



GREAT-MSF 用户指南



目录

第一章 概述	1
第二章 组合导航原理	2
2.1 惯性传感器误差与惯性导航	2
2.1.1 惯性器件误差源	2
2.1.2 惯性导航初始化	3
2.1.3 惯性导航机械编排	4
2.2 GNSS/惯性组合模型	5
2.2.1 惯性导航误差状态模型	5
2.2.2 GNSS 相关参数状态模型	5
2.2.3 GNSS/惯性松组合量测模型	6
2.2.4 GNSS/惯性紧组合量测模型	7
第三章 环境要求和许可证	10
3.1 环境要求	10
3.2 许可证	10
3.3 版权	10
第四章 在 windows 下编译与安装	12
第五章 算例数据处理说明	15
5.1 算例文件目录结构	15
5.2 在 VS 中进行参数配置与运行	15
5.3 使用绘图脚本进行结果评估	17
第六章 附录	21
6.1 XML 配置文件说明	21
6.2 结果文件 (**.ins) 说明	31
6.3 轨迹文件 (**.kml) 说明	33



第一章 概述

GREAT (GNSS+ REsearch, Application and Teaching) 软件由武汉大学测绘学院设计开发，是一个用于空间大地测量数据处理、精密定位和定轨以及多源融合导航的综合性软件平台。软件中，核心计算模块使用 C++语言(C++17)编写，辅助脚本模块使用 Python3 和 C-Shell 语言实现自动化数据处理。其中，所有 C++ 模块的编写都遵循 Google 开源项目代码风格指南，并且使用 GIT 工具进行版本控制。GREAT 软件使用 CMAKE 工具进行编译管理，用户可以灵活选择 GCC、Clang、MSVC 等主流 C++编译器。目前软件提供了 Windows 和 Linux 平台的命令行应用程序。

GREAT-MSF 是 GREAT 软件中的一个重要模块，主要用于多传感器融合 (Multi-Sensor Fusion, MSF) 导航解算，官方获取链接为：<https://github.com/GREAT-WHU/GREAT-MSF.git>。GREAT-MSF 由 GREAT-PVT 扩展而来 (<https://github.com/GREAT-WHU/GREAT-PVT.git>)。软件中，核心计算模块使用 C++语言编写，辅助脚本模块使用 Python3 语言实现结果绘制。GREAT-MSF 软件使用 CMAKE 工具进行编译管理，用户可以灵活选择 GCC、Clang、MSVC 等主流 C++编译器。GREAT-MSF 由 2 个可移植程序库组成，分别是 LibGREAT 和 LibGnut。除了原 GREAT-PVT 中的 GNSS 定位解决方案外，LibGREAT 库还进一步集成了多传感器融合导航功能，包括滤波估计中涉及的数据解码、存储以及传感器融合算法的实现。GREAT-MSF 软件在 GREAT-PVT 功能的基础上进一步扩展以下主要功能：

- 支持 GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2/3、QZSS 等卫星导航系统
- 支持 PPP/INS 松耦合和紧耦合，包括无电离层组合、非差非组合等 PPP 定位模型
- 支持 RTK/INS 松耦合和紧耦合，支持载波相位模糊度固定
- 支持组合系统动态快速初始化，包括位移矢量和速度矢量辅助对准
- 支持自定义 IMU 数据格式、噪声模型
- 支持零速约束和非完整性约束模型，支持轮速里程计

此外，软件包还提供定位结果绘图脚本，便于用户对数据进行结果分析。



第二章 组合导航原理

2.1 惯性传感器误差与惯性导航

2.1.1 惯性器件误差源

惯性器件，包括陀螺仪和加速度计，都存在零偏误差、比例因子误差和交叉耦合误差以及测量随机噪声，且每种误差源有四个组成部分：稳定的常值部分，随温度变化的部分，逐次启动部分与运行中的变化项。IMU 测量值可以表示为：

$$\begin{cases} \tilde{\omega}_{ib}^b = (\mathbf{I} + \mathbf{S}_\omega) \cdot \omega_{ib}^b + \delta\omega_{ib}^b + \varepsilon_\omega \\ \tilde{\mathbf{f}}_{ib}^b = (\mathbf{I} + \mathbf{S}_f) \cdot \mathbf{f}_{ib}^b + \delta\mathbf{f}_{ib}^b + \varepsilon_f \end{cases} \quad (2-1)$$

式中， $\tilde{\omega}_{ib}^b$ 与 ω_{ib}^b 分别代表陀螺仪测量的角速度与真实角速度； $\tilde{\mathbf{f}}_{ib}^b$ 与 \mathbf{f}_{ib}^b 分别代表加速度计测量的比力加速度与真实比力加速度； \mathbf{I} 为单位阵； \mathbf{S}_ω 和 \mathbf{S}_f 代表陀螺仪与加速度计乘数因子误差，由比例因子误差和交叉耦合误差组成； $\delta\omega_{ib}^b$ 与 $\delta\mathbf{f}_{ib}^b$ 为陀螺仪和加速度计测量误差，通常情况下可以仅包括常值零偏 \mathbf{b}_g 与 \mathbf{b}_a ； ε_ω 与 ε_f 为角速度和比力测量噪声。

零偏误差指的是传感器本身存在的数值偏差，是惯性器件误差的主要组成因素，含静态与动态两部分。其中静态部分在一次运行中都保持不变，但每次启动时数值都不同；而动态部分会随着时间不断变化，一般称为零偏稳定性或不稳定性。对于大多数低成本 MEMS IMU，其零偏常值部分较大且稳定性差，这是导致低成本 IMU 导航误差快速累积的根本原因。在导航数据处理中，零偏综合误差一般可建模为一阶高斯马尔可夫模型。

比例因子误差是指输入量的乘数项，会使得陀螺仪输出误差与输入的角速度成正比，加速度计输出误差与输入的比力成正比。而交叉耦合误差是由于 IMU 器件敏感轴不正交引起的，一般受工艺所限。二者在一次启动中保持不变，可视作常数估计。但在大多数车载场景下，受限于可观测性，需谨慎估计此类参数。

惯性器件测量噪声受多种因素影响，如机械振动、信号处理等。其中高频噪声部分会随着惯性导航积分运算后被平滑，而低于 1 Hz 的噪声分量一般可近似为白噪声，通常以功率谱密度来描述，其二次方与采样频率二次方的乘积即为噪



声的方差强度。角速度测量噪声经过时间积分之后将产生姿态随机游走误差，而比力测量噪声经过时间积分将产生速度随机游走误差。

2.1.2 惯性导航初始化

惯性器件测量值为当前时刻相较于上一时刻的相对量，每一个历元机械编排结果均是在上一历元基础上计算得到。因此惯性导航系统在开始提供服务前应进行初始化，主要包括位置、速度与姿态初始化。初始位置与速度一般通过外部导航系统直接提供，如 GNSS 定位、地图匹配、多普勒雷达等；而姿态初始化，一般称初始对准，包括水平姿态与方位角的初始化，是导航中主要关注的问题。

载体静止时刻加计比力输出仅受重力的影响，即在横滚与俯仰角的作用下造成了重力在水平方向的加速度分量，因此水平姿态可直接利用数秒内加计数据平滑后计算得到。方位初始化按照是否有外部信息可分为自对准和辅助对准，按载体状态可分为静基座对准与动态对准。自对准取决于 IMU 陀螺寻北性能，包括粗对准与精对准，一般认为零偏误差低于地球自转角速度一个数量级的陀螺 ($<1 \text{ deg/h}$) 才具备自对准能力。然而实际车载组合导航应用中的陀螺大部分不具备自对准能力，因此一般通过外部信息辅助完成初始化。常用的方位初始化方式有 GNSS 双天线定向、GNSS 运动矢量辅助初始化、磁航向初始化。

GNSS 运动矢量辅助初始化本质均是基于 GNSS 两点之间的方向矢量实现对准，运动矢量包括位移矢量与速度矢量。位移矢量基于车辆直线行驶中方位角基本不变这一物理特性，在行进过程中计算车辆行驶方位角 ψ 。而速度矢量辅助初始化是利用当前时刻载体速度方向在当地水平坐标系下的投影实现单历元方位解算。二者基本计算公式如下：

$$\begin{aligned}\psi &= \arctan\left(\left|\mathbf{dr}_{(t_i, t_j), E}^l\right| / \left|\mathbf{dr}_{(t_i, t_j), N}^l\right|\right) \\ \psi &= \arctan\left(\left|\mathbf{v}_{t, E}^l\right| / \left|\mathbf{v}_{t, N}^l\right|\right)\end{aligned}\quad (2-2)$$

式中， $\mathbf{dr}_{(t_i, t_j)}^l$ 表示 t_i 至 t_j 时刻载体的位移矢量； \mathbf{v}_t^l 表示 t 时刻载体速度矢量。同样，两种方法中方位角的估计精度分别取决于位置矢量与速度矢量精度。

