

## ICESat-2/ATLAS 数据反演林下地形精度验证

黄佳鹏<sup>1</sup>, 邢艳秋<sup>1</sup>, 秦磊<sup>1</sup>, 夏婷婷<sup>2</sup>

(1. 东北林业大学 森林作业与环境研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150000;  
2. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘要:** 针对星载激光雷达数据反演林下数字地面模型 (Digital Terrain Model, DTM) 存在困难的问题, 研究了冰云陆地高程卫星-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite, ICESat-2)/先进地形激光高度计系统 (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS) 的强弱光束数据反演林下地形的精度, 并探究了冠层高度及植被覆盖率对于 ICESat-2/ATLAS 反演林下 DTM 精度的影响。研究表明: 强光束反演林下 DTM 的精度为  $R^2=1$ ,  $RMSE=0.74$  m, 弱光束反演林下 DTM 的精度为  $R^2=1$ ,  $RMSE=0.76$  m, 强光束相对弱光束表现出更优的反演精度, 但是, 强光束与弱光束的光子云数据均可为反演林下 DTM 提供科学数据。从研究区植被的整体情况来看, 随冠层高度及植被覆盖率的增加, 不同激光类型数据均出现误差逐步增加的情况。

**关键词:** ICESat-2/ATLAS; 强光束; 弱光束; 林下数字地面模型; 冠层高度  
**中图分类号:** S75      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200237

## Accuracy verification of terrain under forest estimated from ICESat-2/ATLAS data

Huang Jiapeng<sup>1</sup>, Xing Yanqiu<sup>1</sup>, Qin Lei<sup>1</sup>, Xia Tingting<sup>2</sup>

(1. Centre for Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150000, China)

**Abstract:** In view of the difficulties in retrieving Digital Terrain Model (DTM) with the spaceborne lidar data, the terrain elevation estimation accuracy of Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2)/Advanced Terrain Advanced topographic laser altimeter system (ATLAS) strong and weak beam data under the forest was studied, and the effect of canopy height and vegetation coverage on ICESat-2/ATLAS estimation accuracy of DTM was explored. The results show that the accuracy of DTM under the forest with strong beam estimation accuracy is  $R^2=1$ ,  $RMSE=0.74$  m, and that with weak beam estimation accuracy is  $R^2=1$ ,  $RMSE=0.76$  m. The performance of the strong beam estimation accuracy performed better than that of the weak beam, but both the photon cloud data of the strong beam and the weak beam can provide scientific data for estimating the DTM under the forest. In the study area, with the increase of the canopy height and vegetation coverage, the error of

收稿日期:2020-06-09; 修订日期:2020-07-10

基金项目:国家重点研发计划 (2017YFD060090402); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572019AB18); 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室项目 (KLSMTA-201706)

作者简介:黄佳鹏 (1993-), 男, 博士生, 主要从事星载激光雷达理论和应用方面的研究。Email: huangjp@nefu.edu.cn

导师简介:邢艳秋 (1970-), 女, 教授, 博士, 主要从事林业遥感应用方面的研究。Email: yanqiuqing@nefu.edu.cn

different laser types data gradually increases.

**Key words:** ICESat-2/ATLAS; strong beam; weak beam; digital terrain model under the forest; canopy height

## 0 引言

截止 2018 年年底,全球森林总面积为 38.15 亿  $\text{hm}^2$ , 约占全球陆地总面积的 25.60% (按全球陆地面积 149 亿  $\text{hm}^2$  计算)<sup>[1]</sup>, 故林下数字地面模型 (Digital Terrain Model, DTM) 是构建全球 DTM 模型的重要部分<sup>[2]</sup>。为获取全球范围内的大尺度、多时相数据, 通常选择卫星观测数据作为主要研究对象<sup>[3-4]</sup>。不同于光学卫星遥感技术及微波卫星遥感技术反演林下地形过程中易受云层及森林信号饱和的影响, 卫星激光测高技术可以获取分米级甚至厘米级的林下 DTM 数据<sup>[5-7]</sup>。

目前为止, 全球共有 4 个已经成功发射的以激光测高技术为主载荷的对地观测卫星, 分别为: 冰云陆地高程卫星 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite, ICESat)/ 地学激光高度计系统 (Geoscience Laser Altimeter System, GLAS), ICESat-2/先进地形激光高度计系统 (Advanced Topographic Laser Altimeter System, ATLAS), 高分七号 (GF-7) 和全球生态系统动力学研究卫星 (Global Ecosystem Dynamics Investigation, GEDI)。其中, ICESat, GF-7, GEDI 均以线性体制的波形方式记录激光测高数据, 而 ICESat-2 是以光子计数方式记录激光测高数据。基于 ICESat/GLAS 数据已经分别完成不同类型 DTM 数据的反演研究。其中, Wang、Nie、Lamsters 等将 ICESat/GLAS 数据应用于冰川的 DTM 数据反演, 并得出 ICESat/GLAS 数据与实测值具有较高相关性<sup>[8-10]</sup>。Li 等<sup>[11]</sup> 讨论了 ICESat/GLAS 数据与全球先进陆地观测卫星 (Advance Land Observing Satellite, ALOS) 的 ALOS world 3D-30 m (AW3D30)、航天飞机雷达地形任务 (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) 的 SRTM1 数据及 Global DEM version 2(GDEM2) 的相关性, 通过试验证明, 3 种数据存在明显相关性, 其中, AW3D30 相关性最高, RMSE 为 4.81 m。Yang 等<sup>[12]</sup> 利用 ICESat/GLAS 波形数据量化了地形坡度, 试验结果表明: ICESat/GLAS 数据反演地面坡度的精度分别为  $R^2=0.83$ ,  $RMSE=3.6^\circ$ 。Irfan 等<sup>[13]</sup> 利用 ICESat/GLAS 数据完成森林冠层高度

