

星载激光测高仪脚点坐标解算方法及机载验证*

韩晓爽, 潘 超, 刘宇哲, 王丽东, 戴学兵, 赵一鸣
(北京遥测技术研究所 北京 100094)

摘要:通过分析 ICESat-1 和 ICESat-2 测高载荷地面脚点坐标解算方法, 对比分析多波束、单光子体制对地激光三维测绘载荷与传统的单波束、全波形体制激光测高载荷在坐标解算方法上的异同, 机载与星载激光雷达坐标解算的异同, 建立机载激光雷达坐标解算方法与流程, 利用自主研发的机载激光雷达进行飞行试验与验证, 对后期机载、星载激光测高雷达激光脚点解算具有借鉴意义。

关键词: 激光测高; 坐标解算; 机载激光雷达; 联合定位

中图分类号: TN249 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)03-0011-10

Spaceborne laser altimeter footprint coordinate calculation method and airborne validation

HAN Xiaoshuang, PAN Chao, LIU Yuzhe, WANG Lidong, DAI Xuebing, ZHAO Yiming
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: By analyzing the ICESat-1 and ICESat-2 altimeter payloads, the similarities and differences in coordinate calculation methods between the multi-beam, single-photon system and the traditional single-beam, full-waveform system laser altimetric payloads, the similarities and differences between airborne and spaceborne LiDAR coordinate solving methods and processes are analyzed and compared, and the airborne LiDAR coordinate calculation methods and processes are established, and the independently developed airborne LiDAR is used for flight test and verification, which has reference significance for the later airborne and spaceborne laser altimeter footprint geolocation calculation.

Key words: Laser altimeter; Coordinate calculation; Airborne LiDAR

引 言

激光高度计卫星的研制已有近 30 年的发展历史。从 1994 年美国 NASA 首次将激光测高仪搭载在航天飞机进行对地观测探索开始, 火星轨道激光高度计 MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter)、搭载于 ICESat-1 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) 卫星的地球科学激光测高仪系统 GLAS (Geoscience Laser Altimeter System)、水星激光高度计 MLA (Mercury Laser Altimeter) 及月球轨道激光高度计 LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) 分别在陆地高程、森林、冰盖等探测中取得了丰富的成果。2018 年发射的 ICESat-2 卫星搭载更为先进的地形激光高度计载荷 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System), 率先采用 6 波束激光、微脉冲、单光子探测体制, 凭借其精确的测高能力, 在山岳、冰川及冰帽、地表地貌、河流及湖泊深度、近海水深、海洋潮汐、高纬地区大地水准面、海洋重力场等地球科学的多个领域均广泛应用。NASA 规划的最新一代星载全球高分辨率成像测绘激光雷达系统 LIST (Lidar Surface Topography) 采用线阵推扫模式, 具备多达 1000 束激光的探测能力, 可提供全球三维地形数据, 预计 2025 年发射。

多年来, 在国家各类项目的支持下, 我国星载激光雷达技术也得到了长足发展, 已经具有较深厚的技术储备。从“嫦娥”探月系列卫星上搭载的激光测高仪开始, 搭载了激光雷达载荷的“资源三号”02 星、“高分七号”已经分别于 2016 年和 2019 年成功发射并在轨应用, 搭载了星载多波束激光雷达载荷

*基金项目: 高分航空系统应用技术项目 (0403260309)

收稿日期: 2020-03-17

的“陆地生态系统碳监测卫星”也将于 2021 年发射, 实现对全球植被高度与大气分布的协同探测。多家单位研制的机载多波束三维成像激光雷达类载荷也开展了飞行试验。其中, 由北京遥测技术研究所自主研制的机载大光斑激光雷达于 2017 年分别在石家庄、张家界开展了多架次飞行试验, 实现了星载多波束激光雷达载荷的机载验证与反演算法优化。

在星载激光测高仪激光地面脚点坐标解算方面, 文献[1-4]介绍了 ICESat-1/GLAS 的脚点定位模型和误差。ICESat-1/GLAS 和 ICESat-2/ATLAS 的 ATBD (Algorithm Theoretical Basis Document) 报告分别对脚点定位流程及误差有较为详细的介绍。文献[5-7]也较为系统地阐述了卫星激光测高严密几何模型及精度分析, 同时, 文献采用“资源三号”02 星的激光测高数据对其进行了处理和验证。

本文对单波束、全波形和多波束、单光子两种探测体制激光载荷的坐标解算方法进行分析, 在上述方法的指引下, 构建机载平台坐标转换模型及方法, 并通过机载飞行试验进行了验证。

1 星载激光雷达坐标解算方法

星载激光雷达地面脚点坐标的解算方法可基本概括为: 通过激光发射和接收的时间差 t , 以及激光传播速度 c , 求得测距值, 再结合卫星搭载的 GPS 和星敏感器获得卫星位置和姿态信息, 求得激光地面脚点在目标坐标系下的三维坐标。

