

GREAT-LAG 用户指南

目录

第一章 概述	1
第二章 定位及仿真原理	2
2.1 PPP 模型	2
2.1.1 低轨星座增强 GNSS PPP 函数模型	2
2.1.2 低轨星座增强 GNSS PPP 随机模型	2
2.2 观测值仿真模型	4
2.2.1 仿真原理	5
2.2.2 地面监测站数据仿真	5
第三章 环境要求和许可证	8
3.1 环境要求	8
3.2 许可证	9
3.3 Python 虚拟环境	9
3.4 版权	9
第四章 编译与安装	10
4.1 Windows	10
4.2 Linux	13
第五章 软件和工具使用说明	15
5.1 数据下载	15
5.2 GREAT-LAG 软件	16
5.2.1 观测值仿真	16
5.2.2 低轨星座增强定位	17
5.3 结果绘图和分析工具	17
5.3.1 定位结果绘制	17
第六章 算例数据处理说明	20
6.1 低轨星座增强定位算例一	20

6.1.1	数据准备	20
6.1.2	参数配置	20
6.1.3	数据解算	21
6.1.4	结果绘制	23
6.2	低轨星座增强定位算例二	26
6.2.1	数据准备	26
6.2.2	参数配置	26
6.2.3	数据解算	27
6.2.4	结果绘制	27
6.3	低轨星座定位算例	30
6.3.1	数据准备	30
6.3.2	参数配置	30
6.3.3	数据解算	31
6.3.4	结果绘制	31
第七章	附录	33
7.1	GREAT-UPD	33
7.2	GREAT-IFCB	33
7.3	GREAT-SimuObsXML 配置文件说明	33
7.4	GREAT-PPP XML 配置文件说明	37
7.5	flt 结果文件说明	42

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-LAG 是 GREAT 软件中的一个重要模块，主要用于低轨导航增强 PPP 解算，包括观测数据仿真、PPP、PPP-AR 等。GREAT-LAG 由 GREAT 团队已开源的 GREAT-PVT 软件扩展而来，主要应用程序为 GREAT-PVT 和 GREAT-SimuObs，可移植程序库为 LibGREAT 和 LibGnut。除了原 GREAT-PVT 中的 GNSS 定位解决方案外，LibGREAT 库还进一步集成了低轨导航增强功能，包括仿真过程中涉及的数据解码、存储、仿真算法以及低轨卫星导航增强算法的实现，LibGnut 库来源于开源 GNSS 软件 G-nut，包括 GNSS 数据的解码和存储以及基本参数配置模块。本次开源的 GREAT-LAG Beta 版本主要包括原始观测数据仿真与低轨导航增强部分，在 GREAT-PVT 基础上进一步扩展了以下功能：

- 支持低轨星座增强 GNSS PPP、低轨星座增强 GNSS PPP 固定解
- 支持低轨星座 PPP、低轨星座 PPP 固定解
- 支持双频无电离层组合、非差非组合低轨卫星观测值组合方式
- 支持 GPS、Galileo、BDS-2/3、LEO 四系统原始观测数据仿真(rinex 3.0 格式)
- 支持使用电离层格网数据、对流层格网数据仿真低轨卫星电离层延迟、对流层延迟
- 软件包还提供结果绘图脚本，便于用户对数据进行结果分析

第二章 定位及仿真原理

2.1 PPP 模型

PPP 基本观测方程、双频 PPP 函数模型、多频多星座 PPP 函数模型已在 GREAT-PVT 用户指南中给出，本指南不再赘述

2.1.1 低轨星座增强 GNSS PPP 函数模型

低轨卫星导航信号的观测模型与全球导航卫星系统类似。它们基本上受到相同的误差源影响，地面站的 GNSS 观测方程同样适用于 LEO。本小节考虑 GPS、Galileo、BDS 和 LEO 系统观测条件下（其中 BDS-2 与 BDS-3 采用公共信号，不做区分）多星座 PPP 的函数模型。下面给出各系统各自的伪距与相位观测方程：

$$\begin{cases} p_{r,n}^{s,G} = \mu_r^{s,G} \cdot x + t_r - t^{s,G} + \gamma_n^G \cdot I_{r,1}^{s,G} + m_{r,w}^{s,G} \cdot Z_{r,w} + (b_{r,n}^G - b_n^{s,G}) + e_{r,n}^{s,G} \\ p_{r,n}^{s,E} = \mu_r^{s,E} \cdot x + t_r - t^{s,E} + \gamma_n^E \cdot I_{r,1}^{s,E} + m_{r,w}^{s,E} \cdot Z_{r,w} + (b_{r,n}^E - b_n^{s,E}) + e_{r,n}^{s,E} \\ p_{r,n}^{s,C} = \mu_r^{s,C} \cdot x + t_r - t^{s,C} + \gamma_n^C \cdot I_{r,1}^{s,C} + m_{r,w}^{s,C} \cdot Z_{r,w} + (b_{r,n}^C - b_n^{s,C}) + e_{r,n}^{s,C} \\ p_{r,n}^{s,L} = \mu_r^{s,L} \cdot x + t_r - t^{s,L} + \gamma_n^L \cdot I_{r,1}^{s,L} + m_{r,w}^{s,L} \cdot Z_{r,w} + (b_{r,n}^L - b_n^{s,L}) + e_{r,n}^{s,L} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} l_{r,n}^{s,G} = \mu_r^{s,G} \cdot x + t_r - t^{s,G} - \gamma_n^G \cdot I_{r,1}^{s,G} + m_{r,w}^{s,G} \cdot Z_{r,w} + N_{r,n}^{s,G} + (B_{r,n}^G - B_n^{s,G}) + \varepsilon_{r,n}^{s,G} \\ l_{r,n}^{s,E} = \mu_r^{s,E} \cdot x + t_r - t^{s,E} - \gamma_n^E \cdot I_{r,1}^{s,E} + m_{r,w}^{s,E} \cdot Z_{r,w} + N_{r,n}^{s,E} + (B_{r,n}^E - B_n^{s,E}) + \varepsilon_{r,n}^{s,E} \\ l_{r,n}^{s,C} = \mu_r^{s,C} \cdot x + t_r - t^{s,C} - \gamma_n^C \cdot I_{r,1}^{s,C} + m_{r,w}^{s,C} \cdot Z_{r,w} + N_{r,n}^{s,C} + (B_{r,n}^C - B_n^{s,C}) + \varepsilon_{r,n}^{s,C} \\ l_{r,n}^{s,L} = \mu_r^{s,L} \cdot x + t_r - t^{s,L} - \gamma_n^L \cdot I_{r,1}^{s,L} + m_{r,w}^{s,L} \cdot Z_{r,w} + N_{r,n}^{s,L} + (B_{r,n}^L - B_n^{s,L}) + \varepsilon_{r,n}^{s,L} \end{cases} \quad (2.19)$$

式中，各符号中的上标 G、E、C、L 分别表示 GPS、Galileo、BDS 与 LEO 卫星。注意到各系统观测值的硬件延迟不同，由于伪距硬件延迟与接收机钟差具有强耦合关系，不同系统的伪距硬件延迟会被吸收到接收机钟差中，从而造成多系统 PPP 中不同系统之间的接收机钟差并不一致，因此需要额外引入系统间偏差（Inter System Bias, ISB）参数，通常选择 GPS 系统的接收机钟差作为基准，估计其它系统的接收机钟差相对于 GPS 接收机钟差的差值。

2.1.2 低轨星座增强 GNSS PPP 随机模型

在确定了低轨星座增强 GNSS PPP 的函数模型之后，还需要进一步确定随机模型，主要包括各类 GNSS 观测值的权比选取、各类待估参数的先验精度及过程噪声确定等。低轨星座增强 PPP 随机模型与 Multi-GNSS PPP 随机模型大体相同。

(1) 观测值随机模型

观测值随机模型包括各伪距相位观测量的先验精度、观测值加权方式等。假

定不同系统、不同频率的伪距或相位观测值的先验精度相等，分别为 σ_p 与 σ_L （常用的经验值有 $\sigma_p = 0.3m$, $\sigma_L = 3mm$ ），则基于原始观测值的方差协方差阵(Σ_{UC})可以表达为：

$$\Sigma_{UC} = \text{diag}(\sigma_p^2, \sigma_L^2) \quad (2.20)$$

观测值定权有高度角加权法、载噪比加权法等。其中高度角加权方式最为常用，可以将伪距或相位观测值精度（标准差） σ 表达为以高度角 e 为变量的函数，如下式：

$$\sigma^2 = f(e) \quad (2.21)$$

根据高度角函数的不同衍生了多种高度角相关的随机模型，目前广泛使用的主要基于指数函数模型与正余弦三角函数模型的随机模型。

如国际上知名的大地测量数据处理软件 Bernese 与 GAMIT 采用的函数模型分别为：

$$\begin{aligned} \text{Bernese: } \sigma^2 &= a^2 + b^2 \cos^2 e \\ \text{GAMIT: } \sigma^2 &= a^2 + b^2 / \sin^2 e \end{aligned} \quad (2.22)$$

式中卫星高度角 e 的单位为弧度， a 、 b 为待定系数，一般根据经验给定或者通过拟合方法确定。

本软件采用的随机模型是 PANDA 软件中的一种常用模型：

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 a_0 \quad (2.23)$$

σ_0 为观测值的先验精度，本文取为伪距 0.3m，相位 3mm。 a_0 为与高度角 e 相关的函数，可以表达为：

$$a_0 = \begin{cases} 1 & e \geq 30^\circ \text{ deg} \\ \frac{1}{2 \sin e} & e < 30^\circ \text{ deg} \end{cases} \quad (2.24)$$

即当卫星高度角小于 30 度时，对观测值进行降权；当卫星高度角高于 30 度时则等权处理。除非特殊说明，各系统或各卫星的观测值之间一般等权。

(2) 参数随机模型

参数的随机模型主要包括：(分段)常数模型、(分段)线性模型、白噪声模型、随机游走模型、高斯-马尔科夫模型等。其中白噪声模型与随机游走模型可以看作是一阶高斯-马尔科夫模型的特殊情况。

离散形式的一阶高斯-马尔科夫过程可以表示为：

$$p(t_j) = p(t_i)e^{-\beta(t_j-t_i)} + u_k(t_i) \sqrt{\frac{\sigma^2}{2\beta}(1 - e^{-2\beta(t_j-t_i)})} \quad (2.25)$$

式中， $p(t)$ 表示随机过程； $u_k(t)$ 为高斯白噪声，其方差为 σ^2 ； $\beta = 1/\tau$ 为相关时间 τ 的倒数； t_i 、 t_j 为两个时刻。 $p(t_j)$ 与 $p(t_i)$ 的相关程度与参数 σ 和 β 的数值选择有关。

特别地，当 β 于 0 时，一阶高斯-马尔科夫模型退化为随机游走模型：

$$p(t_j) = p(t_i) + u_k(t_i)\sigma\sqrt{(t_j - t_i)} \quad (2.26)$$

当 β 趋于无穷时，一阶高斯-马尔科夫模型退化为白噪声模型：

$$p(t_j) = u_k(t_i)\sqrt{\frac{\sigma^2}{2\beta}} \quad (2.27)$$

PPP 中的待估参数包括测站三维坐标、接收机钟差、对流层延迟、相位模糊度。非差非组合中，待估参数还包括电离层延迟；多频多星座条件下还需要额外估计频间偏差、系统间偏差等偏差参数。其中测站坐标参数，在静态模式下作为常数估计，在动态模式下可认为是随机游走或白噪声过程逐历元估计；接收机钟差参数通常作为白噪声逐历元估计；对流层延迟参数可以作为分段常数、分段线性或随机游走过程估计，并同时估计对流层梯度参数；模糊度参数在未发生周跳的弧段内作为常数估计，若发生周跳则需要添加新的模糊度参数；电离层延迟一般也可认为是随机游走过程；各类偏差参数则需要具体分析其变化特性，选取相应的随机模型。值得一提的是，低轨卫星的系统间偏差同样也被建模为随机游走模型。

2.2 观测值仿真模型

由于大多数低轨星座尚处于方案论证或系统建设初期，缺少 LEO 卫星和部分 GNSS 卫星的实测导航数据，因此，本文将介绍 LEO 和 GNSS 卫星观测值仿真模型。仿真 LEO 卫星星载 GNSS 接收机数据用于 LEO 卫星精密定轨(Precise Orbit Determination, POD)，仿真地面监测站同时接收 LEO 卫星和 GNSS 卫星观测数据，用于后续的低轨星座增强 GNSS 定位性能分析。

2.2.1 仿真原理

仿真观测值的基本原理实际上是定位的逆过程。在定位的过程中，由 4 颗以上已知轨道坐标和钟差的卫星，以及伪距和载波相位观测数据，并且所有的误差（包括与接收机和测站有关的误差、与卫星有关的误差、与信号传播路径有关的误差等）都已通过已有模型进行了改正，那么接收机的位置和接收机钟差就可以通过最小二乘或卡尔曼滤波估计出来。在观测值仿真的过程中，接收机位置、卫星轨道和卫星钟差已知，可以计算出测站与卫星间的几何距离，再由已有的模型，计算出信号发射到接收过程中的所有误差，并考虑观测噪声，最后将这些误差和噪声加入到几何距离上模拟伪距和载波观测数据。

