



航天工程大学
space engineering university

卫星导航高精度定位及应用

答辩人：易流

组 员：刘宪 李文浩

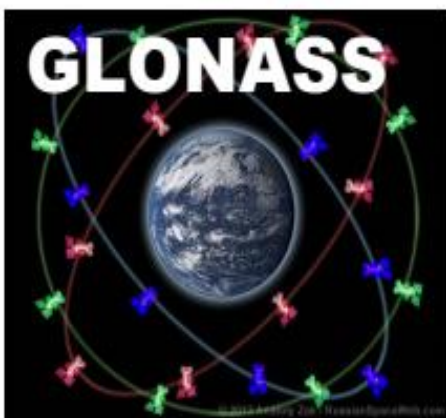
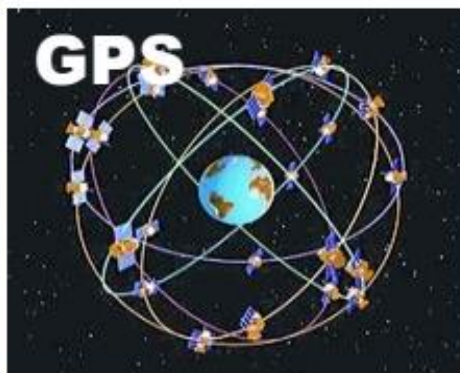
王震 蓝秦隆







答辩日期：2024年12月2日

目录

- 一 ▶ 研究背景及意义
- 二 ▶ 国内外研究现状
- 三 ▶ 主要研究内容与方法
- 四 ▶ PPP应用

一、研究背景及意义



	GNSS	Sat. type	Navigation signals	NSat.
	GPS	Block IIR-A/B	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	8
		Block IIR-M	+L2C	8
		Block IIF/III	+L5/ +L5, L1C	16
	GLONASS	GLONASS-M	L1/L2 C/A+P	24
		GLONASS-K	L1/L2 C/A+P, L3 (CDMA)	3
	BDS	BDS-2	B1, B2, B3	15
		BDS-3	B1, B3, B1C, B2a/b/a+b	30
	GALILEO	IOV	E1, E5a/b/a+b	4
		FOC	E1, E5a/b/a+b	22
	QZSS	IGSO	L1, L2, L5	4
	IRNSS/ NavIC	IGSO	L5, S	5
		GEO	L5, S	3

多系统多频可提高定位结果的稳定性和可靠性

一、研究背景及意义



航天工程大学
space engineering university

随着自动驾驶、人工智能等新兴技术的快速发展，用户对全球实时高精度时空信息提出了更高的要求。



导航技术

优点

缺点

精密单点定位 (PPP)

无误差积累

易受到环境影响

惯性导航 (INS)

自主性强，短时精度高

误差积累会影响精度

因此研究多系统多频PPP-AR/INS组合导航技术，
为用户在复杂环境下提供实时高精度时空的位置服务具有十分重要的意义

目录

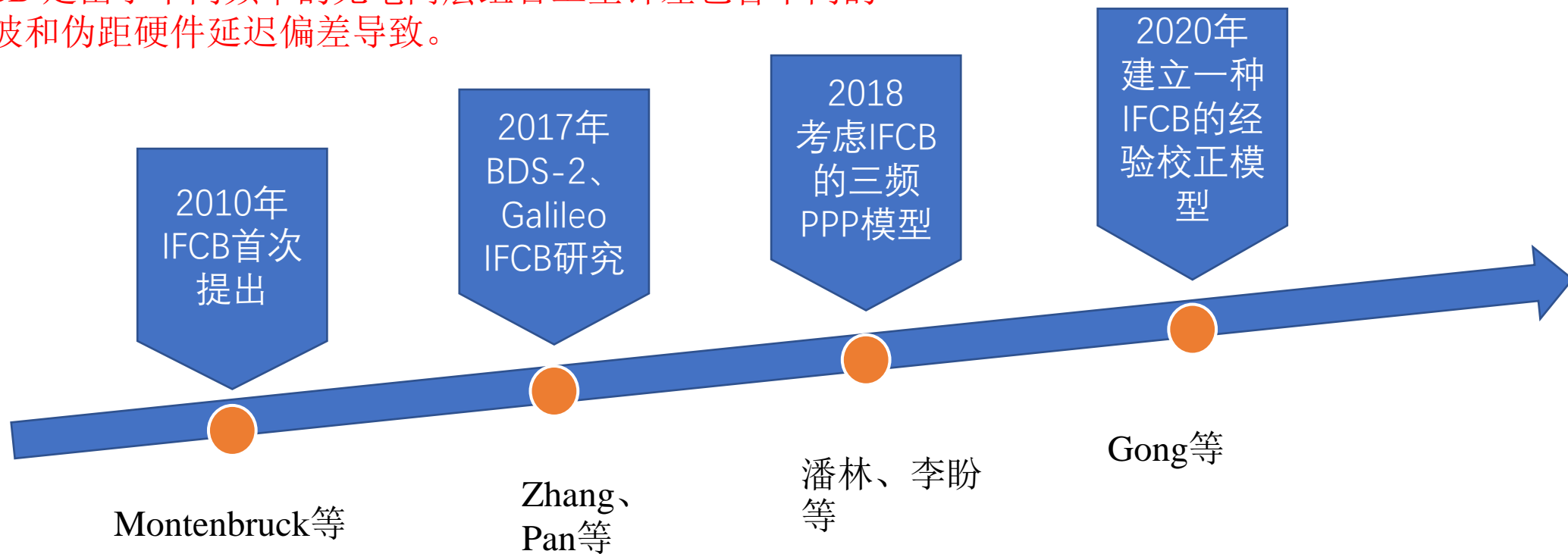
- 一 ▶ 研究背景及意义
- 二 ▶ 国内外研究现状
- 三 ▶ 主要研究内容与方法
- 四 ▶ PPP应用