信息反演研究, 通过试验结果证明 ICESat/GLAS 数据可解释研究区内的 79% 冠层高度数据, 且 ICESat/GLAS 数据可用于反演林下地形。但是, 由于森林区域波形数据的特性, 使得如何利用星载波形数据正确获取林下 DTM 数据存在困难。故利用 ICESat/GLAS 数据反演的 DTM 研究更多集中于非林下的 DTM 探究, 因此如何利用星载激光雷达数据反演林下 DTM 将是星载激光波形数据应用的主要难点<sup>[9, 14]</sup>。由于 ICESat-2/ATLAS 采用不同于 ICESat/GLAS 的光子计数形式记录激光数据, 所以探究光子数据反演林下 DTM 数据精度对于星载激光雷达数据应用具有重要意义。Neuenschwander 等<sup>[15]</sup> 通过试验证明, 芬兰林区机载激光雷达数据反演的林下 DTM 与对应的 ICESat-2/ATLAS 数据之间存在良好的相关性 ( $R^2=0.99$ ,  $RMSE=0.85$  m)。Wang 等<sup>[16]</sup> 通过试验证明在阿拉斯加林区, ICESat-2/ATLAS 数据与机载激光雷达获取的 DTM 之间存在良好相关性 ( $R^2=0.99$ ,  $RMSE=1.96$  m)。与 ICESat/GLAS 采用的单波束激光发射方式不同, ICESat-2/ATLAS 采用 3 对 6 波束 (每对激光束由一强一弱激光束组成, 强弱光束能量比为 4 : 1) 的激光发射方式, 而以上针对 ICESat-2/ATLAS 数据的研究均以其强光束类型数据作为主要研究对象, 并未分析 ICESat-2/ATLAS 弱光束数据反演林下 DTM 的精度<sup>[17-18]</sup>。

为探究 ATLAS/ICESat-2 强、弱光束数据反演林下 DTM 的精度, 研究拟以 ATL03、ATL08 数据作为研究对象, 探究 ICESat-2/ATLAS 的强、弱光束数据反演林下 DTM 的精度, 并讨论不同冠层高度及植被覆盖率对于 ICESat-2/ATLAS 数据反演林下 DTM 的精度影响。

## 1 研究材料

### 1.1 研究区

研究选择的研究区位于美国的南卡罗莱纳州 Aiken 郡, 其经纬度范围为 ( $33.56^\circ\text{N}\sim 33.78^\circ\text{N}$ ,  $81.69^\circ\text{W}\sim 81.73^\circ\text{W}$ ), 如图 1 所示。Aiken 郡位于南卡罗莱纳州西南部, 属于亚热带季风湿润气候。研究区内植被类

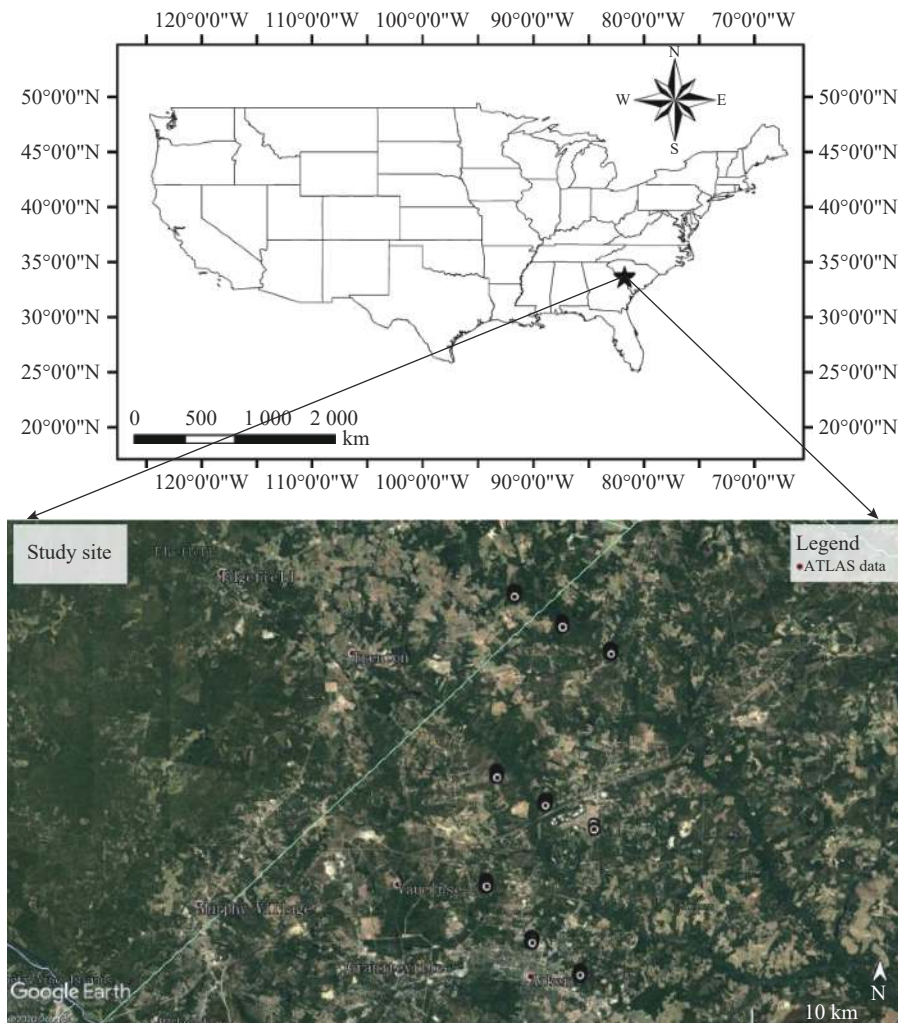


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of study area

型包括:耕地(0.04%)、森林(88.52%)、灌木(0.51%)、湿地(6.97%)、人工地表(3.95%)<sup>[19]</sup>。研究区林下地形缓坡居多,海拔范围为 91~164 m。植被覆盖率范围为 25%~66%,大部分足印覆盖区的植被覆盖率为 36%(29.5%), 66%(26.2%)<sup>[20]</sup>。冠层高度范围为 0.1~34.8 m。

