



基于GREAT的实时精密定位 服务系统与车载导航

李昕 李星星

武汉大学测绘学院导航所

2021年10月11日



一、研究背景

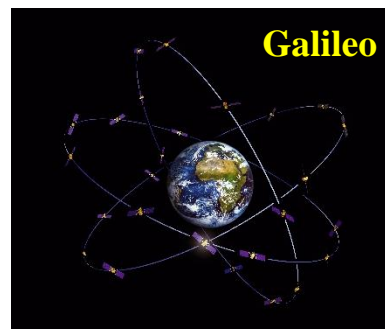
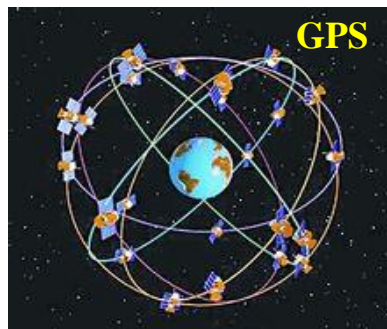
二、GREAT软件平台

三、实时精密定位服务系统

四、PPP-RTK实验验证

五、总结与展望

- 北斗三号全球卫星导航系统已于2020年7月正式开通，为全球用户提供全天候的时空信息服务

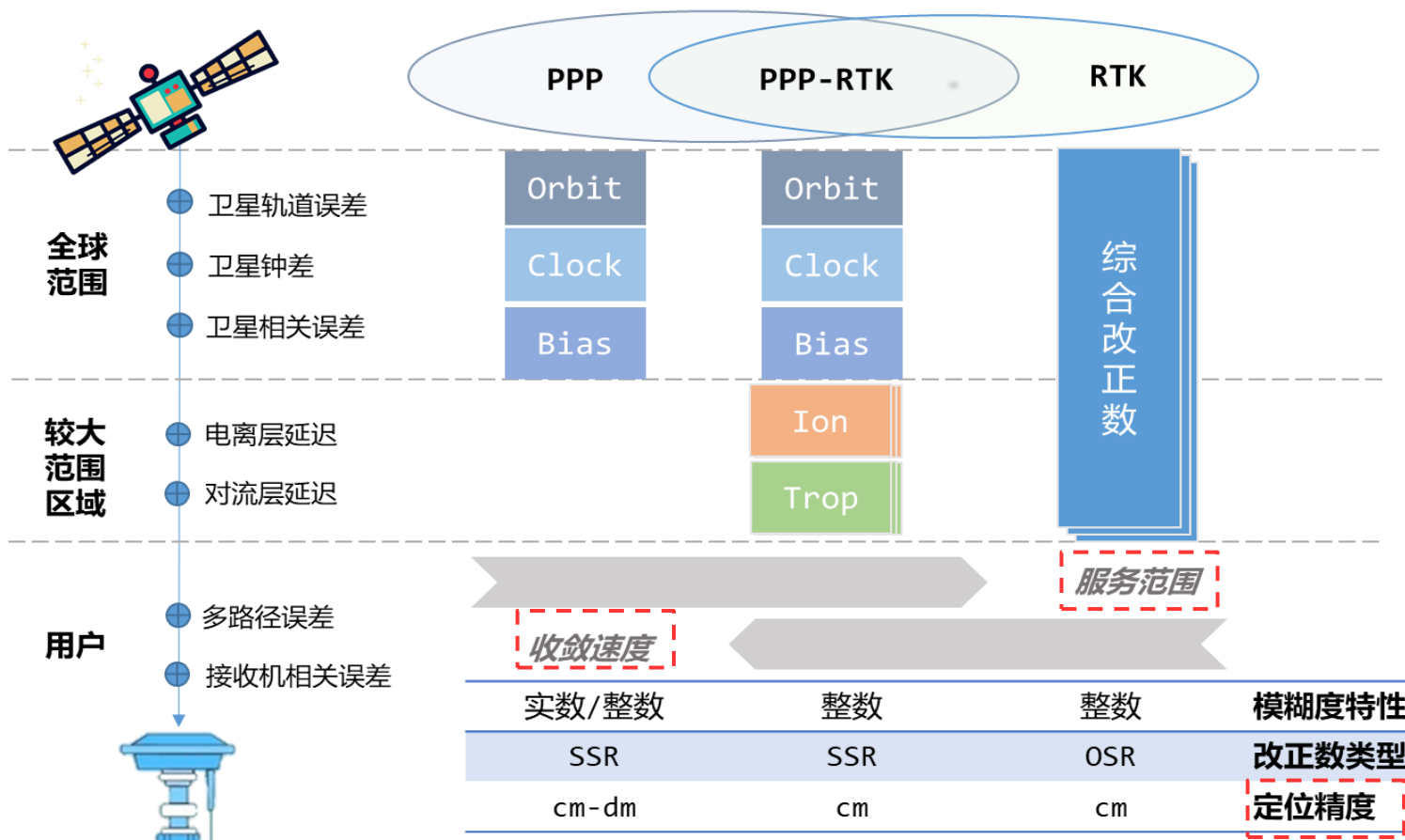


- 物联网、自动驾驶、移动机器人等对时空信息服务的准确性、时效性和可靠性提出了更高的要求





GNSS精密定位技术

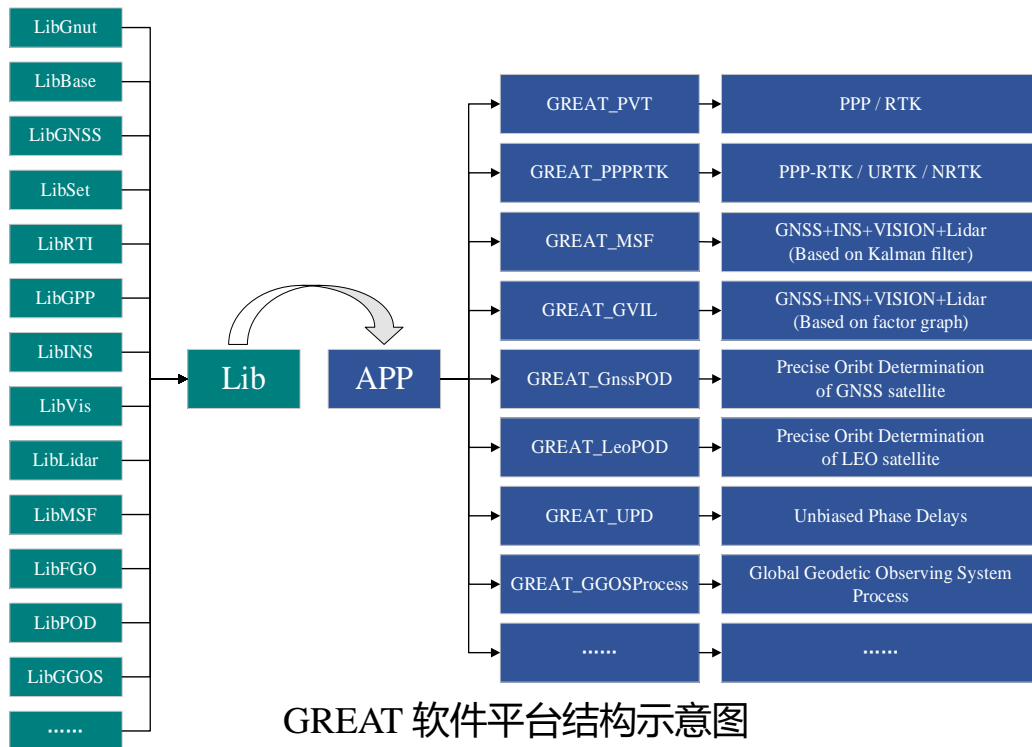


PPP-RTK技术集成了PPP与RTK技术的优点，**服务范围广、精度高、收敛快、隐私性好**，可为海量大众用户提供**实时、精密、快速**的位置服务



□ GREAT软件

GREAT (GNSS+ REsearch, Application and Teaching) 是由武汉大学测绘学院设计并研发的一款**卫星大地测量与多源导航软件**，主要用于科学研究、工程应用、教学与人才培养



GREAT 软件平台结构示意图

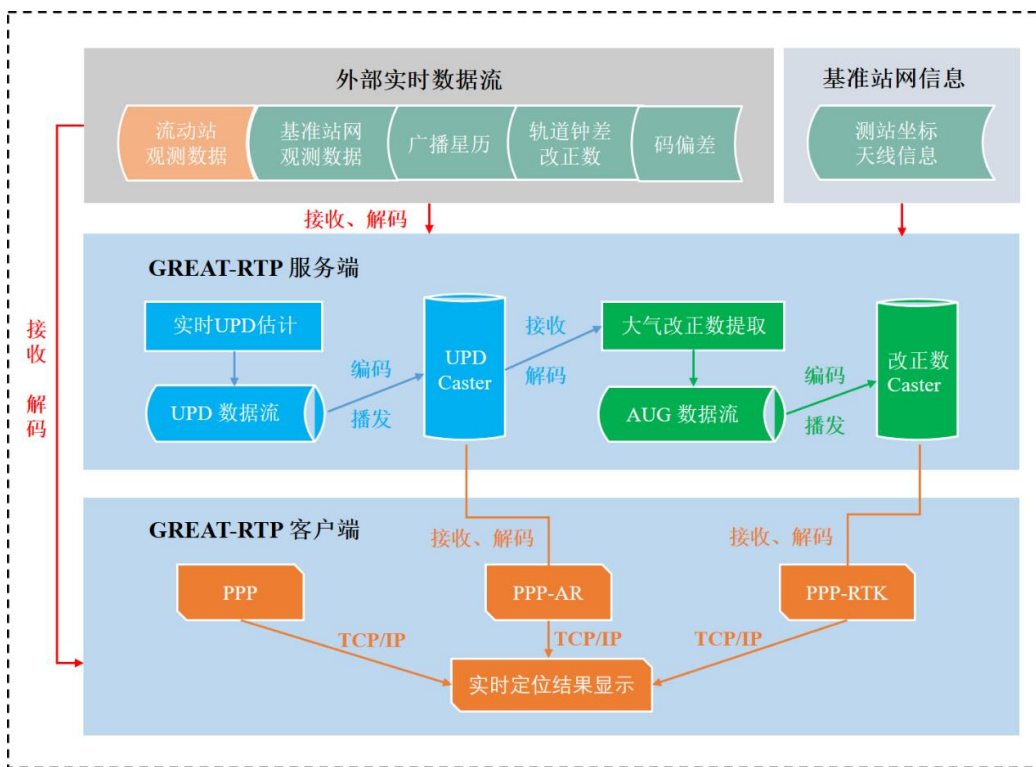
◆ 软件功能

- ✓ 以PPP-RTK/PPP/NRTK为代表的实时精密定位
- ✓ GNSS/INS/VISION/LiDAR 多源融合与组合导航
- ✓ 轨道、钟差、UPD、电离层、对流层等精密产品生成
- ✓ GNSS+SLR+VLBI联合解算
- ✓ 低轨增强GNSS
- ✓

