



北斗/GNSS精密定位及 多源导航增强

李星星 李昕 廖健驰 冯绍权

王铨彬 李圣雨 申志恒 周宇轩 等

武汉大学测绘学院导航所(系)

2021年3月16日



一、背景及意义

二、星基增强PPP

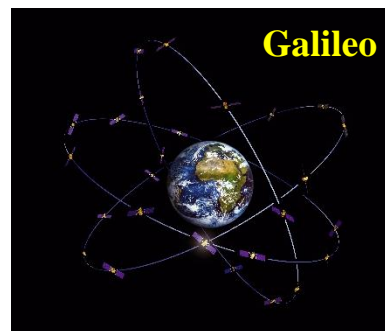
三、星地一体化增强PPP-RTK

四、低轨星座增强精密定位

五、多源融合导航增强

研究背景与意义

- 北斗三号全球卫星导航系统已于2020年7月正式开通，其服务覆盖范围扩展至全球



- 物联网、自动驾驶、移动机器人等对北斗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





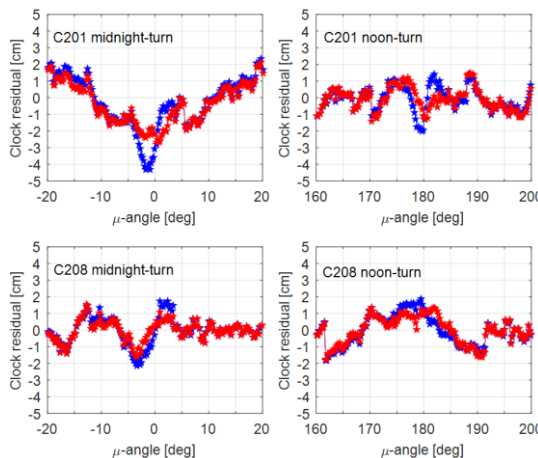
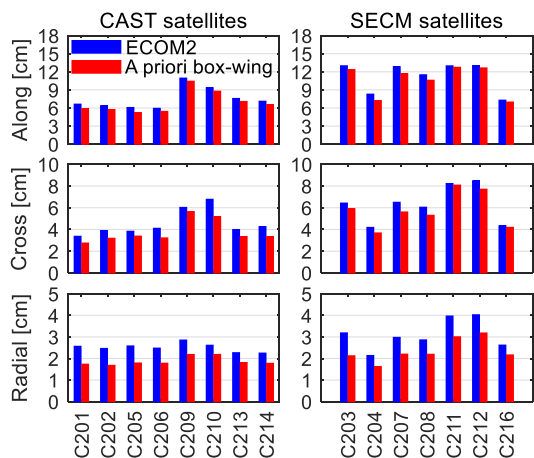
□ 北斗导航增强技术

- ✓ 星基增强PPP技术
 - 利用精密轨道钟差等星基增强信息，实现**全球**范围内的**厘米级**定位
- ✓ 星地一体化增强PPP-RTK
 - 利用已有的地基参考站设施，在重点区域能够实现**快速初始化**
- ✓ 低轨星座增强精密定位
 - 利用低轨星座几何构型变化快的优势，实现**快速收敛**
- ✓ 多源传感器紧组合导航定位
 - 发挥多源传感器各自的优势，实现城市复杂环境下的**连续可靠**定位

“更加泛在、更加融合、更加智能” 的国家综合PNT体系建设方向

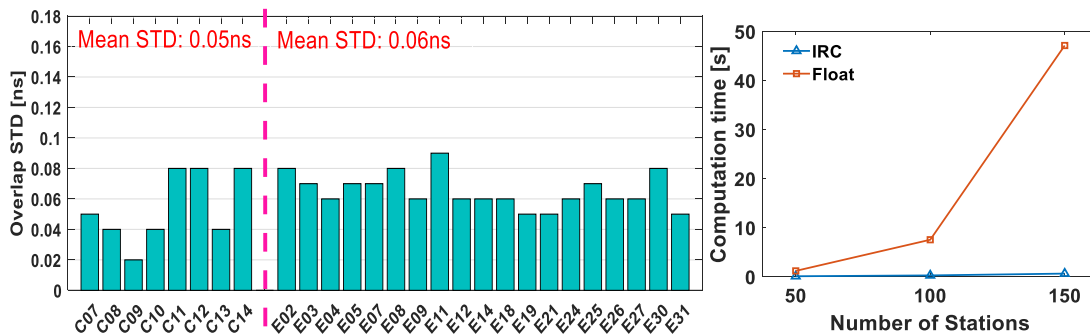


多系统精密轨道产品



✓ 精化了BDS-3、Galileo等新兴卫星系统的偏航姿态模型与太阳光压模型，提高了定轨与估钟精度

多系统实时整数钟产品

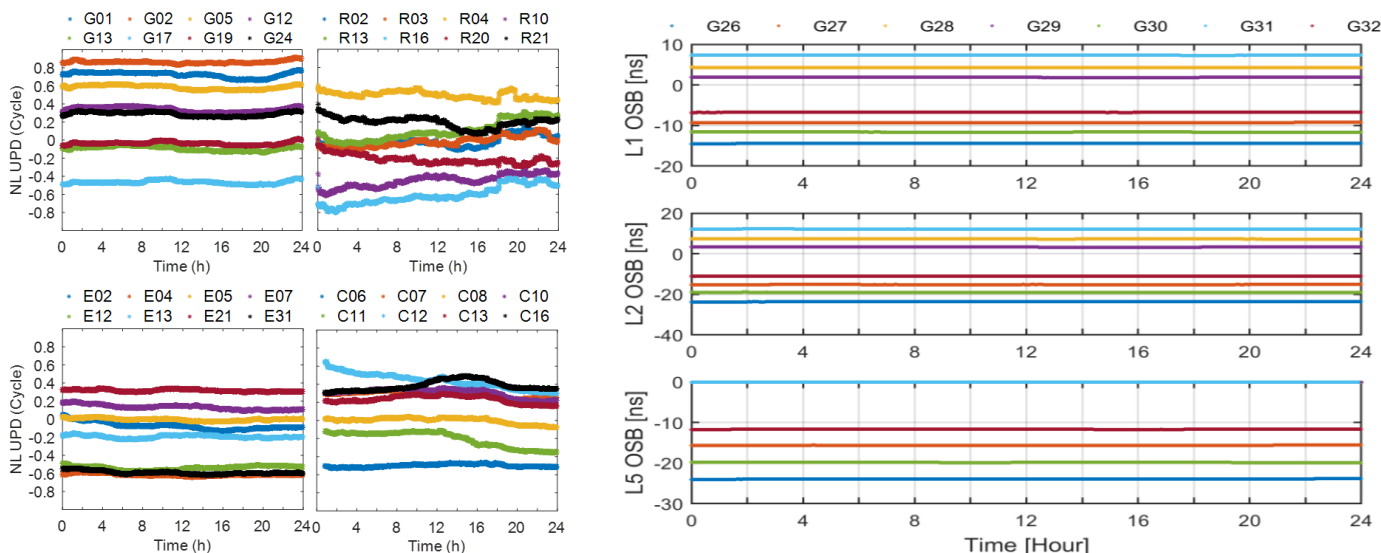


✓ 基于Carrier-range观测值的整数钟估计方法能够提高实钟差产品精度，减少计算耗时



多频多系统相位/码偏差产品

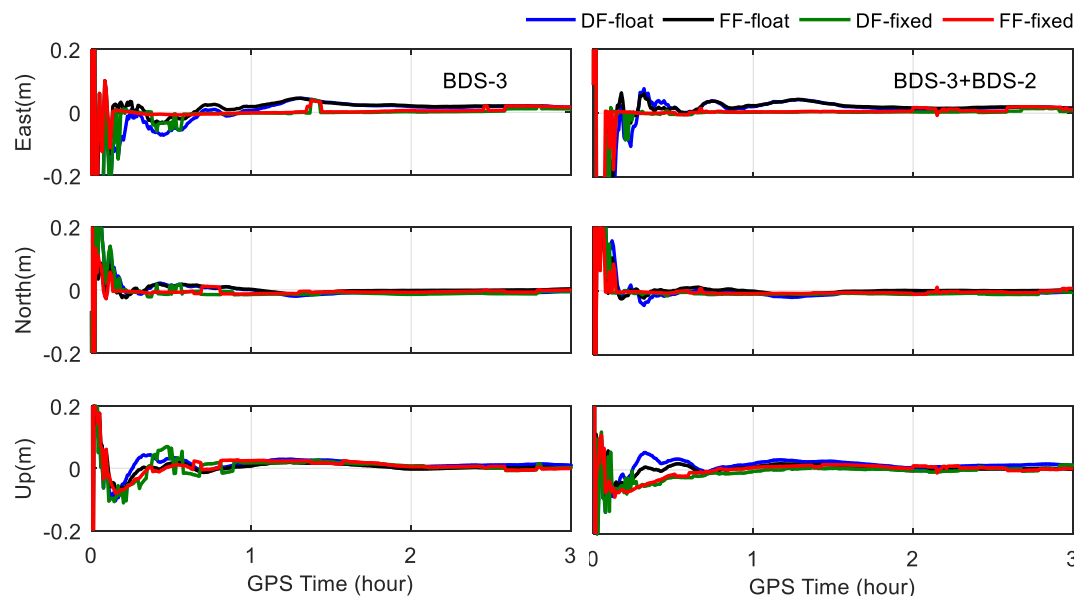
- ✓ GPS、Galileo、BDS和GLONASS的超宽巷、宽巷、窄巷UPD（开源）
- ✓ 相位频率间卫星钟差偏差PIFCB
- ✓ 面向原始相位/码观测值的OSB



窄巷UPD产品（左）和相位OSB产品（右）



□ BDS-3多频PPP固定解



- ✓ 相对于双频固定解，BDS-3多频PPP模糊度固定缩短了收敛时间，提高了定位精度
- ✓ **BDS-3+BDS-2五频PPP AR的收敛速度最快，精度最高，定位序列最为稳定；**
- ✓ 尽管多频观测值可以有效缩短首次固定时间，但是它仍然需要超过20分钟才能实现窄巷模糊度的固定。

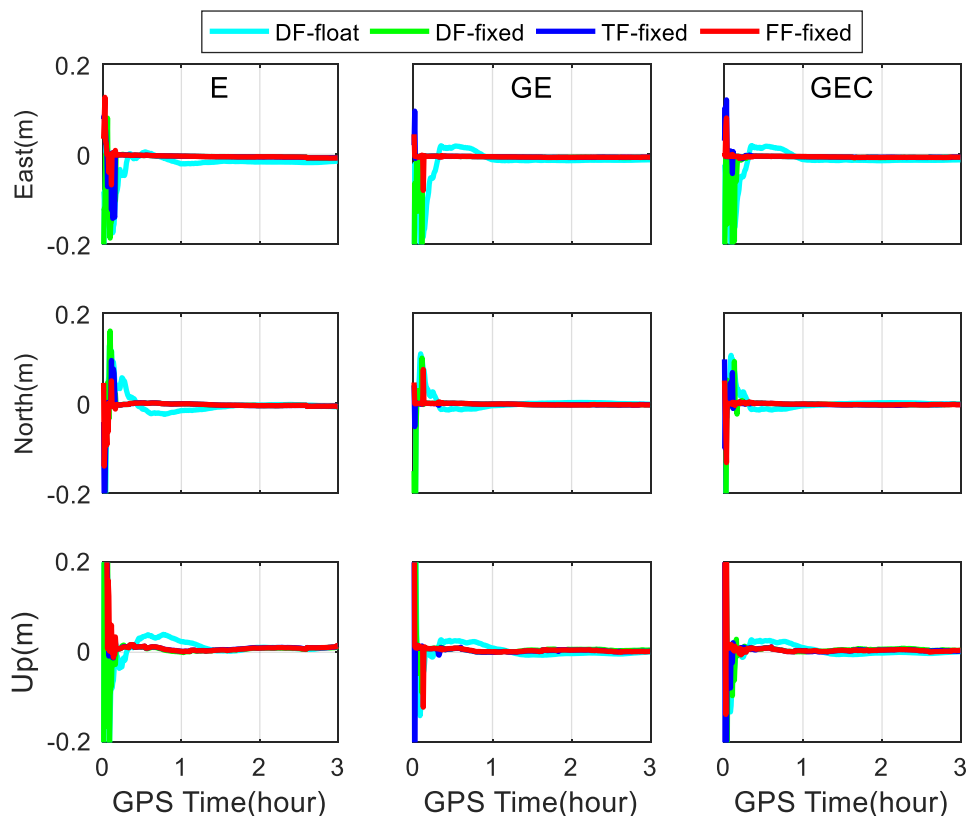
单BDS-3与BDS-3+BDS-2 PPP定位误差序列

BDS双频和多频PPP浮点和固定解的平均收敛时间（分钟）

	双频浮点	多频浮点	双频固定	多频固定
BDS-3	55.6	51.4	53.6	45.12
BDS-3+BDS-2	33.3	31.7	30.4	25.5



多频率多星座PPP固定解



不同系统组合双频、三频、五频PPP-AR定位误差序列

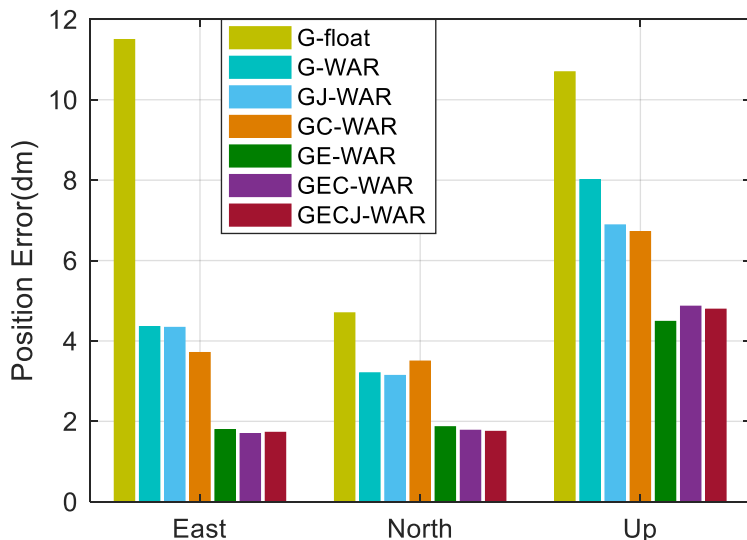
平均收敛时间（分钟）

	E	G	GC	GEC
三频浮点	16.5	12.9	10.8	9.6
双频固定	13.5	9.4	8.5	5.4
三频固定	12.2	8.6	8.4	5.0
五频固定	12.1	/	/	4.6

- ✓ 双系统/多系统观测值的融合可以显著缩短PPP的收敛时间；
- ✓ 三频/五频固定解所需的收敛时间明显少于双频固定解；
- ✓ GEC三系统的五频固定解仅需要**4.6分钟**即可实现收敛。



□ PPP瞬时分米级定位



多频多系统PPP宽巷固定解收敛时间（历元数）

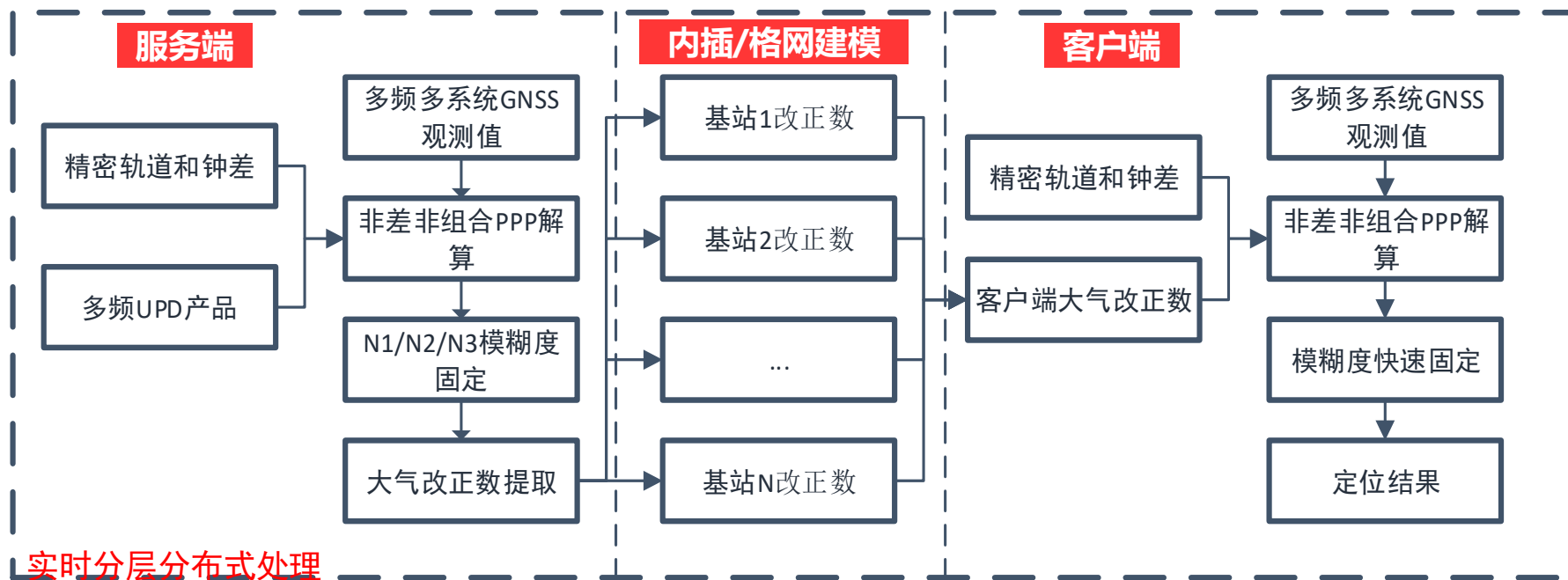
	G-float	G	GJ	GC	GE	GEC	GECJ
< 0.10 m	48.0	40.6	34.4	25.8	22.8	19.8	19.6
< 0.50 m	11.6	4.0	3.6	3.2	1	1	1