根据卫星实际情况, 星载激光雷达地面脚点坐标解算涉及瞬时激光束坐标系、测量参考坐标系 (光学平台坐标系)、卫星本体坐标系、国际天球参考框架 (ICRF) 下的 J2000 坐标系和国际地球参考框架 (ITRF) 下的 WGS84 坐标系五个坐标系^[8]。

转换流程如图 1 所示^[9], 其中下标 SC、ICRF 表示卫星本体坐标系, COM 为卫星质心, Ref 为激光参考点, Laser Spot 为激光地面脚点, Δr_{ref} 为激光参考点和卫星质心的位置偏移量, h 为激光传输距离。由 $R_{SPOT} = R_{SC} + \Delta r_{ref} + h$ 可求得激光地面脚点在 ICRF 框架下的坐标, 再将其转换至 ITRF 参考框架下的坐标。获得足印点的三维坐标 (X, Y, Z) 后, 也可用大地椭球坐标系 (B, L, H) 来表示。

在星载激光雷达地面坐标点的解算过程中, 基本沿用以上原理进行坐标转换。根据测高体制、波束分布的不同, 在具体的转换流程中也存在区别。下文分别对 ICESat-1、ICESat-2 的坐标解算方法进行分析, 探寻不同载荷体制下坐标解算过程中的异同。

1.1 ICESat-1/GLAS

ICESat-1 于 2003 年 1 月发射成功, 其搭载的 GLAS 是目前较为成功的对地星载激光测高系统。GLAS 为单波束、全波形测高系统, 脉冲频率 40Hz, 沿轨方向足印间隔 170m, 地面足印大小 55m~110m, 其科学探测目标为南北极冰盖监测、陆地及水文地貌监测、植被高度监测和云-气溶胶高度分布监测。公开发布的数据产品包括 GLA0-GLA15 在内的 0 级、1 级和 2 级数据产品。

GLAS 的激光脚点解算方法符合星载激光雷达坐标解算流程, 但过程有所简化。采用 ANC04 惯性坐标系旋转矩阵、ANC08 卫星精密定轨 (POD) 数据、ANC09 激光指向和精密定姿 (PAD) 数据、ANC25 时间转换数据, 与计算得到的激光测距值联合解算, 得到激光地面脚点在 ITRF 框架下的坐标。其计算流程如图 2 所示。

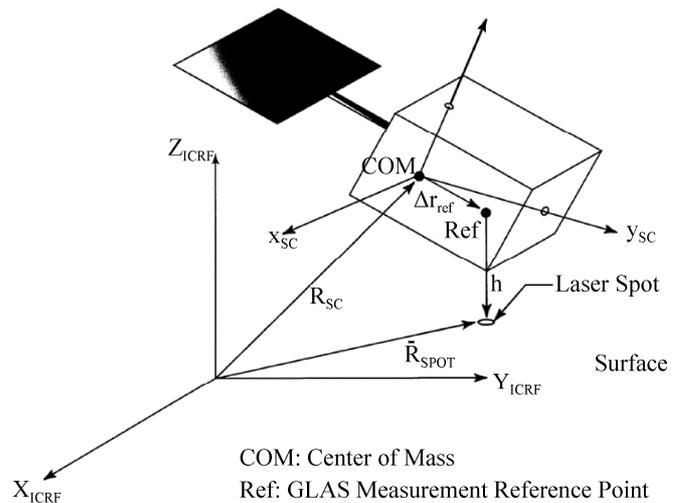


图 1 星载激光雷达地面脚点解算流程
Fig. 1 Spaceborne laser altimeter footprint coordinate calculation process

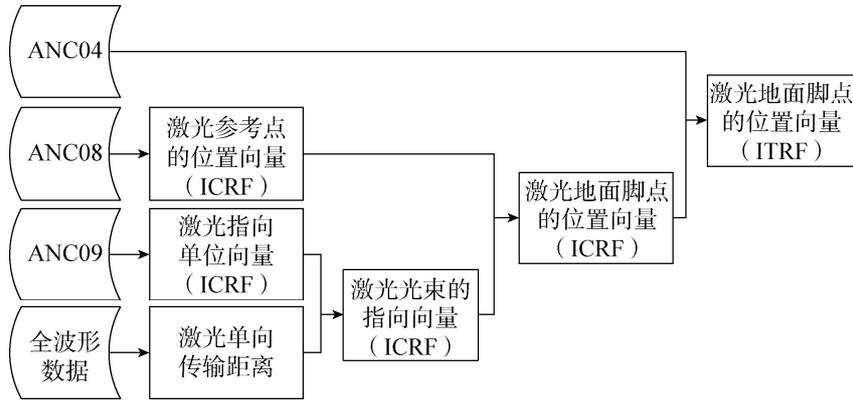


图 2 ICESat-1/GLAS 地面坐标解算流程

Fig. 2 Footprint coordinate calculation process of ICESat-1/GLAS

由于 GLAS 发射波形可近似为高斯脉冲，激光经地表反射后的回波波形可视作一个或多个高斯脉冲的叠加，采用波形分解的方法对回波波形进行拟合，从而求得激光单向传输的距离。