2.2.2 地面监测站数据仿真

地面站需要仿真来自 GNSS 卫星的观测数据，也要仿真 LEO 卫星播发的导航数据。而且对流层延迟、地球潮汐改正、接收机的天线 PCO 和 PCV 改正值也需要被仿真。此外，考虑到地面复杂的观测条件，比如多路径效应和大气残余误差，仅利用高斯随机噪声难以刻画出实际情况，会导致仿真的结果偏优，因而仿真利用真实的轨道和观测值进行多系统 PPP 解算，得到每个历元每颗卫星的真实残差，再基于真实残差去仿真伪距和载波测量噪声。同时，在多系统 PPP 的过程中，还可以得到与测站有关的接收机钟差、系统间时间差以及对流层湿延迟信息。具体的地面站非差伪距和载波相位观测值仿真公式如下所示：

$$\begin{aligned} P_{r,j}^s &= \mathbf{u}_r^s \cdot (\mathbf{o}^s - \mathbf{r}_r) + d_{pco,j}^s + d_{pcv,j}^s + d_{r,pco,j} + d_{r,pcv,j} + d_{r,disp} - t^s \\ &\quad + t_r + I_{r,j}^s + T_r^s + b_{r,j} - b_j^s + e_{r,j}^s \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \phi_{r,j}^s &= \mathbf{u}_r^s \cdot (\mathbf{o}^s - \mathbf{r}_r) + d_{pco,j}^s + d_{pcv,j}^s + d_{r,pco,j} + d_{r,pcv,j} + d_{r,disp} - t^s \\ &\quad + t_r - l_{r,j}^s + T_r^s + \lambda_j N_j^s + \varepsilon_{r,j}^s \end{aligned} \quad (2.29)$$

式中， s 和 r, j 分别表示卫星、接收机和频率号； \mathbf{u}_r^s 为从接收机至卫星视线方向单位向量； \mathbf{o}^s 和 \mathbf{r}_r 分别为卫星质心坐标和测站接收机天线参考中心坐标； $P_{r,j}^s$ 和 $\phi_{r,j}^s$ 分别是待仿真的伪距和载波相位观测值； $d_{r,pco,j}$ 和 $d_{r,pcv,j}$ 分别表示接收机段的 PCO 和 PCV； $d_{r,disp}$ 为地球潮汐位移改正，包括地球固体潮、海潮负荷位移和极潮； $b_{r,j}$ 和 b_j^s 分别是接收机端与卫星端的码硬件延迟； t^s 和 t_r 分别为卫星钟差与接收机钟差； $I_{r,j}^s$ 为电离层延迟； T_r^s 为对流层延迟； λ_j 为频率 j 对应的载波波

长; N_j^s 为整周模糊度; $e_{r,j}^s$ 和 $\varepsilon_{r,j}^s$ 分别为伪距和载波相位观测噪声; 在相位观测值仿真中暂时不考虑相位硬件延迟。

为仿真各项误差, 使用无电离层组合(IF)消去一阶电离层延迟项, 根据仿真原理, L1 和 L2 频率观测值仿真公式如下:

$$\begin{cases} P_1 = \rho_1 - t^s + t_r + I_1 + b_{r,1} - b_1^s + e_1 \\ P_2 = \rho_2 - t^s + t_r + \gamma I_1 + b_{r,2} - b_2^s + e_2 \\ \Phi_1 = \rho_1 - t^s + t_r - I_1 + \lambda_1 N_1 + \varepsilon_1 \\ \Phi_2 = \rho_2 - t^s + t_r - \gamma I_1 + \lambda_2 N_2 + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2.30)$$

式中, $\rho_j = \mathbf{u}_r^s \cdot (\mathbf{o}^s - \mathbf{r}_r) + d_{pco,j}^s + d_{pcv,j}^s$ 为各频率上接收机至 GNSS 卫星天线相位中心的几何距离, 由于 PCO 和 PCV 与频率有关, 其几何距离也将与频率有关。卫星天线 PCO 和 PCV 可采用国际 GNSS 服务(International GNSS service, IGS)机构提供的天线文件进行仿真。

对(2.30)进行无电离层组合, 可得:

$$\begin{cases} P_{IF} = \rho_{IF} - \bar{t}^s + \bar{t}_r + e_{IF} \\ \Phi_{IF} = \rho_{IF} - \bar{t}^s + \bar{t}_r + \lambda_{IF} \bar{N}_{IF} + \varepsilon_{IF} \end{cases} \quad (2.31)$$

式中, $\rho_{IF} = \mathbf{u}_r^s \cdot (\mathbf{o}^s - \mathbf{r}_r) + d_{pco,IF}^s + d_{pcv,IF}^s$ 为接收机至卫星天线相位中心的无电离层组合几何距离; $\bar{t}^s = t^s + b_{IF}^s$, $\bar{t}_r = t_r + b_{r,IF}$, $\bar{N}_{IF} = N_{IF} + \frac{b_{IF}^s - b_{r,IF}}{\lambda_{IF}}$ 在定位过程中总是作为一个整体参数估计。实际上, 欧洲定轨中心(CODE)提供的精密卫星钟差也是由双频无电离层估计出来的, 吸收了卫星端无电离层伪距硬件延迟, 提供的就是 \bar{t}^s , 因此, 考虑利用 CODE 产品仿真。

将 $\bar{t}^s = t^s + b_{IF}^s$ 和 $\bar{t}_r = t_r + b_{r,IF}$ 代入(2.30)得:

$$\begin{cases} P_1 = \rho_1 - \bar{t}^s + \bar{t}_r + I_1 + (b_{IF}^s - b_1^s) + (b_{r,1} - b_{r,IF}) + e_1 \\ P_2 = \rho_2 - \bar{t}^s + \bar{t}_r + \gamma I_1 + (b_{IF}^s - b_2^s) + (b_{r,2} - b_{r,IF}) + e_2 \\ \Phi_1 = \rho_1 - \bar{t}^s + \bar{t}_r - I_1 + \lambda_1 N_1 + b_{IF}^s - b_{r,IF} + \varepsilon_1 \\ \Phi_2 = \rho_2 - \bar{t}^s + \bar{t}_r - \gamma I_1 + \lambda_2 N_2 + b_{IF}^s - b_{r,IF} + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2.32)$$

对括号中的部分进行处理:

$$\begin{cases} b_{IF}^s - b_1^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_1^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_2^s - b_1^s = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (b_1^s - b_2^s) = \frac{1}{\gamma - 1} DCB_{P1P2}^s \\ b_{IF}^s - b_2^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_1^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_2^s - b_2^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (b_1^s - b_2^s) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} DCB_{P1P2}^s \\ b_{r,1} - b_{r,IF} = b_{r,1} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_{r,1} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_{r,2} = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (b_{r,1} - b_{r,2}) = -\frac{1}{\gamma - 1} DCB_{r,P1P2} \\ b_{r,2} - b_{r,IF} = b_{r,2} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_{r,1} + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot b_{r,2} = -\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} (b_{r,1} - b_{r,2}) = -\frac{1}{\gamma - 1} DCB_{r,P1P2} \end{cases} \quad (2.33)$$

将公式(2.33)代入(2.32)得:

$$\begin{cases} P_1 = \rho_1 - \bar{t}^s + \bar{t}_r + I_1 + \frac{1}{\gamma - 1} (DCB_{P1P2}^s - DCB_{r,P1P2}) + e_1 \\ P_2 = \rho_2 - \bar{t}^s + \bar{t}_r + \gamma I_1 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} (DCB_{P1P2}^s - DCB_{r,P1P2}) + e_2 \\ \Phi_1 = \rho_1 - \bar{t}^s + \bar{t}_r - I_1 + \lambda_1 N_1 + b_{IF}^s - b_{r,IF} + \varepsilon_1 \\ \Phi_2 = \rho_2 - \bar{t}^s + \bar{t}_r - \gamma I_1 + \lambda_2 N_2 + b_{IF}^s - b_{r,IF} + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (2.34)$$

式中, DCB_{P1P2}^s 和 $DCB_{r,P1P2}$ 分别为卫星端和接收机端的 P1-P2 差分码偏差 (Differential Code Bias, DCB)。单 GPS 系统的 DCB 改正可以从 CODE 网站下载; 多系统的 DCB 改正文件, 可以从德国宇航中心(DLR)或者中科院测量与地球物理研究所(IGG)服务器获取。

对于多系统观测数据仿真而言, 将上述公式变化至多系统, 可得:

$$\begin{cases} P_1^G = \rho_1^G - \bar{t}^{s,G} + \bar{t}_r^G + I_1^G + T^G + \frac{1}{\gamma^G - 1} (DCB_{P1P2}^{s,G} - DCB_{r,P1P2}^G) + e_1^G \\ P_2^E = \rho_2^G - \bar{t}^{s,G} + \bar{t}_r^G + \gamma^G I_1^G + T^G + \frac{\gamma^G}{\gamma^G - 1} (DCB_{P1P2}^{s,G} - DCB_{r,P1P2}^G) + e_2^G \\ P_1^{R_j} = \rho_1^{R_j} - \bar{t}^{s,R_j} + \bar{t}_r^G + IFB_{R_{j-G}} + I_1^{R_j} + T^{R_j} + \frac{1}{\gamma^{R_j} - 1} (DCB_{P1P2}^{s,R_j} - DCB_{r,P1P2}^{R_j}) + e_1^{R_j} \\ P_2^{R_j} = \rho_2^{R_j} - \bar{t}^{s,R_j} + \bar{t}_r^G + IFB_{R_{j-G}} + \gamma^{R_j} I_1^{R_j} + T^{R_j} + \frac{\gamma^{R_j}}{\gamma^{R_j} - 1} (DCB_{P1P2}^{s,R_j} - DCB_{r,P1P2}^{R_j}) + e_2^{R_j} \\ P_1^E = \rho_1^E - \bar{t}^{s,E} + \bar{t}_r^G + ISB_{E_G} + I_1^E + T^E + \frac{1}{\gamma^E - 1} (DCB_{P1P5}^{s,E} - DCB_{r,P1P5}^E) + e_1^E \\ P_5^E = \rho_5^E - \bar{t}^{s,E} + \bar{t}_r^G + ISB_{E_G} + \gamma^E I_1^E + T^E + \frac{\gamma^E}{\gamma^E - 1} (DCB_{P1P5}^{s,E} - DCB_{r,P1P5}^E) + e_5^E \\ P_1^C = \rho_1^C - \bar{t}^{s,C} + \bar{t}_r^G + ISB_{C_G} + I_1^C + T^C + \frac{1}{\gamma^C - 1} (DCB_{P1P2}^{s,C} - DCB_{r,P1P2}^C) + e_1^C \\ P_2^C = \rho_2^C - \bar{t}^{s,C} + \bar{t}_r^G + ISB_{C_G} + \gamma^C I_1^C + T^C + \frac{\gamma^C}{\gamma^C - 1} (DCB_{P1P2}^{s,C} - DCB_{r,P1P2}^C) + e_2^C \\ P_1^L = \rho_1^L - \bar{t}^{s,L} + \bar{t}_r^G + ISB_{L_G} + I_1^L + T^L + \frac{1}{\gamma^L - 1} (DCB_{P1P2}^{s,L} - DCB_{r,P1P2}^L) + e_1^L \\ P_2^L = \rho_2^L - \bar{t}^{s,L} + \bar{t}_r^G + ISB_{L_G} + \gamma^L I_1^L + T^L + \frac{\gamma^L}{\gamma^L - 1} (DCB_{P1P2}^{s,L} - DCB_{r,P1P2}^L) + e_2^L \end{cases} \quad (2.35)$$

相位观测值方程不在赘述

式中, $\rho_j = \mathbf{u}_r^s - (\mathbf{o}^s - \mathbf{r}_r) + d_{pco,j}^s + d_{pcv,j}^s + d_{r,pco,j} + d_{r,pcv,j} + d_{r,disp}$ 为接收机天线相位中心至卫星天线相位中心的几何距离; 上标 L 表示 LEO 系统; ISB_{L_G} 为 LEO 系统相对于 GPS 的接收机系统间偏差。

具体仿真过程如下：

首先仍是通过迭代，并考虑天线相位改正、相对论效应和潮汐影响，计算可见卫星与地面接收机之间的几何距离，其中，对于固体潮可根据已有模型仿真，海潮和极潮可分别利用海潮 blq 文件和地球自转参数 erp 文件并结合模型仿真，接收机端和卫星端 PCO 和 PCV 均采用 IGS 天线产品仿真。卫星钟差使用 CODE 多系统精密钟差文件仿真。接收机钟差和系统间偏差，暂时不予考虑。对于电离层，由于 GNSS 和 LEO 卫星高度不一样，GNSS 卫星延迟量可基于 GIM 模型得到 TEC，而 LEO 卫星延迟量需要对 GIM 模型值乘以一定的比例，得到 LEO 卫星高度以下的电离层电子含量。对流层延迟仿真可以通过对流层干延迟乘以干延迟投影函数加上湿延迟乘以湿延迟投影函数得到，其中，干湿延迟采用 GPT (Global Pressure and Temperature) 模型配合 Saastamoinen 模型仿真，干湿分量投影函数采用 GMF (Global Mapping Function) 模型 (Saastamoinen1972; Boehm et al., 2006, 2007)。在 LEO 导航信号频率仿真方面，采用与 GPS 载波相同的频率。对于伪距和载波相位测量噪声，采用 0 均值的高斯噪声仿真，某一历元实际定位中会有多条传播路径，不同路径高度角不同，因而在仿真某一条新路径的噪声时，利用实际路径中与之高度角最接近的那条路径的伪距和相位残差来仿真，仿真时可通过乘以一定的系数 BDS 量测噪声适当放大，模拟更真实的情况。对于模糊度，整数部分使用随机数对每个卫星进行生成，小数部分可以使用 UPD 产品进行仿真。对于其余的无电离层伪距硬件延迟，采用人为设定的值。