多频多系统PPP宽巷固定解首个历元定位精度

- ✓ EWL和WL模糊度波长较长，可实现单历元成功固定，加速PPP从米级精度迅速收敛到分米级精度
- ✓ 四系统PPP宽巷固定解首个历元定位精度为 (0.17,0.17,0.48) m，能够满足一些领域对于瞬时分米级定位的需求



多频多系统PPP-RTK服务系统构建



星地一体化增强PPP-RTK系统

将实时PPP与RTK技术集成为一个统一的定位服务，在全球范围内实现厘米级定位服务，在增强信息的区域实现更高精度的**快速精密定位服务**



实时相位小数偏差估计

原始观测方程构建

$$P_i = \rho + c \cdot (t_r - t^s) + c \cdot (b_{r,i} - b_i^s) + I_i + T + e_i$$

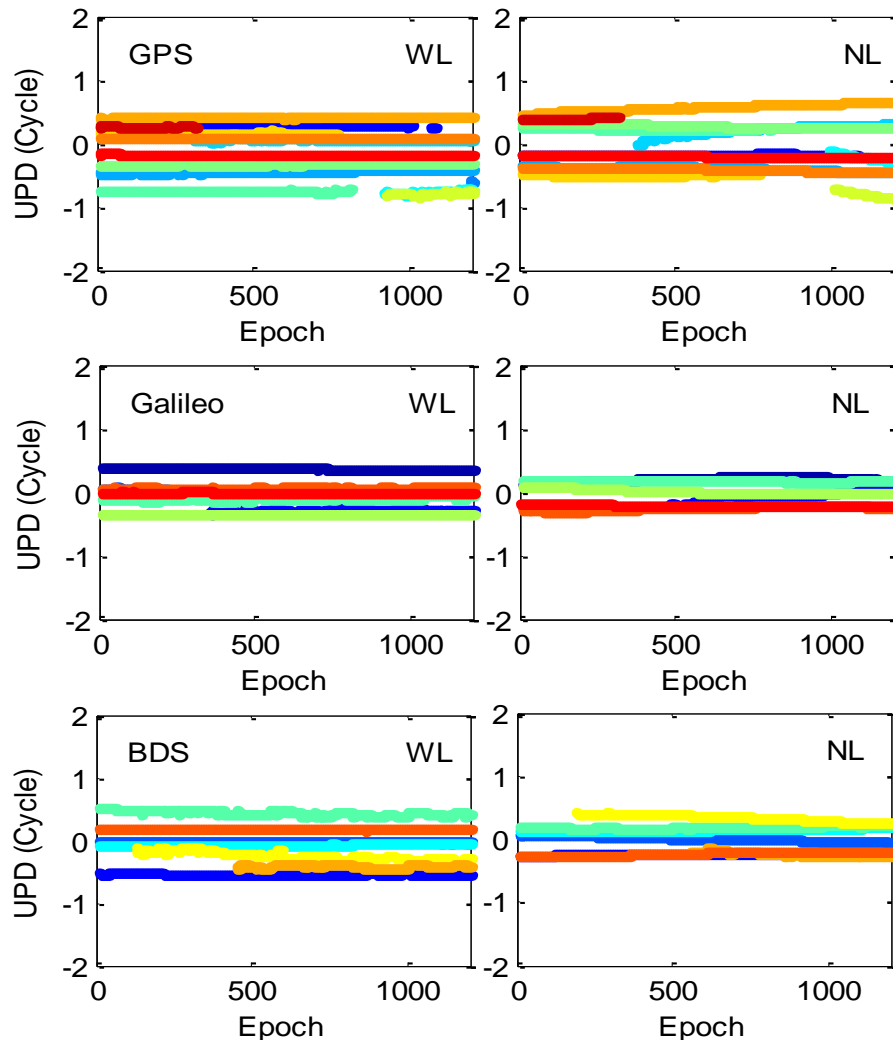
$$L_i = \rho + c \cdot (t_r - t^s) + \lambda_i \cdot (N_i + B_{r,i} - B_i^s) - I_i + T + \varepsilon_i$$

宽、窄巷UPD估计

$$n_{wl} = \left(\frac{L_1}{\lambda_1} - \frac{L_2}{\lambda_2} - \frac{f_1 \cdot P_1 + f_2 \cdot P_2}{(f_1 + f_2) \cdot \lambda_{wl}} \right) = N_{wl} + d_{r,wl} + d_{wl}^s$$

$$n_{nl} = \frac{\lambda_{IF}}{\lambda_{nl}} \cdot N_{IF} - \frac{c \cdot f_2}{\lambda_{nl} \cdot (f_1^2 - f_2^2)} \cdot N_{wl} = N_{nl} + d_{r,nl} + d_{nl}^s$$

$$\begin{bmatrix} D_1^1 \\ \vdots \\ D_1^m \\ D_2^1 \\ \vdots \\ D_2^m \\ \vdots \\ D_n^1 \\ \vdots \\ D_n^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1G} & R_{1C} & R_{1R} & R_{1E} & S_1 \\ R_{2G} & R_{2C} & R_{2R} & R_{2E} & S_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{nG} & R_{nC} & R_{nR} & R_{nE} & S_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_G \\ d_C \\ d_R \\ d_E \\ d^s \end{bmatrix}$$





区域增强改正数提取与内插

大气增强改正数提取

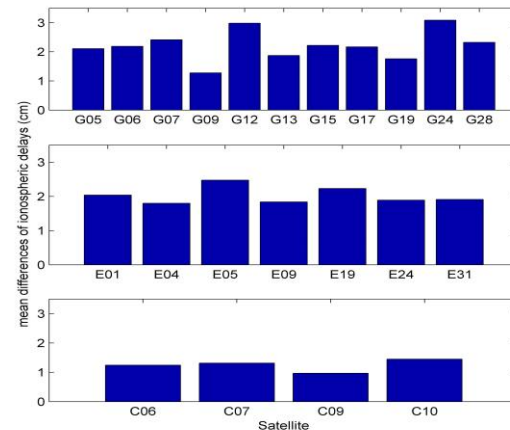
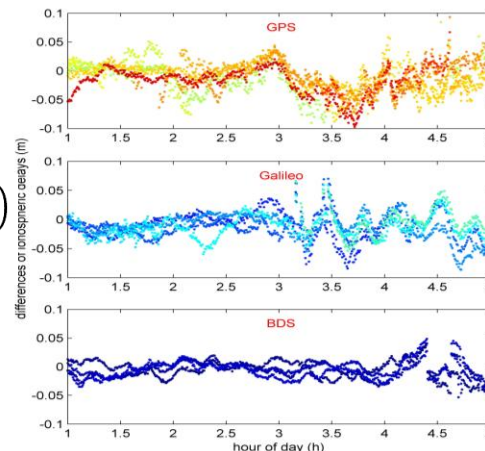
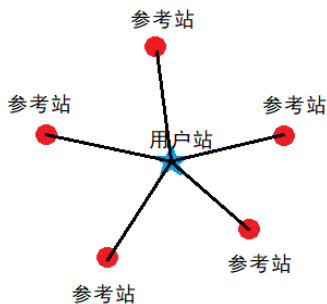
$$T_w = L_{IF} - (\rho + c \cdot t_r - c \cdot t^s + T_d + \lambda_{IF} \cdot N_{IF} + \lambda_{IF} \cdot (B_{r,IF} - B_{IF}^s))$$

$$l_i = \rho + c \cdot t_r - c \cdot t^s + T_d + T_w + \lambda_i \cdot N_i + \lambda_i \cdot (B_{r,i} - B_i^s) - L_i$$

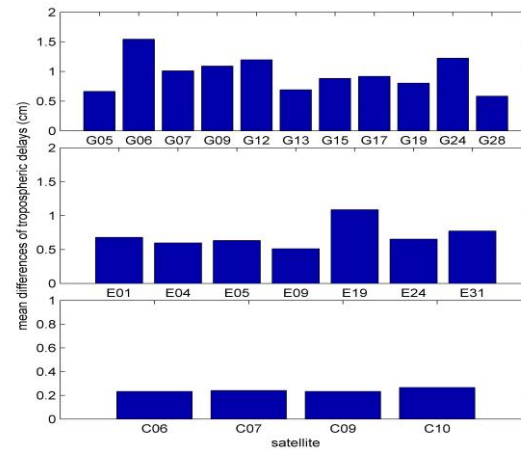
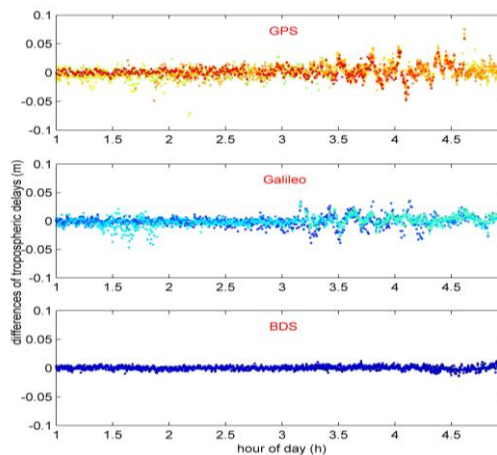
大气增强改正数内插

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_u - X_1 & X_u - X_2 & \dots & X_u - X_n \\ Y_u - Y_1 & X_u - X_2 & \dots & Y_u - Y_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sum_{i=1}^n a_i^2 = Min$$



电离层改正数内插精度

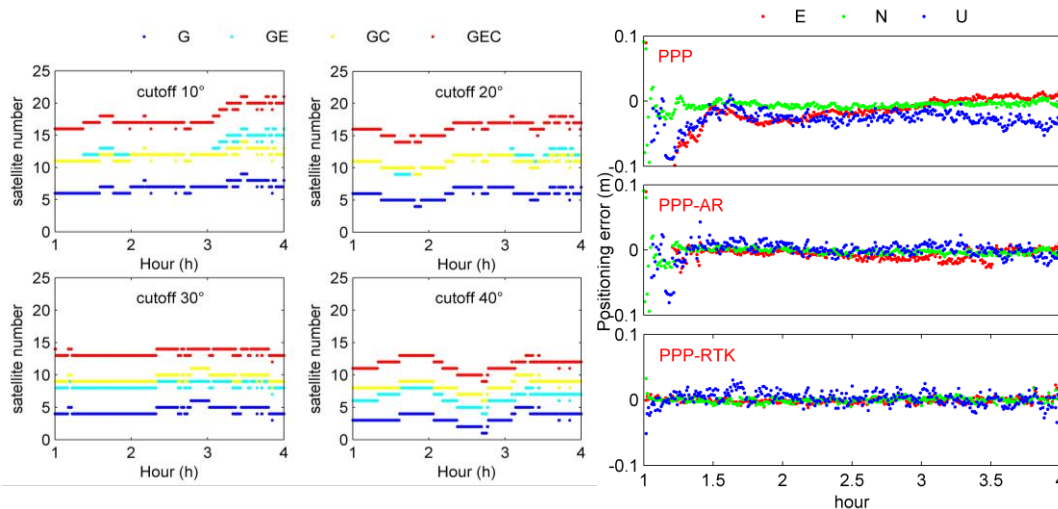


✓ 固定解提取的大气延迟改正数可以实现厘米级的内插精度，满足模糊度固定的需求。

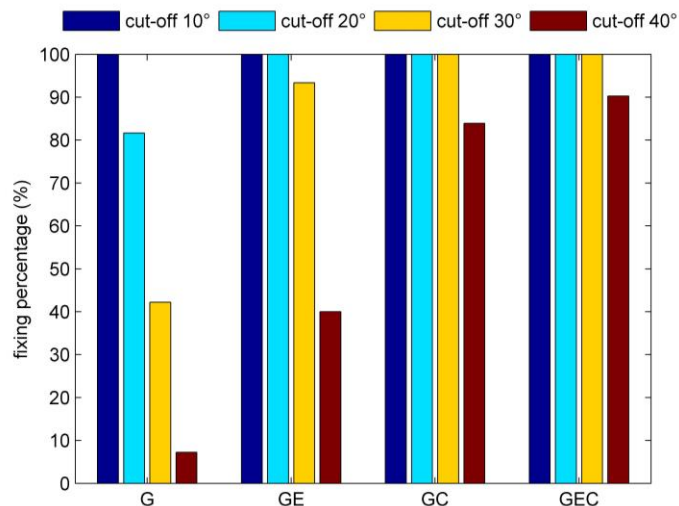
对流层改正数内插精度

星地一体化增强PPP-RTK

多系统PPP-RTK

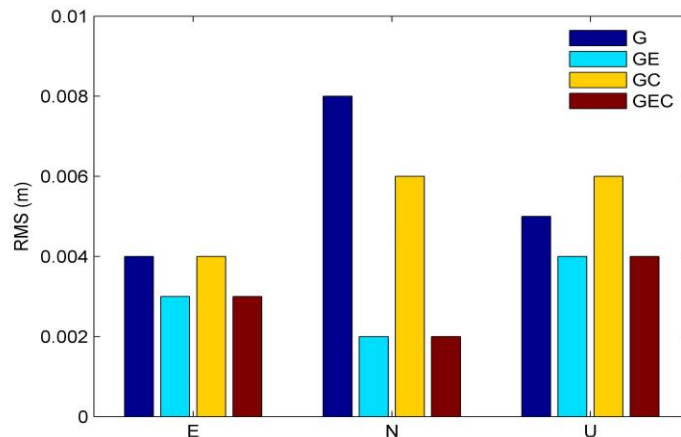


多系统可用卫星数及不同模式定位序列对比



多系统PPP-RTK瞬时模糊度固定成功率对比

- ✓ 基于大气增强的多系统PPP-RTK可以实现瞬时的模糊度固定，提升GNSS定位的**时效性**。
- ✓ 多系统融合可以进一步提升PPP-RTK定位的**可靠性和精度**。



多系统PPP-RTK精度对比

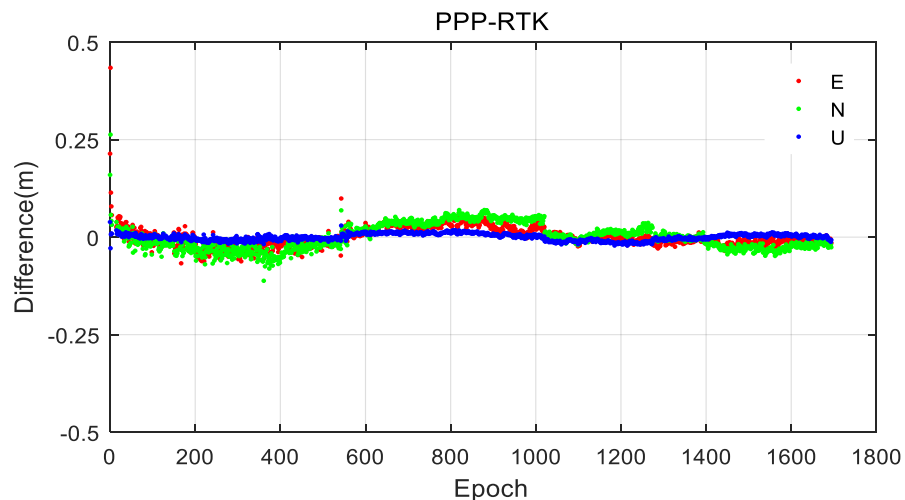
动态PPP-RTK实验

场景1：城市高架桥



测试路线

- ✓ 在开阔环境下，PPP-RTK首次固定时间小于5s，模糊度固定率达到96.8%。



定位序列

RMS-E/m		RMS-N/m		RMS-U/m
0.0229		0.0318		0.0085
Horizontal /%		Vertical /%		Fixing rate
<5cm	88.55 %	<10cm	100.00%	96.78%
<10cm	99.76 %	<20cm	100.00%	