2.1.3 惯性导航机械编排

机械编排指的是对原始观测量通过时间积分获取位置、速度与姿态，具体过程为：位置、速度与姿态经过初始化后，对原始测量值进行误差补偿，角速度积分获取当前时刻姿态，利用姿态对加速度进行分解投影，之后进行两次时间积分获取速度与位置。地心地固坐标系下惯性导航微分方程可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{C}}_b^e \\ \dot{\mathbf{v}}^e \\ \dot{\mathbf{r}}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^e \cdot (\boldsymbol{\omega}_{eb}^b \times) \\ \mathbf{C}_b^e \mathbf{f}^b - 2\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times \mathbf{v}^e + \mathbf{g}^e \\ \mathbf{v}^e \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

式中，角标 b 与 i 分别表示载体坐标系与惯性坐标系； \mathbf{C}_b^e 表示由 b 系到 e 系的坐标变换矩阵； $\boldsymbol{\omega}_{eb}^b$ 表示 b 系相对于 e 系的角速度在 b 系下的投影； $\boldsymbol{\omega}_{ie}^e$ 表示 e 系相对于 i 系的角速度，即地球自转角速度，在 e 系下的投影； \mathbf{g}^e 为重力矢量在 e 系下的投影； \mathbf{r}^e 与 \mathbf{v}^e 分别为 e 系下载体位置与速度。

机械编排包括姿态更新、比力变换、速度更新与位置更新。对于当前时刻 t_k ，其姿态更新算法可表示为：

$$\mathbf{C}_{b(t)}^{e(t)} = \mathbf{C}_{e(t-1)}^{e(t)} \mathbf{C}_{b(t-1)}^{e(t-1)} \mathbf{C}_{b(t)}^{b(t-1)} \quad (2-4)$$

式中， $\mathbf{C}_{e(t-1)}^{e(t)}$ 表示 t_{k-1} 到 t_k 时刻地固系相对于惯性系的旋转，可由地球自转角速度 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^e$ 导出； $\mathbf{C}_{b(t-1)}^{b(t)}$ 表示 t_{k-1} 到 t_k 时刻载体系的旋转，可由校正后的测量角速度导出。

加速度计测量值是载体坐标系下的比力，因此需要利用姿态将其投影到选定的导航坐标系下才可进行积分得到速度变化量，需要注意应扣除重力加速度与载体运动引起的加速度分量，统称有害加速度。因此， t_k 时刻速度可以表示为：

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^e(t_k) &= \mathbf{v}^e(t_{k-1}) + \Delta \mathbf{v}_{sf}^e + \Delta \mathbf{v}_{hf}^e \\ \Delta \mathbf{v}_{sf}^e &= \int_{t_{k-1}}^{t_k} \mathbf{C}_b^e(t_k) \mathbf{f}^b(t_k) dt \\ \Delta \mathbf{v}_{hf}^e &= \int_{t_{k-1}}^{t_k} [-2\boldsymbol{\omega}_{ie}^e(t_k) \times \mathbf{v}^e(t_k) + \mathbf{g}^e(t_k)] dt \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中， $\Delta \mathbf{v}_{sf}^e$ 与 $\Delta \mathbf{v}_{hf}^e$ 表示比力速度增量与有害加速度增量。位置更新采用梯形积分：

$$\mathbf{r}^e(t_k) = \mathbf{r}^e(t_{k-1}) + [\mathbf{v}^e(t_k) + \mathbf{v}^e(t_{k-1})] / 2 \quad (2-6)$$

2.2 GNSS/惯性组合模型

2.2.1 惯性导航误差状态模型

载体导航状态基于 INS 机械编排进行时间传播，地固系下导航状态误差微分方程可以表示为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \delta \dot{\mathbf{v}}^e \\ \delta \dot{\mathbf{r}}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times \boldsymbol{\phi} - \mathbf{C}_b^e \delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b + \boldsymbol{\xi}_\phi \\ \mathbf{C}_b^e \mathbf{f}^b \times \boldsymbol{\phi} - 2\boldsymbol{\omega}_{ie}^e \times \delta \mathbf{v}^e + \mathbf{C}_b^e \delta \mathbf{f}^b + \boldsymbol{\xi}_v \\ \delta \mathbf{v}^e + \boldsymbol{\xi}_r \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

式中， $\boldsymbol{\phi}$ 、 $\delta \mathbf{v}^e$ 与 $\delta \mathbf{r}^e$ 分别为姿态失准角、速度误差与位置误差，其中姿态失准角定义为计算姿态矩阵与真实姿态矩阵之间的差异，描述为 $\mathbf{C}_b^e = (1 + \boldsymbol{\phi} \times) \tilde{\mathbf{C}}_b^e$ ； $\boldsymbol{\xi}_\phi$ 、 $\boldsymbol{\xi}_v$ 与 $\boldsymbol{\xi}_r$ 分别为姿态、速度与位置系统驱动白噪声，均服从零均值高斯分布。需要注意的是，在地固系下的姿态没有实际物理意义，需要转换为与当地水平坐标系之间的姿态矩阵后才可提取出一般意义的姿态角（俯仰、横滚与航向）。

IMU 相关状态包括但不限于传感器零偏误差、比例因子误差、重力模型误差、交叉耦合误差等。状态的选择与传感器等级、载体机动状态等因素有关，通常情况下与载体动态相关的 IMU 误差是可观的，但并非全部可观，因此一般会通过仿真分析以判断不同运动状态下 IMU 参数的可观测性。在大多数车载导航场景下，仅将陀螺仪和加速度计零偏误差选作 IMU 相关参数即可，一般将其模型化为一阶高斯-马尔可夫过程：

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{b}}_g \\ \dot{\mathbf{b}}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} \mathbf{b}_g + \mathbf{w}_g \\ -\frac{1}{\tau_a} \mathbf{b}_a + \mathbf{w}_a \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

式中， \mathbf{w}_g 与 \mathbf{w}_a 为陀螺仪与加速度计测量噪声； τ_g 与 τ_a 为马尔可夫过程的自相关时间；其粗略值可以利用 Allan 方差进行功率谱分析获取。

2.2.2 GNSS 相关参数状态模型

GNSS 相关状态视所采用的处理策略而定。在 RTK 模式中 GNSS 相关的待估参数包括残余的大气误差与双差模糊度，在非差无电离层组合中，GNSS 相关

状态包括接收机钟差、无电离层模糊度等。无论采取何种 GNSS 数据处理策略，于 GNSS 相关状态而言，在紧耦合估计器中仍可按照其本身模型化方法进行估计，具体可参见《GREAT-PVT_1.0》，此处不再重复。

2.2.3 GNSS/惯性松组合量测模型

通过 GNSS 天线相位中心与 IMU 中心已知的空间关系（即杆臂）建立数学模型进行中心归算，即：

$$\mathbf{r}_{ant}^e = \mathbf{r}_{imu}^e + \mathbf{C}_b^e \cdot \mathbf{l}_{ant}^b \quad (2-9)$$

式中， \mathbf{r}_{ant}^e 和 \mathbf{r}_{imu}^e 分别表示地固系下 GNSS 天线相位中心与 IMU 中心的位置； \mathbf{l}_{ant}^b 表示天线中心在 IMU 载体坐标系下的位置矢量，可事先精确测量。综合考虑各物理量的误差，可导出：

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_{ant}^e - \delta \mathbf{r}_{ant}^e &= \tilde{\mathbf{r}}_{imu}^e - \delta \mathbf{r}_{imu}^e + (1 + \phi \times) \tilde{\mathbf{C}}_b^e \cdot \mathbf{l}_{ant}^b \\ \Rightarrow \delta \tilde{\mathbf{r}}_{ant}^e &= \delta \mathbf{r}_{imu}^e + (\tilde{\mathbf{C}}_b^e \cdot \mathbf{l}_{ant}^b) \times \phi \end{aligned} \quad (2-10)$$

公式 2-9 与 2-10 即为 GNSS 与 IMU 融合空间归算模型，综合文档《GREAT-PVT_1.0》中的 GNSS 模型可导出基于原始伪距和相位观测值的松/紧组合量测模型。需要注意的是，紧耦合 GNSS 原始观测是基于惯导机械编排的位置经过空间转换后进行泰勒展开的。

PPP/INS 松组合的量测方程如下：

$$\tilde{\mathbf{p}}_b^e - \tilde{\mathbf{p}}_{ant}^e + \tilde{\mathbf{C}}_b^e \cdot \mathbf{p}_{ant}^b + \boldsymbol{\varepsilon}_p = (\tilde{\mathbf{C}}_b^e \cdot \mathbf{l}_{ant}^b) \times \phi_b^e + \delta \mathbf{p}_b^e \quad (2-11)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_b^e - \tilde{\mathbf{v}}_{ant}^e + \tilde{\mathbf{v}}_{trans}^e + \boldsymbol{\varepsilon}_v = \tilde{\mathbf{v}}_{trans}^e \times \delta \phi_b^e + \delta \mathbf{v}_b^e - \mathbf{C}_b^e \cdot (\mathbf{l}_{ant}^b \times) \cdot \delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \quad (2-12)$$

其中，

$$\tilde{\mathbf{v}}_{trans}^e = \left[\tilde{\mathbf{C}}_b^e \cdot (\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^b \times) - (\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ie}^e \times) \cdot \tilde{\mathbf{C}}_b^e \right] \cdot \mathbf{l}_{gnss}^b \quad (2-13)$$

