

GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching



高中低轨卫星网络精密轨道确定及 导航定位增强

李星星，张柯柯，袁勇强，李昕等

武汉大学测绘学院

2020年11月12日



一、背景及意义

二、低轨卫星精密定轨

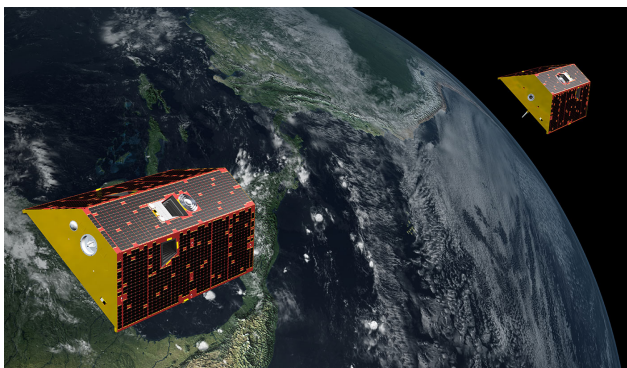
三、导航卫星定轨模型精化

四、高中低轨卫星联合定轨

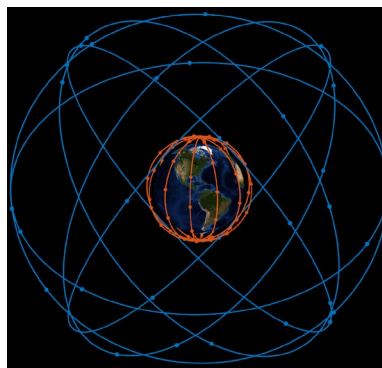
五、低轨增强PPP/RTK

低轨星座蓬勃发展

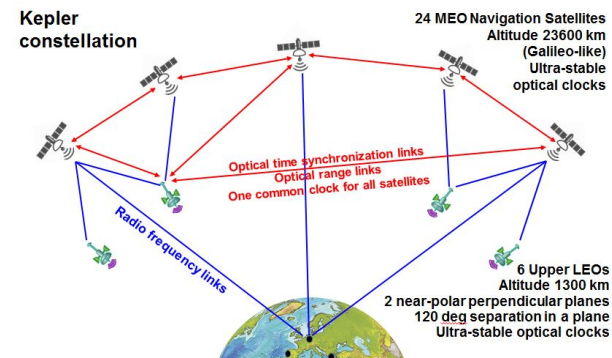
- ✓ 低轨卫星作为**高精度对地观测平台**，被广泛应用于海洋测高、重力场反演、大气监测等众多领域，并且发挥了巨大的作用。
- ✓ 近年来，**大型低轨星座**成为国内外发展的前沿与热点。已公布的低轨卫星计划**超过15个**，涉及**上万颗低轨卫星**。
- ✓ 部分星座兼具**导航星**功能，能自主播发**导航测距信号**(鸿雁、虹云、微厘空间等)。
- ✓ 2025年前我国**北斗**将建成**天基低轨星座增强系统**，在全球范围提供厘米级定位服务。



GRACE-FO



GPS + Iridium



Galileo + Kepler



中高轨导航卫星

VS

低轨导航卫星

优势

- 轨道高，单星覆盖面积大；
- 摄动力简单，精密定轨与预报难度较小；
- 大气阻力影响小，卫星寿命长。

不足

- 轨道高，信号弱，抗多径防欺骗性能差；
- 几何图形变化慢，影响收敛速度；
- BDS GEO轨道精度低。

优势

- 轨道低，功率衰减少，**接收信号强度高**，有利于遮蔽环境下及室内的定位；
- 运行速度快，**几何图形变化快**，有利于模糊度快速收敛，实现快速精密定位。

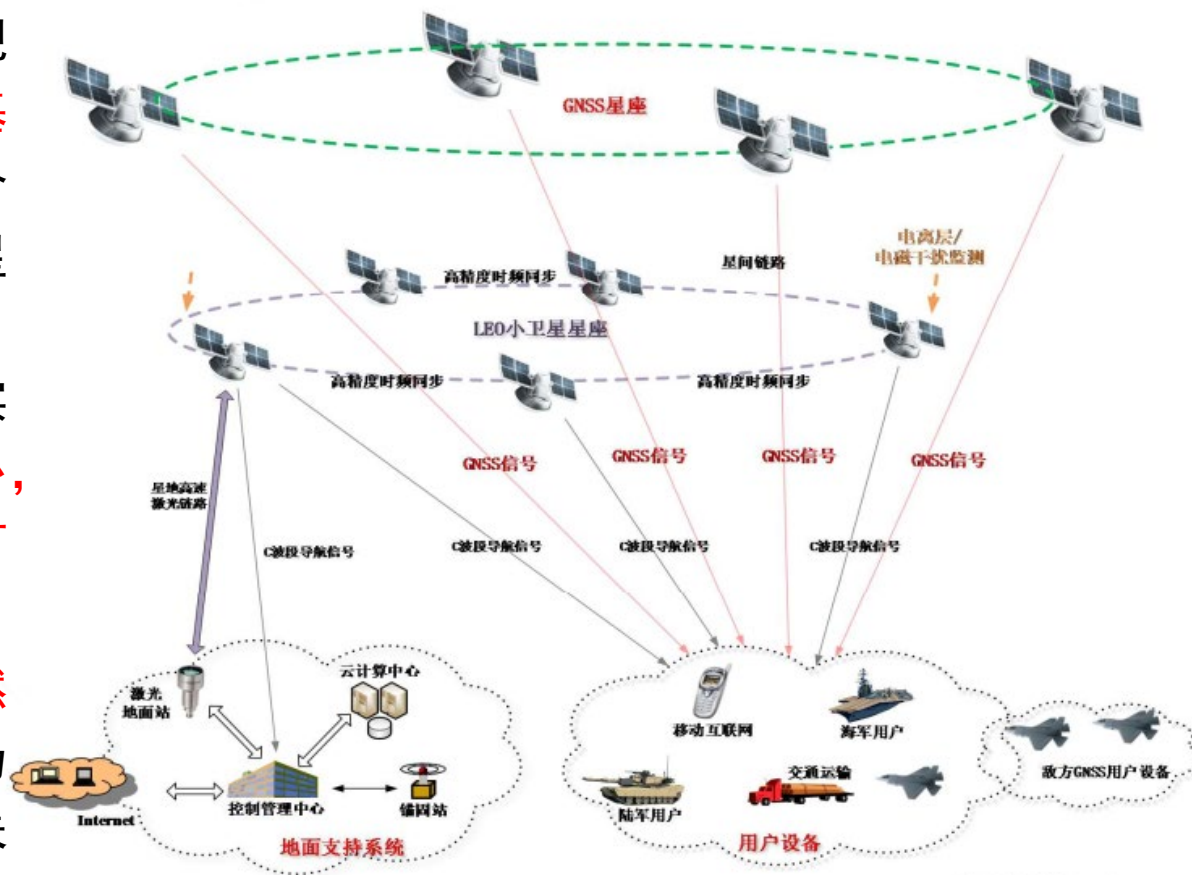
不足

- 轨道低，单星覆盖面积小；
- 摄动力复杂，精密定轨与预报难度大；
- 大气阻力影响大，卫星寿命短。

低轨卫星以其星座和信号的独特优势，逐步受到卫星导航领域的关注和青睐，将成为下一代卫星导航系统发展的关注重点

研究意义

- ✓ 高精度的卫星轨道是实现高精度定位服务的**关键基础**。高/中/低轨卫星联合定轨，可以提高各类卫星定轨精度。
- ✓ 低轨增强GNSS，可以实现高中低轨卫星**优势互补**，为用户提供**精度更高，可靠性更强**的位置服务。
- ✓ 拓展我国北斗事业的**必然需求**，符合以北斗系统为代表的卫星导航系统的未来发展趋势。