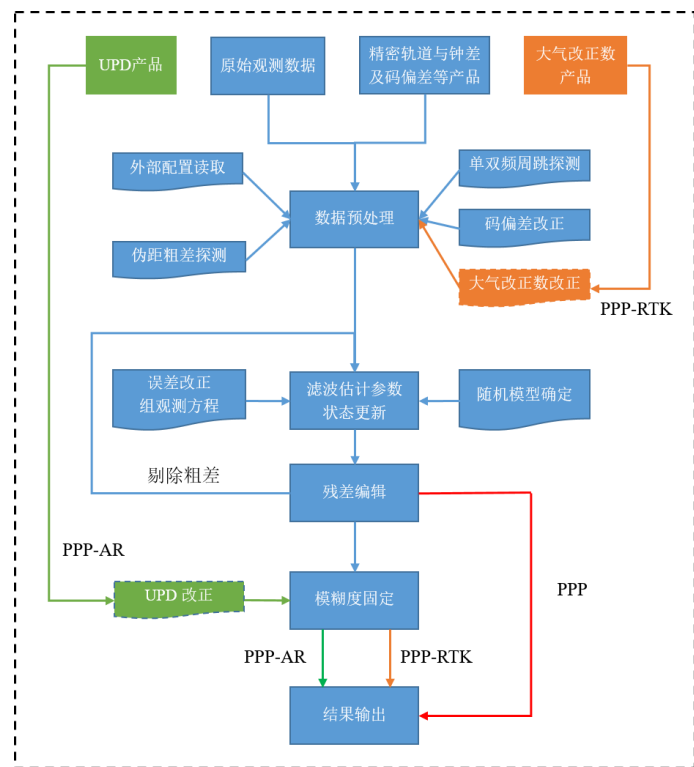


核心功能一：以PPP-RTK为代表的实时精密定位

- ✓ 生成并提供多频多系统实时精密轨道、实时钟差、实时UPD以及实时精密大气产品，支持星地一体化增强的快速精密定位（PPP/PPP-AR/PPP-RTK）

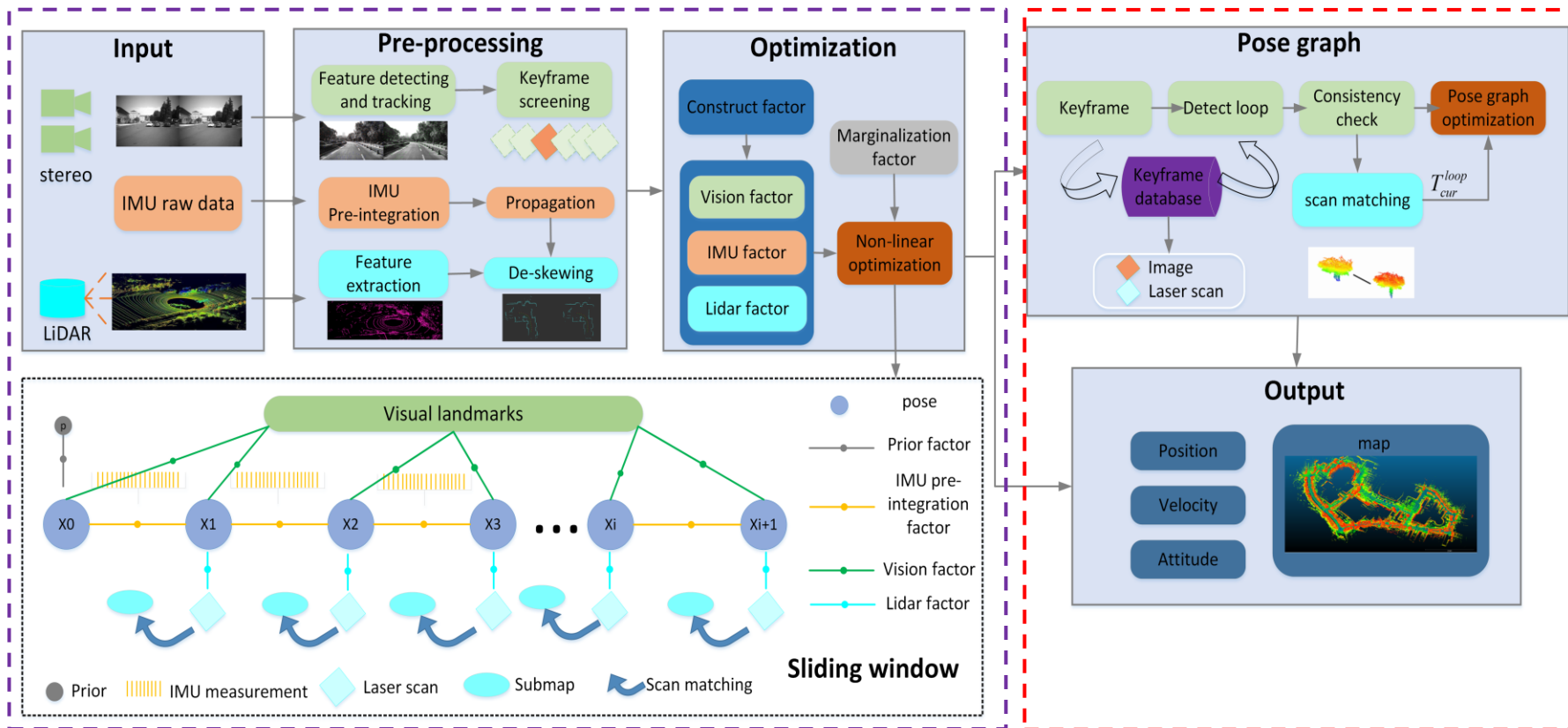


GREAT 实时精密定位模块示意图



实时精密定位处理流程图

核心功能二：基于因子图和滤波的GNSS、视觉、激光、惯性以及高精地图等多源信息紧融合算法

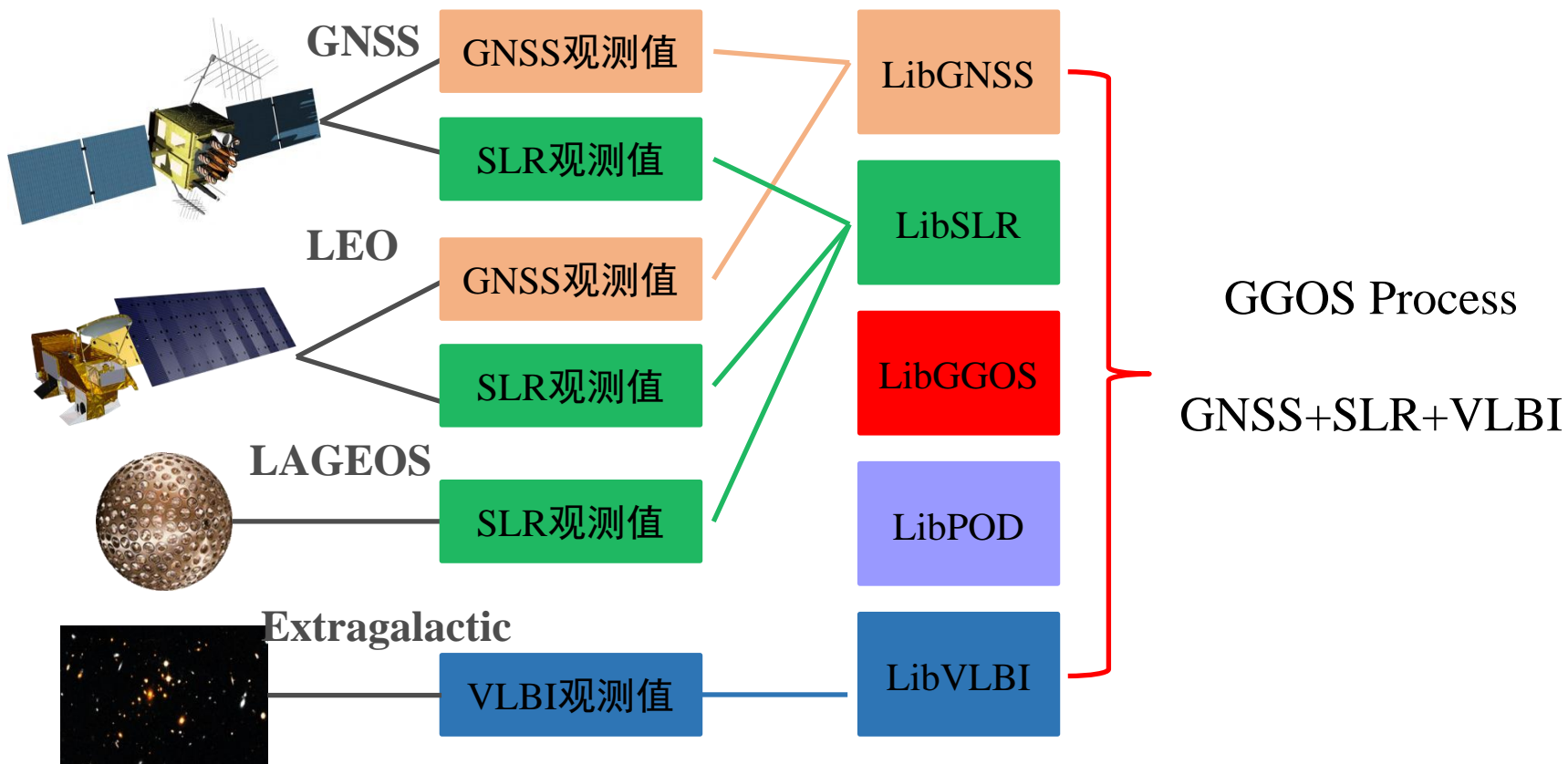


基于图优化的紧耦合视觉/惯性/LiDAR里程计

全局位姿图优化



核心功能三：低轨导航增强以及在观测值层面的多种空间大地测量技术 (GNSS/SLR/VLBI) 联合解算

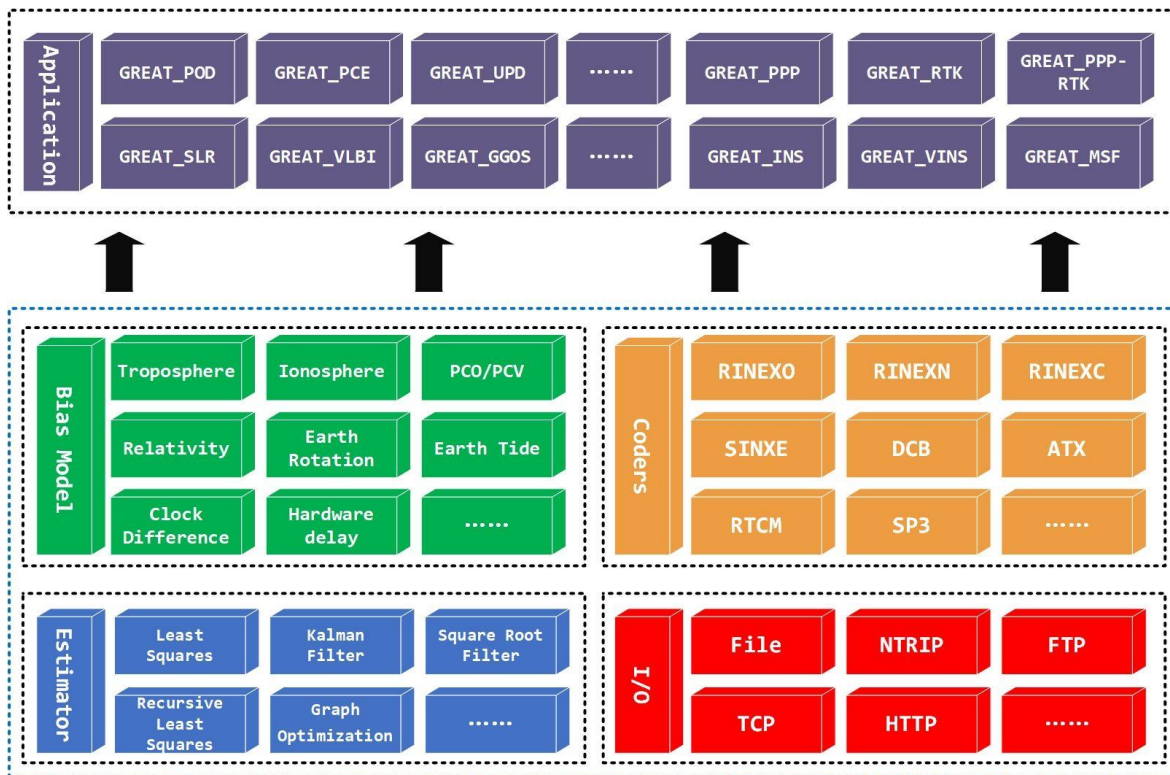




□ GREAT软件特点：标准化与模块化

标准化： C++ 11 标准版本； Google 开源C++项目风格； CMake; GIT

模块化： 采用面向对象设计架构， 对象化、 模块化实现软件各种功能



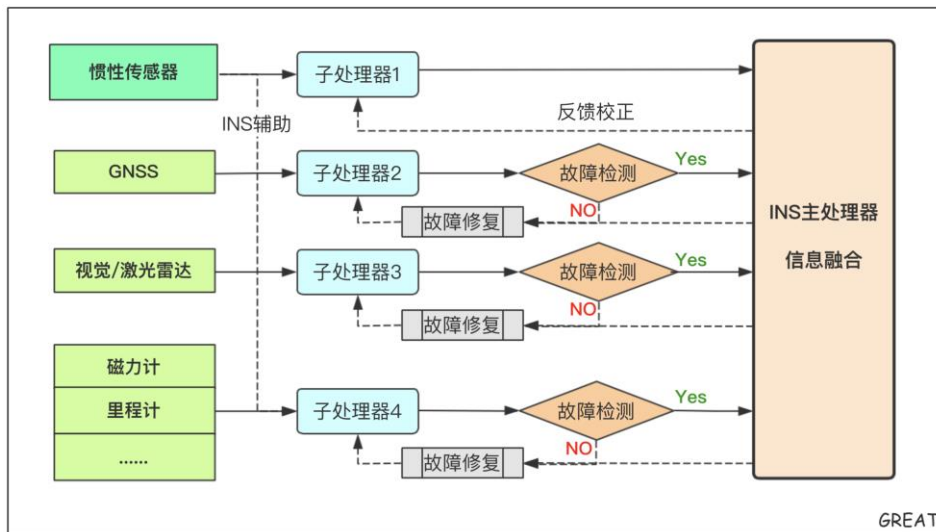
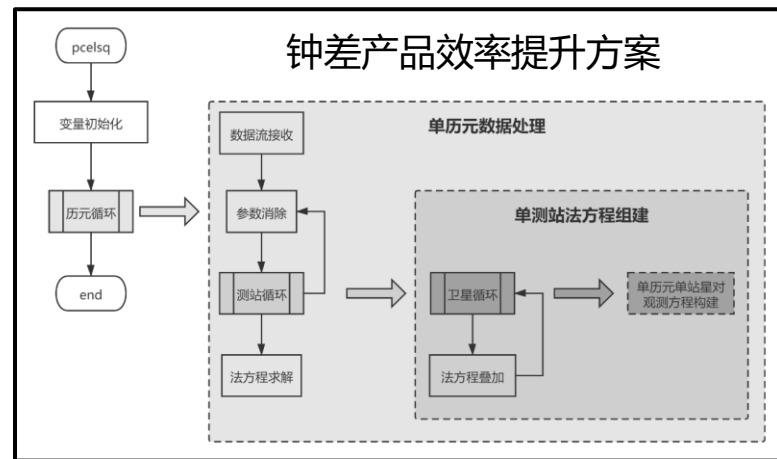
✓ CMake: 软件代码编译 (跨平台, 支持实时、嵌入式)