二、国内外研究现状



➤ 卫星频间钟偏差(IFCB)研究现状

IFCB 是由于不同频率的无电离层组合卫星钟差包含不同的载波和伪距硬件延迟偏差导致。



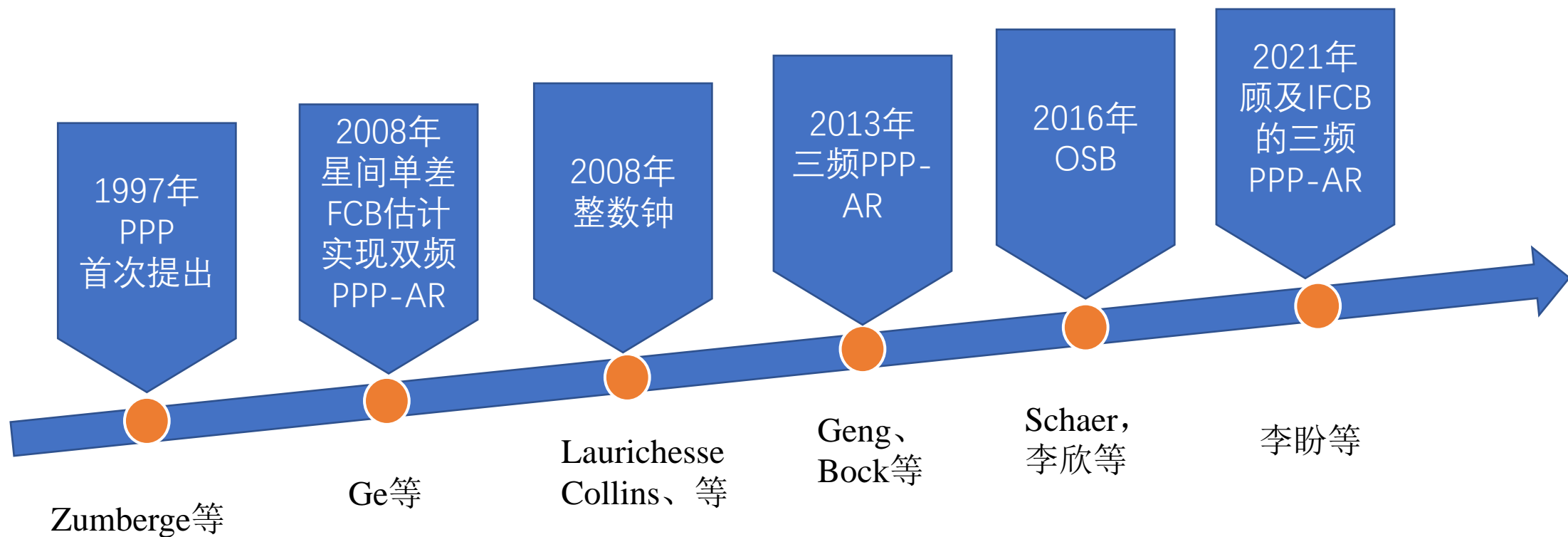
1. 非组合IFCB的研究较少
2. 针对BDS-3的IFCB研究分析较少

二、国内外研究现状



航天工程大学
space engineering university

➤ PPP-AR研究现状



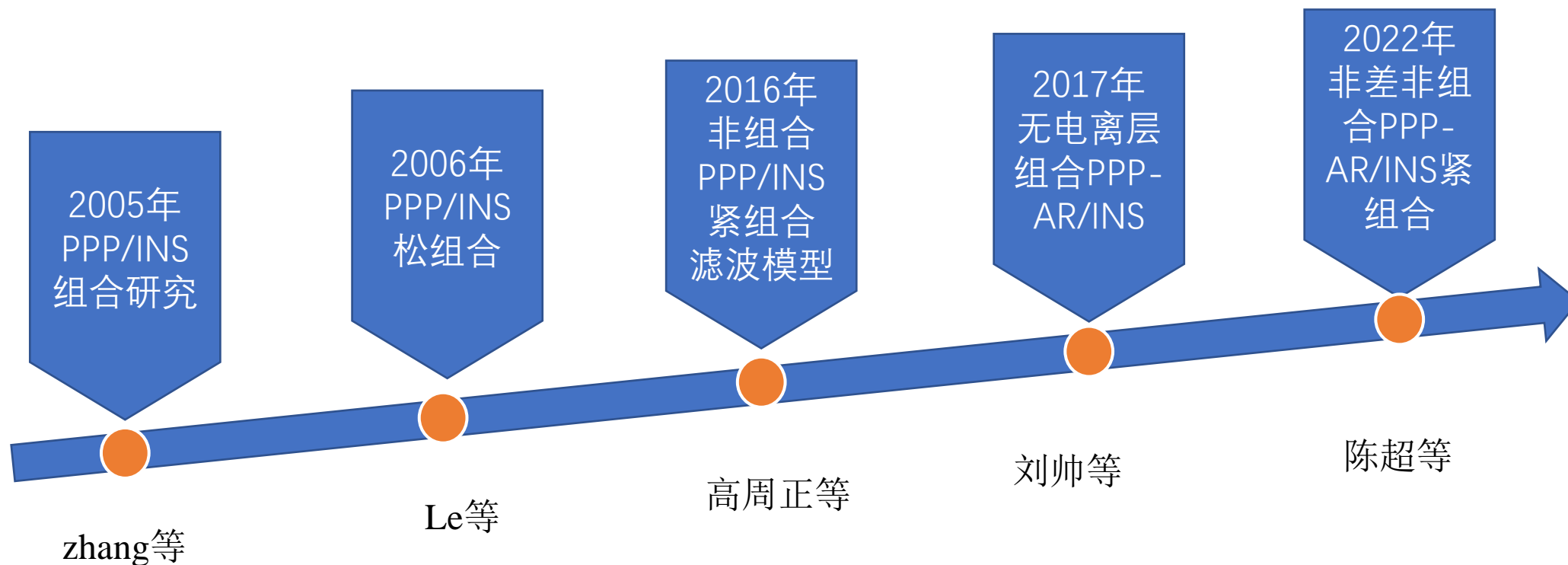
在PPP-AR技术相关研究上，常采用整数相位钟产品、小数偏差产品以及相位钟产品进行实现PPP-AR，而采用绝对偏差OSB进行PPP-AR研究较少。

