

# 机载激光雷达在林业方面的应用

陈超, 于志超, 白晓红, 刘慧婷

黑龙江精臻科技发展有限公司

**摘要:** 激光雷达因为其可以穿透森林的特性, 所以在获取森林垂直结构参数方面有着极强的优势, 而机载激光雷达技术可以大幅度的提高数据获取的效率, 近些年在林业研究和调查方面有很大的发展, 本次项目即使用飞马无人机搭载激光雷达获取林业数据, 从项目准备到获取, 到最后的处理都是基于飞马产品进行的, 全文详细的讲解了此次项目的全过程。

**关键词:** 机载激光雷达, 森林参数反演, 林业应用

## 0 引言

为了及时、准确地掌握森林资源信息, 高效地进行森林资源管理, 国内外开展了大量的森林资源调查工作。近年来, 光学遥感技术利用航空照片与卫星影像替代或补充了一些传统的森林调查, 能够获取大区域内森林生长因子和生态、环境信息, 然而光学遥感技术在获取森林三维结构参数上能力有限。激光雷达遥感作为主动遥感技术可以有效穿透森林, 在获取森林垂直结构参数方面有着其他光学遥感无法比拟的优势。很多研究基于机载激光雷达(ALS)与地基激光雷达(TLS)成功提取了森林垂直结构及水平分布参数和单木结构参数。机载激光雷达因为其高效率, 成为当下林业研究的热门工具。

## 1 项目背景

### 1.1 项目来源

东北林业大学佳木斯市孟家岗林场林业研究, 基于林区山高林密, 倾斜摄影的方式不能有效的获取林区数据, 达不到科研的目的, 经过多番技术论证, 决定使用机载激光雷达和地基激光雷达数据做点云融合处理, 来获取所需要的最终数据。

### 1.2 项目意义

验证飞马无人机作为机载激光雷达飞行平台的优势, 展现飞马机载雷达的性能, 通过实际的项目展现产品的质量和能力。

### 1.3 行业要点

机载激光雷达(ALS)的传感器有多种, 以森林调查为目的较多常用的为离散回波传感器。由于使用成本的降低和操作范围的增大, 应用 ALS 提取大区域森林参数受到越来越多的应用, 获取的树高数据成为其他传感器的验证数据或者展开深层次的研究。林业研究的几个主要研究目标:

1) 树冠高度: ALS 估测树高分为样地水平和单木水平。单木水平树高估测首先进行单木分割; 样地水平树高估测分为直接提取和间接提取, 直接提取是测量地面至树顶的高度, 间接提取是通过建立冠层高度与 ALS 提取的预测变量之间的相关关系来间接估测冠层高度。

2) 单木分割: 当点云密度足以识别单木时, 应用不同的单木分割算法对森林回波点进行分割, 一旦准确分割后, 可以获得树高、树冠尺寸、树冠基部高、断面积、胸径、立木蓄积和生物量等。

3) 叶面积指数和郁闭度: 叶面积指数(LAI)与郁闭度估测对于森林监测应用、森林生长模型和林火分析都至关重要。利用激光雷达数据进行 LAI 和郁闭度反演主要是利用提取的冠层物理参数与实测的 LAI 数据构建统计关系模型进行估测。这些物理参数间接地反映了激光点云在冠层中的分布, 而 LAI 和郁闭度与激光在冠层中的穿透和拦截有关。例如, 冠层郁闭度可以通过计算回波比值(首回波/所有回波, 首回波/最后一次回波)来提取。激光穿透指数(地面点数目与所有点数目之比, LPI)与激光拦截指数(一般指树冠层激光点数目与所有点数目之比)较多地应用在激光雷达数据反演森林 LAI 中。

4) 冠层高度剖面: 激光雷达剖面数据展示了森林的垂直结构, 可以可靠地估测森林生物量和蓄积量。除了 LAI 外, 引入另一个变量即树叶高度剖面来描述树叶结构。树叶高度剖面可以描述树叶在整个冠层的垂直分布。考虑到激光雷达遥感无法从树叶中识别树枝, 经常用冠层高度剖面或植被高度剖面来代替。

5) 生物量: 科学家利用摄影测量和光密度测量方法分析发现, 树冠垂直剖面与森林蓄积量的对数呈线性关系, 从而设想如果激光雷达可以精准重建树冠剖面, 那么森林蓄积量即可被估测出来。机载离散回波激光雷达提取生物量的研究主要集中在以下两个方面: 一是根据高密度点云基础上的单木分割计算单木生物量; 二是根据较低密度点云数据的空间分布情况来估测生物量。

6) 树种分类: 激光雷达树种分类主要根据回波点的空间分布、强度信息以及波形数据的波形特征参数。

以上的是林业研究中主要的研究方向, 本次项目所获取的数据, 经过处理可以满足学校进行各个方向的研究。

## 2 项目准备

### 2.1 测区勘察

项目区域位于黑龙江省哈尔滨尚志市佳木斯市孟家岗林场, 这里是东北林业大学实验林场, 飞行区域大概是 2 平方公里, 测区林场为山下靠半山腰一点, 山脉走向是自东向西, 高差起伏较大, 测区里可供起飞的场地几乎没有, 山高林密, 飞行条件较差。

### 2.2 飞行设备准备

根据测区的实际勘察情况, 发现这块区域属于山区, 高差起伏比较大, 使用一般的飞机, 难以保证测区的整体精度和设备的安全, 所以我们选择了具有自适应仿地飞行功能的飞马 D200S 四旋翼无人机, 这款无人机可以生成变高航线, 可以保证测区的整体精度一致, 也可以保证无人机的飞行安全, 以下是飞马 D200 的相关参数。

#### 飞行平台参数

##### D200 无人机飞行平台

空机重量: 6.5kg

起飞重量: 7.5kg

对称电机轴距: 988mm

外形尺寸: 展开 830×732×378mm

折叠 955×362×378mm

续航时间: 48min (单架次海平面悬停时间)

巡航速度: 36~54km/h

最大爬升速度: 10m/s

最大下降速度: 8m/s

悬停精度 RTK: 水平 1cm+1ppm; 垂直 2cm+1ppm

实用升限高度: 4500 (海拔)

抗风能力: 5 级 (正常作业)

任务响应时间: 展开 ≤10min, 撤收 ≤15min

测控半径: 5km

起降方式: 无遥控器垂直起降

工作温度: -20~50° C

外包装箱尺寸: 1038×475×366.5mm

#### 双频 GPS 导航模块参数

导航卫星: GPS: L1+L2



图 1 飞马 D200

BeiDou: B1+B2  
GLONASS: L1+L2  
采样频率: 20Hz  
定位精度: 5cm  
差分模式: PPK/RTK 及其融合作业模式

高精度 IMU 参数

滚转角测量精度:  $\pm 0.010^\circ$   
俯仰角测量精度:  $\pm 0.010^\circ$   
偏航角测量精度:  $\pm 0.050^\circ$

2.3 LiDAR 选择

激光雷达的选择基于项目的实际需求,选择。本次的项目是在林区进行作业,山高林密,需要透过性很强,能穿透到地面上得到高程数据。所以选择的激光雷达头是 D-LiDAR200,参数如下:

LiDAR 模块(D-LiDAR200)

关键指标:

激光器: RIEGL mini VUX-1UAV

通道数: 1

点频: 100kpts/s

测量距离: >250m

测距精度:  $\pm 1\text{cm}$

回波数量: 5(Max.)