式中， $\tilde{\mathbf{p}}_{gnss}^e$ 和 $\tilde{\mathbf{v}}_{gnss}^e$ 分别是由 GNSS 算法导出的位置和速度，测量噪声为 $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ 。
 $\tilde{\mathbf{v}}_{trans}^e$ 是由于传感器中心不一致带来的速度杆臂补偿项。



2.2.4 GNSS/惯性紧组合量测模型

2.2.4.1 PPP/INS 紧组合量测模型

以无电离层组合为例，PPP/INS 模式下紧耦合模型观测方差可以表示为：

$$\begin{cases} v_{P,IF}^s = \mathbf{g}^s (\mathbf{l}^e \times) \cdot \boldsymbol{\phi} + \mathbf{g}^s \cdot \delta \mathbf{r}^e + c \cdot \delta t_r + mf^s \cdot \delta T_w + e_p^s \\ v_{L,IF}^s = \mathbf{g}^s (\mathbf{l}^e \times) \cdot \boldsymbol{\phi} + \mathbf{g}^s \cdot \delta \mathbf{r}^e + c \cdot \delta t_r + mf^s \cdot \delta T_w + \lambda_{IF} \cdot \delta N_{IF} + \varepsilon_L^s \end{cases} \quad (2-14)$$

式中， $v_{P,IF}^s$ 和 $v_{L,IF}^s$ 表示无电离层组合伪距和相位观测值与计算值之差； δT_w 表示天顶方向对流层湿延迟误差； mf^s 为对流层天顶方向投影函数； $\mathbf{l}^e = \mathbf{C}_b^e \cdot \mathbf{l}_{ant}^b$ ； c 为真空中的光速； \mathbf{g}^s 表示该卫星视线向量； δt_r 表示接收机钟差； λ 表示波长， N 为相位模糊度（周）； e_p^s 和 ε_L^s 分别为伪距和相位观测值噪声。由于卫星端和接收机伪距和相位存在硬件延迟，这部分延迟误差被相位模糊度吸收，导致模糊度失去整数特性。这里仅以无电离层组合为例给出了非差 PPP/SINS 紧耦合观测模型，非组合 PPP 模型与此一致，此处不再赘述。

2.2.4.2 RTK/INS 紧组合量测模型

对于经典 RTK 方法，紧耦合观测量为双差伪距与相位观测值，其紧组合量测方程为：

$$\begin{cases} v_{P,DD} = \mathbf{g}^{m,n} (\mathbf{l}^e \times) \cdot \boldsymbol{\phi} + \mathbf{g}^{m,n} \cdot \delta \mathbf{r} + e_{DD} \\ v_{L,DD} = \mathbf{g}^{m,n} (\mathbf{l}^e \times) \cdot \boldsymbol{\phi} + \mathbf{g}^{m,n} \cdot \delta \mathbf{r} + \delta N_{DD} + \varepsilon_{DD} \end{cases} \quad (2-15)$$

式中符号与前文一致；在中长基线条件下还需增加残余大气延迟误差。上式为附加模糊度参数的紧密耦合模型，即一并将模糊度参数纳入组合滤波器。

总的来说，GNSS/SINS 紧耦合的详细处理流程可以描述为：在完成系统初始化后（包括估计器初始化与惯导初始对准），组合滤波器进入导航阶段，首先对于 IMU 原始输出进行误差校正与不可交换误差的补偿，之后依次完成姿态、速度与位置的更新，而后利用惯导误差传播模型进行状态预测；同时基于 INS 高精度位置对 GNSS 原始观测值进行辅助预处理，包括周跳探测与粗差初筛；而后对 INS 位置中心归算，并基于此位置构建观测模型，完成量测更新。在量测更新



结束之后利用验后质量控制方法进行粗差探测并迭代执行量测更新,直至观测中不含有粗差。最终对状态参数进行闭环反馈校正。

2.3 零速约束和非完整性约束模型

2.3.1 零速约束模型

零速度约束是一种显著且极为有效的可靠信息源。车辆处于静止状态时,速度、角速度以及加速度等反映载体状态变化的速率量在理想情况下均可视为零,因此针对不同物理量可构建相应的约束模型,以零速度观测模型为例:

$$\mathbf{0} = \mathbf{v}_{imu}^e \Rightarrow \tilde{\mathbf{v}}_{imu}^e + \boldsymbol{\varepsilon}_v = \delta \mathbf{v}_{imu}^e \quad (2.16)$$

式中, $\tilde{\mathbf{v}}_{imu}^e$ 为惯导机械编排的速度; $\boldsymbol{\varepsilon}_v$ 为量测白噪声,受到载体震动与传感器噪声影响。

零速度观测更新的关键在于载体运动状态的判断,由于惯性导航误差随时间累积,因此直接利用 IMU 自身机械编排的速度并不能较好地识别静止状态,一般需通过外部信息辅助运动状态探测,如 GNSS 速度、轮式里程计脉冲、相机与激光雷达帧间匹配等,也可利用零偏校正和降噪后的 IMU 数据进行运动状态探测。准确识别静止状态后的量测信息具有极强的约束作用,可赋予较小的量测噪声方差。

2.3.2 非完整性约束模型

由于车辆本身的运动限制,大多数情况下均为直线行驶状态,即在车体坐标系 \mathbf{v} 下的侧向与法向速度为零,此隐含信息也可以作为虚拟观测加入组合滤波器。由于其只有二维的速度量测,因此被称为非完整性约束。下面给出其观测模型(以下物理量仅取侧向与法向二维):

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{nhc}^v &= \mathbf{C}_b^v \left[\mathbf{C}_e^b \cdot \mathbf{v}_{imu}^e + (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \boldsymbol{\omega}_{ie}^b) \times \mathbf{l}_v^b \right] \\ \Rightarrow \mathbf{C}_b^v \tilde{\mathbf{v}}_{imu}^e - \tilde{\mathbf{v}}_{nhc}^v + \mathbf{C}_b^v (\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{eb}^b \times \mathbf{l}_v^b) + \boldsymbol{\varepsilon} &= -\mathbf{C}_b^v \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\phi} + \mathbf{C}_b^v \tilde{\mathbf{C}}_e^b \cdot \delta \mathbf{v}_{imu}^e - \mathbf{C}_b^v (\mathbf{l}_v^b \times) \delta \boldsymbol{\omega}_{ib}^b \end{aligned} \quad (2.17)$$

式中, $\mathbf{M} = \tilde{\mathbf{C}}_e^b \cdot (\tilde{\mathbf{v}}_{imu}^e \times) + (\mathbf{l}_v^b \times) \tilde{\mathbf{C}}_e^b (\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ie}^e \times)$; \mathbf{v}_{nhc}^v 为车体坐标系下载体侧向与法向速度; \mathbf{l}_v^b 为 NHC 参考点在 IMU 坐标系下的位置矢量,参考点为非转向轮轮毂中心; \mathbf{C}_b^v 为 IMU 载体坐标系与车体坐标系之间的旋转矩阵,其他符号与前文一致。

值得注意的是, IMU 安装偏差会导致较大侧向与法向速度分量, 假设载体以 10 m/s 的速度前行, 且 IMU 存在 5 deg 的航向安装偏差与 2 deg 的俯仰安装偏差, 那么会造成 0.87 m/s 的侧向速度分量与 0.34 m/s 的法向速度分量, 这将直接导致 NHC 不可用。因此 IMU 安装偏差需事先标定。

2.4 轮式里程计观测模型

陆地车辆大多会装备轮速计, 可以通过 CAN 总线获取车轮速度数据, 或者额外配备外挂的轮式里程计, 通过脉冲与速度转换即可获取车辆前进速度。需要注意的是, 在进行脉冲与速度转换时需引入车轮半径长度。然而在陆地车辆行驶过程中, 车轮会发生一定程度形变, 因此一般将此形变模型化为与半径相关的比例因子误差, 并将其建模为随机游走过程。综合考虑后轮式里程计量测模型可以表示为(以下物理量仅取前向一维):

$$\begin{aligned}
 (1+s)v_{odo}^v &= C_e^b \cdot v_{imu}^e + (\omega_{ib}^b - \omega_{ie}^b) \times l_v^b \\
 \Rightarrow \tilde{v}_{imu}^b - (1+\tilde{s})\tilde{v}_{odo}^v + \tilde{\omega}_{eb}^b \times l_v^b + \varepsilon &= -M \cdot \phi + \tilde{C}_e^b \cdot \delta v_{imu}^e \\
 -\tilde{v}_{odo}^v \cdot \delta s - l_v^b \times \delta \omega_{ib}^b &
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

式中, v_{odo}^v 表示经脉冲转换后的车轮前向速度; s 表示轮速计模型化的比例因子; 其他符号与前文一致。一般外部配备的轮式里程计均安装在非转向轮, 因此其参考点与非完整性约束一致, 均为非转向轮轮毂中心, 二者在观测模型上具有一致性, 区别在于轮速约束需要考虑比例因子参数。比例因子在载体速度变化时可迅速收敛, 而安装角可视为前向速度在 IMU 载体坐标系下的投影, 属于乘数因子, 因此可直接将其与比例因子合并估计。