二、国内外研究现状



航天工程大学
space engineering university

➤ PPP-AR/INS研究现状



目前，针对非差非组合PPP-AR与INS技术的相关研究较少，主要集中在传统的GNSS/INS组合和PPP/INS组合。

目录

- 一 ▶ 研究背景及意义
- 二 ▶ 国内外研究现状
- 三 ▶ 主要研究内容与方法
- 四 ▶ PPP应用

主要研究内容

- 针对相位硬件延迟时变部分影响多频PPP定位性能的问题，提出非组合IFCB估计方法。
- 实现基于OSB产品的BDS-3/GPS/Galileo三频非差非组合PPP-AR。
- 针对PPP/INS收敛时间较长的问题，提出并实现了非差非组合PPP-AR/INS方法

三、主要研究内容与方法



1、多系统IFCB估计

$$\begin{aligned} GFIF(t) &\equiv L_{r,IF12}^{s,sys}(t) - L_{r,IF13}^{s,sys}(t) \\ &= \lambda_{IF12} N_{r,IF12}^{s,sys} - \lambda_{IF13} N_{r,IF13}^{s,sys} + b_{r,IF12}^{sys} + b_{IF12}^{s,sys} - b_{r,IF13}^{sys} - b_{IF13}^{s,sys} \\ &= N_{GFIF} + B_{r,GFIF}^s + \delta B_{IFCB} \end{aligned}$$

为了消除模糊度和相位硬件延迟的常数项，在无周跳的连续观测弧段，进行**历元间差分**：

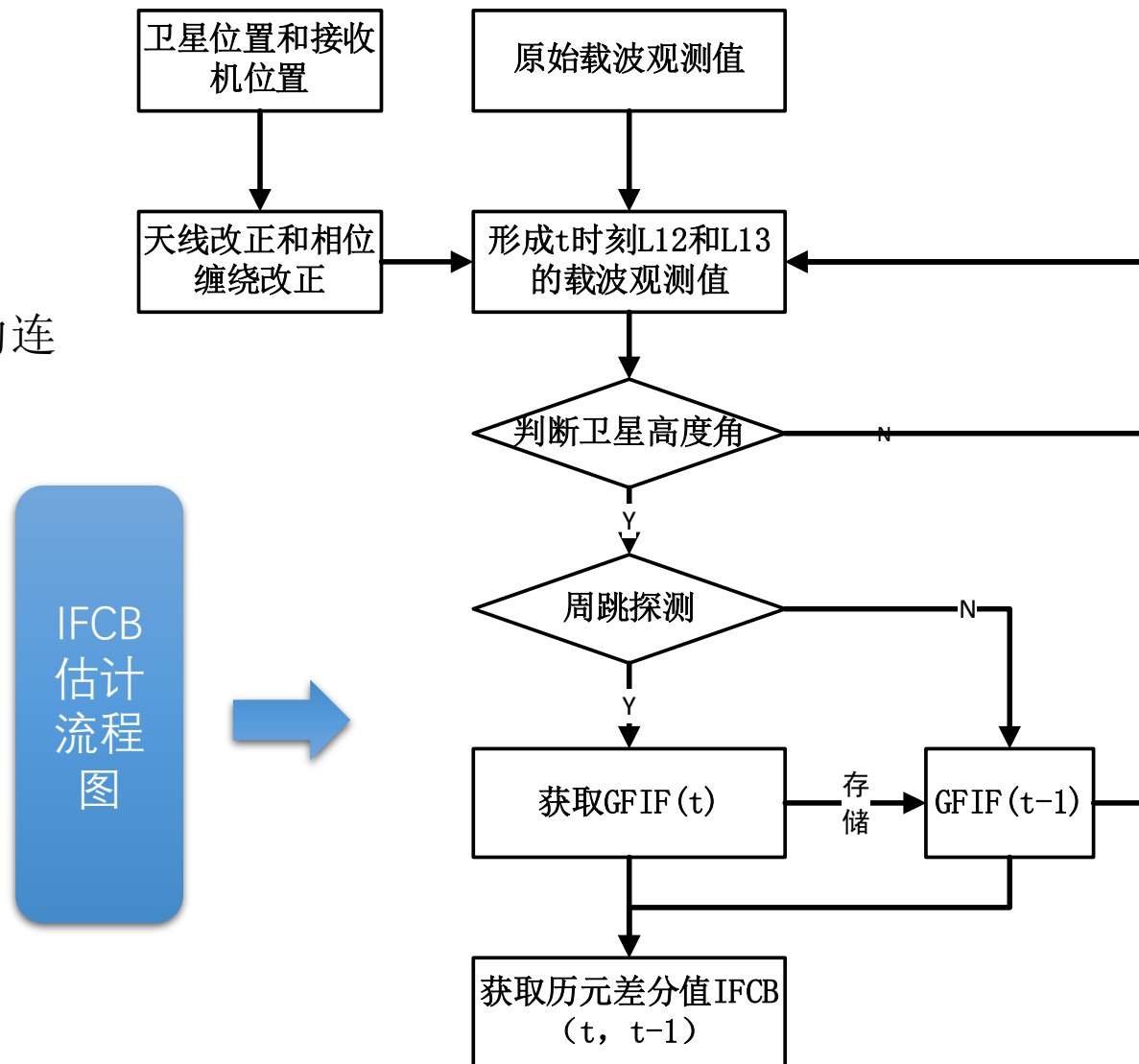
$$\Delta \delta B_{IFCB(t,t-1)} = GFIF(t) - GFIF(t-1)$$

