



第十一届中国卫星导航年会
THE 11th CHINA SATELLITE NAVIGATION CONFERENCE

卫星导航新时代 | CSNC
GNSSE, New Global Era
2020.11.23-25

北斗/GNSS精密定位：从PPP-RTK 到 Vision-PPP

李星星，李昕，李圣雨，申志恒等

武汉大学测绘学院

2020年11月26日



1. 研究背景与意义

2. BDS/GNSS偏差

3. BDS PPP-AR与PPP-RTK

4. 视觉增强PPP

5. 总结 & 展望

□ 北斗三号全面建成



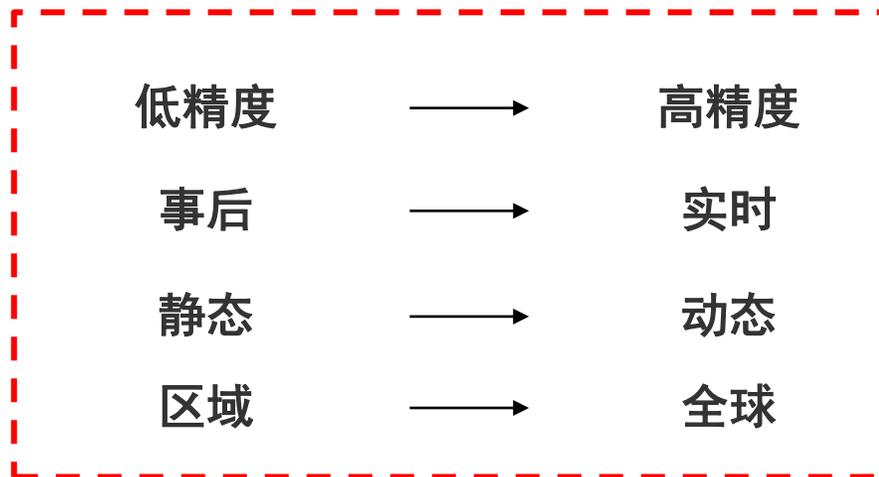
- ✓ 2020年7月31日，北斗三号全球卫星导航系统正式开通，标志着北斗“三步走”发展战略圆满完成，北斗迈进全球服务新时代
- ✓ 目前北斗可以在全球范围内提供定位精度优于10m，测速精度优于0.2m/s，授时精度优于20ns的服务

研究背景与意义

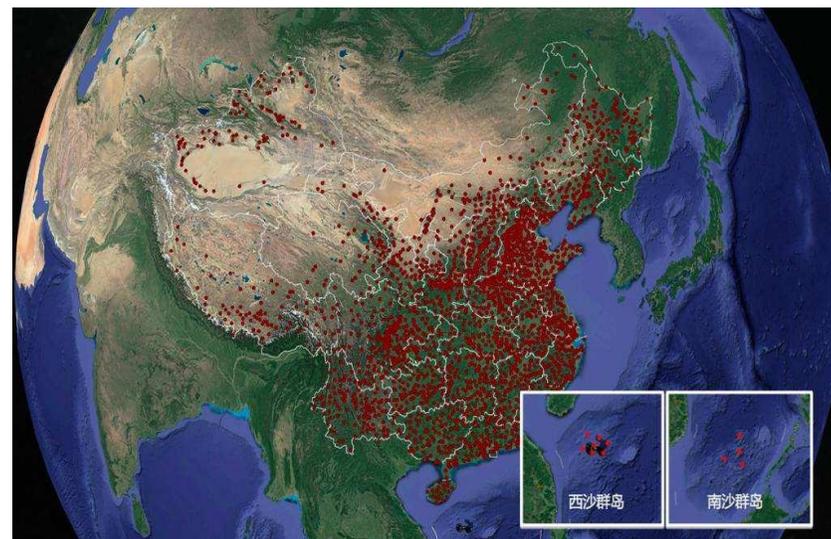
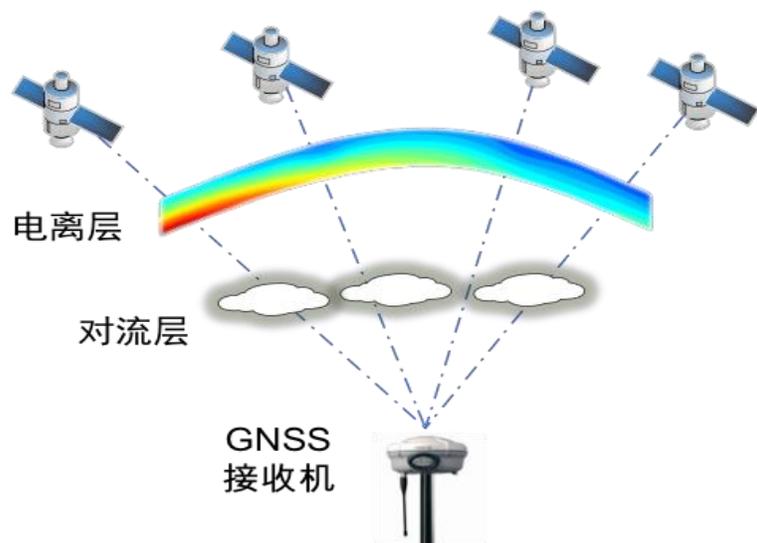
精准时空信息需求



对时空基准信息服务的需求：



□ PPP与PPP-RTK



- ✓ 精密定位技术的发展：RTK，PPP，PPP-RTK
- ✓ 利用基准站播发的增强信息，可以将PPP-RTK初始化时间缩短到数秒以内，实现模糊度的快速固定

研究背景与意义

□ VIO增强的PPP

在地面复杂环境中（城市峡谷、高架桥、隧道、林荫道等），单一传感器无法满足高精度、高可用、高可靠的导航定位需要



- ✓ GNSS: 城市复杂环境下存在信号遮挡以及多路径效应，严重影响GNSS定位精度
- ✓ INS: 纯惯导解算随着时间增长解算结果逐渐发散
- ✓ Vision: 面对弱纹理、高动态等情况定位性能显著下降

多源传感器融合是未来的发展趋势

1. 研究背景与意义

2. BDS/GNSS偏差

3. BDS PPP-AR与PPP-RTK

4. 视觉增强PPP

5. 总结 & 展望



OSB (Observable-specific signal bias) 产品

GPS	C1C、C1W、C2L、C2W、C2X、C5Q、C5X...
GLONASS	C1C、C1P、C2C、C2P...
Galileo	C1X、C5X、C7X、C8X...
BDS	C2I、C2X、C5D、C5P、C7I、C7Z...

差分?



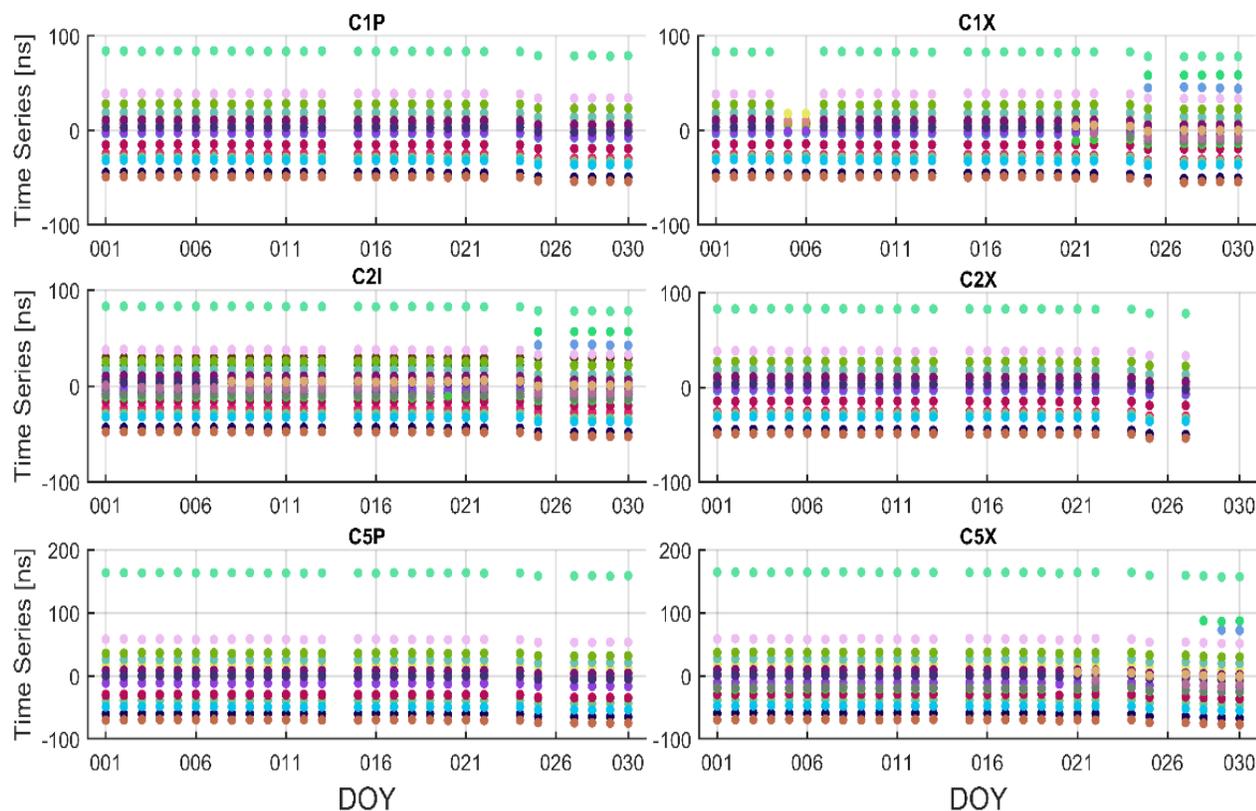
过于庞大的 DCB数量!

少量的DCB+固定的基准=每个码类型上的绝对偏差(OSB)

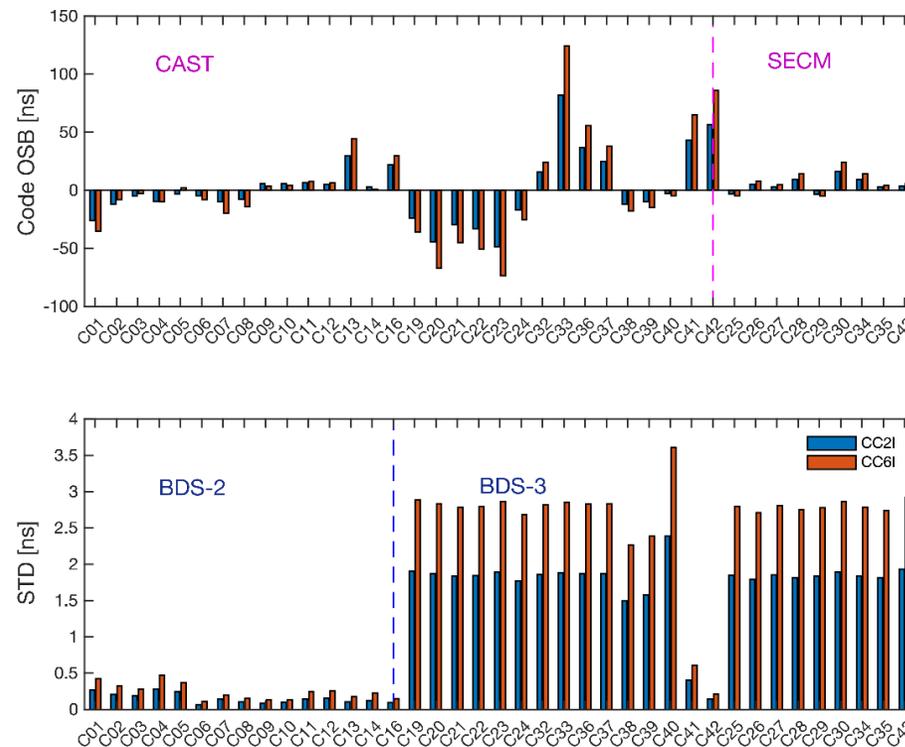
- ✓ 以某一码类型为基准，只需估计 $n - 1$ 种DCB，即可在一定的约束条件下得到所有码类型上的特定的OSB
- ✓ 得到伪距上的OSB后，可进一步由UPD产品得到相位上的OSB
- ✓ 将伪距/相位上的OSB直接改正至GNSS原始观测值上，即可很方便地进行精密定位



北斗伪距OSB



北斗伪距 OSB (B1C/B1I/B2a)