一、背景及意义

二、低轨卫星精密定轨

三、导航卫星定轨模型精化

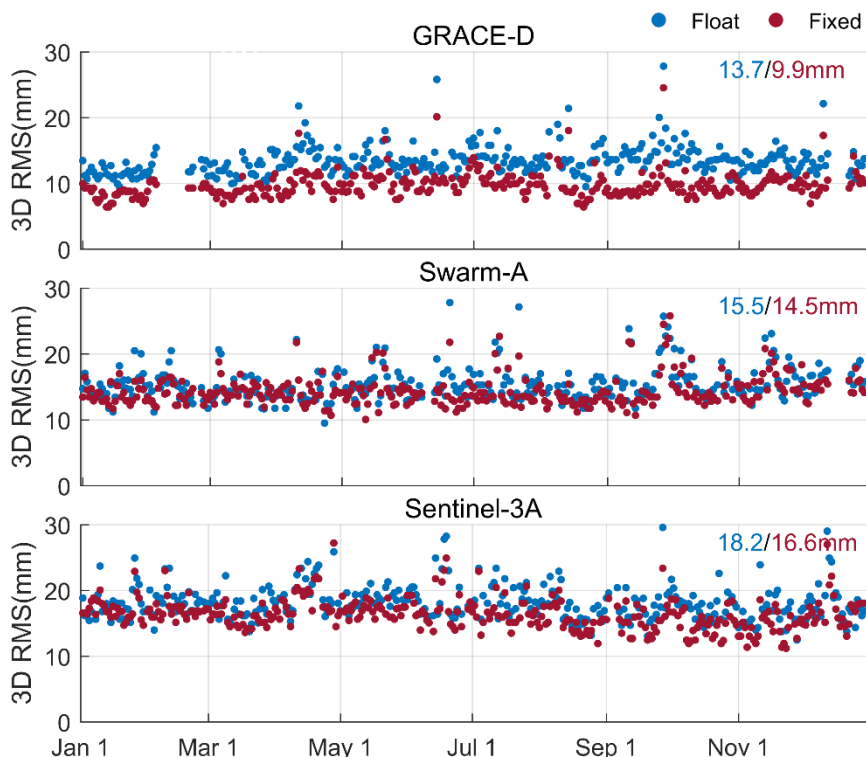
四、高中低轨卫星联合定轨

五、低轨增强PPP/RTK

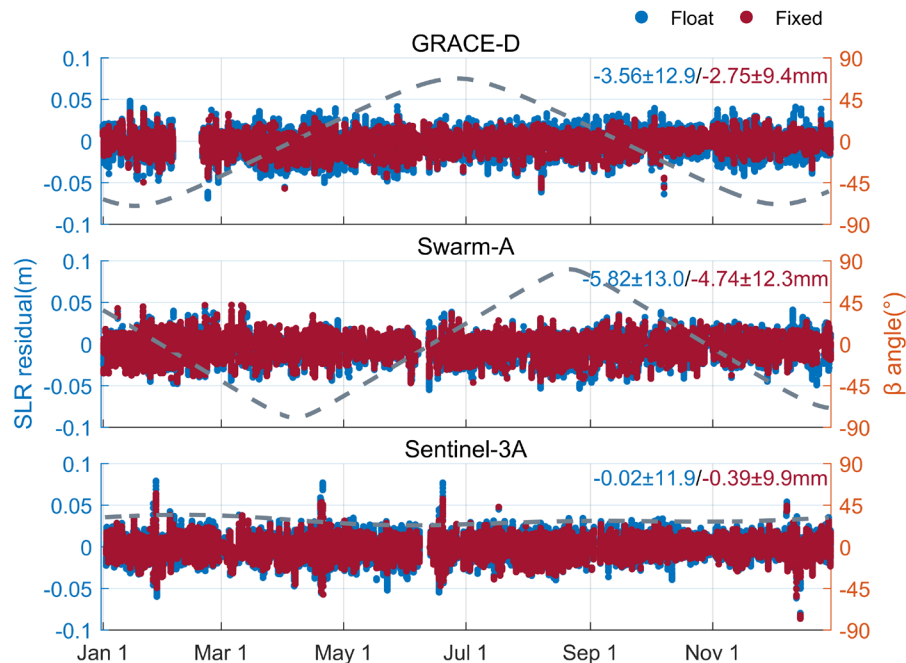
低轨卫星精密定轨



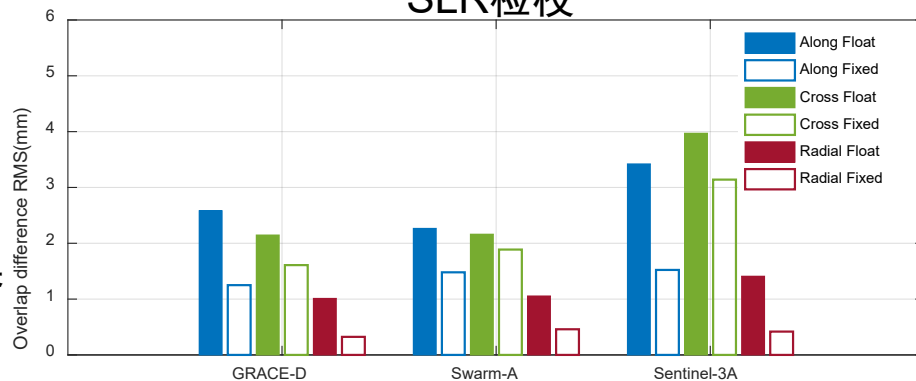
基于非差固定解的LEO简化动力学定轨



外部产品比较



SLR检校



重叠轨道比较

- ✓ 非差固定解能显著提高低轨卫星定轨精度。
- ✓ 模糊度固定后，部分LEO卫星SLR检校结果可以达到亚厘米级。

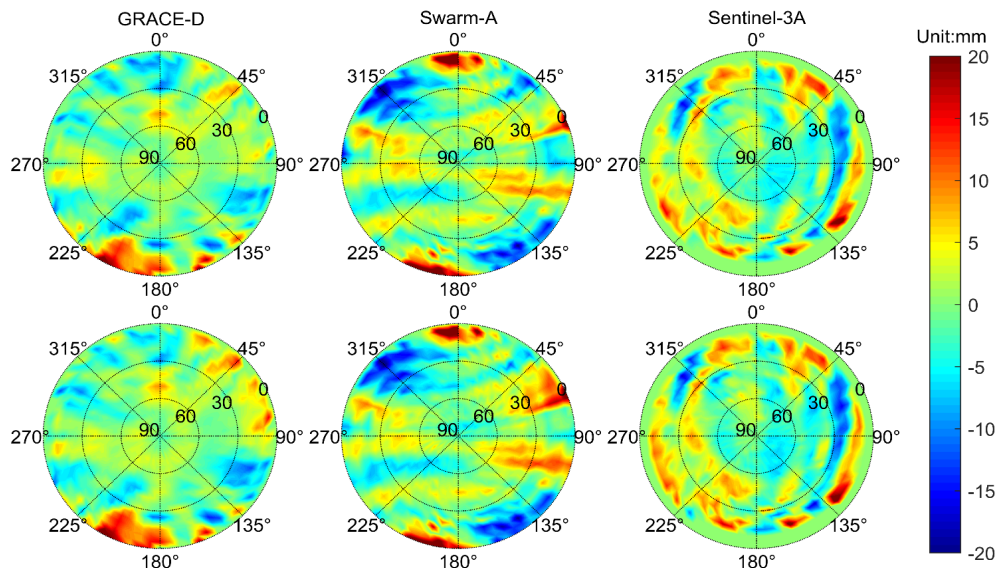
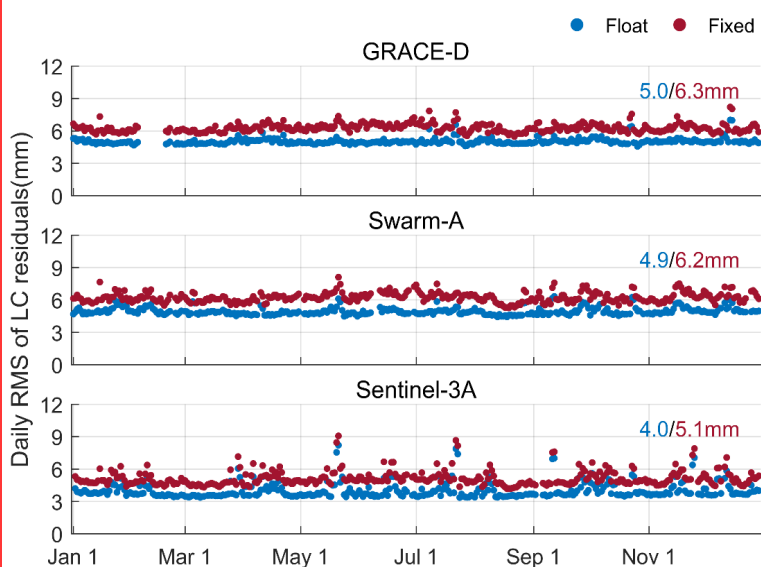
低轨卫星精密定轨

GREAT

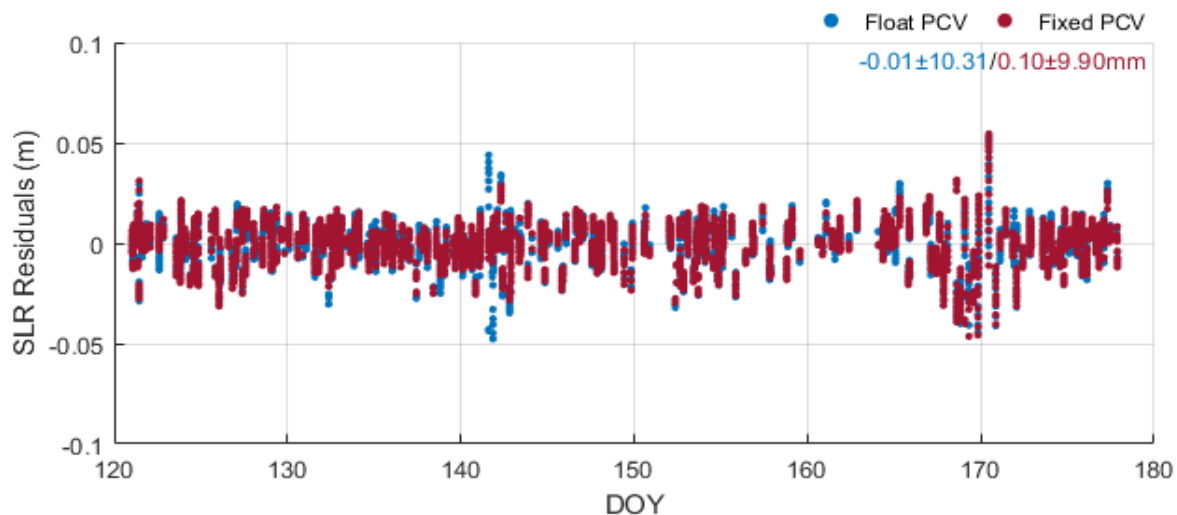
GNSS+ REsearch, Application and Teaching



基于非差固定解的LEO简化动力学定轨

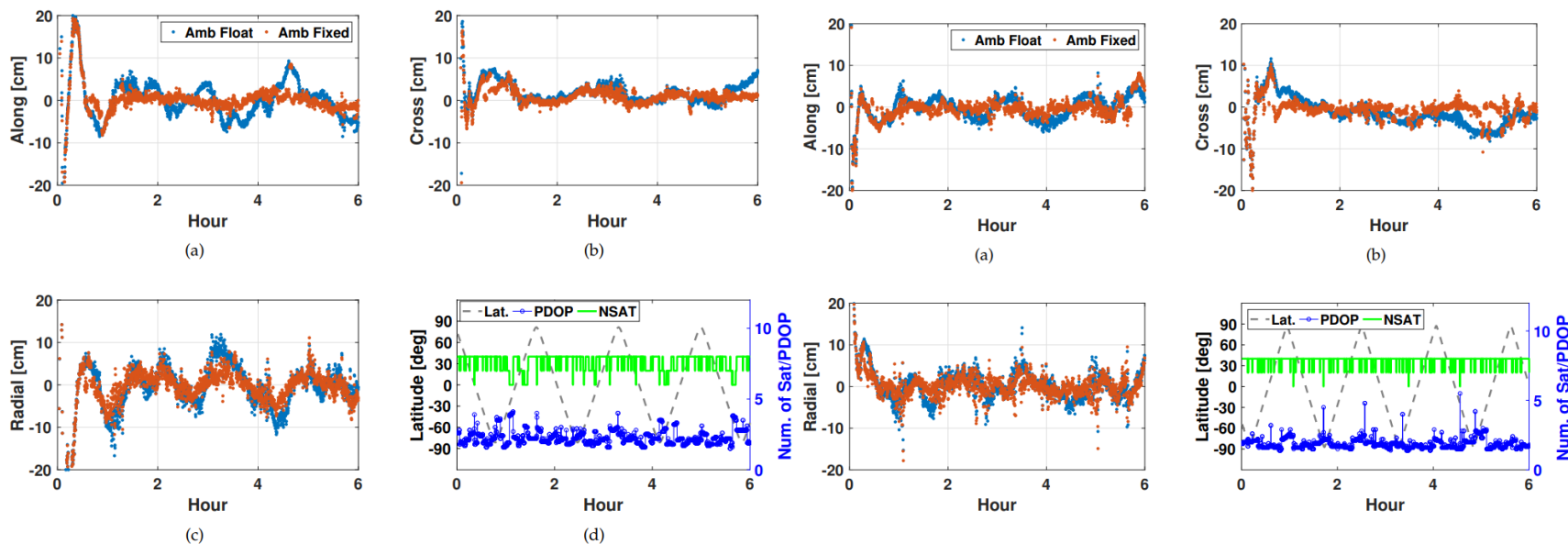


✓ 基于固定解残差得到低轨卫星PCV可以进一步提高低轨卫星的定轨精度。





基于非差固定解的LEO实时几何法精密定轨



Sentinel-3A与科学轨道产品比较结果

Swarm-A科学轨道产品比较结果

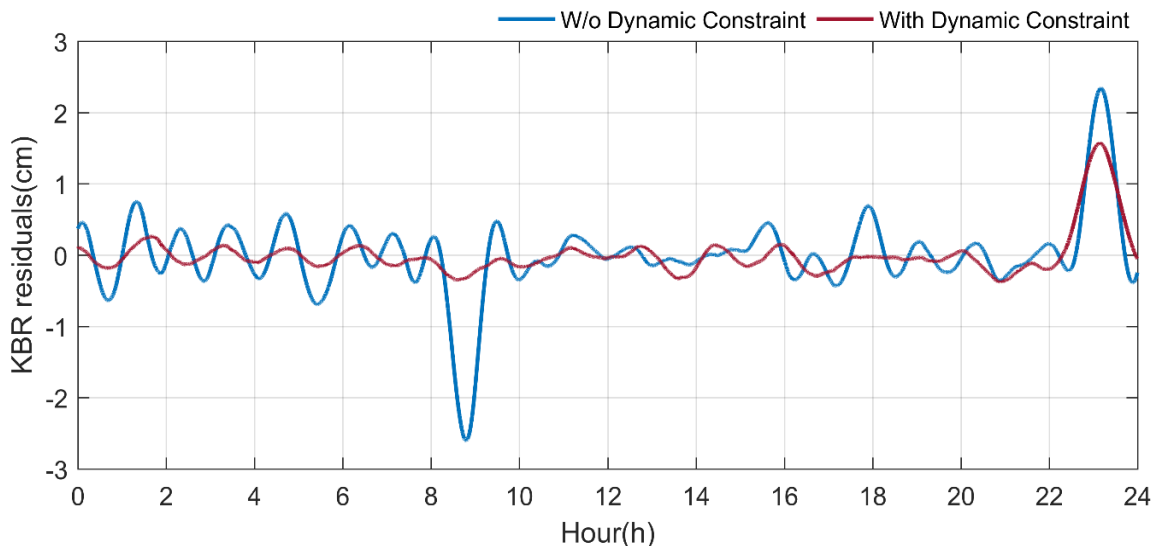
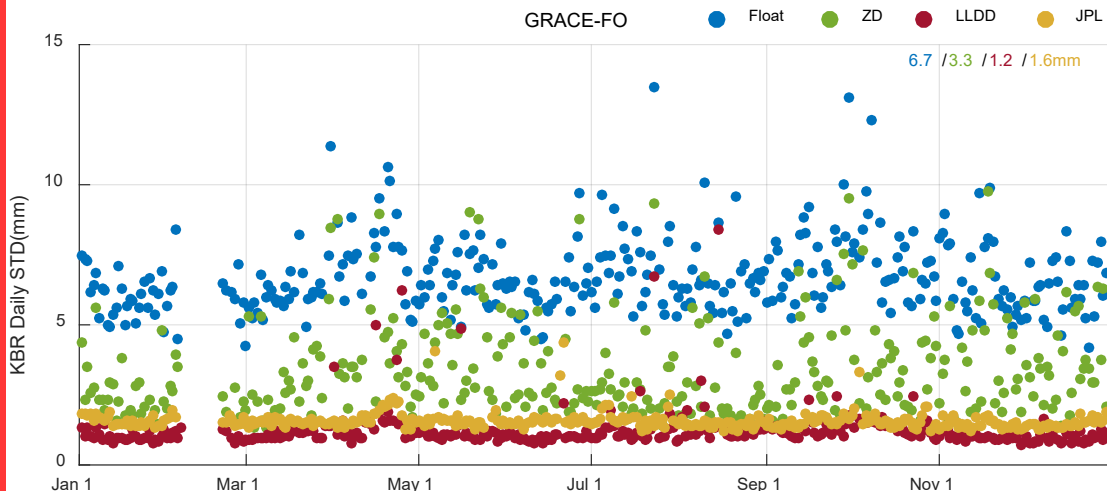
	Sentinel-3A		Swarm-A	
	Amb. Float	Amb. Fixed	Amb. Float	Amb. Fixed
Along (cm)	4.46	3.11	3.16	2.28
Cross (cm)	3.06	2.19	2.63	2.02
Radial (cm)	4.68	3.59	3.32	2.61
3D RMS (cm)	7.15	5.23	5.29	4.01

✓ 固定模糊度后，LEO卫星的几何法实时定轨精度得到了显著的提高。

低轨卫星精密定轨



基于固定解的低轨编队相对定轨



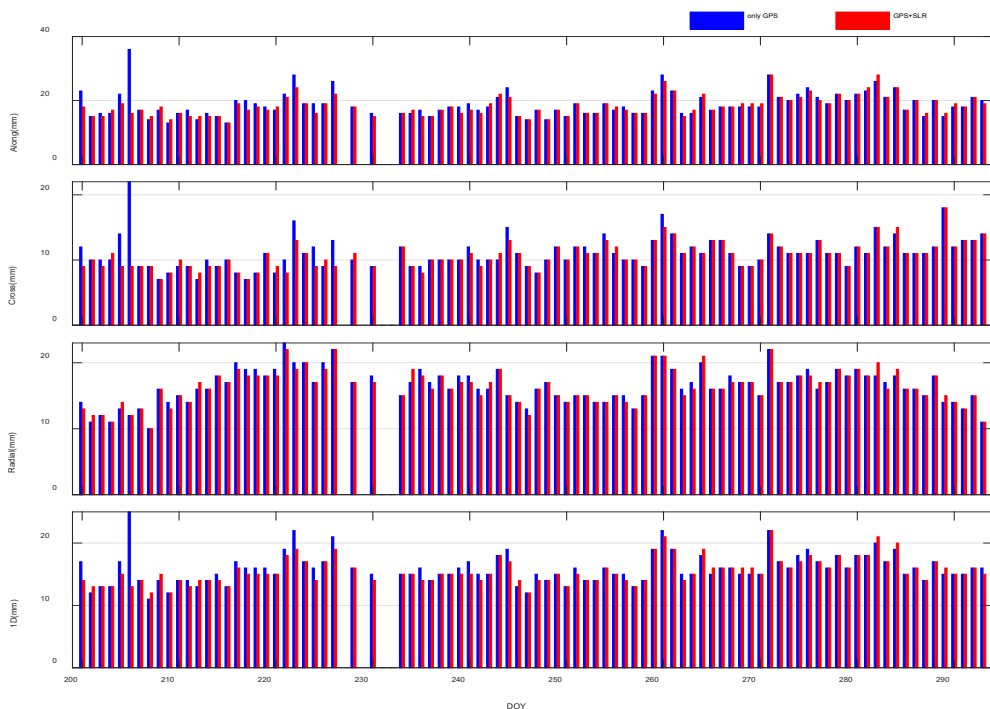
- ✓ 与浮点解相比，非差固定和星间双差固定解的相对定轨精度分别提升了51%和82%。
- ✓ 星间双差固定解基线相对精度优于JPL提供的科学轨道产品。
- ✓ 编队卫星之间的动力学约束可以进一步提高相对定轨精度。

Solution	W/o DYN. CON.	With DYN. CON.
Zero-difference	3.34 mm	2.60mm
Double-difference	1.24 mm	1.13 mm