1.2 ICESat-2/ATLAS

已于 2018 年 9 月 15 日发射的 ICESat-2 卫星是 ICESat-1 卫星的延续，搭载了更先进的地形激光测高系统载荷 ATLAS。ATLAS 为非扫描推帚式、高重频、微脉冲、光子计数式的多光束激光测高载荷，轨道高度 500km，轨道倾角 92°，重访周期 91 天。ATLAS 激光脉冲频率达 10kHz，激光脚点沿轨方向间距 0.7m，地面足印直径为 17m；采用 6 波束探测，其中 3 波束能量较强，3 波束能量较弱，能量比为 4:1；每组强激光脚点之间的垂轨距离 3.3km，沿轨距离 2.5km，强-弱激光脚点之间的垂轨距离为 90m，如图 3 所示^[10,11]。相较 GLAS 载荷，ATLAS 载荷可提供空间分辨率和平面定位精度更高的数据产品。

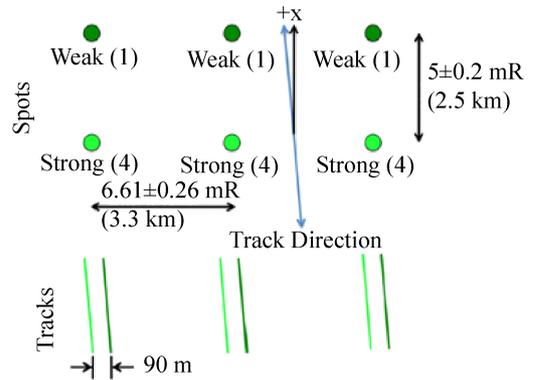


图 3 ICESat-2 激光地面足印示意图

Fig. 3 Laser footprints of ICESat-2

ATLAS 的激光脚点解算方法总体上与 GLAS 相似，采用 ATL02 数据、ANC03 惯性坐标系旋转矩阵、ANC04 卫星精密定轨（POD）数据、ANC05 激光指向和精密定姿（PAD）数据联合解算，得到激光地面点在 ECF 坐标系下的坐标，其实现流程如图 4 所示。

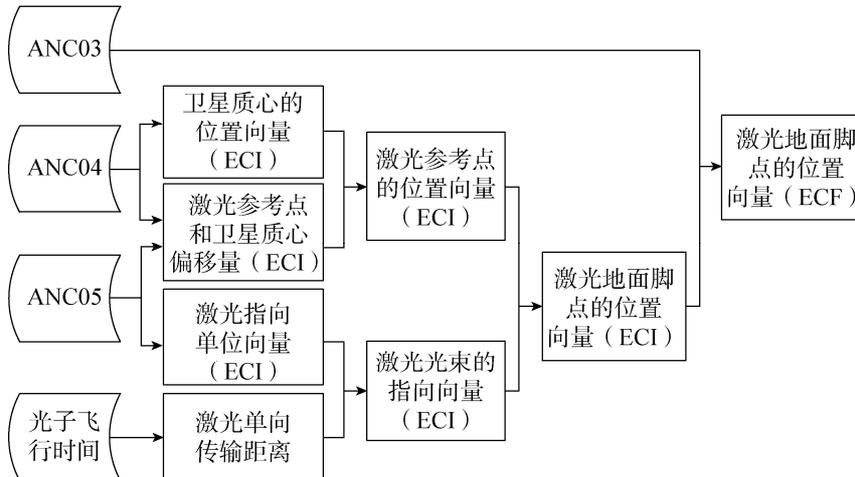


图 4 ICESat-2/ATLAS 地面坐标解算流程

Fig. 4 Footprint coordinate calculation process of ICESat-2/ATLAS

基于脉冲时间飞行法 TOF (time of flight) 的光子计数激光雷达通过记录起始脉冲信号与目标返回信号的时间差来测量距离。设激光光源发射脉冲信号的时刻为 t_T , 脉冲信号传播至目标表面经漫反射、接收光学系统收集至探测器的时刻为 t_R , 介质中的光速为 c , 则理想情况下探测距离为

$$\rho = c(t_R - t_T) / 2 \quad (1)$$

针对光子计数体制的特点, 载荷 ATLAS 的地面脚点坐标解算方法也进行了相应的变化。在 ATL02 数据中, 将 N 个光子的数据合并为一组进行处理, 每组光子对应时间约为 5ms, 对应沿轨距离约为 40m, 通过解算获得所有 N 个光子的地面脚点坐标。后续在进行大气参数和大气延迟校正时, 为节省存储与运算资源, 从 N 个光子中选取第 j 个光子, 其指向向量作为后续校正所用向量^[12,13]。

具体解算步骤如下:

①根据第 i 个光子的飞行时间 $\text{tof}(i)$ 、发射时间 $t_T(i)$ 和距离校正值 $\rho_{\text{bias}}(t_T(i))$, 得到测距值 $\rho(i) = \frac{\text{tof}(i)}{2} * c - \rho_{\text{bias}}(t_T(i))$, 进而计算接收到光子的时间 $t_R(i) = t_T(i) + \frac{2\rho(i)}{c}$, 以及光子到达地面点时刻

$$t_B(i) = t_T(i) + \frac{\rho(i)}{c}。$$

②根据 ANC04、ANC05 数据计算激光发射时刻 $t_T(i)$ 下激光参考点和卫星质心在 ECI 坐标系下的偏移向量 $\bar{x}_{\text{DOEoff}}(i)$ 。

③根据 ANC04 数据计算光子到达地面点时刻 $t_B(i)$ 下卫星质心在 ECI 坐标系下的坐标向量 $\bar{X}_{S/C}(t_B(i))$ 。

④根据 ANC05 数据计算激光发射时刻 $t_T(i)$ 下 ECI 坐标系下激光指向的单位向量 $\hat{p}(i)$ 。

⑤根据公式 $\bar{B}_{\text{ECI}}(i) = \bar{X}_{S/C}(t_B(i)) + \bar{x}_{\text{DOEoff}}(i) + \rho(i) \cdot \hat{p}(i)$ 计算激光地面点在 ECI 坐标系下的坐标向量 $\bar{B}_{\text{ECI}}(i)$ 。

⑥利用 ANC03 数据得到光子到达地面点时刻 $t_B(i)$ 下 ECI 坐标系向 ECF 坐标系的旋转矩阵, 并计算激光地面点在 ECF 坐标系下的坐标向量。

⑦将激光地面点在 ECF 坐标系空间直角坐标系下的坐标转化为大地坐标系下的坐标形式。

2 机载激光雷达坐标解算方法

机载激光雷达坐标解算模型与星载模型较为相似, 通过发射点到地面反射点距离、惯性导航系统 (INS) 测定的飞机姿态参数及 GPS 测定的飞机精确位置联合解算获取地面点在目标坐标系下的三维坐标。星载平台通过星敏感器或陀螺仪定姿, 机载激光雷达通过惯导定姿, 在坐标转换过程中不涉及天球坐标系, 不需考虑岁差、章动、极移等现象。参考激光测高卫星定位模型和 ICESat-1/GLAS 公布的处理流程, 可构建机载平台坐标转换模型, 进行激光地面脚点坐标解算, 以下分别对机载激光雷达涉及的坐标系统和解算方法进行介绍。

2.1 坐标系统

坐标系统包括瞬时激光束坐标系、激光扫描参考坐标系、惯性平台参考坐标系、导航坐标系和大地坐标系。其定义分别如下^[14]:

①瞬时激光束坐标系: 定义激光发射参考点为原点 O , X 轴为飞行方向, Z 轴为瞬时光束方向, O - XYZ 构成右手系。

②激光扫描参考坐标系 (L 系): 定义激光发射参考点为原点 O , X^L 轴为飞行方向, Z^L 轴为扫描系统的零点方向, O - $X^L Y^L Z^L$ 构成右手系。

③惯性平台参考坐标系 (I 系): 定义惯性平台中心为原点 O , X^I 轴、 Y^I 轴 Z^I 轴方向按照 IMU 参考标架定义, O - $X^I Y^I Z^I$ 构成右手系。

④导航坐标系 (N 系): 又称为当地切平面坐标系, GPS 天线相位中心为原点 O , X^N 轴指向真北, Y^N 轴指向东, Z^N 轴为铅直向下方向, O - $X^N Y^N Z^N$ 构成右手系。

⑤大地坐标系 (E 系): 采用 WGS84 坐标系, 地球质心为原点 O , Z 轴指向国际时间局 (BIH) 1984.0 定义的协议地极 (CTP) 方向, X^E 轴指向 BIH1984.0 的协议子午面和 CTP 赤道的交点, $O-X^E Y^E Z^E$ 构成右手系。

2.2 坐标转换过程

机载激光雷达对地定位中的坐标转换顺序为瞬时激光束坐标系 \rightarrow 激光扫描参考坐标系 (L 系) \rightarrow 惯性平台参考坐标系 (I 系) \rightarrow 导航坐标系 (N 系) \rightarrow 大地坐标系 (E 系) [15,16], 各坐标系的定义 2.1 节已进行阐述, 具体转换过程如下。

①瞬时激光束坐标系转 L 系

在激光扫描参考坐标系下定义扫描角 θ 为激光束与 Z^L 的夹角, 逆时针转动方向为正, 如图 5 所示。

当激光测距值为 ρ 时, 地面点在 L 系下的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} X^L \\ Y^L \\ Z^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho \sin \theta \\ -\rho \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