扫描速度:  $10\sim 100\text{HZ}$

回波强度: 16bit

波长: 905nm(Class 1)

激光发散角:  $1.6\times 0.5\text{mrad}$

视场角-水平:  $360^\circ$

分辨率-水平:  $0.05\sim 0.5^\circ$



图 2 激光雷达头

3 技术路线

本次项目实施的技术路线是使用飞马D200S多旋翼无人机挂载机载LiDAR对测区进行数据采集,获取的点云数据加上RTK所测高精度坐标信息进行精度验证和融合,最后使用软件进行数据处理,数据处理我们使用飞马无人机管家的智激光进行处理,是我们自己的设备获取数据,在使用我们自己的软件进行数据处理,体现了我们飞马无人机功能的全面性,最后得到项目所需要的数据。

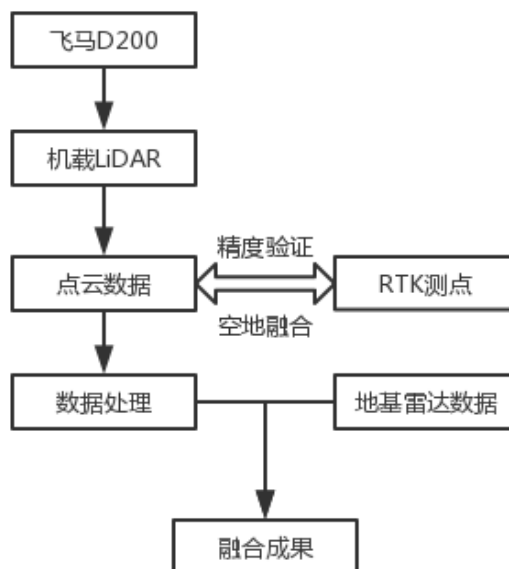


图 3 技术流程

## 4 项目实施

### 4.1 飞行准备

采用无人机管家智航线模型进行航线设计。

LiDAR 航线设计，基于点密度引导下的自动航线设计，可根据三维地图进行变高飞行，获取一致的点云数据。设置航速为 5.0m/s，航高为 80m，航线重叠度为 50%，交叉航线，变高飞行。预计获取的平局点云密度为 300 点/m<sup>2</sup>，以区块一为示例涉及航线设计如下图：

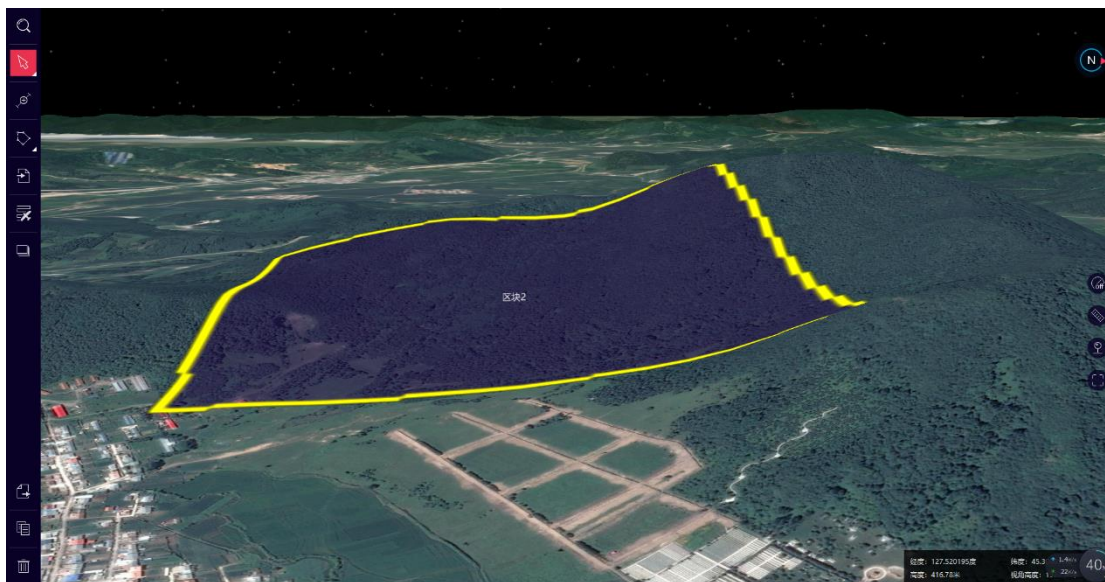


图 4 测区概况

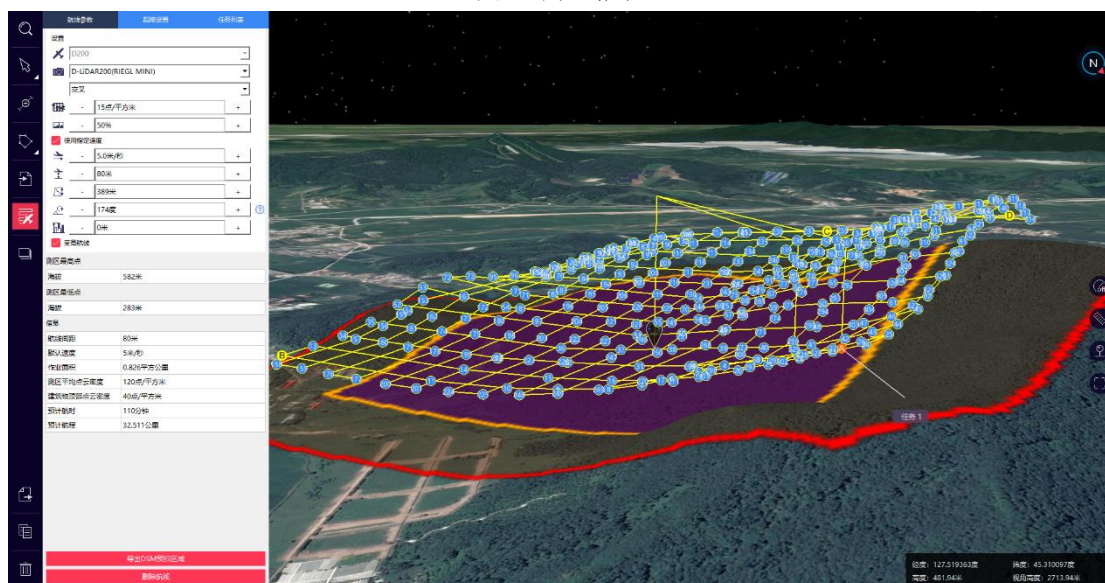


图 5 航线规划

### 4.2 外业飞行

飞行前进行测区踏勘，选择起降点，架设基站，D200S 对起降环境要求较小，半径 3m 为平坦区域即可，两分钟完成飞机组装，并根据无人机管家引导步骤进行飞行前检查，保证设备安装和设置正确无误，飞机垂直起飞，飞行过程中可实时监控，保证飞行安全。



图 6 测区现场

#### 4.3 数据处理

机载激光雷达数据准备主要包括 GPS 数据、LIDAR 原始数据准备以及轨迹解算等几个步骤。

##### 4.3.1 GPS 数据

GPS 数据准备包括以下几点：

(1) 基站数据：数据格式为 .GNS 的静态数据。

(2) 飞机下载的数据：由于从飞机下载数据较多，以截图形式表示下载的数据格式；以表格的形式介绍每个数据的用途。

2019-05-29 06-50-05.bin	2019/5/29 上午 ...	BIN 文件	83,096 KB
2019-05-29 06-50-05.fpos	2019/5/29 上午 ...	FPOS 文件	0 KB
2019-05-29 06-50-05.gim	2019/5/29 上午 ...	GIM 文件	0 KB
2019-05-29 06-50-05.gsof	2019/5/29 上午 ...	GSOF 文件	5,650 KB
2019-05-29 06-50-05.imr	2019/5/29 上午 ...	Waypoint Raw I...	15,196 KB
2019-05-29 06-50-05.pos	2019/5/29 上午 ...	POS 文件	0 KB
2019-05-29 06-50-05.rt27	2019/5/29 上午 ...	RT27 文件	38,375 KB

图 7 飞行数据

表 1 飞行文件注释

bin 文件	飞行日志
fpos 文件	机载 pos 文件：针对新五相机载荷，其余载荷该文件为空
gim 文件	云台数据：新五相机及 Lidar 模块该文件为空（无云台）
gsof 文件	RTK 轨迹
imr 文件	高精度惯性导航数据
pos 数据	机载 pos 文件：新五相机及 Lidar 模块该文件为空
rt27 文件	机载 GPS 观测数据

#### 4.3.2 LIDAR 原始数据

LIDAR 原始数据格式为 .rxp，它是激光原始数据，如下图所示：











 SN_00044_20190528-225133_17.11.14.13_0001.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	103,973 KB
 SN_00044_20190528-225353_17.11.14.13_0002.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	105,061 KB
 SN_00044_20190528-225611_17.11.14.13_0003.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	112,933 KB
 SN_00044_20190528-225837_17.11.14.13_0004.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	112,814 KB
 SN_00044_20190528-230103_17.11.14.13_0005.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	121,849 KB
 SN_00044_20190528-230341_17.11.14.13_0006.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	99,933 KB
 SN_00044_20190528-230552_17.11.14.13_0007.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	101,269 KB
 SN_00044_20190528-230803_17.11.14.13_0008.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	76,728 KB
 SN_00044_20190528-230945_17.11.14.13_0009.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	54,893 KB
 SN_00044_20190528-231100_17.11.14.13_0010.rxp	2019/5/28 下午 ...	RXP 文件	45,283 KB