对所有站的进行**加权取平均值**：

$$\overline{\Delta \delta B_{IFCB(t,t-1)}} = \frac{\sum_{r=1}^n \Delta \delta B_{IFCB(t,t-1)} \cdot \omega_{r,(t,t-1)}}{\sum_{r=1}^n \omega_{r,(t,t-1)}}$$

确定t时刻值IFCB值：

$$\delta B_{IFCB}(t) = \delta B_{IFCB}(0) + \sum_{k=1}^{k=t} \overline{\Delta \delta B_{IFCB(k,k-1)}}$$

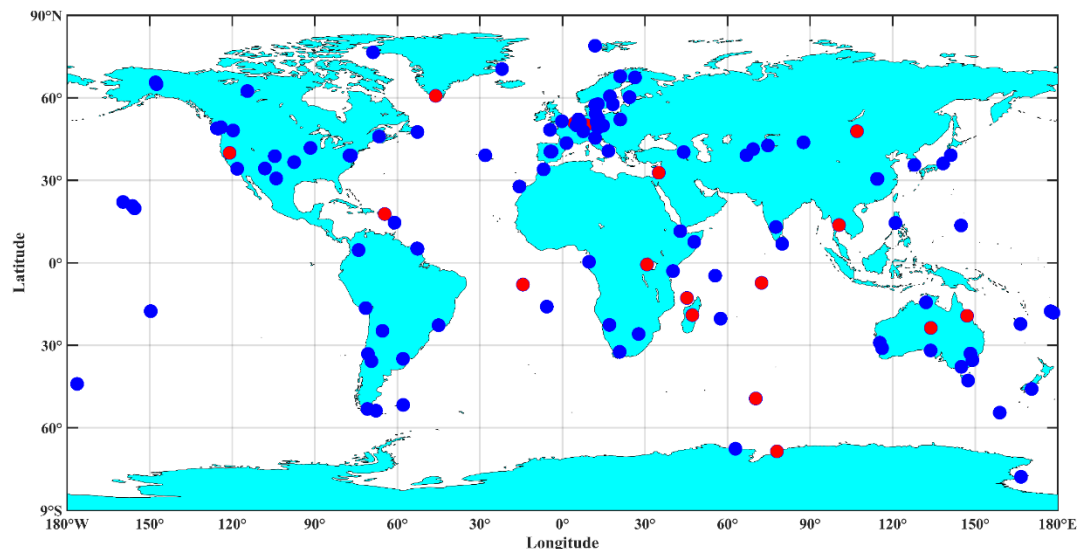


三、主要研究内容与方法

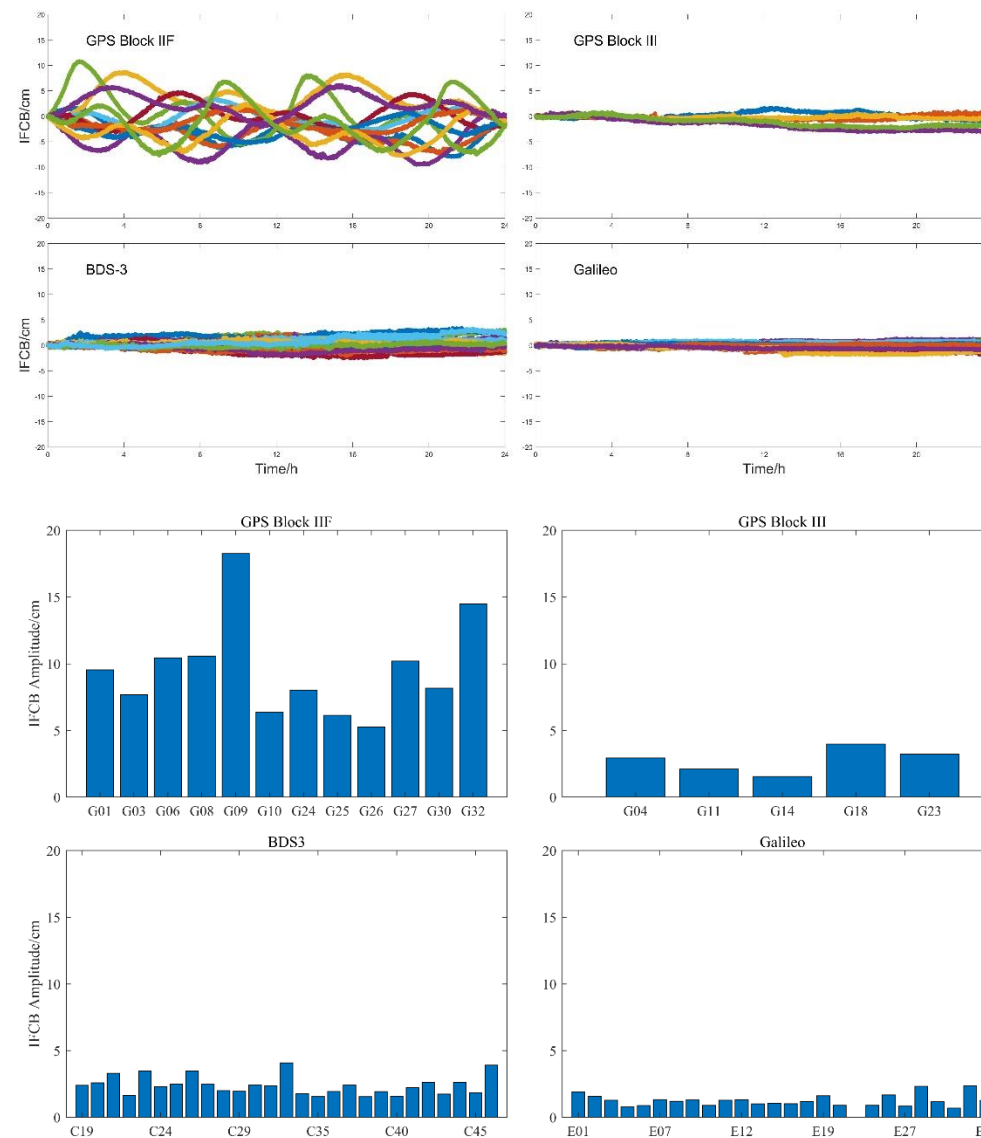


1、多系统IFCB估计——IFCB时变特征

采用全球117个MGEX测站，进行估算了多频多系统非组合IFCB产品。



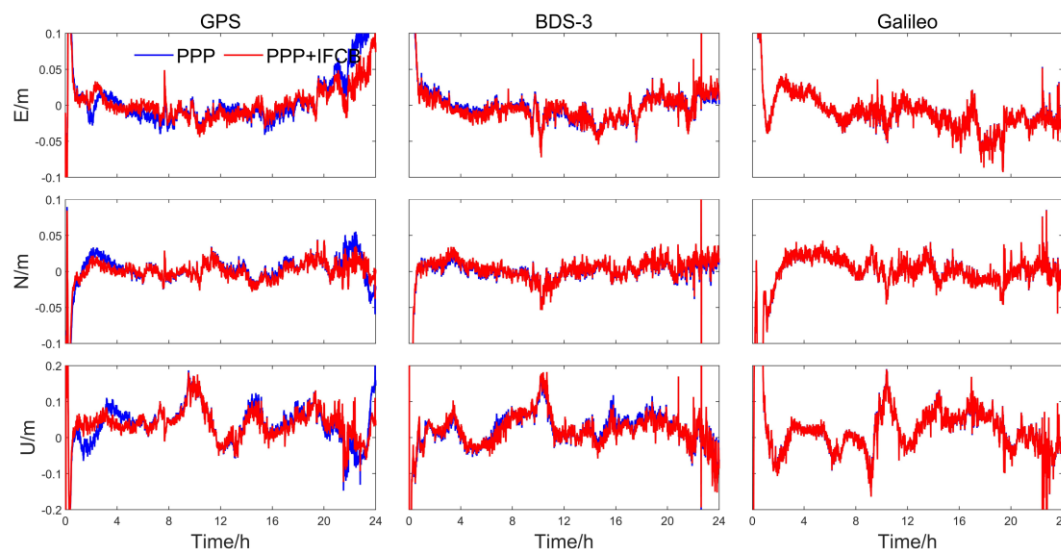