## 1.2 研究数据

### 1.2.1 ICESat-2 数据

ICESat-2 采用的激光发射频率为 10 kHz,结合 ICESat-2 的卫星轨道高度及卫星运动速度可知,ICESat-2 的足印直径约为 17 m,沿轨足印间距 0.7 m。每对波束垂轨间距约为 3 km,每对波束内强弱光束垂轨方向间距约为 90 m,沿轨方向间距约为 2.5 km。ATLAS 数据足印分布形式如图 2 所示<sup>[17]</sup>。

根据美国国家冰雪数据中心(National Snow and

Ice Data Center, NSIDC) 公布的 ICESat-2 数据产品形式,ICESat-2 有 3 种级别共 21 种产品,分别为 ATL01~ATL21,文件均采用 hdf5 文件格式存储数据。其中与林下 DTM 相关的数据产品包括:ATL03、ATL08。其中 ATL03 为全球定位光子数据产品(Global Geolocated Photon Data),ATL03 产品包括每个光子事件的时间、纬度、经度和高程信息。在 ATL03 文件中,每个光子采用 2 种索引方法,一种是按照光子的传输时间顺序进行编号,称为光子数据传输时间序号,光子数据的经纬度、高程等信息按照该序号被记录在 ATL03/gtx/heights 组内。另一种索引方式为按沿轨距离每 20 m 划分为一个区段,并按区段进行数据处理生成 ATL08 级数据。对各组区段依次进行编号,称为区段号,参数名称为 segment\_id,每组区段的起始光子序号参数名称为 ph\_index\_beg。

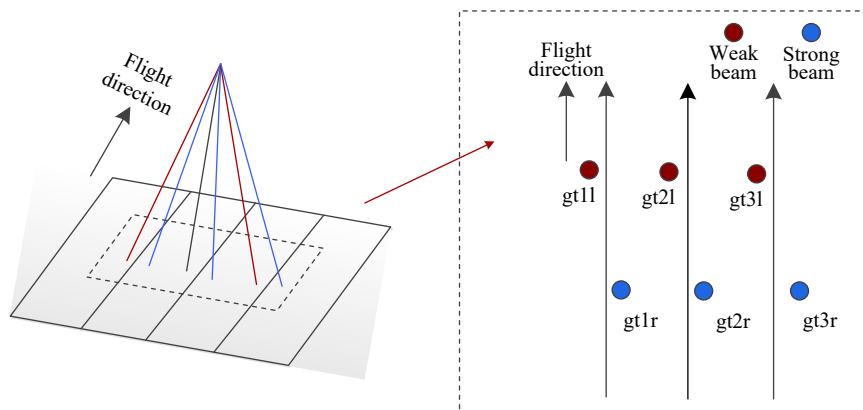


图 2 ATLAS 数据示意图<sup>[17]</sup>

Fig.2 Schematic of ATLAS data

ATL08 为陆地植被数据产品 (Land and Vegetation Height), ATL08 产品为利用差分、回归和高斯自适应最近邻 (Differential, Regressive, and Gaussian Adaptive Nearest Neighbor, DRAGANN) 对 ATL03 数据进行去噪, 并利用 NASA 官方分类算法完成光子云的分类, 将光子云划分为冠层顶光子、冠层光子、地面光子和噪声光子<sup>[15]</sup>, 光子分类参数名称为: classed\_pc\_flag, ATL08 数据的光子分类参数为按 ATL03 文件的 20 m 区段进行储存, 光子分类参数区段号的参数名称为 ph\_segment\_id, 区段内相对序号的参数名称为 classed\_pc\_indx. 研究使用的 ATL03、ATL08 数据均可在网站 <https://search.earthdata.nasa.gov> 下载。

### 1.2.2 G-LiHT 数据

为确定研究区范围, 利用机载激光雷达 (Goddard's LiDAR, Hyperspectral Thermal Imager, G-LiHT) 公布的机载轨迹标记语言 (Keyhole Markup Language, KML) 文件联合 ATL03 文件的卫星运行轨迹, 确定两数据重合位置, 作为研究区。为验证 ATLAS 数据反演林下 DTM 的精度, 研究选择 G-LiHT 数据发布的数字地面模型 (DTM)、冠层高度模型 (Canopy Height Model, CHM) 产品作为验证数据。该类数据的分辨率为 1 m, 数据格式为 TIFF。研究使用的 G-LiHT 相关数据来自于 <https://glihtdata.gsfc.nasa.gov>。

### 1.3 研究方法

为探究 ATLAS 强、弱光束数据反演林下 DTM 精度, 研究选择对 ATL03、ATL08 数据进行关联, 着重探究 ATL08 标定的 ATL03 中的林下地面光子与 G-LiHT 的 DTM 数据的关系。研究方法流程如图 3

所示, 研究主要包括以下步骤:

(1) 根据 ATLAS 轨道范围结合 G-LiHT 的 KML 文件, 选择 ATLAS 轨道与 G-LiHT 轨迹重合区域作为研究区。

(2) 提取 ATL03 数据产品中光子云数据的经度 (lat\_ph)、纬度 (lon\_ph)、高程 (h\_ph) 和大地水准面改正信息 (geoid)。由于光子云数据为基于 WGS84 坐标系, 需将光子云高程信息减去大地水准面改正信息获得带有大地水准面改正信息的光子高程数据。研究使用的 ATL03 文件与 ATL08 文件中的参数汇总如表 1 所示。

(3) 通过 ATL03 数据产品中光子云数据的经纬度信息获取对应 G-LiHT 的 DTM 数据和 CHM 数据作为验证数据, 如图 4 所示。图 4(a)、4(b) 分别为 ATL03 数据与对应研究区 G-LiHT 的 DTM 数据和 CHM 数据重合示意图。图中红色轨迹为 gt2r 轨迹, 绿色轨迹为 gt2l 轨迹。图中 ATLAS 文件名为: ATL03\_201812\_26053112\_13530106\_001\_01.h5, G-LiHT 的 DTM、CHM 文件名分别为: AMIGACarb\_Augusta\_FIA\_Sep2011\_147s557\_DTM.tif、AMIGACarb\_Augusta\_FIA\_Sep2011\_147s557\_CHM.tif。

(4) 提取 ATLAS 数据产品中的光子分类参数 (classed\_pc\_flag), 关联参数 (segment\_id, ph\_index\_beg, classed\_pc\_indx, ph\_segment\_id)。关联方式为: 遍历 ATL03、ATL08 的光子云数据, 通过 ATL03 中的 segment\_id 与 ATL08 中的 ph\_segment\_id 匹配两数据文件相同区段, 获得该组的起始光子序号 (ph\_index\_beg), 光子的相对序号 (classed\_pc\_indx) 与所在

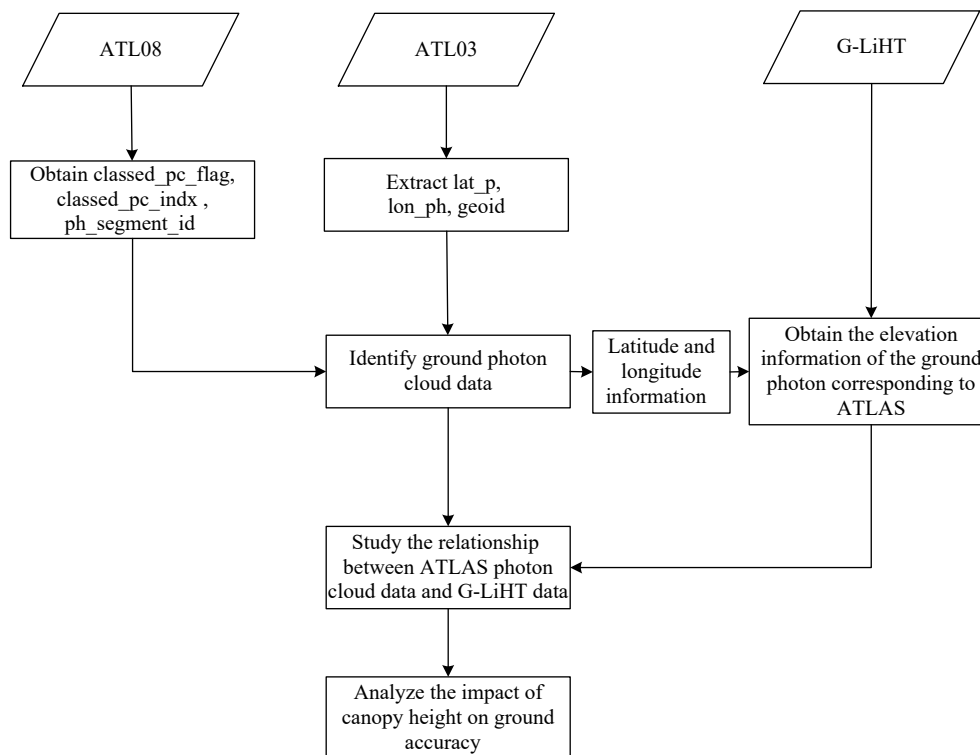


图 3 研究流程图

Fig.3 Research flow chart

表 1 研究使用的 ATLAS 参数

Tab.1 ATLAS parameters used in the paper

Parameters	Description of parameters	Source of parameters
lat_ph	Latitude of each received photon	ATL03/gtx/heights/lat_ph
lon_ph	Longitude of each received photon	ATL03/gtx/heights/lon_ph
h_ph	Height of each received photon	ATL03/gtx/heights/h_ph
geoid	Geoid height above WGS-84 reference ellipsoid	ATL03/gtx/geophys_corr/geoid
segment_id	A 7 digit number identifying the along-track geolocation segment number	ATL03/gtx/geolocation/segment_id
ph_index_beg	Index (1-based) within the photon-rate data of the first photon within this segment	ATL03/gtx/geolocation/ph_index_beg
classed_pc_flag	Land vegetation ATBD classification flag for each photon as either noise, ground, canopy, and top of canopy. 0=noise, 1=ground, 2=canopy, or 3=top of canopy	ATL08/gtx/signal_photons/classed_pc_flag
classed_pc_indx	Index (1-based) of the ATL08 classified signal photon from the start of the ATL03 geolocation segment specified on the ATL08 product at the photon rate in the corresponding parameter, ph_segment_id	ATL08/gtx/signal_photons/classed_pc_indx
ph_segment_id	Segment ID of photons tracing back to specific 20 m segment_id on ATL03	ATL08/gtx/signal_photons/ph_segment_id

组的起始光子序号相加,可得到其在 ATL03 文件中光子数据传输时间序号,即光子数据传输时间序号<sup>[21]</sup>。由此,可将 ATL08 中的光子分类参数与 ATL03 中的光子数据经纬度及高程进行关联,按照 ATL08 的分类参数确定 ATL03 光子云数据中的地面光子。