精度及收敛时间统计

星地一体化增强PPP-RTK

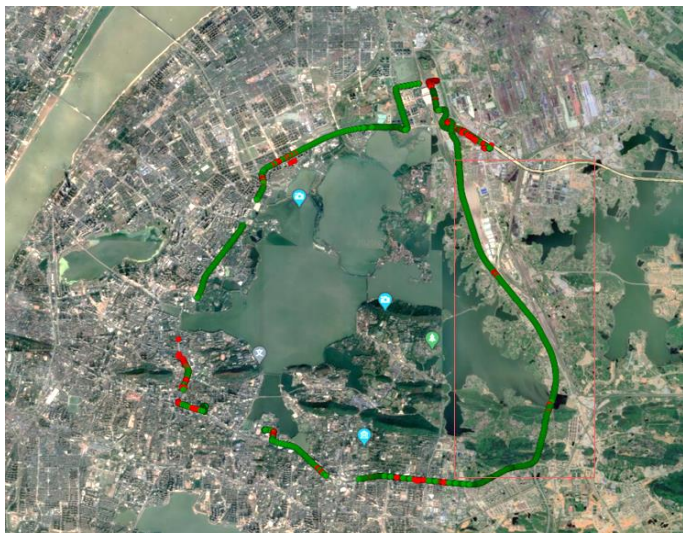
GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching



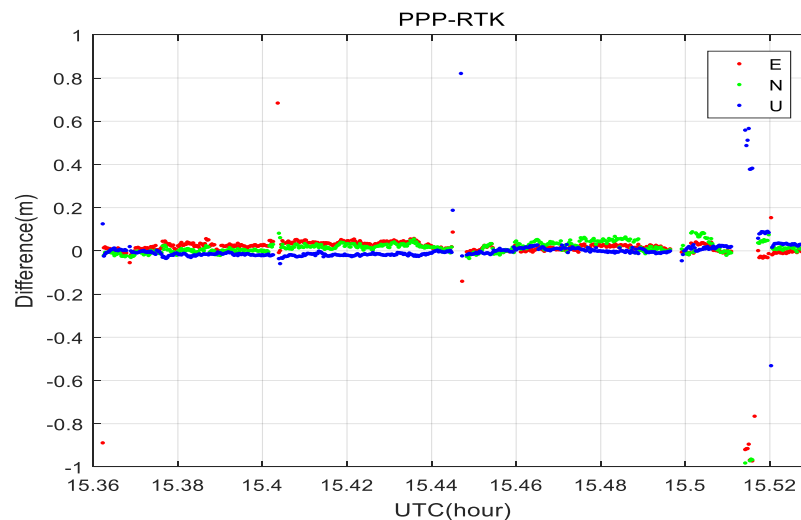
动态PPP-RTK实验

场景2：城市高速公路



测试路线

- ✓ 受到路牌、高架桥等遮挡物的影响出现多次信号中断，重收敛可在数秒内完成。



定位序列

RMS-E/m		RMS-N/m		RMS-U/m
0.0268		0.0220		0.0219
Horizontal /%		Vertical /%		Fixing rate
<5cm	87.48 %	<10cm	97.71%	95.02%
<10cm	97.53 %	<20cm	98.059%	

精度及收敛时间统计

星地一体化增强PPP-RTK

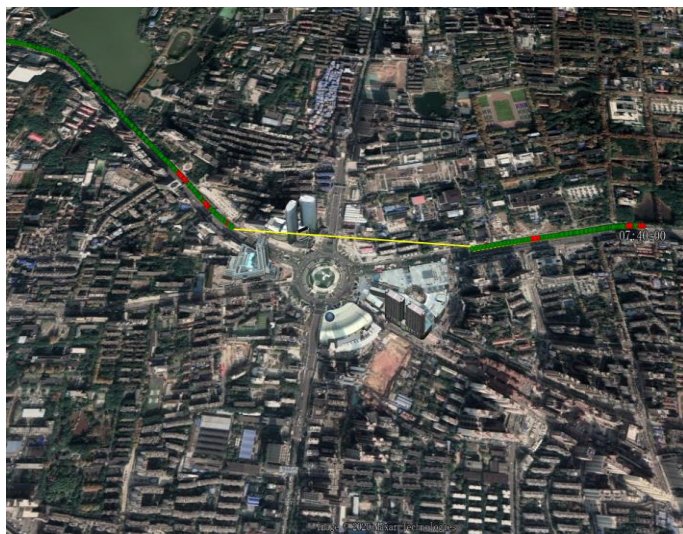
GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching

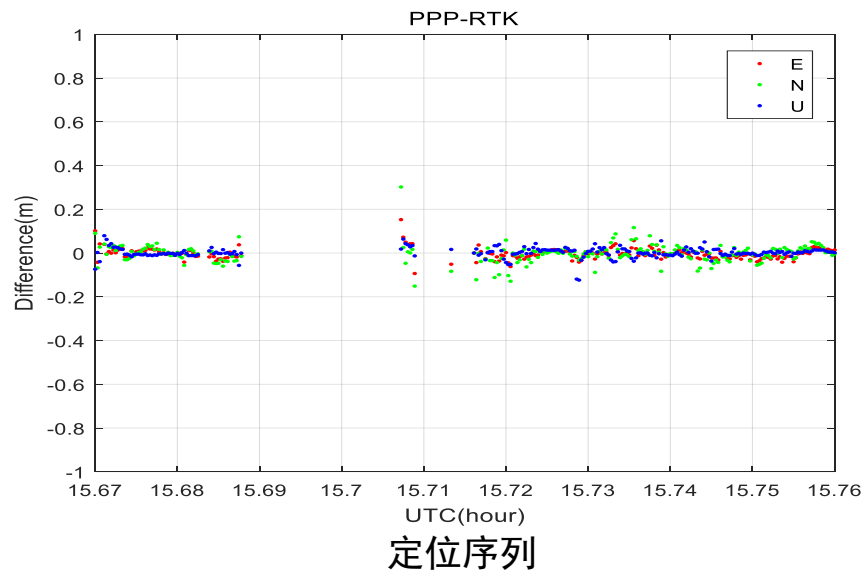


动态PPP-RTK实验

场景3：城市隧道测试



测试路线



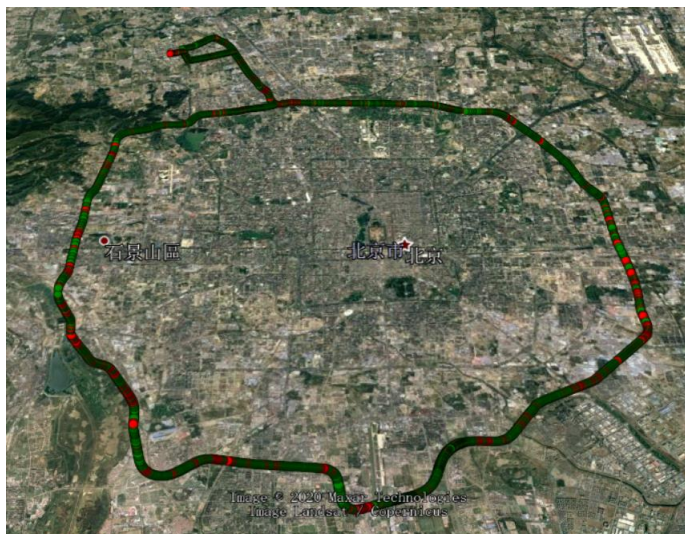
- ✓ 在隧道中行车时间约为70秒，期间经历了卫星信号失锁。在驶离隧道十秒内能够实现模糊度重新固定。

RMS-E/m		RMS-N/m		RMS-U/m
0.0249		0.0420		0.0230
Horizontal /%		Vertical /%		Fixing rate
<5cm	86.28 %	<10cm	98.67%	95.07%
<10cm	96.02 %	<20cm	100.00%	

精度及收敛时间统计

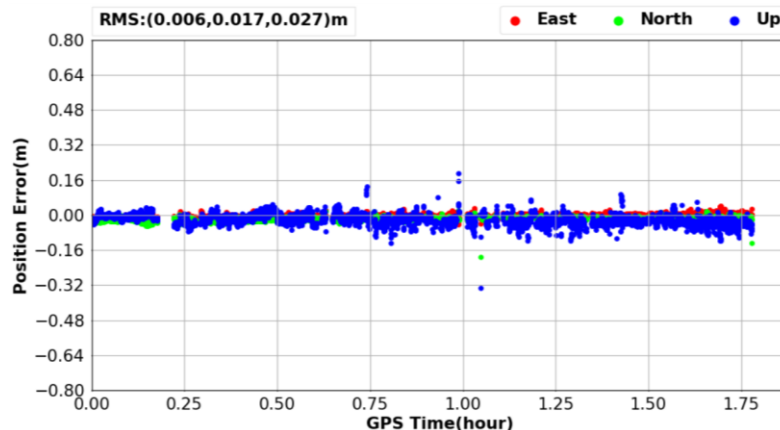
动态PPP-RTK实验

场景4：低成本接收机（UBLOX-F9P）



测试路线

✓ 使用UBLOX-F9P接收机在北京五环进行测试。结果表明低成本接收机的定位精度可以达到厘米级。



定位序列

RMS-E/m		RMS-N/m		RMS-U/m
0.0240		0.0180		0.0850
Horizontal /%		Vertical /%		Fixing rate
<5cm	97.19 %	<10cm	98.16%	96.78%
<10cm	97.83 %	<20cm	98.62%	

精度及收敛时间统计



GNSS卫星 VS LEO卫星

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。

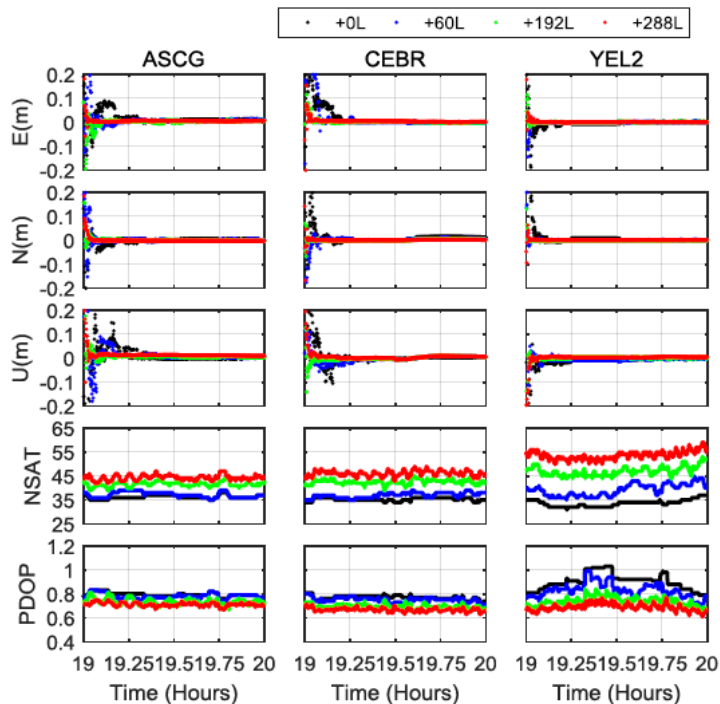
不足

- 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。

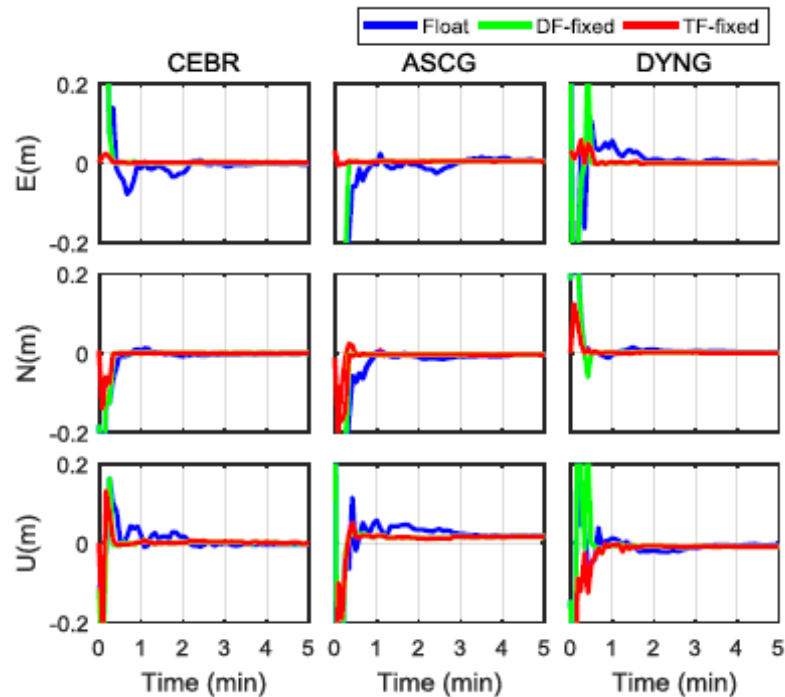
✓ 低轨卫星以其星座和信号的独特优势，受到卫星导航领域的关注和青睐，成为下一代卫星导航系统发展的关注重点，北斗四号将积极发展低轨导航增强系统。



低轨星座增强PPP-AR



不同数量 (60,192,288) 低轨卫星增强的
GREC四系统双频PPP-AR



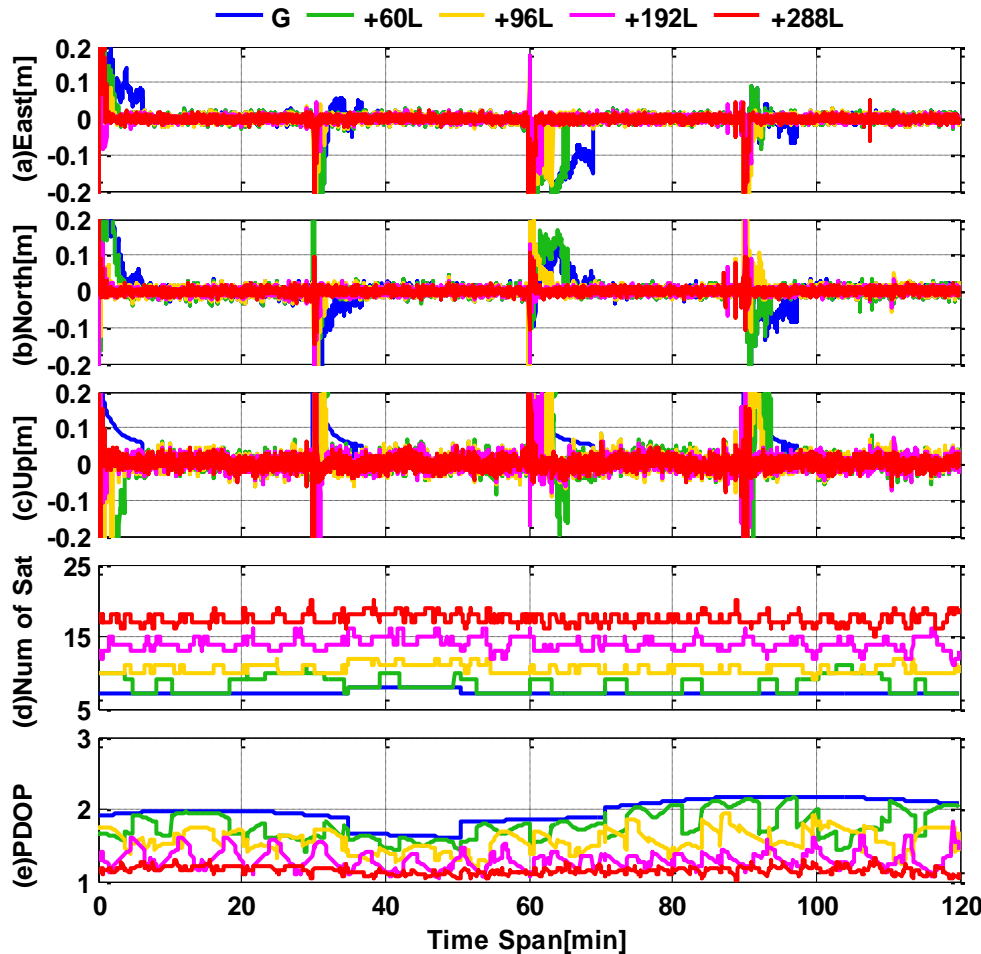
288颗低轨卫星增强双频/三频PPP-AR

- ✓ 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。
- ✓ 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。