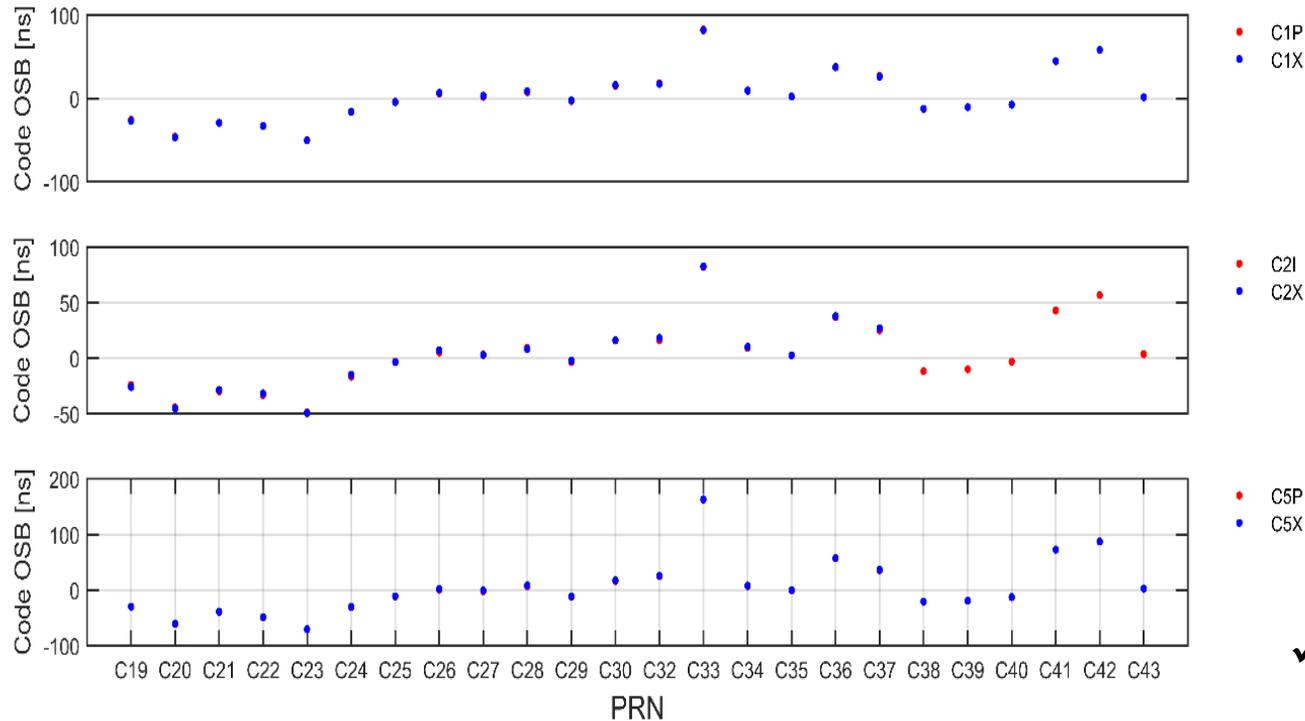


C2I/C6I OSB的均值与STD

✓ 北斗卫星伪距OSB具有较高的稳定性 (STD: BDS-2 小于1 ns, BDS-3 1.8-2.8 ns)



北斗伪距OSB



BDS-3伪距OSB均值: B1C/B1I/B2a

差异:

C1P - C1X : -1.32 ~ 1.25 ns

C2I - C2X: -2.27 ~ 2.03 ns

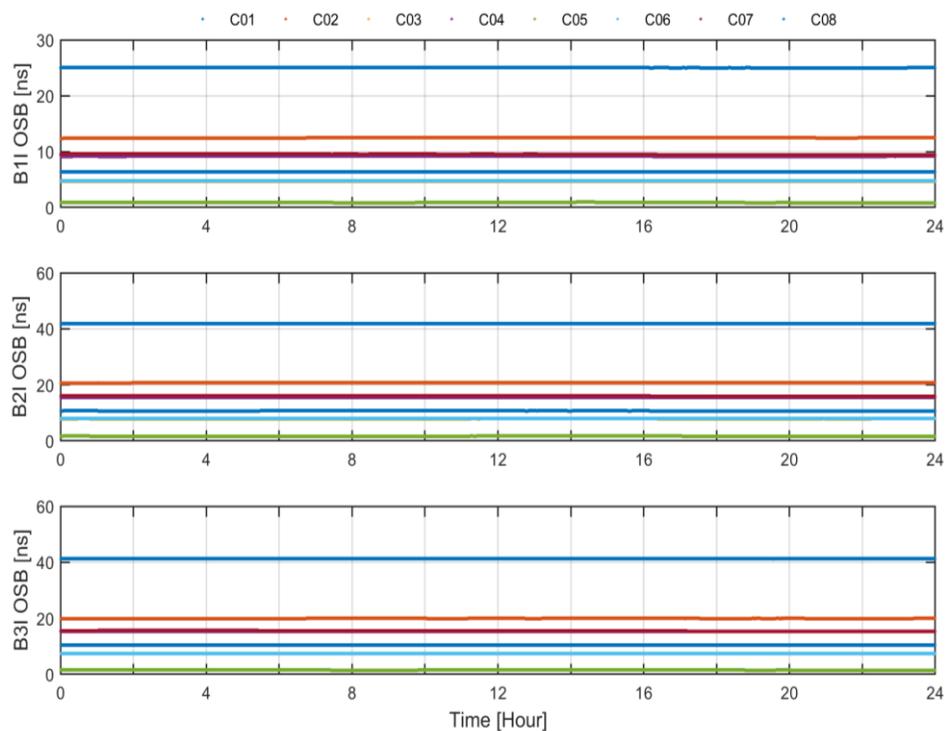
C5P - C5X: -1.63 ~ 0.11 ns

C5X - C7Z: < 1 ns

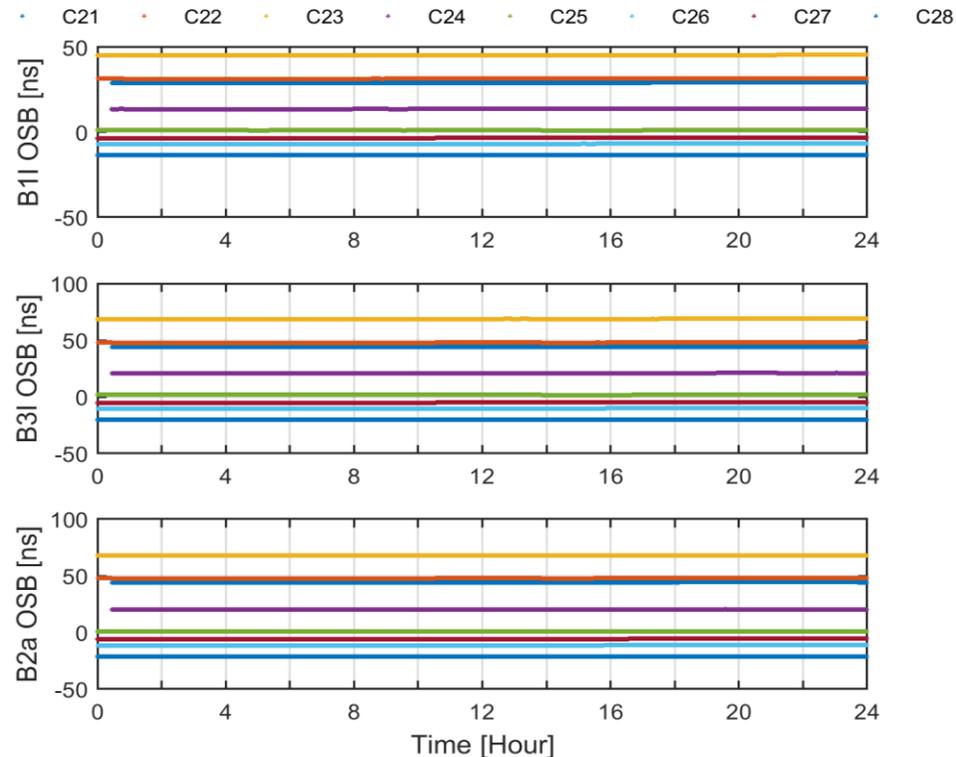
- ✓ 不同码类型(C1P/X, C5P/X)的OSB较为接近
- ✓ B2波段不同频率信号之间的OSB较为接近



北斗相位OSB



BDS-2相位OSB：B1I/B2I/B3I

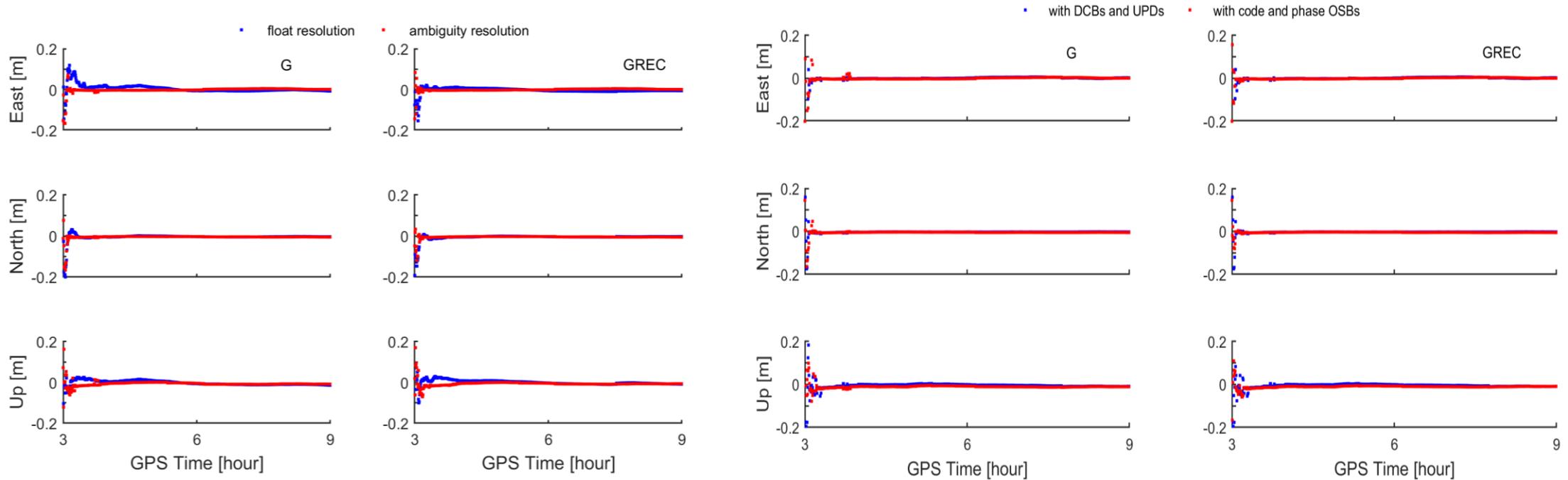


BDS-3相位OSB：B1I/B2a/B3I

✓ 北斗卫星相位OSB单天较为稳定 (STD: B1I/B3I/B2a小于0.2 ns, B2I小于0.1 ns)



基于OSB产品的PPP-AR



- ✓ 将OSB产品直接用于原始观测值的改正，即可实现PPP模糊度固定
- ✓ 利用相位/伪距OSB进行PPP-AR都能达到DCB+UPD产品相当的结果

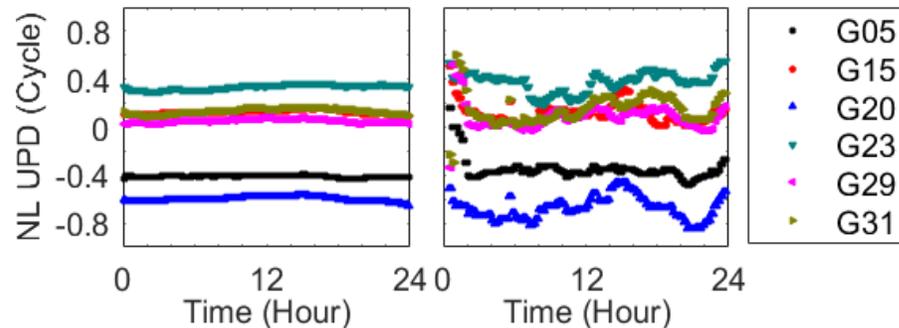
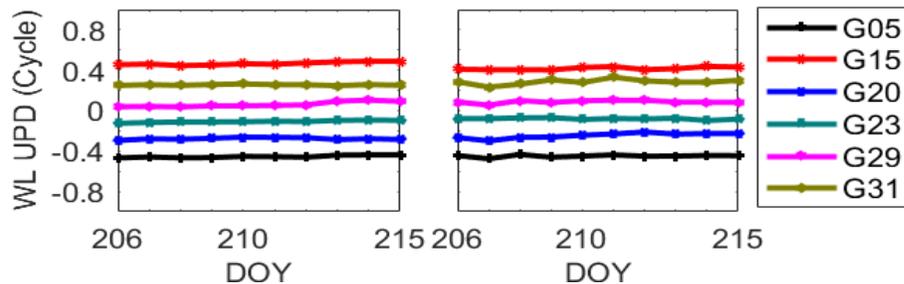


基于LEO星载数据的UPD估计

✓ 相较于地面站的UPD估计:

- a) 运行轨迹覆盖全球（包括海洋区域）
- b) 不易受到大气误差（如对流层）和多路径的影响

低轨卫星数据：Swarm-A/B/C, GRACE-FO1/2, Sentinel-3A/B, Jason-3, TerraSAR-X（9颗）



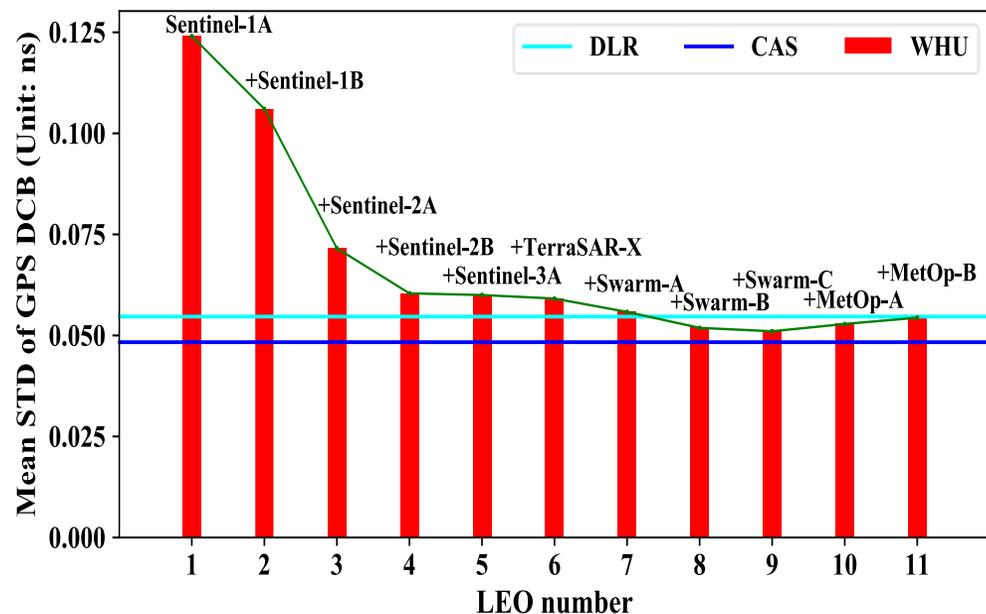
基于地面站的UPD

基于LEO的UPD

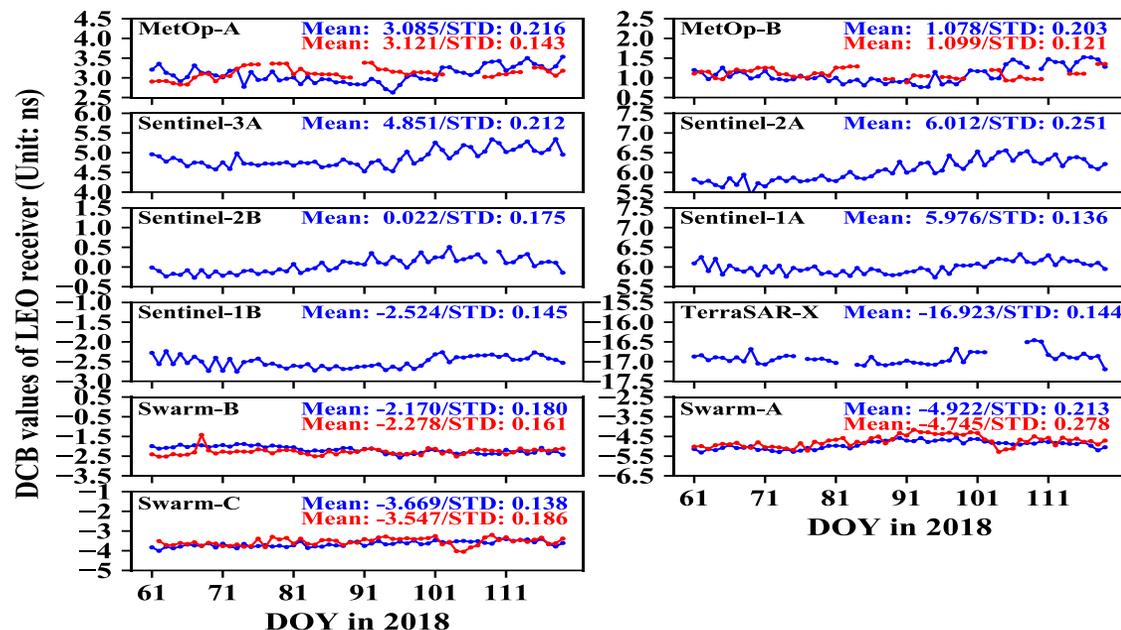
- ✓ 基于LEO星载观测值估计的WL UPD较为稳定，并且与地面测站的估计结果一致
- ✓ 受限于当前LEO的数量，基于LEO星载观测的NL UPD估值稳定性略差
- ✓ 随着可用LEO卫星数量的增加，基于LEO星载观测估计的UPD稳定性、可用性有望进一步改善



基于LEO星载数据的DCB估计



GPS卫星DCB稳定性



低轨卫星接收机DCB时序图（红色表示外部产品）

- ✓ 联合9颗LEO估计DCB精度接近CAS产品，略优于DLR产品精度
- ✓ 接收机DCB估计结果与外部产品有较好的符合性

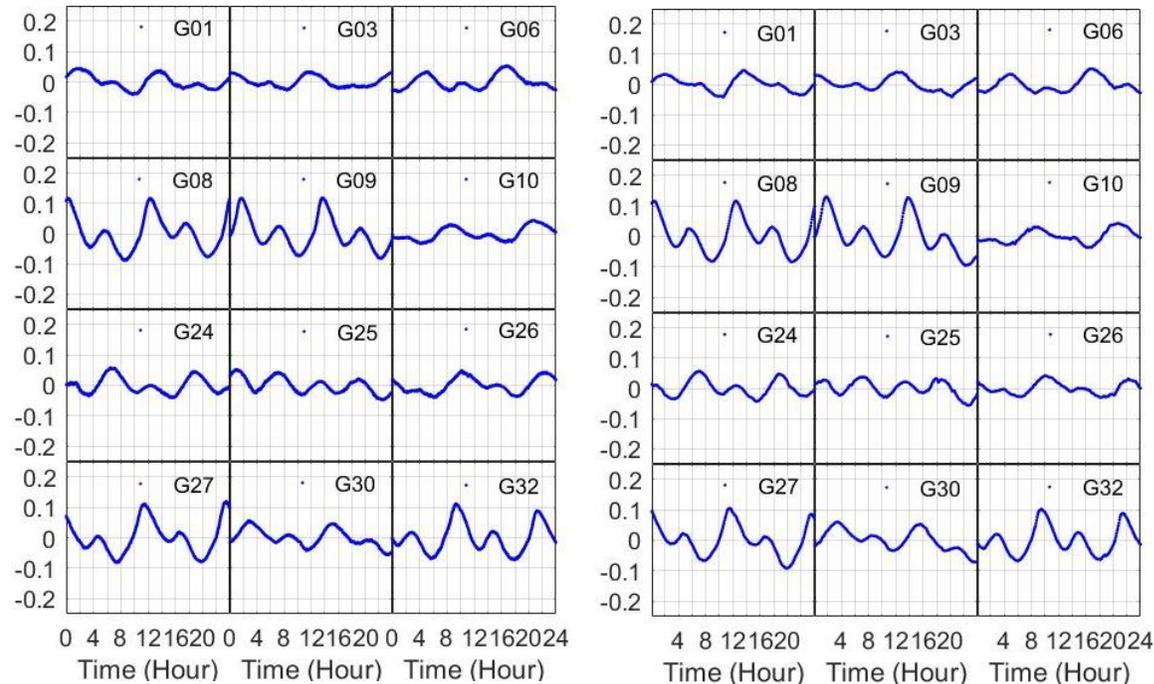


IFCB估计

✓ 在多频数据处理中，需要考虑IFCB:

a) 伪距IFCB可以使用DCB产品转换改正

b) 提出了一种估计时变相位IFCB (PIFCB)的方法



$$\textcircled{1} \quad GFIF = (a_{12,1} \cdot \Phi_1 + a_{12,2} \cdot \Phi_2) - (a_{15,1} \cdot \Phi_1 + a_{15,2} \cdot \Phi_5) \\ = \delta_{IF,15} + N_{GFIF} + b_{r,GFIF} + b_{c,GFIF}$$

$$\textcircled{2} \quad \mathcal{I}_{IF,15} = cdt_{IF,15} - cdt_{IF,12} = (\alpha_{12,1} \cdot d_1 + \alpha_{12,2} \cdot d_2) - (\alpha_{15,1} \cdot d_1 + \alpha_{15,2} \cdot d_5) \\ + (\alpha_{12,1} \cdot b_{v,1} + \alpha_{12,2} \cdot b_{v,2}) - (\alpha_{15,1} \cdot b_{v,1} + \alpha_{15,2} \cdot b_{v,5})$$

① 传统方法（左图）：GFIF组合

② 新方法（右图）：两组卫星钟差之间的偏差

1. 研究背景与意义

2. BDS/GNSS偏差

3. BDS PPP-AR与PPP-RTK

4. 视觉增强PPP

5. 总结 & 展望

BDS PPP-AR与PPP-RTK



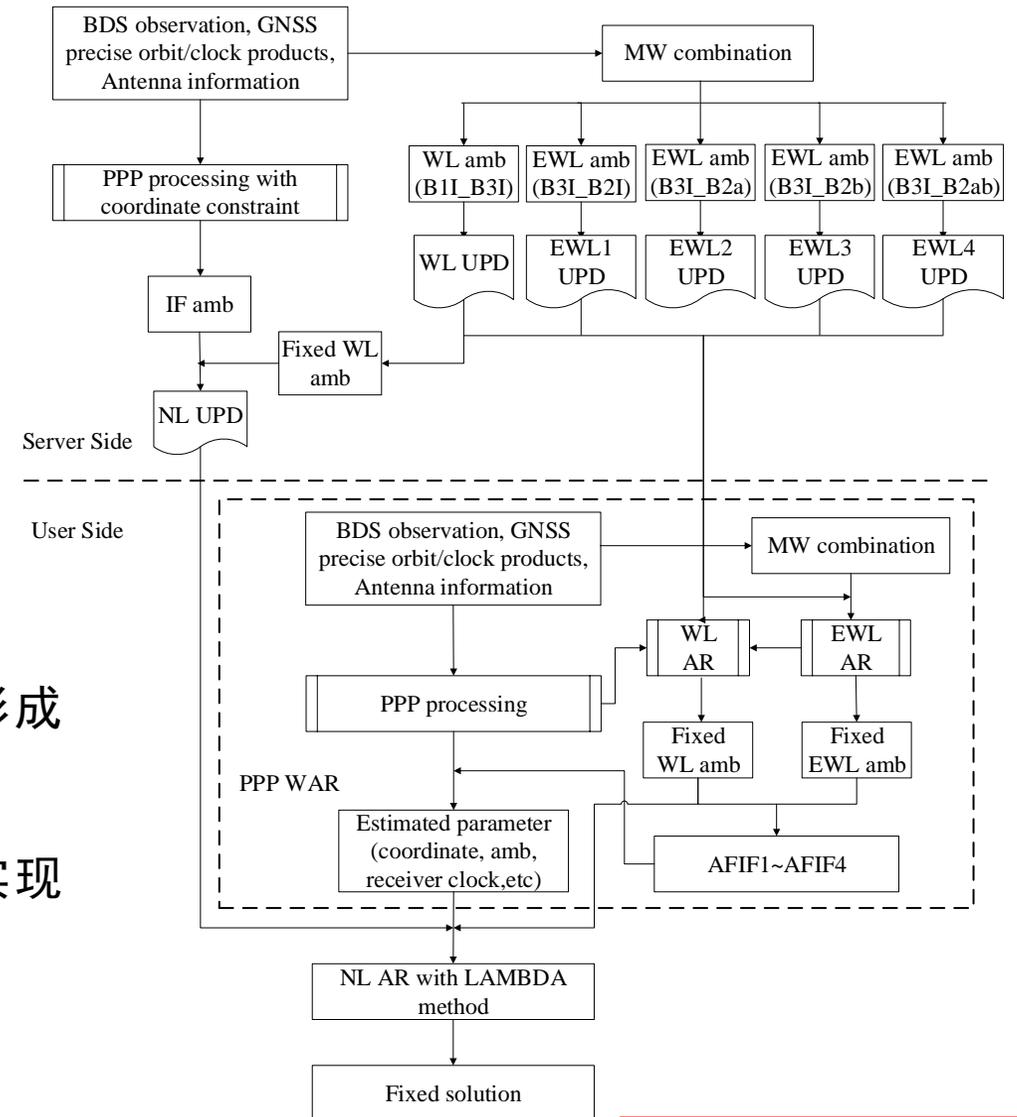
□ BDS-3+BDS-2多频PPP-AR

Ambiguity-fixed ionosphere-free (AFIF)观测值

$$P_{r,AFIF_ijk}^s = \frac{f_i}{f_i - f_k} L_{r,wl_ij}^s - \frac{f_k}{f_i - f_k} L_{r,ewl_jk}^s$$