第三章 环境要求和许可证

3.1 环境要求

安装包中的 Windows 可执行 CUI 应用程序是由 VS (Microsoft Visual Studio) 在 Windows 11 (64 位) 上构建的。文件夹中包含了所有必需的动态链接库。此外还在 CentOS Linux release 7.7.1908 和 x64 CPU 上构建了 CUI AP 和 Linux 共享库并进行了测试。对于 Macintosh, CUI AP 和动态库是在 MacOS 10.15.3 上使用 AppleClang 11.0.3.11030032 构建的, 内核版本为 Darwin 19.3.0。

此外, 用户可以使用开源、跨平台的编译工具 CMake 在他们自己的操作系统(Windows、Linux 或 Macintosh)上构建可执行的二进制应用程序。

3.2 许可证

GREAT-MSF 是一个开源软件, 遵循 GNU 通用公共许可证(版本 3) (<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>)。

3.3 版权

开发人员:

- 武汉大学 GREAT 团队, Wuhan University

三方库:

- GREAT-MSF 使用 G-Nut 库 (<http://www.pecny.cz/>) Copyright (C) 2011-2016
GOP - Geodetic Observatory Pecny, RIGTC
- GREAT-MSF 使用 pugixml 库 (<http://pugixml.org>) Copyright (C) 2006-2014
Arseny Kapoulkine
- GREAT-MSF 使用 Newmat 库(http://www.robertnz.net/nm_intro.htm) Copyright
(C) 2008: R B Davies
- GREAT-MSF 使用 spdlog 库 (<https://github.com/gabime/spdlog>) Copyright(c)
2015-present, Gabi Melman & spdlog contributors
- GREAT-MSF 使用 GLFW 库(<https://www.glfw.org/>) Copyright (C) 2002-2006
Marcus Geelnard, Copyright (C) 2006-2019 Camilla Löwy

- GREAT-MSF 使用 Eigen 库 (<https://eigen.tuxfamily.org>) Copyright (C) 2008-2011 Gael Guennebaud
- GREAT-MSF 使用 PSINS 库 (<https://psins.org.cn>) Copyright(c) 2015-2025 Gongmin Yan



第四章 在 windows 下编译与安装

该软件包可以通过网站 <https://github.com/GREAT-WHU/GREAT-MSF> 访问。可以通过 git 克隆，也可直接下载将软件包 **GREAT-MSF_<ver>.zip**。GREAT-MSF 目录结构如下。

表 4.1 GREAT-MSF 软件目录结构

目录/文件	目录/文件	说明
./src		源代码
	./app	GREAT-MSF 和 GREAT-PVT 主程序
	./LibGREAT	GNSS 和多传感器融合核心算法库
	./LibGnut	Gnut 库
	./third-party	第三方库
	CMakeLists.txt	CMakeLists 文件
./ sample_data		算例数据
	./MSF_20201027	GNSS 挑战场景算例
	./MSF_20201029	GNSS 开阔场景算例
	./ MSF_20211013	GNSS 挑战场景算例
	./ MSF_20211012	具有里程计量测的算例
./plot		画图脚本
./doc		文档文件
	GREAT-MSF_1.0.pdf	用户指南

以下说明展示了如何在 Windows 上构建 GREAT-MSF 可执行程序。

- (1) 通过网站 (<https://cmake.org/download/>) 获取并安装 CMake。请注意，CMake 版本的最低要求是 3.0.0。
- (2) 执行 cmake-gui。
- (3) 执行 “Browse Source...”，然后选择目录 **<install_dir>/GREAT-MSF_<ver>/src**，或者将目录 **<install_dir>/GREAT-MSF_<ver>/src** 中的 CMakeLis

t.txt 拖放到 cmake-gui 界面。然后将属性 “Where to build the binaries” 修改为 `<install_dir>/GREAT-MSF_<ver>/src/build`。

(4) 执行 “Configure” 并为项目选择集成开发环境 (Integrated Development Environment, IDE) (仅在第一次单击 “Configure” 按钮时出现)。

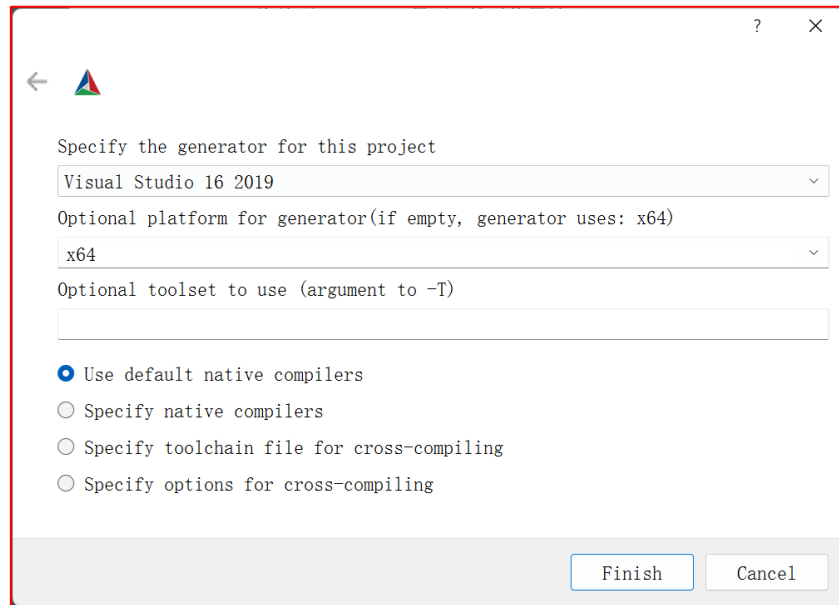


图 4.1 IDE 选择示例

(5) 配置三方库路径。

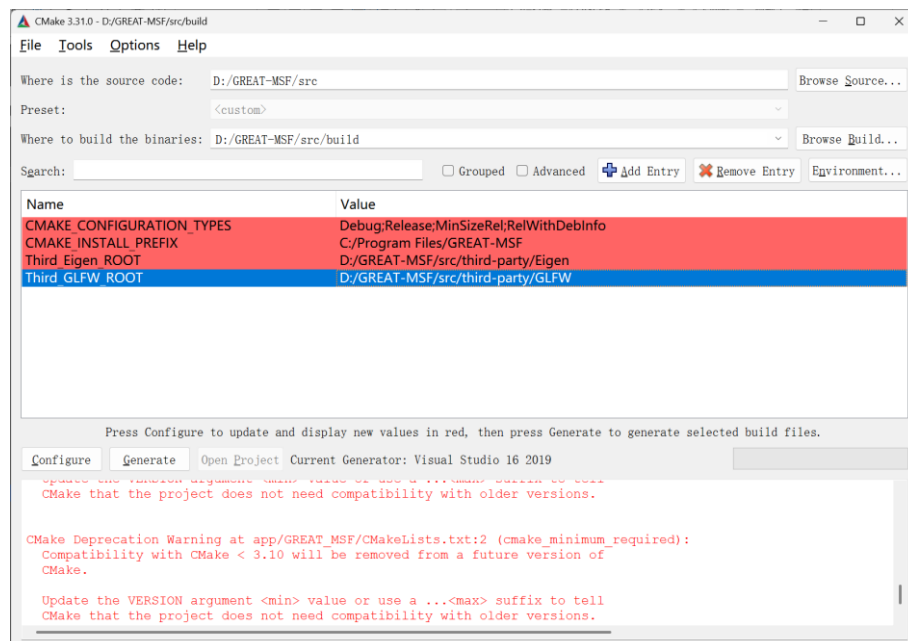


图 4.2 配置三方库路径



第五章 算例数据处理说明

5.1 算例文件目录结构

算例数据在文件夹<install_dir>/GREAT-MSF_<ver>/sample_data 当中。共提供了数组算例数据，一组为 GNSS 开阔场景数据 MSF_20201029，MSF_20201027 和 MSF_20211013 为 GNSS 挑战场景数据，每组数据均提供了 PPP/INS 和 RTK/INS 的松/紧组合 xml 配置文件，此外我们提供了一组具有里程计数据的算例 MSF_20211012，配置文件说明请参见附录。算例数据文件夹目录结构如下：

表 5.1 算例文件目录结构

目录/文件	说明
./GNSS	GNSS 数据文件夹，包含基站、流动站观测值文件夹和相应的星历、钟差等产品文件夹
./IMU	IMU 数据文件夹
./model	系统模型文件夹
./xml	xml 配置文件夹
./ref	使用 IE 解算出的参考结果文件夹
./result	结果输出文件夹