(5) classed\_pc\_flag 为 ATL08 产品官方提供的 NASA 官方的光子云数据的分类参数, classed\_pc\_

flag 的值可能为 0、1、2、3,分别对应噪声光子,地面光子,冠层光子,冠层顶光子。研究选择利用 classed\_pc\_flag=1 即 ATL08 分类为地面的光子作为研究使用的林下地面光子。ATL03 与 ATL08 数据反演林下地形结果如图 5 所示。图 5(a)、5(b) 分别为 ATLAS 的弱光束与强光束对应的反演林下地形示意图,其中红色点为 ATL03 的数据,蓝线曲线为带有 ATL08 分类

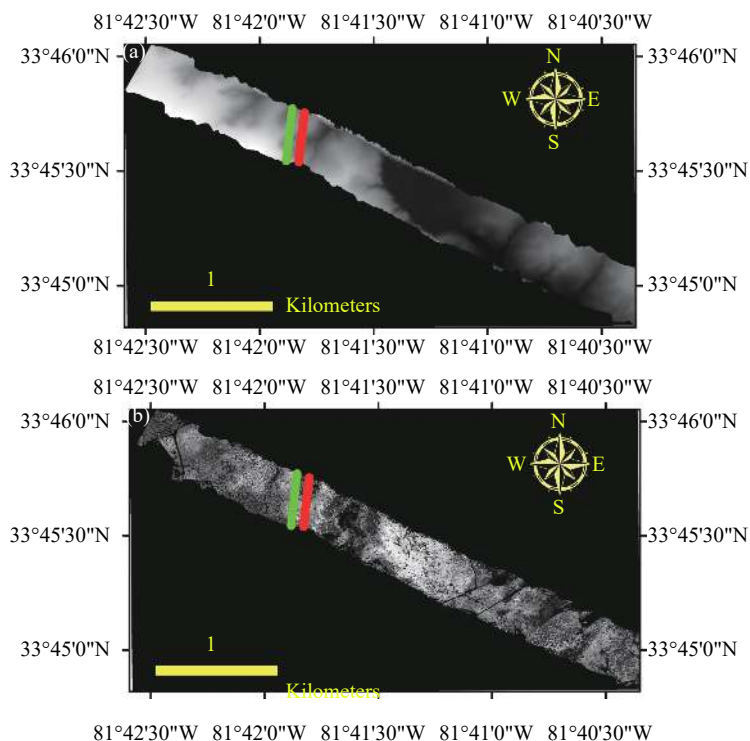


图 4 ATLAS 数据与 G-LiHT 数据重叠示意图

Fig.4 Schematic diagram of overlap between ATLAS data and G-LiHT data

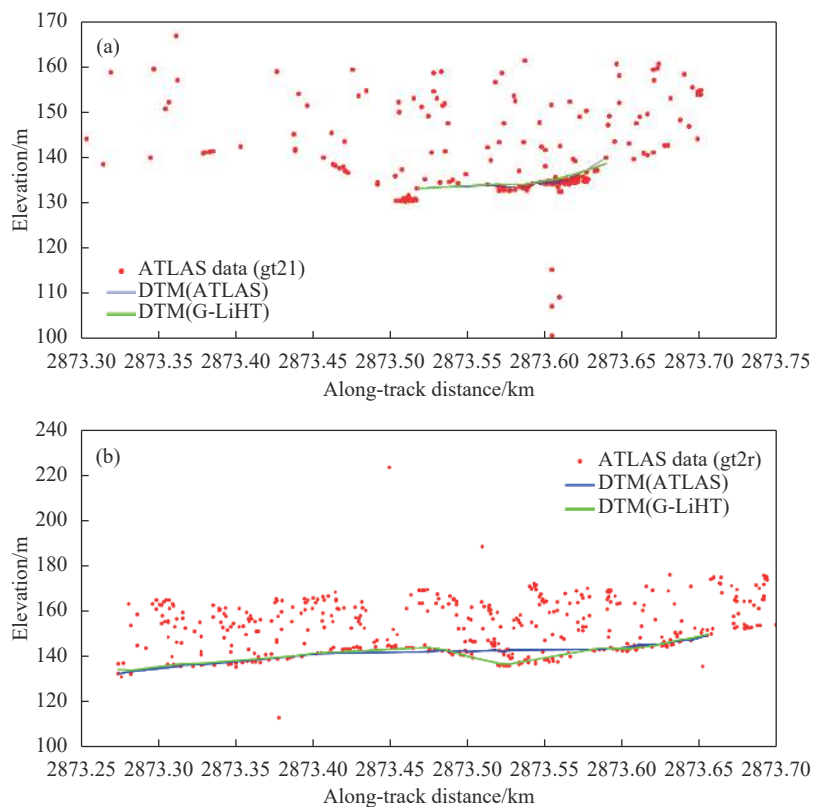


图 5 ATLAS 与 G-LiHT 数据反演林下地形示意图

Fig.5 Schematic diagram of ground elevation under forest by using ATLAS and G-LiHT data

参数的 ATLO3 光子数据所生成的 DTM, 绿线曲线为 G-LiHT 数据所生成的 DTM。

(6) 比较分析 ATLO3 产品中的地面光子与机载 G-LiHT 数据对应 DTM 数值的对应关系。若地面光子的高度与机载 G-LiHT 数据相应高度之间的绝对差大于 20 m, 则认为该光子被错误分类并剔除该光子。