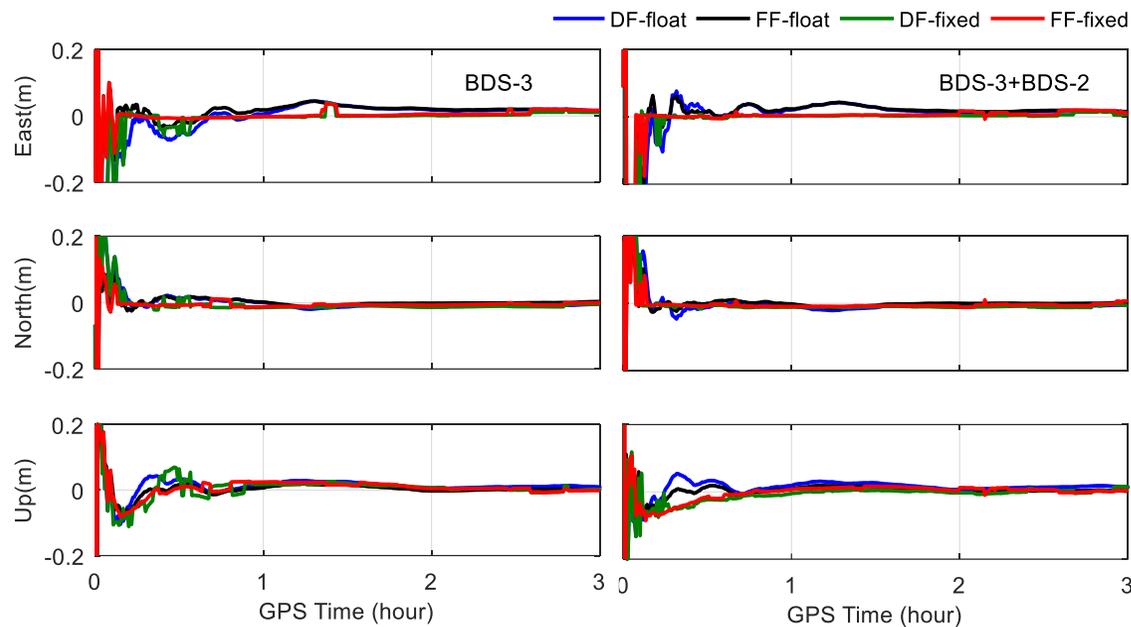
$$\begin{cases} L_{r,wl_ij}^s = \frac{f_i}{f_i - f_j} L_{r,i}^s - \frac{f_j}{f_i - f_j} L_{r,j}^s - \lambda_{wl_ij} (N_{r,wl_ij}^s + d_{r,wl_ij} - d_{wl_ij}^s) \\ L_{r,ewl_jk}^s = \frac{f_j}{f_j - f_k} L_{r,j}^s - \frac{f_k}{f_j - f_k} L_{r,k}^s - \lambda_{ewl_jk} (N_{r,ewl_jk}^s + d_{r,ewl_jk} - d_{ewl_jk}^s) \end{cases}$$

- ✓ 依次固定超宽巷和宽巷模糊度，联立相位观测值形成AFIF组合观测值。
- ✓ 构成四组AFIF观测值(AFIF1-AFIF4)约束法方程，实现PPP宽巷固定解
- ✓ 进一步实现窄巷模糊度固定

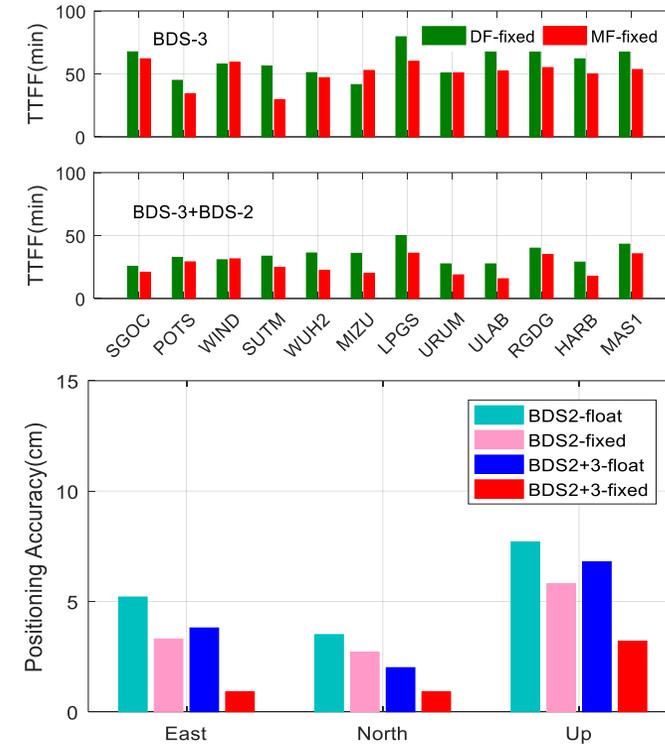




□ BDS-3+BDS-2多频PPP-AR



BDS-3 与BDS-3+BDS-2 PPP 和PPP-AR 结果



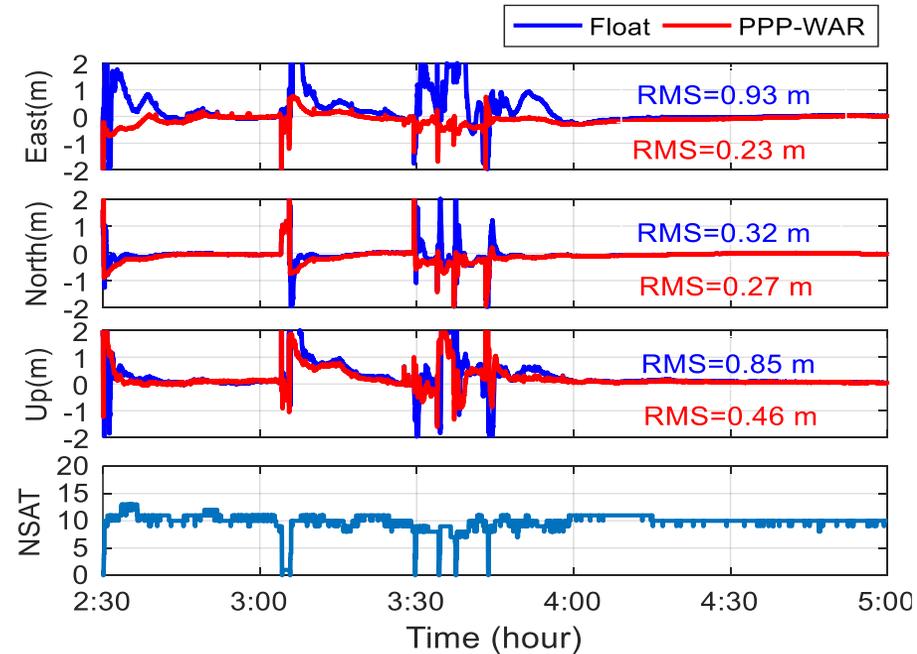
✓ BDS-3 和 BDS-3+BDS-2 多频 PPP-AR首次固定时间分别为 50.4 和 25.5 min, 相较于双频PPP-AR 的结果提升了 17.2%~25.4%

✓ BDS-3+BDS-2 多频PPP-AR定位精度为 (0.9, 0.9 3.2) cm, 也获得了显著的提升

□ BDS 快速分米级定位



行车轨迹图

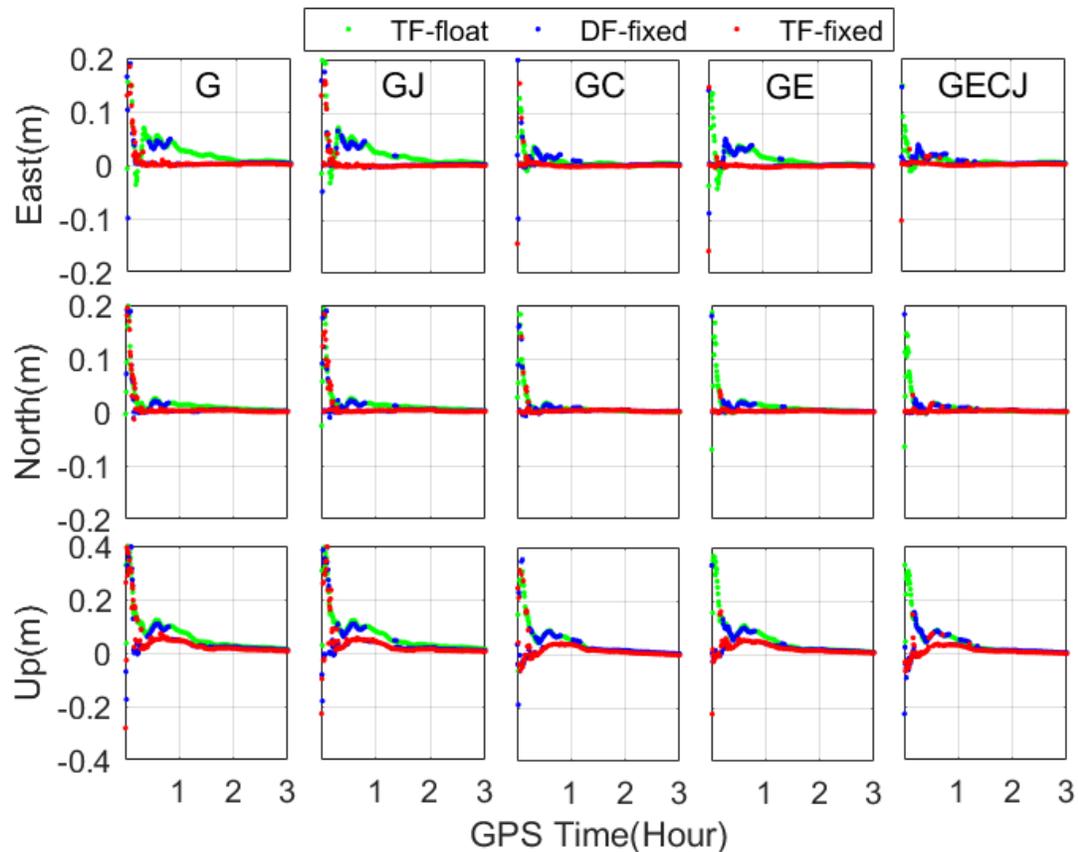


BDS PPP 浮点解 和 PPP WAR结果比较

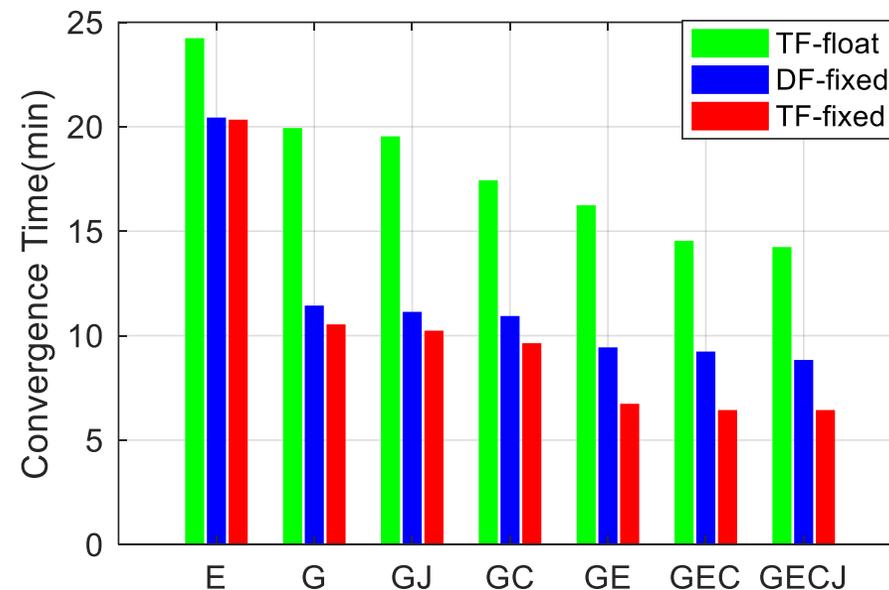
- ✓ BDS PPP宽巷固定的定位精度为 (0.23, 0.27, 0.46) m, 相较于浮点解的定位精度分别提升了(75.2%, 15.6%, 45.8%)
- ✓ BDS PPP宽巷固定对收敛和精度有明显的提升, 重收敛后可以很快速达到分米级精度



