</sup>。由于 ATLAS 数据刚刚发布,其反演森林冠层高度的研究成果有限。Neuenschwander 初步探索了 ATLAS 的 ATL08 产品估测森林冠层高度的方法,以芬兰机载数据进行验证,精度为 3.69 m ( $R^2=0.98$ )<sup>[22]</sup>。

### 1.2.2 ATLAS 林业应用特点

ATLAS 工作频率高,沿轨足印间距最小 0.7 m,而 GLAS 沿轨足印间距 170 m。ATLAS 可以获得连续的航带信息,能够更真实准确的描述被测目标,而且多波束工作模式,在相同轨迹条件下可获得更多的观测信息。ATLAS 光斑小,为 17 m,而 GLAS 为 70 m,小光斑可减少坡度对信息获取的影响<sup>[22]</sup>。但是 ATLAS 发射和接收的信号光子均为弱信号光子,其受背景噪声(太阳背景噪声、系统暗噪声、大气反射噪声等)影响极大。因此,如何有效完成光子云去噪是该系统需要解决的问题之一<sup>[25-26]</sup>。而且,由于光子信号仅记录返回位置,并不具备属性信息,因此,有效完成信号光子的精确分类是该系统需要解决的另一个问题<sup>[27]</sup>。ATLAS 数据林业遥感相对于全波形数据的有效性和全球覆盖度还有待验证,后续应与全波形数据融合使用提升激光雷达林业遥感的应用效能。

## 2 星载激光雷达林业应用分析

### 2.1 星载激光雷达林业遥感优势和不足

星载激光雷达在林业遥感中的优点是:(1)直接提供森林垂直结构信息;(2)测距精度高,能精确获取森林的三维地理坐标;(3)覆盖范围广,能够捕捉全球森林的广泛趋势和动态变化情况,可用于大区域林业资源调查研究;(4)费用低,地面控制作业工作量少,成本低。

但是星载激光雷达数据使用反演精度还有待提高,相比于其他遥感手段,定量化应用水平还不高,在今后在反演森林结构参数研究中需要解决的问题有:(1)数据覆盖率低,数据在空间分布的不连续;(2)光斑内信息干扰严重;(3)与其他载荷融合应用效率低。

### 2.2 星载全波形及光子激光雷达林业遥感体制

相对于星载全波形激光雷达数据,光子激光雷达获得的光子云密度更高,激光足印间距小,足印光斑尺寸也小,能够获取更多观测信息,对于森林结构参数提取具有重要意义。

但光子激光雷达发射和接收的是弱信号光子,受背景噪声影响极大。而且,由于光子信号不具备属性信息,会影响精确分类,给数据处理算法开发带来一定难度。

星载激光雷达的这两种探测方式未来还会长期并行发展。光子点云可以补充波形数据覆盖率低的缺点,而波形数据信噪比高于光子数据,数据处理算法成熟,反演精度较高。两者的结合,将极大提升星载激光林业遥感的范围和精度。

### 2.3 星载激光雷达与微波雷达林业遥感

微波合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是激光雷达主要竞争者。微波雷达同样可获取高精度森林的结构信息如树高等,进而反演其他林业参数,而且不受天候条件影响。

但是微波雷达不能直接获取森林的垂直结构。目前天基遥感主要使用的 C 波段 SAR 不能直接穿透森林,而论证中的 P 波段 SAR 可以直接穿透森林,但是需要多波段配合才能反演森林的垂直结构。当前主要利用多基线 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 层析技术提取树高,反演精度取决于森林冠层在垂直方向的经验功率损失阈值,鲁棒性较差。



国内正在论证的 P 谱段 SAR 穿透能力强, 可以直接获取林下地形, 激光雷达则能够获取森林的垂直结构信息, 两者的结合将会优势互补, 提升林业遥感的反演精度。

### 3 结论与展望

从激光雷达的发展综合来看, 光斑大小从 70 m 直径提升到 17 m 直径, 工作波束从 1 个提升到 6 个, 工作频率从 40 Hz 到 10 000 Hz。光斑越来越小, 波束越来越多, 工作频率也越来越大, 目标是提供尽量密集的地面采样, 提高信噪比, 降低地形等因素对森林信号的影响。但是激光林业遥感是通过大范围的森林垂直结构信息预估生物量、碳循环等信息, 是宏观的观测, 并不是越密集采样精度越高。比如全波形的 MOLI 激光雷达, 就充分论证了激光雷达数据与地形及光学数据的融合, 将光斑直径大小设定为 25 m。而光子激光雷达 ATLAS 则考虑噪声影响等, 将光斑直径大小定为 17 m。后续星载激光雷达的设计, 应该是以垂直结构参数估算精度为衡量标准, 综合考虑工作频率和光斑大小等与林业遥感反演密切相关的工作参数设定。