(7) 为探究不同冠层高度及植被覆盖率对于 ATLAS 强、弱激光束反演林下 DTM 的影响程度, 研究选择以 G-LiHT 数据的 CHM 数据作为冠层高度验证数据, 并以 5 m 为间隔, 将研究区足印覆盖的冠层高度分为: 0~5 m, 6~10 m, 11~15 m, 16~20 m, 大于 21 m, 统计不同冠层区段内, 两种数据反演林下 DTM 相关性评价数据。

1.4 精度评价标准

为评价 ATLAS 产品的地面光子高程与机载 G-LiHT 产品中的 DTM 数据的关系。研究选择统计了

两种数据的均方根误差 (RMSE), 绝对平均误差 (MAE), 决定系数 ( $R^2$ ), 平均误差 (ME) 定量评价两种数据之间的关系。为探究不同冠层高度对于 ATLAS 数据反演林下 DTM 的影响程度, 研究拟计算了 ATLAS 地面光子高程减去机载 G-LiHT 的对应高程数据, 得到对应的高程误差, 并统计不同冠层高度内, 两组数据的误差统计指标 (RMSE、MAE、 $R^2$ 、ME、不同冠层高度数量占比 (N)、pearson 相关系数、spearman 相关系数、kendall 相关系数), 不同冠层高度内对应的高程误差及植被覆盖率。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

为探究强弱激光类型的 ATLAS 数据反演林下 DTM 精度, 统计了强弱激光类型的 ATLAS 数据反演林下 DTM 精度如表 2 所示, 散点图如图 6 所示。

表 2 不同激光类型条件下 ATLAS 数据反演精度统计

Tab.2 Estimation accuracy statistics of ATLAS data under different laser types

Different laser intensities types	RMSE/m	MAE/m	$R^2$	ME/m
Weak beam	0.76	0.54	1.00	0.33
Strong beam	0.74	0.51	1.00	0.27
Mean of different laser intensities types	0.75	0.53	1.00	0.30

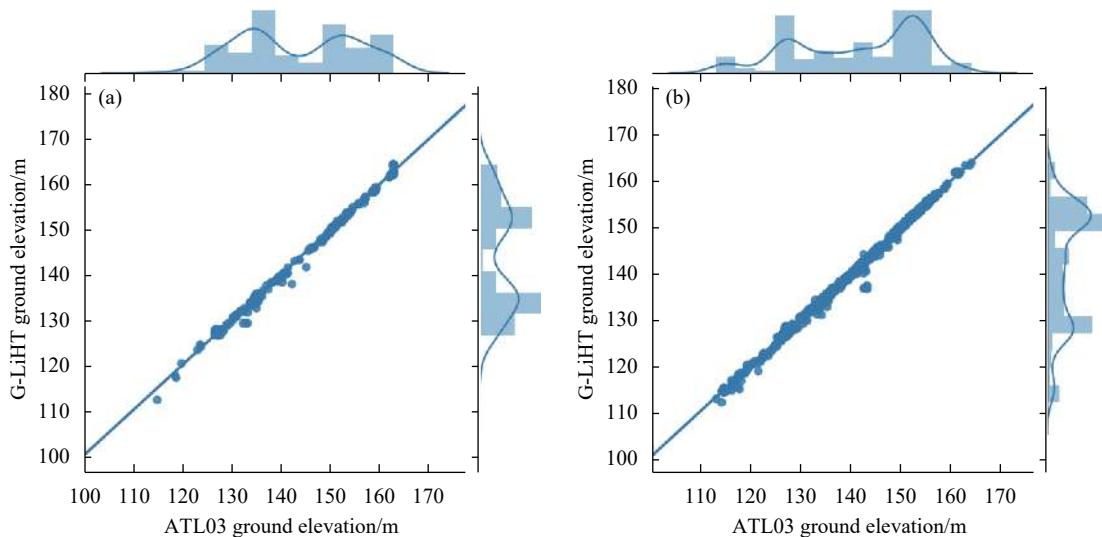


图 6 不同激光类型条件下 ATLAS 数据与 G-LiHT 数据散点图。(a) 弱波束; (b) 强波束

Fig.6 Scatter diagram of ATLAS data and G-LiHT data under different laser types. (a) Weak beam; (b) Strong beam

试验结果的定量结果如图 6 及表 2 所示。其中,  $R^2$  值均为 1, 说明 ATLO3 数据反演的林下 DTM 数据

与机载 G-LiHT 的林下 DTM 高度一致。ATLAS 数据的 RMSE 平均值和 MAE 平均值分别为 0.75 m 和 0.53 m。

强、弱光束条件下, *RMSE* 分别为 0.74 m、0.76 m, *MAE* 分别为 0.51 m、0.54 m。研究结果显示, 该研究的强弱光束反演结果相对参考文献 [15-16] 表现出更高的  $R^2$ , 与更低的 *RMSE*、*MAE*。试验结果显示, 该研究中强光束类型相对弱光束类型表现出更优的反演精度。试验结果表明, 激光强度对于 ATLAS 数据反演林下 DTM 存在影响, 由于强、弱波束类型的标定激光发射强度比为 4 : 1<sup>[18]</sup>, 当测量同一类植被类型时, 强波束类型可以获得更多的光子数据, 用以描述被测地物, 但是

此次研究结果表明两种激光波束都可以为反演林下 DTM 提供科学数据。

### 2.2 冠层高度影响因素分析

为探究冠层高度对于 ATLAS 强、弱激光束反演林下 DTM 的影响程度, 统计不同冠层高度条件下强、弱波束数据反演精度评价标准及植被覆盖情况如表 3 所示, 其中表 3 中的植被覆盖率为该区段冠层高度情况下覆盖占比最大的植被覆盖率<sup>[20]</sup>。不同冠层高度条件下两组数据误差的箱形图如图 7 所示。