图 8 LIDAR 数据

#### 4.3.3 数据整理与存放

将准备好的 GPS 数据、LIDAR 原始数据以及影像数据按照以下规定的文件路径和文件夹名称依次存放，以便进行下一步数据解算工作。

(1) 最外层文件夹以此次飞行任务名字+飞行日期命名为“haerbin+20190529”，IE 软件不能正常显示中文，所以文件名不包含中文。

(2) 在“haerbin+20190529”文件夹下建立五个文件夹，分别命名为 Static、UavData、LIDARData、IE、PRJ\_FM。其中“Static”文件夹存放基站.GNS 静态观测数据；“UavData”文件夹存放飞机 GPS 观测数据 (rt27)、高精度惯性导航数据 (imr)、RTK 轨迹 (gsof) 等从飞机上下载的数据；“LIDARData”文件夹存放 LIDAR 原始数据以及格式为 XML 的激光校正参数（此文件在数据处理时可输入设备编号直接下载）；“IE”文件夹存放后续解算过程中的 IE 工程和解算结果；“PRJ\_FM”文件夹存放后续点云解算的工程。

#### 4.3.4 GPS 数据格式转换

GPS 数据格式转换主要基站数据和机载 GPS 数据格式转换两个环节。

对于基站静态数据 (\*.GNS)、机载 GPS 数据 (\*.rt27)，可使用智理图中的 GPS 格式转换工具进行转换。在无人机管家主界面中，打开【智理图模块】-【GPS 处理】-【GPS 格式转换】，如图所示，将基站文件（如\_7323460.GNS）、机载 GPS 文件（如 2019-05-29 06-50-05.rt27）打开，RINEX 文件会自动储存到和 GNS 文件同一路径下（此路径可更改），单击【确定】进行转换。基站静态数据转换后包含两个文件，分别为：\_7323460.18o 及\_7323460.18p（当前版本这两个文件版本默认为 RINEX3.02）机载数据转换后包含两个文件，分别为：2019-05-29 06-50-05.19o 及 2019-05-29 06-50-05.19p。



图 9 无人机管家

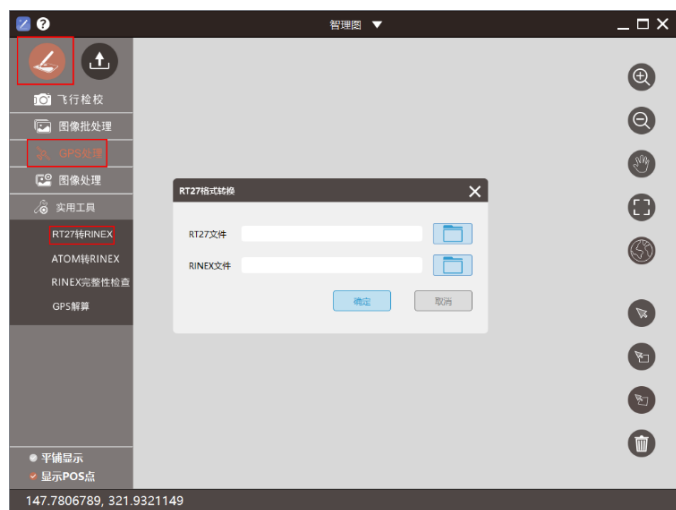


图 10 GPS 格式转换

#### 4.3.5 点云轨迹解算

采用 Inertial Explore 高精度 GNSS/INS 后处理软件进行紧耦合差分处理得到 LIDAR 数据预处理需要的轨迹数据，主要分为格式转换、紧耦合差分解算、质量检查与轨迹导出三个环节，具体步骤如下：

##### 4.3.5.1 格式转换

(1) 打开 IE，点击【File】-【New Project】-【Empty Project】，选择工程路径为 3.4 章节所提到的“IE”文件夹，新建 IE 的工程格式.cfg。

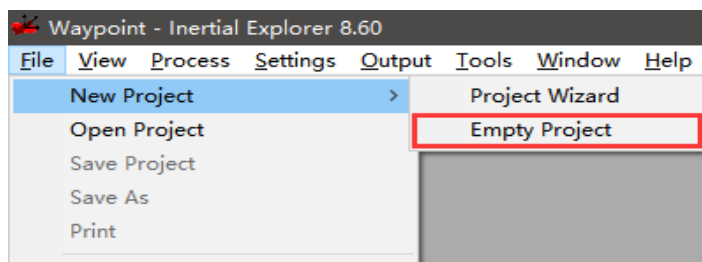


图 11 新建工程

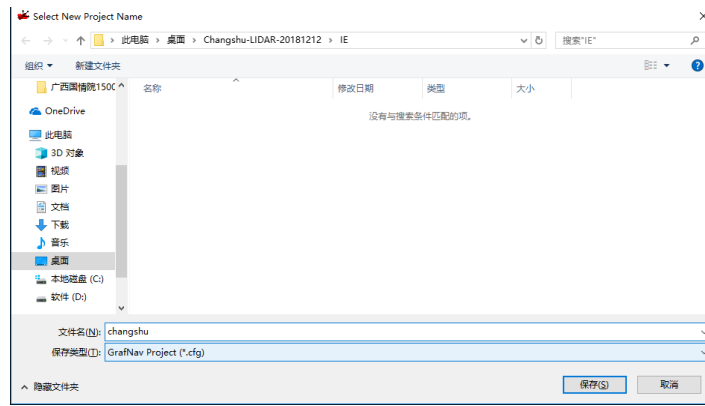


图 12 选择工程路径

(2)在 IE 中将 4.1 章节转换得到的基站和机载的 0 文件(\_7323471.18o 和 2019-05-29 06-50-05.19o) 转换为 IE 识别的 GPB 格式，具体操作步骤如下：