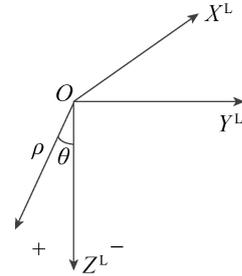


图 5 激光扫描参考坐标系

Fig. 5 Laser scanning reference system

②L 系转 I 系

可通过测量得到 L 系和 I 系坐标原点间的距离, 即惯性平台中心与激光发射参考点的偏移量为 $[\Delta X^L \ \Delta Y^L \ \Delta Z^L]^T$; 坐标轴之间的夹角为偏心角 α 、 β 、 γ , 即惯导与激光扫描仪在安装过程中三个坐标轴产生的固定轴线偏差转角。地面点在 I 系下的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} X^I \\ Y^I \\ Z^I \end{bmatrix} = \mathbf{R}_L^I \begin{bmatrix} X^L \\ Y^L \\ Z^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^L \\ \Delta Y^L \\ \Delta Z^L \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R}_L^I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

③I 系转 N 系

N 系和 I 系坐标原点间的距离为偏移量 $[\Delta X^N \ \Delta Y^N \ \Delta Z^N]^T$, 坐标轴之间的夹角可由 IMU 记录的三个姿态角航向角 $H_{(heading)}$ 、俯仰角 $P_{(pitch)}$ 和侧滚角 $R_{(roll)}$ 表示, 地面点在 N 系下的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} X^N \\ Y^N \\ Z^N \end{bmatrix} = \mathbf{R}_I^N \begin{bmatrix} X^I \\ Y^I \\ Z^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X^N \\ \Delta Y^N \\ \Delta Z^N \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{R}_I^N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos R_{(roll)} & -\sin R_{(roll)} \\ 0 & \sin R_{(roll)} & \cos R_{(roll)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P_{(pitch)} & 0 & \sin P_{(pitch)} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P_{(pitch)} & 0 & \cos P_{(pitch)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos H_{(heading)} & -\sin H_{(heading)} & 0 \\ \sin H_{(heading)} & \cos H_{(heading)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

④N 系转 E 系

GPS 系统可以实时获得天线相位中心即导航坐标系原点的参心大地坐标 (B, L, H) (纬度, 经度和椭圆高), $[X_{gps} \ Y_{gps} \ Z_{gps}]^T$ 为 GPS 在 WGS84 坐标系下的坐标, 可利用下面的公式进行计算:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{gps}} \\ Y_{\text{gps}} \\ Z_{\text{gps}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H)\cos B\cos L \\ (N+H)\cos B\sin L \\ [N(1-e^2)+H]\sin B \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, e 为第一偏心率, N 为卯酉圈曲率半径, $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$, a 为 WGS84 椭球的长半轴。

地面点在 WGS84 下的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} X^E \\ Y^E \\ Z^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{gps}} \\ Y_{\text{gps}} \\ Z_{\text{gps}} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_N^E \begin{bmatrix} X^N \\ Y^N \\ Z^N \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{R}_N^E = \begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L & -\cos L \cos B \\ -\sin L \sin B & \cos L & -\sin L \cos B \\ \cos B & 0 & -\sin B \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据上述的坐标转换公式, 最终可求得激光地面点在 WGS84 坐标系下的坐标表示为

$$\begin{bmatrix} X^E \\ Y^E \\ Z^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{gps}} \\ Y_{\text{gps}} \\ Z_{\text{gps}} \end{bmatrix} + \mathbf{R}_N^E \left(\mathbf{R}_I^N \left(\mathbf{R}_L^I \begin{bmatrix} 0 \\ \rho \sin \theta \\ -\rho \cos \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{\text{offset}} \\ Y_{\text{offset}} \\ Z_{\text{offset}} \end{bmatrix} \right) \right) \quad (10)$$

其中, $[X_{\text{offset}} \ Y_{\text{offset}} \ Z_{\text{offset}}]^T$ 为激光参考点到 GPS 天线中心的偏移量。

通过上述坐标系统的转换, 可以得到每个激光地面点在地心坐标系 WGS84 下的三维坐标值。可以根据需要将激光地面点的空间直角坐标转换为大地坐标。

3 机载验证系统——大光斑激光雷达

机载大光斑激光雷达是为满足碳监测卫星多波束激光雷达载荷的算法验证需求而研制的机载验证载荷, 采用单波束、全波形体制, 通过将机载大光斑激光雷达与航空相机、航空惯导系统、高稳平台、控制及存储系统等设备的集成和优化, 形成机载大光斑激光雷达系统, 以 40Hz 的重频发射激光脉冲进行地表探测^[17,18]。系统参数指标如表 1 所示, 系统组成如图 6 所示。