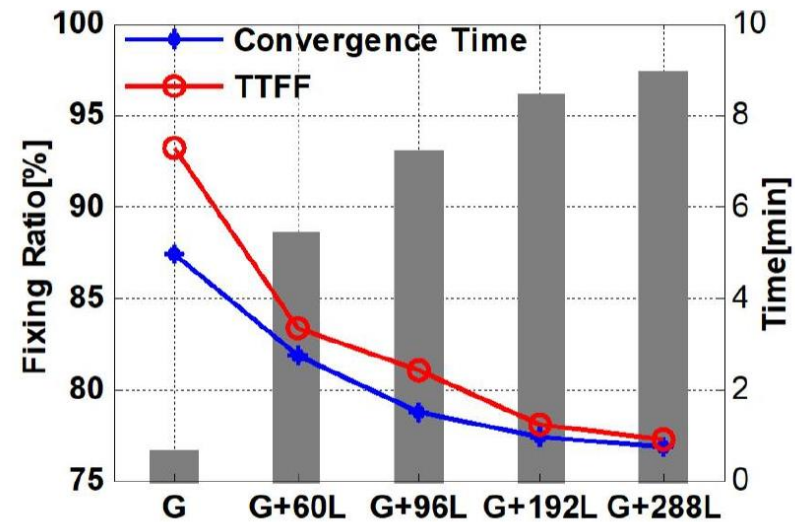
低轨增强精密定位



低轨星座增强RTK



中基线 (68.7km) RTK



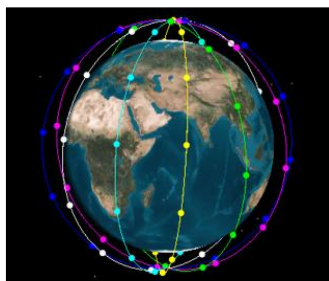
- ✓ 增强效果与LEO卫星数量密切相关。随着LEO卫星数量增加，收敛速度、首次固定时间、基线分量精度和模糊度固定成功率改善效果越明显。

低轨增强精密定位



低轨星座增强PPP-RTK

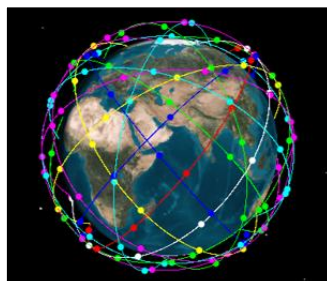
LEO 72



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

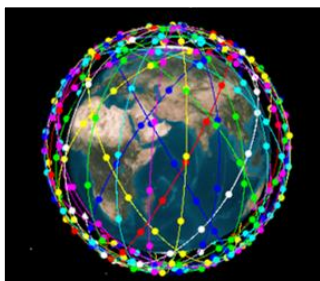
LEO 150



混合星座

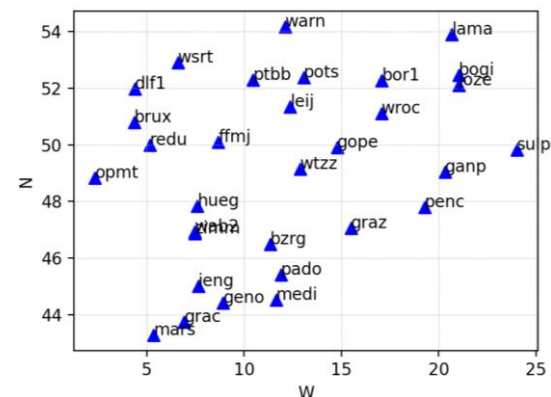
① 12/10/1 Walker星座
轨道倾角 50° 高度975km
② 3/10/1 Walker星座
轨道倾角 50° 高度975km

LEO 360



混合星座

① 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

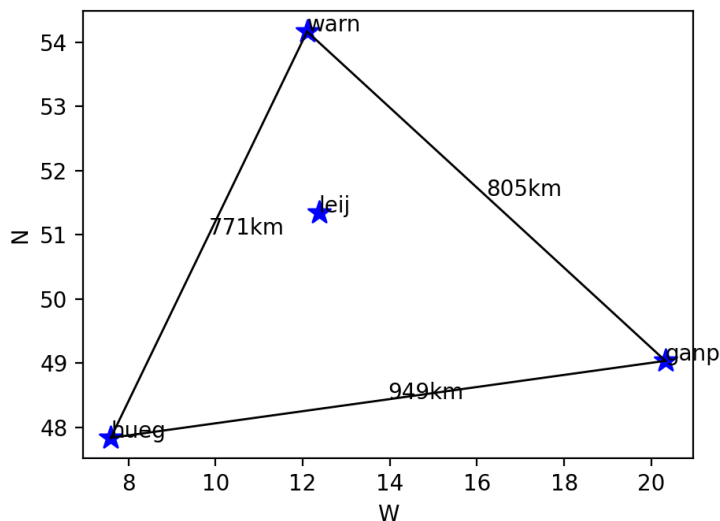


✓ 选择了44个欧洲IGS测站，仿真了GRECL五系统伪距和载波相位原始观测数据（采样间隔5s）

低轨增强精密定位

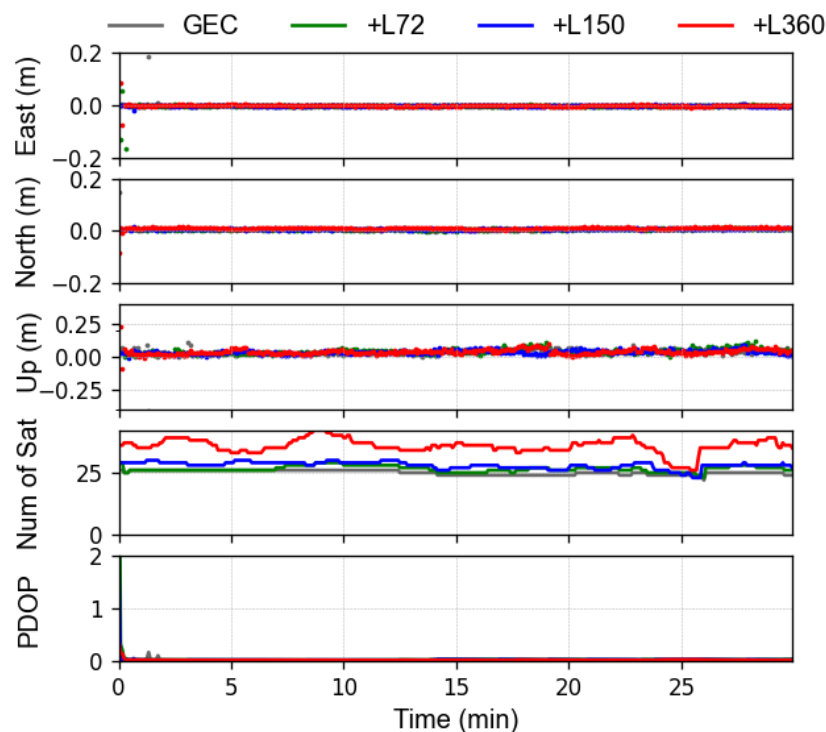


低轨星座增强PPP-RTK



超长基线 PPP-RTK

- ✓ 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

多源传感器紧组合导航定位

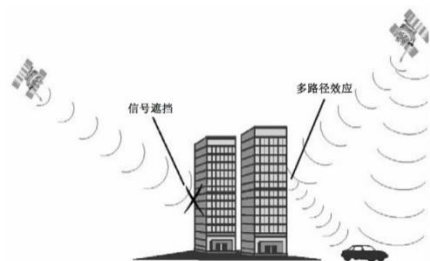
GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching



□ 实际应用需求

- ✓ 使用GNSS单一传感器的导航系统已经逐渐不能满足城市复杂环境中 **高可靠、高精度** 定位的需求



城市峡谷



高架桥



隧道

充分利用多种传感器(INS/VISION/LiDAR等), 完成对GNSS的增强





GNSS/INS 伪距相位观测值紧组合(TCI)

✓ 合并PPP/INS 状态信息, **原始伪距相位量测**

状态合并

$$\mathbf{X}_{GNSS} = (\delta\mathbf{r}^e, \delta t, \delta T_{Trop}, \delta \mathbf{N}_i)^T \sim Q_{GNSS}$$

$$\mathbf{X}_{INS} = (\boldsymbol{\phi}^n, \delta\mathbf{v}^n, \delta\mathbf{r}^n, \delta\mathbf{b}_g, \delta\mathbf{b}_a)^T \sim Q_{INS}$$

$$\mathbf{X} = (\boldsymbol{\phi}^n, \delta\mathbf{v}^n, \delta\mathbf{r}^n, \delta\mathbf{b}_g, \delta\mathbf{b}_a, \delta t, \delta T_{Trop}, \delta \mathbf{N}_i)^T \sim Q_{TCI}$$

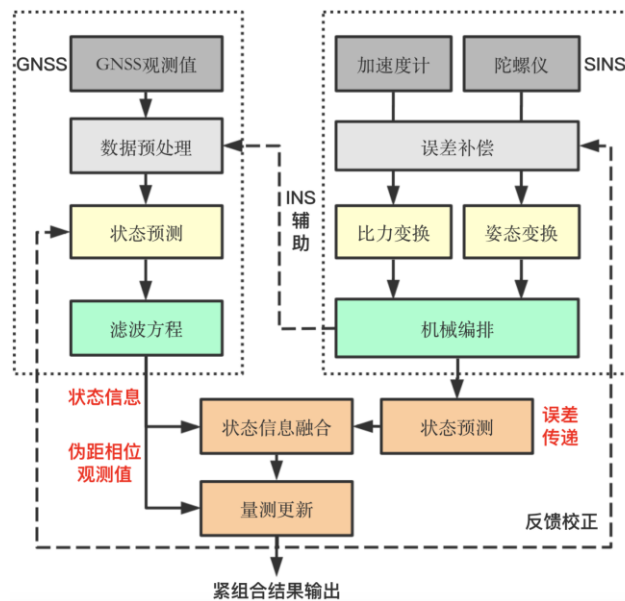
量测模型

$$P - P_0 = \mathbf{nA} \cdot \delta\mathbf{r}_{INS}^n + \mathbf{n}(\tilde{\mathbf{l}}^n \times) \boldsymbol{\phi}^n + \delta t + mf \cdot \delta T_{Trop}$$

$$L - L_0 = \mathbf{nA} \cdot \delta\mathbf{r}_{INS}^n + \mathbf{n}(\tilde{\mathbf{l}}^n \times) \boldsymbol{\phi}^n + \delta t + mf \cdot \delta T_{Trop} + \delta N$$

优点: **精度更高**;

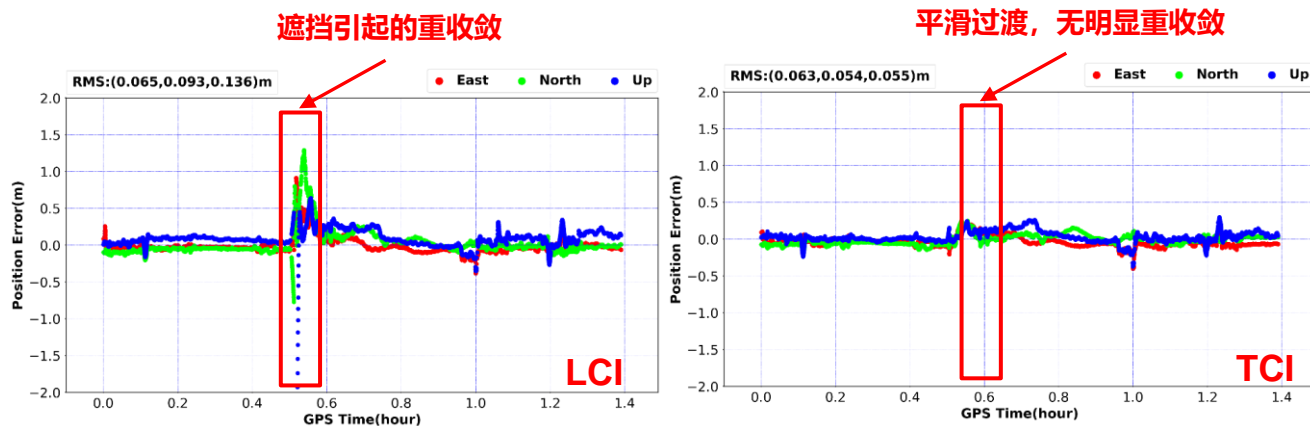
缺点: **结构复杂**。



紧组合利用了原始伪距相位观测值, 从GNSS/INS 整个滤波器的角度来看是一种**全局最优估计**, 理论上具有更高的精度。



GNSS/INS 松、紧组合

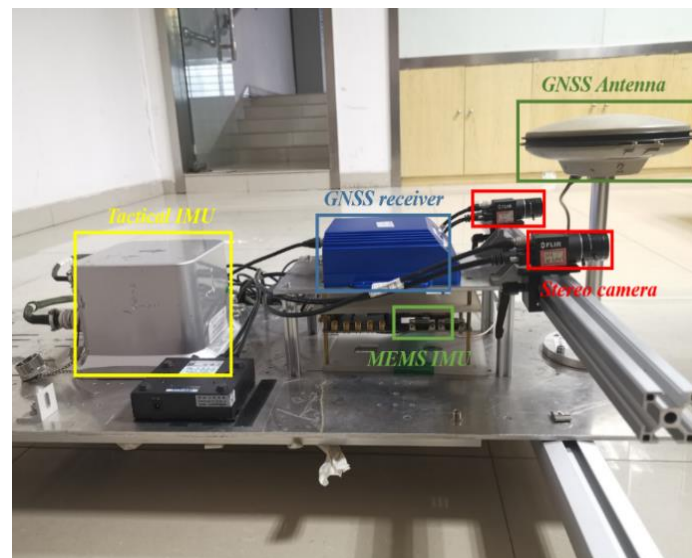
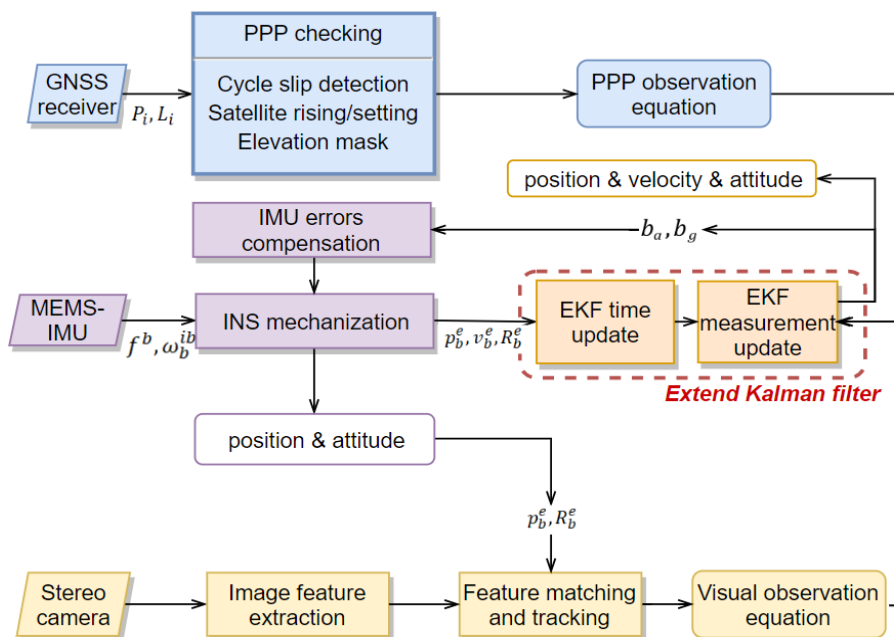


解算模式	位置误差 (m)	速度误差 (mm/s)	姿态误差 (deg)	位置改善 (%)
PPP	(0.067, 0.089, 0.160)	—	—	—
PPP/INS-LCI	(0.065, 0.093 , 0.136)	(6, 4, 5)	(0.007, 0.010, 0.145)	(3.0%, -4.5%, 15%)
PPP/INS-TCI	(0.063, 0.054, 0.055)	(2, 2, 2)	(0.008, 0.009, 0.109)	(6.0%, 39.3%, 65.6%)