A、点击【File】-【Convert】-【Raw GNSS to GPB】，出现转界面如下：

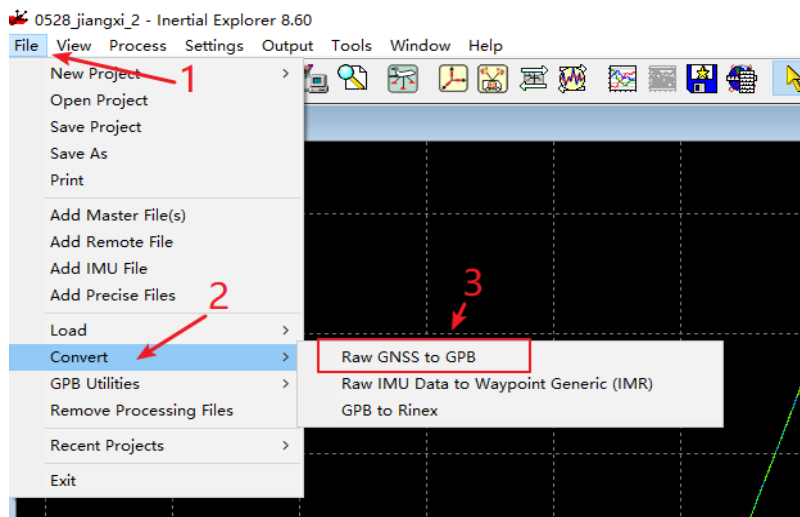


图 13 格式转换步骤 1

B、点击【Get Folder】，找到基站对应 0 文件所在的路径，选中 0 文件，点击【Add】，该文件就会添加到右侧的列表中。

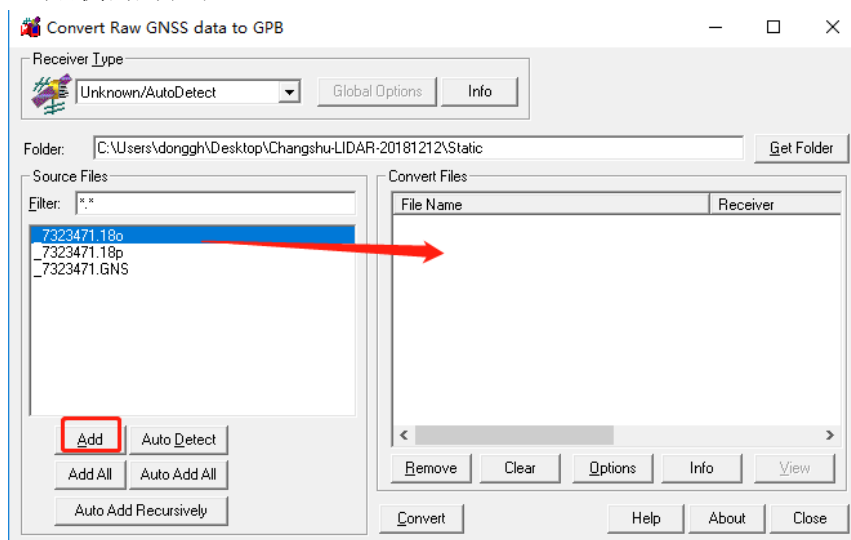


图 14 格式转换步骤 2



C、点击【Convert】，将数据 0 文件转换为 GPB 格式。

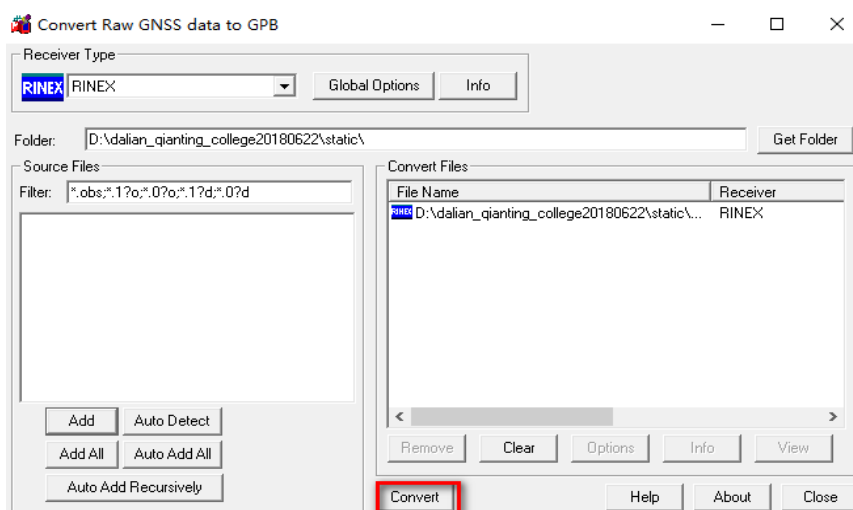


图 15 格式转换步骤 3

D、转换完成后，GNS 数据的同路径下会生成 GPB 格式数据。



图 16 格式转换步骤 4

#### 4.3.5.2 紧耦合差分解算

(3) 点击【File】-【Add Master File(s)】将基站 GPB 数据加载到当前工程。

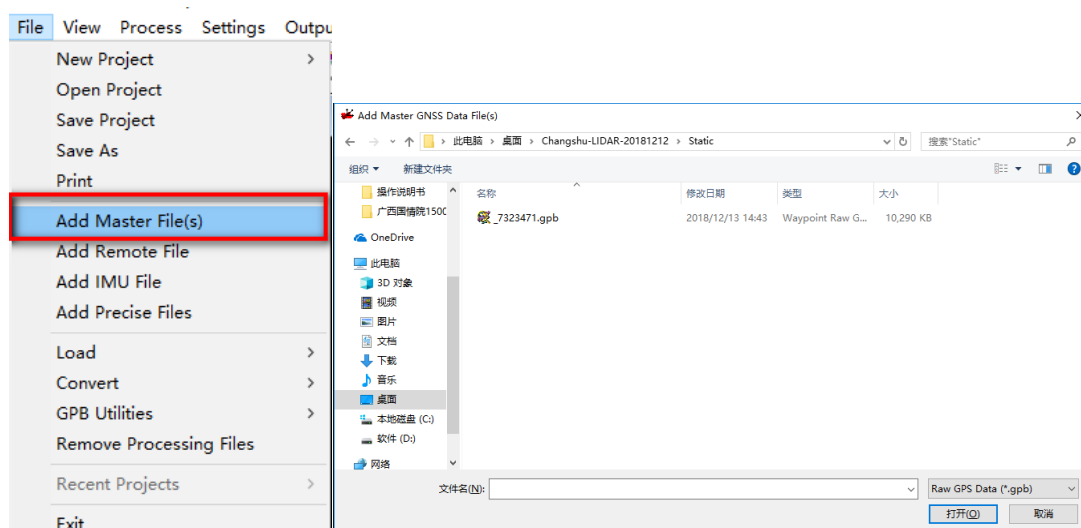


图 17 紧耦合差分解算步骤 1

➤ 检查基站的点号、经纬度、椭球高、天线垂高。

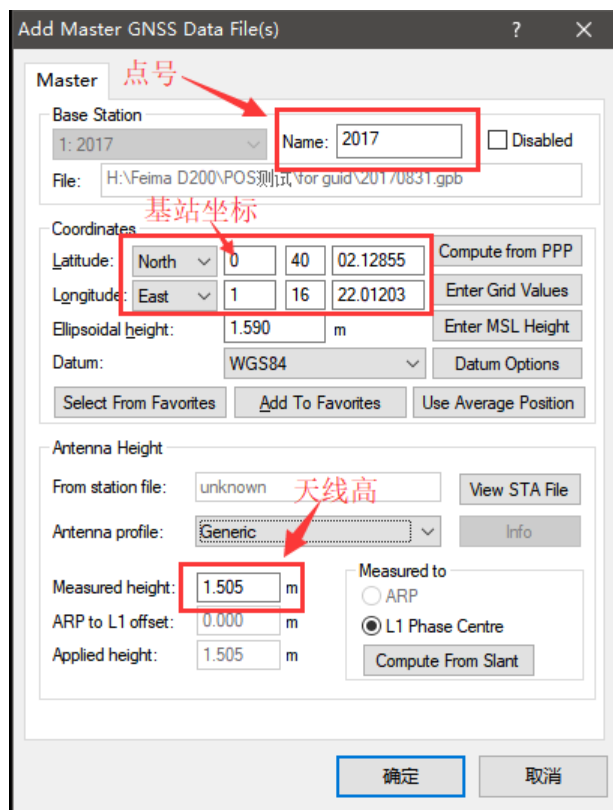


图 18 紧耦合差分解算步骤 2

注：若为 CORS 采集的已知点，则天线高设为 0；若采用地面控制点，请输入基站坐标和天线高。

(4) 点击【File】-【Add Remote File(s)】将机载 GPB 数据加载到当前工程，天线高为 0m。

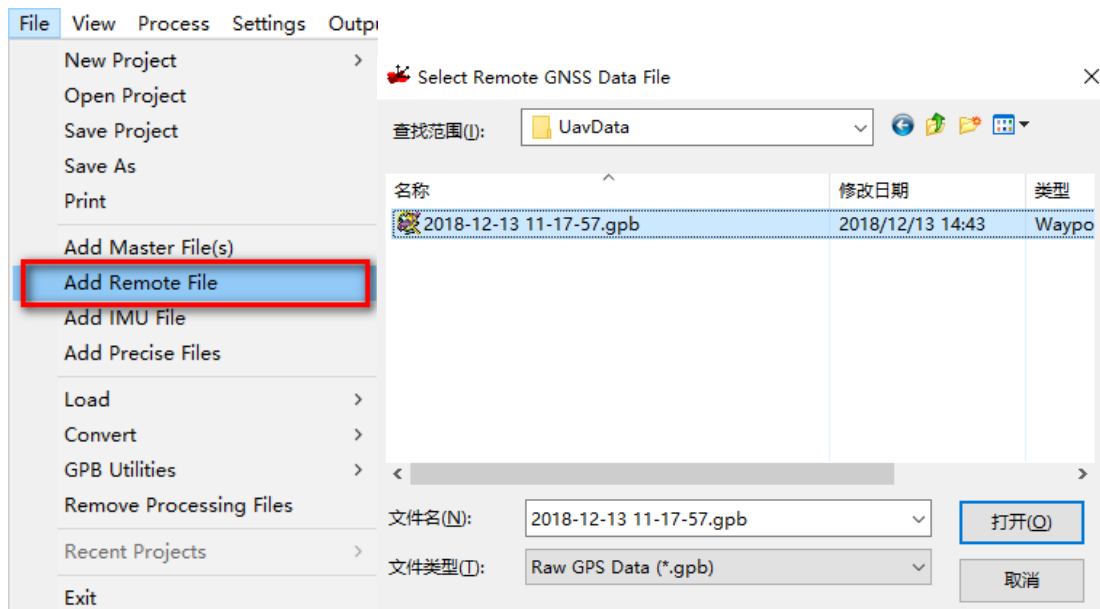


图 19 紧耦合差分解算步骤 3

注：机载 GPS 测量为天线相位中心，测量天线高设置为 0。