✓ GIT: 软件代码管理 (易于协同开发和维护)



□ GREAT软件：并行处理与效率优化

通过**并行处理**、**矩阵库的优化**以及**块消参等方案**解决全球GNSS数据解算与高频高动态环境中数据解算的效率问题，使得**高频率高精度的实时解算**成为可能



多源融合并行处理模式

采用的高性能计算技术：

- OpenMP
- 高性能线性代数库
- Intel Vtune效率分析工具
- CUDA GPU并行加速
-

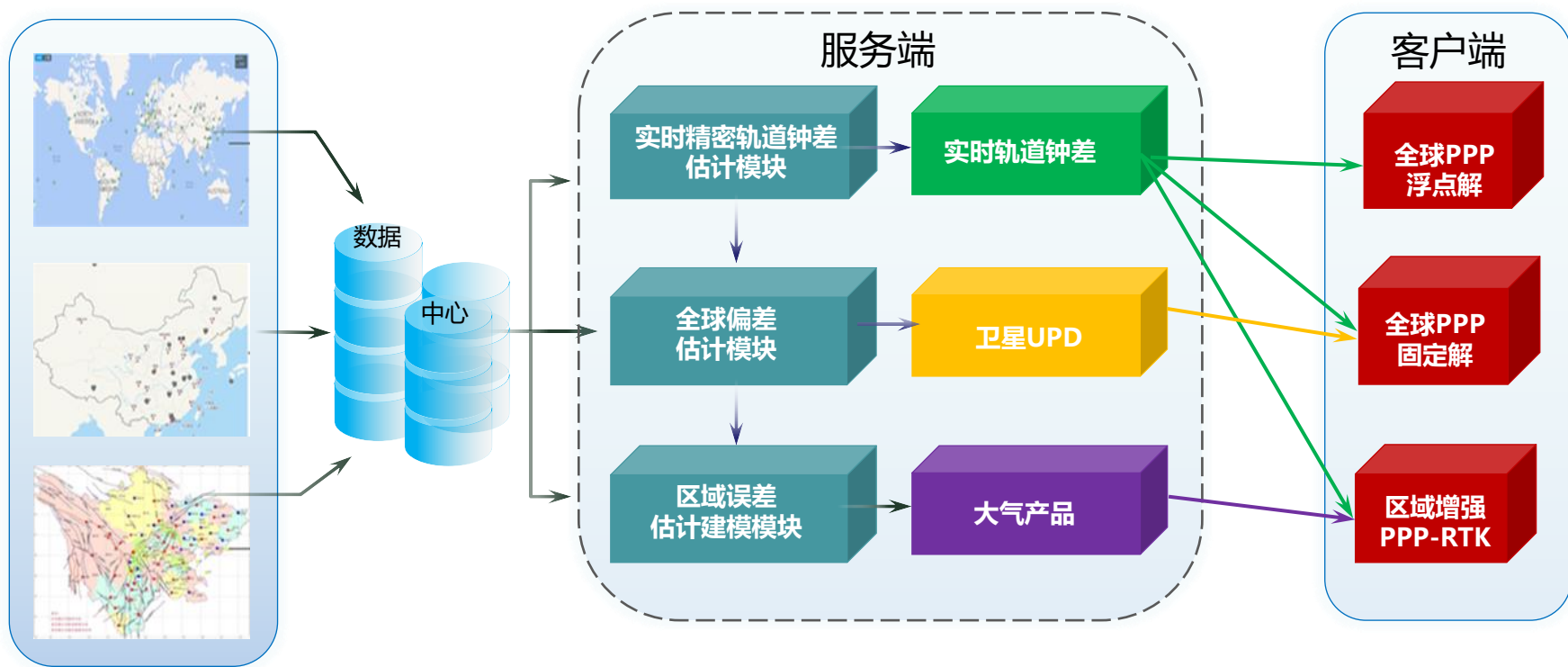
实时精密定位服务系统

GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching



实时精密定位系统整体架构



多尺度原始数据流

核心处理模块与服务产品

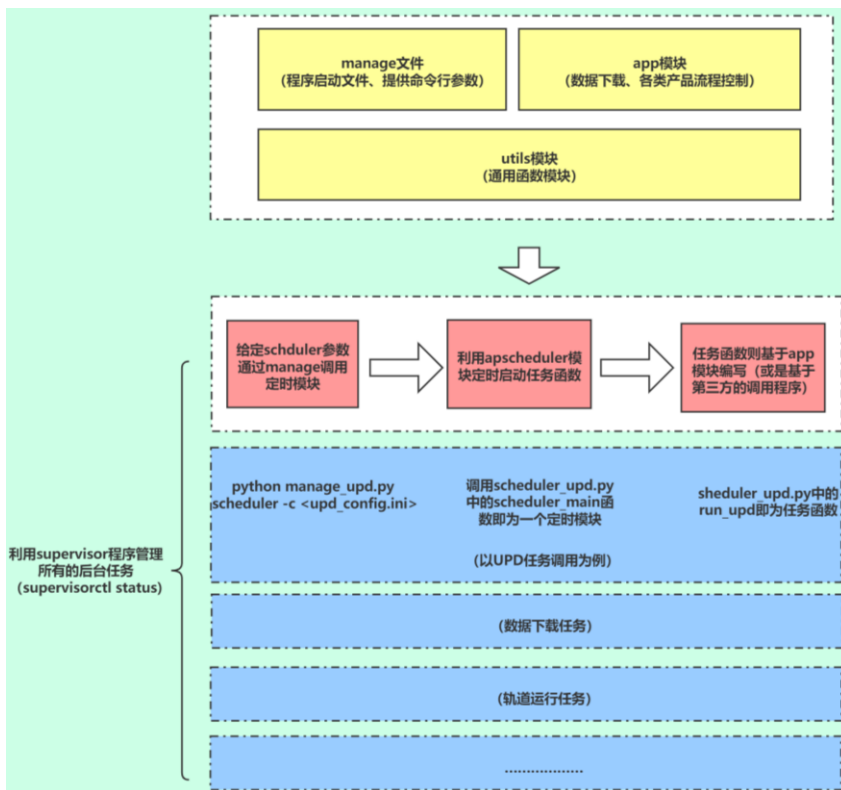
终端定位服务



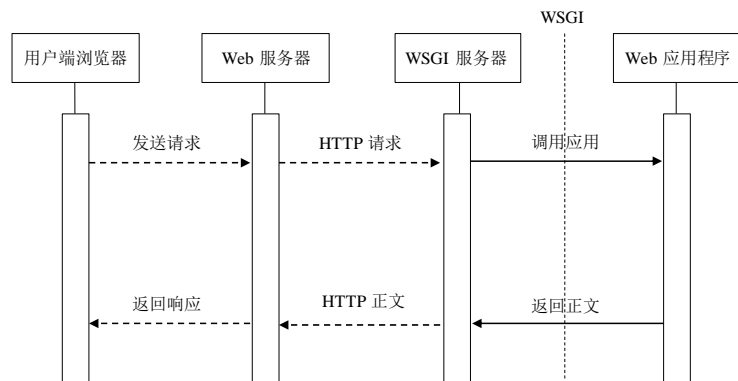
自动化运维平台与可视化实时监测平台

自动化运维平台实现了各类产品的长期稳定的生产

基于Web开发的可视化实时监测平台展示了产品的生成进度、精度评估等指标



自动化运维平台框架

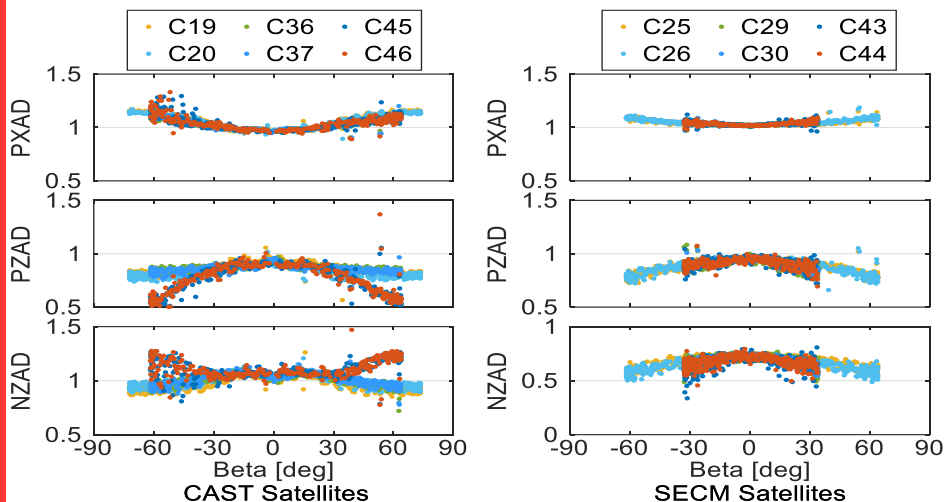


实时监测平台架构图

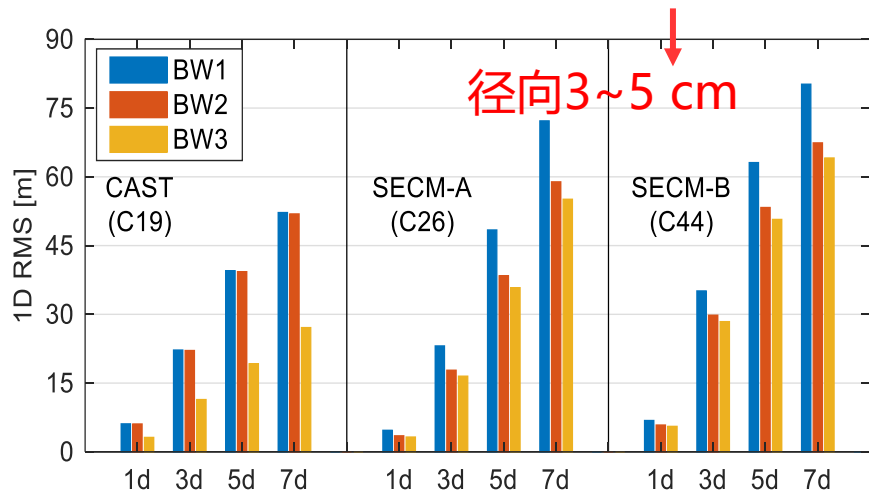
- ✓ 采用Python进行开发
- ✓ 保障产品长期定时运行
- ✓ 具有良好容错性，无需人力干预
- ✓ 易于后续的开发和维护
- ✓ 具有可移植性，方便部署



精化了BDS-3卫星的表面光学系数，提高了北斗卫星的实时轨道精度



北斗三号卫星表面光学系数估计值



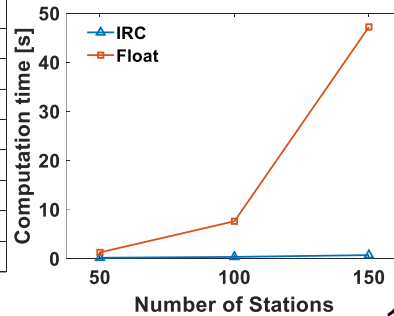
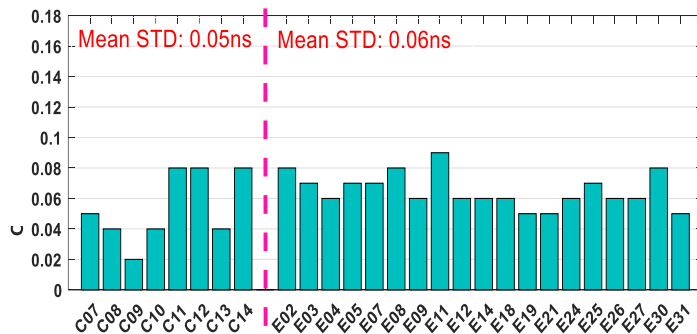
不同光学系数轨道预报精度