多频多系统 PPP-AR



GPS/Galileo/BDS/QZSS 多频PPP AR

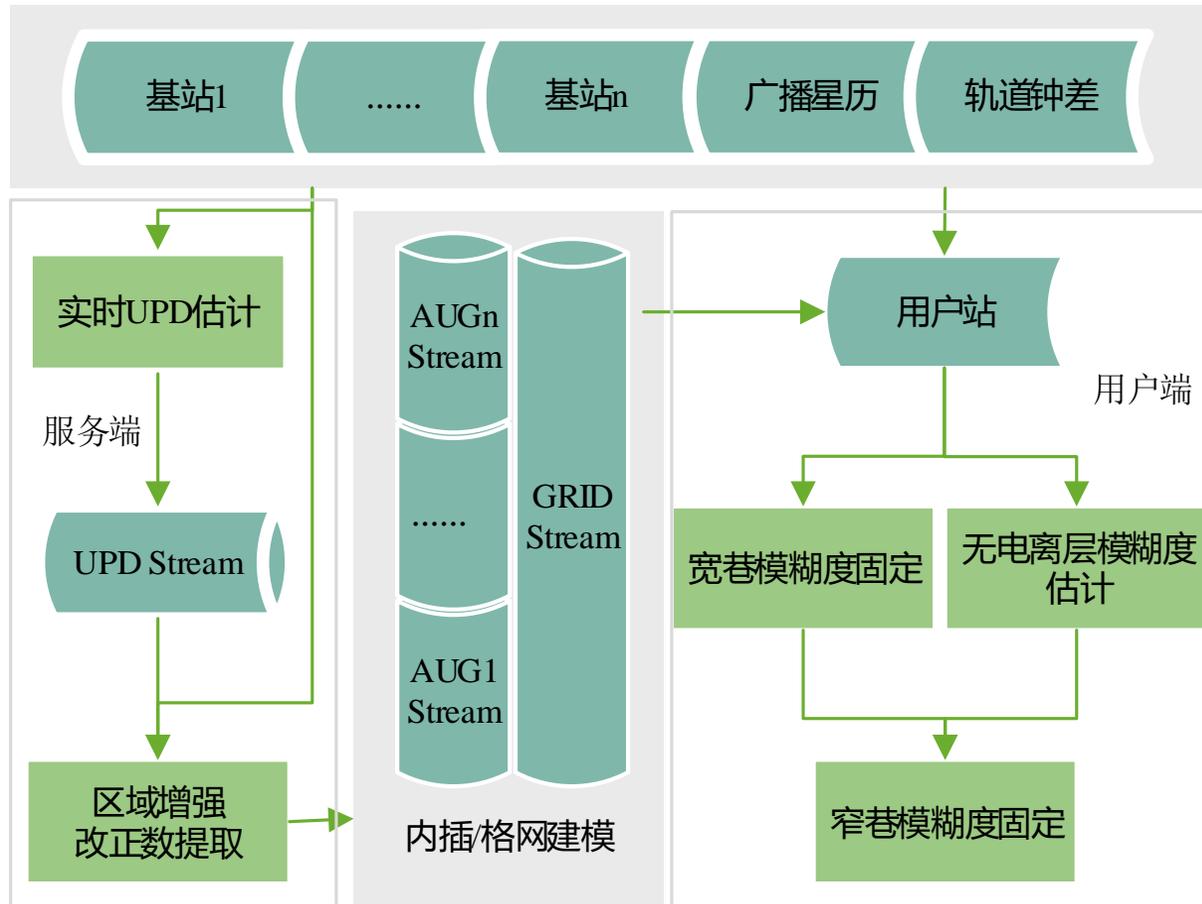


不同系统组合收敛时间统计

- ✓ 多系统GNSS显著改善了定位效果，缩短收敛时间
- ✓ 三频PPP AR表现出优于双频固定解的定位效果
- ✓ GECJ四系统三频PPP固定解收敛最快，为6.4分钟



□ PPP-RTK



- ✓ 利用基准站获取实时UPD;基于PPP固定解提取基准站上的大气延迟
- ✓ 可采用内插/格网两种模式对大气改正数进行改正
- ✓ 用户端实现快速模糊度固定

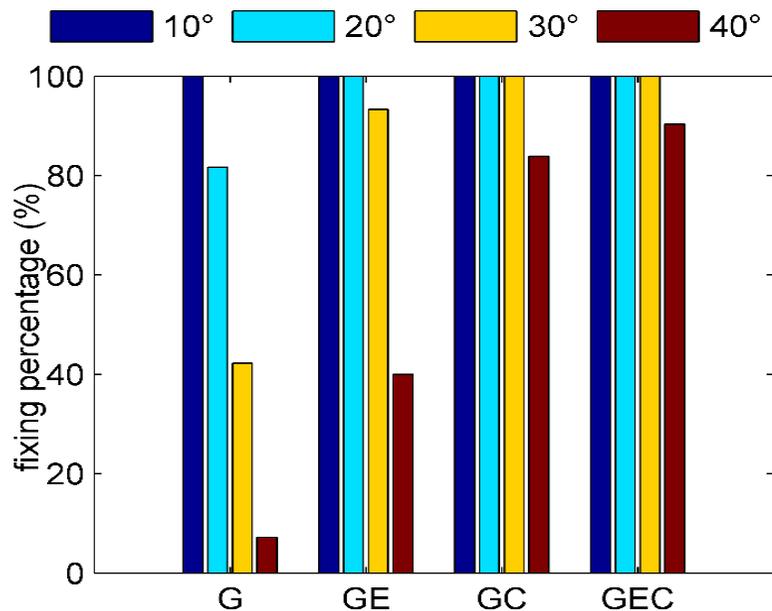


多系统 PPP-RTK

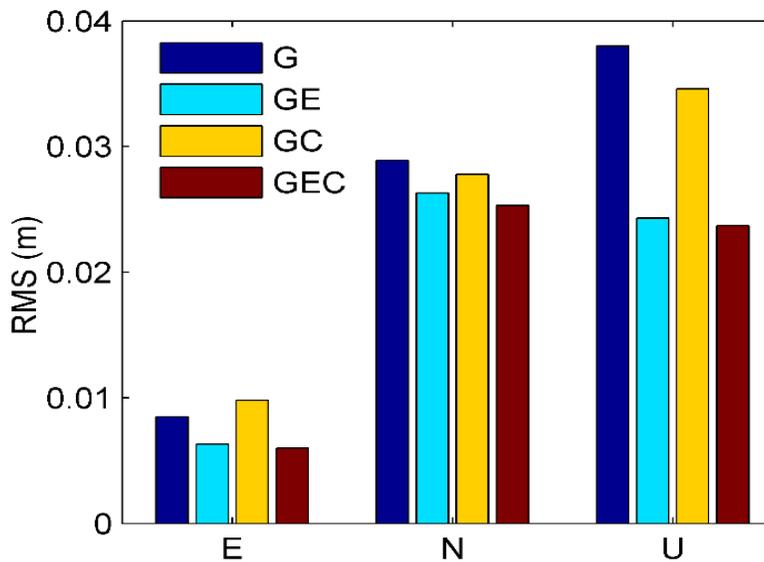
✓ 多星座融合进一步提升PPP-RTK的定位效果:

a) 进一步提升定位精度

b) 提升复杂环境下卫星数目不足时的定位效果

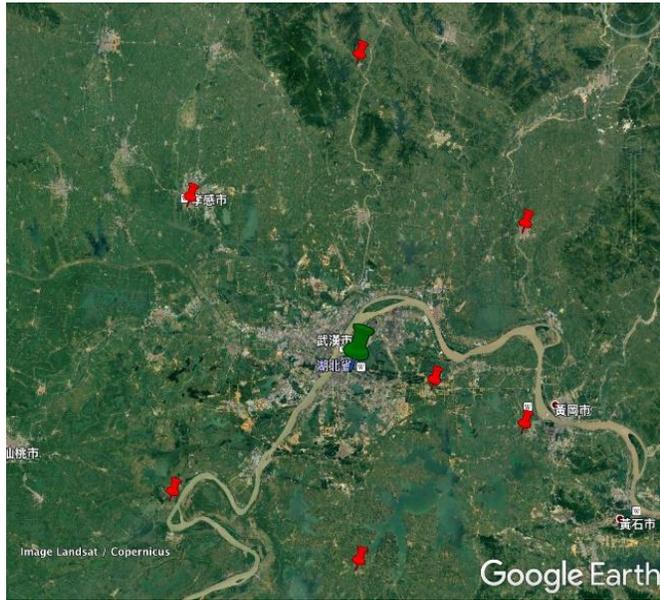


不同截止高度角下不同组合类型的固定率



不同组合类型的定位精度

□ 车载动态实验



基准站与车载设备

车载实验类型:

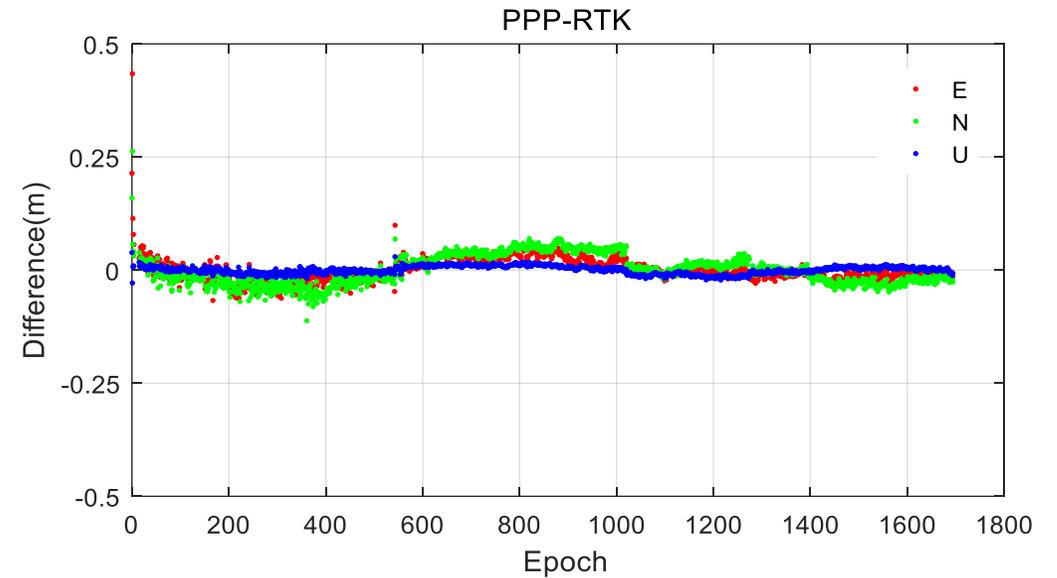
- I. 高架桥实验
- II. 城市周边高速公路实验
- III. 隧道实验

车载实验 I: 高架桥



运行轨迹图

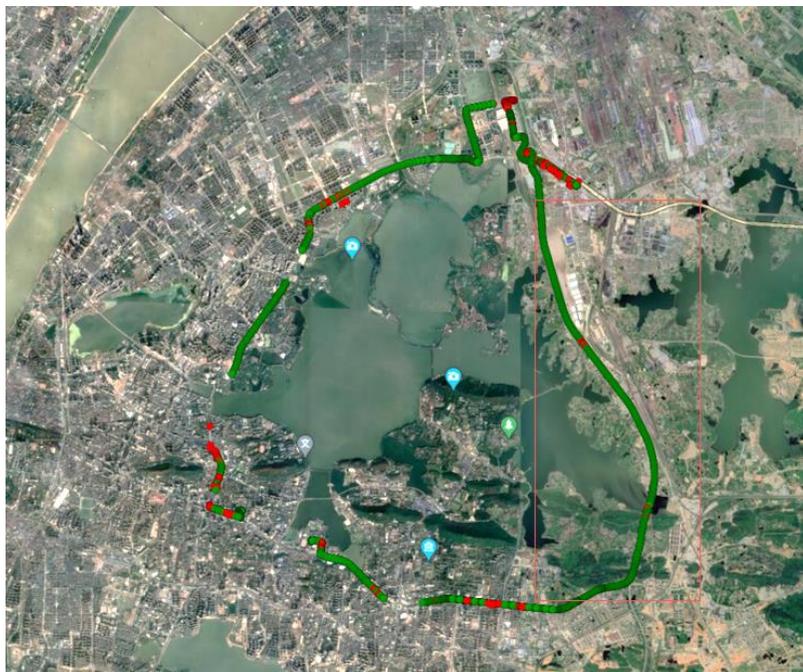
- ✓ 高架桥周围基本没有高的建筑物遮挡，环境开阔，首次固定时间为12s，固定率为96.78%



STD-E/m		STD-N/m		STD-U/m
0.0229		0.0318		0.0085
Horizontal /%		Vertical /%		TTFB/s
<5cm	88.55%	<10cm	100.00%	12
<10cm	99.76%	<20cm	100.00%	
Fixing percentage				96.78%