(5) 软件会提示读取惯性导航数据（格式. imr，与机载观测文件同名）。点击【是】，将惯性导航数据导入。

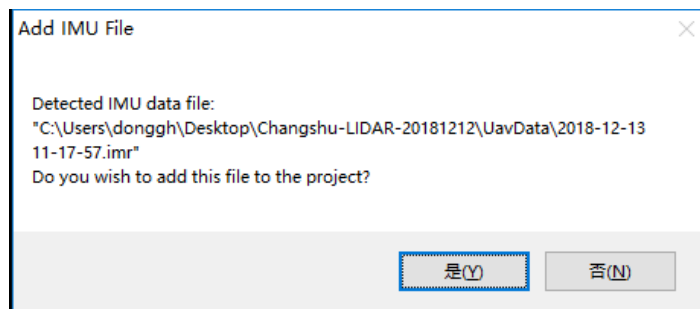


图 20 紧耦合差分解算步骤 4

(6) 若在上一步结束时没有提示自动添加 IMR 文件，则点击【File】-【Add IMU File】，选择 STIM300 记录的 .imr 文件。

(7) 完成上述数据添加后，IE 主界面会显示飞行轨迹和基站点。

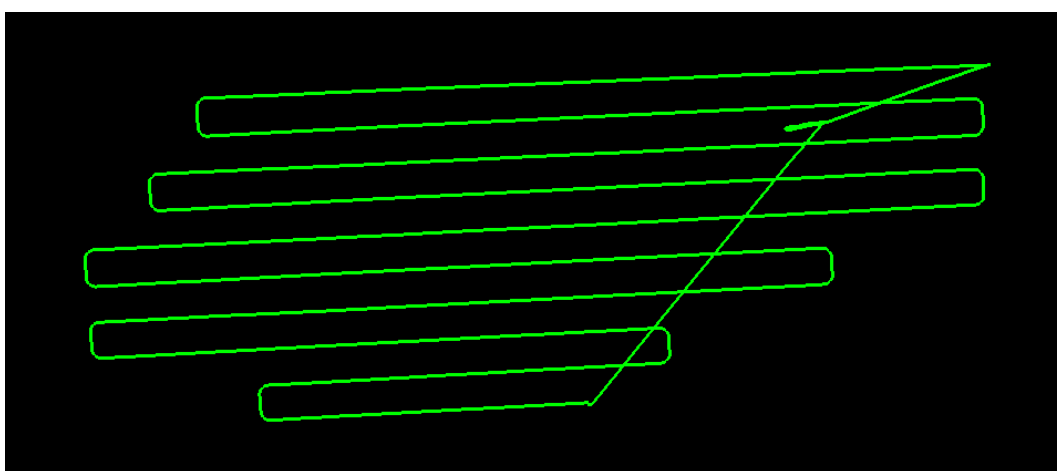


图 21 紧耦合差分解算步骤 5

(8) 点击【Process】-【Process TC(Tightly Coupled)】进行紧耦合解算功能。

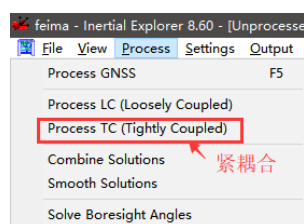


图 22 紧耦合差分解算步骤 6

(9) 设置【Processing Settings】、【Lever Arm】和【IMU】旋转参数，其中【Processing Settings】选择 SPAN Airborne (STIM300)，本公司的激光设备 Lever Arm 和 IMU 旋转参数都是固定数值，配置如下：

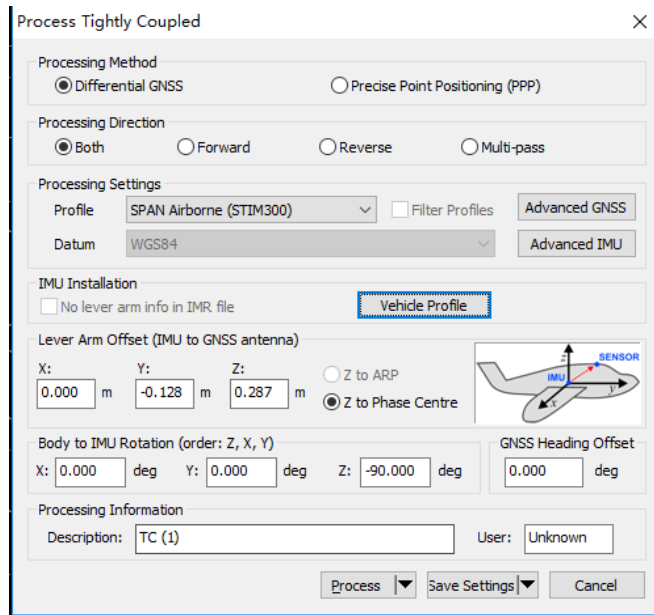


图 23 LIDAR100 设置

Lever Arm 和 IMU 旋转参数可以点击【Vehicle Profile】按钮进行设置保存，下次直接点击该按钮读取即可，避免频繁输入。

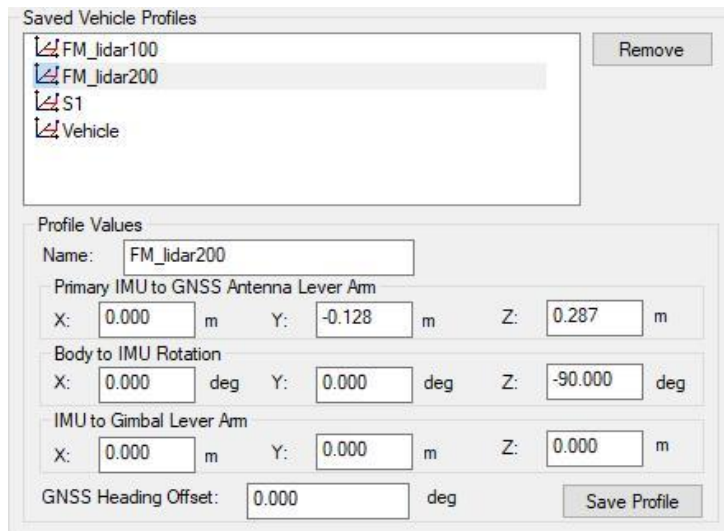


图 24 LIDAR200 设置

(10) 点击【Process】按钮进行解算，点击后会有警告信息，若没有错误信息，可点击【Continue】进行解算。至此，在 IE 中进行的差分 POS 数据解算已完成。