BDS-3卫星单天振幅在1~3cm。
GPS Block III卫星单天振幅在1~3cm。
GPS Block IIF卫星振幅大小在10~20cm之间。
Galileo卫星振幅在2cm以下。



三、主要研究内容与方法



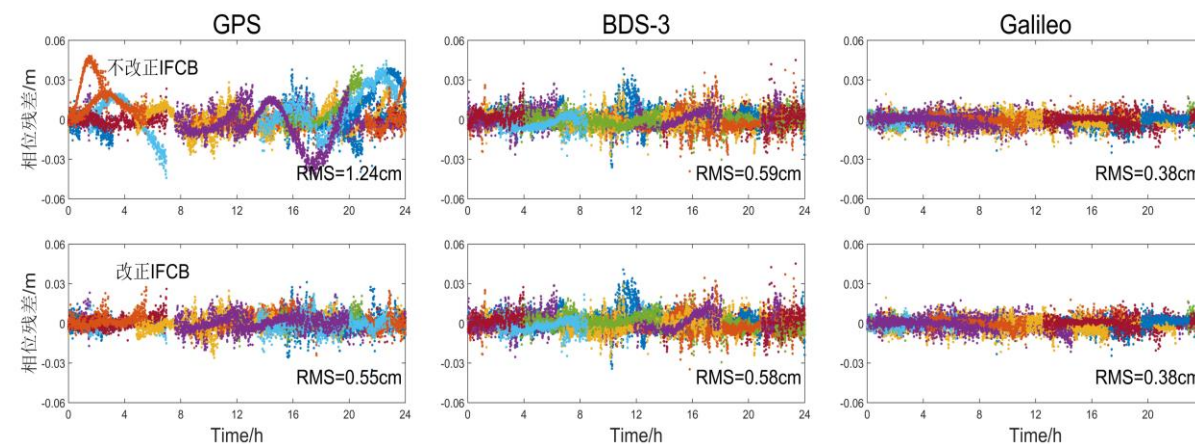
1、多系统IFCB估计——定位影响



ASCG测站三频PPP时间序列图

21个测站7天GPS动态定位精度与收敛时间统计

	E/cm	N/cm	U/cm	3D/cm	收敛时间/分钟
PPP	2.59	1.77	4.81	5.74	46.72
PPP + IFCB	2.00	1.43	4.06	4.75	39.61
提升	22.86%	19.45%	15.53%	17.34%	15.22%



ASCG测站三频残差图

- ◆ **高精度**: 采用非组合IFCB改正相位时变偏差后, 三维定位精度提升17.34%, 收敛速度加快15.22%。
- ◆ **高可靠**: 采用IFCB改正后, 可以使模型更好的参数化, 避免了残差影响