✓ 紧组合方式相比于松组合方式具有更高的定位精度和鲁棒性



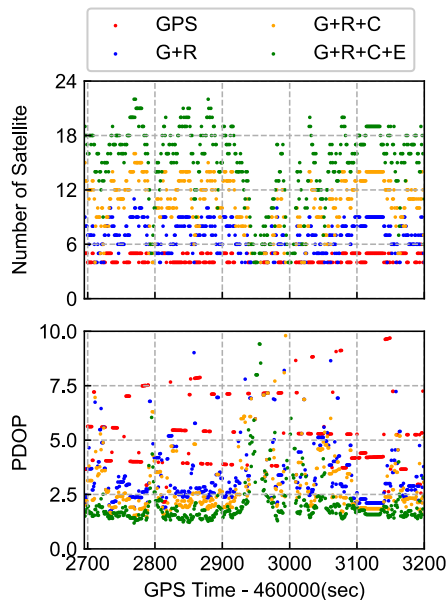
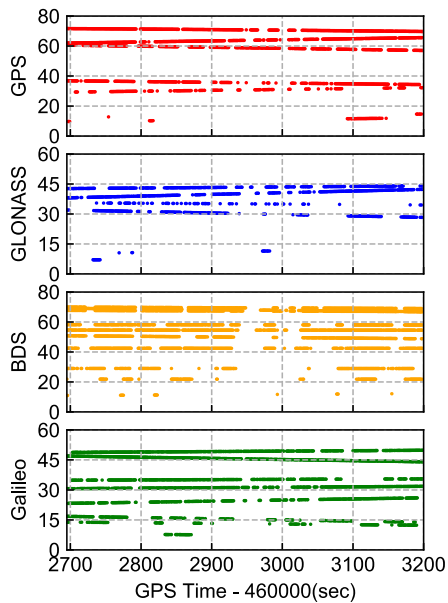
GNSS/INS/VISION 紧组合



- ✓ 直接使用GNSS原始伪距、相位观测值
- ✓ 基于扩展卡尔曼滤波
- ✓ 所有观测信息统一于ECEF下
- ✓ 真值采用RTK/战术级IMU双向紧组合平滑解



实验场景分析



• 频繁的信号中断

• 骤减的卫星数

• 剧烈光线变化、动态物体干扰

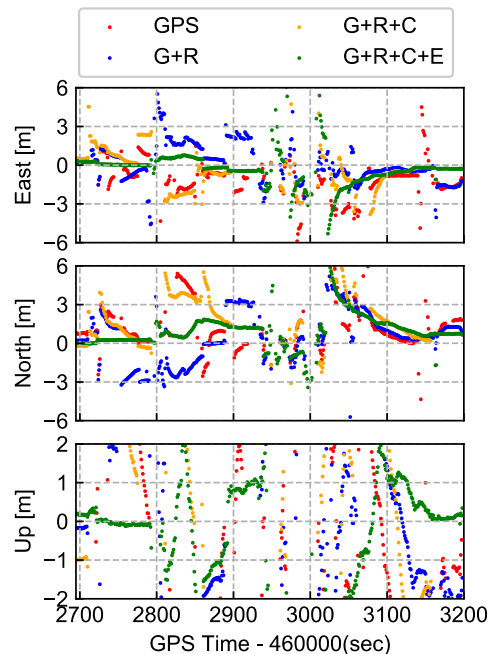
GNSS 观测条件

视觉观测条件

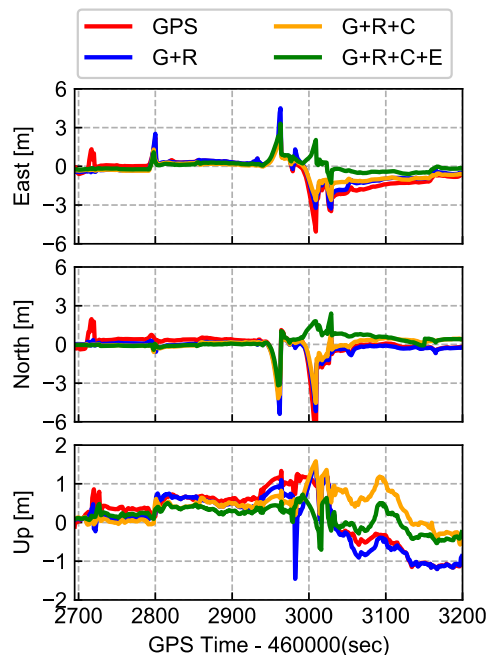
✓ 城市复杂环境是对精密定位的挑战



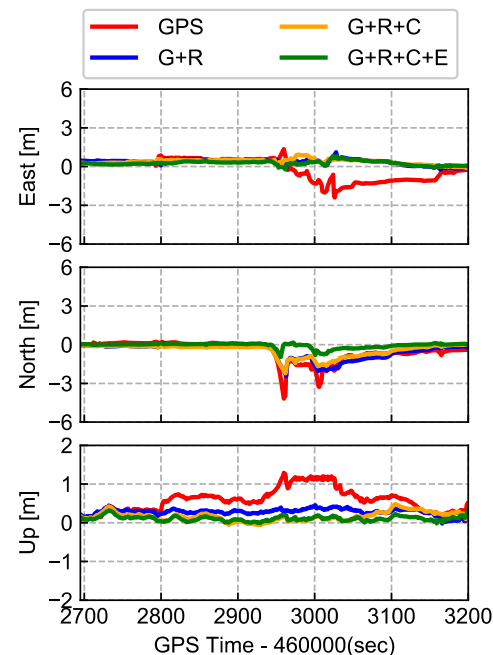
GNSS/INS/VIS紧组合定位结果分析



PPP



PPP/INS



PPP/INS/VISION

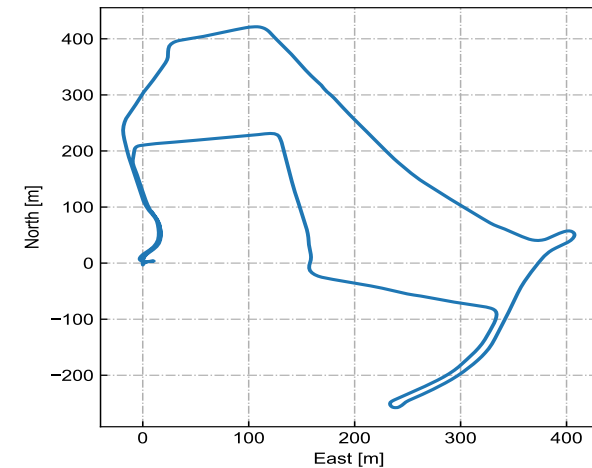
- ✓ 遮挡环境下，INS的辅助，提升了PPP定位的精度和连续性
- ✓ 相比于PPP/INS 紧组合，加入视觉的紧组合体现出更高的定位精度



GNSS/INS/VISION紧组合定位结果分析

RMS (m)	PPP/INS			PPP/INS/VIS			Improvement (%)		
	East	North	Up	East	North	Up	East	North	Up
GPS	1.154	0.916	0.725	0.855	0.909	0.659	25.9	0.8	9.1
G+R	0.954	0.722	0.677	0.419	0.702	0.294	56.1	2.7	56.6
G+R+C	0.772	0.660	0.553	0.431	0.642	0.202	44.2	2.7	63.5
G+R+C+E	0.496	0.599	0.325	0.317	0.199	0.123	36.1	66.8	61.2

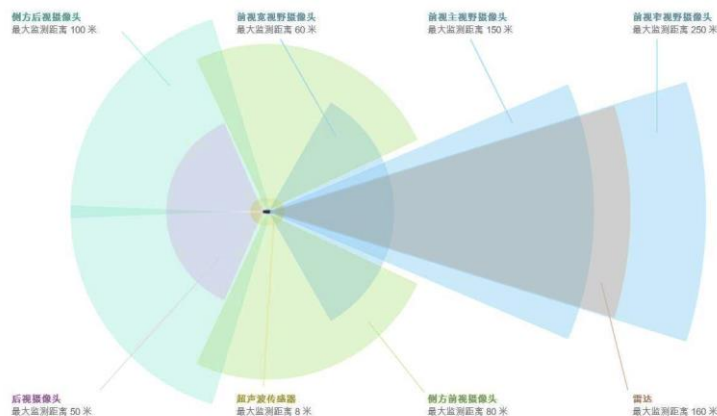
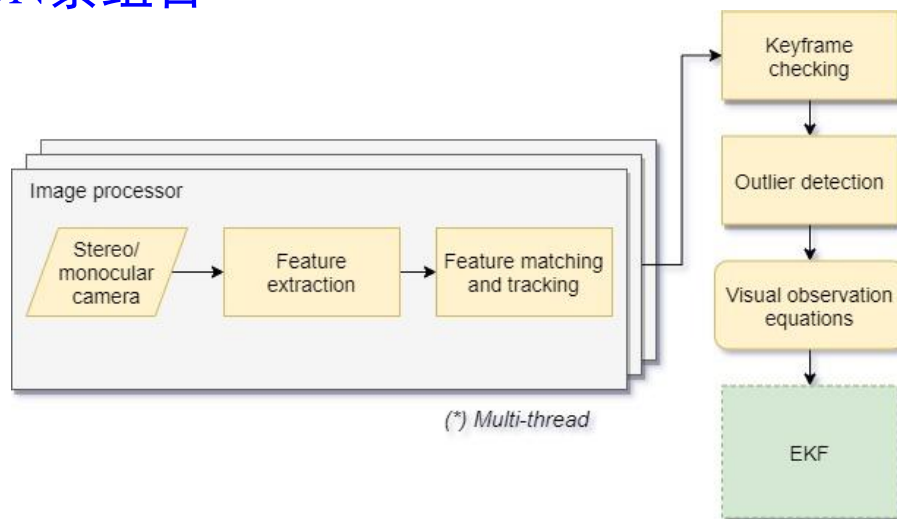
- ✓ 相比于PPP/INS, 三者紧组合在ENU方向上的平均提升率为**40.6%**, **18.3%**和**47.6%**
- ✓ 每增加一个卫星系统, 定位精度的平均提升率为**24.1%**, **13.0%**和**23.0%**



考虑多组相机的GNSS/INS/VISION紧组合



(*)单一朝向相机易受干扰或缺乏可用特征

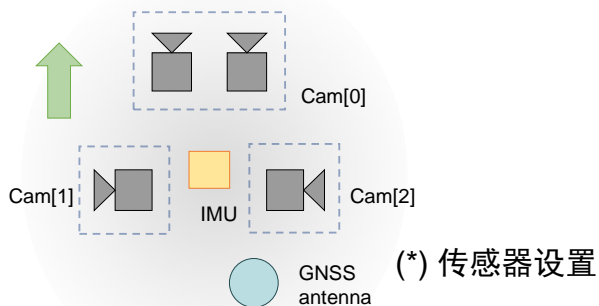


(*)自动驾驶车辆通常配备提供
车身周围视场的相机，
可以加以充分利用

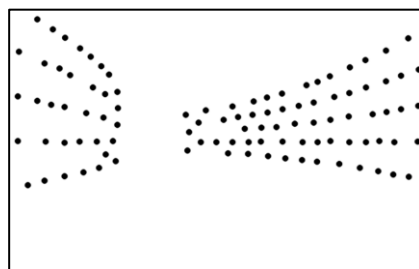
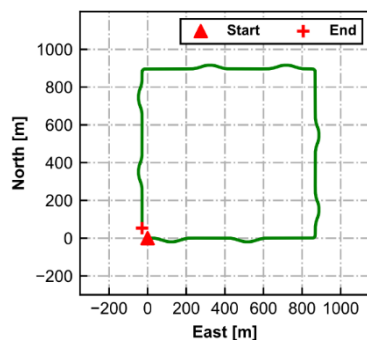
- ✓ 前端图像处理采用多线程，后端采用滤波方式，提供**实时处理大量特征点**的能力
- ✓ 以IMU为中心**整合多组相机**的观测
- ✓ 使用在线估计的方法解决**外参标定**的问题
- ✓ **视场增大** → 可用观测信息增多 → 更大的抗差余地

考虑多组相机的GNSS/INS/VISION紧组合

初步使用仿真的GNSS/INS/VISION数据进行算法测试



✓ 采用**立体相机+单目相机**的组合



(*) 左：仿真车载轨迹 右：仿真特征点观测值

仿真数据参数设置

图像大小：752 * 480

视场角（单个相机）：60°

特征点噪声：1 pix (1σ)

图像采样率：20 Hz

IMU采样率：200 Hz

陀螺仪白噪声：0.5° / $\sqrt{\text{hr}}$

加速度计白噪声：0.2 mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$

加速度常值零偏：(1mg, 1mg, 1mg)

角速度常值零偏：(100° /hr, 100° /hr, 100° /hr)

GNSS：GPS+BDS+Galileo (双频伪距/载波相位)

✓ 考虑**低成本传感器**的参数

✓ **仿真场景**考虑自动驾驶车辆的典型场景



考虑多组相机的GNSS/INS/VISION紧组合

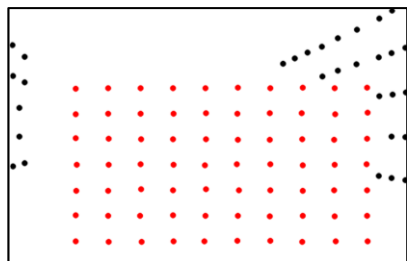
➤ VIO相对精度测试

(*) 考虑以下两种常见的视觉干扰情况

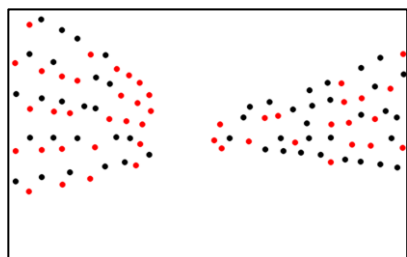
前向双目



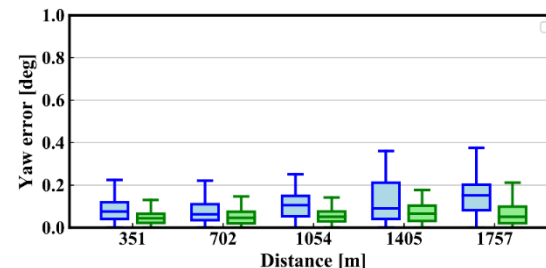
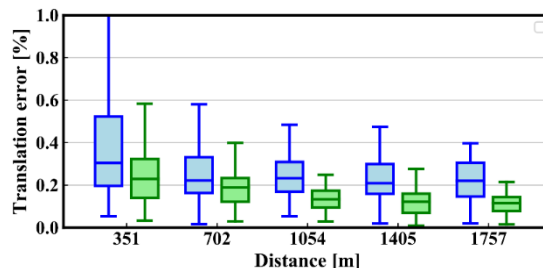
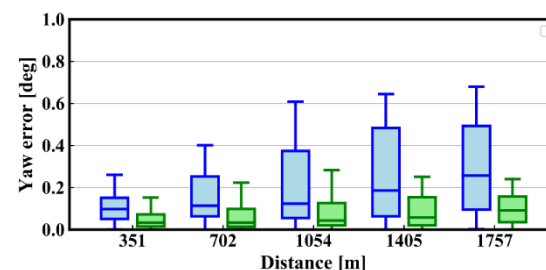
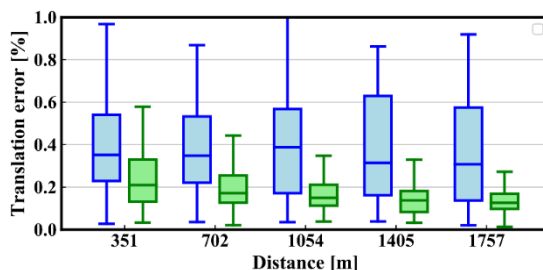
前向双目+双侧向单目



跟车型粗差点



大量动态点 (60%)