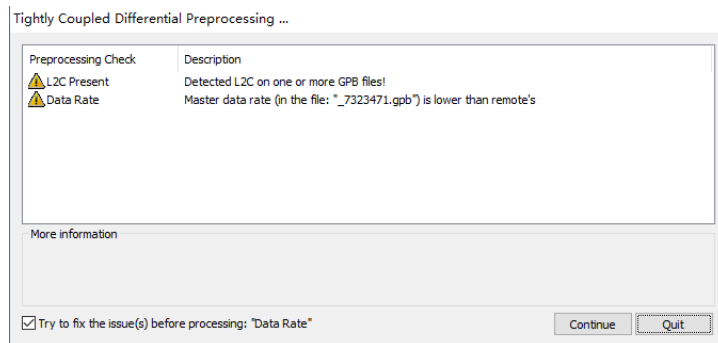


图 25 紧耦合差分解算步骤 7

### 4.3.5.3 质量检查与轨迹导出

(1) 点击下图红色框按钮，查看 POS 数据解算精度，一般精度小于 2cm 为解算正常。

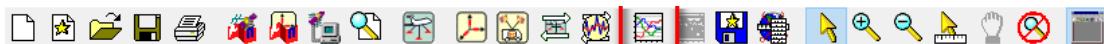


图 26 精度查看 1

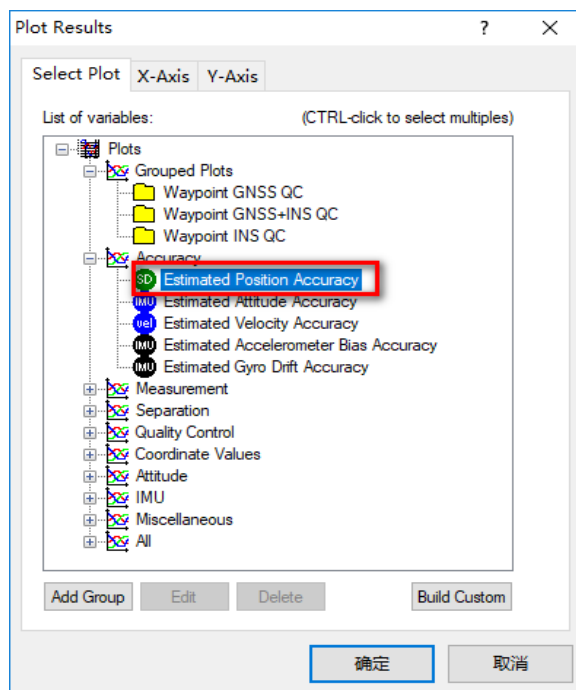


图 27 精度查看 2

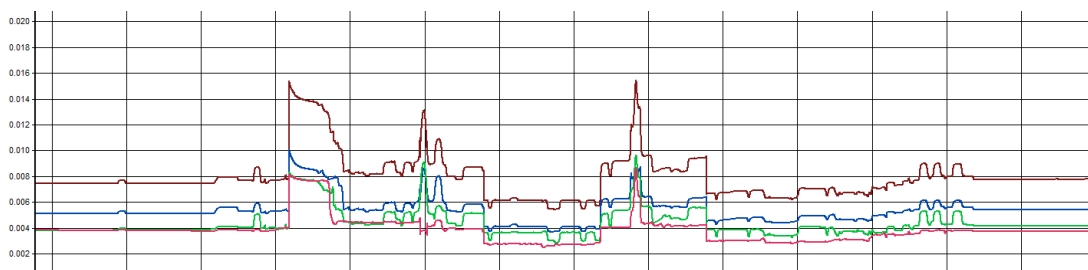


图 28 精度查看 3

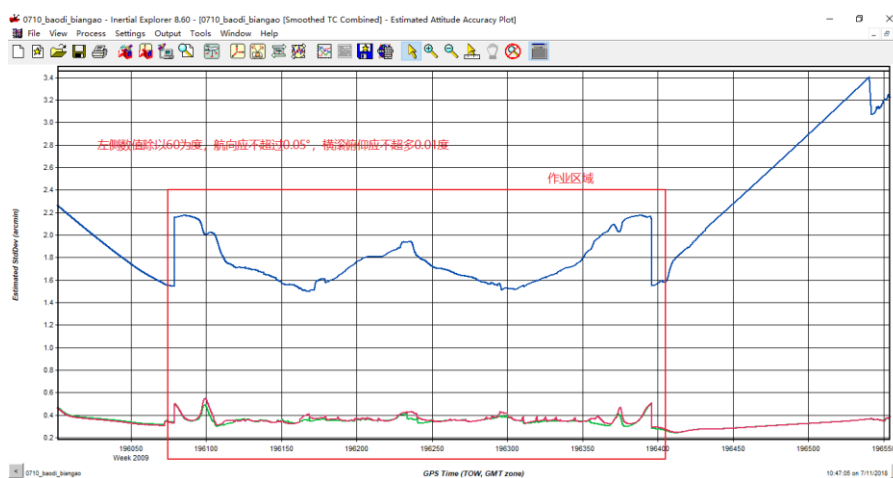


图 29 精度查看 4

(2) 点击【File】-【Output-Export to SBET】导出解算结果。

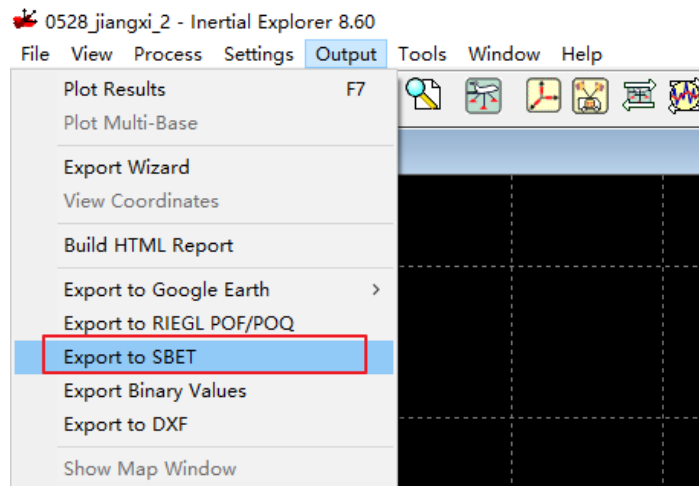


图 30 结算结果导出

选择输出位置(默认 IE 工程目录下)、检查 GPS 时间、点击【OK】导出 SBET.OUT 文件。

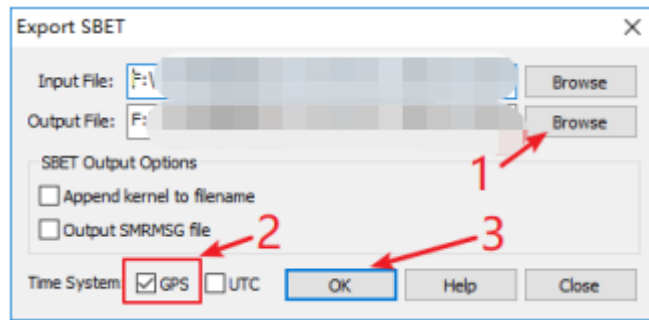


图 31 选择输出位置

#### 4.4 云数据预处理

点云数据预处理是在飞马无人机管家的“智激光”模块中，将解算得到的 SBET.OUT 和 LIDAR 原始数据进行融合，来获得标准格式的点云的过程，具体步骤如下图：