基于Carrier-range观测值的整数钟估计，显著提升钟差精度与处理效率

$$L_{r,IF}^S - N_{r,IF}^S = \rho_{r,g}^S + \tilde{d}t_{r,IF} - \tilde{d}t_{IF}^S + T_r^S + \varepsilon_{r,IF}^S$$

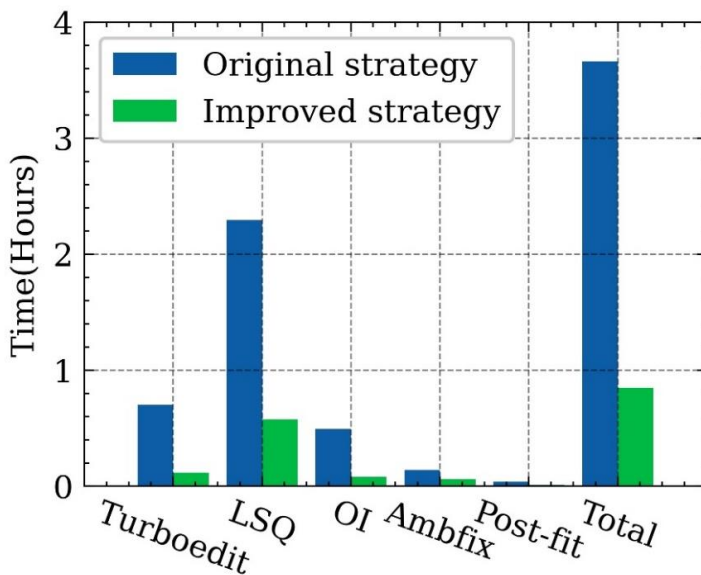
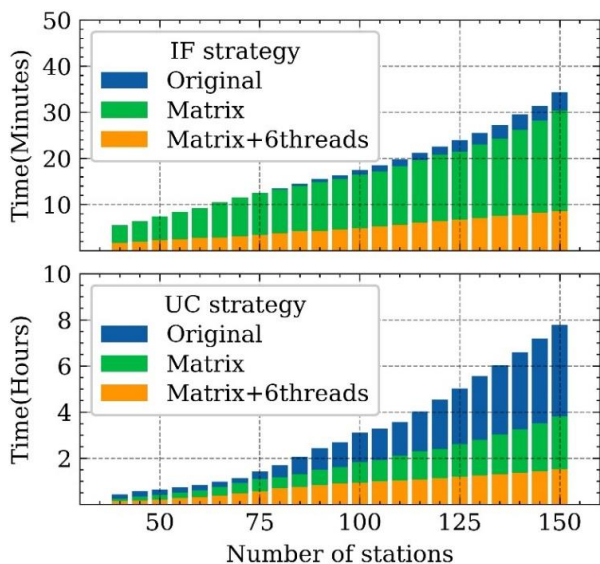
$$P_{r,IF}^S = \rho_{r,g}^S + \tilde{d}t_{r,IF} - \tilde{d}t_{IF}^S + T_r^S + \xi_r^S + \omega_{r,IF}^S$$

Carrier-range观测值



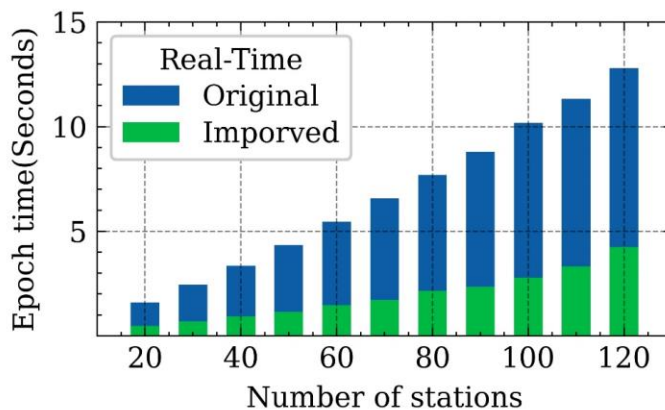
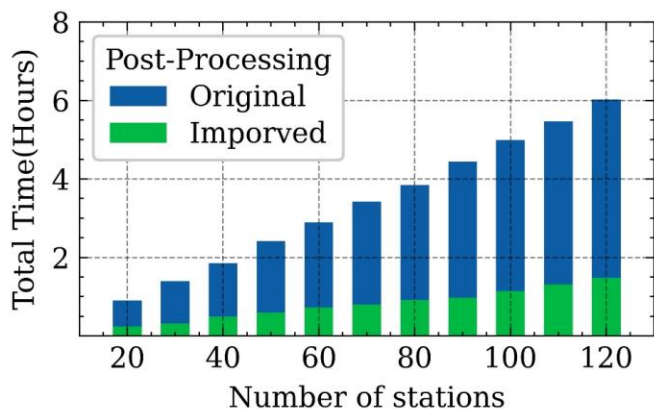


大规模GNSS网解效率优化：基于OpenMP、高性能矩阵库等并行技术



精密轨道估计

四系统超快速
轨道可以实现
小时更新



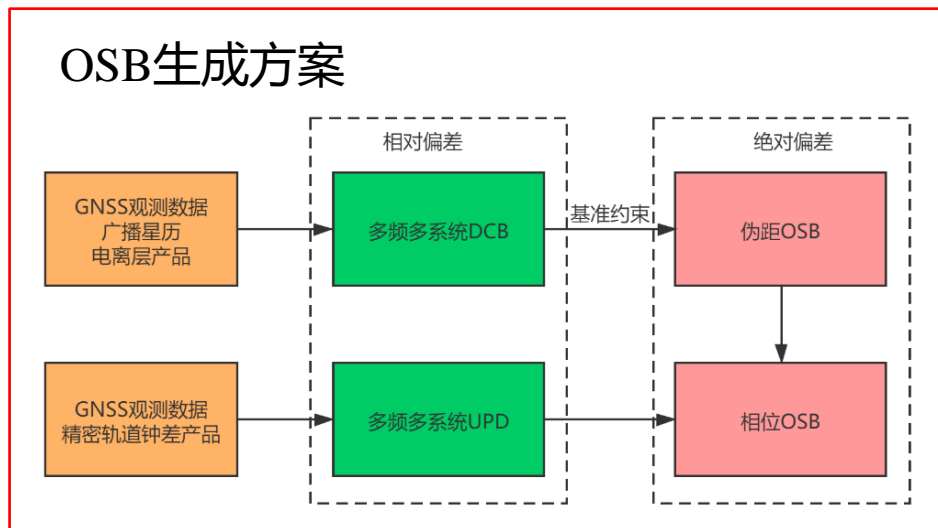
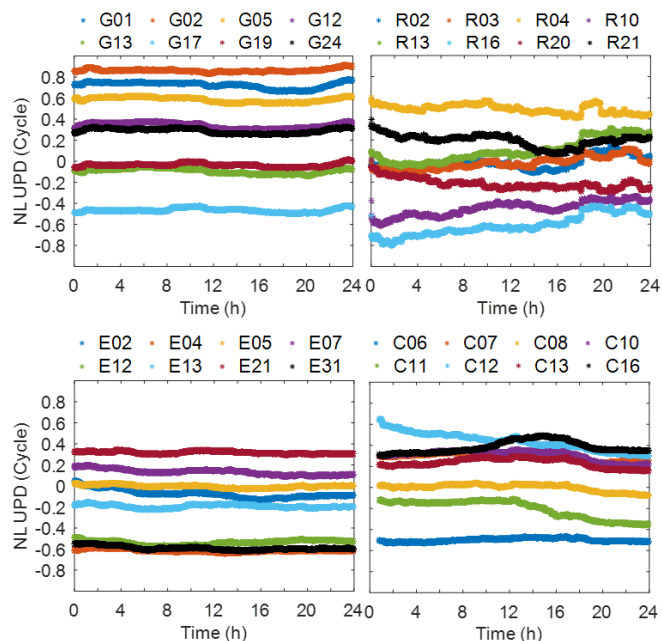
精密钟差估计

非差估计的实
时钟差可以在5s
内完成更新



服务端：多频多系统相位/码偏差产品

- ✓ GRECJ五系统的超宽巷、宽巷、窄巷UPD (开源)
- ✓ 相位频率间卫星钟偏差 (PIFCB) 产品 (开源)
- ✓ 面向原始观测值的伪距与相位偏差 (OSB)



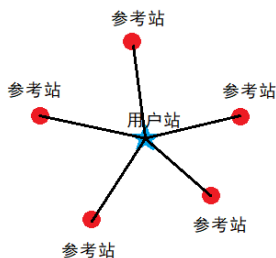


服务端：实时大气产品

① 非差非组合解算得到的电离层与对流层可直接作为电离层与对流层改正数

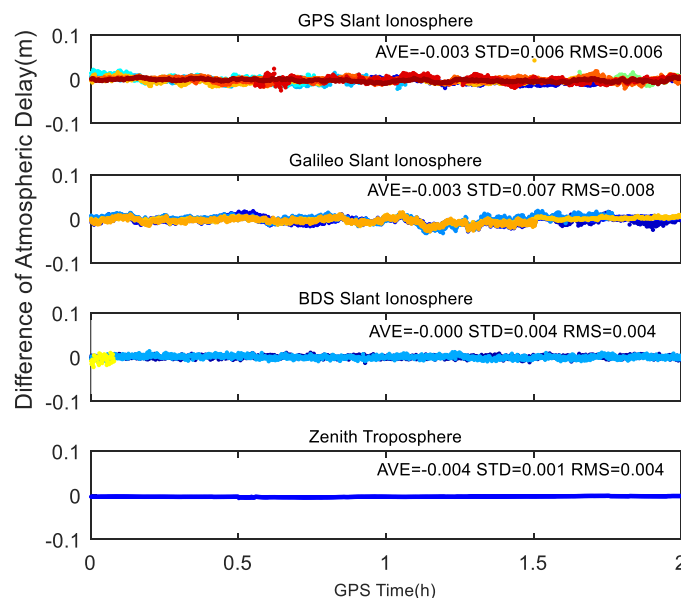
$$\begin{cases} \tilde{Z}_{r,w} = Z_{r,w} \\ \tilde{I}_{r,1}^{s,G} = \hat{I}_{r,1}^{s,G}; \tilde{I}_{r,n}^{s,G} = \gamma_n^G \tilde{I}_{r,1}^{s,G} \\ \tilde{I}_{r,1}^{s,R} = \hat{I}_{r,1}^{s,R}; \tilde{I}_{r,n}^{s,R} = \gamma_n^{R_k} \tilde{I}_{r,1}^{s,R} \\ \tilde{I}_{r,1}^{s,E} = \hat{I}_{r,1}^{s,E}; \tilde{I}_{r,n}^{s,E} = \gamma_n^E \tilde{I}_{r,1}^{s,E} \\ \tilde{I}_{r,1}^{s,C} = \hat{I}_{r,1}^{s,C}; \tilde{I}_{r,n}^{s,C} = \gamma_n^C \tilde{I}_{r,1}^{s,C} \end{cases}$$

② 支持内插与格网两种模式



$$\begin{cases} \delta I_{ai,0}^s = C_{00}^s \\ \delta I_{ai,1}^s = C_{00}^s + C_{01}^s (\phi - \phi_0) + C_{10}^s (\lambda - \lambda_0) \\ \delta I_{ai,2}^s = C_{00}^s + C_{01}^s (\phi - \phi_0) + C_{10}^s (\lambda - \lambda_0) + C_{11}^s (\phi - \phi_0)(\lambda - \lambda_0) \end{cases}$$

③ 固定解提取的大气延迟改正数可以实现毫米级的精度，基本满足模糊度的固定需求



实时精密定位服务系统

客户端：基于非差非组合模型的多频多系统PPP-AR

借鉴了传统RTK三频模糊度**逐级固定逐级约束**的思想，按照先易后难的顺序依次逐步固定不同组合的模糊度，**利用前一步骤的固定解信息辅助和加速下一步的模糊度固定**，逐级提升模糊度精度，提升模糊度固定效率

$$\begin{aligned}\hat{\Delta N}_{ewl_jk}^{s_1s_2} &= \Delta N_{r,j}^{s_1s_2} - \Delta N_{r,k}^{s_1s_2} - \Delta d_{ewl}^{s_1s_2} \\ \Delta N_{ewl_jk}^{s_1s_2} &= LAMBDA(\hat{\Delta N}_{ewl_jk}^{s_1s_2} + \Delta d_{ewl}^{s_1s_2})\end{aligned}$$