位置

姿态

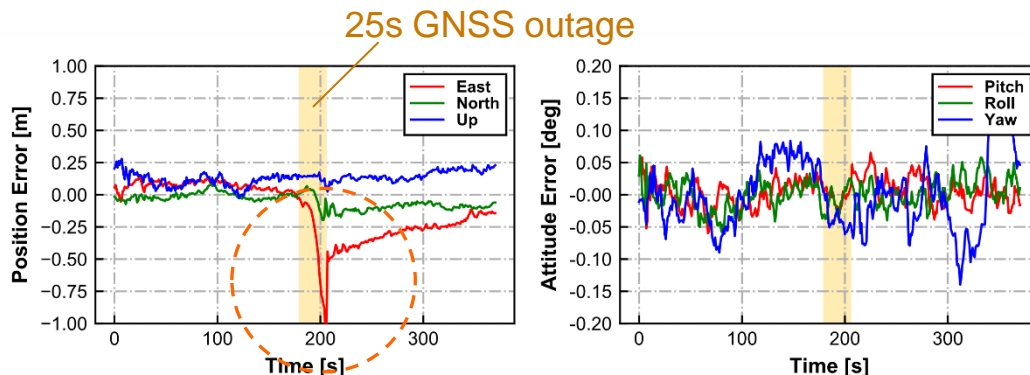
✓ 在单一相机存在干扰的情况下，多相机可以提供更稳健的VIO效果。



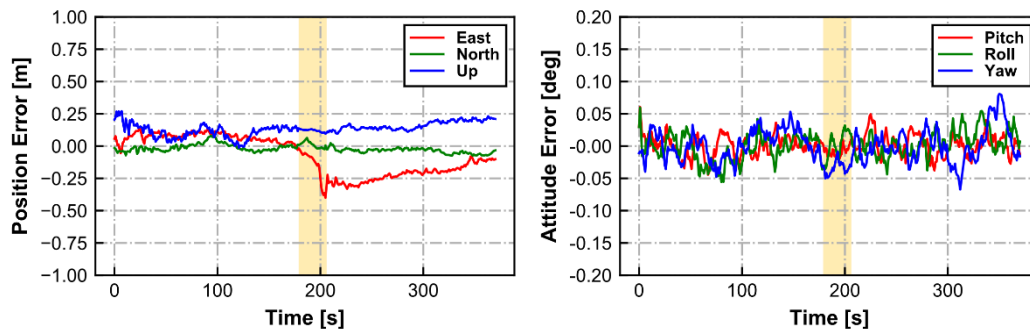
考虑多组相机的GNSS/INS/VISION紧组合

➤ GNSS/INS/VISION三者组合绝对精度测试 (*) 考虑前向相机受到动态物体干扰

前向双目



前向双目+双侧向单目

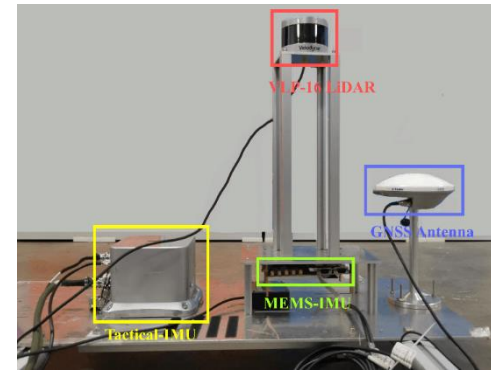
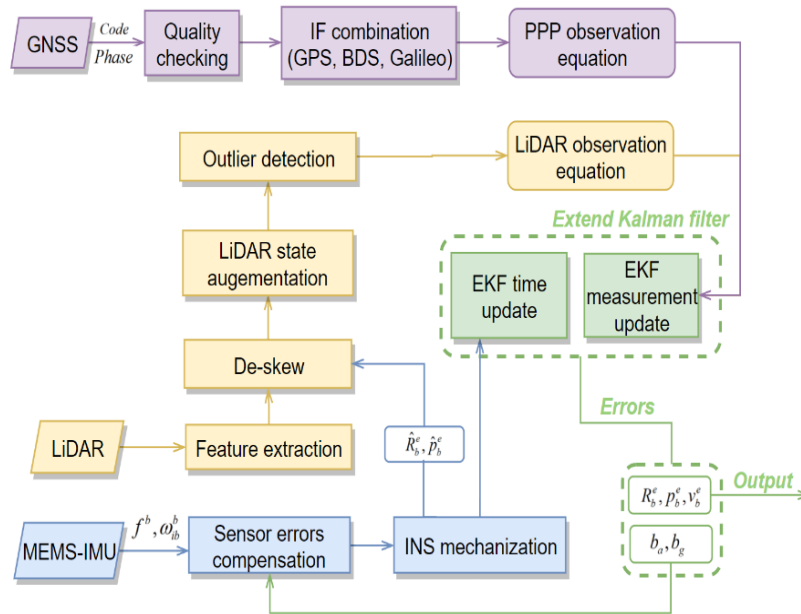


位置

姿态

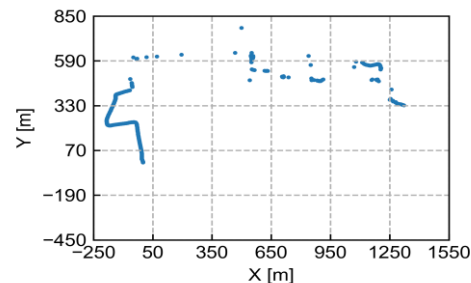
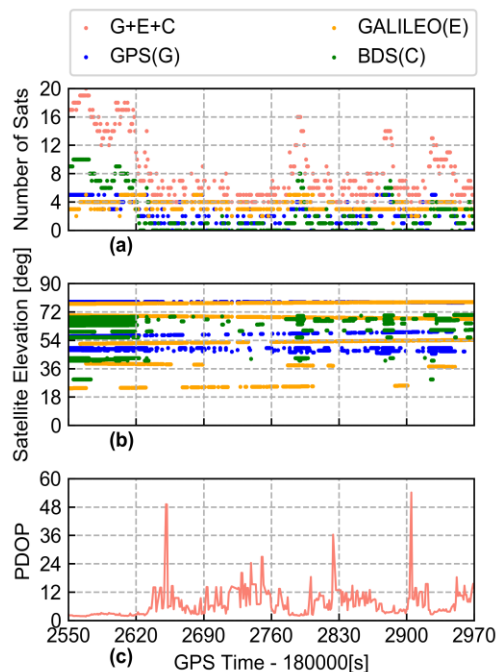
✓ 在GNSS中断，单一相机存在干扰的情况下，多相机可以提供更稳健的导航效果。

GNSS/INS/LiDAR 紧组合



- ✓ LiDAR采用点到线，点到面的距离作为观测值
- ✓ MEMS-IMU辅助LiDAR去除运动畸变

实验场景分析



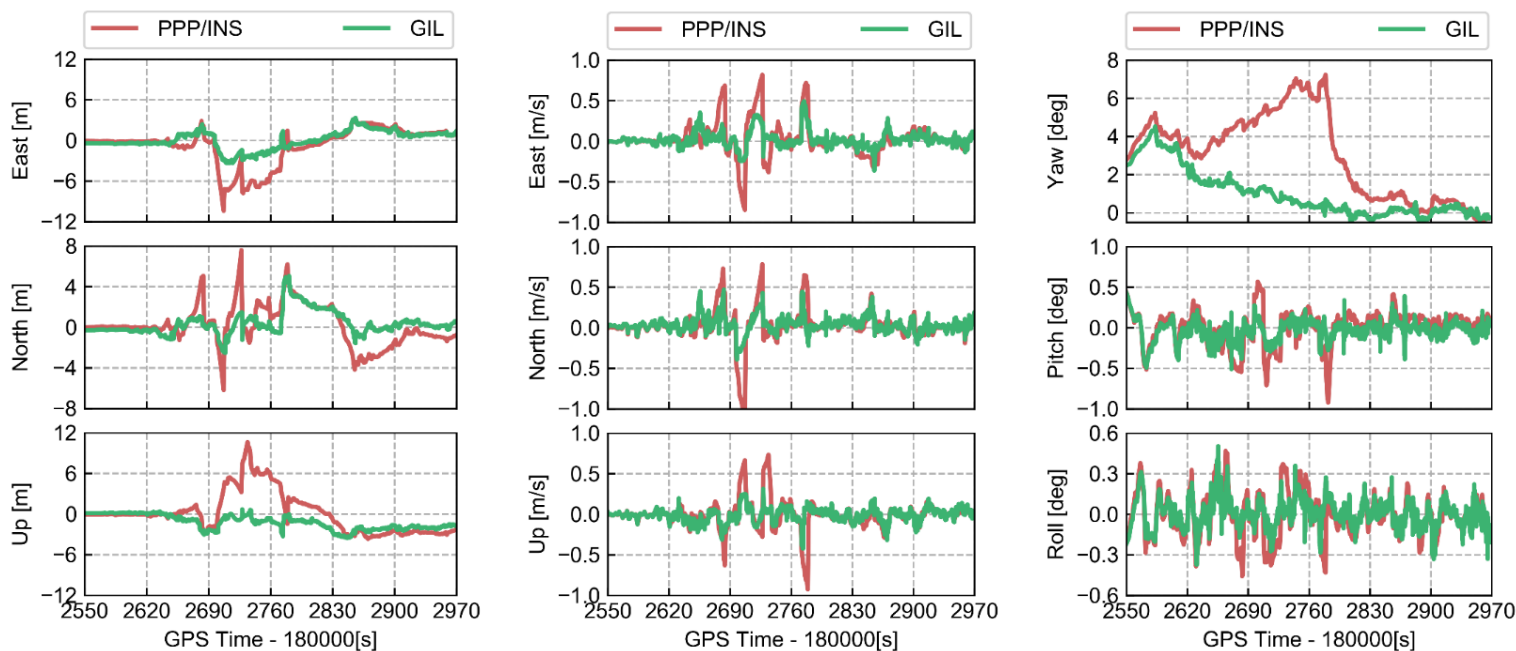
- 卫星信号**遮挡严重**

- 平均卫星数仅为**7**颗
- 伴随着严重的信号中断

- PPP定位**不连续**



GNSS/INS/LiDAR紧组合定位结果分析



位置

速度

姿态

- ✓ PPP/INS/LiDAR紧组合在定位、定姿、测速方面均优于PPP/INS紧组合
- ✓ LiDAR的加入极大地提升了航向角的精度



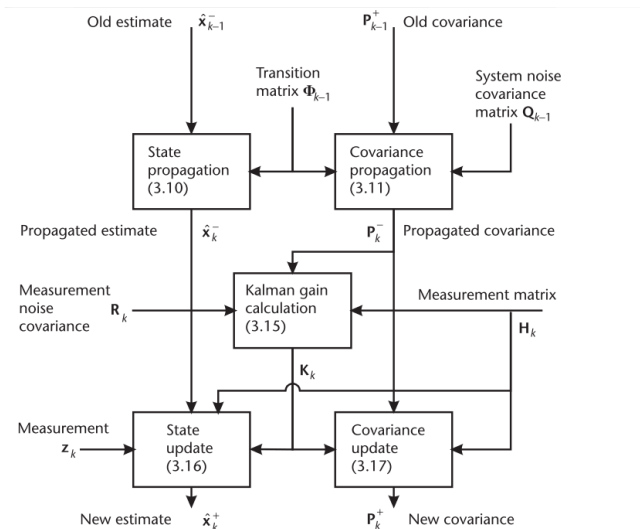
GNSS/INS/LiDAR紧组合定位结果分析

Methods		Multi-GNSS PPP/INS	GIL	Improvements (%)
Position RMSE (m)	East	2.82	1.41	50.0
	North	1.97	1.25	36.5
	Up	2.99	1.70	43.1
Maximum position error (m)	East	10.41	3.35	67.8
	North	7.60	5.05	33.6
	Up	10.62	3.56	66.5
Velocity RMSE (m/s)	East	0.20	0.11	45.0
	North	0.21	0.10	52.4
	Up	0.18	0.09	50.0
Maximum velocity error (m/s)	East	0.85	0.49	42.4
	North	1.09	0.47	56.9
	Up	0.93	0.43	53.8
Attitude RMSE (deg)	Yaw	3.73	1.16	68.9
	Pitch	0.22	0.12	45.5
	Roll	0.17	0.10	41.2

- ✓ 相比于PPP/INS, 融入LiDAR的紧组合的方案在ENU方向的位置提升率为 **50.0%, 36.5%, 43.1%**
- ✓ 对应的姿态提升率为 **68.9%, 45.5%, 41.2%**

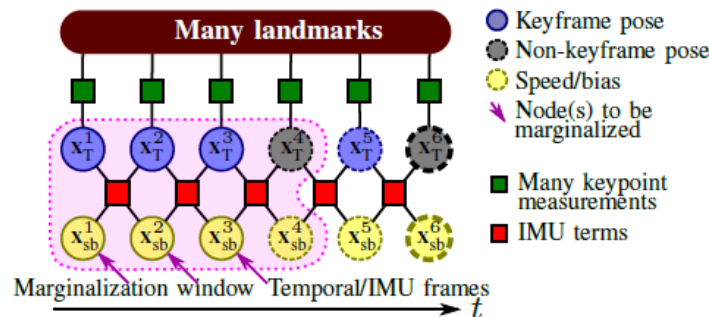


卡尔曼滤波与图优化



卡尔曼滤波

- ✓ 计算效率高
- ✓ 适合多传感器融合



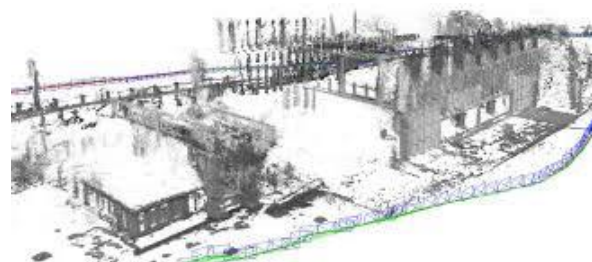
图优化

- ✓ 良好的全局一致性
- ✓ 适合非线性问题

视觉激光传感器互补特性

视觉SLAM

- 被动感知可见光，受环境光、纹理特征影响较大
- 无探测距离限制，成本较低
- 测距精度较低，单目存在尺度问题
- 具有丰富的语义信息
- 回环检测能力强，位姿修正能力较低

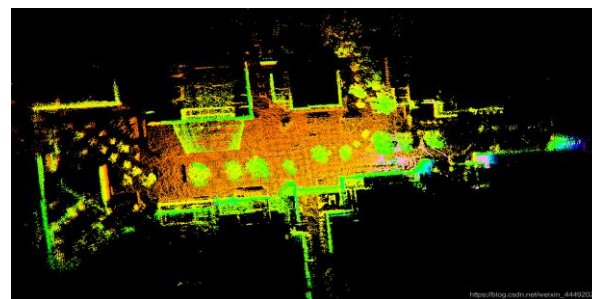


LSD-SLAM

二者存在互补特性！

激光雷达SLAM

- 主动发射激光束，受环境光影响较小，需要结构化特征
- 探测范围有限，目前成本较高
- 测距精度较高
- 语义信息较弱
- 回环检测能力弱，地图匹配精度较高



LOAM

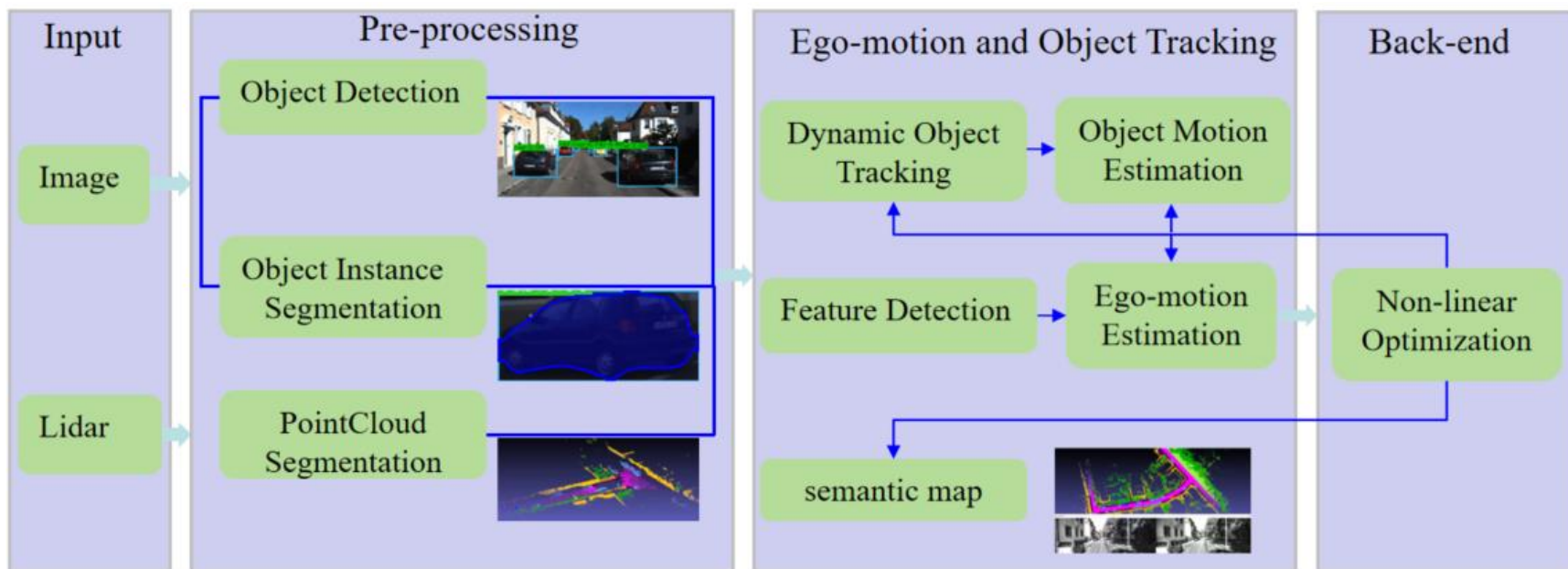
基于图优化的导航定位算法

GREAT

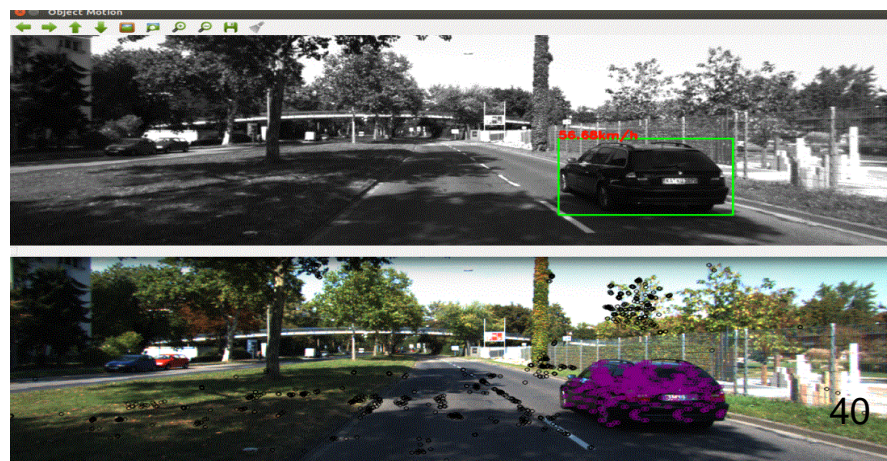
GNSS+ REsearch, Application and Teaching