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-LAG 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 Python 虚拟环境

GREAT-LAG 提供了一些辅助 python 脚本，这些脚本需要 python 3.7 (或更高版本)环境和一些 python 包。因此我们建议您创建一个运行这些脚本的虚拟环境 (venv)。有关 venv 的详细说明，请参阅官方文件链接 (<https://docs.python.org/3/tutorial/venv.html>)。

3.4 版权

开发人员：

- 武汉大学 GREAT 团队，Wuhan University

三方库：

- GREAT-LAG 使用 G-Nut 库 (<http://www.pecny.cz/>) Copyright (C) 2011-2016 GOP - Geodetic Observatory Pecny, RIGTC
- GREAT-LAG 使用 pugixml 库 (<http://pugixml.org>) Copyright (C) 2006-2014 Arseny Kapoulkine
- GREAT-LAG 使用 Newmat 库(http://www.robertnz.net/nm_intro.htm)Copyright (C) 2008: R B Davies
- GREAT-LAG 使用 spdlog 库 (<https://github.com/gabime/spdlog>) Copyright(c) 2015-present, Gabi Melman & spdlog contributors
- GREAT-LAG 使用 Eigen 库 (<https://eigen.tuxfamily.org>) Copyright (C) 2008-2011 Gael Guennebaud
- 脚本工具使用部分 FAST 源码 (<https://github.com/ChangChuntao/FAST>) Copyright (C) The GNSS Center, Wuhan University & Chinese Academy of Surveying and mapping

第四章 编译与安装

该软件包可以通过网站 <https://github.com/GREAT-WHU> 访问。将软件包 **GREAT-LAG_<ver>.zip** 解压到适当的目录 **<install_dir>**。GREAT-LAG 目录结构如下。

表 4.1 GREAT-LAG 软件目录结构

目录/文件	目录/文件	说明
./bin		可执行程序
	./Linux	Linux 系统可执行程序
	./Windows	Windows 系统可执行程序
./src		源代码
	./app	GREAT-LAG 主程序
	./LibGREAT	低轨导航增强解算库
	./LibGnut	Gnut 库
	./third-party	三方库 (Eigen)
	CMakeLists.txt	CMakeLists 文件
./sample_data		算例数据
	./PPPFLT_2023305	低轨增强定位算例一
	./PPPFLT_2021100	低轨增强定位算例二
./util		脚本工具
	./plot	画图脚本
./doc		文档文件
	GREAT_PPP.xml	低轨导航增强配置文件模板
	GREAT_SimuObs.xml	观测值仿真配置文件模板
	GREAT-LAG_1.0.pdf	用户指南

4.1 Windows

您可以使用文件夹 **<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/bin/Windows** 下的现有程序，或者自行编译可执行程序。以下说明展示了如何在 Windows 上构建 GREAT-LAG 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-LAG_<ver>/src`，或者将目录 `<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/src` 中的 CMakeList.txt 拖放到 cmake-gui 界面。然后将属性 “Where to build the binaries” 修改为 `<install_dir>/GREAT-LAG_<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)。

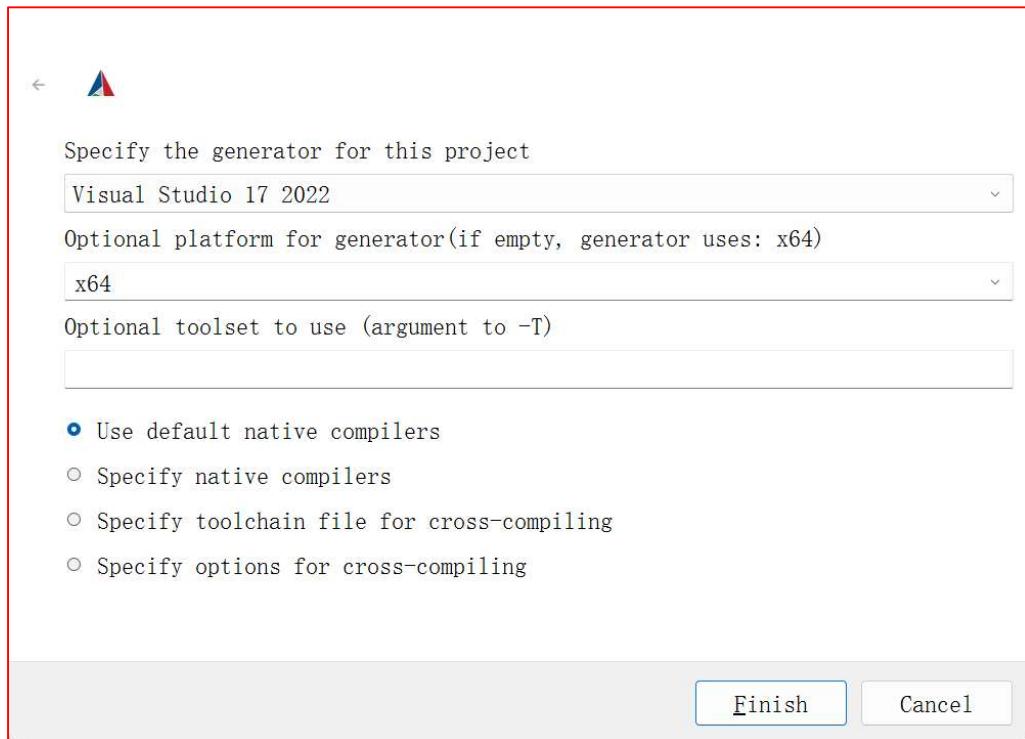


图 4.1 IDE 选择示例

- (5) 配置三方库路径。

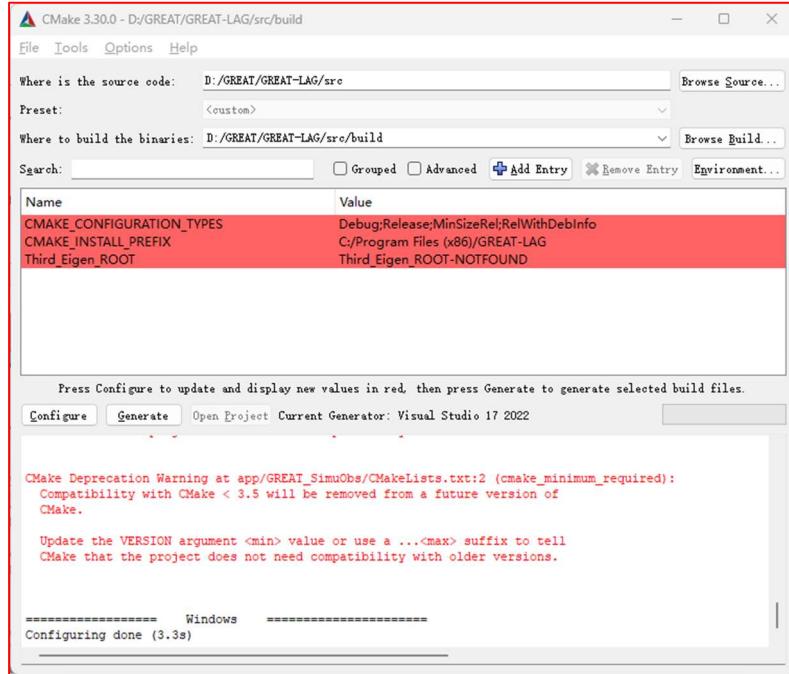


图 4.2 配置三方库路径

(6) 执行“Generate”将构建文件写入 <install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/src/build。

(7) 执行“Open Project”，然后在相应的 IDE 中编译源代码。

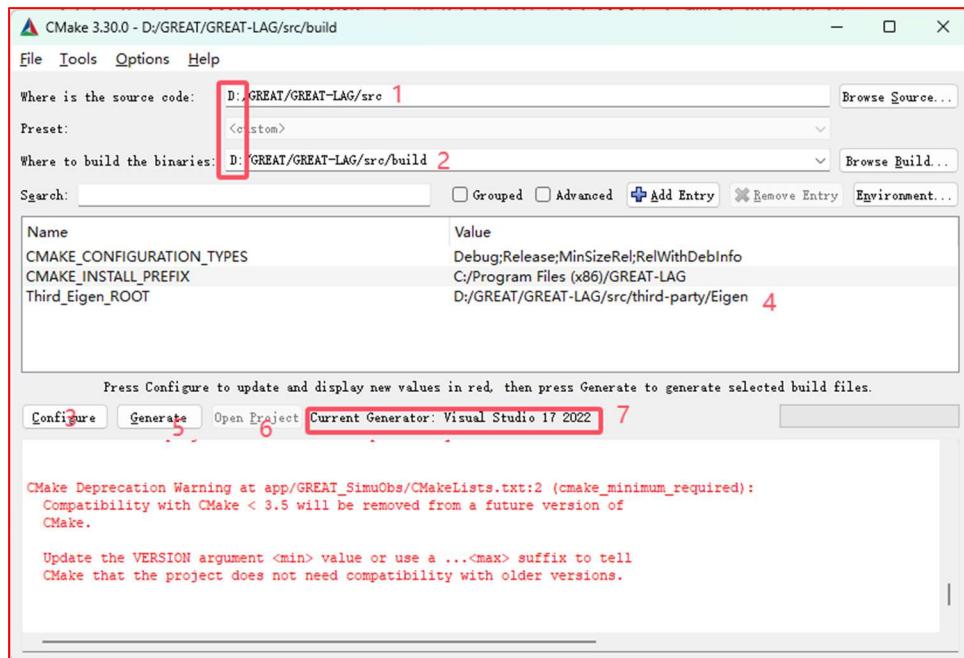


图 4.3 GREAT-LAG 在 Windows 环境下的编译过程

4.2 Linux

对于 Linux 环境，您可以按照以下说明在 Linux 上重新构建 GREAT-LAG 可执行程序。

- (1) 通过网站 (<https://cmake.org/download/>) 获取 CMake 并安装。请注意，CMake 的最低版本要求是 3.0.0。
- (2) 在目录 <install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/src 中创建“build”目录并切换到该目录。

1. mkdir build

2. cd build/

(3) 执行 cmake3 ../ 然后执行 make -j8 以编译源代码。GREAT-LAG 的可执行程序可以在 <install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/src/build_Linux/Bin 中找到。

3. cmake3 ..

4. make -j8

```
(base) [wanghao@new-c7-03 src]$ mkdir build
(base) [wanghao@new-c7-03 src]$ cd build/
(base) [wanghao@new-c7-03 build]$ cmake3 ..
-- The C compiler identification is GNU 4.8.5
-- The CXX compiler identification is GNU 4.8.5
-- Check for working C compiler: /usr/bin/cc
-- Check for working C compiler: /usr/bin/cc - works
-- Detecting C compiler ABI info
-- Detecting C compiler ABI info - done
-- Detecting C compile features
-- Detecting C compile features - done
-- Detecting CXX compiler: /usr/bin/c++
-- Check for working CXX compiler: /usr/bin/c++ - works
-- Detecting CXX compiler ABI info
-- Detecting CXX compiler ABI info - done
-- Detecting CXX compile features
-- Detecting CXX compile features - done
-- =====
-- .ooooo. oooooooo. ooooooo000000 .o. oooooooooooooo
-- d8P' `Y8b 888 `Y88. 888' `8 .888. 8` 888 8
-- 888 888 .d88' 888 .8"888. 888
-- 888 888oooo88P' 888oooo8 .8' 888. 888
-- 888 ooooo 888' 88b. 888 " .88oooo8888. 888
-- '88. ,88' 888 '88b. 888 o .8' `888. 888
-- `Y8bood8P' o888o o888o o888ooooo8d8 o88o o8888o o888o
-- =====
-- The GREAT (GNSS+ Research, Application and Teaching) software is designed and developed at Wuhan University for
-- scientific and engineering application and teaching in geodesy and navigation fields.
-- 
-- It is written in standard C++. GREAT-PVT supports multi-frequency multi-system PPP and RTK filtering solutions.
-- =====
-- Performing Test COMPILER_SUPPORTS_CXX11
-- Performing Test COMPILER_SUPPORTS_CXX11 - Success
-- Performing Test COMPILER_SUPPORTS_CXX0X
-- Performing Test COMPILER_SUPPORTS_CXX0X - Success
-- operation system is : Linux-5.4.0-170-generic
-- current platform is : Linux
-- CMake version is : 5.4.0-170-generic
-- C compiler is : /usr/bin/cc
-- C++ compiler is : /usr/bin/c++
-- Build directory is : /data02/lxyuan/test3/src/build_Linux
-- The program main directory is : /data02/lxyuan/test3/src
spdlogexportgioutilsgcodersgmodelsgallgdataasetpuigxmlgrcprgambfixnewmat
-- include path for LibGnut is : /data02/lxyuan/test3/src/third-party/Eigen
-- include path for LibGnut is : /data02/lxyuan/test3/src/LibGnut
-- include path for Eigen is : /data02/lxyuan/test3/src/third-party/Eigen
-- include path for LibGREAT is : /data02/lxyuan/test3/src/LibGREAT
-- 
-- ===== Not Windows =====
-- Configuring done
-- Generating done
-- Build files have been written to: /data02/lxyuan/test3/src/build
(base) [wanghao@new-c7-03 build]$ make -j8
Scanning dependencies of target Lngntut
[ 1%] Building CXX object ../build_Linux/LibGnut/CMakeFiles/LibGnut.dir/gall/gallbias.cpp.o
[ 1%] Building CXX object ../build_Linux/LibGnut/CMakeFiles/LibGnut.dir/gall/gallnav.cpp.o
[ 2%] Building CXX object ../build_Linux/LibGnut/CMakeFiles/LibGnut.dir/gall/gallobj.cpp.o
[ 2%] Building CXX object ../build_Linux/LibGnut/CMakeFiles/LibGnut.dir/gall/gallobj.cpp.o
```