EWL约束



$$\begin{cases} p_{r,n}^s = \mu_r^s \cdot x + \hat{t}_r - \bar{t}_{IF}^s + \gamma_{ik} \hat{I}_{r,i}^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \kappa \cdot IFB + e_{r,n}^s \\ l_{r,n}^s = \mu_r^s \cdot x + \hat{t}_r - \bar{t}_{IF}^s - \gamma_{ik} \cdot \hat{I}_{r,i}^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \hat{N}_{r,n}^s + \varepsilon_{r,n}^s \\ ll = \Delta N_{r,ewl_jk}^{s_1s_2} + d_{ewl_jk}^{s_1s_2}, \sigma_{ll}^2 \in 0 \end{cases}$$

参数更新



$$\begin{cases} p_{r,n}^s = \mu_r^s \cdot x + \hat{t}_r - \bar{t}_{IF}^s + \gamma_{ik} \hat{I}_{r,i}^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \kappa \cdot IFB + e_{r,n}^s \\ l_{r,n}^s = \mu_r^s \cdot x + \hat{t}_r - \bar{t}_{IF}^s - \gamma_{ik} \cdot \hat{I}_{r,i}^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \hat{N}_{r,n}^s + \varepsilon_{r,n}^s \\ ll = \Delta N_{r,wl_ij}^{s_1s_2} + d_{wl_ij}^{s_1s_2}, \sigma_{ll}^2 \in 0 \end{cases}$$

WL约束



$$\begin{aligned}\hat{\Delta N}_{wl_ij}^{s_1s_2} &= \Delta N_{r,i}^{s_1s_2} - \Delta N_{r,j}^{s_1s_2} - d_{wl}^{s_1s_2} \\ \Delta N_{wl_ij}^{s_1s_2} &= LAMBDA(\hat{\Delta N}_{wl_ij}^{s_1s_2} + d_{wl}^{s_1s_2})\end{aligned}$$

参数更新



$$\begin{aligned}\hat{\Delta N}_i^{s_1s_2} &= \Delta N_{r,i}^{s_1s_2} - d_i^{s_1s_2} \\ \Delta N_i^{s_1s_2} &= LAMBDA(\hat{\Delta N}_i^{s_1s_2} + d_i^{s_1s_2})\end{aligned}$$

L1约束



$$\begin{cases} p_{r,n}^s = \mu_r^s \cdot x + \hat{t}_r - \bar{t}_{IF}^s + \gamma_{ik} \hat{I}_{r,i}^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \kappa \cdot IFB + e_{r,n}^s \\ l_{r,n}^s = \mu_r^s \cdot x + \hat{t}_r - \bar{t}_{IF}^s - \gamma_{ik} \cdot \hat{I}_{r,i}^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \hat{N}_{r,n}^s + \varepsilon_{r,n}^s \\ ll = \Delta N_{r,i}^{s_1s_2} + d_i^{s_1s_2}, \sigma_{ll}^2 \in 0 \end{cases}$$

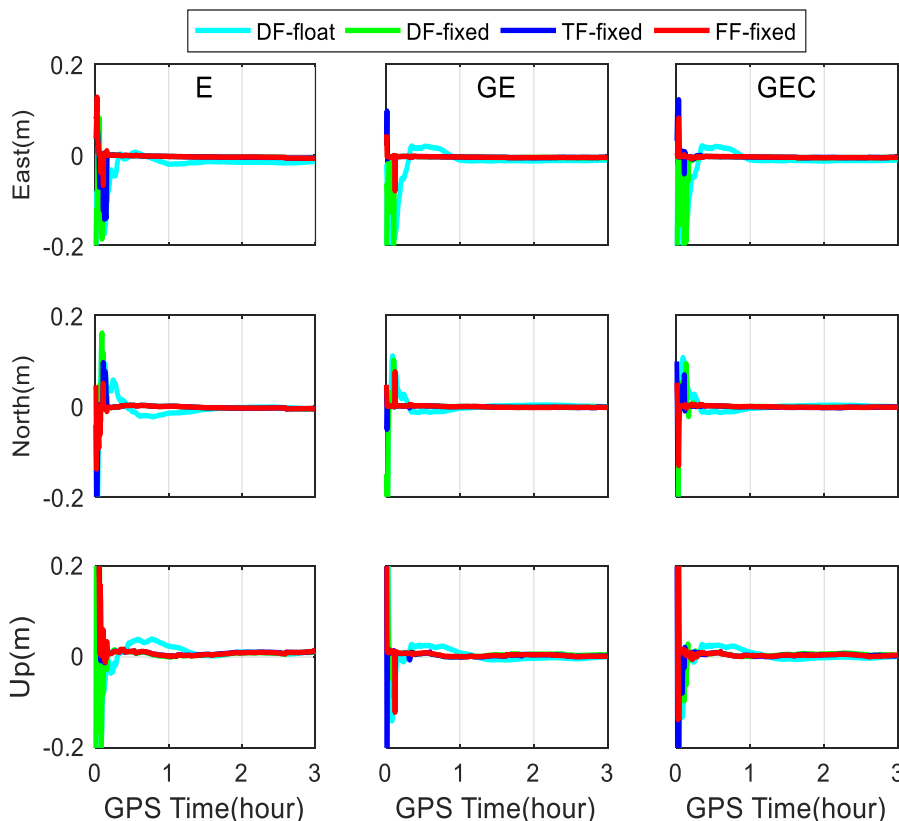


多频PPP固定解



基于非差非组合模型的多频多系统PPP-AR

平均首次固定时间统计 (分钟)



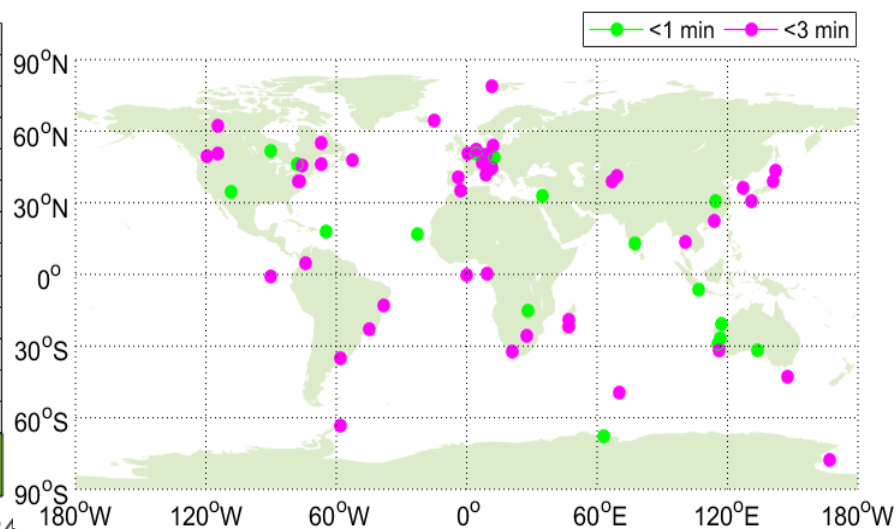
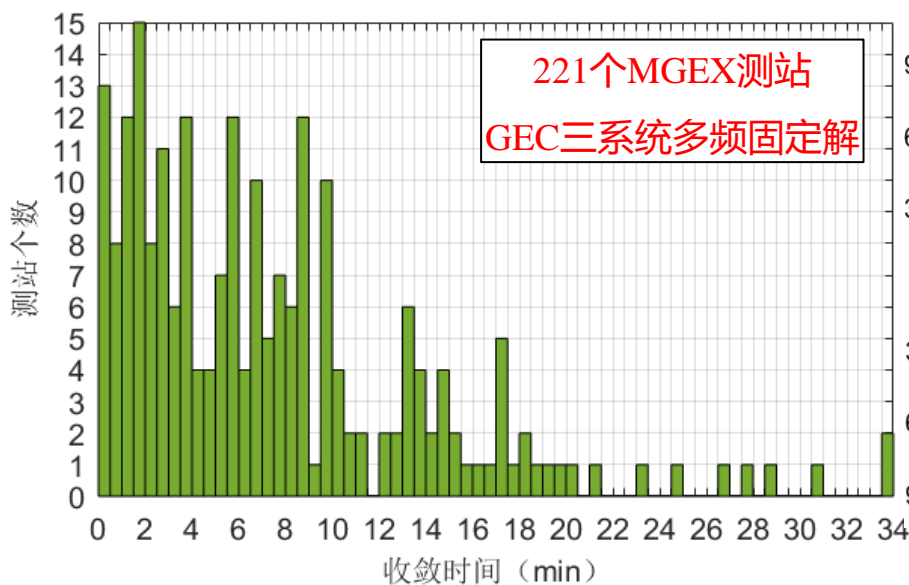
	E	G	GC	GE	GEC
双频固定	23.6	13.4	10.5	5.8	4.4
三频固定	19.5	13.3	10.3	5.2	4.1
五频固定	18.8	/	/	5.1	4.1

- ✓ 多系统观融合将首次固定时间缩短60%以上, 定位精度提升50%以上
- ✓ 多频固定解将首次固定时间缩短8%~20%, 提升效果与星座、频率有关
- ✓ GEC三系统的五频固定解仅需要**4.1分钟**即可实现首次固定

不同系统组合双频、三频、五频PPP-AR定位误差序列



基于PPP固定解的全球快速厘米级定位



多频率多星座PPP在15 min时的定位精度 (单位: m)

方向	双频浮点	双频固定	三频固定	五频固定
E	0.056	0.022	0.019	0.019
N	0.021	0.010	0.009	0.009
U	0.068	0.051	0.044	0.044

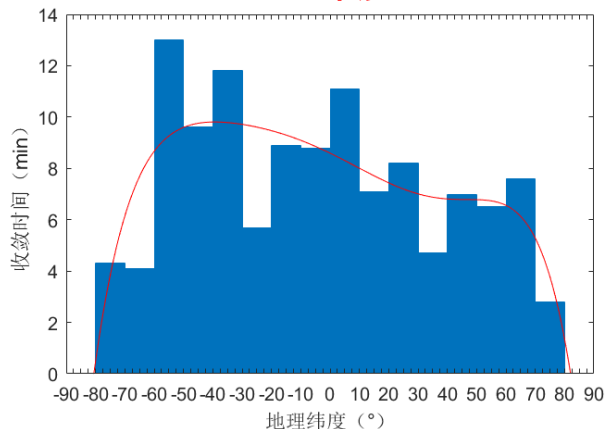
- ✓ 共有21个测站收敛时间在1 min以内, 67个测站收敛时间在3 min以内
- ✓ 部分MGEX测站可以实现快速模糊度固定, 达到厘米级的定位精度