全波形探测体制发展较为成熟, GDEI 和 MOLI 都是该体制在 GLAS 系统后的进一步发展。除了增加地面覆盖率, 布设在 ISS 上, 可以增加激光雷达作为主动有源遥感技术的稳定性。随着 ATLAS 数据的发布, 光子探测技术将提供高覆盖率大量观测数据, 其在林业应用中的效能将得到验证。后续发展将聚焦在两种探测体制数据融合提升反演精度, 和激光雷达可靠性设计, 提升数据量化应用的稳定性。

激光雷达主要提供森林空间离散的垂直结构信息, 在实际应用中, 一般需要与可见光和 SAR 数据联合实现连续的森林观测。在森林遥感反演方法中, 一般也需要多种数据融合分析。这需要提升激光雷达数据的稳定性和可靠性, 如定位精度等, 增强与其他数据空间匹配程度, 给数据融合提供良好基础。

#### 参考文献:

- [1] Lefsky M A, Cohen W B, Acker S A, et al. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir western hemlock forests [J]. *Remote Sens Environ*, 1999, 70: 339-361.
- [2] Wulder M A, White J C, Stinson G, et al. Implications of differing input data sources and approaches upon forest carbon stock estimation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 166(1-4): 543-561.
- [3] Duncanson L I, Niemann K O, Wulder M A. Integration of GLAS and Landsat TM data for aboveground biomass estimation [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(2): 129-141.
- [4] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The ice, cloud, and land elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.
- [5] Xie D, Li G, Zhao Y, et al. U. S. GEDI space-based laser altimetry system and its application [J]. *Space International*, 2018, 480(12): 41-46. (in Chinese)
- [6] Singh U N, Sugimoto N, Jayaraman A, et al. Lidar remote sensing for envirmonitoringXV-Overview and status of vegetation lidar mission MOLI[C]//Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XV. Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XV, 2016: 987908.
- [7] Abshire J B, Smith J C, Schutz B E. The geoscience laser altimeter system (GLAS)[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 1998, 420(1): 33-37.
- [8] Sun G, Ranson K J, Kimes D S, et al. Forest vertical structure from GLAS: An evaluation using LVIS and SRTM data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 107-117.
- [9] Lefsky M A, Harding D J, Keller M, et al. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22): L22S02.
- [10] Pang Y. Forest parameters inversion using spaceborne InSAR and Lidar technology[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2005.(in Chinese)
- [11] Xing Y, Gier A D, Zhang J, et al. An improved method for estimating forest canopy height using ICESat-GLAS full waveform data over sloping terrain: A case study in Changbai mountains, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(5): 385-392.
- [12] Chi H, Huang J, Qiu J, et al. Estimation of forest above ground biomass using ICESat/GLAS data and Landsat/ETM+ imagery [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43: 9-16. (in Chinese)
- [13] Hieu D, Norbert P, Roderik L. Full waveform analysis: ICESat laser data for land cover classification[C]//Proceedings of the ISRRS Mid-term Symposium, Remote Sensing: From Pixels to

- Processes, 2006: 8-11.
- [14] Duong V H, Lindenbergh R, Pfeifer N, et al. Single and two epoch analysis of ICESat full waveform data over forested areas [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(5): 1453-1473.
- [15] Zhang J, De Gier A, Xing Y, et al. Full waveform-based analysis for forest type information derivation from large footprint spaceborne lidar data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2011, 77(3): 281-290.
- [16] Wang R, Xing Y, You H, et al. Forest basal area estimation based on spaceborne LiDAR waveform Data [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(5): 156-162. (in Chinese)
- [17] Harding D J, Carabajal C C. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 741-746.
- [18] Neuenschwander A L, Urban T J, Gutierrez R, et al. Characterization of ICESat/GLAS waveforms over terrestrial ecosystems: Implications for vegetation mapping [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: G02S03.
- [19] Luo S, Wang C, Xi X, et al. Forest leaf area index estimation using combined ICESat/GLAS and optical remote sensing image [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2015, 34(2): 243-249. (in Chinese)
- [20] Stysley Paul R, Barry Coyle D, Kay Richard B, et al. Long term performance of the high output maximum efficiency resonator (HOMER) laser for NASA's global ecosystem dynamics investigation (GEDI) lidar [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 68: 67-72.
- [21] Montesano P M, Rosette J, Sun G, et al. The uncertainty of biomass estimates from modeled ICESat-2 returns across a boreal forest gradient [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 95-109.
- [22] Neuenschwander A, Pitts K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 247-259.
- [23] Zhang J, Kerekes J. An adaptive density-based model for extracting surface returns from photon-counting laser altimeter data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 12(4): 726-730.
- [24] Nie S. Study on the estimation method of forest canopy parameters using LiDAR data[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science(Institute of Remote Sensing and Digital Earth), 2017.(in Chinese)
- [25] Huang J, Xing Y, You H, et al. Particle swarm optimization-based noise filtering algorithm for photon cloud data in forest area [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 980.
- [26] Nie S, Wang C, Xi X. Estimating the vegetation canopy height using micro-pulse photon-counting LiDAR data [J]. *Optics Express*, 2018, 26: 520-540.
- [27] Popescu S C, Zhou T, Nelson R. Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 154-170.