5.2 在 VS 中进行参数配置与运行

- (1) 完成编译后在 Visual Studio 解决方案资源管理器中打开 app 文件夹，右键 GREAT_MSF，将 GREAT_MSF 设为启动项目。

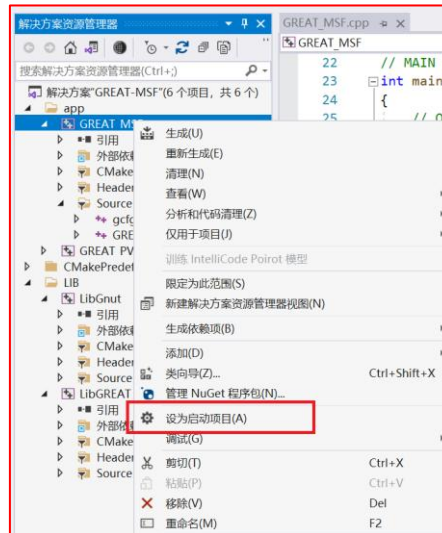


图 5.1 在 VS 中将 GREAT_MSF 设为启动项目

- (2) 右键 GREAT_MSF，选择属性，将配置改为 RelWithDebInfo，设置算例所在目录设为工作目录，并设置命令参数。

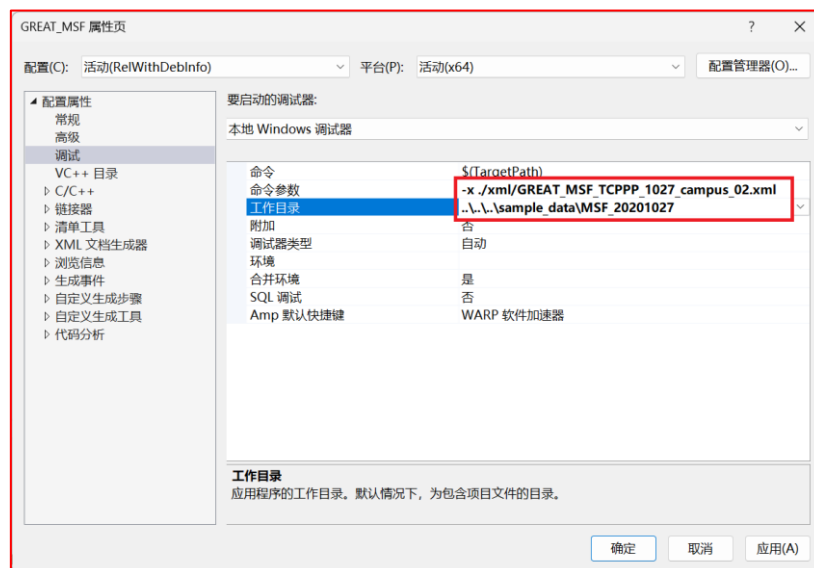


图 5.2 以某算例配置解算命令参数和工作目录设置

- (3) 以 RelWithDebInfo 运行即可

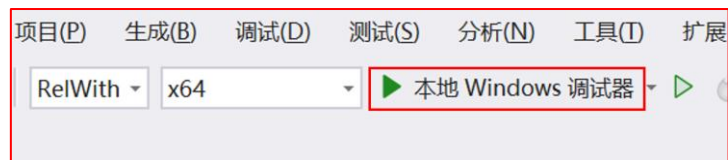


图 5.3 运行 GREAT-MSF



5.3 使用绘图脚本进行结果评估

GREAT-MSF 提供了 python 脚本来绘制和分析 PPP 与 RTK 结算结果，这些脚本位于文件夹 **plot** 中。主程序为 **Evaluation.py**，运行程序生成结果后修改如下路径即可运行。

```
ins_file=r'D:\GREAT-MSF\sample_data\MSF_20201029\result\SEPT-MSF.ins'
ref_file=r'D:\GREAT-MSF\sample_data\MSF_20201029\groundtruth\20201029_adis_ref.txt'
```

图 5.4 修改 Evaluation.py 中的路径

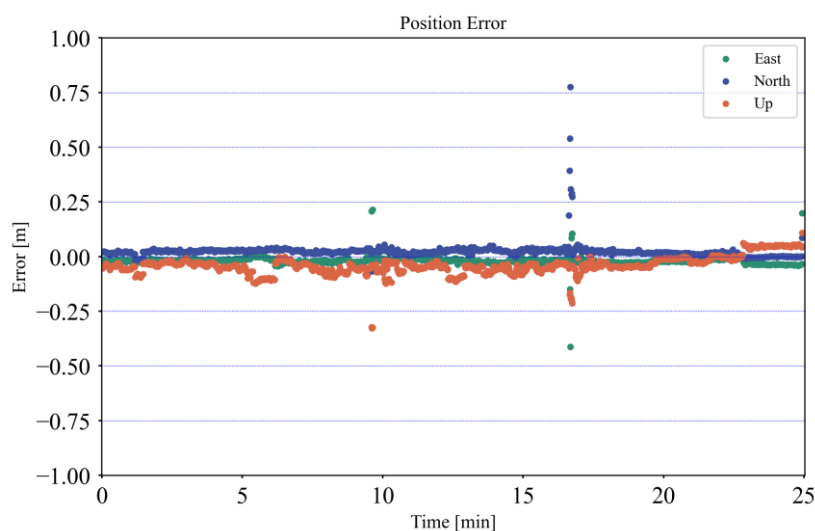


图 5.5 使用 Evaluation.py 绘图结果(a)

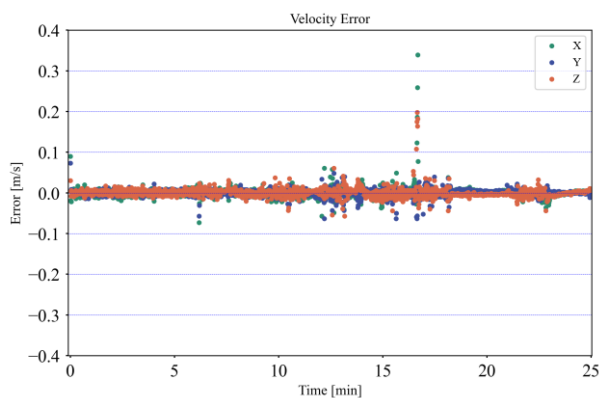


图 5.6 使用 Evaluation.py 绘图结果(b)

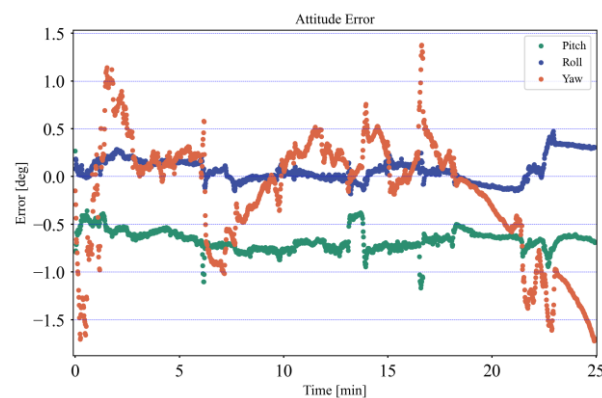


图 5.7 使用 Evaluation.py 绘图结果(c)

5.4 在配置文件中启用运动约束或里程计

在新版本中，我们更新了 NHC、ZUPT 和 ODO 观测模型，本节示范如何配置 XML 文件以正确启用这些量测。

5.4.1 启用非完整性约束

如 2.3.2 节所说，IMU 的安装角会导致较大侧向与法向速度分量，因此如需启用 NHC 需要对 IMU 的安装偏差进行事先标定或者在滤波中进行状态估计，需要打开<ins>节点中的<Installation>，将其设置为 ON。

如果事先进行了安装角的标定，则在以下的 Rotation 节点中进行设置；杆臂对 NHC 的影响较小。

```
<Installation Type="ON" Format="OFF/ON" Description="Take the left rear wheel as the origin">
  <Rotation Pitch="0.9231" Roll="0" Yaw="0.0205" Description="deg" />
  <Lever X="0" Y="0" Z="0" Description="m" />
</Installation>
```

图 5.8 设置安装角初值

或者在滤波中对安装角进行估计，将<integration>节点中的 ExtraStates-IMUInstallation 设置为 Rotation，并在 Rotation 节点中合理设置其初始方差和过程噪声。

```
<ExtraStates>
  <IMUInstallation Type="Rotation" Format="OFF/Translation/Rotation/TransRot">
    <Translation InitialSTD="1,1,1" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="m" />
    <Rotation InitialSTD="10,10,10" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="deg" />
  </IMUInstallation>
  <OdometerScale Type="OFF" Format="OFF/ON" InitialSTD="1" ProcNoiseSD="0.0001" Description="#" />
</ExtraStates>
```

图 5.9 在滤波状态中估计安装角

最后打开<integration>节点中<NHC>并合理设置频率与噪声即可。

```
<NHC Type="ON" Format="OFF/ON">
  <Frequency Value="1" Description="Hz" />
  <NoiseSD Value="0.10" Description="m/s" />
</NHC>
```

图 5.10 打开 NHC 节点

其判断直行/静止的阈值参数位于函数 motion_state 中。



```

MOTION_TYPE great::t_gsinskf::motion_state()
{
    double vf = - t_gglv::INF;

    if (sins.wnb.norm() < 1.5 * t_gglv::dps && abs(sins.vb(1)) > 5)
        return m_straight;
    else if (sins.an.norm() < 1 && sins.wnb.norm() < 1 * t_gglv::dps && sins.vn.norm() < 0.1)
    {
        return m_static;
    }

    else if (_ododata->load(_ins_crt, vf, _shm.delay_odo))
    {
        if (sins.vn.norm() < 1 && abs(vf) < 0.1)
            return m_static;
        else
            return m_default;
    }
}