收敛时间标准: 连续十个历元水平方向精度优于5个厘米

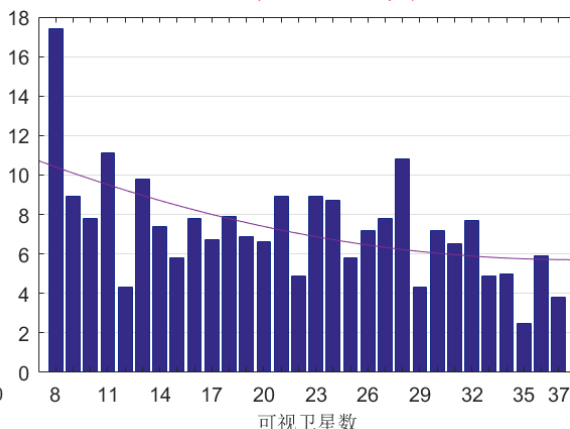


基于PPP固定解的全球快速厘米级定位

地理纬度



可视卫星数



接收机类型

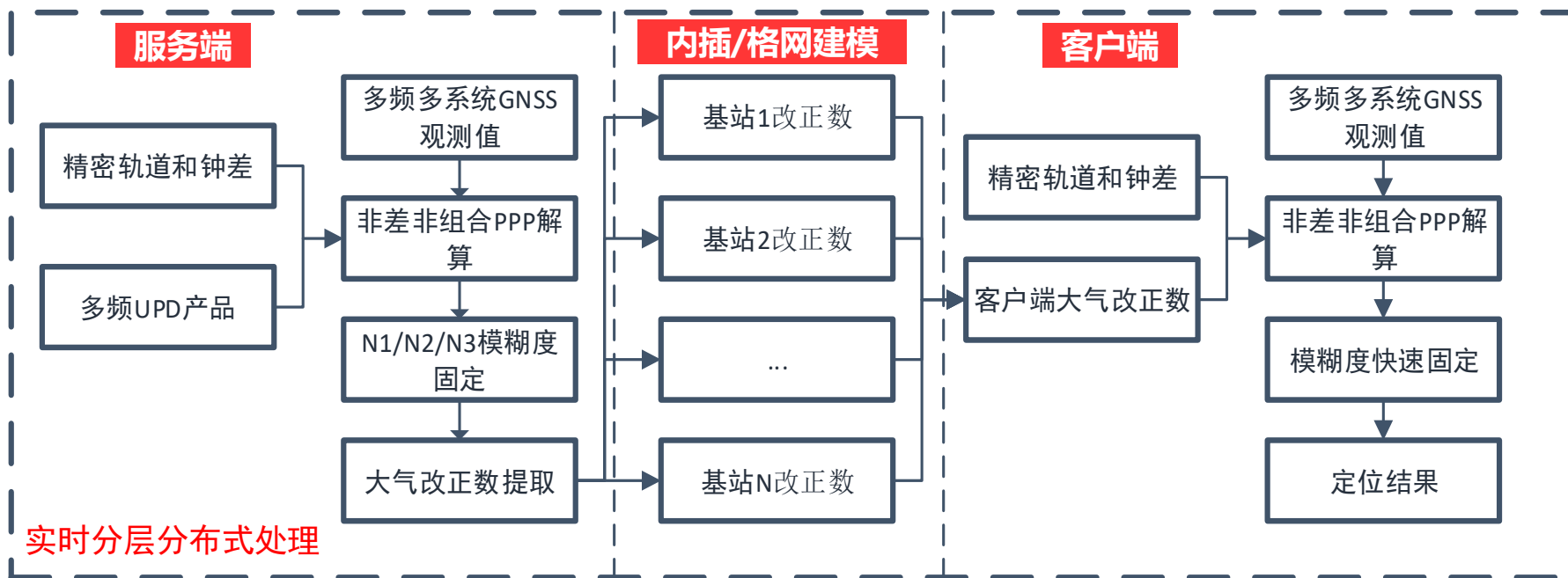
厂商	接收机类型	收敛时间 (min)
LEICA (25)	LEICA GR 10	8.3
	LEICA GR 25	9.8
	LEICA GR 30	11.8
	LEICA GR 50	7.1
SEPT (69)	SEPT ASTERX4	6.0
	SEPT POLARX4	9.0
	SEPT POLARX4TR	13.9
	SEPT POLARX5	7.7
	SEPT POLARX5TR	3.5

- ✓ 高纬度测站收敛速度较快，可能与高纬度地区电离层的活跃程度较低有关
- ✓ 随着可视卫星数增多，收敛时间可以一定程度的缩短
- ✓ 对于LEICA和SEPT接收机，接收机版本号最新的测站对应的收敛时间也最短

- ✓ 收敛速度会受到接收机类型、可视卫星以及测站观测环境、伪距噪声等的综合影响
- ✓ 采用相同的接收机类型进行精密产品与偏差的估计，可能进一步改善PPP固定解的性能



客户端：星地一体化增强PPP-RTK



- ✓ 服务端通过精密轨道与多频UPD产品实现**多频多星座非差非组合模糊度固定**，基于固定解提取大气延迟改正信息，对大气延迟进行内插建模，播发给用户实现快速模糊度固定

Li et al. (2021) Multi-constellation GNSS PPP instantaneous ambiguity resolution with precise atmospheric corrections augmentation. *JG*

Li et al. (2014) Real-time precise point positioning regional augmentation for large GPS reference networks. *GPS*

PPP-RTK实验验证

□ 实验设计

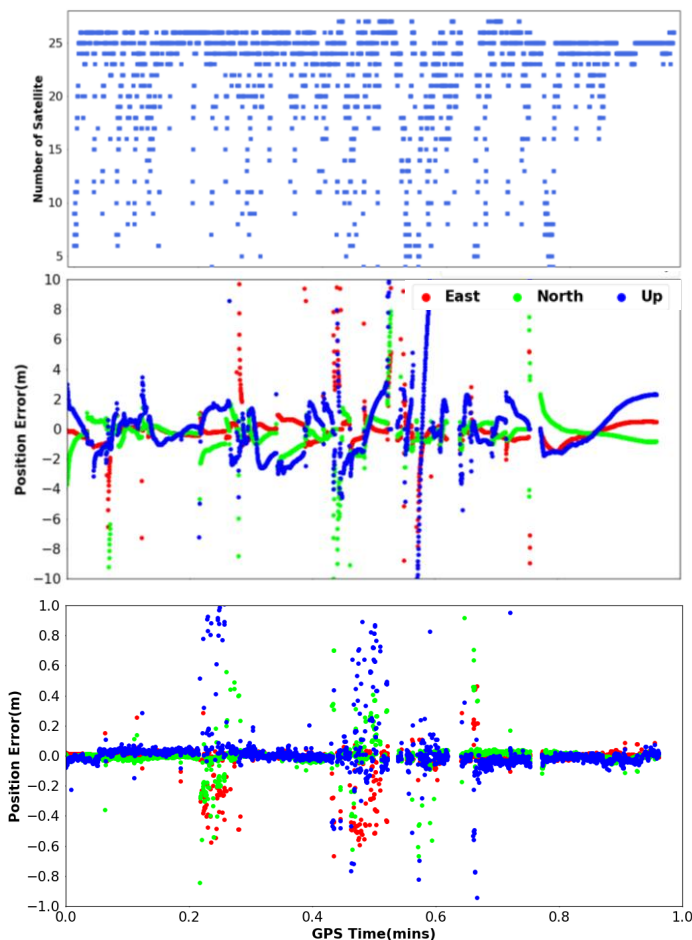


北京市参考站网分布 (左) 北京实验车辆行驶轨迹 (中) 实验车装备配置 (右)

实验时间	3/18/2021 1:32~5:14 GPST	采样率	1s
实验路线	京承高速-北六环-G6高速-八达岭奥莱-G7高速		
实验数据	GPS L1/L2/L5, Galileo E1/E5a/E5b/E5/E6, BDS B1I/B2I/B3I		
实验数据	NovAtel OEM729接收机+Trimble天线		
参考坐标	SBG惯导设备PPK/INS后处理结果		
UPD估计	所有基站 (29个)		
大气产品	北京市区10个基站 (蓝色三角形)		

PPP-RTK实验验证

□ PPP-RTK&PPP浮点解



卫星数序列 (上)、双频GEC三系统PPP (中)、双频GEC三系统PPP-RTK (下) 定位序列

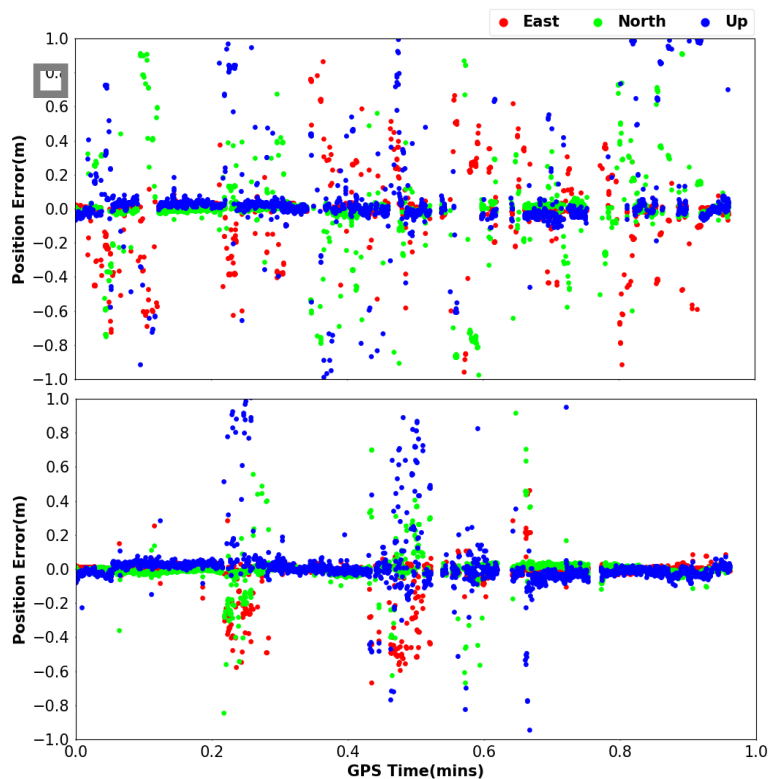
双频 GEC	RMS(m)			固定率 (%)	首次固定时间 (s)
	E	N	U		
PPP 浮点	0.609	0.794	1.471	-	-
PPP-RTK	0.032	0.022	0.041	88.18	2

注: RMS由定位误差在 3σ 内误差序列计算得到

- ✓ PPP浮点解多次发生重收敛, 定位精度与稳定性较差, 长时间未达到厘米级精度
- ✓ PPP-RTK可以显著缩短PPP的收敛时间, 提升定位精度, 定位精度相较于PPP浮点解分别提升了66.50%, 68.14%, 52.62%

PPP-RTK实验验证

多系统PPP-RTK



GPS单系统PPP-RTK (上)、GEC三系统PPP-RTK (下) 定位误差序列

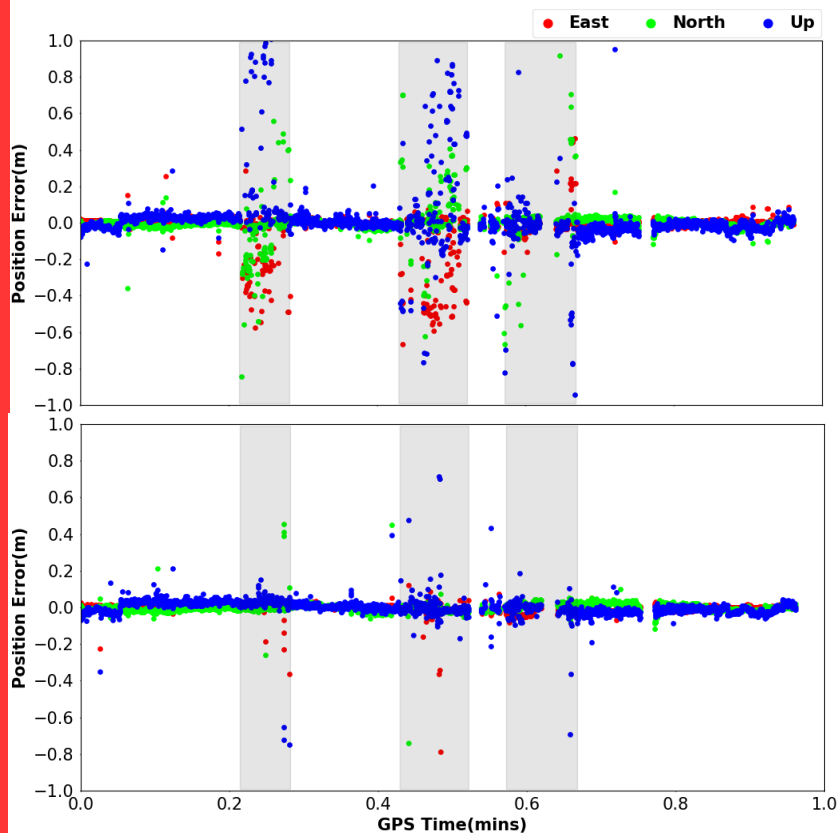
双频 PPP-RTK	RMS(m)			固定率 (%)	首次固定时间 (s)
	E	N	U		
G	0.106	0.114	0.295	61.10	4
GEC	0.032	0.022	0.041	88.18	2

注：RMS由定位误差在 3σ 内误差序列计算得到

- ✓ 三系统PPP-RTK的定位误差序列更加稳定，飞点更少，定位精度提升了60%左右，模糊度固定率从单GPS系统的61.10%提升到88.18%
- ✓ 多系统融合能够显著提升PPP-RTK的固定率、定位精度以及可靠性，缩短首次固定时间

PPP-RTK实验验证

多频PPP-RTK



双频 GEC 三系统 PPP-RTK (上) & 多频 GEC 三系统 PPP-RTK (下) 定位误差序列

GEC PPP-RTK	RMS(m)			固定率 (%)	首次固定时间 (s)
	E	N	U		
双频	0.032	0.022	0.041	88.18	2
多频	0.029	0.017	0.028	95.93	2