表 1 机载大光斑激光雷达系统参数指标

Table 1 Parameters of airborne large spot LiDAR system

激光雷达	激光发射波长	1064nm
	激光发射能量	2mJ
	激光重频	40Hz
	望远镜口径	100mm
	激光发散角	5mrad
	光斑足印	15m@3km
	航空相机	传感器分辨率
相元尺寸		5.2μm
惯导	IMU 精度	横滚, 俯仰 0.005°, 航向 0.008°
	IMU 采样率	200Hz
	位置精度	0.05m~0.3m
高稳平台	自动稳定范围	≥±8deg
	最大角速度	≥50deg/s
	动态误差	0.08deg (3deg, 3Hz)
	自动置平模式时竖直偏差	<0.01deg
	有效负载	100kg

4 机载飞行验证试验数据结果

机载大光斑激光雷达系统于 2017 年 4 月上旬, 在石家庄栾城机场附近区域开展了首次机载飞行试验, 并开展了点云激光雷达同步试验比对、地面外业试验交叉比对与精度评估。此次飞行试

验包括两个架次的校飞试验, 获取了检校区与测区共计 10 条航线, 约 300GB 的有效数据。系统再次于 2017 年 12 月下旬, 在张家界荷花机场附近区域开展了两个架次的飞行试验。此次飞行试验航线总长超过 980km, 航高超过 3000m, 航时总计 11 小时, 获取了检校区与测区共计四个测区的有效数据。