图 4.4 Linux 系统 CMake 配置结果示例

在这里, CMake 将自动找到系统上的默认 C/C++ 编译器及其构建工具。如果 CMake 报告找不到编译器错误, 如“CMake Error: CMAKE_C_COMPILER not set”, 您应根据链接 (<https://stackoverflow.com/questions/45933732/how-to-specify-a-compiler-in-cmake>) 指定 C/C++ 编译器的路径。同样, 您可以根据链接 (<https://cmake.org/cmake/help/latest/manual/cmake-generators.7.html>) 为 CMake 指定构建工具。

第五章 软件和工具使用说明

5.1 数据下载

GREAT-LAG 软件包含 GREAT-PVT、GREAT-SimuObs 两个 app，GREAT-PVT 所需的输入文件包括观测值、广播星历、精密轨道、精密钟差、IGS 天线文件、行星星历文件、海潮文件、地球定向参数文件；在此基础上用户可以选择是否输入差分码偏差（Differential Code Bias, DCB）、频率间钟偏差（Inter-frequency Clock Bias, IFCB）、未校准相位硬件延迟（Uncalibrated Phase Delay, UPD），其中 GRAET-UPD 与 GREAT-IFCB 已经开源在 <https://github.com/GREAT-WHU> 上，表 5.1 列出了 GREAT-PVT 软件所需输入文件的格式说明和获取方式：

表 5.1 GREAT-PVT 输入文件及文件格式

输入文件	文件描述	文件格式说明
RINEXO	GNSS 观测值	https://files.igs.org/pub/data/format/rinex304.pdf
RINEXN	广播星历	https://files.igs.org/pub/data/format/rinex304.pdf
SP3	精密轨道	https://files.igs.org/pub/data/format/sp3d.pdf
RINEXC	精密钟差	https://files.igs.org/pub/data/format/rinex_clock304.txt
DCB	差分码偏差	https://files.igs.org/pub/data/format/sinex_bias_100.pdf
IFCB	频率间钟偏 差	https://github.com/GREAT-WHU/GREAT-IFCB/blob/main/doc/GREAT-IFCB_1.0.pdf
UPD	未校准相位 硬件延迟	https://github.com/GREAT-WHU/GREAT-UPD/blob/main/doc/GREAT-UPD_1.0.pdf
jpleph_de405	行星星历	https://ssd.jpl.nasa.gov/planets/eph_export.html
oceanload	海潮文件	http://holt.oso.chalmers.se/loading/example_b1q.html
poleut1	地球定向参 数文件	参见附录 7.3
atx	天线文件	https://files.igs.org/pub/station/general/antex14.txt

GREAT-SimuObs 所需的输入文件包括观测值、精密轨道、精密钟差、IGS 天线文件、行星星历文件、海潮文件、地球定向参数文件；在此基础上用户可以选择是否输入未校准相位硬件延迟（Uncalibrated Phase Delay, UPD），值得一提的是仿真软件并不支持 DCB 以及 IFCB 文件，并不会使用其数据进行仿真。表 5.2 列出了 GREAT-SimuObs 软件所需输入文件的格式说明和获取方式：

表 5.2 GREAT-SimuObs 输入文件及数据获取方式

输入文件	文件描述	数据获取方式说明
RINEXO	GNSS 观测值	https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/data/daily/
SP3	精密轨道	https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/
RINEXC	精密钟差	https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/
UPD	未校准相位硬件延迟	https://github.com/GREAT-WHU/GREAT-UPD
jpleph_de405	行星星历	https://ssd.jpl.nasa.gov/ftp/eph/planets/Linux/
oceanload	海潮文件	http://holt.oso.chalmers.se/loading
ionex	电离层产品	ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/gps/products/ionex
TRP	对流层产品	ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/gps/products/troposphere
poleut1	地球定向参数文件	参见附录 7.3
atx	天线文件	https://files.igs.org/pub/station/general/pcv_archive/

5.2 GREAT-LAG 软件

5.2.1 观测值仿真

在进行 GREAT-SimuObs 观测值仿真之前，用户需要生成 XML（Extensible Markup Language，可扩展标记语言）格式的配置文件，SimuObs 解算的配置文件的详细设置请参见附录 7.3。为方便参考和修改，提供了名为“GREAT_SimuObs.xml”的模板配置文件，该文件位于<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/doc 文件夹下。

要在单个项目中运行 GREAT-SimuObs，用户只需要输入命令行：

```
1. cd <path_to_config>
2. <path_to_executable>/GREAT-SimuObs -x <CONFIG>.xml
```

<path_to_config>、<path_to_executable>和<CONFIG>分别表示配置文件路径、GREAT-LAG 可执行程序的路径和 xml 配置文件名。

5.2.2 低轨星座增强定位

GREAT-LAG 低轨星座增强定位解算之前，用户需要生成 XML（Extensible Markup Language，可扩展标记语言）格式的配置文件，解算的配置文件的详细设置请参见附录 7.4。为方便参考和修改，低轨星座增强定位解算提供了名为“GREAT_PPP.xml”的模板配置文件，该文件位于<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/doc 文件夹下。

要在单个项目中运行 GREAT-PVT app，用户只需要输入命令行：

```
1. cd <path_to_config>
2. <path_to_executable>/GREAT-PVT -x <CONFIG>.xml
```

<path_to_config>、<path_to_executable>和<CONFIG>分别表示配置文件路径、GREAT-PVT 可执行程序的路径和 xml 配置文件名，定位解算的结果文件格式可参见附录 7.5。

5.3 结果绘图和分析工具

GREAT-LAG 提供了 python 脚本来绘制和分析低轨星座增强定位解算结果，这些脚本位于文件夹<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/util/plot 中，文件目录结构如下：

表 5.3 低轨星座增强定位结果绘制目录结构

目录/文件	说明
./data_ppp	定位结果文件
/ PythonScripts	画图脚本
./output	定位绘图结果输出文件

5.3.1 定位结果绘制

(1) 在进行定位结果绘制之前，确保已安装以下第三方库：

- [tqdm](#)
- [matplotlib](#)
- [numpy](#)

(2) 用户需要准备以下两类文件:

1. SINEX 文件, 将其放入`./data_ppp/snxx/`文件夹下;
2. GREAT-LAG 解算得到的浮点解与固定解的文件, 浮点解文件放入`./data_ppp/sta_float/`文件夹下, 固定解文件放入`./data_ppp/sta_fix/`文件夹下。

(3) 数据文件准备好后, 首先使用“[snx_to_crd.py](#)”脚本将 sinex 文件转换为自定义测站精密坐标 crd 文件, 打开“[snx_to_crd.py](#)”脚本, 可在主函数中修改时间和文件路径, 相关说明可见表 5.4。图 5.1 给出了配置示例, 运行完毕后会在`./data_PP/PP/crd`文件夹下输出 crd 文件。

表 5.4 snx_to_crd.py 配置说明

配置节点	说明
<code>year</code>	年<YYYY>
<code>day</code>	天<DOY>
<code>sinex_path</code>	sinex 文件路径 (输入)
<code>crd_path</code>	crd 文件路径 (输出)

```
# 年
year = 2023
# 年积日
day = 305
# snx 文件夹路径
sinex_path = rf"..\\data_ppp\\snxx"
# crd 文件夹路径 (输出目录)
crd_path = rf"..\\data_ppp\\PP\\PP\\crd"
```

图 5.1 snx_to_crd.py 配置示例

(4) 打开“[ppp_plot.py](#)”, 可修改测站列表信息、时间和文件路径等, 相关配置说明参见表 5.5。图 5.2 给出了配置示例, 运行完毕后会在`./output`文件夹下生成该日的结果文件, 其中 png 文件为对应测站的误差序列图, sum 文件为相关统计数据。

表 5.5 ppp_plot.py 配置说明

配置节点	说明
siteList	测站列表<SITE>
year	年<YYYY>
day	天<DOY>
type1	数据类型 1 (ppp-float)
type2	数据类型 2 (ppp-fix)
fltpath1	对应 type1 的数据路径 (输入)
fltpath2	对应 type2 的数据路径 (输入)
savepath	保存的结果路径 (输出)
crd_path	crd 文件路径 (输入)

```

siteList = [
    "AC23", "AC24", "WUH2", "POTS", "GODN", "GODS",
    "MBAR", "SGOC", "ASCG", "PARK", "CPVG", "ALIC", "HERS"
]

# 数据的年份
year = 2023
# 数据的年积日
day = 305
# 设置数据类型: 浮点解(ppp-float)或者固定解(ppp-fixed)
type1 = "PPP-float"
type2 = "PPP-fixed"

# 对应 type1 的测站数据
fltpath1 = rf"..\\data_ppp\\sta_float"
# 对应 type2 的测站数据
fltpath2 = rf"..\\data_ppp\\sta_fix"
# 保存的结果目录
savePath = rf"..\\output"
# gnss_crd_io.py 脚本输出的 crd 文件路径
crdPath = rf"..\\data_ppp\\crd\\snx_igs_2023_305.crd"

```

图 5.2 ppp_plot.py 配置示例

第六章 算例数据处理说明

6.1 低轨星座增强定位算例一

6.1.1 数据准备

低轨星座增强定位仿真算例一数据在文件夹 <install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/sample_data/ PPPFLT_2023305，选取 2023 年 11 月 1 日开展测试，该组算例使用 120-LEO 星座后行进行仿真，使用模型仿真对流层延迟、电离层延迟，使用随机噪声仿真接收机钟差。测站为 ALIC，文件目录结构如下：

表 6.1 低轨增强定位仿真算例一文件目录结构

目录/文件	说明
./gnss	GNSS 数据文件夹
./model	系统文件夹
./obs	观测值文件夹
./obs_simu	仿真观测值文件夹
./upd	upd 文件夹
./xml	xml 配置文件夹
./result	结果输出文件夹

6.1.2 参数配置

(1) 设置仿真系统及卫星

若需要仿真多个系统需要在 xml 中的<**sys**>节点中填入仿真的多个系统，此外，需要在各 GNSS 系统的<**sat**>节点中填入仿真的卫星 PRN 号及仿真的频段、频率；本程序支持 GPS、BDS、Galileo、LEO 四系统观测值仿真。

(2) 设置仿真选项

仿真设置主要由 xml 中的<**simu**>节点控制；

将<**simu**>中的<**ztd**>选项填 NO，程序将使用给定的模型进行仿真；

将<**simu**>中的<**clk**>选项填 NO，程序将使用随机数进行接收机钟差仿真，接收机钟差随机数标准差由<**sig_clk**>选项控制；

将`<simu>`中的`<ion>`选填填 NO，程序将不加入电离层延迟，所有卫星的观测值中电离层延迟均为 0；

将`<simu>`中的`<upd>`选项填 YES，模糊度整数部分通过随机数生成，`<sig_amb>`节点控制该随机数的标准差。

以上述配置设置观测值，大部分误差将以对应的模型进行仿真，在此情况下开展低轨卫星导航增强实验。

(3) 设置接收机坐标

GREAT-SimuObs 支持多测站仿真，需要在 xml 中的节点中设置接收机初始坐标，初始坐标值可以有 sinex 文件获取，仿真观测值仅支持双频仿真；xml 详细设置请参见附录 7.3。

(4) 设置 PPP xml

在 GREAT-PPP.xml 中的`<sys>`节点中填入进行定位的系统，本算例填入 GECL 四系统。在`<process>`节点中的`<sig_init_leo>`中填 LEO_ISB 的初始标准差。在`<filter>`节点中将`rndwk_leo`修改为合适的值。

6.1.3 数据解算

数据仿真分为以下几步：

(1) 在 Visual Studio 解决方案资源管理器中打开 app 文件夹，右键 GREAT_SimuObs，将 GREAT_SimuObs 设为启动项目。