低轨卫星精密定轨

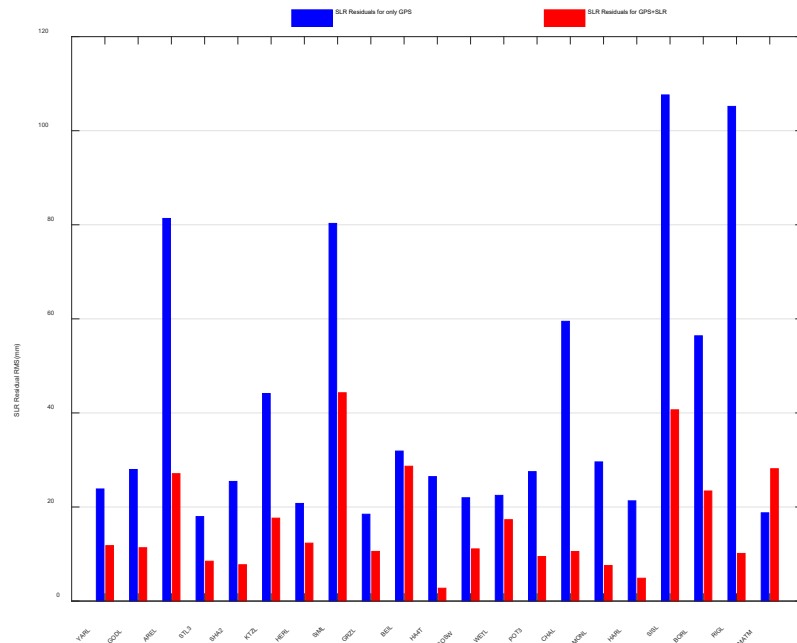


联合SLR+GPS观测值的LEO精密轨道确定



GRACE-C单GPS定轨与GPS+SLR定轨与参考轨道比较

	Along/mm	Cross/mm	Radial/mm	1D/mm
Only GPS	18.45	10.85	16.10	15.58
GPS+SLR	17.91	10.47	15.99	15.18



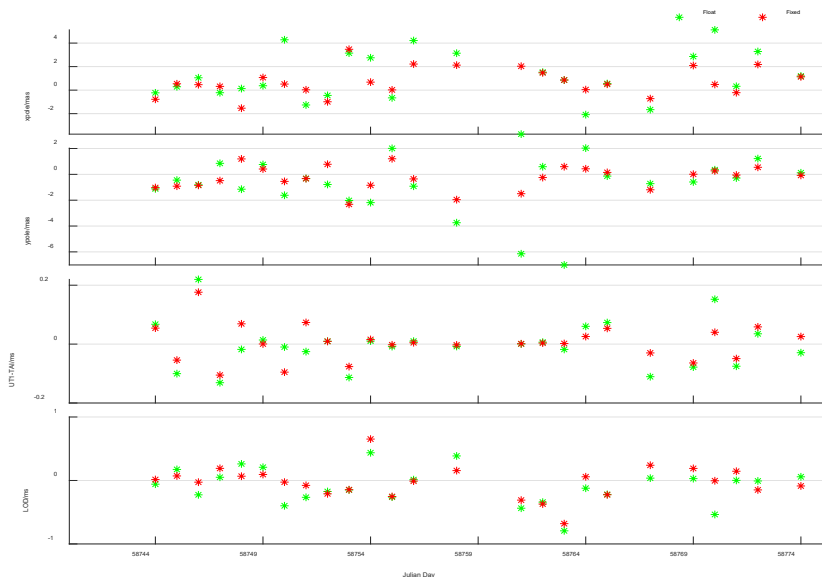
每个ILRS测站SLR残差RMS统计

✓ 加入SLR观测值能够提高低轨卫星的轨道精度。

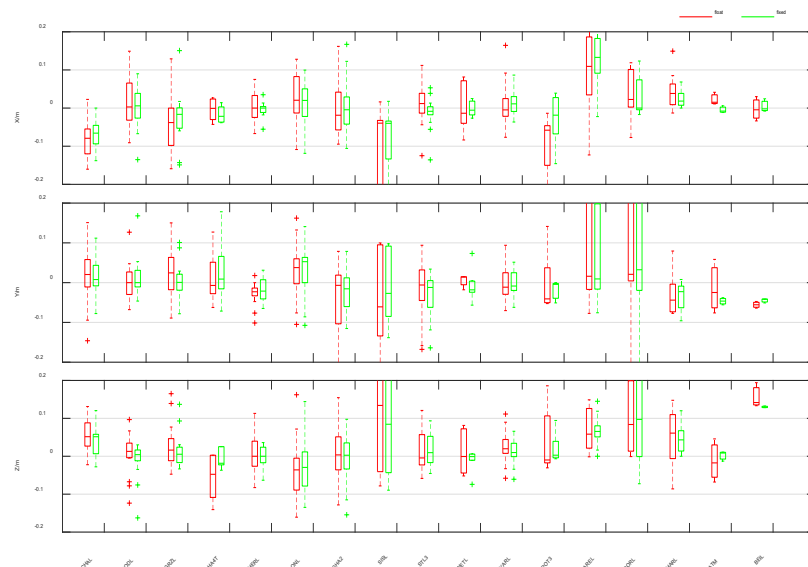
低轨卫星精密定轨



联合LEO卫星SLR+GNSS观测值估计ERP参数



3天解与IERS ERP比较结果



估计的测站坐标与SLRF2014比较结果

✓ 模糊度固定技术能够显著提升ERP参数的估计精度。Xpole, Ypole, UT1-TAI和LOD 与IERS产品比较RMS分别减少了42%, 59%, 23%和16%。

Solution	X pole/mas		Y pole/mas		UT1-TAI/ms		LOD/ms	
	mean	RMS	mean	RMS	mean	RMS	mean	RMS
Float	0.992	2.352	-0.882	2.279	-0.002	0.078	-0.093	0.295
Fixed	0.719	1.362	-0.284	0.930	0.005	0.060	-0.027	0.247



一、背景及意义

二、低轨卫星精密定轨

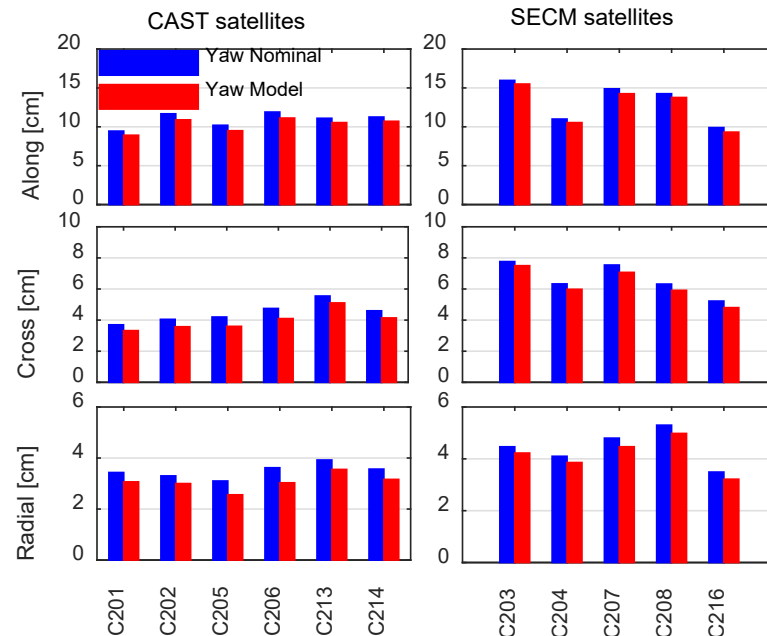
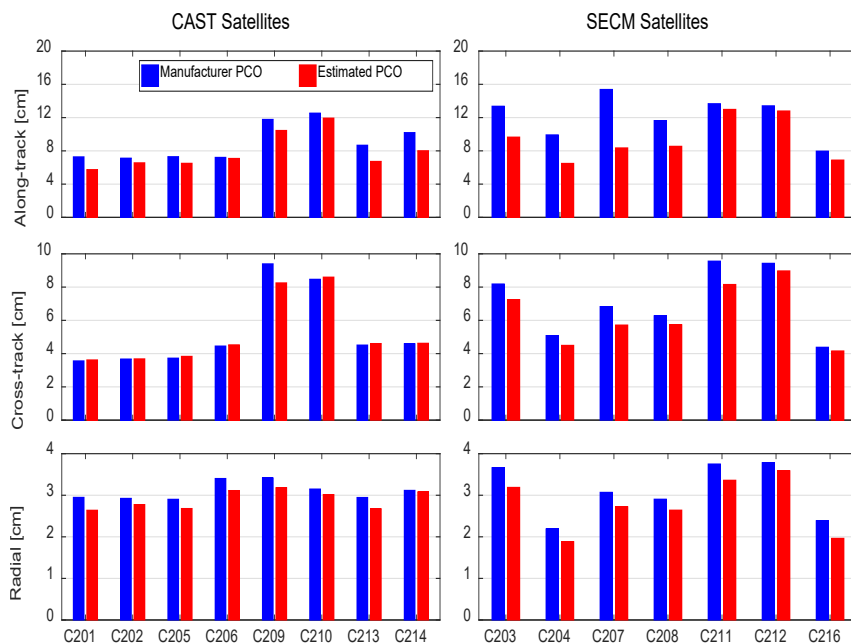
三、导航卫星定轨模型精化

四、高中低轨卫星联合定轨

五、低轨增强PPP/RTK



□ BDS-3卫星模型精进



BDS-3卫星使用不同PCO定轨结果的24小时重叠轨道RMS

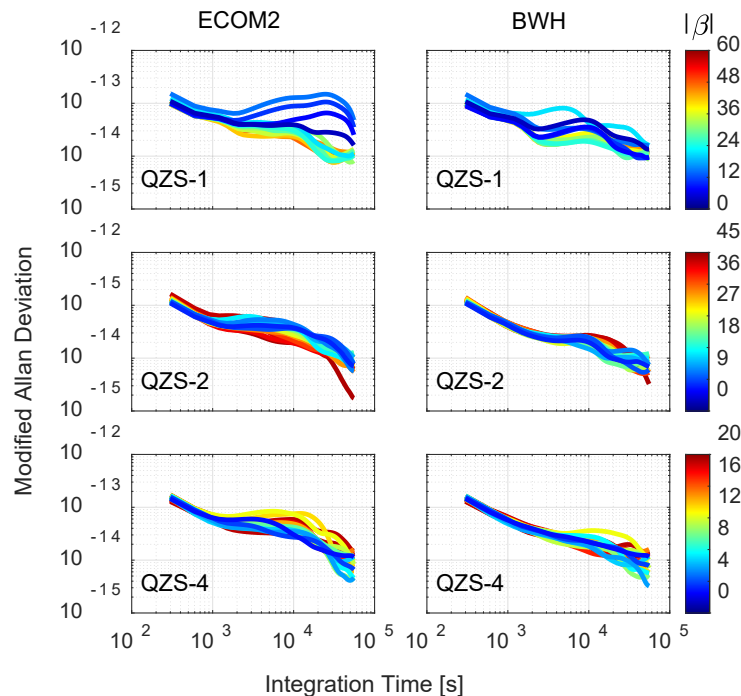
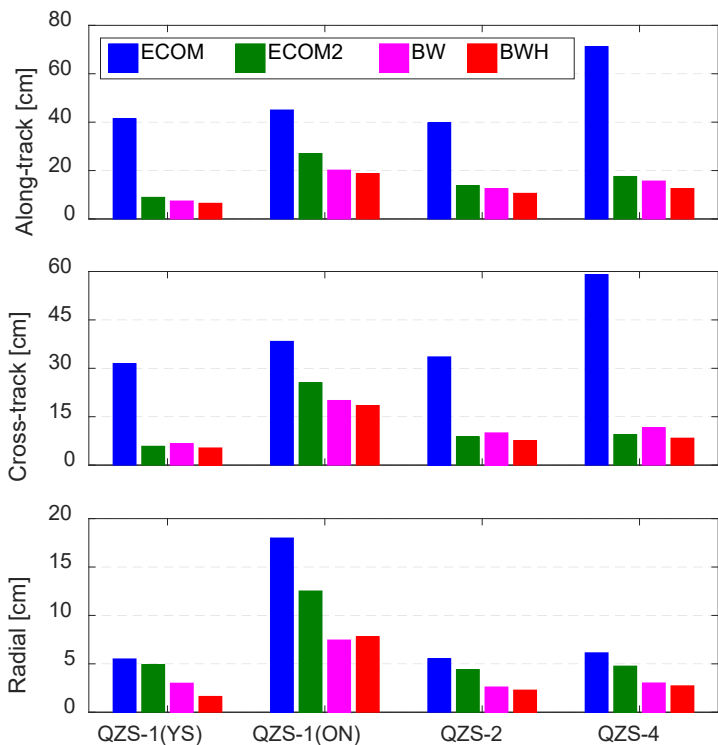
不同姿态模型定轨结果的重叠轨道误差

- ✓ 相比于制造商提供的初值，使用估计的PCO值可以提升BDS-3卫星定轨精度：
 - 对于CAST卫星，提升 9.7%
 - 对于SECM卫星，提升 19.4%

- ✓ 姿态建模能够有效减小重叠轨道误差：
 - 对于CAST卫星，减小(0.6, 0.5, 0.4) cm
 - 对于SECM卫星，减小(0.5, 0.4, 0.3) cm