```

图 5.11 在函数 motion_state 中根据与之判断直行/静止

5.4.2 启用零速约束

打开<integration>节点中<NHC>并合理设置频率与噪声即可，其监测阈值见图 5.11。

```

<ZUPT Type="ON" Format="OFF/ON">
  <Frequency Value="1" Description="Hz" />
  <VelNoiseSD Value="0.01" Description="m/s" />
</ZUPT>

```

图 5.12 打开零速约束

5.4.3 启用轮速里程计

首先需要在<inputs>中输入里程计文件：

```
<odo> .\DMI\dmi.txt </odo>
```

图 5.13 输入 odo 文件

在<integration>节点中启用里程计，设置为 Velocity。对于其他格式，可以在 odofile.cpp 中的函数 t_odofile::decode_data 里修改解码方式。可于附录中查看下图各节点意义。

```

<Odometer Type="Velocity" Format="OFF/Raw/Velocit">
  <Installation Type="Left" Format="Left/Right" />
  <DelayTime Value="0.001" Description="s"/>
  <Frequency Value="1" Description="Hz" />
  <WheelRadius Value="1" Description="m" />
  <Scale Value="1" Description="#" />
  <NoiseSD Value="0.07" Description="m/s" />
</Odometer>

```

图 5.13 里程计节点

在<ins>节点中的<Installation>设置里程计与 IMU 之间的杆臂信息，XYZ 分别表示右前上。

```
<Installation Type="ON" Format="OFF/ON" Description="Take the left rear wheel as the origin">  
  <Rotation Pitch="0" Roll="0" Yaw="0" Description="deg" />  
  <Lever X="0.91" Y="-0.503" Z="-1.915" Description="m" />  
</Installation>
```

图 5.14 设置里程计与 IMU 之间的杆臂

此外，使用 ODO 量测时估计比例因子误差通常是必要，因此需要在<ExtraStates>节点中合理设置<OdometerScale>状态预测的初始方差和过程噪声。

```
<ExtraStates>  
  <IMUInstallation Type="Rotation" Format="OFF/Rotation">  
    <Rotation InitialSTD="10,10,10" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="deg" />  
  </IMUInstallation>  
  <OdometerScale InitialSTD="1" ProcNoiseSD="0.0001" Description="#" />  
</ExtraStates>
```

图 5.14 在<ExtraStates>节点中设置比例因子的初始方差和过程噪声

第六章 附录

6.1 XML 配置文件说明

配置文件格式为 XML，其中包含了输入输出文件设置、处理方案、解算策略等信息。每行中以"<!--"开始并以"-->"结尾的部分为注释。下表展示了 GREAT-MSF 程序的 XML 文件的格式，其中<ins>和<integration>节点为新增节点，其余含义与 GREAT-PVT 的 XML 配置相同

表 6.1 GREAT-MSF 的 XML 配置文件说明

项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
基础设置（一级节点）		<gen>
开始时刻	设置开始时刻的 GPS 时，格式为"YYYY-MM-DD hh:mm:ss"	<beg>
结束时刻	设置结束时刻的 GPS 时，格式为"YYYY-MM-DD hh:mm:ss"	<end>
卫星系统	设置参与解算的卫星系统	<sys>
测站列表	设置参与解算的测站列表，4 位字符	<rec>
采样频率	设置观测值的采样频率	<int>
估计方法	默认为滤波	<est>
流动站名	流动站名和基站名，仅在 RTK/INS 模式下	<rover>
基站名	使用，在 PPP/INS 模式中不应设置	<base>
输入文件设置（一级节点）		<inputs>
RINEX 观测值文件	用于进行解算的 RINEX 观测值文件。支持 RINEX 2.10, 2.11, 2.12, 3.00, 3.01, 3.02, 3.03, 3.04 格式。 程序会根据基站名和流动站名自动识别，文件名前四位应与设置的站名保持一致。	<rinexo>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
RINEX 广播星历文件	用于进行解算的 RINEX 广播星历文件。支持 RINEX 2.10, 2.11, 2.12, 3.00, 3.01, 3.02, 3.03, 3.04 格式。	<rinexn>
精密钟差文件	用于进行解算的精密钟差文件，在 RTK/INS 中可不设置	<rinexc>
精密星历文件	用于进行解算的精密星历文件，在 RTK/INS 中可不设置	<sp3>
天线文件	用于天线相位中心改正的卫星天线信息文件	<atx>
海洋潮汐文件	用于潮汐改正的海洋潮汐文件	<blq>
行星星历文件	用于计算行星参数	<de>
EOP 参数文件	用于计算旋转矩阵的地球自转参数文件	<eop>
IMU 文件	用于解算的 IMU 文件，格式见后续节点	<imu> <ins>-<DataFormat>
输出文件设置（一级节点）		<outputs>
日志文件	用于记录输出的日志信息	<log>
GNSS 结果	卫星计算结果文件	<flt>
MSF 结果文件	组合导航结果文件	<ins>
轨迹文件	可在谷歌地球上查看可视化结果的轨迹文件	<kml>
解算设置（一级节点）		<process>
相位观测值	是否使用载波相位观测值： --true: 使用 --false: 不使用	<phase>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
对流层参数	是否估计对流层参数： --true: 估计 --false: 不估计	<tropo>
电离层参数	是否估计电离层参数： --true: 估计 --false: 不估计	<iono>
多普勒观测值	是否使用多普勒观测值 --true: 使用 --false: 不使用	<doppler>
对流层模型	使用的对流层模型	<tropo_model>
待估参数的先验	测站坐标	<sig_init_crd>
sigma	测站速度	<sig_init_vel>
	对流层	<sig_init_ztd>
	模糊度	<sig_init_amb>
	Galileo 的系统间偏差和频率间偏差	<sig_init_gal>
	GLONASS 的系统间偏差和频率间偏差	<sig_init_glo>
	BDS 的系统间偏差和频率间偏差	<sig_init_bds>
	电离层	<sig_init_vion>
截止高度角	可用卫星观测值的最小高度角	<minimum_elev >
观测值组合	用于解算的观测值组合方式 --IONO_FREE: 无电离层组合, 支持双频 --RAW_ALL: 非差非组合, 支持双频和多 频	<obs_combinatio n>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
最大验后残差	用于残差编辑的验后残差阈值	<max_res_norm >
动态模式	是否为动态模式： --true: 是 --false: 不是	<pos_kin>
最小卫星个数	参与解算卫星个数的最小阈值	<min_sat>
观测值加权	确定观测值权重的方法	<obs_weight>
北斗卫星码偏差	是否改正北斗卫星的码偏差： --true: 是 --false: 不是	<bds_code_bias_ corr>
周跳探测	周跳探测模型 --default 默认	<slip_model>
观测值频率	用于解算的观测值频率个数	<frequency>
滤波设置（一级节点）		<filter>
滤波算法	使用的滤波算法： --srcf: 平方根容积滤波 --kalman: 卡尔曼滤波	method_flt
待估参数的先验 噪声	测站坐标白噪声	noise_crd
	测站速度白噪声	noise_vel
	接收机钟速白噪声	noise_dclk
	接收机钟差白噪声	noise_clk
	电离层白噪声	noise_vion
	对流层的随机游走噪声	rndwk_ztd
	模糊度的随机游走噪声	rndwk_amb