(2)

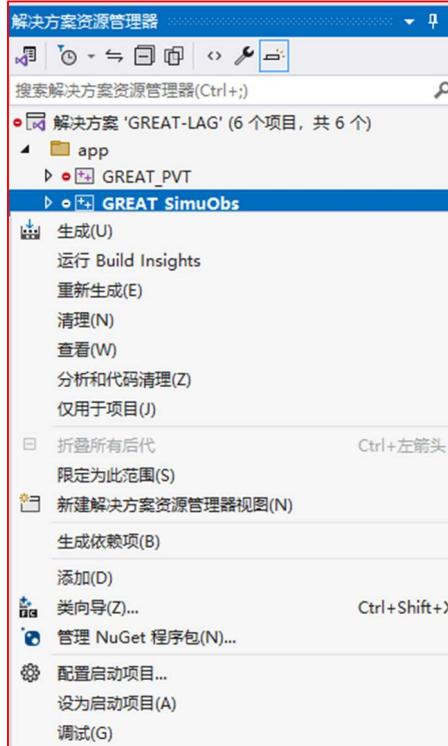


图 6.1 GREAT_SimuObs 设为启动项目

- (3) 右键 GREAT_SimuObs，选择属性，将算例所在目录设为工作目录，并设置命令参数。

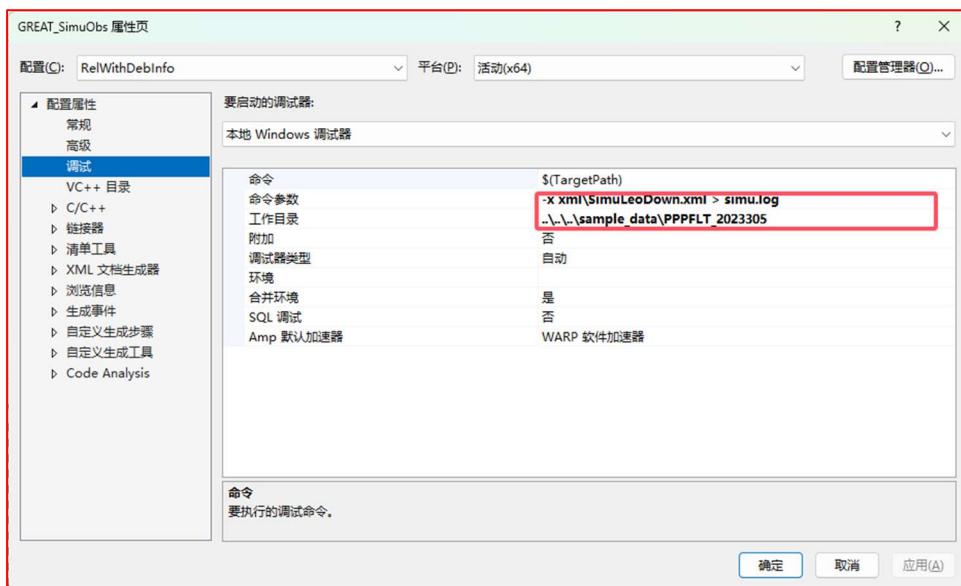


图 6.2 仿真观测值解算命令参数和工作目录设置

- (4) 运行即可。



图 6.3 运行 GREAT-SimuObs

- (5) 完成观测值仿真之后，仿真 GREAT-PVT 说明文档中进行 PPP 解算的步骤，进行 PPP 或 PPP-AR 解算

6.1.4 结果绘制

对于低轨增强定位算例一，我们计算了 24 小时内的静态和仿动态 PPP 浮点解与固定解，为了评估结果的准确性，使用 IGS 日解坐标作为参考值，按照 5.3.1 小节绘制东、北、天 (East、North、Up, ENU) 方向上误差序列图，图 6.4、6.5 分别为 ALIC 站四系统双频静态 PPP、低轨增强 PPP 及 AR 结果，图 6.6、6.7 分别为 ALIC 站四系统双频仿动态 PPP、低轨增强 PPP 及 AR 结果。

计算 ALIC 测站 24 小时内 ENU 三个方向上误差的均方根值 (Root Mean Square, RMS) 和模糊度固定率，统计结果如表 6.2 和 6.3 所示，与 PPP 浮点解三个方向 RMS 相比，低轨增强 PPP 浮点解三个方向上 RMS 的统计分量有所减小，尤其在北方向上，ALIC 站静态解减小了 33.3%，ALIC 站动态解分别减小了 46.2%。本文中收敛标准为 ENU 三方向 RMS 小于(0.1m, 0.1m, 0.25m)并且持续连续 10 个历元；从收敛时间上来看，PPP、低轨增强 PPP、PPP-AR、低轨增强 PPP-AR 静态解分别为 390s、180s、180s、150s；动态解分别为 300s、150s、180s、90s。

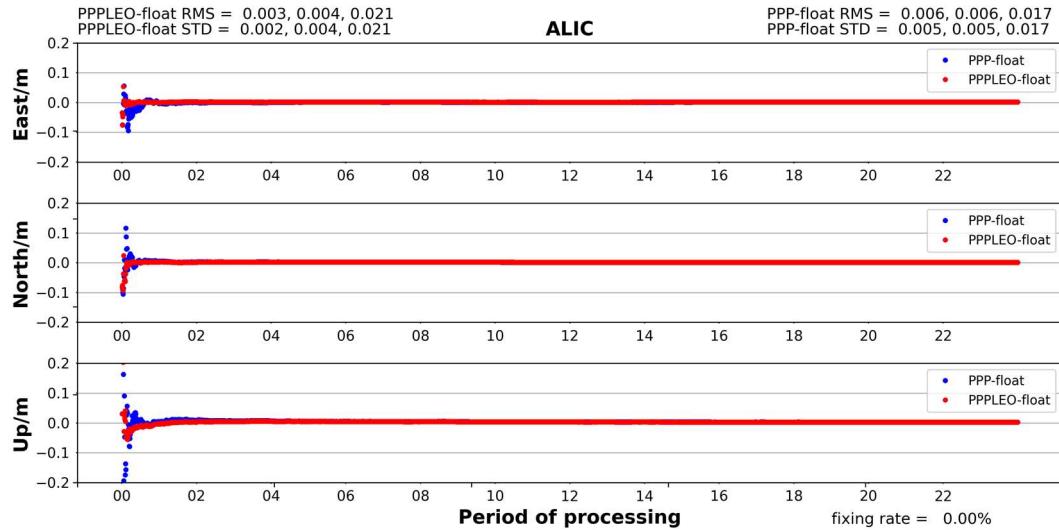


图 6.4 ALIC 站静态 PPP 浮点解与低轨增强 PPP 浮点解误差

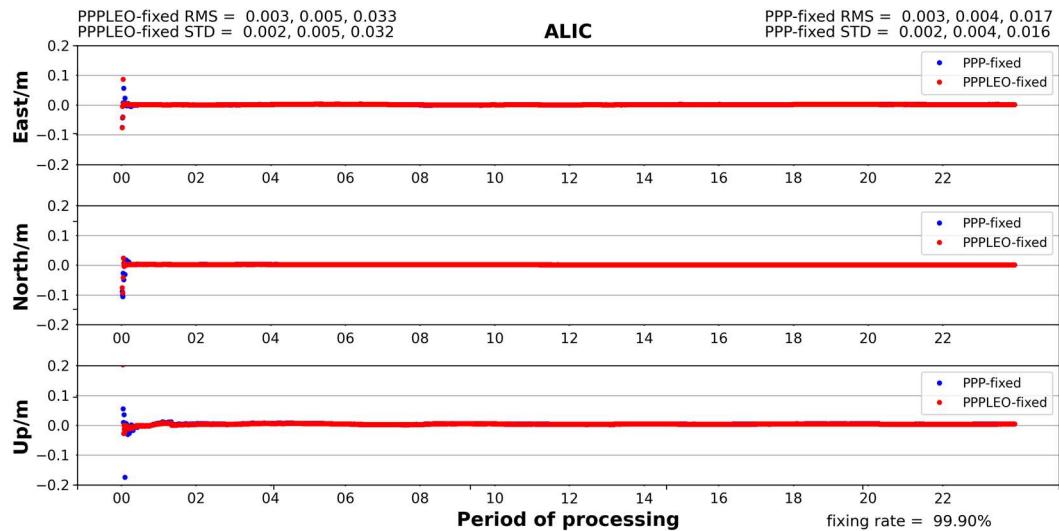


图 6.5 ALIC 站静态 PPP 固定解与低轨增强 PPP 固定解误差

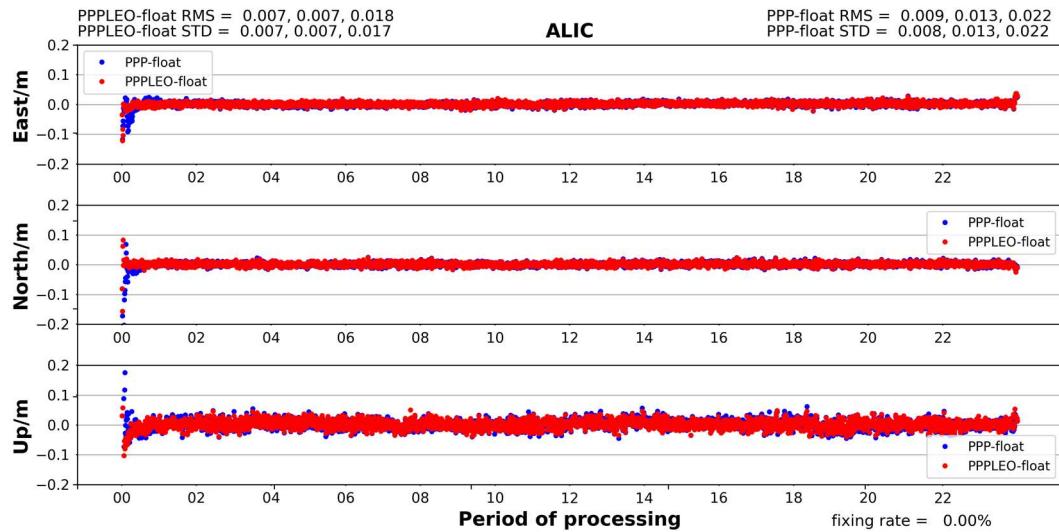


图 6.6 ALIC 站仿动态 PPP 浮点解与低轨增强 PPP 浮点解误差

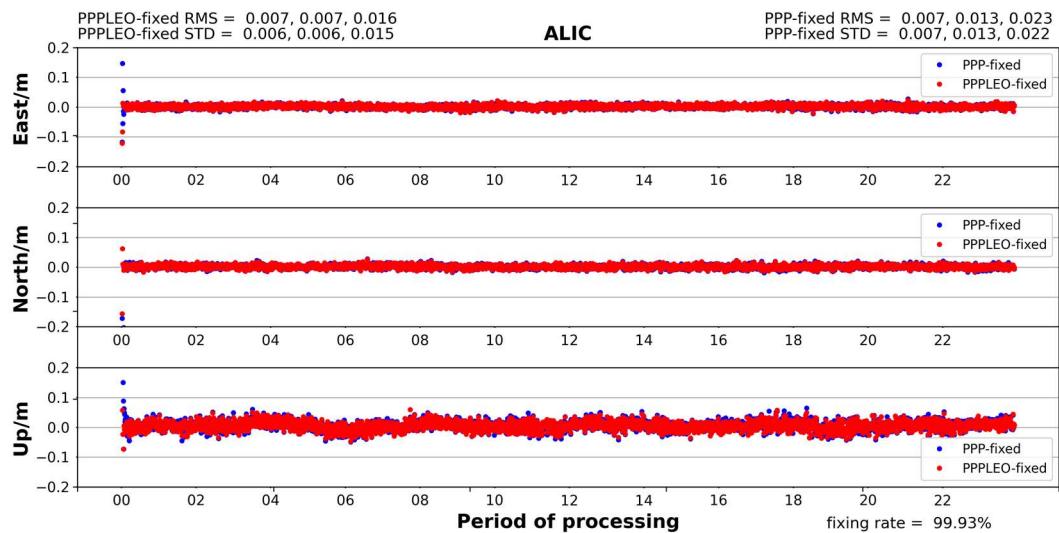


图 6.7 ALIC 站仿动态 PPP 固定解与低轨增强 PPP 固定解误差

表 6.2 ALIC 站 PPP 解算统计结果

解类型	RMS (cm)			固定率
	East	North	Up	
静态浮点解	0.6	0.6	1.7	-
静态固定解	0.4	0.3	1.7	99.86%
动态浮点解	0.9	1.3	2.2	-
动态固定解	0.7	1.3	2.3	99.86%

表 6.3 ALIC 站低轨增强 PPP 解算统计结果

解类型	RMS (cm)			固定率
	East	North	Up	
静态浮点解	0.3	0.4	2.1	-
静态固定解	0.3	0.5	3.3	99.90%
动态浮点解	0.7	0.7	1.8	-
动态固定解	0.7	0.7	1.6	99.93%