□ QZSS IGSO卫星模型精进



不同QZSS光压模型定轨结果24-h重叠轨道比较

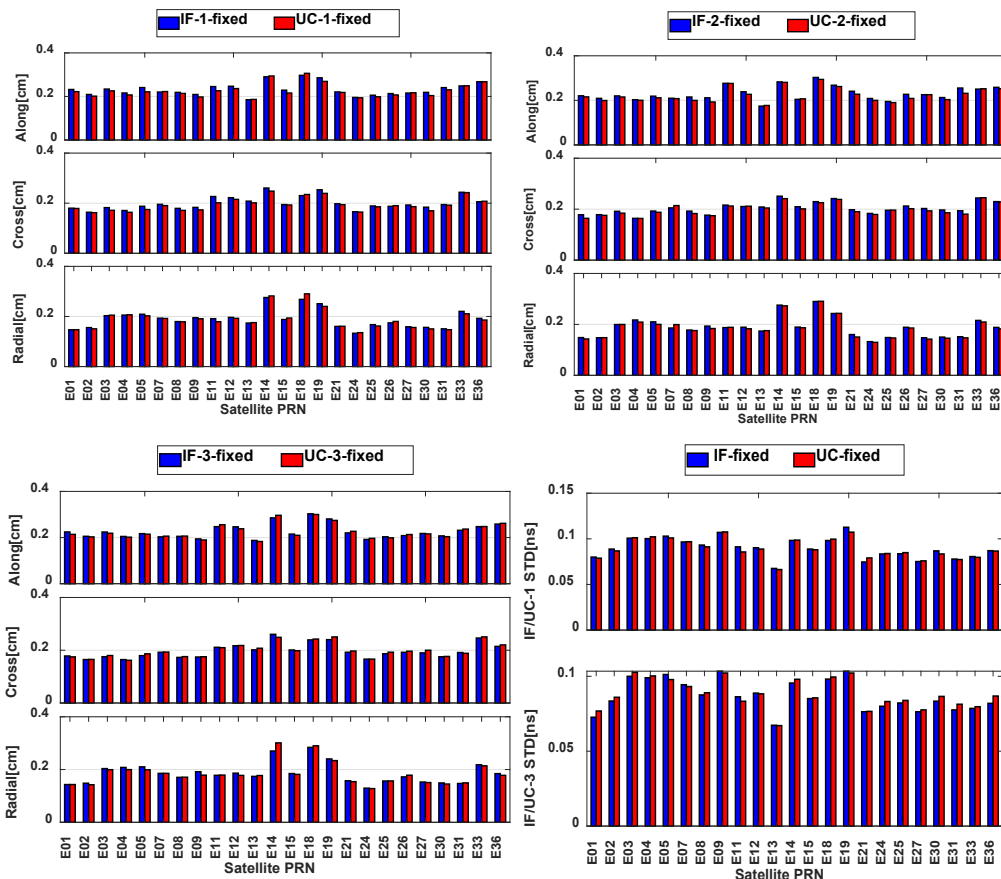
不同QZSS光压模型钟差估计结果的改进阿兰方差

✓ 先验Box-wing-hat模型的定轨与估钟结果优于ECOM(2) 与先验Box-wing模型



基于非组合观测值的精密定轨

- ✓ 使用相同观测值时，UC和IF策略定轨结果的精度差异很小，两者在切向、法向与径向差异均在1 mm以内。
- ✓ 三频观测值定轨固定解与双频定轨固定解的1D RMS平均值相互之间差异小于1 mm。
- ✓ 四种策略所有卫星的钟差STD平均值相互间差异小于0.01 ns，可以认为钟差精度基本一致。



双频和三频UC/IF策略定轨结果与CODE精密产品互差结果（2019年080-120）

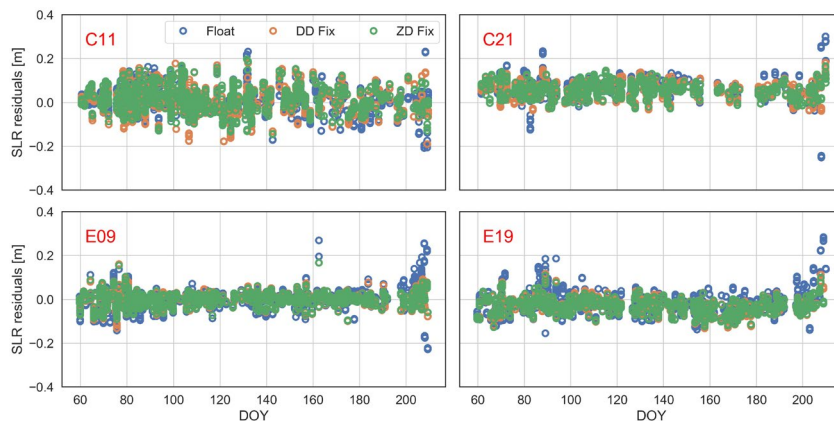
频率	组合	钟差基准	标识
E1/E5a	IF	IF E1/E5a	IF-1
E1/E5a	UC	IF E1/E5a	UC-1
E1/E5b	IF	IF E1/E5b	IF-2
E1/E5b	UC	IF E1/E5b	UC-2
E1/E5a/E5b	IF	IF E1/E5a	IF-3
E1/E5a/E5b	UC	IF E1/E5a	UC-3



基于非差固定解的精密定轨/估钟



Day boundary结果（左：北斗，右：Galileo）



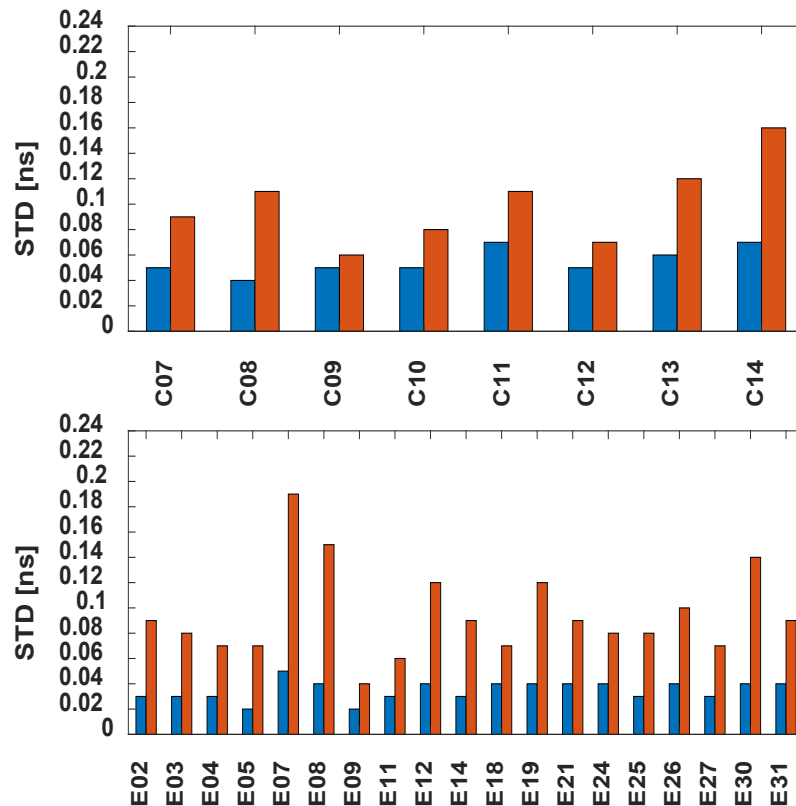
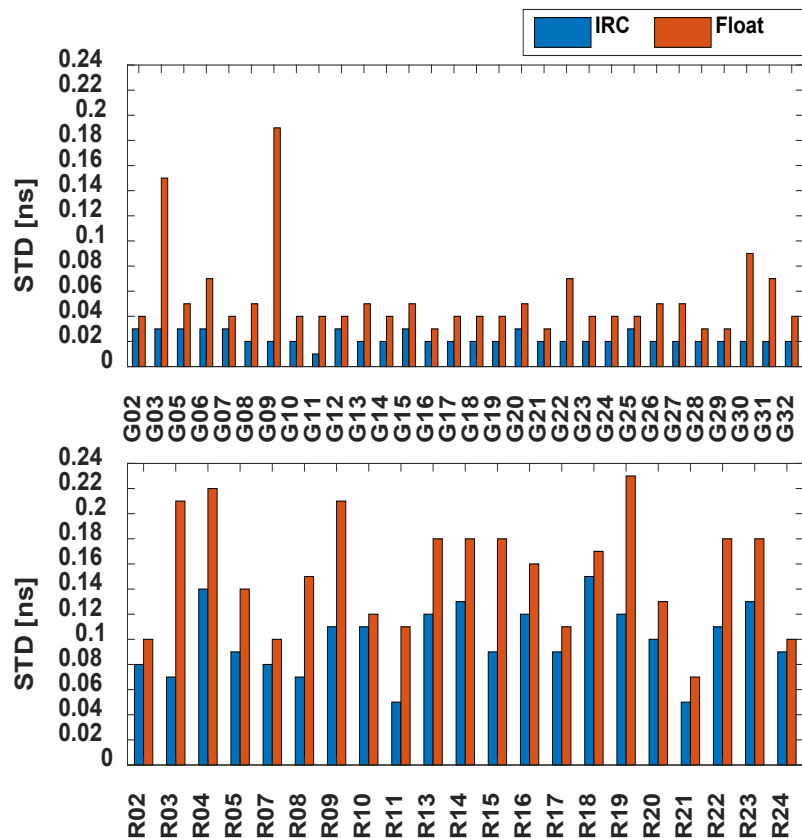
SLR残差序列图

- ✓ BDS-2I、BDS-2M、BDS-3M 和 Galileo 卫星的 Day Boundary 分别提升了 27、40、38 和 18%；
- ✓ BDS-2M、BDS-3M 和 Galileo 卫星 SLR 残差 STD 分别减少了 0.21、0.27 和 0.14 cm。

导航卫星定轨模型精化



基于非差固定解的精密定轨/估钟



实时整数钟相比于浮点钟精度提升明显

- ✓ GPS: 0.046 ns 提高到 0.022 ns
- ✓ GLONASS: 0.153 ns 提高到 0.101 ns
- ✓ BDS: 0.096 ns 提高到 0.055 ns
- ✓ Galileo: 0.097 ns 提高到 0.035 ns



一、背景及意义

二、低轨卫星精密定轨

三、导航卫星定轨模型精化

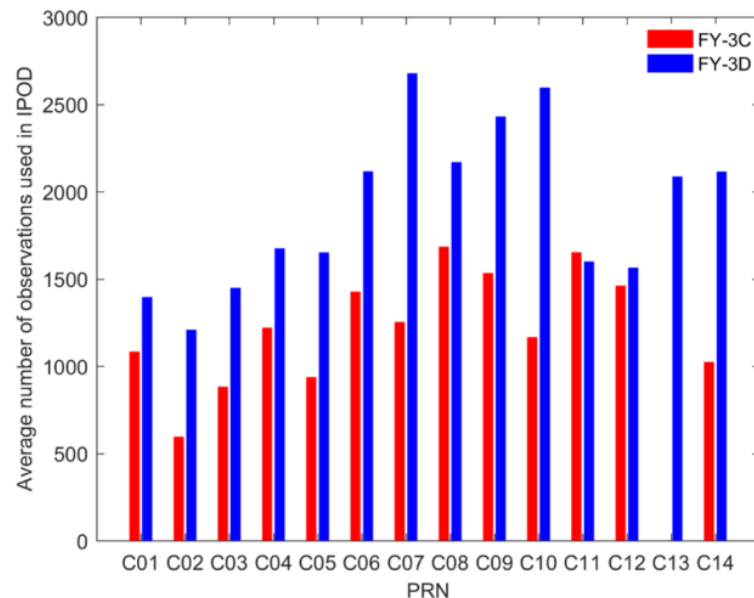
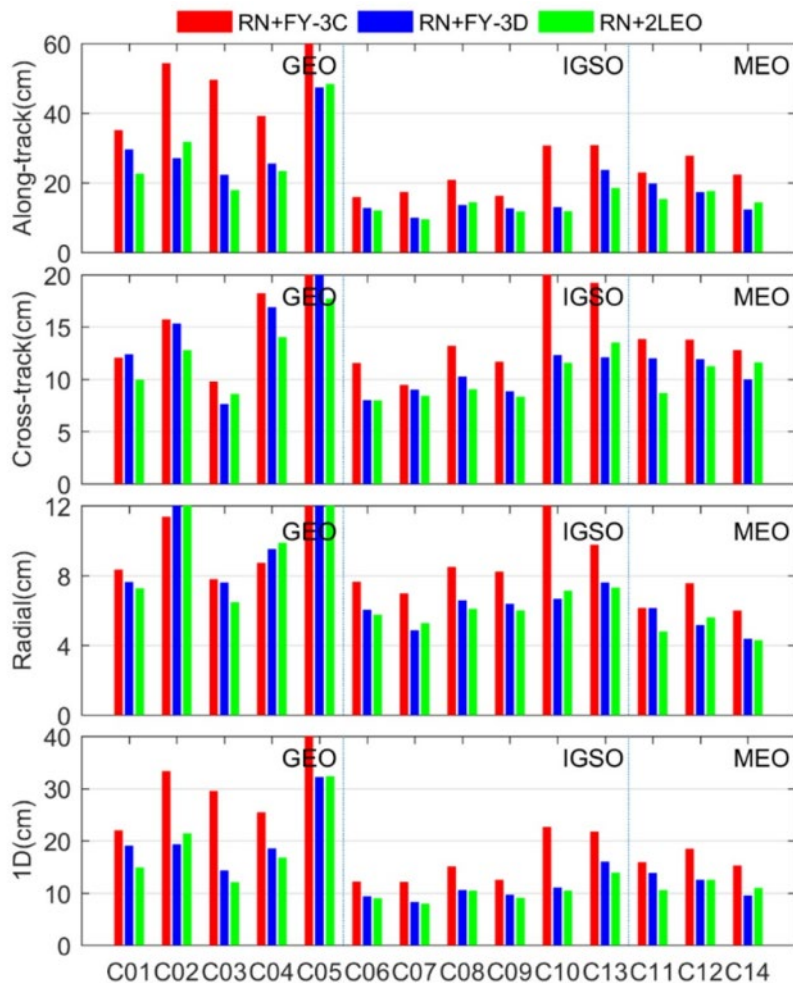
四、高中低轨卫星联合定轨