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
	GLONASS isb/ifb 的随机游走噪声	rndwk_glo
	Galileo isb/ifb 的随机游走噪声	rndwk_gal
	BDS isb/ifb 的随机游走噪声	rndwk_bds
	GPS ifb 的随机游走噪声	rndwk_gps
模糊度固定设置（一级节点）		<ambiguity>
固定模式	是否进行模糊度固定： --NO：不进行模糊度固定 --SEARCH：进行模糊度固定	<fix_mode>
UPD 模式	使用 UPD 产品进行模糊度固定	<upd_mode>
部分模糊度固定	是否进行部分模糊度固定： --NO：不进行 --YES：进行	<part_fix>
部分模糊度固定的个数	部分模糊度固定模式下最小模糊度固定个数	<part_fix_num>
Ratio 值	LAMBDA 方法进行模糊度固定中 ratio 检验的值	<ratio>
参考卫星	是否设置参考卫星 --NO：不设置 --YES：设置	<set_refsat>
最小共视时间	进行模糊度固定时对同一颗卫星的最小共视时间	<min_common_time>
超宽巷观测值	对不同观测值组合进行模糊度固定的相关设置：	<extra_widelane_decision>
宽巷观测值	-- alpha&maxdev：置信区间参数 -- maxsig：最大 sigma 值	<widelane_decision>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
窄巷观测值		<narrowlane_dec ision>
卫星设置（一级节点）		<gps>/<bds> /<gal>/<glo>
观测值的先验	伪距	sigma_C
sigema	载波相位	sigma_L
频率	卫星频率，对应频段，可选值 1/2/3/4/5	<freq>
卫星	卫星 PRN 号	<sat>
频段	设置不同卫星系统对应频段的观测值 --GPS: 1->L1, 2->L2, 5->L5 --GAL: 1->E1, 5->E5a, 7->E5b, 8->E5, 6->E6 --BDS: 2->B1I, 7->B2I, 6->B3I, 1->B1 C, 5->B2a, 9->B2b, 8->B2a+b --GLO: 1->G1, 2->G2	<band>
惯导设置（一级节点）		<ins>
处理时段	--Start: 启动时间，周内秒 --End: 结束时间，周内秒	<ProcTime>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
数据格式	--AxisOrder: IMU 数据文件的格式顺序 (garfu/gaflu/gafurd), 其中 g 和 a 分别表示陀螺和加表, 后三个字母表示方向(r: right, f:forward, u: up) --GyroUnit: 陀螺单位 (DPS /RPS /RAD /DPH /RPH) --AcceUnit: 加速度单位 (MPS/MPS2) --Frequency: 采样频率 (单位: Hz)	<DataFormat>
对准方式	--OFF: 不设置 --STATIC: 静态对准 --POS: GNSS 位置矢量辅助对准 --VEL: GNSS 速度矢量辅助对准	<Alignment>
初始状态	--Position: 位置, 支持 OFF /Cartesian /Geodetic , Cartesian 格式下单位为米 --Velocity: 速度, 支持 OFF/Cartesian 格式, Cartesian 格式下单位为米每秒 --Attitude: 姿态, 支持 OFF/ON 格式, 单位为度 --GyroBias: 陀螺零偏, 单位为 deg/h --AcceBias: 加速度计零偏, 单位为 mg	<InitialStates>
安装参数	--Type: 设置是否设置 b 系与 v 系的安装参数 --Rotation: 设置初始安装角, 单位为度 --Lever: 设置杆臂, 单位为米	<Installation>
组合模式设置 (一级节点)		<integration>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
GNSS 设置	<p>--Type: 组合类型, 支持设置 OFF/LCI/TCI</p> <p>--AntennaLever: 天线杆臂, 属性 Type 表示天线在 IMU 坐标系下定义为 RFU, 即右前上, 在 X,Y,Z 中设置杆臂三轴长度</p> <p>--DelayTime: 在组合量测的历元, GNSS 时间戳与 IMU 时间戳所容许的最大延迟时间</p> <p>--LCISetting: 松组合配置, 仅在组合类型为松组合时生效, 可设置参与松组合的最小卫星数 MinSat、最大 PDOP 值、最大后验残差阈值 MaxNorm</p>	<GNSS>
估计器设置	<p>--IMUErrorModel: IMU 误差模型, 支持 ADIS16470、StarNeto GI7660 两种 IMU, 也可通过 Customize 自定义误差模型, 当使用预设 IMU 型号时, 下面的属性不生效</p> <p>--Attitude: 支持设置初始方差 InitialSTD 和过程噪声 ProcNoiseSD, 单位为 deg</p> <p>--Velocity: 支持设置初始方差 InitialSTD 和过程噪声 ProcNoiseSD, 单位为 m/s</p> <p>--Position: 支持设置初始方差 InitialSTD 和过程噪声 ProcNoiseSD, 单位为 m</p> <p>--GyroBias: 支持设置初始方差 InitialSTD 和过程噪声 ProcNoiseSD, 单位为 deg/h</p> <p>--AcceBias: 支持设置初始方差 InitialSTD 和过程噪声 ProcNoiseSD, 单位为 mg</p>	<Estimator>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
里程计设置	<p>--Type: 包括选项"OFF/Raw/Velocity", 当选用 Velocity 时其格式为“周内秒+前向速度”</p> <p>--Installation: 里程计的安装位置, 左轮或右轮</p> <p>--DelayTime: 时间戳所容许的最大延迟时间</p> <p>--Frequency: ODO 量测频率</p> <p>--WheelRadius: 车轮半径, 对于 Type = Velocity 是不必要的</p> <p>--Scale: 轮速计比例因子初值</p> <p>--NoiseSD : 轮速计观测噪声, 单位为 m/s</p>	<Odometer>
非完整性约束	<p>--Type: 包括选项"OFF/ON"</p> <p>--Frequency: 设置 NHC 的频率, 单位为 Hz</p> <p>--NoiseSD: 设置 NHC 量测的噪声, 单位为 m/s</p>	<NHC>
零速约束	<p>--Type: 包括选项"OFF/ON"</p> <p>--Frequency: 设置 ZUPT 的频率, 单位为 Hz</p> <p>--VelNoiseSD: 设置零速观测的噪声, 单位为 m/s</p>	<ZUPT>



项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
状态扩维	<p>--IMUInstallation: 设置为 Rotation 表示滤波状态还会估计 IMU 安装角, 设置为 OFF 表示关闭; 其节点内设置滤波估计过程中的初始方差和过程噪声。</p> <p>--OdometerScale: 设置里程计的比例因子在状态预测中的初始方差和过程噪声。</p>	<ExtraStates>

下面给出一级节点<ins>和<integration>的示例, 其余示例可查看《GREAT-PVT_1.0》或提供的 XML 文件:

```
<ins>
  <ProcTime Start="0" End="1000000000000"/>

  <DataFormat>
    <AxisOrder Type="garfu" Format="garfu/gaflu/gafrd" />
    <GyroUnit Type="DPS" Format="DPS/RPS/RAD/DPH/RPH" />
    <AcceUnit Type="MPS2" Format="MPS/MPS2" />
    <Frequency Value="100" Description="Hz" />
  </DataFormat>

  <Alignment Type="POS" Format="OFF/STATIC/POS/VEL">
    <PositionVector Value="3" Description="m" />
    <VelocityVector Value="1" Description="m/s" />
    <CoarseAlignTime Value="300" Description="s" />
  </Alignment>

  <InitialStates>
    <Position Type="OFF" Format="OFF/Cartesian/Geodetic" X="-2264975.053" Y="5011133.582" Z="3220185.787" Description="m" />
    <Velocity Type="OFF" Format="OFF/Cartesian" X="0.096" Y="4.552" Z="-6.327" Description="m/s" />
    <Attitude Type="OFF" Format="OFF/ON" Pitch="3.0932157894" Roll="0.1179490917" Yaw="165.921753953" Description="deg" />
    <GyroBias Type="OFF" Format="OFF/ON" X="401" Y="32" Z="-85" Description="deg/h" />
    <AcceBias Type="OFF" Format="OFF/ON" X="0" Y="0" Z="0" Description="mg" />
  </InitialStates>
</ins>
```

图 6.1 XML 配置文件<ins>节点示例(a)

```
<Installation Type="ON" Format="OFF/ON" Description="Take the left rear wheel as the origin">
  <Rotation Pitch="0" Roll="0" Yaw="0" Description="deg" />
  <Lever X="0.91" Y="-0.503" Z="-1.915" Description="m" />
</Installation>
```

图 6.2 XML 配置文件<ins>节点示例(b)



```

<integration>
  <GNSS Type="LCI" Format="OFF/LCI/TCI">
    <AntennaLever Type="RFU" Format="RFU" X="-0.05" Y="-0.41" Z="0.15" Description="m" />
    <DelayTime Value="0.01" Description="s"/>
    <LCISetting MinSat="5" MaxPDOP="6" MaxNorm="15"/>
  </GNSS>

  <Estimator >
    <IMUErrorModel Type="ADIS 16470" Format="Customize/ADIS 16470/StarNeto" />
    <Attitude InitialSTD="1,1,10" ProcNoiseSD="1,3,3" Description="deg" />
    <Velocity InitialSTD="1,1,1" ProcNoiseSD="1,1,1" Description="m/s" />
    <Position InitialSTD="10,10,10" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="m" />
    <GyroBias InitialSTD="100,100,100" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="deg/h" />
    <AcceBias InitialSTD="10,10,10" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="mg" />
  </Estimator>
</integration>

```

图 6.3 XML 配置文件< integration >节点示例(a)

```

<Odometer Type="Velocity" Format="OFF/Raw/Velocity">
  <Installation Type="Left" Format="Left/Right" />
  <DelayTime Value="0.001" Description="s"/>
  <Frequency Value="1" Description="Hz" />
  <WheelRadius Value="1" Description="m" />
  <Scale Value="1" Description="#" />
  <NoiseSD Value="0.07" Description="m/s" />
</Odometer>

<NHC Type="ON" Format="OFF/ON">
  <Frequency Value="1" Description="Hz" />
  <NoiseSD Value="0.05" Description="m/s" />
</NHC>

<ZUPT Type="ON" Format="OFF/ON">
  <Frequency Value="1" Description="Hz" />
  <VelNoiseSD Value="0.01" Description="m/s" />
</ZUPT>

<ExtraStates>
  <IMUInstallation Type="Rotation" Format="OFF/Rotation">
    <Rotation InitialSTD="10,10,10" ProcNoiseSD="0,0,0" Description="deg" />
  </IMUInstallation>
  <OdometerScale InitialSTD="1" ProcNoiseSD="0.0001" Description="#" />
</ExtraStates>