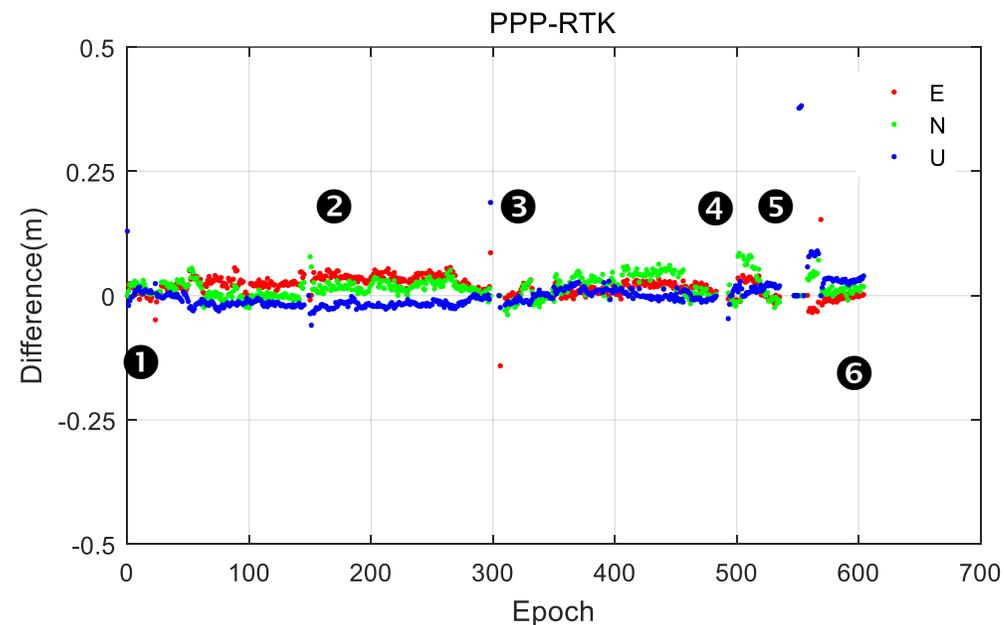
BDS PPP-AR与PPP-RTK

车载实验II:城市周边高速公路



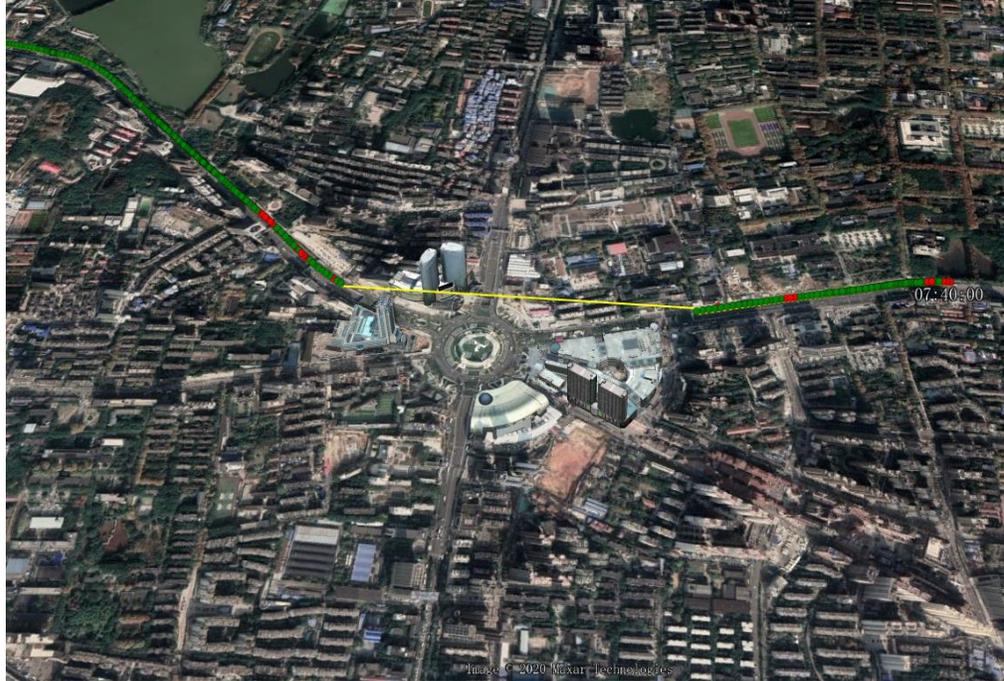
行车轨迹图

- ✓ 高速场景下受路牌、天桥和高架桥等遮挡导致的信号丢失而发生的重收敛，共发生五次重收敛情况，平均重收敛时间是10 s



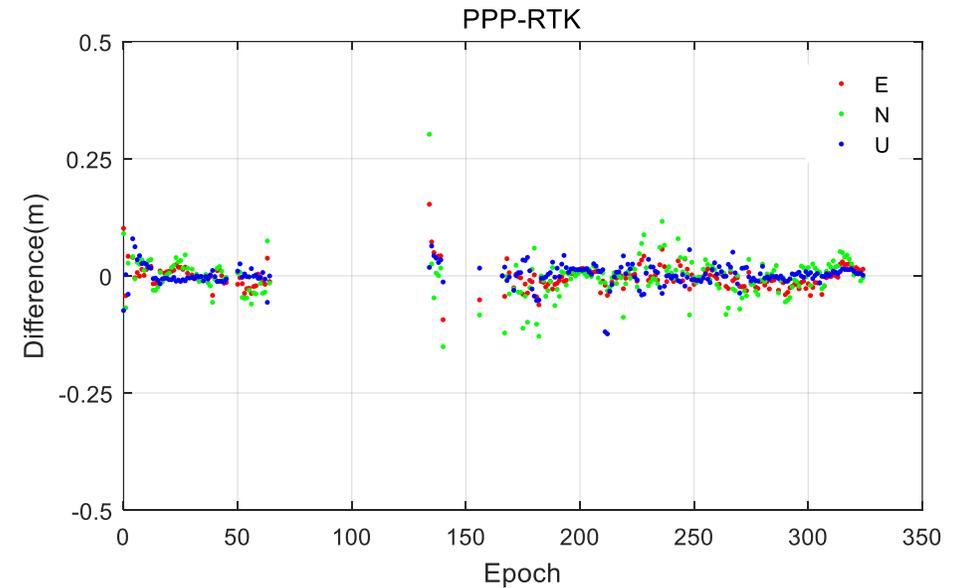
	初始化	重收敛				
收敛时刻	①	②	③	④	⑤	⑥
收敛时长/s	13	4	12	9	19	3

□ 车载实验 III: 隧道



行车轨迹图

- ✓ 驶出地下隧道，由于汽车需要经历爬坡过程，信号由弱变强，但仍能在几秒钟恢复较高精度的定位结果



STD-E/m		STD-N/m		STD-U/m
0.0249		0.0420		0.0230
Horizontal /%		Vertical /%		TTF/s
<5cm	86.28%	<10cm	98.67%	11
<10cm	96.02%	<20cm	100.00%	
Fixing percentage				95.07%

1. 研究背景与意义

2. BDS/GNSS偏差

3. BDS PPP-AR与PPP-RTK

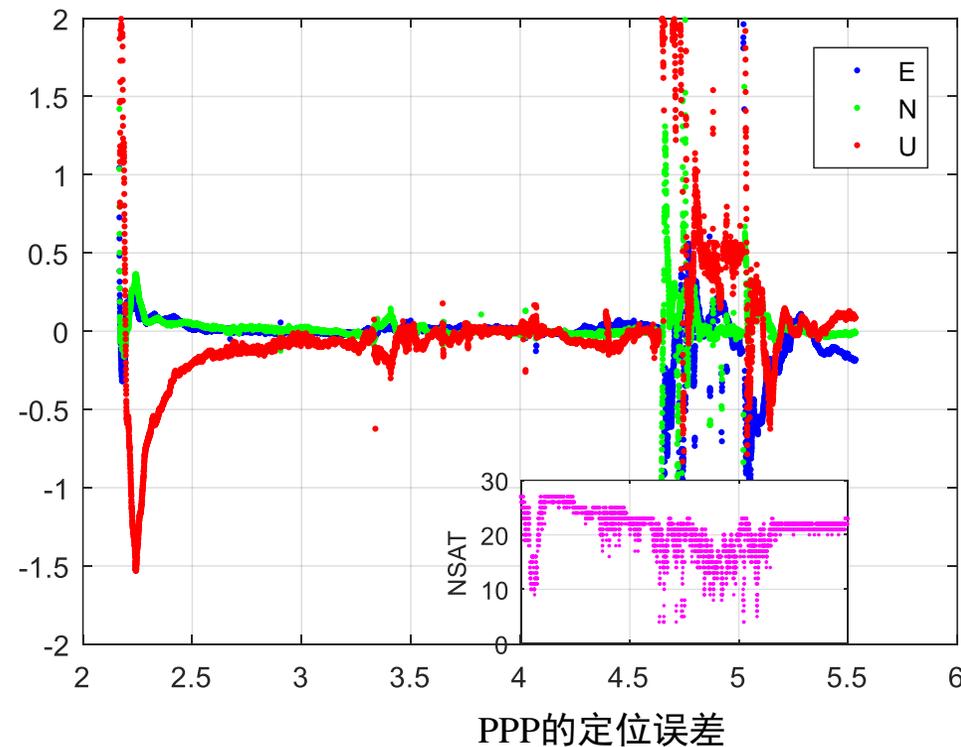
4. 视觉增强PPP

5. 总结 & 展望

INS 增强 PPP-RTK



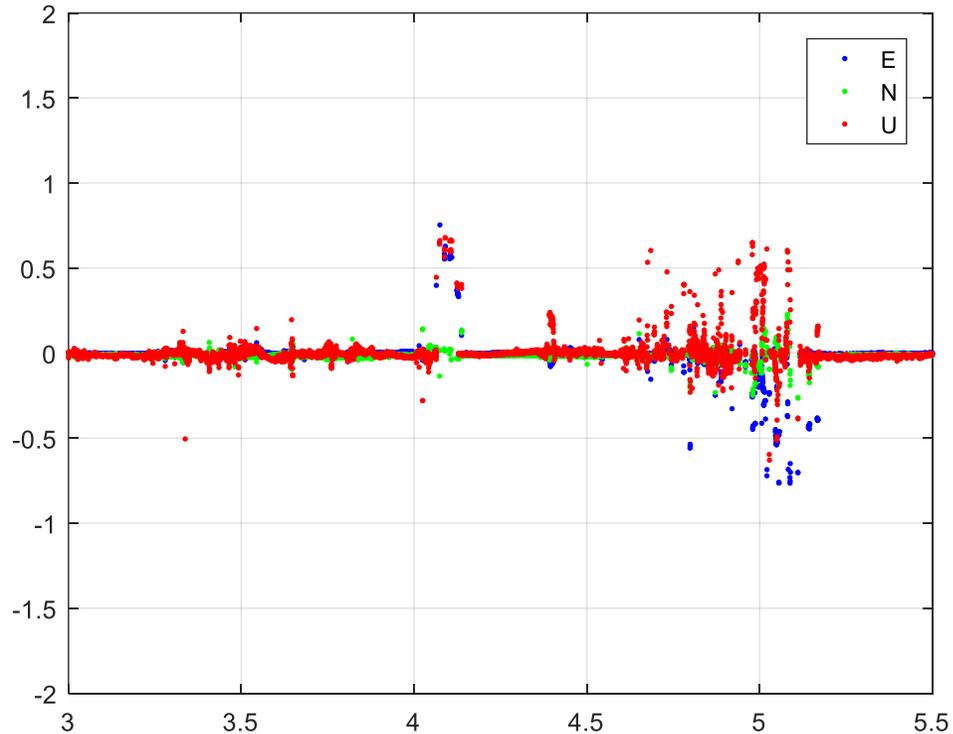
行车轨迹图



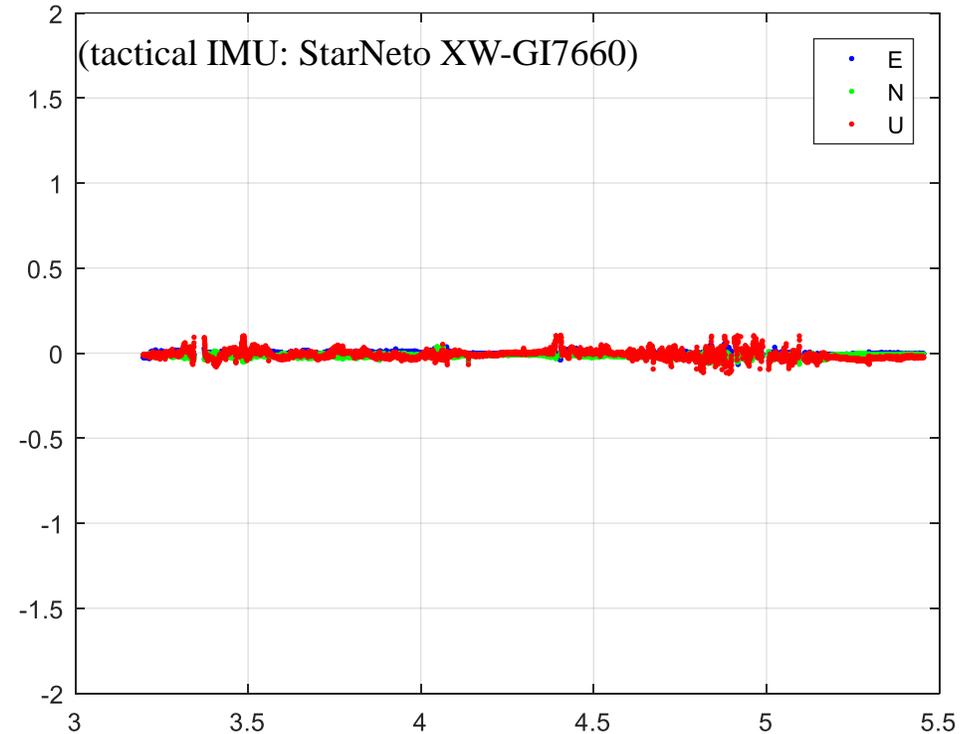
✓ 由于树木和建筑的遮挡，卫星数目急剧减小，信号质量变差，PPP定位效果明显变差