五、低轨增强PPP/RTK

高中低轨卫星联合定轨



□ FY-3C/FY-3D增强GNSS定轨



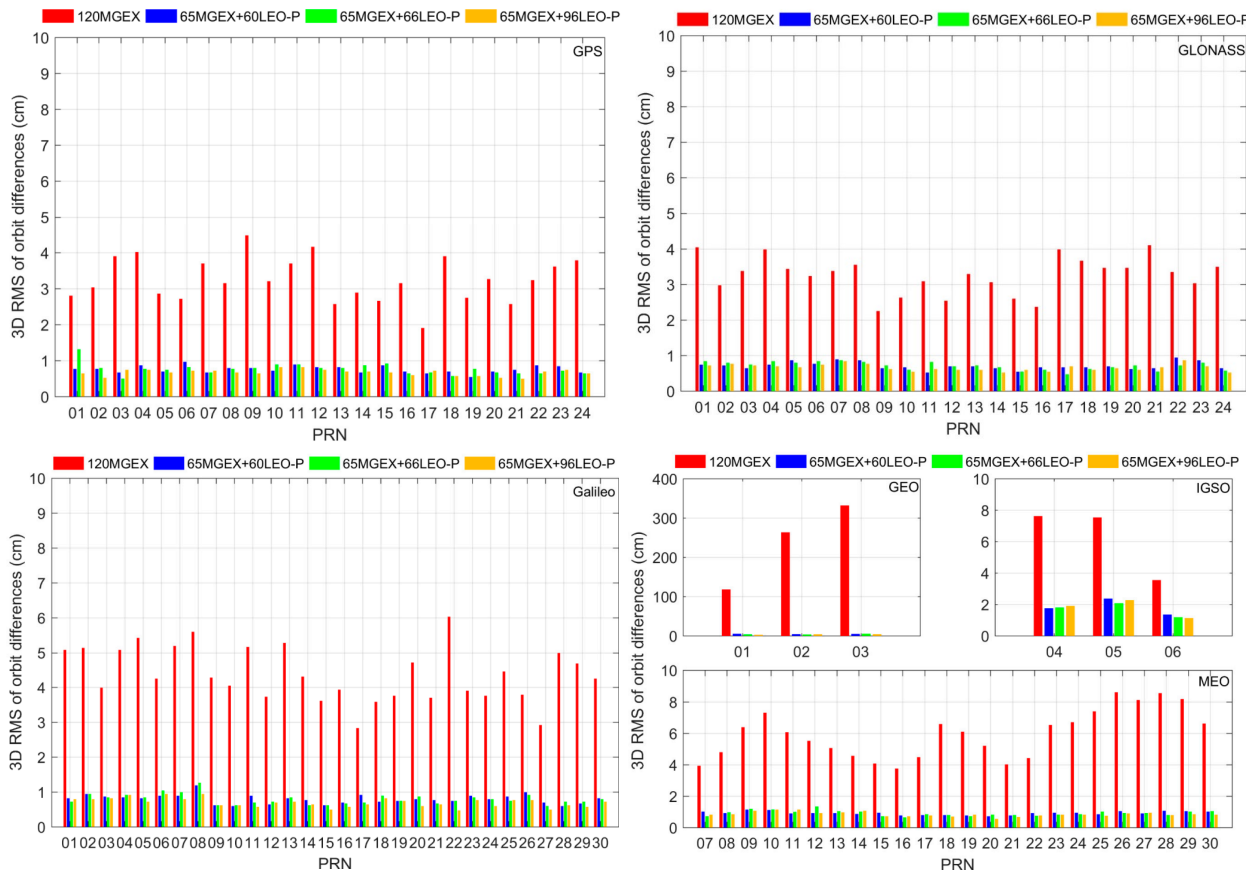
- ✓ FY-3D对BDS卫星轨道具有更强的增强能力。
- ✓ FY-3D+FY-3C两颗卫星联合能够进一步提高BDS卫星的轨道精度。

高中低轨卫星联合定轨



低轨星座增强GNSS定轨—卫星数量影响

- ✓ 仅利用120个地面测站，大部分GNSS卫星的定轨精度优于8cm。
- ✓ 引入低轨卫星星载数据之后，所有联合定轨方案的轨道精度均提高了70%以上。其中BDS GEO卫星的精度提升幅度最大，高达98%。
- ✓ 相比于60颗和66颗低轨卫星方案，96颗低轨卫星方案能够取得对导航卫星更好的增强效果，但是其计算时间是其他方案的3.2倍。

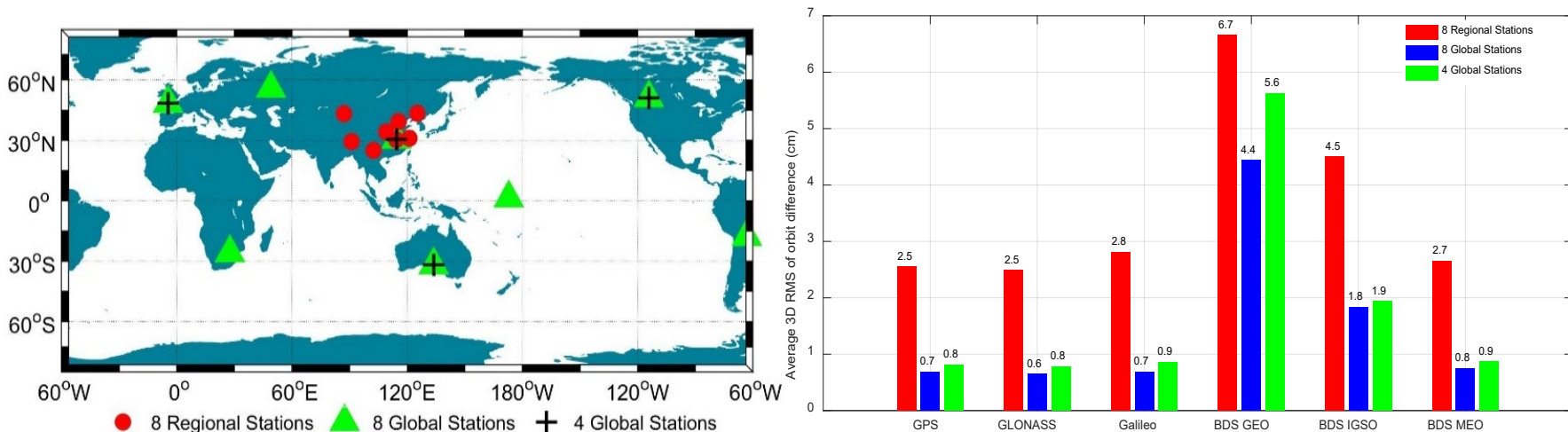


Scheme	65sta	+60leo	+66leo	+96leo
Computation time (h)	0.78	12.58	12.37	38.86

高中低轨卫星联合定轨



低轨星座增强GNSS定轨—测站数量与分布影响

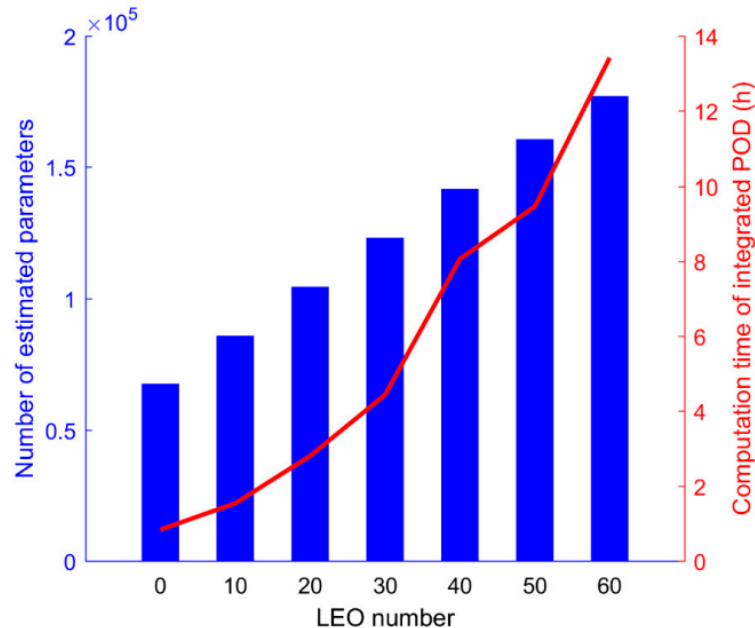
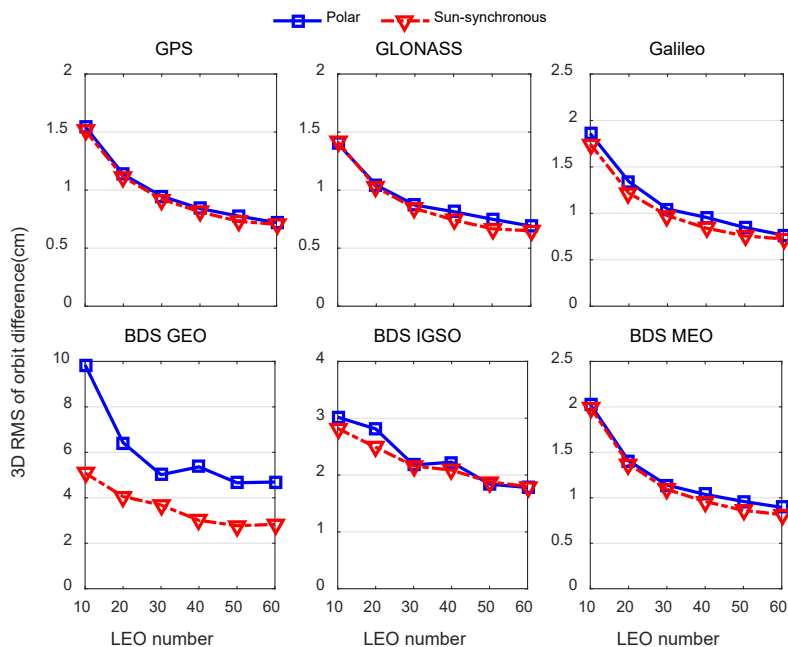


- ✓在测站数量相同的情况下，全球测站参与的联合定轨方案精度更高。
- ✓利用8个区域测站和60颗太阳同步轨道卫星的定轨精度要明显优于仅用65个MGEX测站网所得到的GNSS轨道。

大量低轨卫星的引入能够显著降低GNSS卫星定轨对于地面测站的依赖，此时地面测站分布对于联合定轨的影响要明显大于测站数量的影响。



低轨星座增强GNSS定轨—部分LEO参与



- ✓ 加入LEO卫星数量越多，GNSS卫星定轨精度越高，但是同时精度提升的幅度减小，计算时间显著增加。
- ✓ 在相同数量LEO卫星条件下，太阳同步轨道要明显优于极轨道。

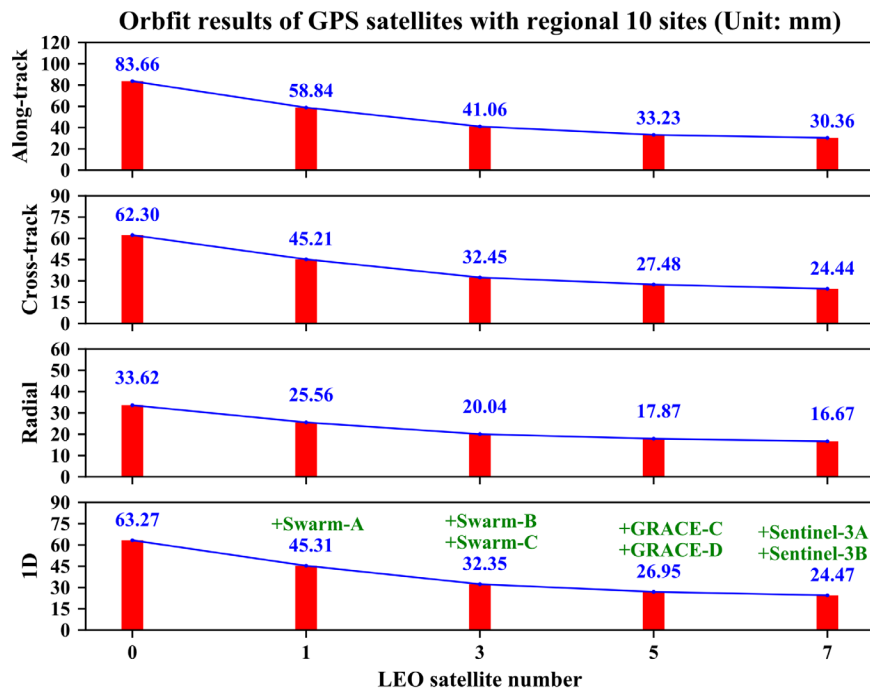
高中低轨卫星联合定轨

GREAT

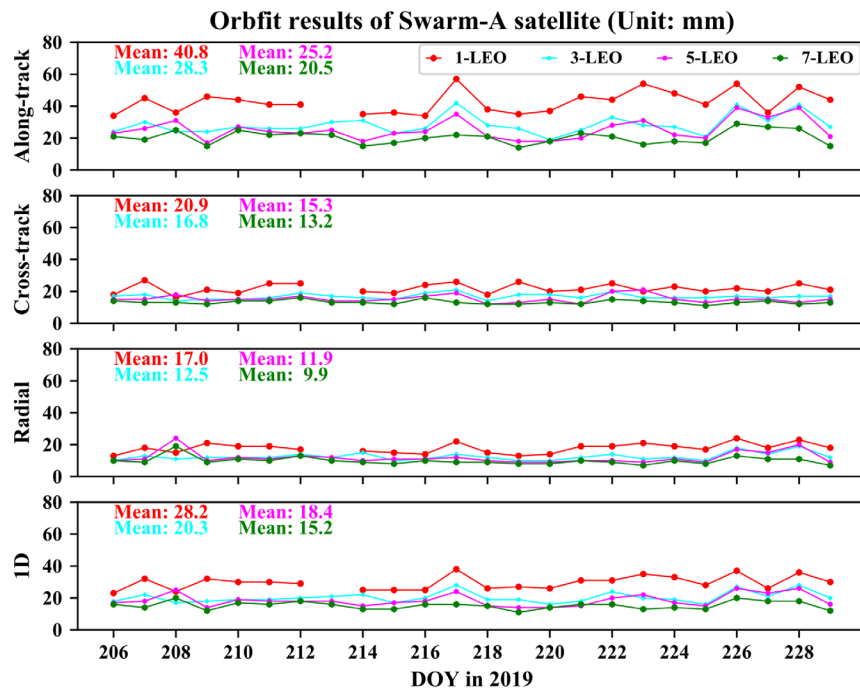
GNSS+ REsearch, Application and Teaching