前端语义模块



- 应用深度学习网络，提取目标语义信息，联合后端模块解算目标状态，消除动态目标干扰，提升载体位姿估计的精度



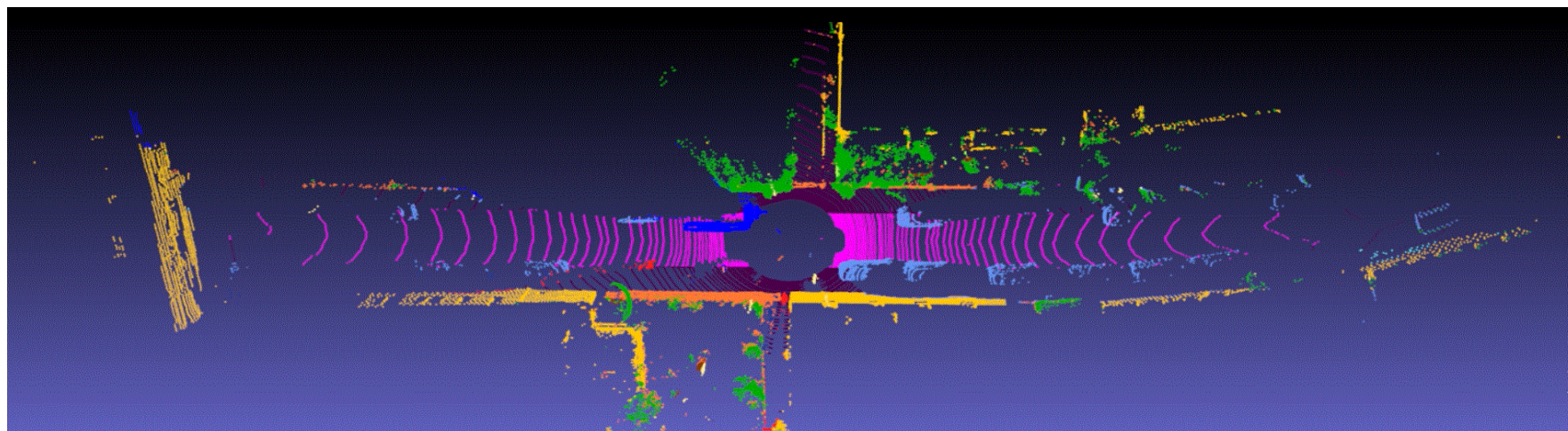
基于图优化的导航定位算法

GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching



前端语义模块——KITTI数据目标检测和语义分割



inference time for the frame: 85.642303 ms

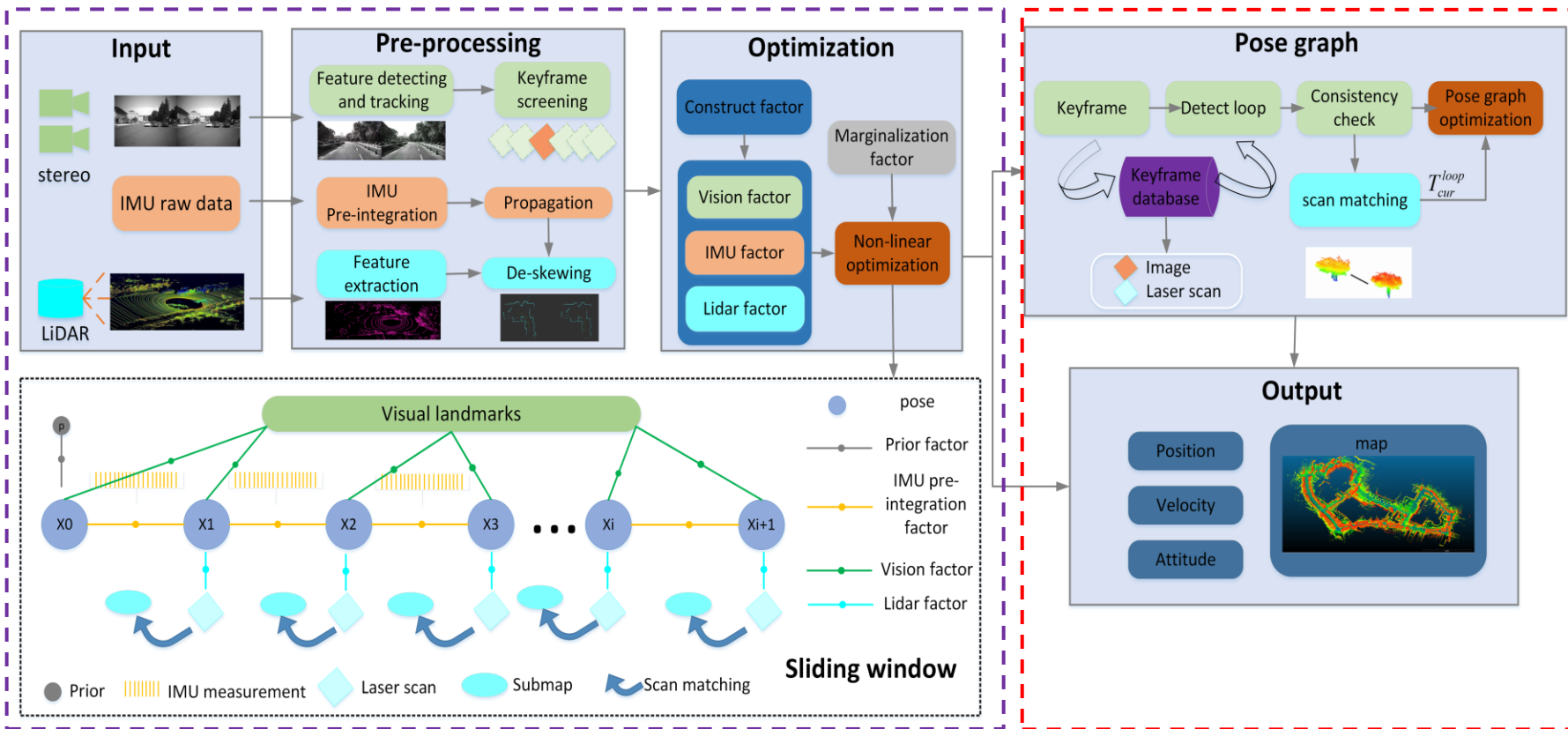


➤ NVIDIA GeForce RTX 2060

基于图优化的导航定位算法



后端优化模块



基于图优化的紧耦合视觉/惯性/LiDAR里程计

全局位姿图优化

基于图优化的导航定位算法

GREAT

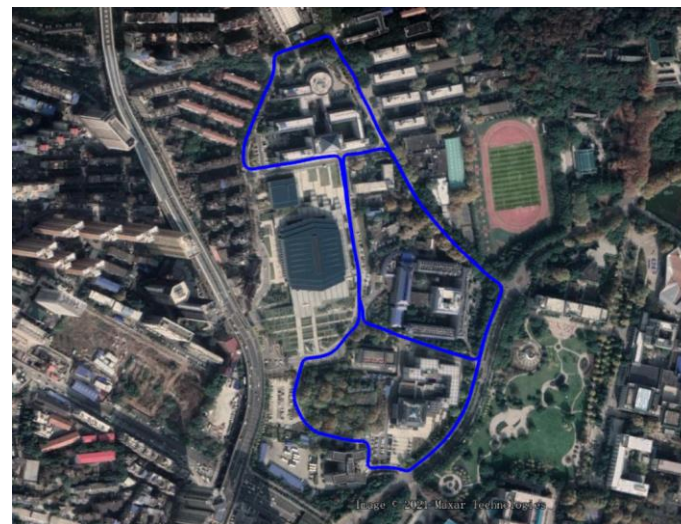
GNSS+ REsearch, Application and Teaching



城市复杂环境下车载实验验证



实验场景示意图



轨迹俯视图

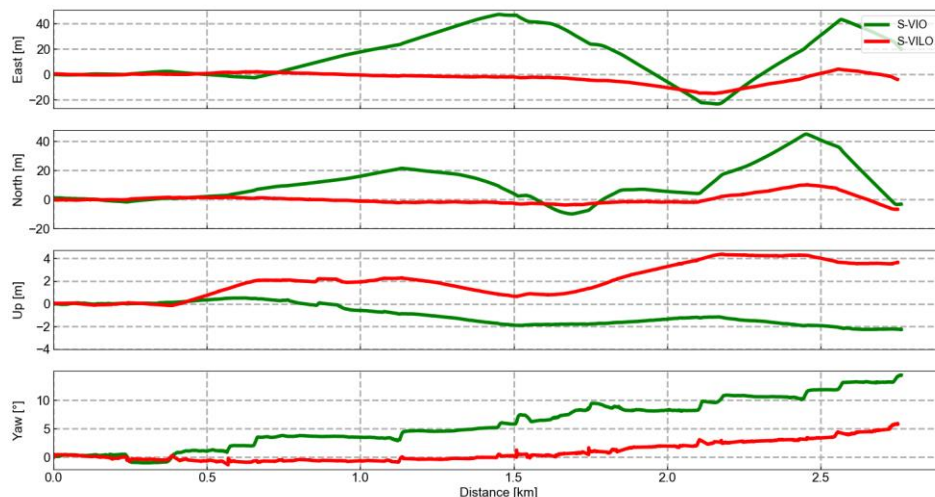
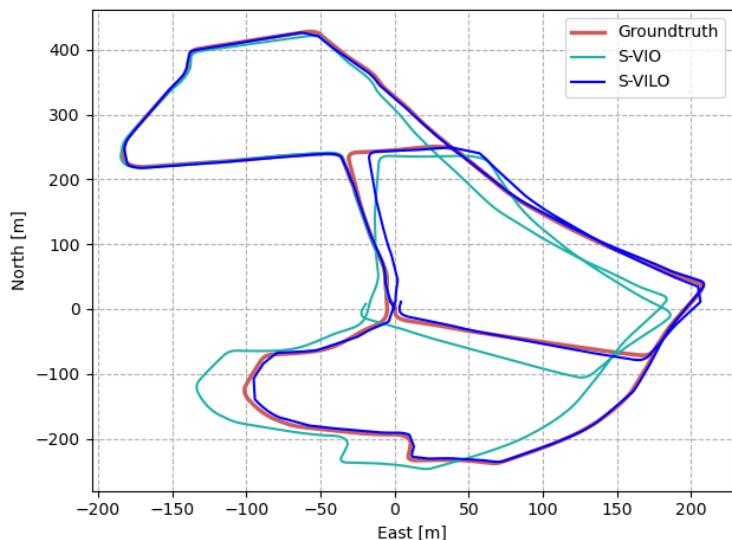
- ✓ 大尺度场景，全程2600m左右
- ✓ 道路两旁存在树木、高楼等结构化特征
- ✓ 存在上下坡等明显的高程变化
- ✓ 人、车等动态物体较多
- Ground Truth: RTK/战术级惯导事后双向紧组合平滑解

基于图优化的导航定位算法



基于图优化的紧耦合视觉/惯性/LiDAR里程计

绝对轨迹误差 (ATE)



		S-VIO	S-VILO
Position RMS (m)	E	17.856	4.004
	N	11.996	3.962
	U	0.967	1.453
Attitude RMS (deg)	Y	4.930	2.655

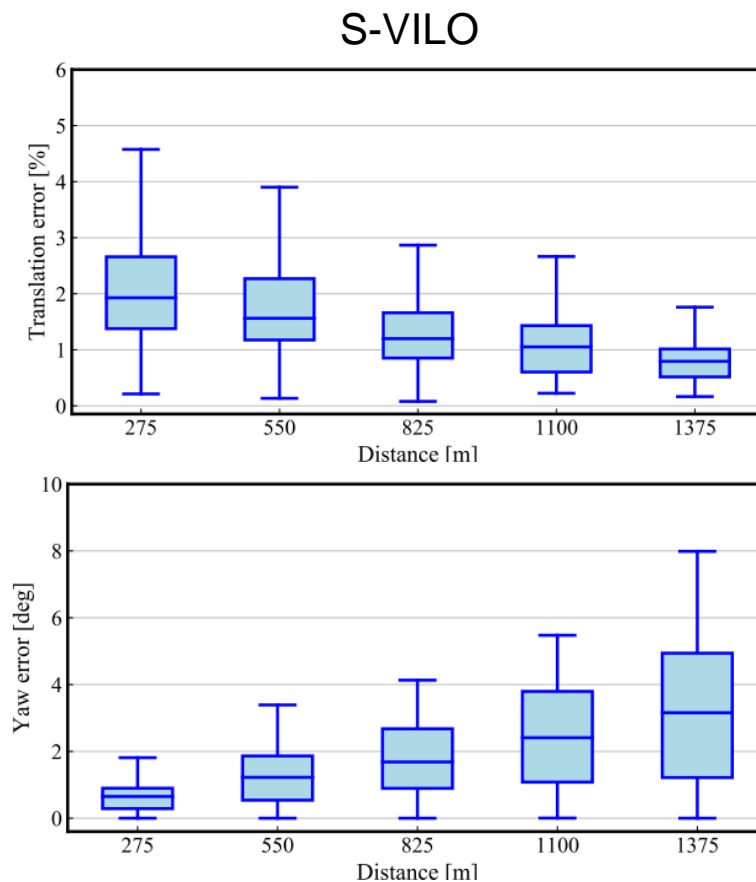
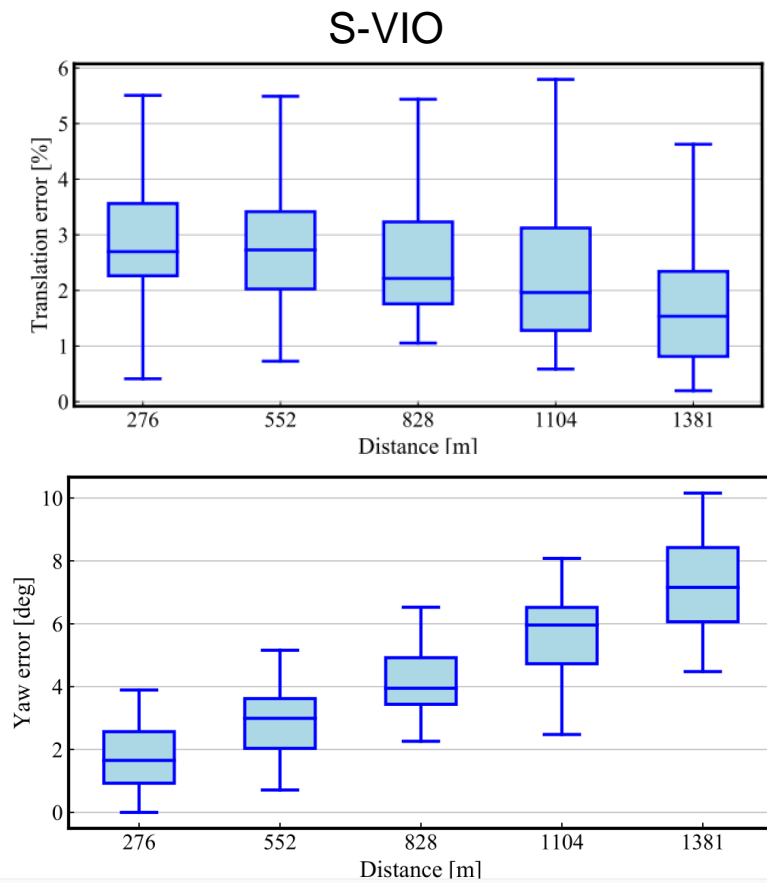
- 本组实验中，相比于紧耦合视觉/惯性里程计，视觉/惯性/LiDAR里程计的航向角精度提升**46.1%**，平面精度提升**73.8%**