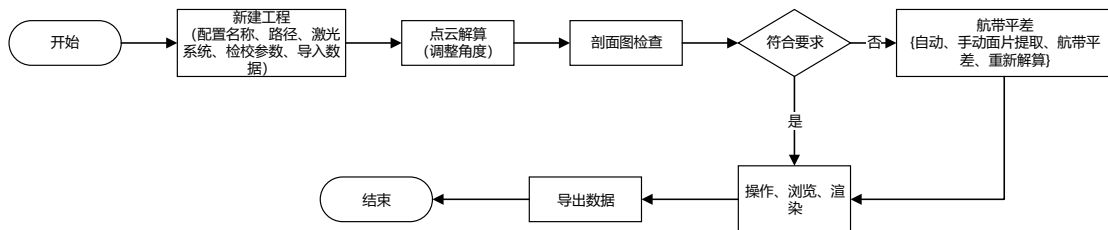


图 32 点云数据处理流程

##### 4.4.1 新建项目

将原始 LIDAR 数据和轨迹数据导入并完成项目新建。具体步骤如下：

(1) 打开无人机管家中的智激光模块。



图 33 打开智激光

(2) 点击【文件】-【新建项目】，在弹出的创建工程向导中输入“工程名称、工程路径、激光系统”。点击【下一步】。



图 34 新建项目

(3) 单击【云端下载】，输入设备 ID 号直接下载激光校正文件，点击【下一步】。



图 35 下载激光校正文件

(4)添加 LIDAR 原始数据(数据格式. rxp)和 IE 软件输出的轨迹数据(数据格式. out), 点击【完成】, 完成新建项目。

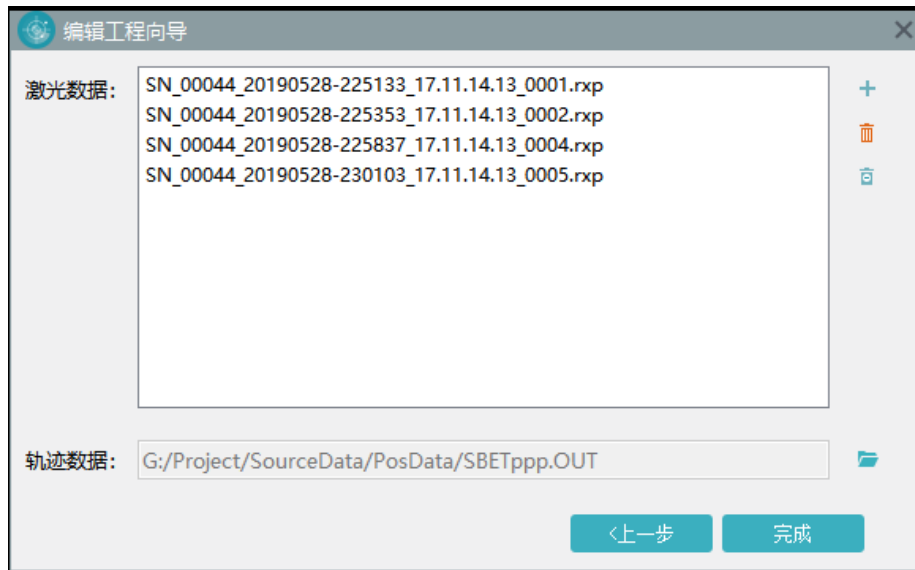


图 36 添加 LIDAR 原始数据

(5) 在主界面的信息输出窗口会提示成功加载的 LIDAR 数据、轨迹数据, 并完成了新建项目, 新建项目格式为. fmp, 同时主界面会显示飞行任务的轨迹。

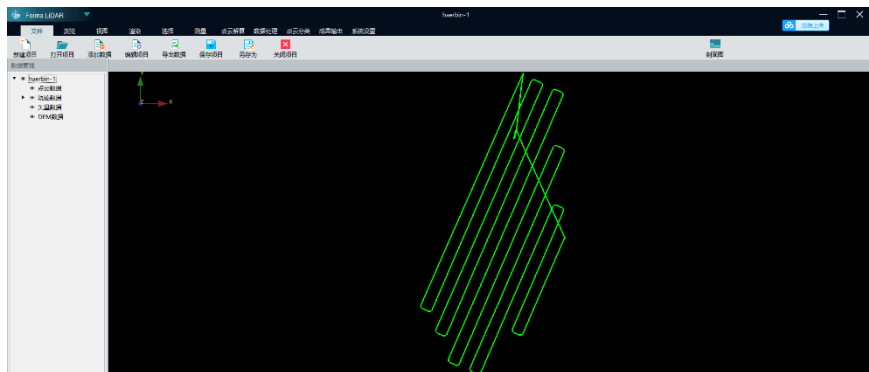


图 37 数据轨迹

#### 4.4.2 点云解算

完成新建项目后, 就该进行点云的解算, 解算步骤如下。

(1) 点击【点云解算】-【点云解算】, 打开点云解算功能对话框。



图 38 点云解算

(2) 按照默认参数解算即可 (可适当扩大视场角增加点数量, 使树木轮廓体现的更加丰满), 点击“开始”按钮, 软件进行解算并自动显示点云数据。



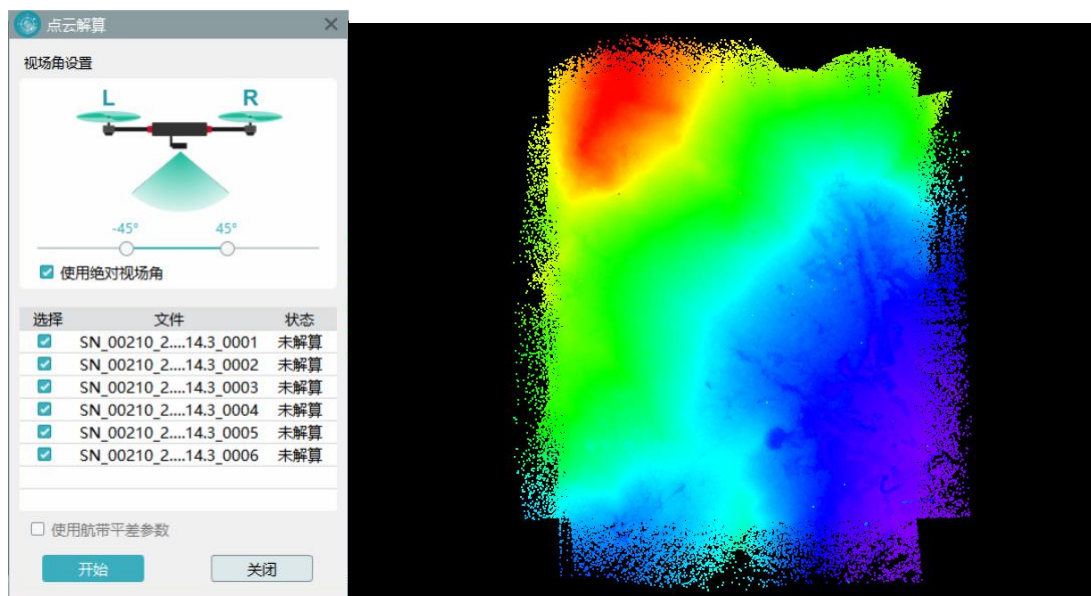


图 39 点云解算

#### 4.4.3 数据检核

点云解算完成后，利用智激光的剖面功能，检查数据质量。具体操作步骤如下。

- (1) 点击【渲染】-【航带】，这时软件会根据航带把点云渲染成不同颜色。



图 40 数据检核



图 41 航带渲染

#### 4.4.4 特征提取

点击【点云解算】-【特征提取】，按照默认参数，点击【开始】，软件会自动提取特征点，待底部工具条完成，且信息输出框提示提取特征点数据时，完成特征点提取。



图 42 特征点提取



图 43 自动提取匹配面

#### 4.4.5 航带平差

完成特征提取，点击【点云解算】-【航带平差】，点击【计算】，将 6.4 节提取出来特征点进行配准，最后点击【应用】。