6.2 低轨星座增强定位算例二

6.2.1 数据准备

低轨星座增强定位仿真算例二数据在文件夹 `<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/sample_data/ PPPFLT_2021100`, 选取 2021 年 4 月 10 日开展测试, 该组算例使用 120-LEO 星座后行进行仿真, 使用对流层产品、电离层产品、接收机钟差产品仿真对流层延迟、电离层延迟、接收机钟差, 测站为 ABMF, 文件结构目录如下:

表 6.4 低轨星座增强定位仿真算例二文件目录结构

目录/文件	说明
<code>./gnss</code>	GNSS 数据文件夹
<code>./model</code>	系统文件夹
<code>./obs</code>	观测值文件夹
<code>./obs_simu</code>	仿真观测值文件夹
<code>./upd</code>	upd 文件夹
<code>./xml</code>	xml 配置文件夹
<code>./result</code>	结果输出文件夹

6.2.2 参数配置

使用外部产品进行仿真, xml 总体上与使用模型进行仿真一致; xml 详细设置请参见附录 7.4。

(1) 设置仿真系统及卫星

与前文 6.1.2 一致

(2) 设置仿真选项

将`<simu>`中的`<ztd>`选项填 YES，并且在`<input>`节点中加入`<trpztd>`节点，节点中填写对流层产品文件名；

将`<simu>`中的`<clk>`选项填 YES，在`<input>`节点中的`<rinexc_simu>`节点中加入接收机钟差文件，`<sig_clk>`选项不需要改变；接收机钟差需要用户使用程序

`<upd>`选项与前文一致。

以上述配置设置观测值，大部分误差将以对应的产品进行仿真，在此情况下开展低轨卫星导航增强实验。

(3) 设置接收机坐标

与前文 6.1.2 一致。

(4) 设置 PPP xml

与前文 6.1.2 一致。

6.2.3 数据解算

数据解算设置过程与前文 6.1.3 一致

6.2.4 结果绘制

同样按照 5.3.1 小节绘制东、北、天（East、North、Up, ENU）方向上误差序列图，图 6.8、6.9 分别为 ABMF 站四系统双频静态 PPP、低轨增强 PPP 及 AR 结果，图 6.10、6.11 分别为 ABMF 站四系统双频仿动态 PPP、低轨增强 PPP 及 AR 结果。计算 ABMF 测站 24 小时内 ENU 三个方向上误差的均方根值（Root Mean Square, RMS）和模糊度固定率，统计结果如表 6.5 和 6.6 所示，与 PPP 浮点解三个方向 RMS 相比，低轨增强 PPP 浮点解三个方向上 RMS 的统计分量有所减小，尤其在东方向上，ABMF 站静态解减小了 57.1%，ABMF 站动态解分别减小了 22.7%。从收敛时间上来看，PPP、低轨增强 PPP、PPP-AR、低轨增强 PPP-AR 静态解分别为 720s、240s、690s、210s；动态解分别为 900s、240s、870s、210s。

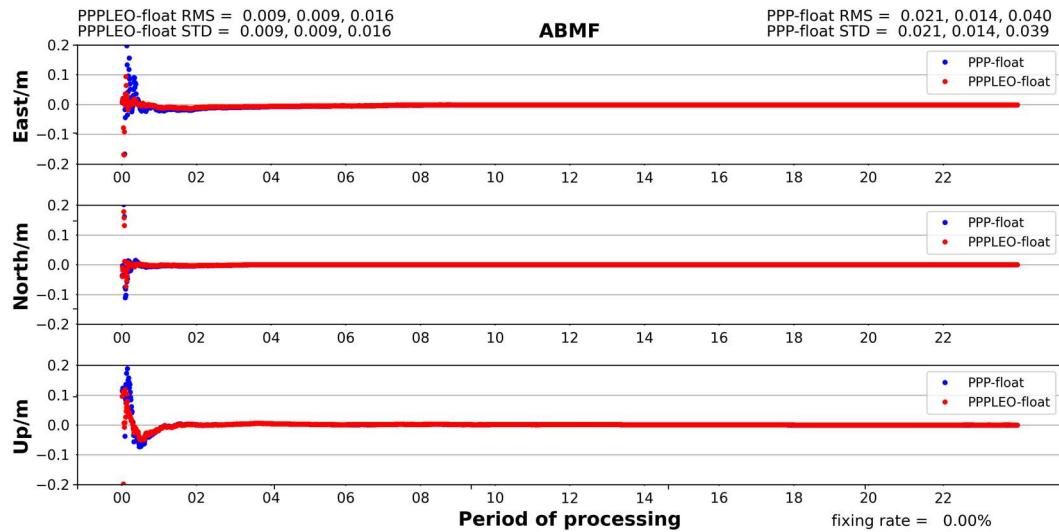


图 6.8 ABMF 站静态 PPP 浮点解与固定解误差

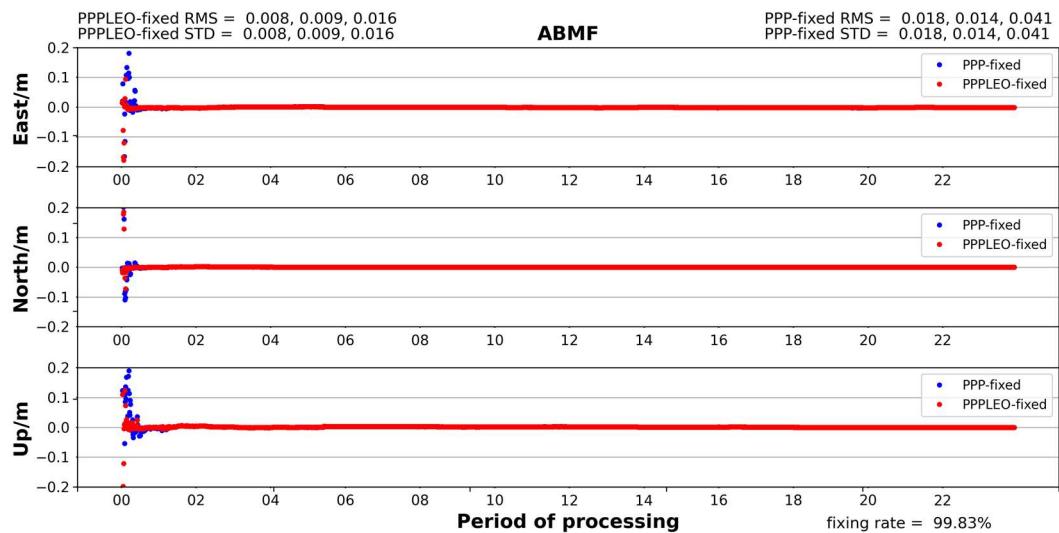


图 6.9 ABMF 站静态低轨增强 PPP 浮点解与固定解误差

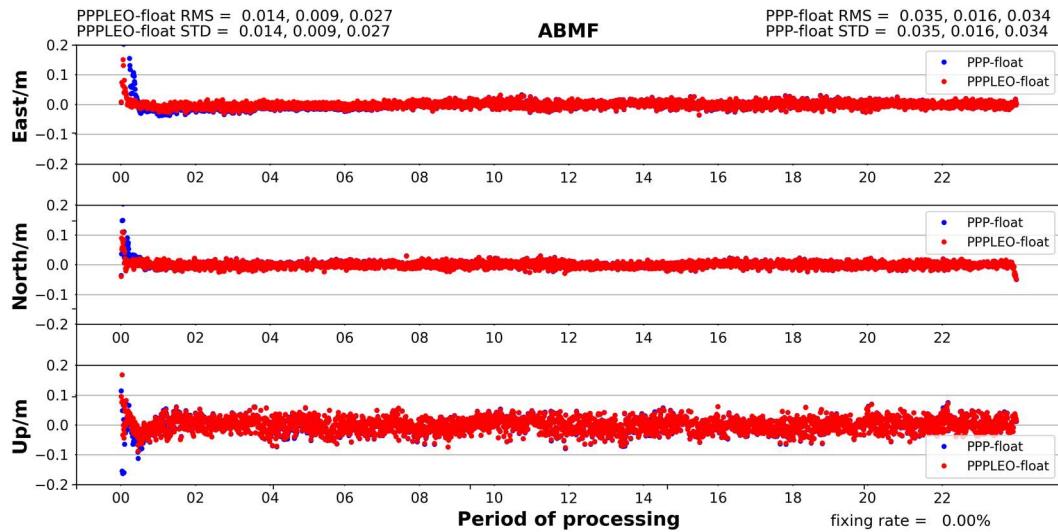


图 6.10 ABMF 站仿动态 PPP 浮点解与固定解误差

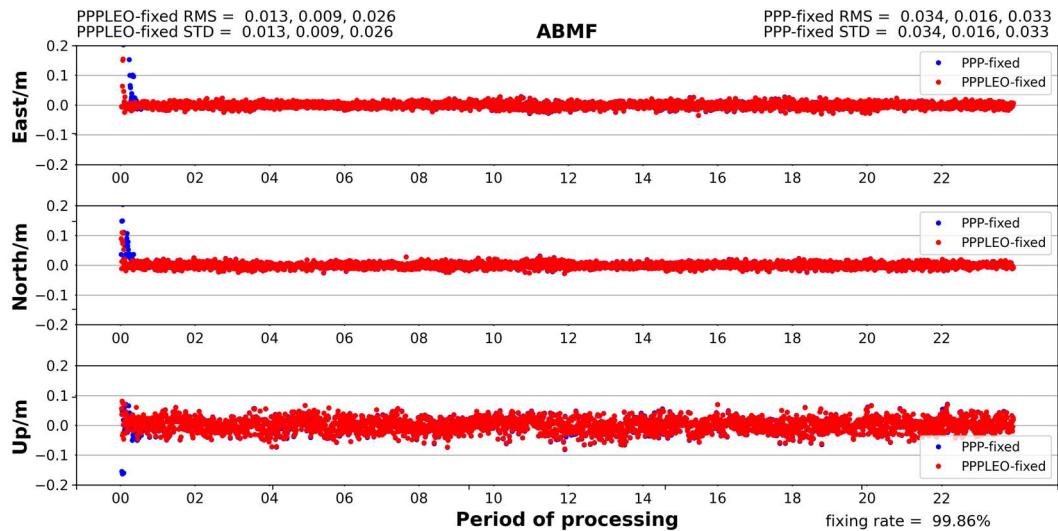


图 6.11 ABMF 站仿动态低轨增强 PPP 浮点解与固定解误差

表 6.5 ABMF 站 PPP 解算统计结果

解类型	RMS (cm)			固定率
	East	North	Up	
静态浮点解	2.1	1.4	4.0	-
静态固定解	1.8	1.4	4.1	99.19%
动态浮点解	3.5	1.6	3.4	-
动态固定解	3.4	1.6	3.3	99.19%

表 6.6 ABMF 站低轨增强 PPP 解算统计结果

解类型	RMS (cm)			固定率
	East	North	Up	
静态浮点解	0.9	0.9	1.6	-
静态固定解	0.8	0.9	1.6	99.76%
动态浮点解	1.4	0.9	2.7	-
动态固定解	1.3	0.9	2.6	99.86%

6.3 低轨星座定位算例

6.3.1 数据准备

低轨星座定位仿真算例数据在文件夹 `<install_dir>/GREAT-LAG_<ver>/sample_data/ PPPFLT_2021100_LEO`, 选取 2021 年 4 月 10 日开展测试, 该组算例使用 240-LEO 星座后行进行仿真, 使用对流层产品、电离层产品、接收机钟差产品仿真对流层延迟、电离层延迟、接收机钟差, 测站为 ABMF。在此基础上开展低轨星座定位, 文件结构目录如下:

表 6.7 低轨星座增强定位仿真算例二文件目录结构

目录/文件	说明
<code>./gnss</code>	GNSS 数据文件夹
<code>./model</code>	系统文件夹
<code>./obs</code>	观测值文件夹
<code>./obs_simu</code>	仿真观测值文件夹
<code>./upd</code>	upd 文件夹
<code>./xml</code>	xml 配置文件夹
<code>./result</code>	结果输出文件夹

6.3.2 参数配置

(1) 设置仿真系统及卫星

本算例仅进行 LEO 系统仿真，在 xml 中的`<sys>`节点中仅填 LEO，卫星填入所有 240 颗低轨卫星。在 LEO 系统的`<sat>`节点中填入 240 颗卫星 PRN 号及仿真的频段、频率。

(2) 设置仿真选项

与前文 6.1.2 一致

(3) 设置接收机坐标

与前文 6.1.2 一致。

(4) 设置 PPP xml

与前文 6.1.2 一致。

6.3.3 数据解算

数据解算设置过程与前文 6.1.3 一致

6.3.4 结果绘制

同样按照 5.3.1 小节绘制东、北、天（East、North、Up, ENU）方向上误差序列图，图 6.12 为 ABMF 站低轨星座双频静态 PPP 及 AR 结果，图 6.13 为 ABMF 站低轨星座双频仿动态 PPP 及 AR 结果。计算 ABMF 测站 24 小时内 ENU 三个方向上误差的均方根值（Root Mean Square, RMS）和模糊度固定率，统计结果如表 6.8 所示，从收敛时间上来看，低轨星座 PPP、低轨星座 PPP-AR 静态解分别为 120s、120s；动态解分别为 210s、180s。