三、主要研究内容与方法

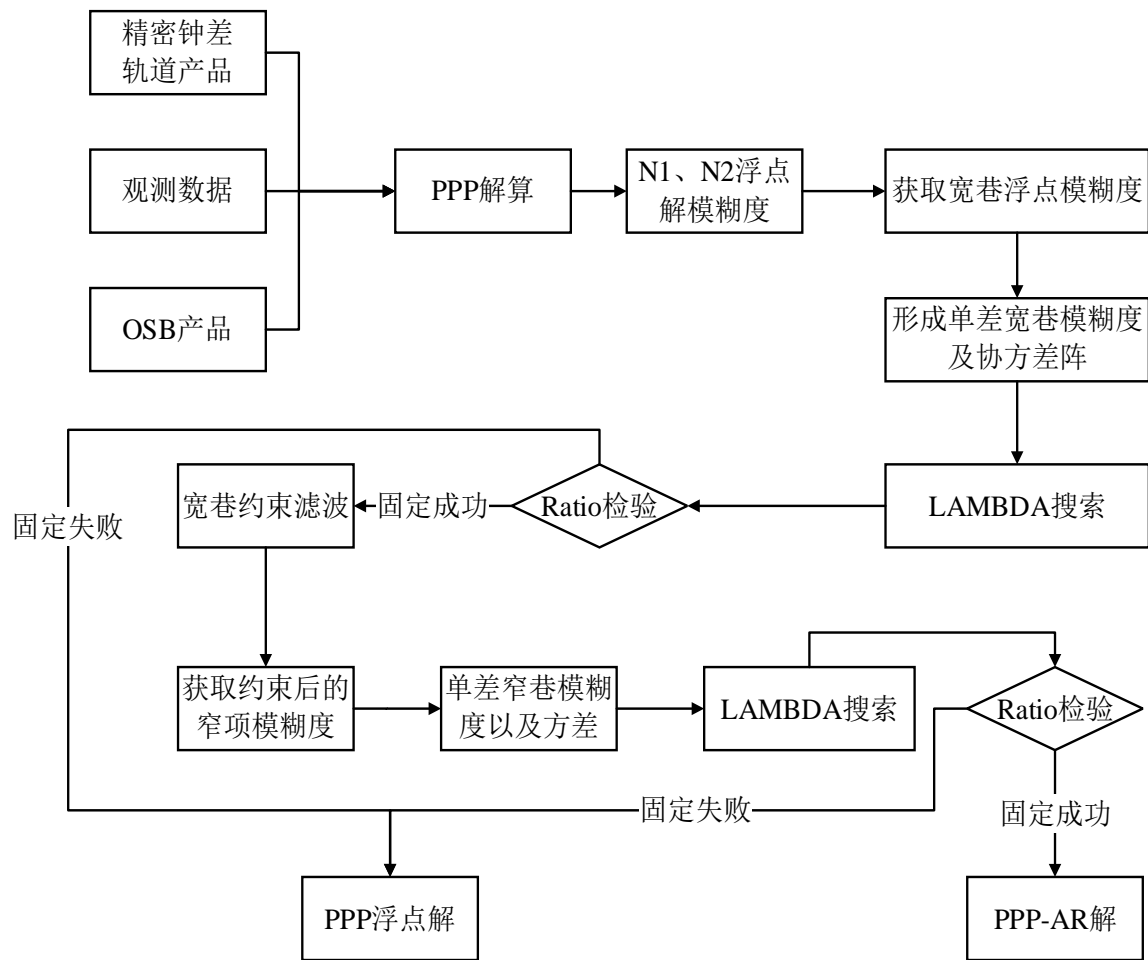


2、非差非组多频PPP-AR

➤ 双频PPP-AR

顾及系统间偏差的多系统双频PPP模型:

$$\begin{bmatrix} P_{r,1}^{s,G} \\ P_{r,2}^{s,G} \\ P_{r,1}^{s,C} \\ P_{r,2}^{s,C} \\ P_{r,1}^{s,E} \\ P_{r,2}^{s,E} \\ \vdots \\ L_{r,1}^{s,G} \\ L_{r,2}^{s,G} \\ L_{r,1}^{s,C} \\ L_{r,2}^{s,C} \\ L_{r,1}^{s,E} \\ L_{r,2}^{s,E} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_r^{s,G} & 1 & 0 & 0 & m_r^{s,G} & R_r^G & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,G} & 1 & 0 & 0 & m_r^{s,G} & R_r^G & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,C} & 1 & 1 & 0 & m_r^{s,C} & R_r^C & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,C} & 1 & 1 & 0 & m_r^{s,C} & R_r^C & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,E} & 1 & 0 & 1 & m_r^{s,E} & R_r^E & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,E} & 1 & 0 & 1 & m_r^{s,E} & R_r^E & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_r^{s,G} & 1 & 0 & 0 & m_r^{s,G} & -R_r^G & \lambda_1^G & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,G} & 1 & 0 & 0 & m_r^{s,G} & -R_r^G & 0 & \lambda_2^G & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,C} & 1 & 1 & 0 & m_r^{s,C} & -R_r^C & 0 & 0 & \cdots & \lambda_1^C & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,C} & 1 & 1 & 0 & m_r^{s,C} & -R_r^C & 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_2^C & \cdots & 0 & 0 & \cdots \\ u_r^{s,E} & 1 & 0 & 1 & m_r^{s,E} & -R_r^E & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \lambda_1^E & 0 & \cdots \\ u_r^{s,E} & 1 & 0 & 1 & m_r^{s,E} & -R_r^E & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_2^E & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ dt_r^{-G} \\ ISB_r^{G-C} \\ ISB_r^{G-E} \\ Z_r \\ \bar{I}_{r,1} \\ \bar{N}_{r,1}^{1,G} \\ \bar{N}_{r,2}^{1,G} \\ \vdots \\ \bar{N}_{r,1}^{1,C} \\ \bar{N}_{r,2}^{1,C} \\ \vdots \\ \bar{N}_{r,1}^{1,E} \\ \bar{N}_{r,2}^{1,E} \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{r,j}^s \\ \zeta_{r,j}^s \end{bmatrix}$$