图 44 航带平差



图 45 扫描数据调整

软件提示是否重新解算点云，点击【是】即可优化点云，消除点云分层。

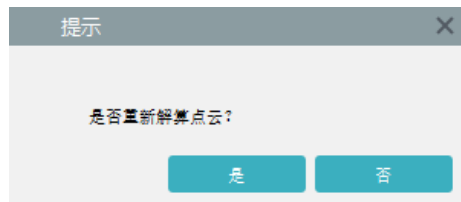


图 46 消除点云分层

#### 4.4.6 点云标准格式 (LAS) 导出

经过坐标转换之后，单击【文件】-【导出数据】即可完成标准 LAS 格式的点云成果导出。

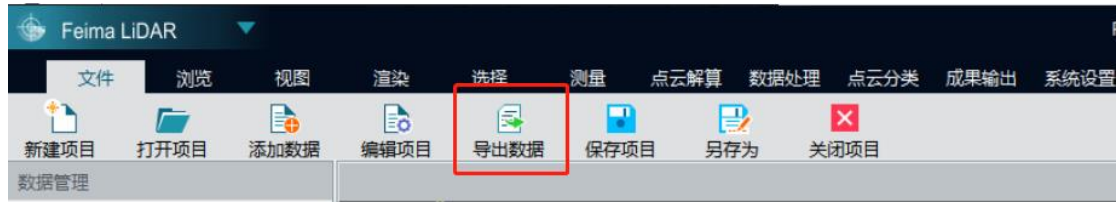


图 47 数据导出

#### 4.5 应用分析

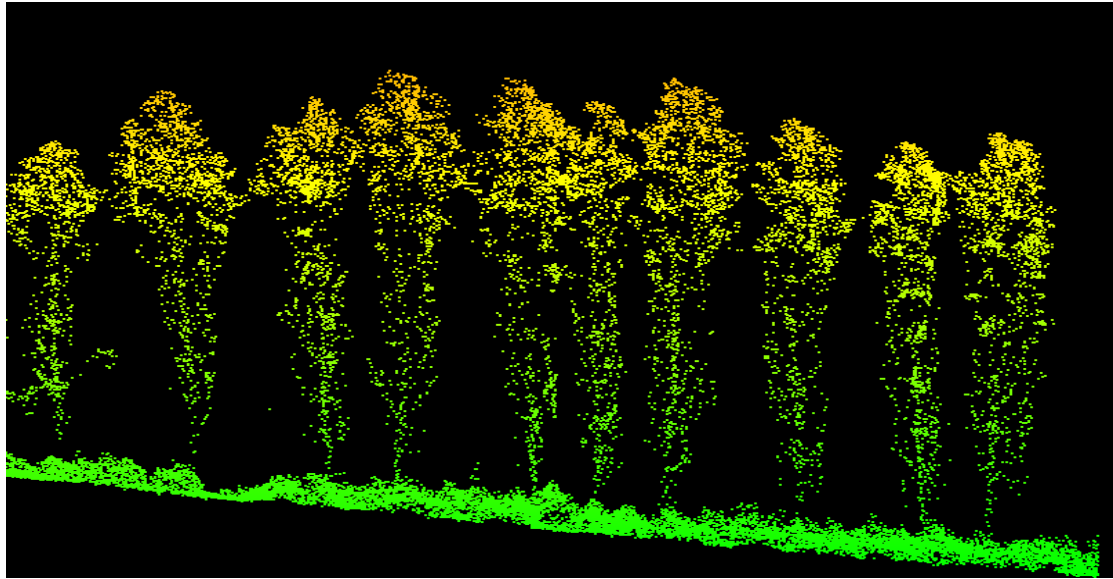


图 48 成果分析 1

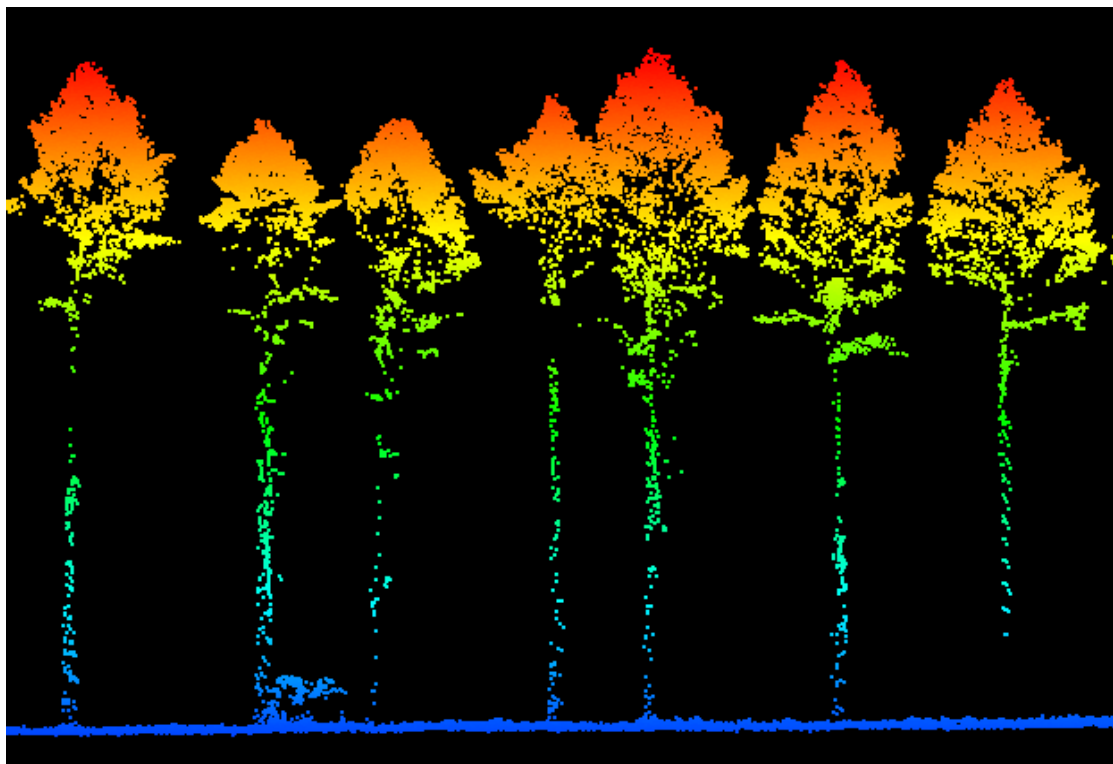


图 49 成果分析 2

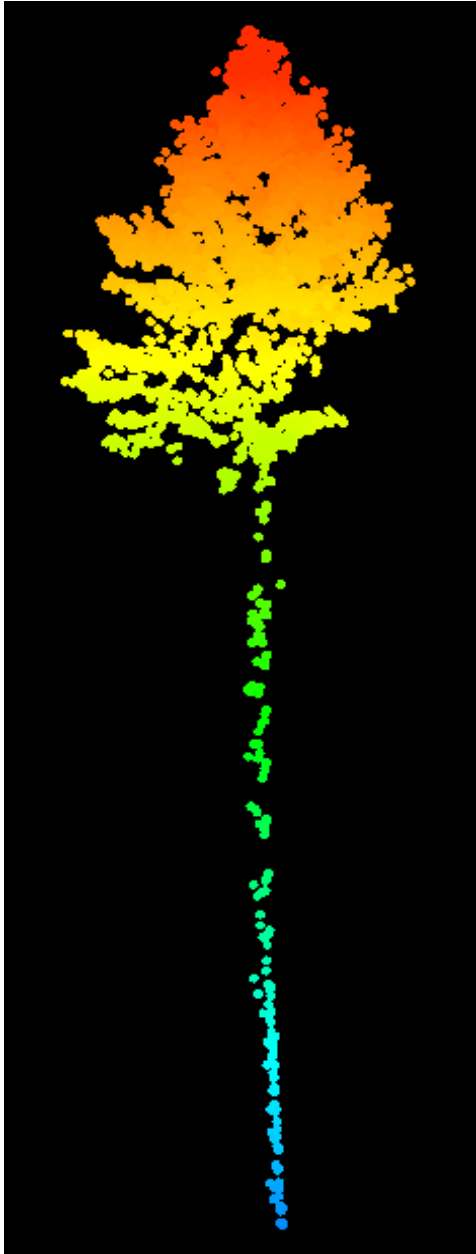


图 50 成果分析 3

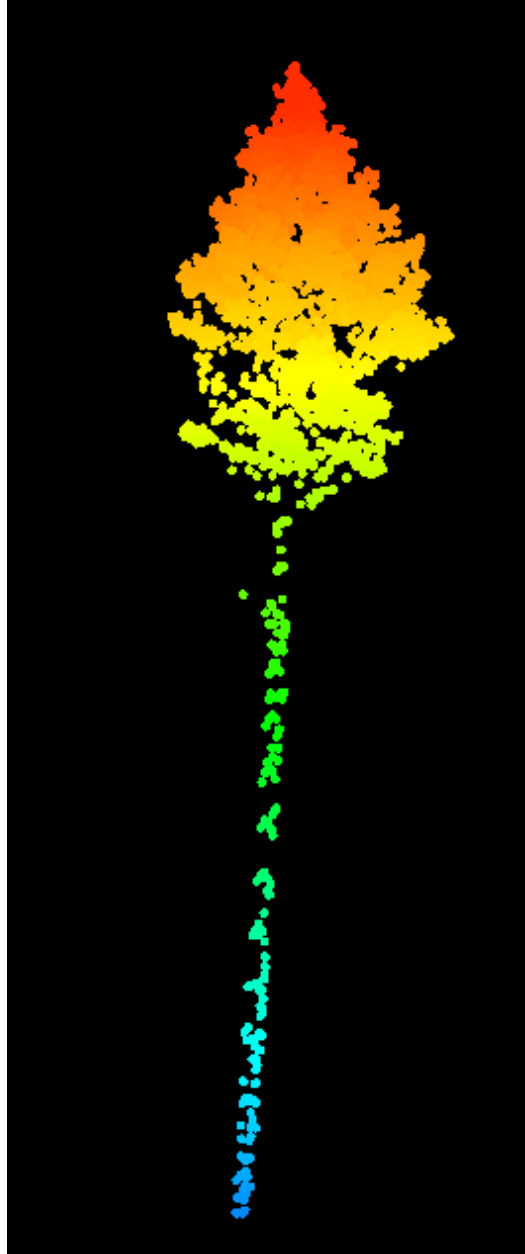


图 51 成果分析 4

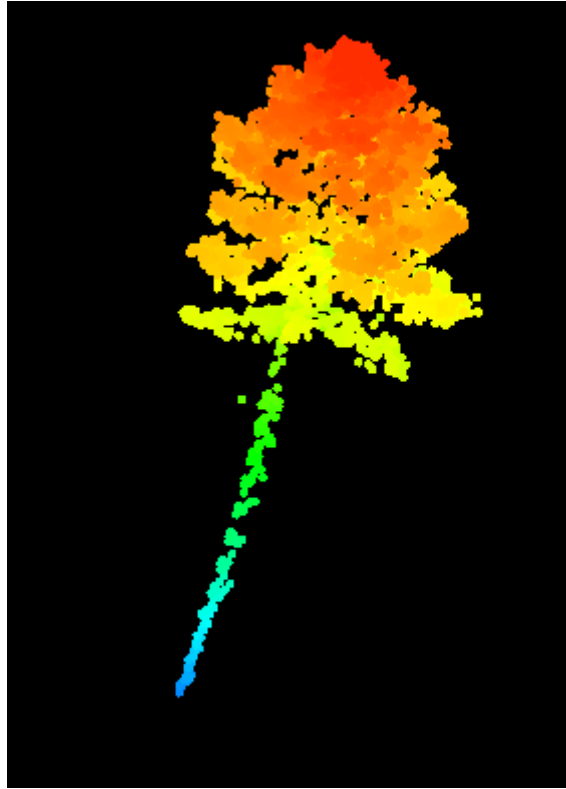


图 52 成果分析 5

## 5 总结

激光雷达作为一种主动遥感技术，在林业调查中起到越来越重要的作用。本研究利用一种低成本、灵活便捷的无人机激光雷达系统（飞马 D200s 多旋翼无人机挂载高精度 RIEGL mini VUX-1UAV 扫描仪）进行激光雷达点云数据的获取。本项目数据采集为多为山区林地，地形高低起伏，测区高差较大，林区森林结构复杂。通过飞马无人机自适应地形变高飞行，可随山体地形的高度变高飞行，保证了整体的相对航高的一致性，从而保证数据的精度以及完整性。通过 RIEGL mini VUX-1UAV 传感器可以获得多次回波的特性，可以高效的获取植被垂直结构信息和林下地形信息，为不同尺度森林高度信息的提取提供了便利条件。通过高密度的激光雷达点云可以简单高效的获取单木及林分水平的林业参数，提高了林业调查效率。一定程度上可以代替部分外业实测避免伐木与复杂人工量，克服了很多传统林业数据采集过程中的障碍。

总的来说，该项目为无人机激光雷达森林生态应用提供借鉴，为简单、高效、精细化的林业调查作业提供了项目参考。随着机载激光雷达技术的不断发展，数据精确度会越来越高，并且结合地基雷达数据做点云融合后，可在林业调查森林研究方向有着更高精度、更广泛的应用。

版权声明：不可在期刊上公开发表