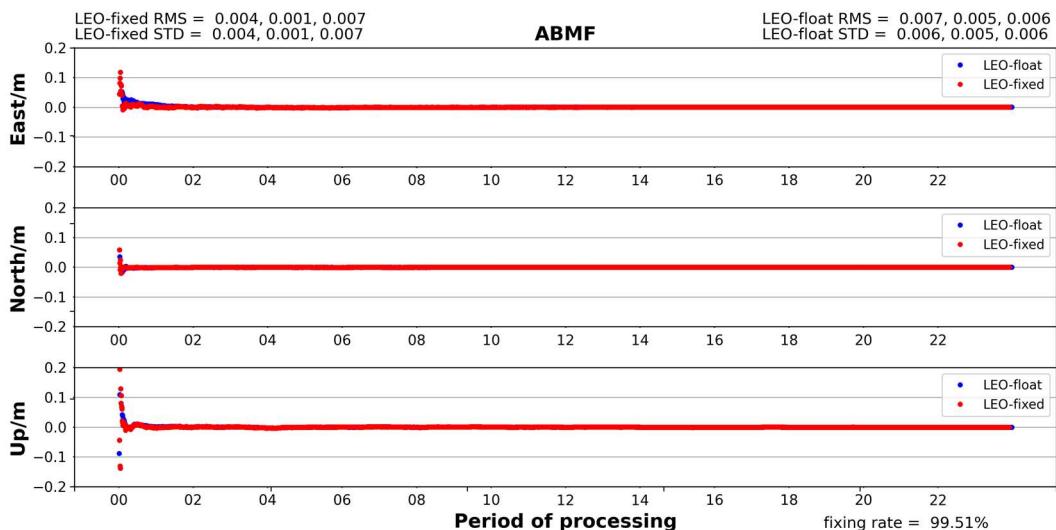


图 6.12 ABMF 站静态低轨星座 PPP 浮点解与固定解误差

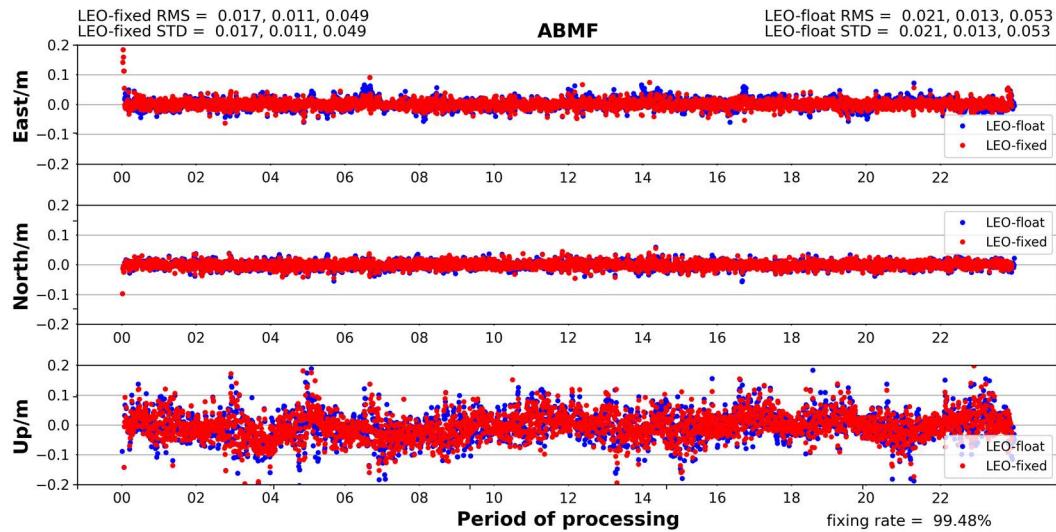


图 6.13 ABMF 站仿动态低轨星座 PPP 浮点解与固定解误差

表 6.8 ABMF 站低轨星座 PPP 解算统计结果

解类型	RMS (cm)			固定率
	East	North	Up	
静态浮点解	0.7	0.5	0.6	-
静态固定解	0.4	0.1	0.7	99.51%
动态浮点解	2.1	1.3	5.3	-
动态固定解	1.7	1.1	4.9	99.48%

第七章 附录

7.1 GREAT-UPD

GREAT-UPD 是 GREAT 软件中的一个重要模块，主要用于多频率多系统 UPD 估计。它可以为 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS (GREC) 卫星提供超宽巷 (Extra-Wide-Lane , EWL)、宽巷(Wide-Lane , WL)和窄巷(Wide-Lane , NL) UPD，用于多频率多系统精密单点定位模糊度固定。开源的 GREAT-UPD 软件是用 c++ 11 语言编写的，遵循面向对象的原则，可以在 Windows、Linux 和 Macintosh 等几种流行的操作系统上编译和运行。软件包可从 <https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/GREAT-UPD.htm> 获取，包括源代码、用户手册、批处理脚本、样例数据和一些辅助工具。相关出版物参见 <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01070-2>。

7.2 GREAT-IFCB

频率间时钟偏差作为 GNSS 应用中的关键问题之一，近年来得到了广泛的研究。然而，由于缺乏公开可用的 IFCB 产品，用户无法充分利用多频 GNSS 观测结果。基于武汉大学 GREAT 软件平台，设计开发了一款开源软件 GREAT-IFCB，为多频段用户提供多 GNSS IFCB 产品。基于无几何距离和无电离层的多频观测组合，GREAT-IFCB 可以为 GPS、Galileo 和 BDS 卫星生成 IFCB 产品。开源的 GREAT-UPD 软件是用 c++ 11 语言编写的，遵循面向对象的原则，可以在 Windows、Linux 和 Macintosh 等几种流行的操作系统上编译和运行。软件包可从 <https://geodesy.noaa.gov/gps-toolbox/great-ifcb.shtml> 获取，包括源代码、用户手册、批处理脚本、样例数据和一些辅助工具。相关出版物参见 <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01398-5>。

7.3 GREAT-SimuObsXML 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 SimuObs XML 文件的格式。

表 7.1 SimuObs xml 配置文件说明

项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
GREAT_SimuObs 的基础设置 (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>
GREAT_SimuObs 的输入文件设置 (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。	<rinexo>
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。	<rinexc>
精密星历文件	用于进行解算的精密星历文件。	<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>
TRP 文件	用于进行仿真对流层延迟的文件	<trpztd>
ionex 文件	用于进行仿真电离层延迟的文件	<ifcb>
UPD 文件	未校准的相位硬件延迟文件, 用于模糊度固定	<upd>
GREAT_SimuObs 的输出文件设置 (一级节点)		<outputs>
仿真结果	SimuObs 的计算结果文件	<rinexo>
GREAT_SimuObs 的解算设置 (一级节点)		<process>
对流层模型	使用的对流层模型	<tropo_model>
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	<obs_combinatio>
--IONO_FREE:	无电离层组合, 支持双频	n>
--RAW_ALL:	非差非组合, 支持双频和多频	

项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
观测值加权	确定观测值权重的方法	<obs_weight>
观测值频率	用于解算的观测值频率个数，只能为 2	<frequency>
GREAT_SimuObs 的仿真设置（一级节点）		<simu>
接收机钟差	用于确定接收机钟差仿真方式	<clk>
电离层延迟	用于确定电离层延迟仿真方式	<ion>
对流层延迟	用于确定对流层延迟仿真方式	<ztd>
相位小数偏差	用于确定相位小数偏差仿真方式	<upd>
整周模糊度 标准差	整周模糊度噪声标准差	<sig_amb>
接收机钟差 标准差	接收机钟差噪声标准差	<sig_clk>
GREAT_SimuObs 的接收机设置（一级节点）		<receiver>
测站名	用于确定测站名	id
接收机初始 坐标	测站 X 方向坐标	X
	测站 Y 方向坐标	Y
	测站 Z 方向坐标	Z
GREAT_SimuObs 的卫星设置（一级节点）		<gps>/<bds> <gal>/<leo>
观测值的先 验 sigema	伪距	sigma_C
	载波相位	sigma_L
频率	卫星频率，对应频段，可选值 2	<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->B1C, 5->B2a, 9->B2b, 8->B2a+b --LEO: 1->L1, 2->L2	<band>

示例：

```

<gen>
  <beg>2021-04-10 00:00:00</beg>      <!-- begin time <!-->
  <end>2021-04-10 23:59:30</end>      <!-- end time <!-->
  <int> 30 </int>                      <!-- sampling interval <!-->
  <sys> GFS BDS GAL LEO</sys>        <!-- system ex: GFS GAL GLO QZS BDS SBS <!-->
  <rec> CUSV </rec>                   <!-- site (4-char upper) <!-->
  <est> LSQ </est>                   <!-- Estimator : FLT <!-->
  <sat_rm> </sat_rm>
</gen>

<leo sigma_C="0.6" sigma_L="0.01" maxC_simu="1" maxL_simu="0.01" sigC_simu="0.1" sigL_simu="0.005">
  <!--> LEO pseudorange simu sigma & phase simu sigma<!-->
  <!--> satellite prn <!-->
  <sat>
    261 262 263 264 265 266 267 268 269 270
    271 272 273 274 275 276 277 278 279 280
    281 282 283 284 285 286 287 288 289 290
    291 292 293 294 295 296 297 298 299 300
    301 302 303 304 305 306 307 308 309 310
    311 312 313 314 315 316 317 318 319 320
    321 322 323 324 325 326 327 328 329 330
    331 332 333 334 335 336 337 338 339 340
    341 342 343 344 345 346 347 348 349 350
    351 352 353 354 355 356 357 358 359 360
    361 362 363 364 365 366 367 368 369 370
    371 372 373 374 375 376 377 378 379 380
  </sat>
</leo>

```

图 7.1 SimuObs XML 配置文件示例 (a)

```

<gps sigma_C="0.6" sigma_L="0.01" maxC_simu="1" maxL_simu="0.01" sigC_simu="0.1" sigL_simu="0.005">
  <!--> GPS pseudorange simu sigma & phase simu sigma<!-->
  <!--> satellite prn <!-->
  <sat>
    G01 G02 G03 G05 G06 G07 G08 G09 G10 G11
    G12 G13 G14 G15 G16 G17 G18 G19 G20 G21
    G22 G23 G24 G25 G26 G27 G28 G29 G30 G31
    G32
  </sat>
  <band> 1 2</band>
  <freq> 1 2</freq>
</gps>

<gal sigma_C="0.6" sigma_L="0.01" maxC_simu="1" maxL_simu="0.01" sigC_simu="0.1" sigL_simu="0.005">
  <!--> GAL pseudorange simu sigma & phase simu sigma<!-->
  <!--> satellite prn <!-->
  <sat>
    E01 E02 E03 E04 E05 E06 E07 E08 E09 E10 E11 E12 E13
    E15 E16 E17 E20 E22 E23 E24 E25 E26 E28
    E29 E30 E31 E32 E33 E34 E35 E36
  </sat>
  <band> 1 5 </band>
  <freq> 1 2 </freq>
</gal>

<bds sigma_C="0.6" sigma_L="0.01" maxC_simu="1" maxL_simu="0.01" sigC_simu="0.1" sigL_simu="0.005">
  <!--> BDS pseudorange simu sigma & phase simu sigma<!-->
  <!--> satellite prn <!-->
  <sat>
    C07 C08 C09 C10 C11 C12 C13 C14 C15 C16 C17 C18
    C11 C12 C19 C20 C21 C22 C23 C24 C25 C26 C27 C28
    C29 C30 C31 C32 C33 C34 C35 C36 C37
    C38 C40 C41 C42 C43 C44 C45 C46
    C06 C39
    C14
  </sat>
  <freq> 1 2 </freq>
  <band> 1 5 </band>
</bds>

```

图 7.2 SimuObs XML 配置文件示例 (b)

```

<simu>
  <clk> NO </clk>          <!--> use rec clk product (true/false) <!-->
  <ion> YES </ion>          <!--> use ion map product (true/false) <!-->
  <ztd> YES </ztd>          <!--> use ztd map product (true/false) <!-->
  <upd> YES </upd>          <!--> use upd product (true/false) <!-->
  <sig_amb> 10.0 </sig_amb> <!--> sigma of inter ambiguity <!-->
  <sig_clk> 9000.0 </sig_clk> <!--> sigma of rec clk <!-->
</simu>

<receiver> <!--> simulated receiver stations and their XYZ coordinates <!-->
  <rec id="AMFP" X="" Y="" Z="" 1774604.877625" dX="" 0.000298" dY="" 0.000485" dZ="" 0.000216" obj="SNX" />
  <rec id="CUSV" X="-1132915.015920" Y="6092528.529211" Z="1504633.157510" dX="" 0.000298" dY="" 0.000485" dZ="" 0.000216" obj="SNX" />
</receiver>

<process>
  <frequency> 2 </frequency>          <!--> frequency number <!-->
  <minimum_elev> 7 </minimum_elev>       <!--> cut-off satellite elevation(deg) <!-->
  <grad_mf> TILTING </grad_mf>          <!--> tropo gradient mapping function(TILTING,CHEN_HERRING, BAR_SEVER ...) <!-->
  <ion_model> SION </ion_model>          <!--> ion model (SION or VION) <!-->
  <obs_combination> IONO_FREE </obs_combination> <!--> obs comb type (IONO_FREE) <!-->
  <gradient> false </gradient>           <!--> estimate tropo gradient (true/false) <!-->
  <tropo> true </tropo>                  <!--> estimate tropo param (true/false) <!-->
  <tropo_mf> gmt </tropo_mf>            <!--> tropospheric wet delay mapping function <!-->
  <tropo_model> saastamoinen </tropo_model> <!--> trop model <!-->
  <obs_weight> PARTELE </obs_weight>       <!--> weigh model of obs <!-->
</process>