表 3 不同冠层高度条件下强、弱波束数据反演精度统计

Tab.3 Estimation accuracy statistics of strong beam and weak beam data under different canopy heights

Canopy heights/m	<i>RMSE</i> /m	<i>MAE</i> /m	$R^2$	<i>ME</i> /m	<i>N</i>	pearson	spearman	kendall	Vegetation coverage
0-5	0.49/0.90	0.41/0.57	1.00/0.99	0.33/0.32	21.39%/20.48%	1.00/1.00	1.00/0.99	0.95/0.93	27%(28.5%)/25%(35.7%)
6-10	0.47/0.50	0.41/0.38	1.00/1.00	0.29/0.25	22.37%/24.34%	1.00/1.00	1.00/0.99	0.97/0.94	27%(33.0%)/66%(36.4%)
11-15	0.52/0.82	0.42/0.68	1.00/0.99	0.33/0.56	27.20%/33.01%	1.00/1.00	1.00/0.99	0.96/0.94	36%(30.4%)/66%(61.8%)
16-20	0.66/0.97	0.47/0.76	1.00/0.99	0.35/0.50	13.28%/11.57%	1.00/1.00	0.99/0.94	0.93/0.84	36%(50.0%)/66%(51.0%)
21-	1.25/0.66	0.99/0.58	0.98/0.98	0.77/0.41	15.76%/10.60%	0.99/1.00	0.84/0.68	0.67/0.52	36%(42.0%)/40%(30.9%)

注: 表格中数据分别为强波束数据/弱波束数据的精度统计数据

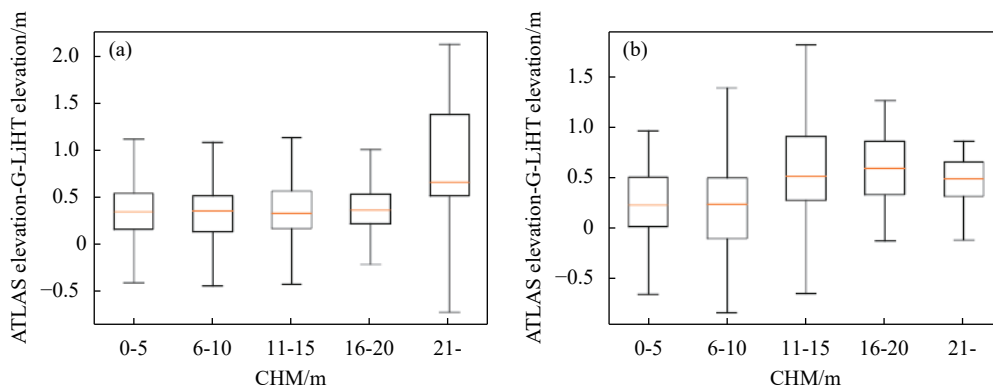


图 7 不同冠层高度条件下 ATLAS 数据反演精度。(a) 强波束; (b) 弱波束

Fig.7 Estimation accuracy of ATLAS data under different canopy height conditions. (a) Strong beam; (b) Weak beam

由于研究区处于亚热带季风湿润气候, 森林冠层高度范围为 0~34.8 m, 故研究选择将植被冠层高度值分为 5 组, 每组间隔 5 m, 如表 3 中 *N* 所示每组冠层高度数据分布较为平均。

表 3 中统计了各冠层高度区段内占比最高的植被覆盖率, 由表 3 植被覆盖率情况可知, 从研究区冠层高度整体变化趋势来看, 随着冠层高度的增加, 植被覆盖率也随之增加。但是, 在弱光束冠层高度大于 21 m 的情况下, 出现了植被覆盖率降低的情况。

由表 3 可知, 从不同统计指标的整体变化趋势来

看, 在研究区冠层高度内, 随冠层高度及植被覆盖率的增加, 强波束激光束的 *MSE*、*MAE*、*ME* 也逐步增加。不同类型相关系数随植被冠层高度及植被覆盖率的增加, 出现冠层高度与高程误差的相关性逐步降低的情况, 该情况与参考文献 [16] 表现类似。其原因可能是由于随植被冠层高度及植被覆盖率的增加, ICESat-2/ATLAS 发射的光子通过森林植被进而撞击地表和经过地表反射回 ICESat-2 接收器的概率降低, 进而造成较大的高程误差。

由表 3 还可知, 在研究区冠层高度范围为 6~20 m 的



情况下,虽然主要植被覆盖率保持在 66%,但是随冠层高度的增加,弱波束激光束的 MSE、MAE、ME 逐步增加。不同类型相关系数随植被冠层高度的增加,出现冠层高度与高程误差的相关性逐步降低的情况。其原因可能是由于随冠层高度的增加,地表反射回 ICESat-2 接收器的概率降低。这种情况表明,即使在植被覆盖率一定的情况下,随冠层高度的增加,误差也会随之增大。在冠层高度范围为 0~5 m 的条件下,出现 RMSE 与 MAE 不符合强波束激光类型的变化情况,其原因可能是由于弱激光束能量相对较低,在冠层高度为 0~5 m 的情况下,ICESat-2/ATLAS 的光子较少,地面信号光子与冠层信号光子距离较近,难以通过 ATL08 的分类算法区分冠层信号光子与地面光子,故出现较大误差。在研究区冠层高度大于 21 m 的情况下,出现 RMSE 与 MAE 不符合误差随冠层高度增加而增加的情况,综合考虑冠层高度与植被覆盖率可知,虽然冠层高度增加,但是植被覆盖率出现降低情况,这种情况表明,冠层植被覆盖率也是影响光子云数据反演林下地形的一个重要因素。