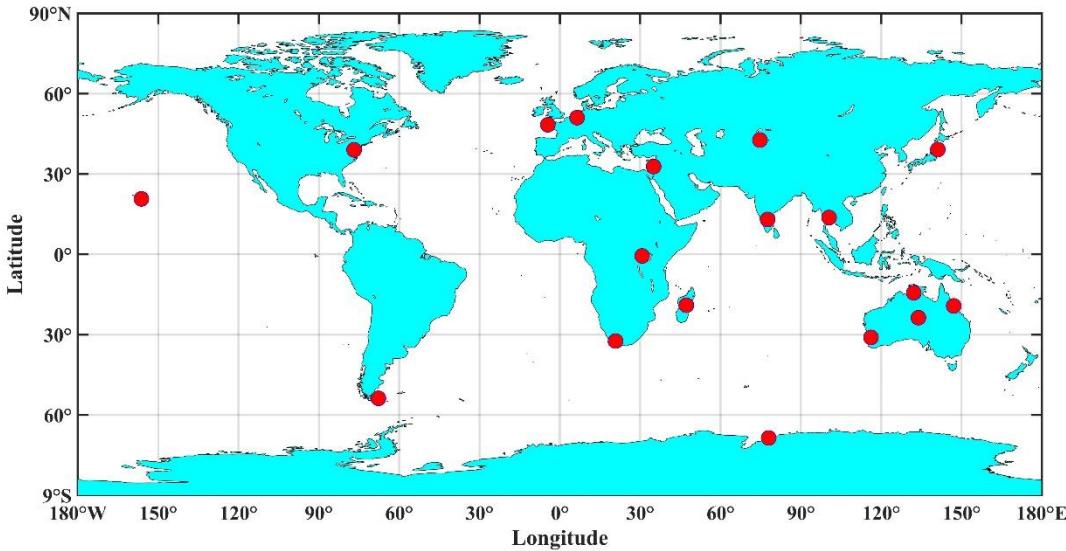
双频PPP-AR流程图

三、主要研究内容与方法



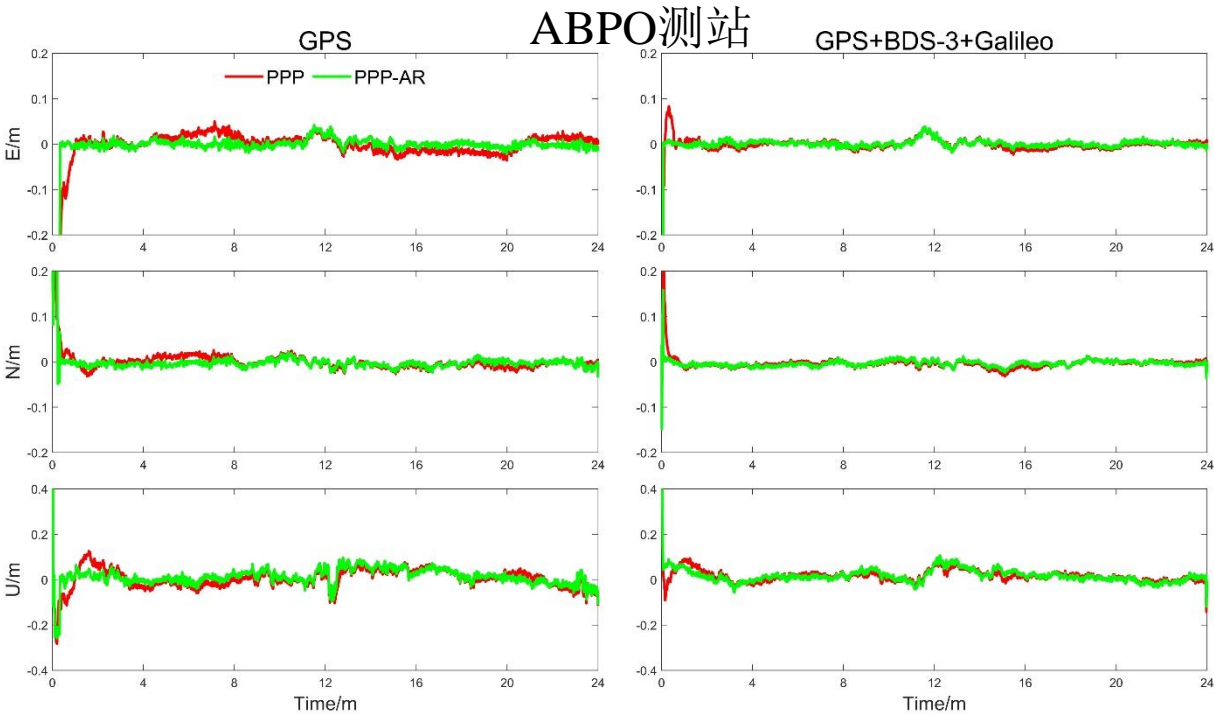
2、非差非组PPP-AR

➤ 双频PPP-AR——实验验证



处理策略

时间：2022年60-68天
系统：BDS-3/GPS/Galileo
采样间隔：30s/1s
接收机钟差：白噪声
对流层：白噪声
对流层：干延迟Saastamoinen模型，随机游走