```

图 7.3 SimuObs XML 配置文件示例 (c)

```

<inputs>
  <rinexo>    <!--> rinex obs file <!-->
  | .\obs\cusv1000.21o
  </rinexo>
  <rinexc_simu>gnss\clk_2021100 gnss\cod21526.clk </rinexc_simu>  <!--> precise satellite clock offset file for simu <!-->
  <sp3_simu>gnss\xwsp3.del_x100 .\gnss\cod21526.sp3</sp3_simu>  <!--> precise orbit file for simu<!-->
  <DE>.\model\jpleph_de405_great</DE> <!--> Planetary ephemeris file <!-->
  <eop>.\model\polet1_2015_2023.2023</eop>  <!--> EOP file <!-->
  <atx>.\model\igs_absolute_14.atx</atx>  <!--> Antenna correction file <!-->
  <blg>.\model\oceanload_SLR</blg>  <!--> oceanload file <!-->
  <ionex>.\gnss\whrg1000.21i</ionex>  <!--> Ionospheric products, for simu ionospheric delay <!-->
  <trpztd>  <!--> Tropospheric products, for simu tropospheric delay <!-->
  | .\gnss\cusv1000.21zpd
  </trpztd>
  <upd>.\upd\upd_wl_2021100_GECL .\upd\upd_nl_2021100_GECL </upd>  <!--> uncalibrated phase delay, for fixing ambiguity <!-->
</inputs>

<outputs>
  <rinexo>./obs_simu/${rec}1000.21o</rinexo>  <!--> simulated rinex obs file <!-->
</outputs>

```

图 7.4 SimuObs XML 配置文件示例 (d)

7.4 GREAT-PPP 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“”结尾的部分为注释。下表展示了 GREAT-PPP XML 文件的格式。

表 7.2 GREAT-PPP xml 配置文件说明

项目	说明	XML 文件中的标签或属性
GREAT_PPFLT 的基础设置（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>
GREAT_PPFLT 的输入文件设置（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。	<rinexo>
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。	<rinexc>
精密星历文件	用于进行解算的精密星历文件。	<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>

项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
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>
DCB 文件	用于进行差分码偏差改正的 DCB 文件	<bias>
IFCB 文件	频率间钟偏差文件	<ifcb>
UPD 文件	未校准的相位硬件延迟文件, 用于模糊度固定	<upd>
GREAT_PPFLT 的输出文件设置 (一级节点)		<outputs>
日志文件	用于记录输出的日志信息	<log>
PPP 日志文 件	用于记录 PPP 计算过程中输出的日志信息	<ppp>
计算结果	PPPFILT 的计算结果文件	<flt>
GREAT_PPFLT 的解算设置 (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>
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 sigma	测站坐标 测站速度 对流层 模糊度 Galileo 的系统间偏差和频率间偏差 GLONASS 的系统间偏差和频率间偏差 BDS 的系统间偏差和频率间偏差 LEO 的系统间偏差偏差 电离层	<sig_init_crd> <sig_init_vel> <sig_init_ztd> <sig_init_amb> <sig_init_gal> <sig_init_glo> <sig_init_bds> <sig_init_leo> <sig_init_vion>
截止高度角	可用卫星观测值的最小高度角	<minimum_elev>

项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
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>
最大验后残差	用于残差编辑的验后残差阈值	<max_res_norm>
坐标约束	坐标约束方法: --est: 估计值约束 --fix: 固定解约束 --kin: 动态约束	<crd_constr>
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_c orr>
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>
GREAT_PPFLT 的滤波设置 (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 测站速度白噪声 接收机钟速白噪声 接收机钟差白噪声 电离层白噪声 对流层的随机游走噪声 模糊度的随机游走噪声 GLONASS isb/ifb 的随机游走噪声 Galileo isb/ifb 的随机游走噪声 BDS isb/ifb 的随机游走噪声 GPS ifb 的随机游走噪声 LEO isb 的随机游走噪声	noise_crd noise_vel noise_dclk noise_clk noise_vion rndwk_ztd rndwk_amb rndwk_glo rndwk_gal rndwk_bds rndwk_gps rndwk_leo
GREAT_PPFLT 的模糊度固定设置 (一级节点)		<ambiguity>

项目	说明	XML 文件中的 标签或属性
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 固定的个数	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>
窄巷观测值		<narrowlane_decision>
GREAT_PPPFLT 的卫星设置（一级节点）		<gps>/<bds> <gal>/<glo> <leo>
观测值的先 验 sigema	伪距 载波相位	sigma_C 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->B1C, 5->B2a, 9->B2b, 8->B2a+b --GLO: 1->G1, 2->G2 --LEO: 1->L1, 2->L2	<band>

示例：

```

<gen>
  <beg> 2021-04-10 00:00:00 </beg>           <!--> begin time <!-->
  <end> 2021-04-10 23:59:00 </end>           <!--> end time <!-->
  <int> 30                                     <!--> sampling interval <!-->
  <sys> GPS GAL LEO  </sys>    <!--> system ex:GPS GAL GLO QZS BDS SBS <!-->
  <rec> ABMF  </rec>      <!--> site (4-char upper) <!-->
  <est> FLT         </est>      <!--> Estimator :FLT <!-->
</gen>

<inputs>
  <rinexo>
    | .\obs_simu\abmf1000.21o          <!--> rinex obs file <!-->
  </rinexo>
  <rinexc> gnss\cod21526.clk gnss\clk_2021100 </rinexc> <!--> precise satellite clock offset file <!-->
  <sp3> gnss\cod21526.sp3 gnss\xwp3\del_x100 </sp3>       <!--> precise orbit file <!-->
  <de> model\jpleph_de405.great </de>                      <!--> Planetary ephemeris file <!-->
  <atx> model\igs_absolute_14.atx </atx>                  <!--> Antenna correction file <!-->
  <blp> model\oceanload_SIR </blp>                      <!--> oceanload file <!-->
  <eop> model\poleuti_2015_2023.2023 </eop>                <!--> ERP file <!-->
  <upd> \upd\upd_w1_2021100_GECL .\upd\upd_nl_2021100_GECL </upd> <!--> uncalibrated phase delay, for fixing ambiguity <!-->
</inputs>

<outputs append="false" verb="0">           <!--> output file: whether append & verb: the larger the value, the more detailed the output log. <!-->
  <log type="CONSOLE" name="ppp" level="INFO"/>        <!--> log file <!-->
  <ppp> .\result\$ (rec)-PPP </ppp>                 <!--> ppp log file <!-->
  <flt> .\result\$ (rec)-PPP-LBO.flt </flt>          <!--> result file <!-->
</outputs>

```

图 7.5 PPP XML 配置文件示例 (a)

```

<gps sigma_C="1" sigma_L="0.05">           <!--> GPS pseudorange sigma & phase sigma <!-->
  <sat>
    G01 G02 G03 G04 G05 G06 G07 G08 G09 G10
    G11 G12 G13 G14 G15 G16 G17 G18 G19 G20
    G21 G22 G23 G24 G25 G26 G27 G28 G29 G30
    G31 G32
  </sat>
  <band> 1 2 </band>                         <!--> the satellite frequency, for example, C5X, is represented as 5 <!-->
  <freq> 1 2 </freq>                         <!--> satellite frequency, corresponding to band, optional value 1/2/5 <!-->
</gps>
<glo sigma_C="0.6" sigma_L="0.01">           <!--> GLO pseudorange sigma & phase sigma <!-->
  <sat>
    R01 R02 R03 R04 R05 R06 R07 R08 R09 R10
    R11 R12 R13 R14 R15 R16 R17 R18 R19 R20
    R21 R22 R23 R24
  </sat>
  <band> 1 2 </band>
  <freq> 1 2 </freq>
</glo>
<gal sigma_C="0.6" sigma_L="0.01">           <!--> GAL pseudorange sigma & phase sigma <!-->
  <sat>
    E01 E02 E03 E04 E05 E06 E07 E08 E09 E10
    E11 E12 E13 E14 E15 E16 E17 E18 E19 E20
    E21 E22 E23 E24 E25 E26 E27 E28 E29 E30
    E31 E32 E33 E34 E35 E36
  </sat>
  <band> 1 5 </band>
  <freq> 1 2 </freq>
</gal>

```

图 7.6 PPP XML 配置文件示例 (b)

```

<bds sigma_C="0.6" sigma_L="0.01">           <!--> BDS pseudorange sigma & phase sigma <!-->
  <sat>
    | C06 C07 C08 C09 C10
    | C11 C12 C13 C14 C15 C16 C17 C18 C19 C20
    | C21 C22 C23 C24 C25 C26 C27 C28 C29 C30
    | C31 C32 C33 C34 C35 C36 C37 C38 C39
    | C41 C42 C43 C44 C45 C46
  </sat>
  <band> 1 5 </band>
  <freq> 1 2 </freq>
</bds>
<qzs sigma_C="0.6" sigma_L="0.01">           <!--> QZS pseudorange sigma & phase sigma <!-->
  <sat>
    | J01 J02 J03 J04
  </sat>
  <band> 1 2 </band>
  <freq> 1 2 </freq>
</qzs>
<leo sigma_C="1" sigma_L="0.05">           <!--> LEO pseudorange sigma & phase sigma <!-->
  <sat>
    261 262 263 264 265 266 267 268 269 270
    271 272 273 274 275 276 277 278 279 280
    281 282 283 284 285 286 287 288 289 290
    291 292 293 294 295 296 297 298 299 300
    301 302 303 304 305 306 307 308 309 310
    311 312 313 314 315 316 317 318 319 320
    321 322 323 324 325 326 327 328 329 330
    331 332 333 334 335 336 337 338 339 340
    341 342 343 344 345 346 347 348 349 350
    351 352 353 354 355 356 357 358 359 360
    361 362 363 364 365 366 367 368 369 370
    371 372 373 374 375 376 377 378 379 380
  </sat>
  <band> 1 2 </band>
  <freq> 1 2 </freq>
</leo>

```

图 7.7 PPP XML 配置文件示例 (c)

```

<bds sigma_C="3" sigma_L="0.03" > <!--> BDS pseudorange sigma & phase sigma <!-->
<freq> 1 2 </freq> <!--> the satellite frequency, for example, CSX, is represented as 5 <!-->
<band> 2 6 </band> <!--> satellite frequency, corresponding to band, optional value 1/2/3/4/5 <!-->
</bds>

<gps sigma_C="2" sigma_L="0.02" >
<freq> 1 2 </freq>
<band> 1 2 </band>
</gps>

<gal sigma_C="3" sigma_L="0.03" >
<freq> 1 2 </freq>
<band> 1 5 </band>
</gal>

<glo sigma_C="4" sigma_L="0.04" >
<freq> 1 2 </freq>
<band> 1 2 </band>
</glo>

```

图 7.8 PPP XML 配置文件示例 (d)

7.5 flt 结果文件说明

flt 文件记录了低轨星座 PPP 或低轨星座增强 GNSS PPP 定位解算结果及其精度指标，具体如下：

表 7.3 flt 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	F10.4, 3X
2	X-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 X 轴坐标	m	F12.4, 3X
3	Y-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Y 轴坐标	m	F12.4, 3X
4	Z-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Z 轴坐标	m	F12.4, 3X
5	Vx-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 X 轴速度	m/s	F7.4, 3X
6	Vy-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Y 轴速度	m/s	F7.4, 3X
7	Vz-ECEF	ECEF (地心地固系) 下 Z 轴速度	m/s	F7.4, 3X
8	X-RMS	ECEF (地心地固系) 下 X 坐标 RMS	m	F6.4, 3X
9	Y-RMS	ECEF (地心地固系) 下 Y 坐标 RMS	m	F6.4, 3X
10	Z-RMS	ECEF (地心地固系) 下 Z 坐标 RMS	m	F6.4, 3X
11	Vx-RMS	ECEF (地心地固系) 下 X 轴方向解算速度的 RMS	m/s	F6.4, 3X
12	Vy-RMS	ECEF (地心地固系) 下 Y 轴方向解算速度的 RMS	m/s	F6.4, 3X
13	Vz-RMS	ECEF (地心地固系) 下 Z 轴方向解算速度的 RMS	m/s	F6.4, 3X
14	NSat	可见卫星数量	#	I2, 3X
15	PDOP	PDOP 值	#	F3.2, 3X
16	sigma0	单位权中误差	m	F5.2, 3X
17	AmbStatus	模糊度固定情况(e.g., Float or Fix)	#	A5, 3X
18	Ratio	Ratio 值	#	F4.2, 3X
19	Quality	数据质量指标	#	I1

示例：