INS 增强PPP-RTK



PPP-RTK 结果

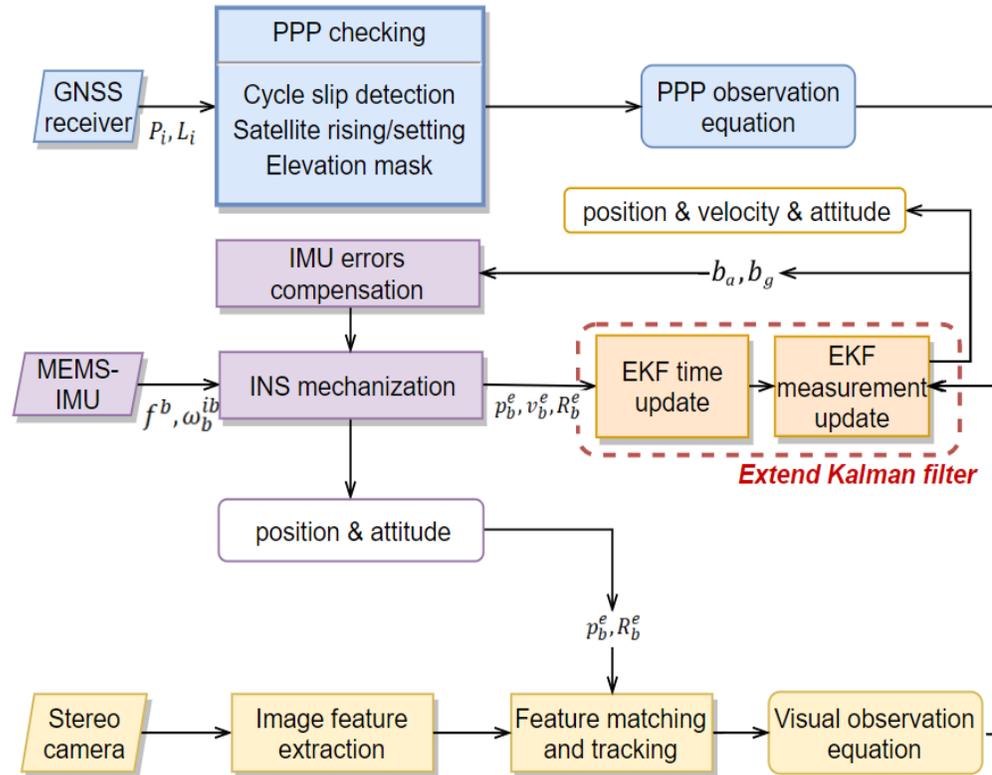


PPP-RTK+INS 结果

✓ INS辅助PPP-RTK后, 定位精度从 $(0.12, 0.03, 0.07)$ m 提升到 $(0.011, 0.016, 0.024)$ m.

视觉增强PPP

视觉增强PPP（基于观测值的紧组合）



VIO增强PPP-算法结构

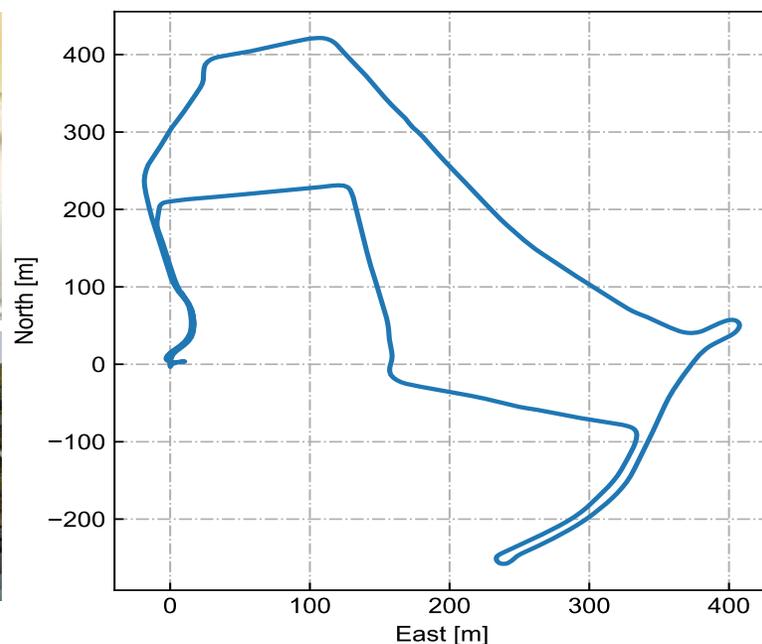
- ✓ 状态转移由INS机械编排完成，INS机械编排后通过EKF时间更新完成对应参数协方差的转移与更新
- ✓ 预测的INS位置和姿态将会协助视觉进行特征点的跟踪
- ✓ 如果存在可用的GNSS观测值或视觉观测值，相应的量测更新将被启用

□ 车载实验

实验设备



实验轨迹



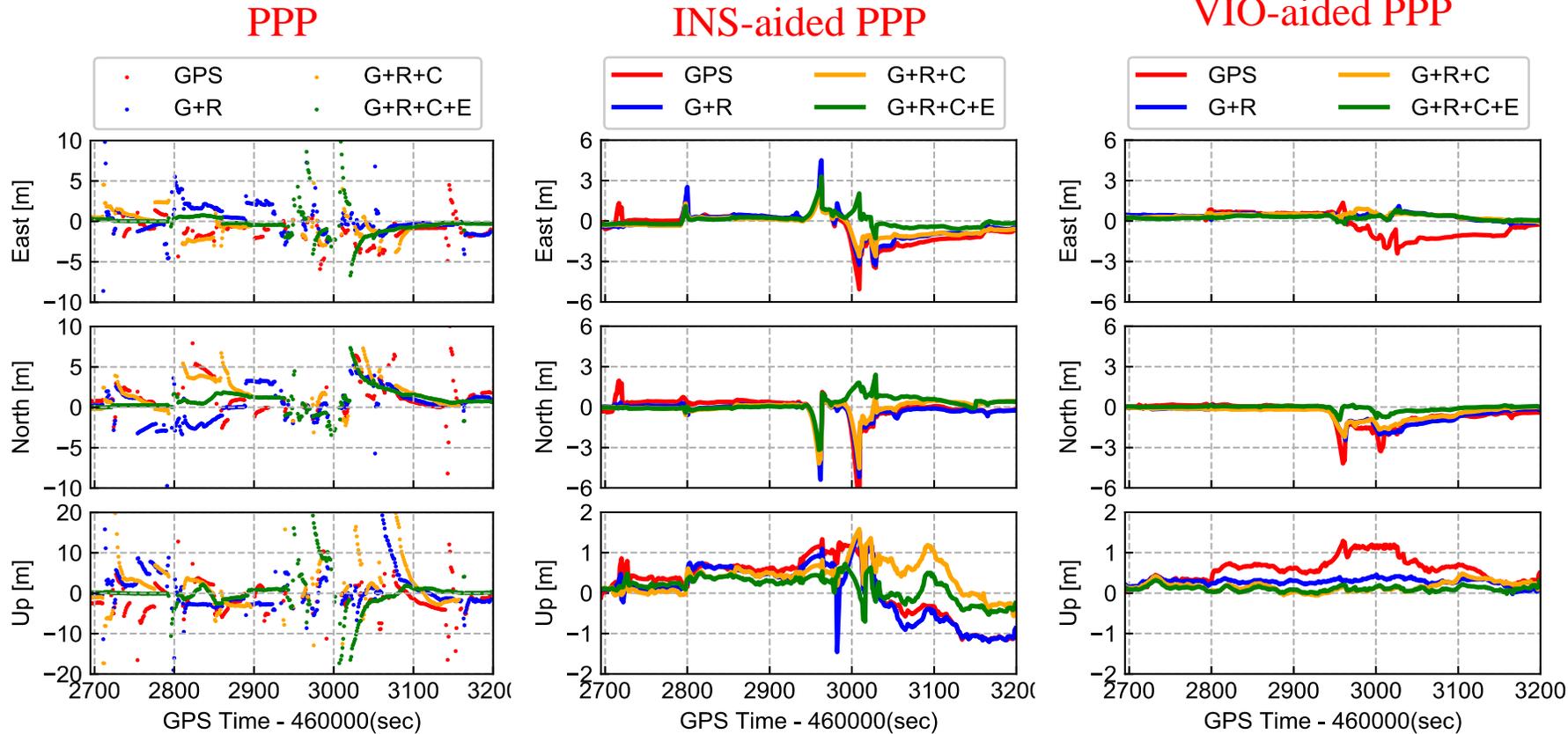
实验场景



- ✓ 实验车辆配备了Septentrio PolaRx5 GNSS接收机以及GNSS天线（NovAtel GPS-702-GG），战术级IMU（StarNeto XW-GI7660），MEMS-IMU（NovAtel AIDS-16470）和两个灰点相机（FLIR BFS-PGE-31S4C）
- ✓ GNSS接收机结合战术级IMU的数据用于计算RTK/INS紧组合双向平滑解作为参考值



□ VIO增强PPP定位



RMSs of position errors

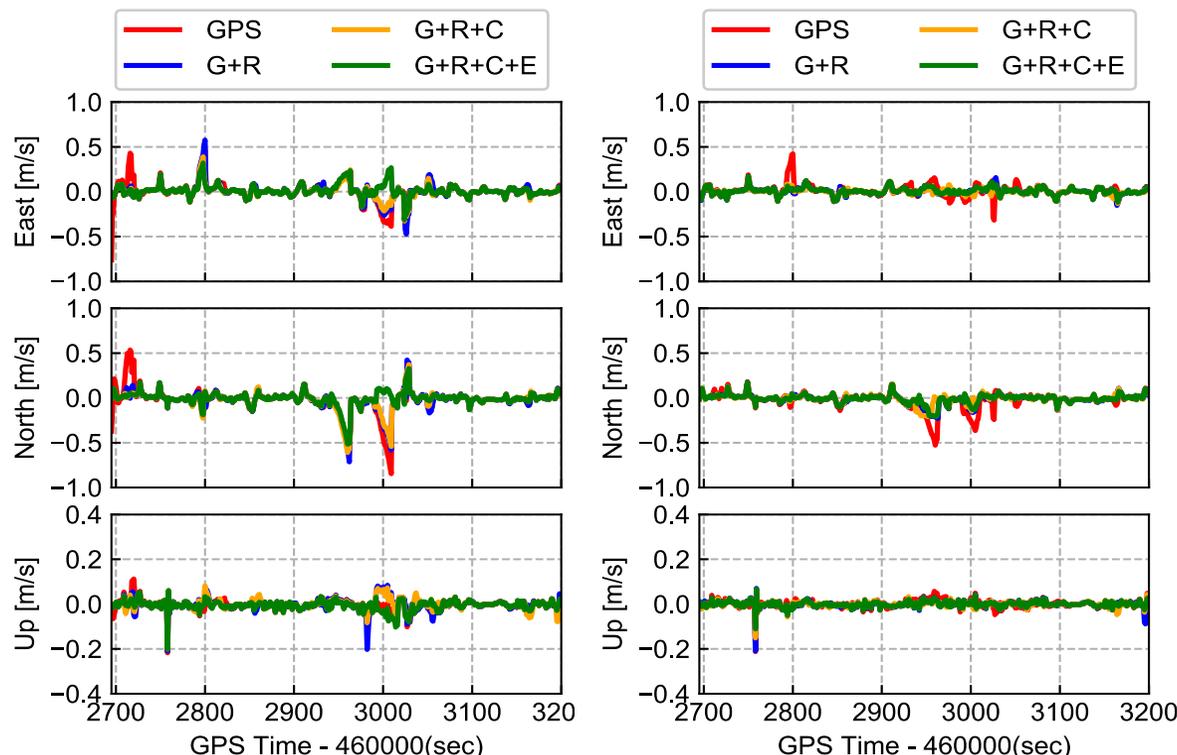
	E	N	U
INS-aided (m)	0.496	0.599	0.325
VIO-aided (m)	0.317	0.199	0.123
Improve (%)	36.1	66.8	61.2

- ✓ 多系统GNSS对于定位精度有一定的提升，但是仍然不能完成在这种复杂环境下的导航定位
- ✓ 添加IMU观测值后，PPP的可用性和连续性大大提高，视觉观测值的加入可以进一步提高定位的精度和稳定性