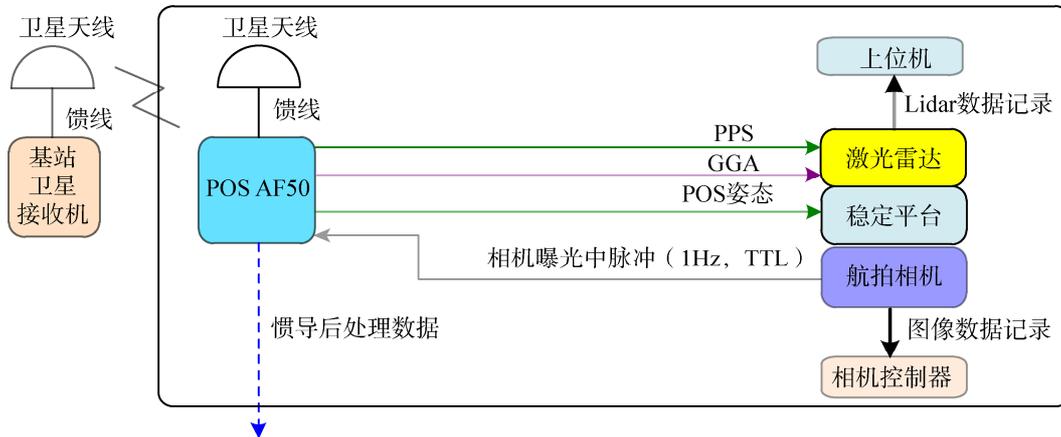


图6 机载大光斑激光雷达系统构成

Fig. 6 System configuration of airborne large spot LiDAR system

对机载大光斑激光雷达系统于2017年12月25日在张家界附近采集到的一段数据进行解算，可得到地面激光点的轨迹如图7所示，部分数据如表2所示。

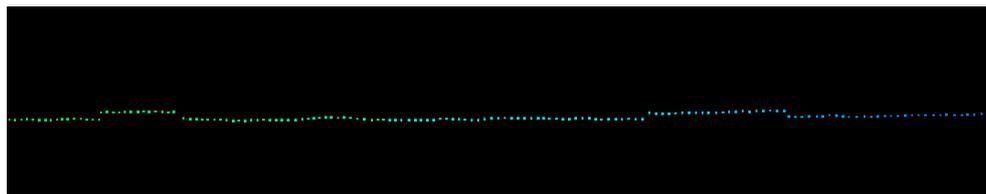


图7 部分地面激光点轨迹

Fig. 7 Partial laser footprint track

表2 经解算得到的部分激光地面点坐标

Table 2 Partial calculated laser footprint coordinates

序号	UTC	脚点坐标 (WGS84, 空间直角坐标)			脚点坐标 (WGS84, 大地坐标)		
		X	Y	Z	B	L	H
1	12987.325	-2036837.469	5210777.883	3052481.957	28.77899495	111.349998	56.69428242
2	12987.35	-2036836.801	5210779.136	3052481.254	28.77898538	111.349987	57.16542033
3	12987.375	-2036836.237	5210780.02	3052480.424	28.77897613	111.3499783	57.30773734
4	12987.4	-2036835.119	5210779.765	3052478.825	28.77896628	111.3499686	55.97265793
5	12987.425	-2036834.252	5210780.515	3052477.827	28.77895673	111.3499575	55.82833537
6	12987.45	-2036831.281	5210776.246	3052473.671	28.77894584	111.3499451	49.39400727
7	12987.475	-2036830.488	5210777.108	3052472.741	28.77893625	111.3499343	49.39684986
8	12987.5	-2036829.744	5210777.752	3052471.856	28.77892782	111.3499248	49.25911717
9	12987.525	-2036828.904	5210778.488	3052470.861	28.7789183	111.3499141	49.11340199
10	12987.55	-2036827.955	5210779.377	3052469.696	28.77890699	111.3499017	48.97493739
11	13017.5	-2035836.605	5211794.342	3051365.659	28.76763693	111.3366632	29.92800062
12	13017.525	-2035835.744	5211795.189	3051364.784	28.76762794	111.3366518	29.92369262
13	13017.55	-2035834.807	5211796.103	3051363.836	28.76761822	111.3366395	29.91522946
14	13017.575	-2035834.022	5211796.964	3051362.909	28.76760865	111.3366288	29.9219522
15	13017.6	-2035833.241	5211797.819	3051361.972	28.76759902	111.3366181	29.91929564
16	13017.625	-2035832.245	5211798.624	3051360.977	28.76758946	111.3366057	29.78057127
17	13017.65	-2035831.424	5211799.506	3051360.022	28.76757964	111.3365945	29.77897076
18	13017.675	-2035830.553	5211800.361	3051359.148	28.76757065	111.336583	29.77843491
19	13017.7	-2035829.716	5211801.145	3051358.392	28.76756281	111.3365721	29.78812642
20	13017.725	-2035828.735	5211802.038	3051357.533	28.76755396	111.3365594	29.79032191
21	13017.75	-2035827.841	5211802.956	3051356.559	28.76754396	111.3365475	29.78668127
22	13017.775	-2035827.087	5211803.817	3051355.615	28.7675342	111.3365371	29.79464719
23	13017.8	-2035826.46	5211804.557	3051354.771	28.76752552	111.3365284	29.79280371
24	13017.825	-2035825.621	5211805.413	3051353.891	28.76751642	111.3365172	29.80082936
25	13017.85	-2035824.638	5211806.32	3051352.999	28.76750725	111.3365044	29.7985193

获得回波信号数据后, 通过高斯滤波方法对信号进行去噪处理, 再用最小二乘曲线拟合法或最大值检测法可以得到该点位测距值^[19,20]。本论文通过计算回波信号的二阶差分获取峰值, 采用公式如下:

$$k = \text{find}(\text{diff}(\text{sign}(\text{diff}(w))) < 0) + 1 \tag{11}$$

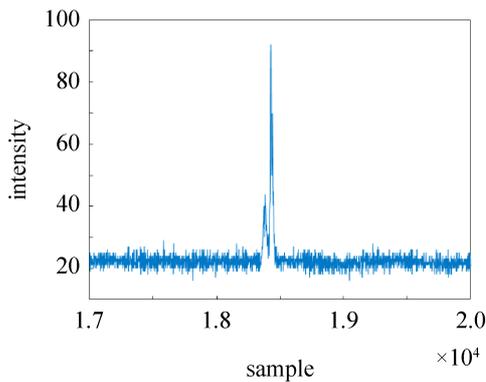
其中, w 为波形数据, 有:

$$\text{diff}(w) = w(t + 1) - w(t) \tag{12}$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1(x > 0) \\ 0(x = 0) \\ -1(x < 0) \end{cases} \tag{13}$$

利用 find 函数获得满足式的元素的序号, k 值所在位置即为回波峰值所在的点位, 当回波信号有多个峰值时, 通常选取回波强度最大的位置作为峰值所在点。利用峰值位置计算出激光测距值后, 根据第 2.2 节介绍的坐标转换方法可解算出对应的激光地面点坐标。

以表 1 第 8 行数据为例, 此时 UTC 为 12987.5, 采集到的回波信号波形如图 8 所示, 通过地图定位可知该位置为树木, 坐标解算结果与信号符合。表 1 第 25 行数据对应 UTC 为 13017.85, 采集到的回波信号波形如图 9 所示, 通过地图定位可知该位置为裸地, 信号强度过大, 存在饱和现象, 坐标解算结果与信号符合。



(a) 回波信号数据

(a) Reflected echo signal data

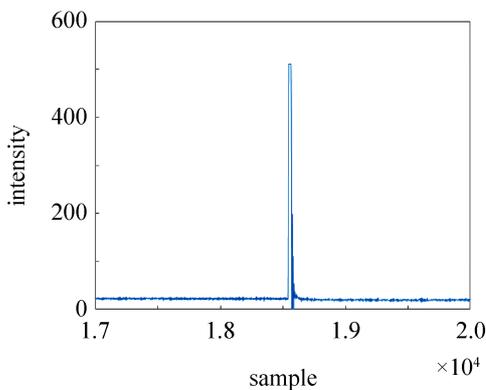


(b) 激光地面点坐标

(b) Laser footprint coordinate

图 8 激光回波信号数据与对应地面脚点坐标 (UTC=12987.5)

Fig. 8 Reflected laser echo signal data and footprint coordinate (UTC=12987.5)



(a) 回波信号数据

(a) Reflected echo signal data



(b) 激光地面点坐标

(b) Laser footprint coordinate

图 9 激光回波信号数据与对应地面脚点坐标 (UTC=13017.85)