多颗LEO卫星与GNSS卫星联合精密轨道确定



GNSS卫星精密定轨结果



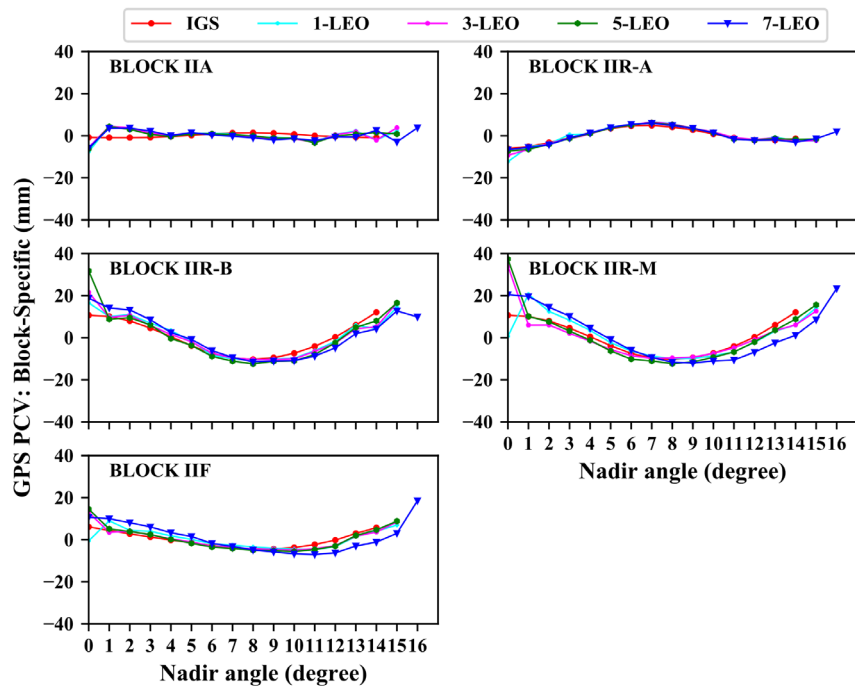
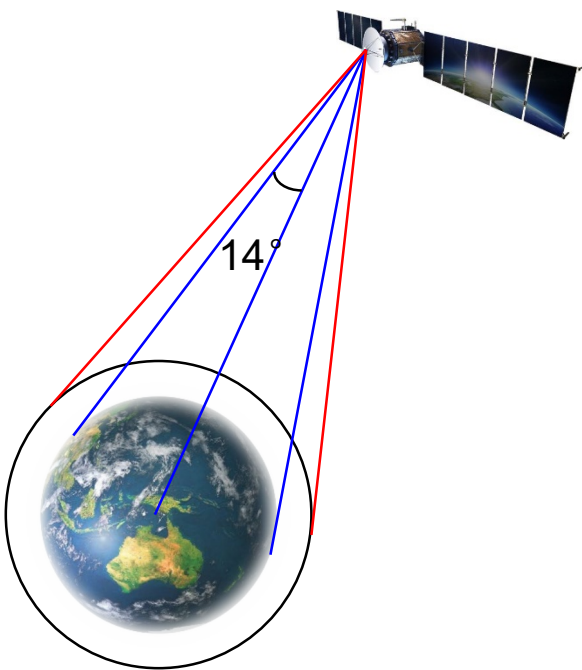
LEO卫星精密定轨结果

- ✓ 区域10测站条件下，随着LEO卫星的增加，GNSS卫星轨道精度逐渐提升，加入7颗LEO时，GNSS卫星轨道平均1D精度能达到2.5cm以内
- ✓ 联合定轨中加入更多LEO卫星，LEO卫星自身轨道精度也能得到提升，区域10测站条件下，随着LEO卫星的增加，LEO卫星自身轨道精度逐渐提升，加入7颗LEO时，Swarm-A卫星轨道平均1D精度能达到1.5cm左右

高中低轨卫星联合定轨



基于LEO星载数据的GNSS卫星PCV估计



- ✓ 由于LEO卫星自身轨道高度，GNSS卫星天底角范围更大（0-17），可扩展地面测站在轨标定模型，并且LEO卫星运动较快，天底角变化快，不受对流层影响，在GNSS卫星PCV估计中更具优势
- ✓ 在区域10测站条件下，加入不同数量LEO卫星，可扩展GNSS卫星天底角估计范围（与LEO卫星轨道高度有关），并且在估计天底角范围内与IGS天线PCV信息有较好的一致性



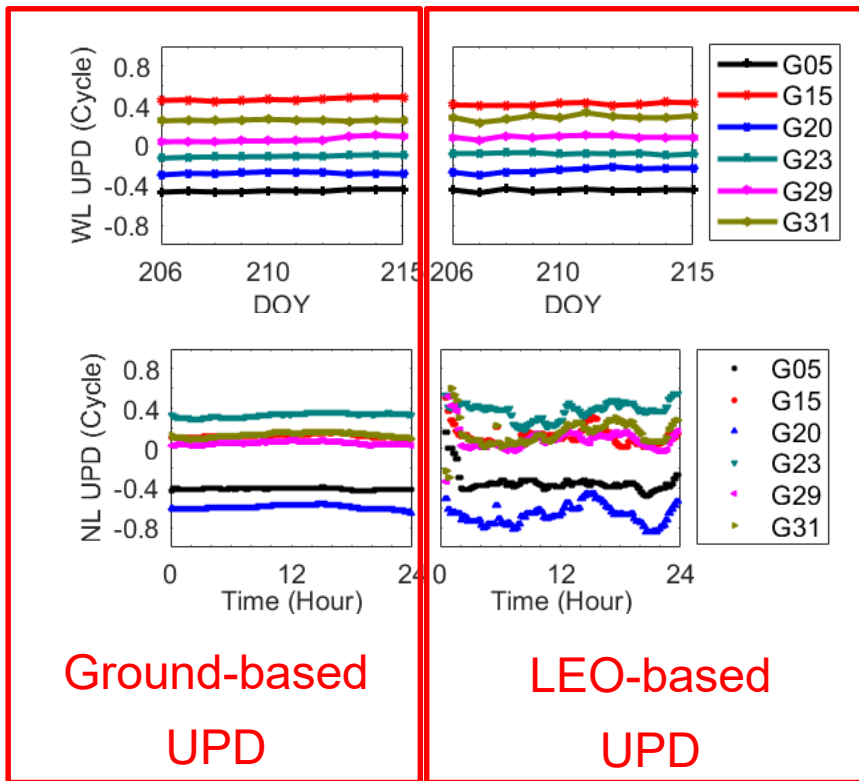
基于LEO星载数据的UPD估计

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

WL、NL UPD的STD均值

	Ground-based UPD	LEO-based UPD
WL	0.016	0.024
NL	0.017	0.083

- ✓ 基于LEO星载观测估计的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



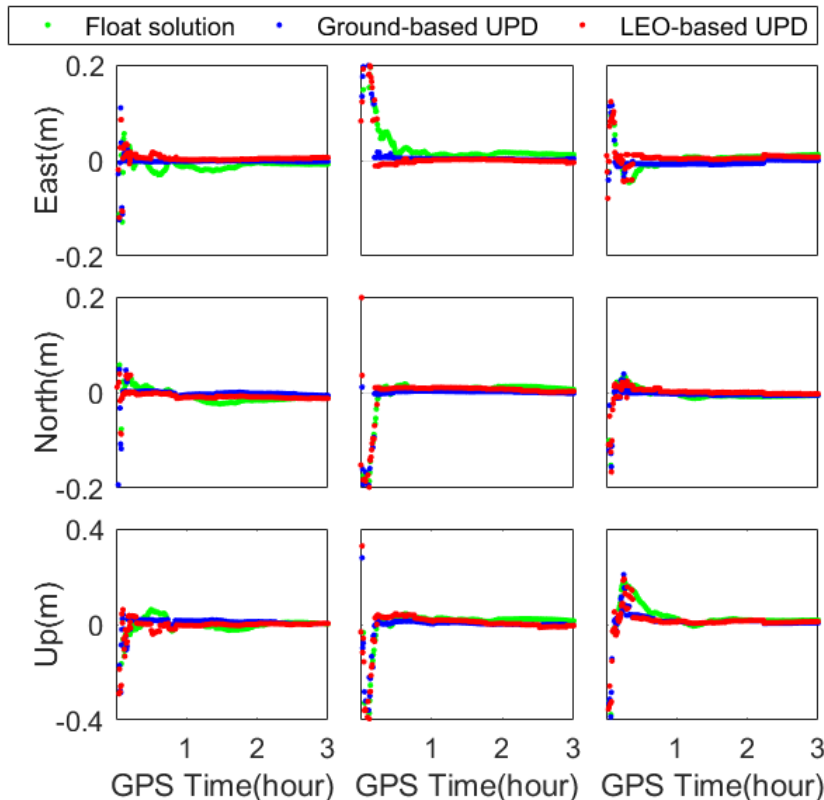
Ground-based
UPD

LEO-based
UPD

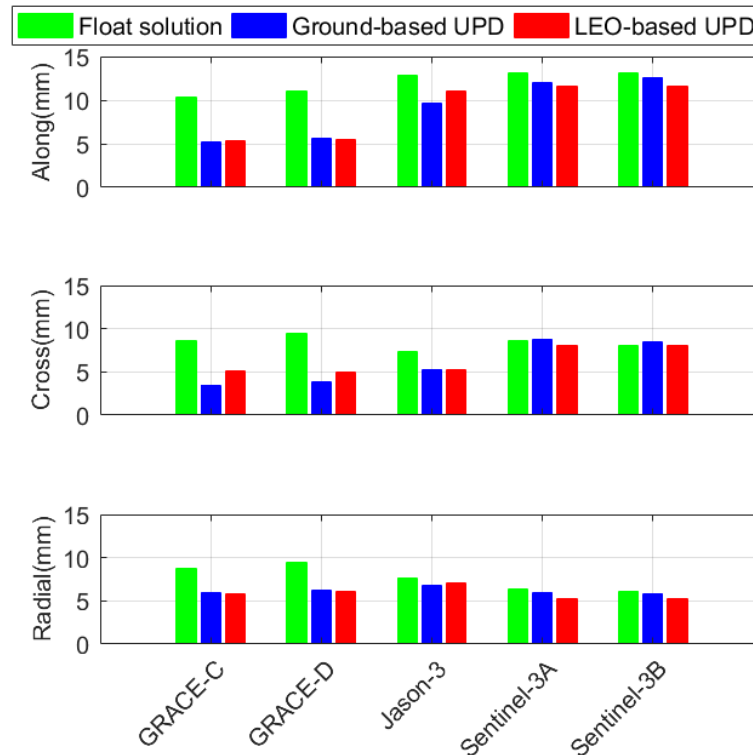
GPS宽巷（上）、窄巷（下）UPD序列
（从左到右：基于地面测站网、9颗LEO卫星）



低轨估计UPD用于模糊度固定



左图：FALK、NNOR、SUTH测站的PPP固定解定位误差
 右图：LEO简化动力学轨道与科学轨道产品对比的结果

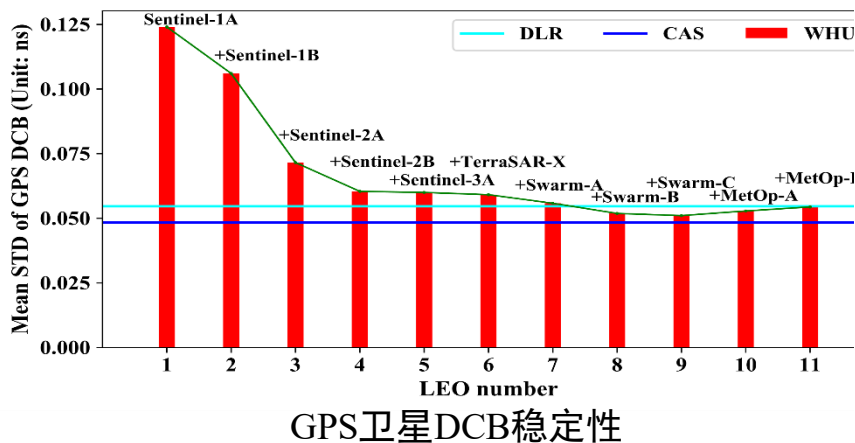


✓ 基于当前LEO星载观测估计的UPD可成功用于PPP、LEO POD模糊度固定过程

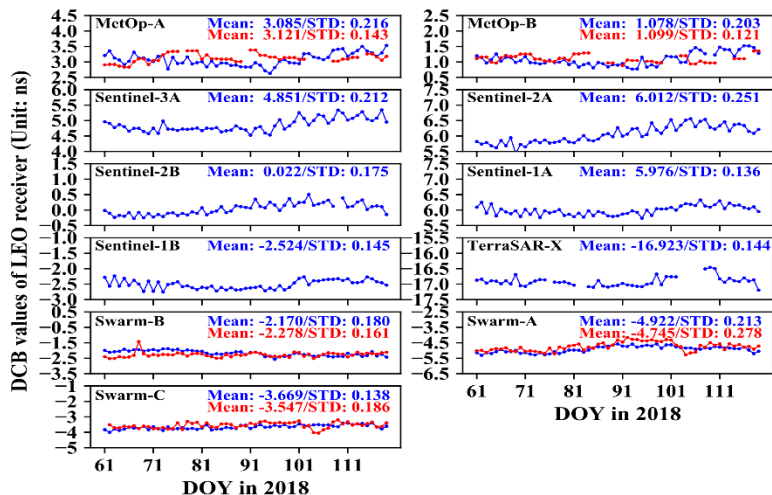
高中低轨卫星联合定轨



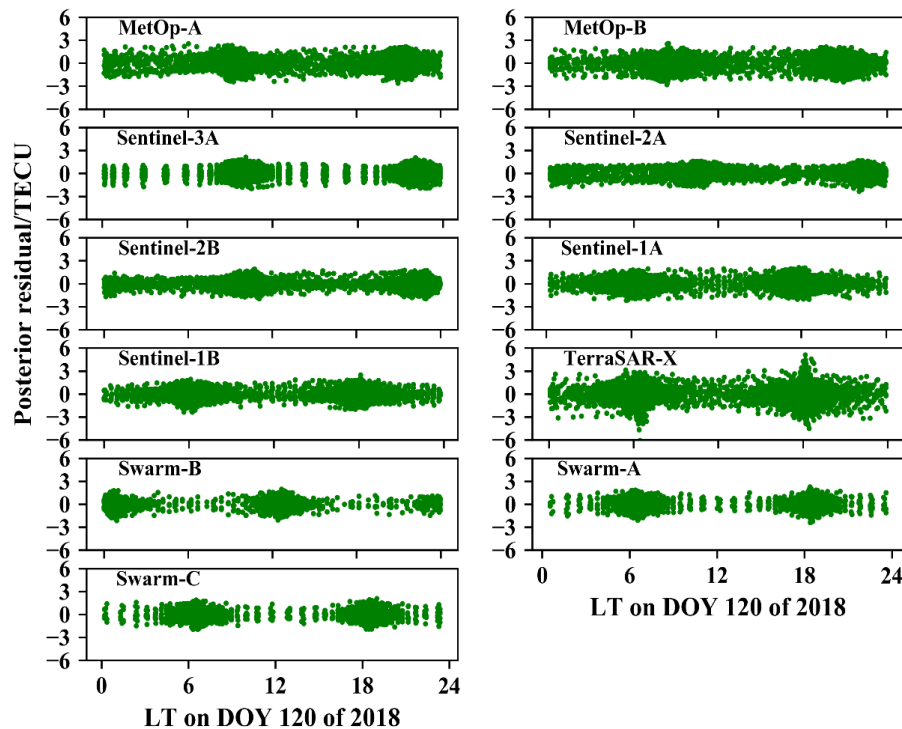
基于LEO星载数据的DCB估计



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
- ✓ 在低纬度地区，电离层球对称可能会导致DCB估计精度下降，特别是对于轨道高度较低的太阳同步LEO卫星。