```

图 6.4 XML 配置文件< integration >节点示例(b)

6.2 结果文件 (**.ins) 说明

flt 文件记录了 PPP 或 RTK 定位解算结果及其精度指标，具体如下：

表 6.2 GREAT-MSF 结果文件说明

列号	列名(列 1-19)	列说明	单位	格式
----	------------	-----	----	----



1	Seconds of Week	GPS 周内秒	s	F18.6
2	X-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 X 轴坐标	m	F18.3
3	Y-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Y 轴坐标	m	F18.3
4	Z-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Z 轴坐标	m	F18.3
5	Vx-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 X 轴速度	m/s	F10.3
6	Vy-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Y 轴速度	m/s	F10.3
7	Vz-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Z 轴速度	m/s	F10.3
8	Pitch	俯仰角 (下负上正)	deg	F10.4
9	Roll	横滚角 (左负右正)	deg	F10.4
10	Yaw	偏航角 (北偏西为正)	deg	F10.4
11	GyroBiasX	陀螺仪 X 轴零偏估值	deg/h	F12.4
12	GyroBiasY	陀螺仪 Y 轴零偏估值	deg/h	F12.4
13	GyroBiasZ	陀螺仪 Z 轴零偏估值	deg/h	F12.4
14	AcceBiasX	加速度计 X 轴零偏估值	mg	F12.4
15	AcceBiasY	加速度计 Y 轴零偏估值	mg	F12.4
16	AcceBiasZ	加速度计 Z 轴零偏估值	mg	F12.4
17	MeasType	当前时刻的测量类型 (e.g., GNSS、NHC)	-	A10
18	OdoScale	里程计比例因子, 仅在开始 odo 时输出	#	F12.4
19	Nsat	可用卫星数量	#	I5
20	PDOP	卫星几何构型强度	-	F7.2
21	AmbStatus	模糊度固定情况(e.g., Fixed, Float)	#	A8
22	Ratio	Ratio 值	-	F10.2

示例:



#	Seconds of week (s)	X-ECF (m)	Y-ECF (m)	Z-ECF (m)	VR (m/s)	VV (m/s)	VZ (m/s)	Pitch (deg)	Roll (deg)	Yaw (deg/h)	GyroBiasX (deg/h)	GyroBiasY (deg/h)	GyroBiasZ (deg/h)	AccBiasX (mg)	AccBiasY (mg)	AccBiasZ (mg)	HeadsType	Isat	PDOP	Amplitude	
185469.000000	-2267184.032	5008969.333	3221946.269	1.785	-1.557	3.784	-1.2364	0.6167	14.1363	0.0865	0.0517	0.0201	0.0537	-0.0940	0.0202	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185470.000000	-2267182.219	5008967.435	3221950.234	1.783	-1.861	4.288	-0.4189	-0.4715	10.4242	9.3168	16.9507	-1.1496	6.6608	-3.2412	5.3251	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185471.000000	-2267180.539	5008965.352	3221954.718	1.515	-2.240	4.719	-1.1780	-0.3822	5.8184	3.2067	37.8025	-1.6571	6.8033	-2.7700	7.2016	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185472.000000	-2267179.494	5008963.189	3221959.000	1.442	-1.577	5.133	-1.0863	0.5838	2.2582	-97.0304	65.0301	1.6566	4.6152	-2.4315	8.6836	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185473.000000	-2267177.743	5008960.498	3221964.679	1.381	-2.618	5.000	-1.7534	0.3248	0.9953	-246.2034	75.6400	0.8581	1.5549	-2.7811	9.2034	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185474.000000	-2267176.468	5008957.904	3221969.477	1.315	-2.588	5.042	-1.3962	0.5349	1.2640	-390.4313	90.3529	-7.3836	-0.8969	-2.7557	9.3088	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185475.000000	-2267175.469	5008955.115	3221974.488	1.434	-2.575	5.058	-1.3243	0.2479	1.0856	-453.6508	110.7393	-13.6131	0.3243	-2.9359	9.3583	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185476.000000	-2267173.634	5008952.484	3221979.815	1.564	-2.668	5.118	-1.4223	0.4859	2.9188	-484.2823	144.7023	-18.1961	1.3721	-3.8846	9.3248	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185477.000000	-2267171.076	5008950.815	3221985.188	1.764	-2.636	5.345	-1.4168	0.5676	4.6933	-468.3937	181.2960	-22.8617	0.6598	-5.7270	9.3785	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185478.000000	-2267170.041	5008947.412	3221990.557	2.187	-2.589	5.568	-0.8922	0.7187	7.5027	-468.7954	179.8914	-22.4786	0.7288	-5.5099	9.3576	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185479.000000	-2267167.742	5008944.835	3221996.215	2.583	-2.562	5.736	-1.2963	0.7216	9.9178	-459.5083	183.1604	-19.1051	-0.4100	-5.8539	9.3511	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185480.000000	-2267165.095	5008942.286	3222002.438	2.783	-2.548	5.918	-1.4334	0.5336	11.9445	-458.4435	184.8185	-17.5952	-0.4121	-5.9548	9.3559	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185481.000000	-2267162.211	5008939.754	3222008.035	2.868	-2.634	6.095	-1.8974	-0.8358	12.0261	-449.5928	188.1667	-22.7018	-2.0454	-6.5211	9.3721	0.0202	GNSS	22	1.53	Float	0.00
185482.000000	-2267159.135	5008937.088	3222014.187	2.838	-2.695	6.145	-1.5408	-0.2488	11.5488	-435.8204	192.0977	-16.0934	-3.3805	-6.5275	9.4081	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185483.000000	-2267156.156	5008934.347	3222020.385	2.781	-2.780	6.056	-2.2272	-0.3573	10.9048	-420.6663	197.7122	-126.5187	-3.5789	-4.8786	9.3987	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185484.000000	-2267153.988	5008931.535	3222026.339	2.594	-2.842	6.020	-2.4959	-0.2872	10.1907	-412.0943	200.1191	-175.2973	-3.2683	-4.0259	9.3859	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185485.000000	-2267151.362	5008928.640	3222032.411	2.538	-2.933	6.101	-2.5882	-0.1884	9.4116	-407.3093	202.9038	-183.9383	-2.8917	-3.5537	9.3513	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185486.000000	-2267149.610	5008925.795	3222038.594	2.582	-3.007	6.240	-2.5692	-0.1264	9.4416	-402.5173	205.1795	-191.9189	-2.3801	-3.1921	9.3515	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185487.000000	-2267146.187	5008922.626	3222044.914	2.656	-3.118	6.366	-2.9804	0.4673	9.5235	-398.7271	206.7406	-191.1264	-1.6867	-2.9317	9.3716	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185488.000000	-2267143.100	5008919.490	3222051.221	2.685	-3.216	6.504	-3.7148	0.4714	8.5299	-392.9688	208.7441	-179.5407	-0.7122	-2.4339	8.3738	0.0202	GNSS	21	1.73	Float	0.00
185489.000000	-2267140.523	5008916.415	3222056.578	2.555	-3.817	6.715	-5.3265	0.8157	0.4634	-358.1504	208.6782	-151.5281	-0.3248	-3.1113	8.3665	0.0202	GNSS	20	2.16	Float	0.00

图 6.3 GREAT-MSF 结果输出文件示例

6.3 轨迹文件 (*.kml) 说明

组合解算的轨迹文件，可通过谷歌地球等地图软件打开，可以查看估计精度和各个坐标点的解算信息，如下

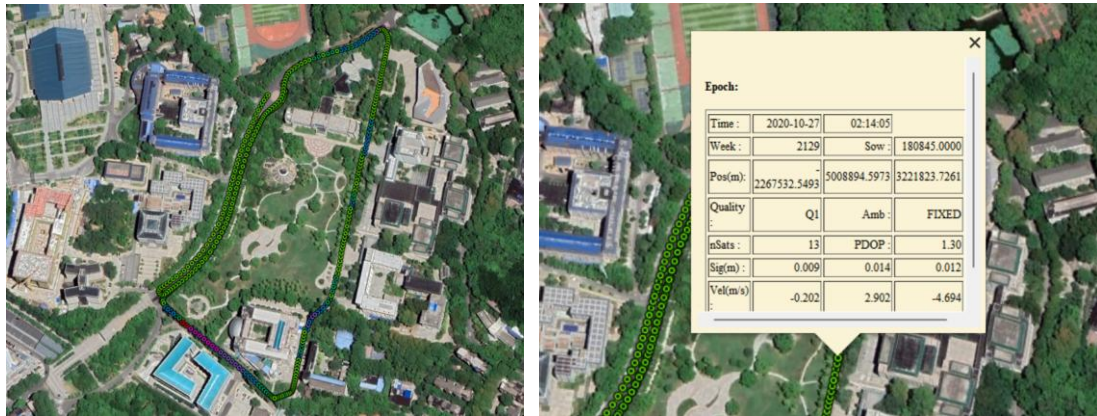


图 6.4 GREAT-MSF 轨迹输出文件打开示例

轨迹中不同颜色的点代表不同的解算精度等级。