Fig. 9 Reflected laser echo signal data and footprint coordinate (UTC=13017.85)

5 结束语

本文通过分析 ICESat-1 和 ICESat-2 星载激光测高载荷地面脚点坐标解算方法, 比较了多波束、单光子体制对地激光三维测绘雷达与传统的单波束、全波形体制激光测高雷达在地面坐标解算过程的异同, 并建立了机载激光雷达坐标解算方法与流程, 通过自主研发的机载大光斑激光雷达与飞行试验, 对坐标解算方法进行验证与分析。随着单光子探测技术的发展, 光子计数激光雷达正在逐步应用于机载、星载对地观测领域, 北京遥测技术研究所也正在进行机载光子计数激光雷达研制。通过对 ICESat-2 地面坐标解算流程作进一步理论分析, 改进并构建适用于机载光子计数激光雷达的坐标解算方法, 并应用于机载飞行验证试验, 是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 马跃, 阳凡林, 卢秀山, 等. 对地观测星载激光测高系统高程误差分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1042–1047.
MA Yue, YANG Fanlin, LU Xiushan, et al. Elevation error analysis of spaceborne laser altimeter for earth observation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 1042–1047.
- [2] 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 Yue. The data processing and error analysis for satellite laser altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [3] 李少宁. 星载激光对地测高系统在轨几何定标研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
LI Shaoning. Research on geometric calibration of earth observation satellite laser altimeter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [4] YU Wang, JIAN Fang, YU Ai. Space-borne laser altimeter geolocation error analysis[C]. Italy: ISPRS TC II Mid-term Symposium, 2018: 1169–1174.
- [5] 李国元. 对地观测卫星激光测高数据处理方法与工程实践[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
LI Guoyuan. Earth observing satellite laser altimeter data processing method and engineer practice[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [6] 唐新明, 李国元, 高小明等. 卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1182–1191.
TANG Xinming, LI Guoyuan, GAO Xiaoming, et al. The rigorous geometric model of satellite laser altimeter and preliminarily accuracy validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(10): 1182–1191.
- [7] 李国元, 唐新明. 资源三号 02 星激光测高精度分析与验证[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1939–1949.
LI Guoyuan, TANG Xinming. Analysis and validation of ZY-03 02 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(12): 1939–1949.
- [8] 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础(第二版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
KONG Xiangyuan, GUO Jiming, LIU Zongquan. Foundation of geodesy[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010.
- [9] SCHUTZ B E. Laser footprint location (geolocation) and surface profiles[R]. USA: The University of Texas at Austin, 2002.
- [10] NEUMANN T A, 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: 1–16.
- [11] MARKUS T, et al. The ice, cloud, and land elevation satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. Remote Sensing of Environment, 2017: 260–273.
- [12] NEUMANN T, et al. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for global geolocated photons ATL03[R]. USA: Goddard Space Flight Center, 2019.
- [13] SCHUTZ B E, et al. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for ATL03g ICESat-2 receive photon geolocation[R]. USA: Goddard Space Flight Center, 2019.
- [14] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.

- ZHANG Xiaohong. Theory and methods of airborne lidar measurement technology[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
- [15] 张靖. 物探飞行模式下的机载 LiDAR 数据与影像配准研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
ZHANG Jing. Airborne LiDAR data and image registration in geophysical prospecting mode[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.
- [16] 黎荆梅, 周梅, 李传荣. 阵列推扫式机载激光雷达三维点云解算方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(6): 1033–1038.
LI Jingmei, ZHOU Mei, LI Chuanrong. Research on points position cloud calculation method of airborne linear array push-broom LiDAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(6): 1033–1038.
- [17] 唐重军, 刘宇哲, 潘超等. 机载大光斑植被激光雷达系统设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39(5): 51–59.
TANG Chongjun, LIU Yuzhe, PAN Chao, et al. Design of airborne large footprint LiDAR for vegetation measurement[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(5): 51–59.
- [18] 吴发云, 高显连, 潘超等. 机载林业探测大光斑激光雷达系统的设计与应用[J]. 林业资源管理, 2018, 4: 125–132.
WU Fayun, GAO Xianlian, Pan Chao, et al. Design and application of forest detecting based on airborne large-footprint LiDAR system[J]. Forest Resources Management, 2018, 4: 125–132.
- [19] HOFTON M A. Decomposition of laser altimeter waveforms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(4): 1989–1996.
- [20] WOLFGANG W, ANDREAS U, VESNA D, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laser scanner[J]. Photogrammetry & Remote Sensing, 2006, 60: 100–112.

[作者简介]

韩晓爽 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达数据处理。

潘超 1981 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达。

刘宇哲 1989 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为测绘及海洋激光雷达。

王丽东 1987 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为激光雷达仿真及数据处理。

戴学兵 1987 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为激光雷达数据处理。

赵一鸣 1983 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达。