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

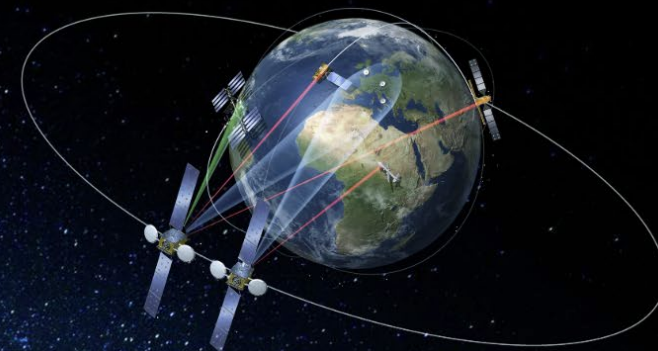
Software

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 »](#)



☰ What's news

[View more »](#)



The official commissioning of

On July 31, the official commissioning of the BeiDou Navigation Satellite

☰ Our status

[View more »](#)

Trial operation of LEO precise science orbit

Precise orbit determination of LEO satellites 2020-07-30
is of central importance for many



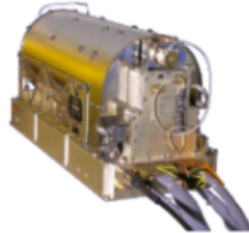
Multi-GNSS Precise Orbit

Rapid and ultra-rapid precise orbit products for five GNSS constellations including BDS, GPS, GLONASS, Galileo and QZSS

[View more »](#)

[Download»](#)

导航卫星轨道



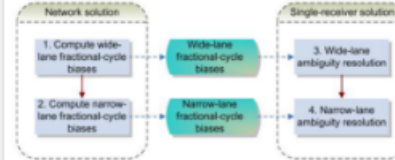
Multi-GNSS Real-time Clock

Multi-GNSS real-time clock products with 5 seconds sampling including BDS, GPS, GLONASS, and Galileo

[View more »](#)

[Download»](#)

实时钟差产品



Uncalibrated Phase Delay

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

[View more »](#)

[Download»](#)

相位小数偏差

GREAT-UPD开源

<https://geodesy.noaa.gov/v/gps-toolbox/GREAT-UPD.htm>



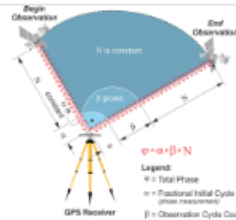
LEO Precise Science Orbit

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

[View more »](#)

[Download»](#)

低轨卫星轨道



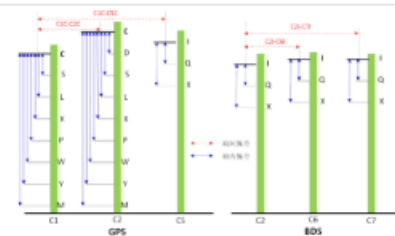
Multi-GNSS Carrier Range

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

[View more »](#)

Coming soon...

Carrier-range产品



Observable Signal Bias

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

[View more »](#)

Coming soon...

OSB产品



□ 导航卫星精密轨道钟差

- ✓ 快速与超快轨道：五系统（CGERJ）；包含除C61以外所有BDS-3卫星
- ✓ 后处理钟差：300秒+30秒卫星钟差
- ✓ 实时钟差：GPS+Galileo+BDS (含BDS-3)；5秒采样率

http://igmas.users.sgg.whu.edu.cn/products/download/directory/products/gnss_orbit

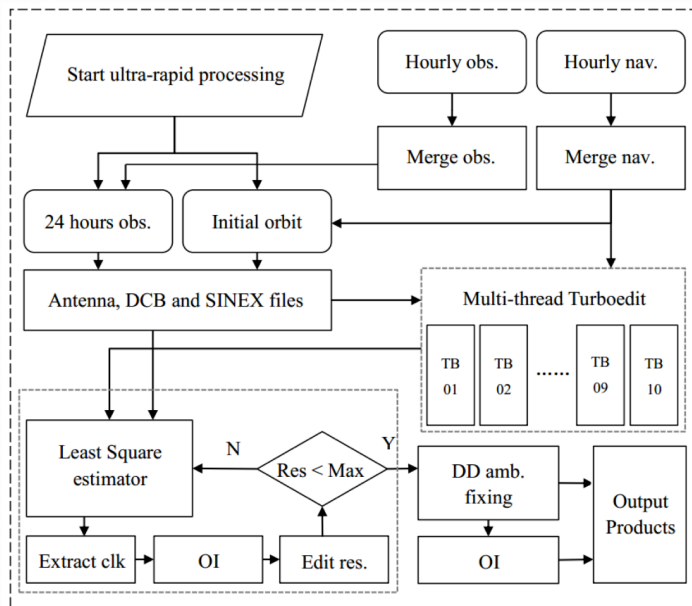


Fig. 2 The flowchart of our ultra-rapid processing

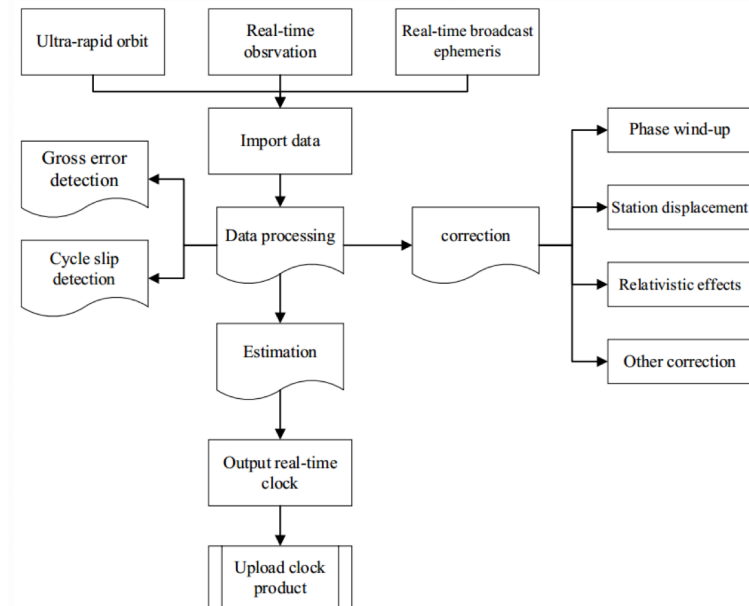


Fig. 1 Processing procedure for real-time clock estimation



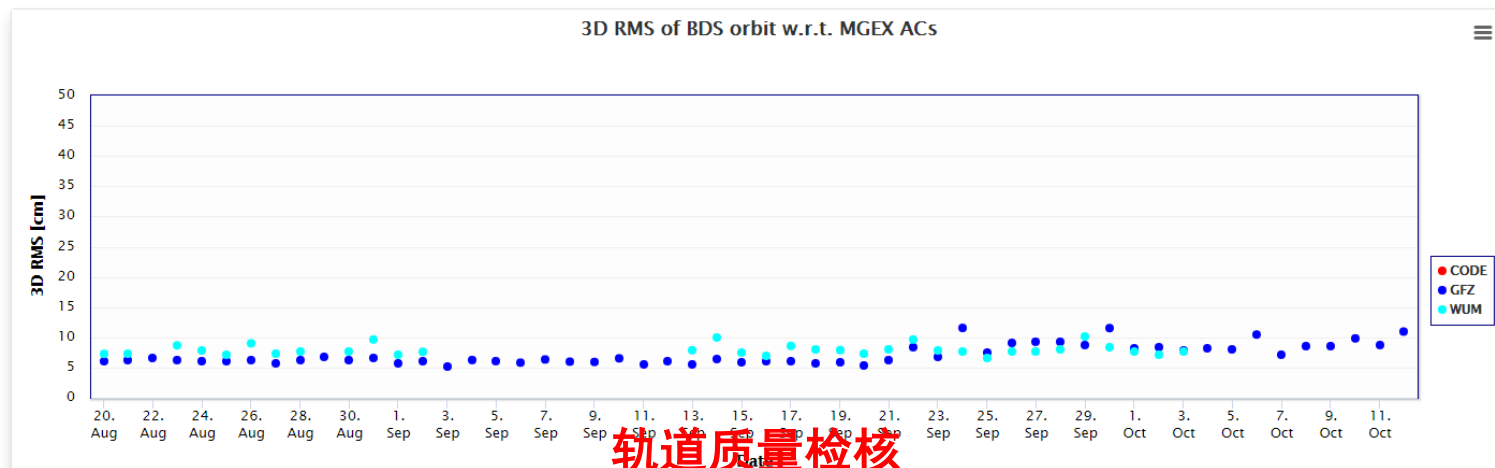
实时进程监控与在线质量检核

GNSS ultra-rapid orbit monitoring page

Running Status				
#	Beg Time	End Time	Process Time	Status
1	2020-10-18 08:35:11			Running LSQ
2	2020-10-18 06:35:22	2020-10-18 08:03:55	1.48 Hour	Success
3	2020-10-18 04:36:49	2020-10-18 06:04:39	1.46 Hour	Success
4	2020-10-18 02:39:10	2020-10-18 04:06:38	1.46 Hour	Success

超快轨道监控

BDS



轨道质量检核

低轨卫星科学轨道产品

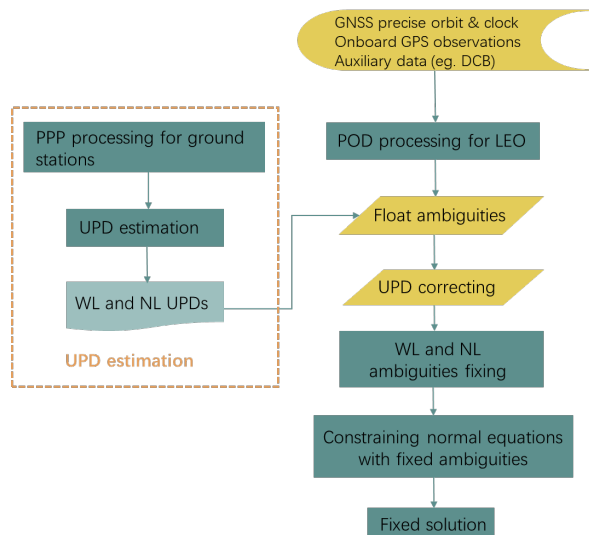
- ✓ SWARM-A/B/C 与 GRACE Follow-on (C/D) 五颗卫星的精密轨道产品
- ✓ 30-h定轨弧长 (3+24+3)
- ✓ 固定非差相位模糊度



SWARM A/B/C

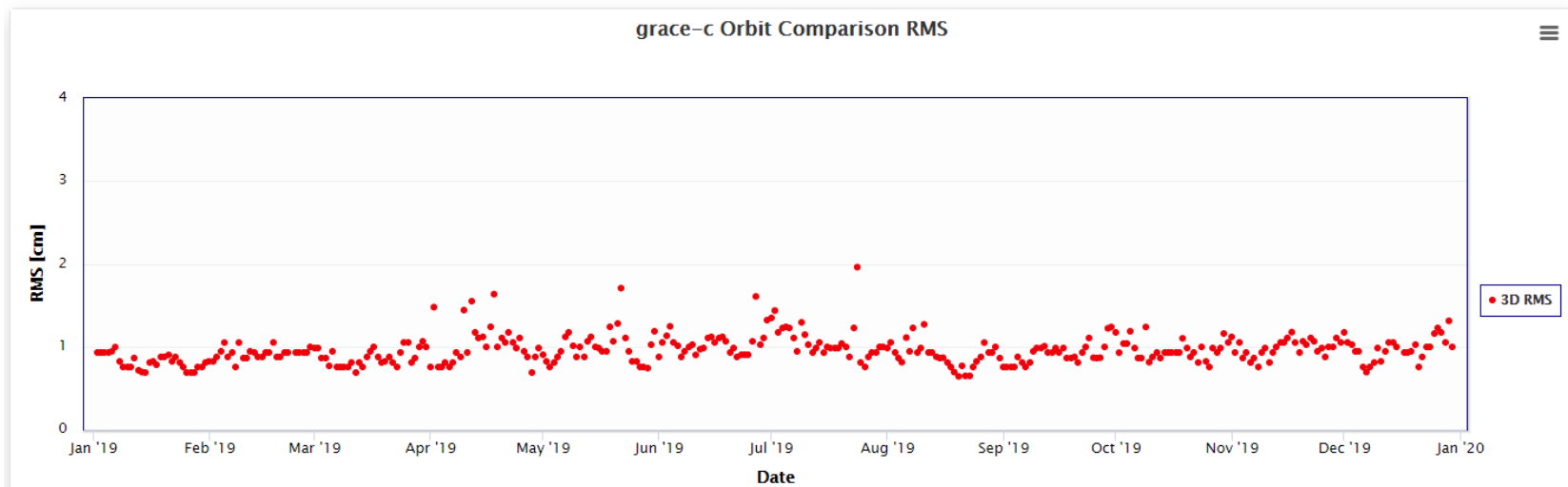


GRACE Follow-on (C/D)