注: RMS由定位误差在 3σ 内误差序列计算得到

- ✓ 定位误差序列均较稳定, 多频PPP-RTK定位精度更高, 分别提升了9.4%, 18.2%, 31.7%
- ✓ 双频PPP-RTK在阴影时段存在较多飞点, 该时段双频宽窄巷模糊度固定个数平均为6.8和3.9个, 多频可达11.5和9.9个
- ✓ 多频数据能显著提升PPP-RTK的固定率、定位精度以及可靠性。在可用观测值较少的情况下, 多频的改善十分明显

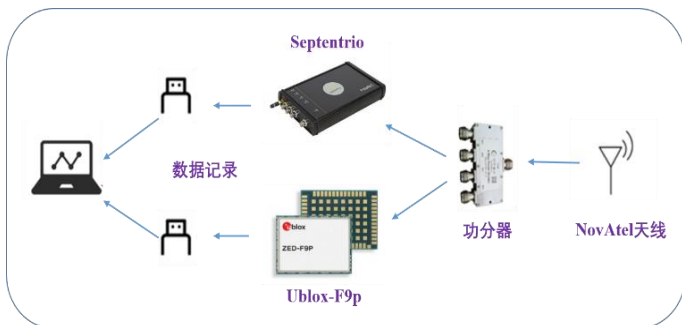
PPP-RTK实验验证

基于低成本终端的PPP-RTK定位

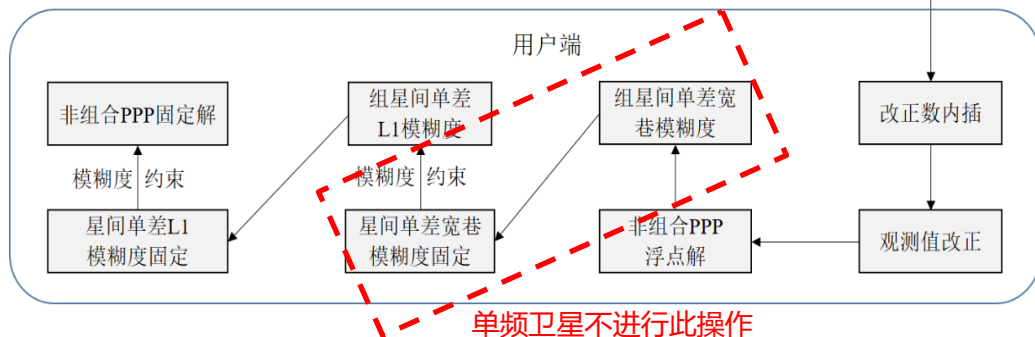
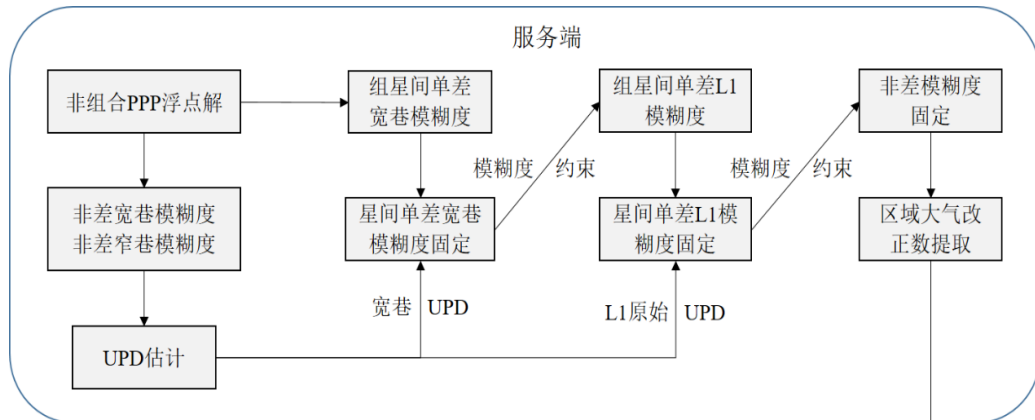
搭载GNSS芯片的低成本终端由于成本低、功耗小、小型化、高性能的特点，广泛应用于车载导航、行人定位等大众应用



低成本芯片/接收机



低成本终端连线方式



单双频混合的PPP-RTK方法

PPP-RTK实验验证

基于Ublox F9P接收机的PPP-RTK定位性能

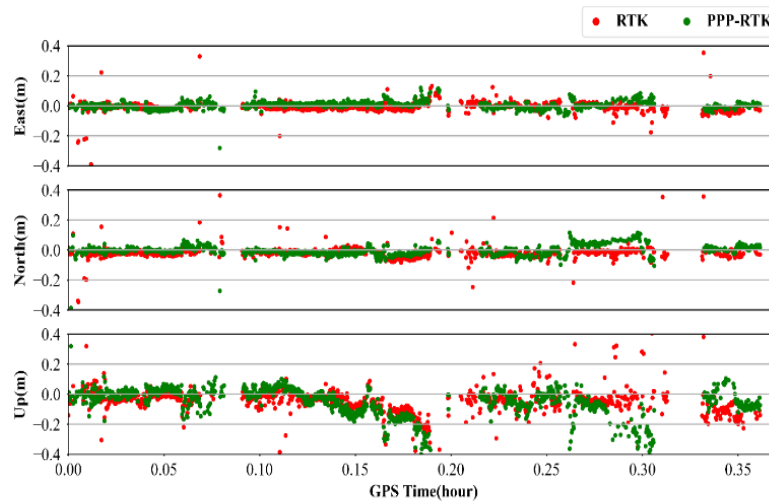
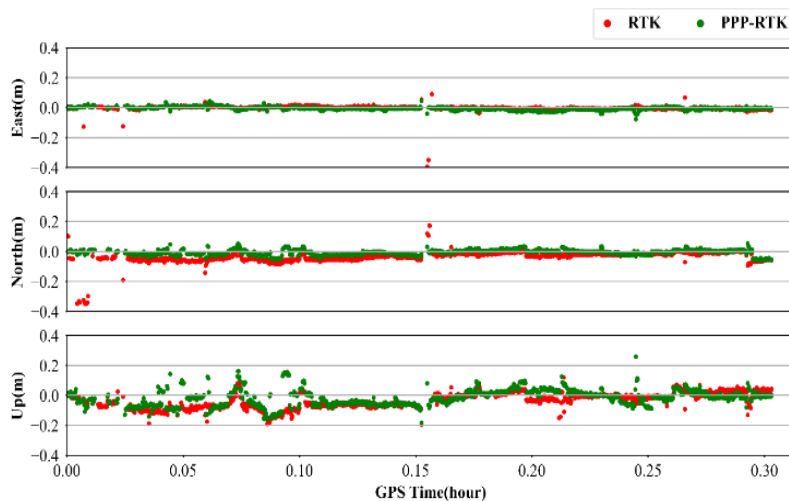
城市高架场景



城市林荫场景



城市高架与林荫环境下，基于F9P接收机的PPP-RTK与RTK精度相当，基本可实现瞬时固定，固定率分别为94.1%与77.9%



城市高架（左图）与林荫（右图）环境下RTK与PPP-RTK定位序列

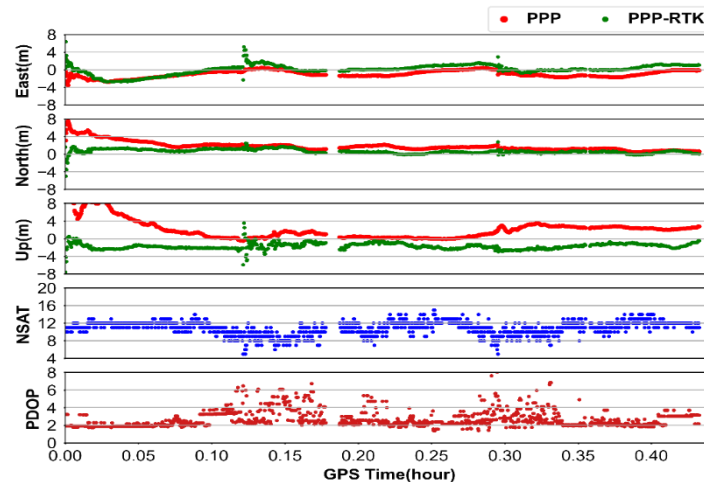
一定场景下，基于低成本接收机可以达到与高成本接收机相当的定位性能

PPP-RTK实验验证

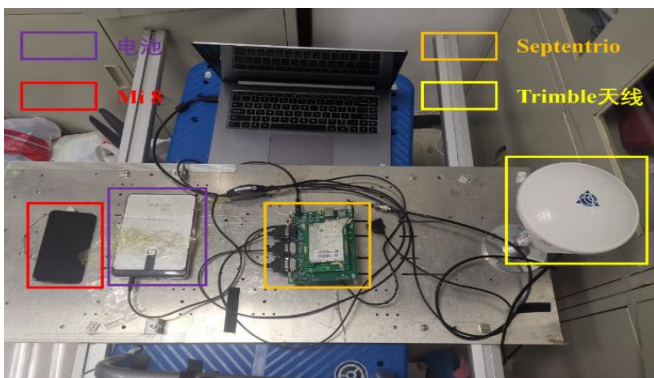
基于小米8手机的PPP-RTK定位性能（内置天线）



PPP（蓝）、PPP-RTK（红）与参考轨迹（绿）



低速车载实验PPP/PPP-RTK定位序列

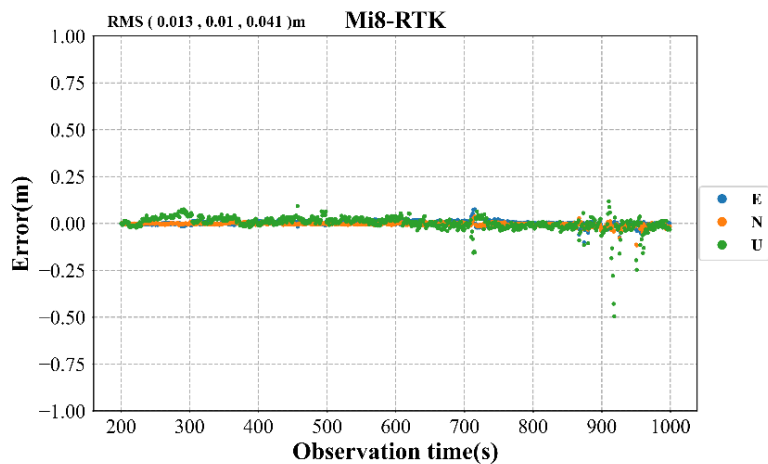


内置天线的MI8实验设备

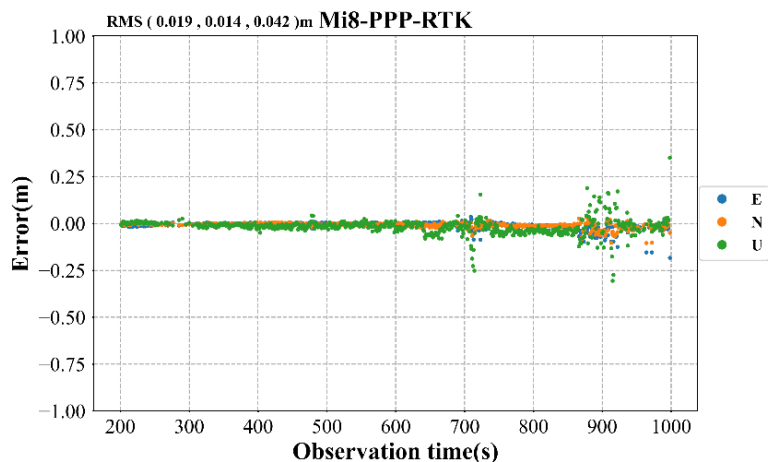
基于小米8手机的PPP-RTK水平、高程定位精度分别为 (1.351, 1.801) m, 相比于PPP分别**提升 (43.1%, 37.9%)**, PPP-RTK技术能有效提升智能手机定位精度

PPP-RTK实验验证

基于小米8手机的PPP-RTK定位性能（外接天线）



外接天线的MI8实验设备与行动轨迹图



- ✓ 相对内置天线，外接天线接收的GNSS数据载噪比大幅提升，观测值噪声大幅减小
- ✓ 基于外接天线的手机PPP-RTK，在较开阔场景下与RTK定位性能相当，可实现厘米级的动态定位精度，固定率达到95%以上