### 3 结 论

为探究 ICESat-2/ATLAS 不同激光类型数据反演林下 DTM 的精度,以美国 Aiken 郡的林区作为研究区,以 G-LiHT 数据作为验证数据,分析了 ICESat-2/ATLAS 的不同激光类型数据的反演精度,并着重讨论了冠层高度及植被覆盖率对于反演精度的影响得出以下结论:

(1) 研究结果显示,强波束反演精度为  $R^2=1$ ,  $RMSE=0.74$  m,弱波束反演精度为  $R^2=1$ ,  $RMSE=0.76$  m。虽然强波束反演林下 DTM 的精度表现优于弱波束,但是,强光束与弱光束的数据均可作为反演林下 DTM 提供科学数据。

(2) 从研究区植被整体情况来看,随冠层高度及植被覆盖率的增加,ICESat-2/ATLAS 的不同激光类型数据均出现误差逐步增加的情况。

总体而言,研究针对 ATLAS 反演林下地面高程进行了初步探索,并探讨了冠层高度对地面高程误差的影响,这将为 ATL03 数据反演林下地面高程提供基础。但是,该研究主要分析了冠层高度对于 ATLAS 数据反演林下地面高程的影响,下一步的研究重点为

植被覆盖率、森林类型等因素对于 ATLAS 数据反演林下地形的影响。

### 参考文献:

- [1] Long Tengfei, Zhang Zhaoming, He Guojin, et al. 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google earth engine [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 489.
- [2] Puliti S, Hauglin M, Breidenbach J, et al. Modelling above-ground biomass stock over Norway using national forest inventory data with ArcticDEM and Sentinel-2 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111501.
- [3] Sarma C P, Dey A, Krishna A M. Influence of digital elevation models on the simulation of rainfall-induced landslides in the hillslopes of Guwahati, India [J]. *Engineering Geology*, 2020, 268: 105523.
- [4] Daniela A, Ranjith G, Mikko K, et al. A method for vertical adjustment of digital aerial photogrammetry data by using a high-quality digital terrain model [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 84: 101954.
- [5] Ai H, Kentaro T, Ram A, et al. Synthesis of L-band SAR and forest heights derived from TanDEM-X DEM and 3 digital terrain models for biomass mapping [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 349.
- [6] Ma Yue, Yang Fanlin, Wang Mingwei, et al. Calculation of elevation changing of Greenland's ice sheet using GLAS laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 65-69. (in Chinese)  
马跃, 阳凡林, 王明伟, 等. 利用 GLAS 激光测高仪计算格陵兰冰盖高程变化[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 65-69.
- [7] Li Guoyuan, Tang Xinming, Fan Wenfeng, et al. On-orbit geometric calibration of satellite laser altimeter using ground-based IR detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1117004. (in Chinese)  
李国元, 唐新明, 樊文锋, 等. 基于地面红外探测器的星载激光测高仪在轨几何定标[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1117004.
- [8] Wang Xianwei, David M Holland, Gudmundsson G Hilmar, et al. Accurate coastal DEM generation by merging ASTER GDEM and ICESat/GLAS data over Mertz Glacier, Antarctica [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 218-230.
- [9] Nie Sheng, Wang Cheng, Dong Pinliang, et al. A novel model for terrain slope estimation using ICESat/GLAS waveform

- data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 50, 1: 217-227.
- [10] Lamsters K, Karuss J, Krievans M, et al. High-resolution orthophoto map and digital surface models of the largest Argentine Islands (the Antarctic) from unmanned aerial vehicle photogrammetry [J]. *Journal of Maps*, 2020, 16(2): 335-347.
- [11] Li Hui, Zhao Jiayang. Evaluation of the newly released worldwide AW3D30 DEM over typical landforms of China using two global DEMs and ICESat/GLAS data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11: 4430-4440.
- [12] Yang Xuebo, Wang Cheng, Nie Sheng, et al. application and validation of a model for terrain slope estimation using spaceborne LiDAR waveform data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10: 1691.
- [13] Irfan A, Jadunandan D, Saleem U, et al. A novel approach to estimate canopy height using ICESat/GLAS data: A case study in the New Forest National Park, UK [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 109-118.
- [14] Yue Linwei, Shen Huanfeng, Zhang Liangpei, et al. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEMv2 and ICESat/GLAS observations [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 123: 20-34.
- [15] Neuenschwander A L, Magruder L A. Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: a first look [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1721.
- [16] Wang Cheng, Zhu Xiaoxiao, Nie Sheng, et al. Ground elevation accuracy verification of ICESat-2 data: a case study in Alaska, USA [J]. *Optics Express*, 2019, 27: 38168-38179.
- [17] Huang Jiapeng, Xing Yanqiu, You Haotian, et al. Particle swarm optimization-based noise filtering algorithm for photon cloud data in forest area [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 980.
- [18] Huang Jiapeng, Xing Yanqiu, Qin Lei, et al. Accuracy of photon cloud noise filtering algorithm in forest area under weak beam conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 164-172. (in Chinese)  
黄佳鹏, 邢艳秋, 秦磊, 等. 弱光束条件下森林区域光子云去噪算法精度研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 164-172.
- [19] Chen Jun, Cao Xin, Peng Shu, et al. Analysis and applications of GlobeLand30: A review [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(8): 230.
- [20] Hansen M, Song X P. Vegetation Continuous Fields (VCF) yearly global 0.05 deg [DB/OL]. [2020-08-10]<https://doi.org/10.5067/MEaSURES/VCF/VCF5KYR.001>.
- [21] Neuenschwander Amy, Pitts Katherine, Jelley Benjamin, et al. ICE, CLOUD, and Land Elevation Satellite (ICESat-2) algorithm theoretical basis document (ATBD) for land-vegetation along-track products [EB/OL]. [2020-01-15] <https://nsidc.org/data/atl08>.