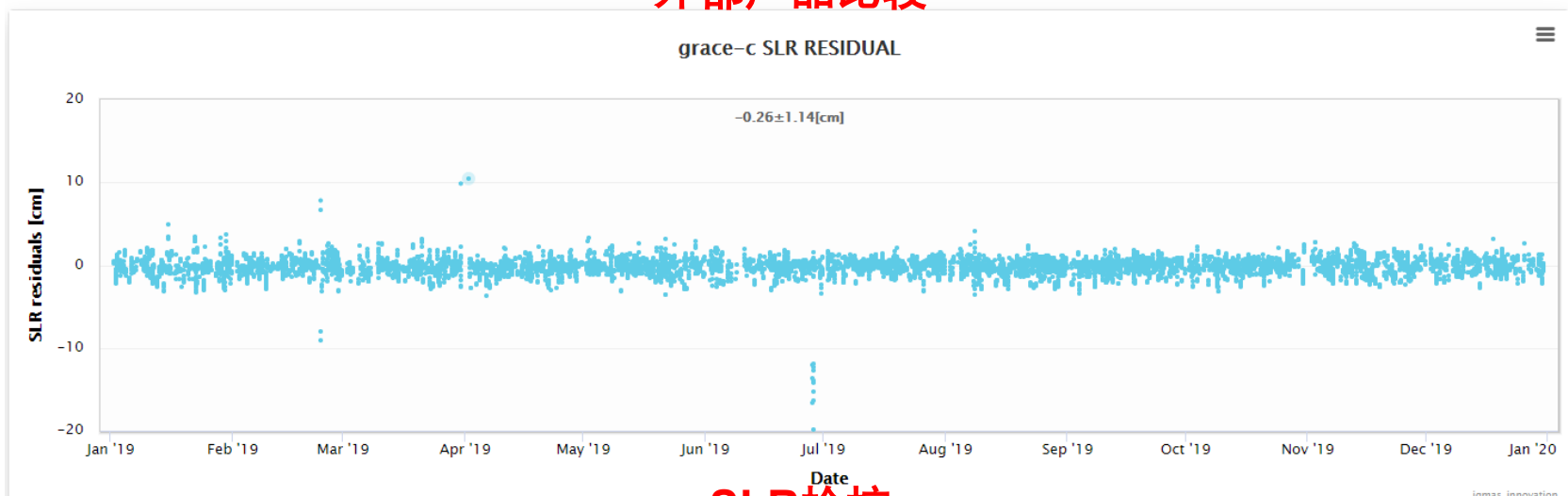




□ 在线质量检核



外部产品比较



SLR检校

一、背景及意义

二、低轨卫星精密定轨

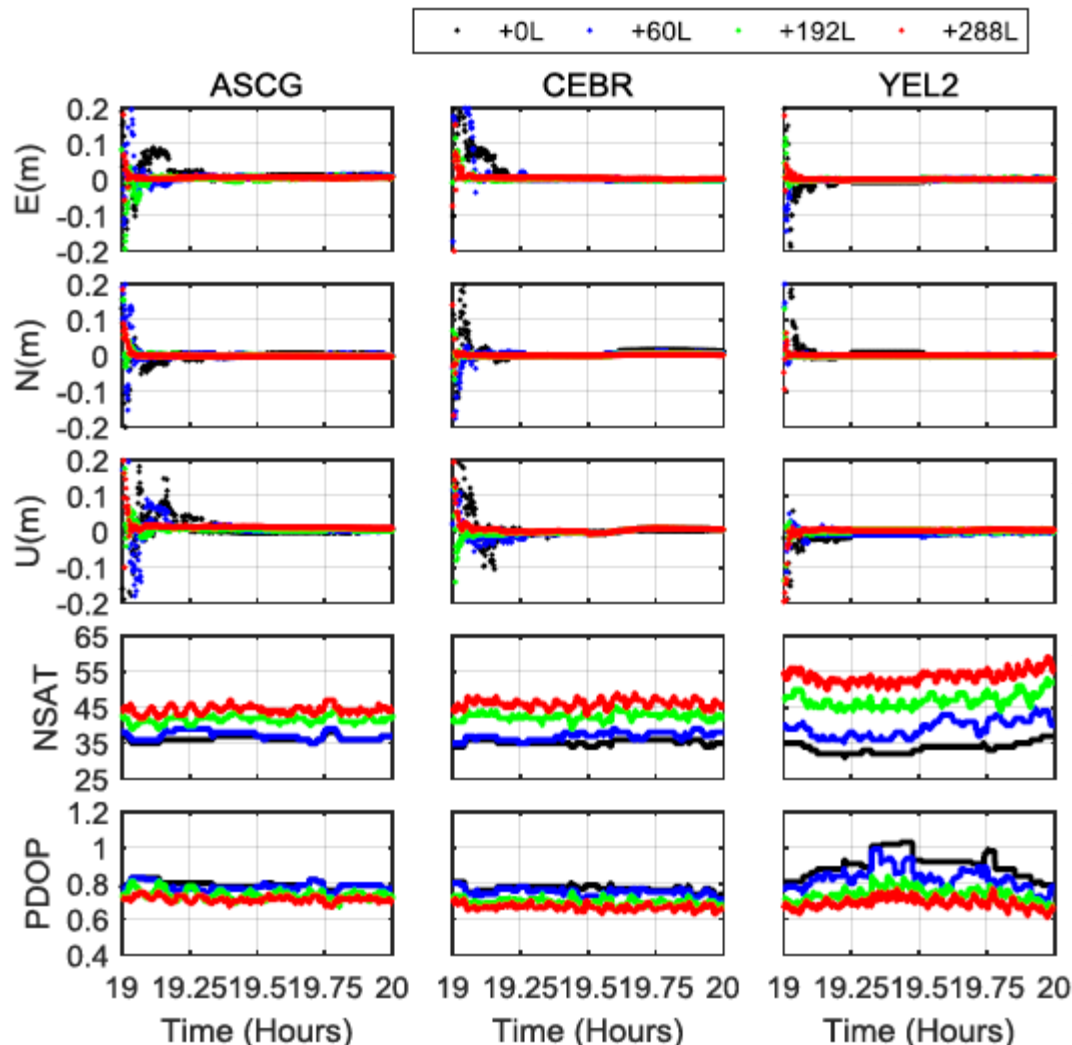
三、导航卫星定轨模型精化

四、高中低轨卫星联合定轨

五、低轨增强PPP/RTK



低轨增强双频PPP-AR

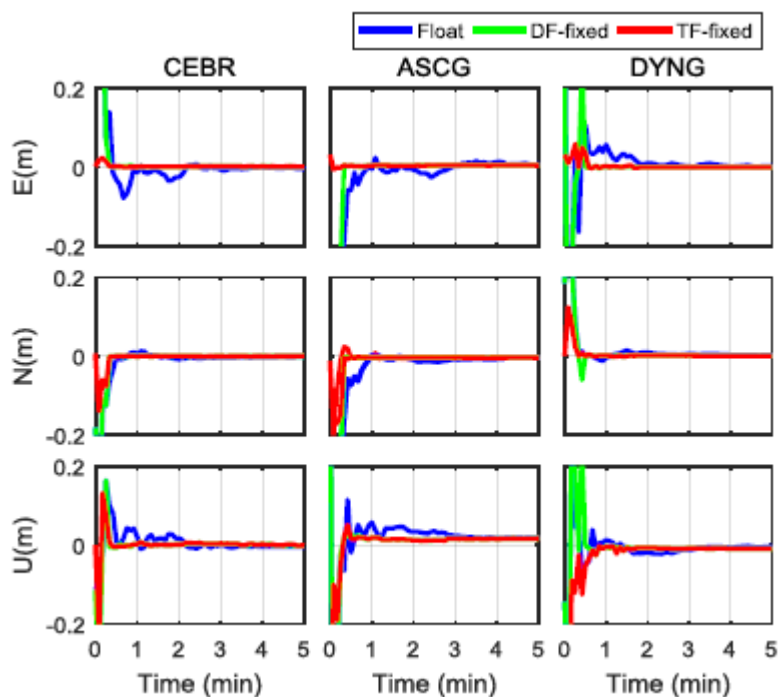


- ✓ 加入LEO卫星，可以显著缩短模糊度固定初始化时间且提高精度
- ✓ LEO卫星数量越多，增强效果越明显
- ✓ 一旦模糊度被正确固定，精度可瞬间提升至cm级甚至mm级

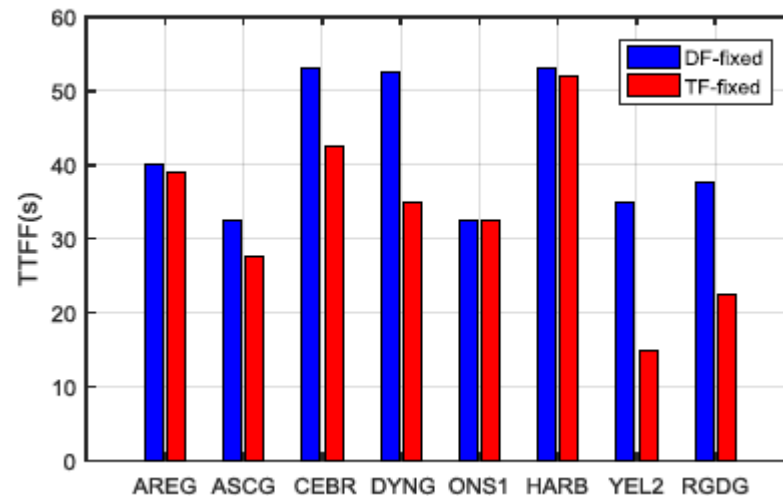
不同数量低轨卫星增强下的GREC四系统PPP-AR



低轨增强三频PPP-AR



288颗低轨卫星增强双频/三频PPP-AR



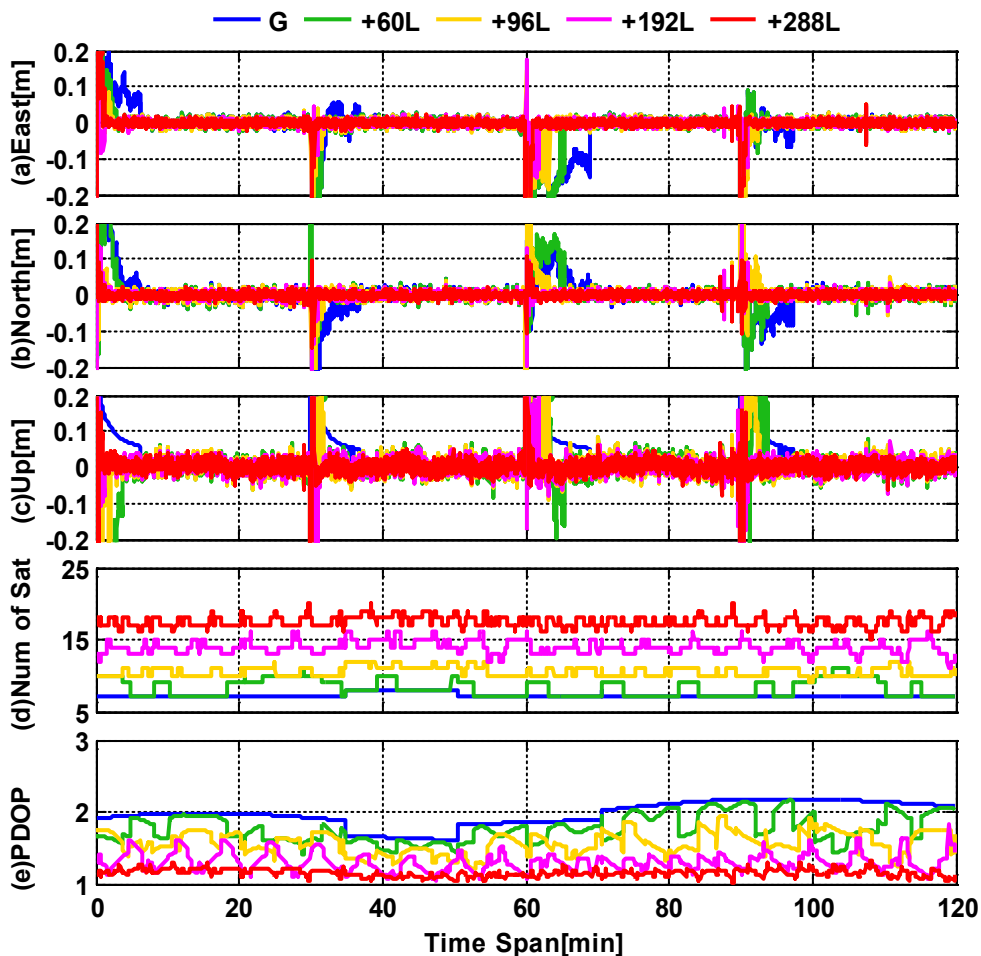
首次固定时间

- ✓ 与双频相比，低轨增强三频PPP-AR收敛速度更快，首次时间固定时间更短，定位精度更高。

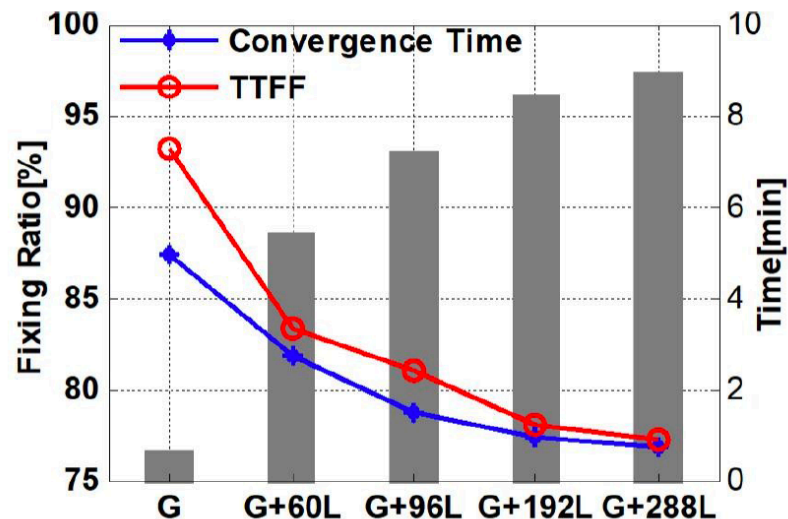
低轨增强PPP/RTK



低轨增强RTK



中基线 (68.7km) GPS RTK



增强效果与LEO卫星数量密切相关。随着LEO卫星数量增加，收敛速度、首次固定时间、基线分量精度和模糊度固定成功率改善效果越明显。



- 固定解技术可以显著提高低轨卫星的相对与绝对定轨精度。
- Galileo卫星三频观测值定轨固定解与双频定轨固定解精度相当。
- 非差固定解技术可以将BDS定轨估钟的精度提高30-40%。
- LEO卫星的加入可有效减弱GNSS卫星轨道对于地面测站的依赖，显著提高GNSS卫星轨道精度。
- 低轨星载GNSS数据可应用于GNSS卫星PCV，码偏差及相位偏差产品的生成。
- LEO增强multi-GNSS 精密定位，可以显著缩短收敛时间和首次固定时间，解决初始化时间长的难题。

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



iGMAS创新中心产品用户群

谢谢大家！