PPP-RTK实验验证

惯导增强的PPP-RTK技术

状态融合

$$X_{PPP} = [\delta r, \delta d_t, \delta I_{r,n}^s, \delta Z_{r,w}, \delta N_n^s] \sim Q_{PPP}$$

$$X_{INS} = [\phi, \delta v, \delta r, \delta b_g, \delta b_a] \sim Q_{INS}$$

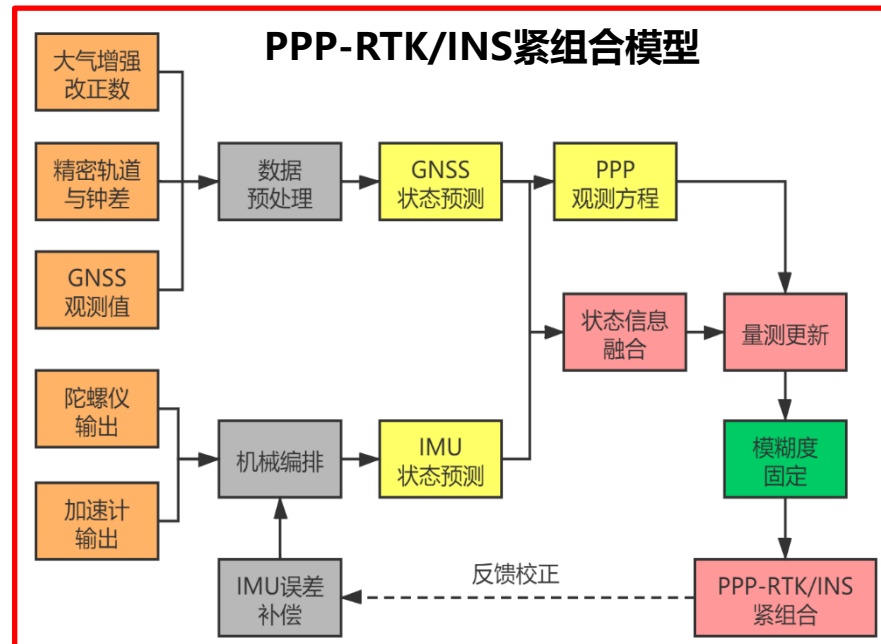
$$X_{PPP/INS} = [\phi, \delta v, \delta r, \delta b_g, \delta b_a, \delta d_t, \delta I_{r,n}^s, \delta Z_{r,w}, \delta N_n^s] \sim Q_{TCI}$$

量测模型

$$\begin{bmatrix} \delta P^s \\ \delta L^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g_r^s & 0 & 0 & I & \gamma_n & m_{r,w}^s & 0 \\ 0 & 0 & g_r^s & 0 & 0 & I & \gamma_n & m_{r,w}^s & I \end{bmatrix} X_{PPP/INS} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{P^s} \\ \varepsilon_{L^s} \end{bmatrix}$$

大气约束

$$\begin{cases} I_{r,n}^s - \tilde{I}_{r_1, r_2, \dots, r_n}^{s_i} = w_I, & w_I \sim N(0, \sigma_{w_I}^2) \\ Z_{r,w} - \tilde{Z}_{r_1, r_2, \dots, r_n} = w_T, & w_T \sim N(0, \sigma_{w_T}^2) \end{cases}$$



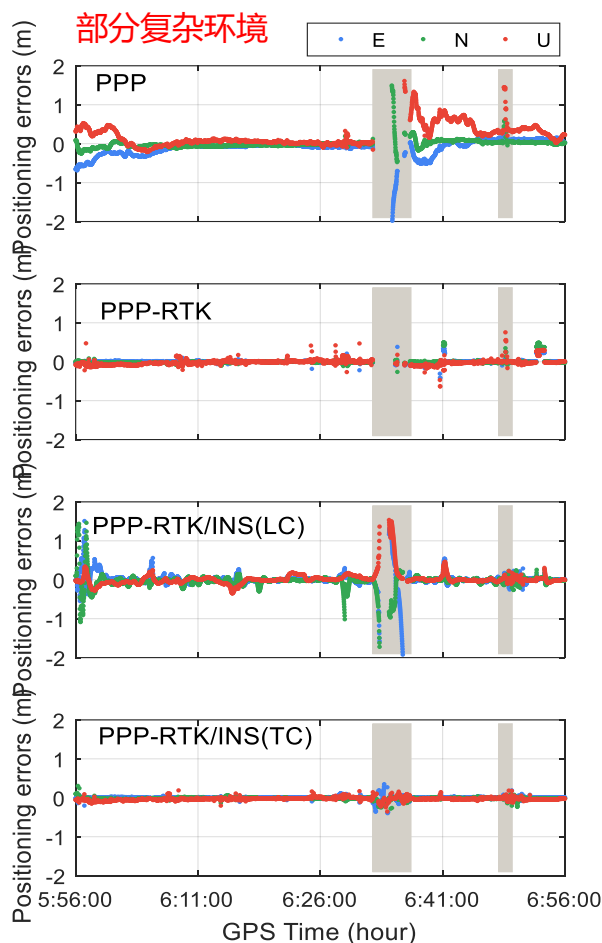
状态方程：融合了GNSS钟差、电离层、对流层、模糊度参数与惯导机械编排获取的导航参数

量测方程：通过杆臂归算，将GNSS观测方程在惯导推算的位置展开，构成紧组合滤波量测模型

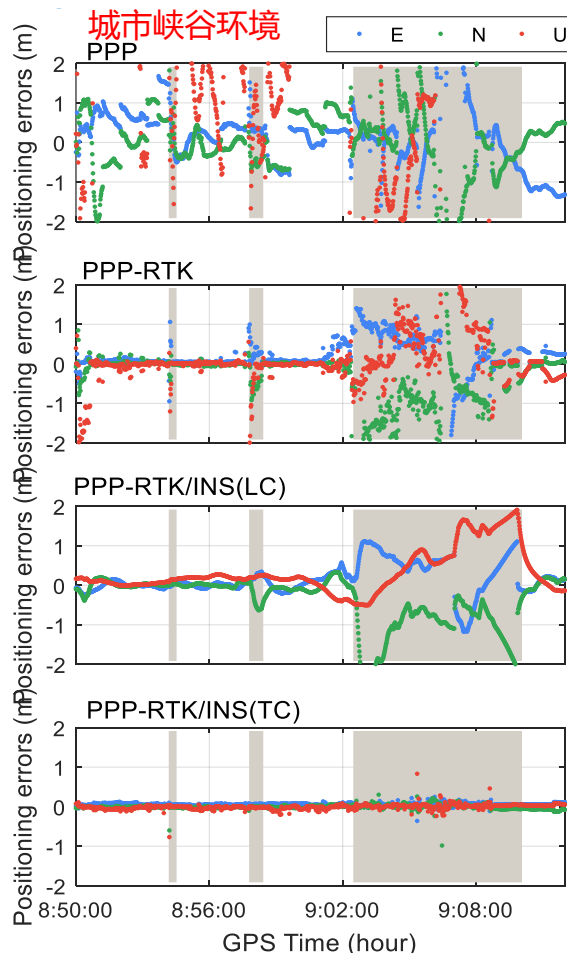
Li et al. 2021 Improving PPP-RTK in urban environment by tightly coupled integration of GNSS and INS, JG

PPP-RTK实验验证

惯导增强的PPP-RTK技术



车载实验A定位序列
(PPP-RTK固定率**87.3%** → **95.3%**)

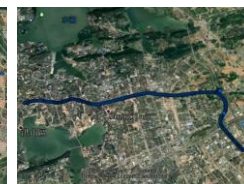


车载实验B定位序列
(PPP-RTK固定率**69.7%** → **88.3%**)

车载实验A

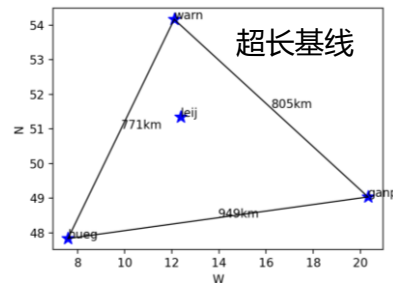


车载实验B



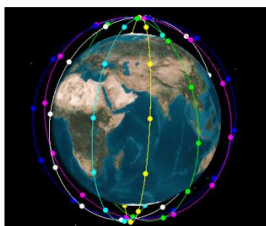
- ✓ **连续性:** 惯导信息填补了GNSS信号短期中断造成的定位结果缺失
- ✓ **可靠性:** 惯导增强将重固定时间缩短到1~3 s, 提升了PPP-RTK的固定率、定位精度与可用性

PPP-RTK实验验证



低轨星座增强的PPP-RTK定位

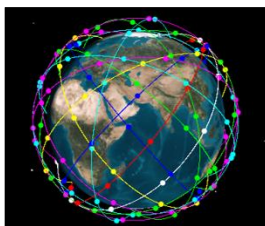
LEO 72



单一星座

6个轨道面，每个轨道面
12颗星
轨道倾角 86.5°
轨道高度1175km

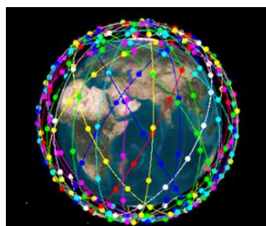
LEO 150



混合星座

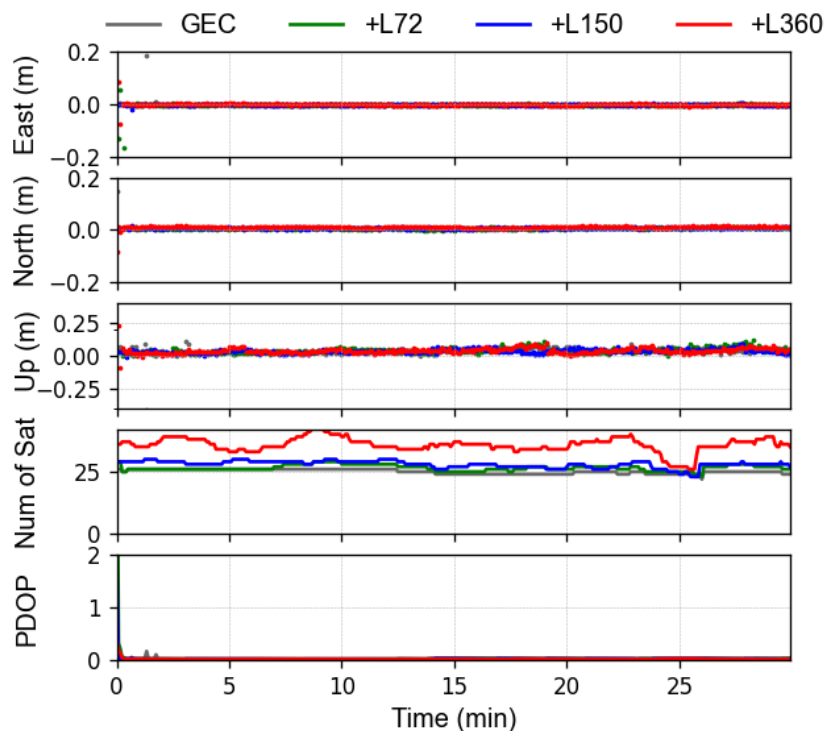
① 12/10/1 Walker星座
轨道倾角 50° 高度
975km
② 3/10/1 Walker星座
轨道倾角 50° 高度
975km

LEO 360



混合星座

近极地轨道星座
12个轨道面
每个轨道面12颗星
② 12/18/1 Walker星座
轨道倾角 60° 高度
1145km



✓ 低轨星座增强PPP-RTK，能够降低对地基参考网的依赖，实现广域瞬时厘米级定位

LEO Number	0	72	150	360
Convergence time (s)	78	<20	<10	<10

Li et al. (2019) Improved PPP ambiguity resolution with the assistance of multiple LEO constellations and signals. *RS*

Li et al. (2018) LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence. *JG*

总结与展望

□ 总结

- ✓ **GREAT软件平台**：支持实时精密定位、多源融合导航、低轨导航增强、GNSS+SLR+VLBI联合解算等多种功能的科研平台软件
- ✓ **实时精密定位系统**：基于GREAT建立了一套实时精密定位系统，生成并提供多频多系统实时精密轨道、实时钟差、实时UPD以及实时精密大气产品，支持星地一体化增强的快速精密定位（PPP/PPP-AR/PPP-RTK）
- ✓ **PPP-RTK技术**：
 - 基于**非差非组合的多频多系统PPP模糊度固定方法**，全球测站静态解算平均**5分钟内**可实现模糊度固定
 - 真实动态场景下，**多频多系统PPP-RTK可实现瞬时厘米级定位**，多频多系统增强可显著提升定位精度、固定率与可靠性
 - **基于低成本终端的PPP-RTK**在较开阔环境下可以实现动态厘米级定位
 - **惯导增强PPP-RTK**将复杂环境下的重固定时间**缩短到1~3s**，并提升定位连续性与稳定性
 - **低轨增强PPP-RTK**实现广域瞬时厘米级定位（1000km超长基线：10s内收敛）

展望

多传感器集成的软硬件一体化终端