速度 和 姿态 精度

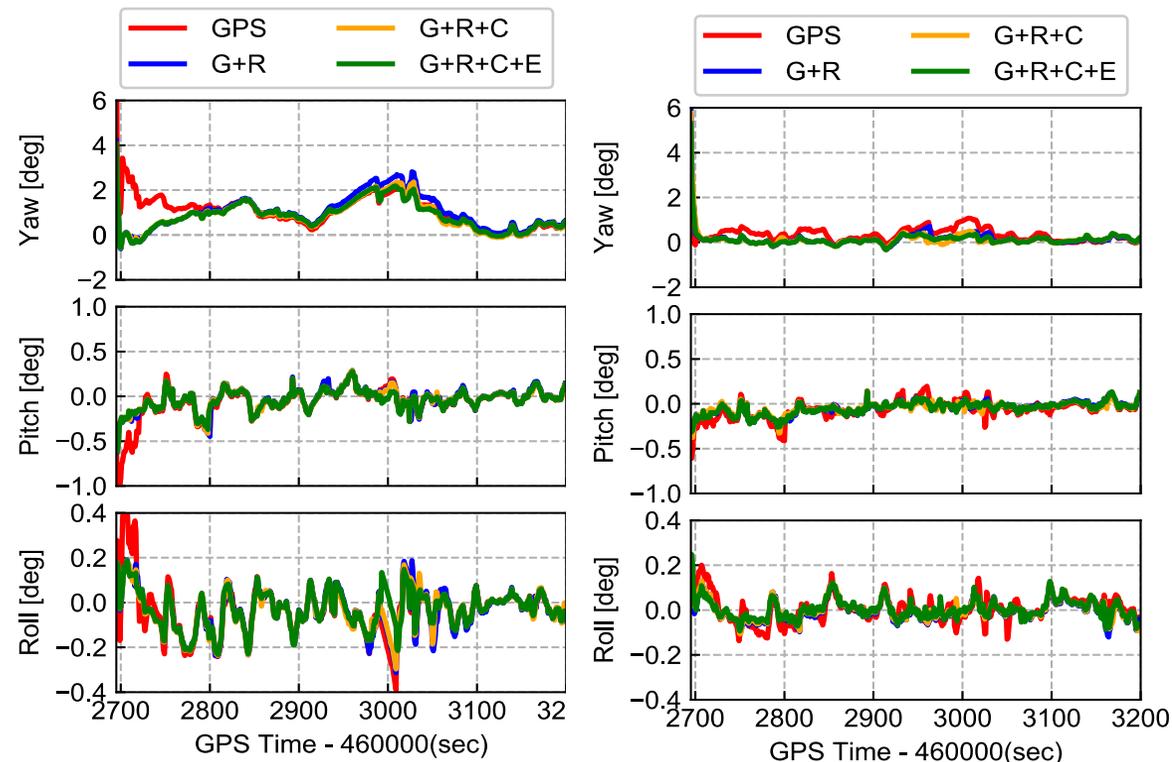
速度



INS-aided PPP

VIO-aided PPP

姿态



INS-aided PPP

VIO-aided PPP

✓ 视觉量测更新的加入可以极大提高速度和姿态的精度，尤其是在姿态的航向角中

iGMAS 创新中心: <http://igmas.users.sgg.whu.edu.cn>



iGMAS Innovation Center

@School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University

Home

Products

Visualization

Group

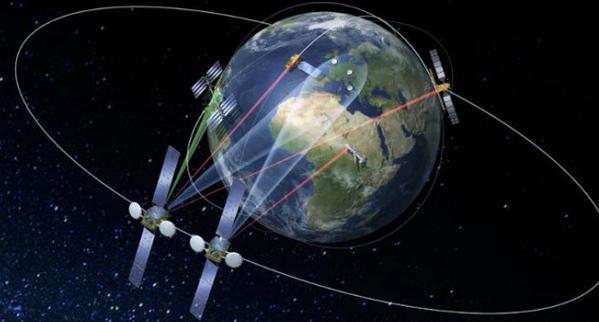
Software

Feedback

iGMAS Innovation Center

aims to improve the accuracy and reliability of existing BDS/GNSS products, to further enrich iGMAS products, to develop models and algorithms for LEO-augmented GNSS technologies, and to expand the service areas of iGMAS to

[View more »](#)



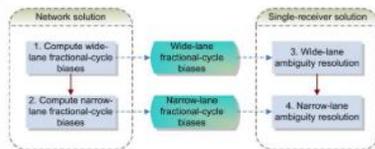
GREAT-UPD

(open-source software)

<https://geodesy.noaa.gov>

[v/gps-toolbox/GREAT-](https://geodesy.noaa.gov)

[UPD.htm](https://geodesy.noaa.gov)



Uncalibrated Phase Delay

Multi-GNSS and multi-frequency uncalibrated phase delay (UPD) products of BDS, GPS, GLONASS and Galileo

[View more »](#)

[Download»](#)

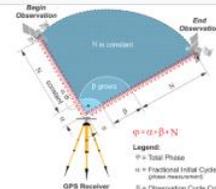


LEO Precise Science Orbit

Reduced-dynamic orbit with ambiguity resolution for LEO satellites, including GRACE Follow-on, Swarm, Jason-3 and Sentinel-3

[View more »](#)

[Download»](#)

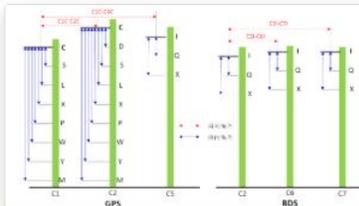


Multi-GNSS Carrier Range

Multi-GNSS and multi-frequency carrier-range observations (ambiguity-free phase observations) of BDS, GPS, GLONASS and Galileo.

[View more »](#)

Coming soon...



Observable Signal Bias

Code and phase observable-specific signal bias (OSB) products for multiple GNSS constellations: BDS, GPS, GLONASS and Galileo.

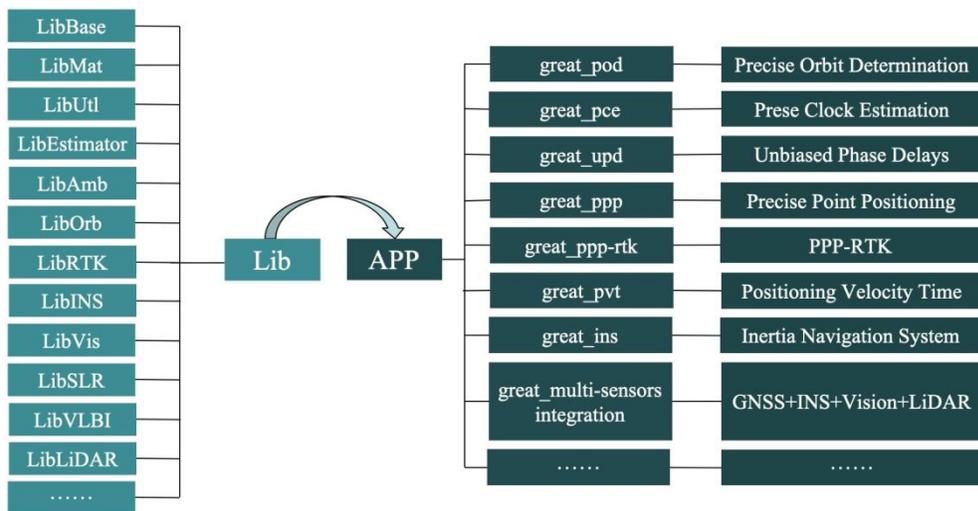
[View more »](#)

[Download»](#)



□ 核心产品生成软件：GREAT

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。支持GNSS+SLR+VLBI联合解算、定轨估钟、PPP/PPP-RTK、低轨增强、GNSS+INS+VISION+LiDAR多源导航等。



iGMAS创新软件软件平台结构示意图

- ✓ C++11，面向对象，Google 风格
- ✓ 模块化设计，易于扩展
- ✓ 集成GNSS/SLR/VLBI等多技术
- ✓ 支持卫导、惯导、视觉、激光等
- ✓ Gitlab，易于协同开发和维护
- ✓ 跨平台，支持实时、嵌入式
- ✓ 支持多线程、GPU并行



1. 研究背景与意义

2. BDS/GNSS偏差

3. BDS PPP-AR与PPP-RTK

4. VIO增强PPP

5. 总结 & 展望



□ 结论

◆ BDS/GNSS偏差

- ① 估计和提供多频多系统的伪距/相位OSB 产品；利用星载LEO观测值估计DCB和UPD产品
- ② 利用差分钟差的方法估计 PIFCB

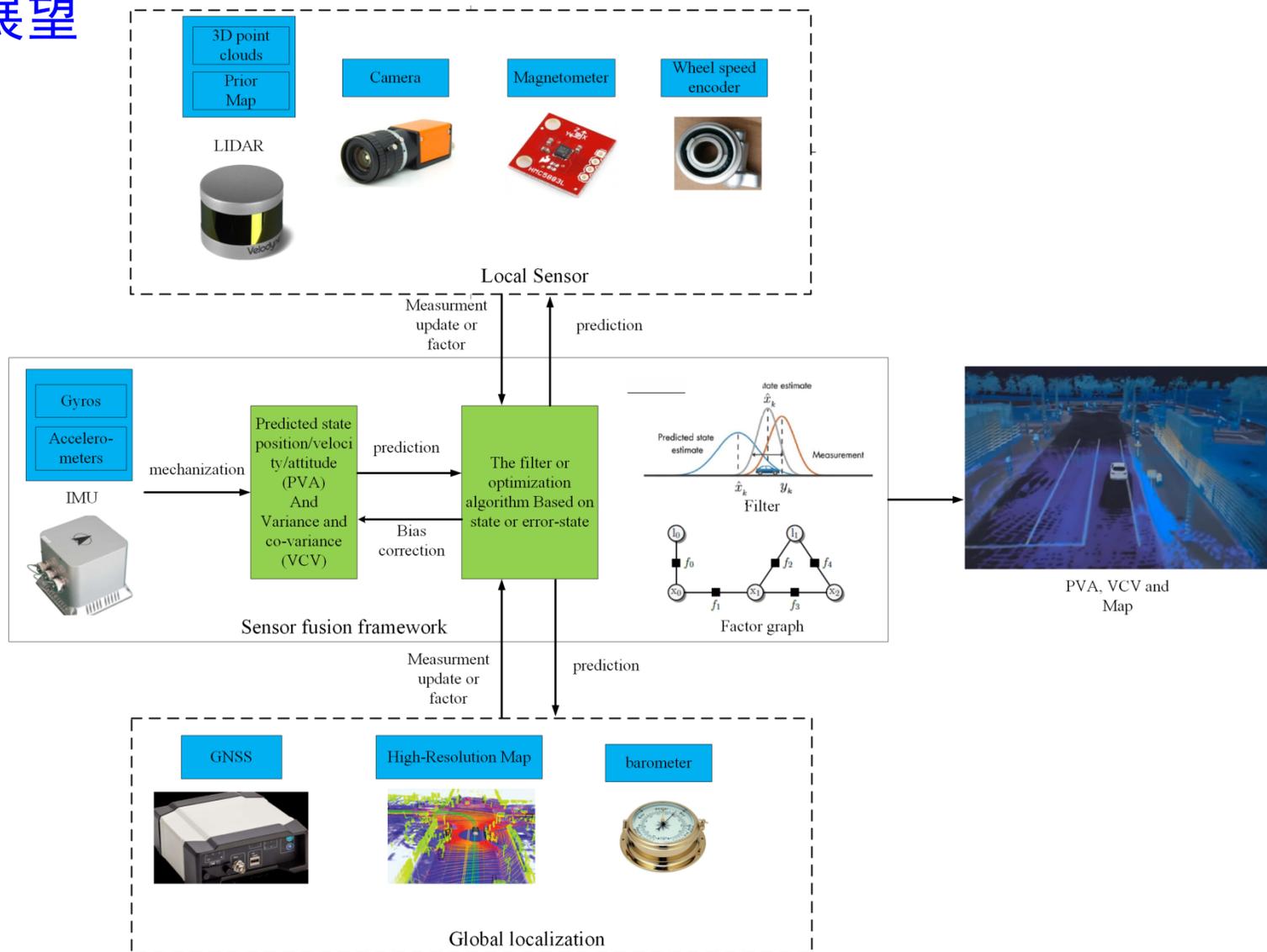
◆ PPP-AR 与PPP-RTK

- ① BDS+3+BDS-2 多频PPP-AR 的首次固定时间只需要25.5分钟，多频多系统可进一步提升PPP-RTK的定位效果
- ② 在空旷环境下PPP-RTK可以实现实时厘米级的定位精度；在城市复杂环境内如经过隧道，仅需数秒即可实现重新收敛

◆ VIO增强 PPP

- ① INS增强可以提升PPP-RTK在复杂环境中的固定率与定位精度
- ② 提出了VIO 增强 PPP 紧组合的方法，可以提升PPP导航性能

展望



**GNSS+INS+Vision
+LiADR+高精度地图+轮速计...**

**采用更多的传感器融合获得更准确
更连续更稳健的导航定位效果**



PVA, VCV and Map



Thank you for your attention!

xxli@sgg.whu.edu.cn

<http://igmas.users.sgg.whu.edu.cn>