基于图优化的导航定位算法



基于图优化的紧耦合视觉/惯性/LiDAR里程计

➤ 相对位姿评估 (RPE)



- 大尺度场景下VIO估计结果随着里程增加发散较为明显，加入lidar信息后可以有效抑制里程计的发散，得到更加精确的相对位姿结果

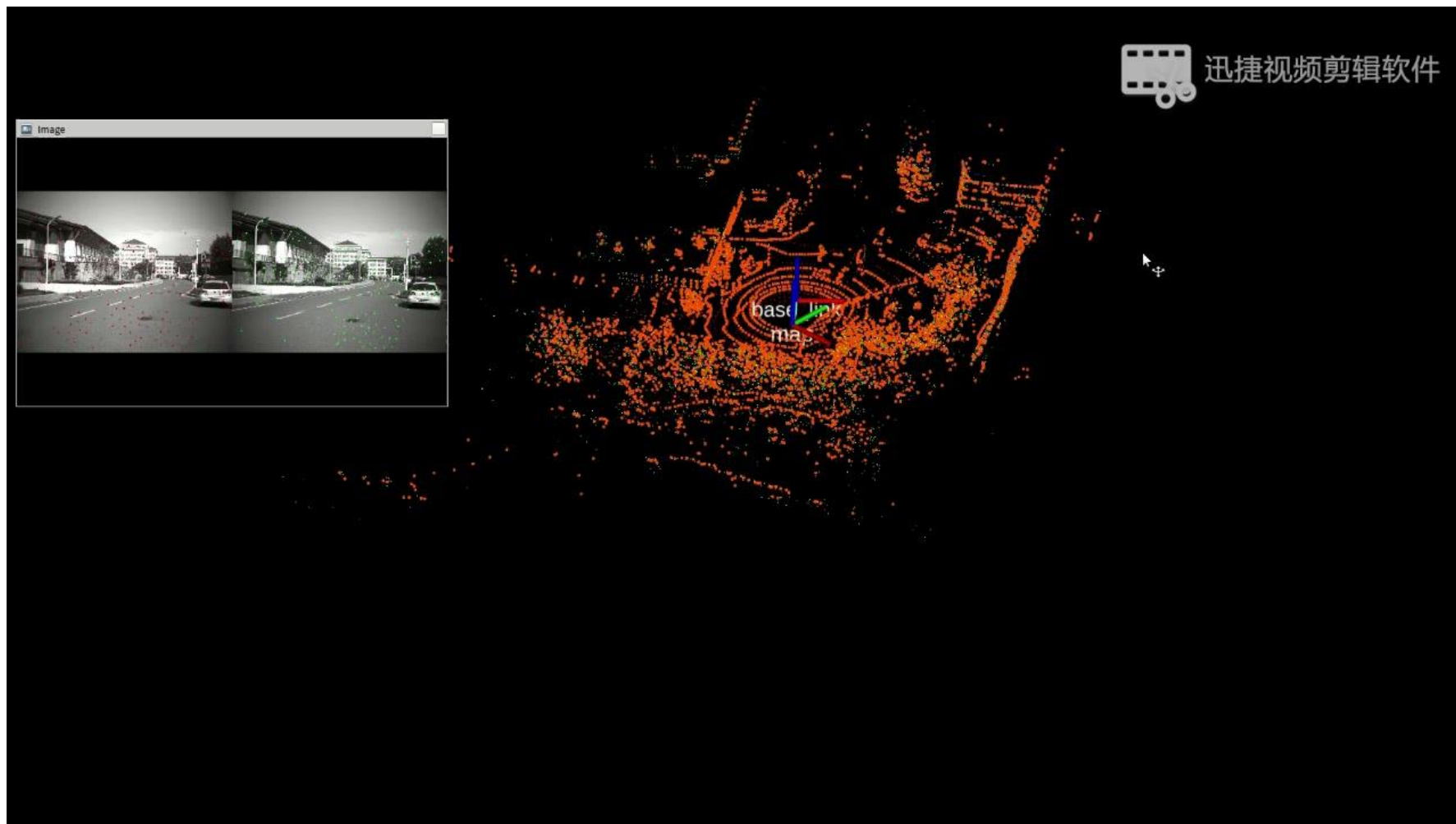
基于图优化的导航定位算法

GREAT

GNSS+ REsearch, Application and Teaching



全局位姿图优化



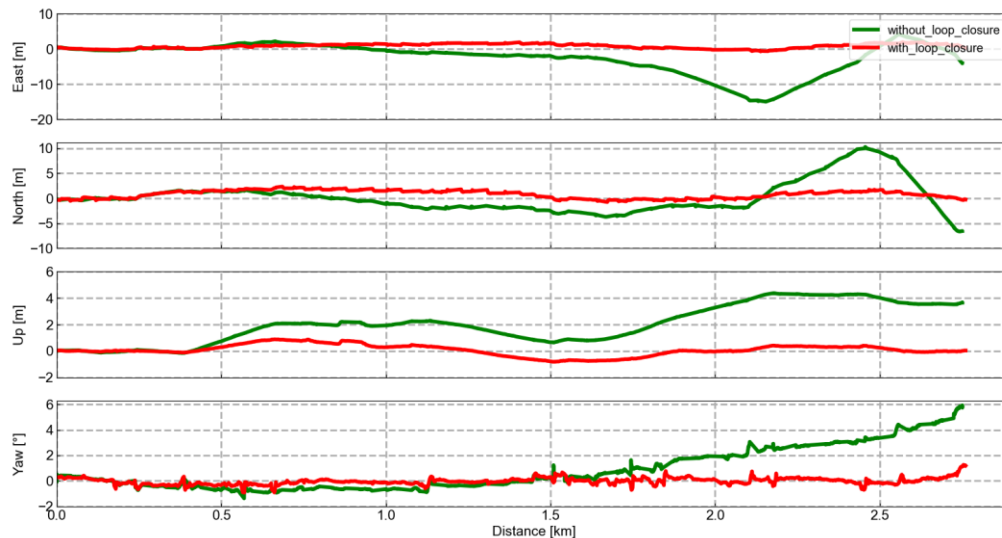
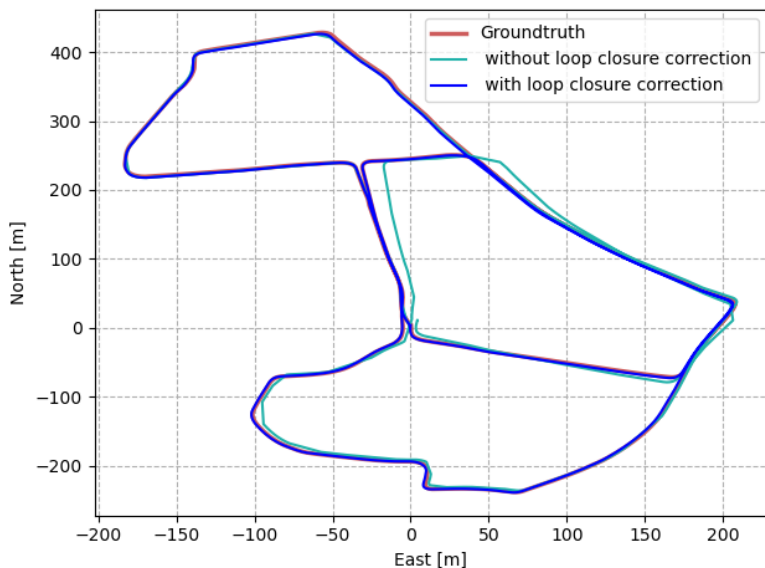
轨迹中的有效闭环信息可以修正里程计的累积误差，得到全局一致的估计结果

基于图优化的导航定位算法



全局位姿图优化

绝对轨迹误差 (ATE)



		without loop closure	with loop closure
Position RMS (m)	E	4.004	0.655
	N	3.962	0.802
	U	1.453	0.421
Attitude RMS (deg)	Y	2.655	0.697

- 这组实测数据中，全局位姿图优化结果相比于里程计结果，三维定位精度提升：
E: 83.6%; N:79.8%; U:71.0%
- 航向角精度提升: 73.7%

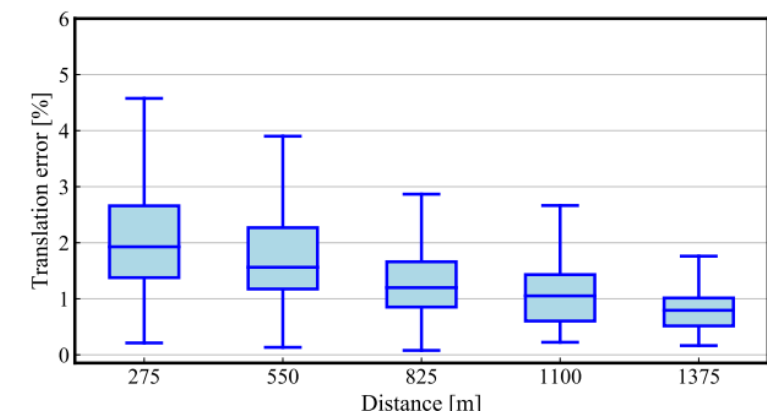
基于图优化的导航定位算法



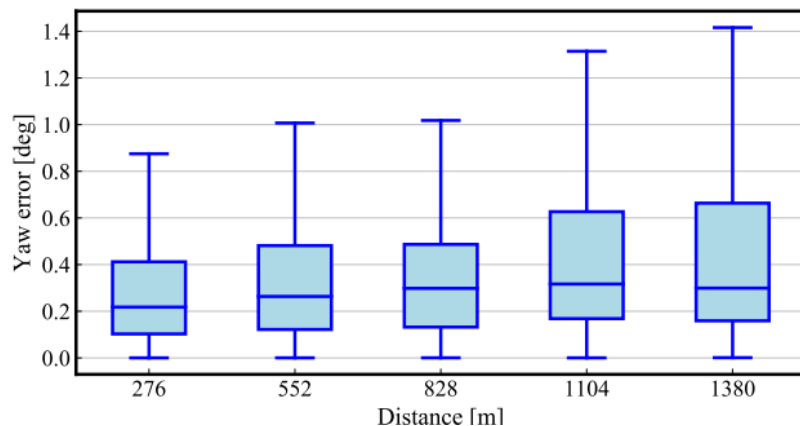
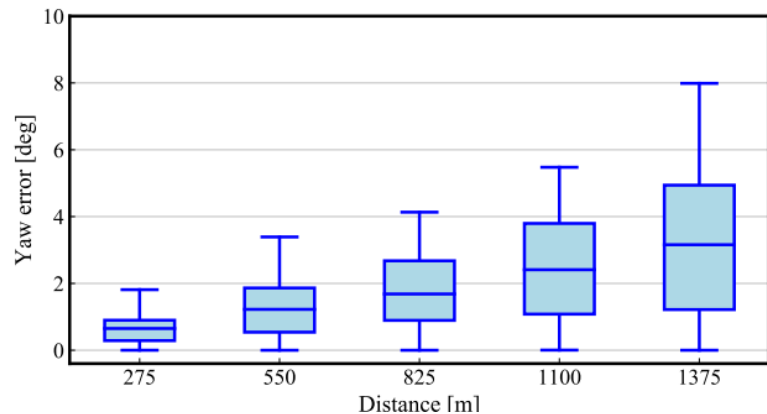
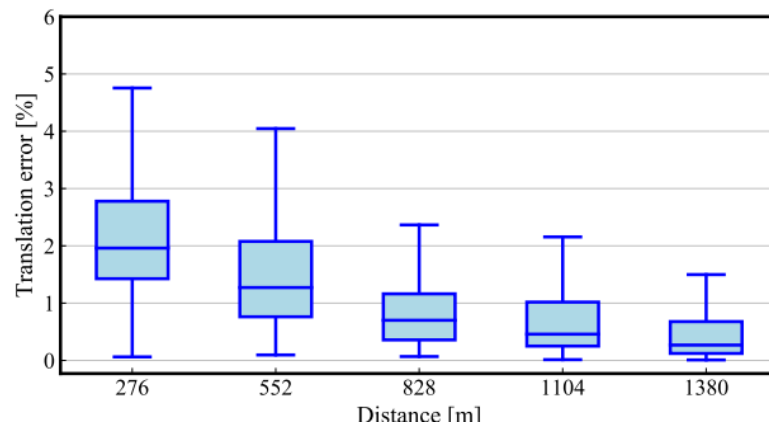
全局位姿图优化

相对位姿评估 (RPE)

无闭环约束



有闭环约束



- 大尺度场景下，有效的**闭环约束信息**可以显著提升位姿图的优化结果



□ 总结

- ✓ GPS+Galileo+BDS五频PPP-AR仅需要**4.6分钟**即可实现收敛
- ✓ 多系统融合可以提升PPP-RTK的定位精度和可靠性，实时高动态场景下的模糊度固定率达**95%以上**，水平方向定位精度优于2个厘米
- ✓ 低轨星座增强GNSS能够实现**1分钟**以内的快速收敛，降低PPP-RTK技术对地基参考网的依赖
- ✓ 在滤波框架下，引入视觉和雷达观测的紧组合系统能够在**弱GNSS环境**下提供更加连续的高精度导航定位
- ✓ 相比于基于优化的紧耦合视觉惯性里程计，引入**LiDAR原始观测信息**可以实现更高精度的局部位姿估计，误差累积更为缓慢
- ✓ 在大尺度场景下，**有效的闭环约束信息**可以显著提升位姿图的优化效果，得到**全局一致**的高精度定位定姿结果



- [1]. Li X, Han X, Li X et al (2021) GREAT-UPD: An open-source software for uncalibrated phase delay estimation based on multi-GNSS and multi-frequency observations. GPS Solutions
- [2]. Liao J, Li X, Wang X et al (2021) Enhancing navigation performance through visual-inertial odometry in GNSS-degraded environment. GPS Solutions
- [3]. Li X, Wang X, Liao J et al (2021) Semi-tightly coupled integration of multi-GNSS PPP and S-VINS for precise positioning in GNSS-challenged environments. Satellite Navigation
- [4]. Li X, Li X, Liu G et al (2020) BDS multi-frequency PPP ambiguity resolution with new B2a/B2b/B2a+b signals and legacy B1I/B3I signals. Journal of Geodesy
- [5]. Li X, Zhang K, Meng X et al (2020) LEO-BDS-GPS integrated precise orbit modelling using FengYun-3D, Fengyun-3C onboard and ground observations. GPS Solutions
- [6]. Li X, Yuan Y, Zhu Y et al (2020) Improving BDS-3 precise orbit determination for medium earth orbit satellites. GPS Solutions
- [7]. Yuan Y, Li X, Zhu Y et al (2020) Improving QZSS precise orbit determination by considering the solar radiation pressure of the L-band antenna. GPS Solutions
- [8]. Li X, Li X, Liu G et al (2020) The phase and code biases of Galileo and BDS-3 BOC signals: effect on ambiguity resolution and precise positioning. Journal of Geodesy
- [9]. Li X, Liu G, Li X et al (2020) Galileo PPP rapid ambiguity resolution with five-frequency observations. GPS Solutions



- [10]. Li X, Xiong Y, Yuan Y et al (2019) Real-time estimation of multi-GNSS integer recovery clock with undifferenced ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*
- [11]. Zhang K, Li X, Xiong C et al (2019) The Influence of Geomagnetic Storm of 7-8 September 2017 on the Swarm Precise Orbit Determination. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*
- [12]. Li X, Ma F, Li X et al (2019) LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence. *Journal of Geodesy*
- [13]. Li X, Ma T, Xie W et al (2019) FY-3D and FY-3C onboard observations for differential code biases estimation. *GPS Solutions*
- [14]. Li X, Xie W, Huang J et al (2019) Estimation and analysis of differential code biases for BDS3/BDS2 using iGMAS and MGEX observations. *Journal of Geodesy*
- [15]. Li X, Li X, Liu G et al (2019) Triple-frequency PPP ambiguity resolution with multi-constellation GNSS: BDS and Galileo. *Journal of Geodesy*
- [16]. Li X, Yuan Y, Huang J et al (2019) Galileo and QZSS precise orbit and clock determination using new satellite metadata. *Journal of Geodesy*
- [17]. Li X, Yuan Y, Zhu Y et al (2019) Precise orbit determination for BDS3 experimental satellites using iGMAS and MGEX tracking networks. *Journal of Geodesy*
- [18]. Li X, Wu J, Zhang K et al (2019) Real-time kinematic precise orbit determination for LEO satellites using zero-differenced ambiguity resolution. *Remote Sensing*