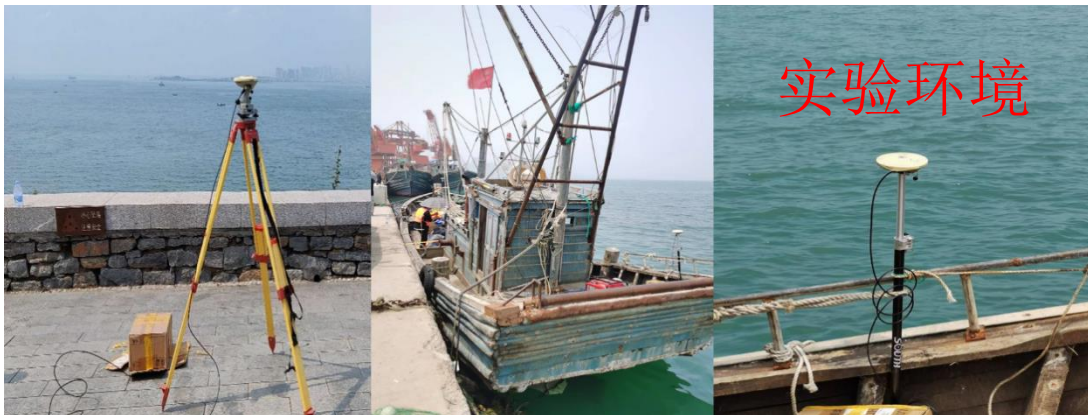
模式	E/cm	N/cm	U/cm	3D/cm	收敛时间/分钟
G-PPP	1.95	1.37	4.13	4.77	35.98
G-PPP-AR	1.12	1.01	3.37	3.69	14.45
GCE-PPP	0.96	0.79	2.66	2.94	14.31
GCE-PPP-AR	0.63	0.66	2.49	2.66	6.29

三、主要研究内容与方法

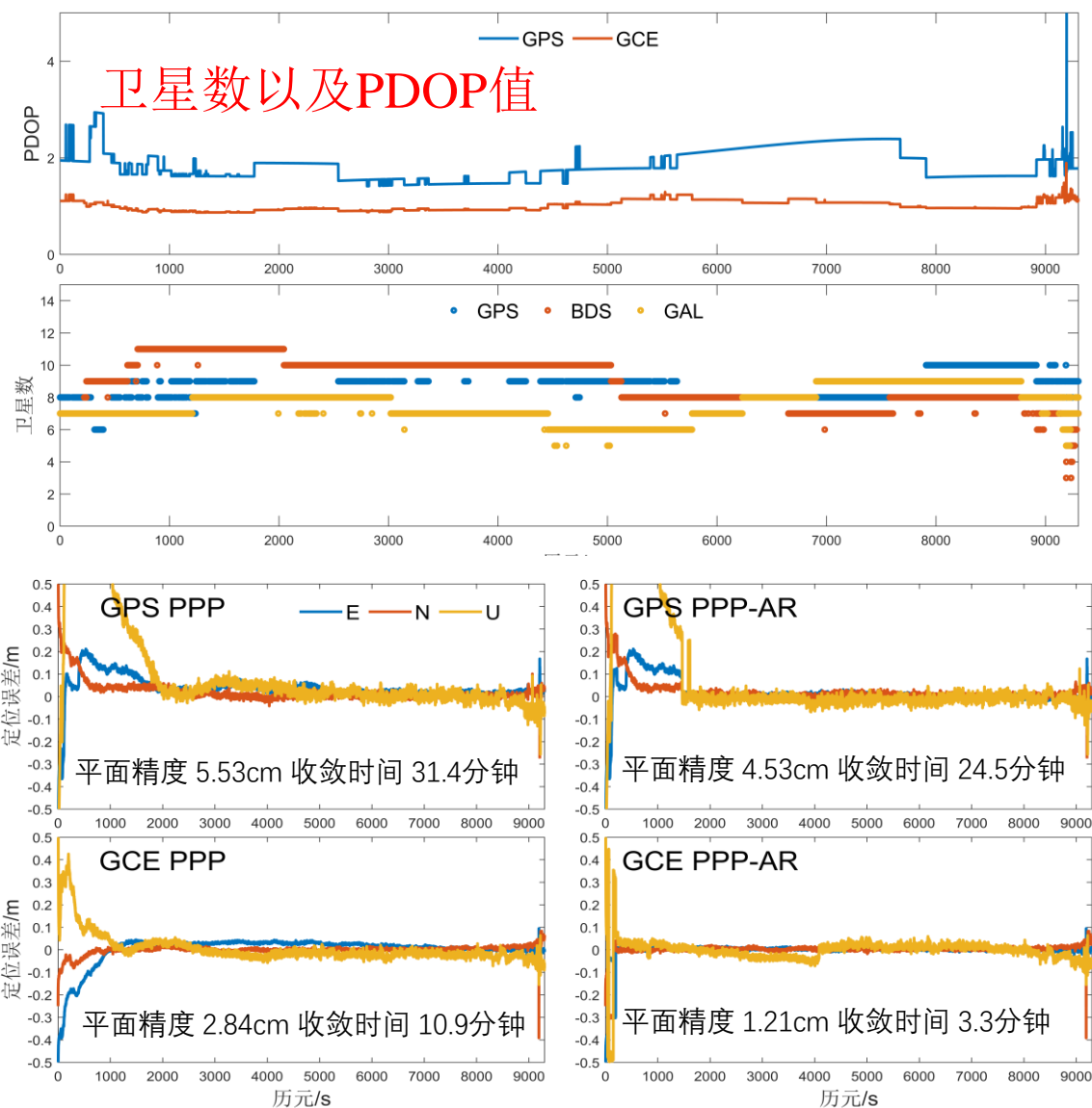


2、非差分非组PPP-AR

➤ 双频PPP-AR——实验验证



实验时间：2021年8月3号01:40:31至04:27:10
实验地点：山东省青岛市后岔湾，
采样率：GNSS数据采间隔为1s
GNSS接收机类型：华测CHC P5
天线类型：TRM39105.00



PPP定位误差曲线图

三、主要研究内容与方法

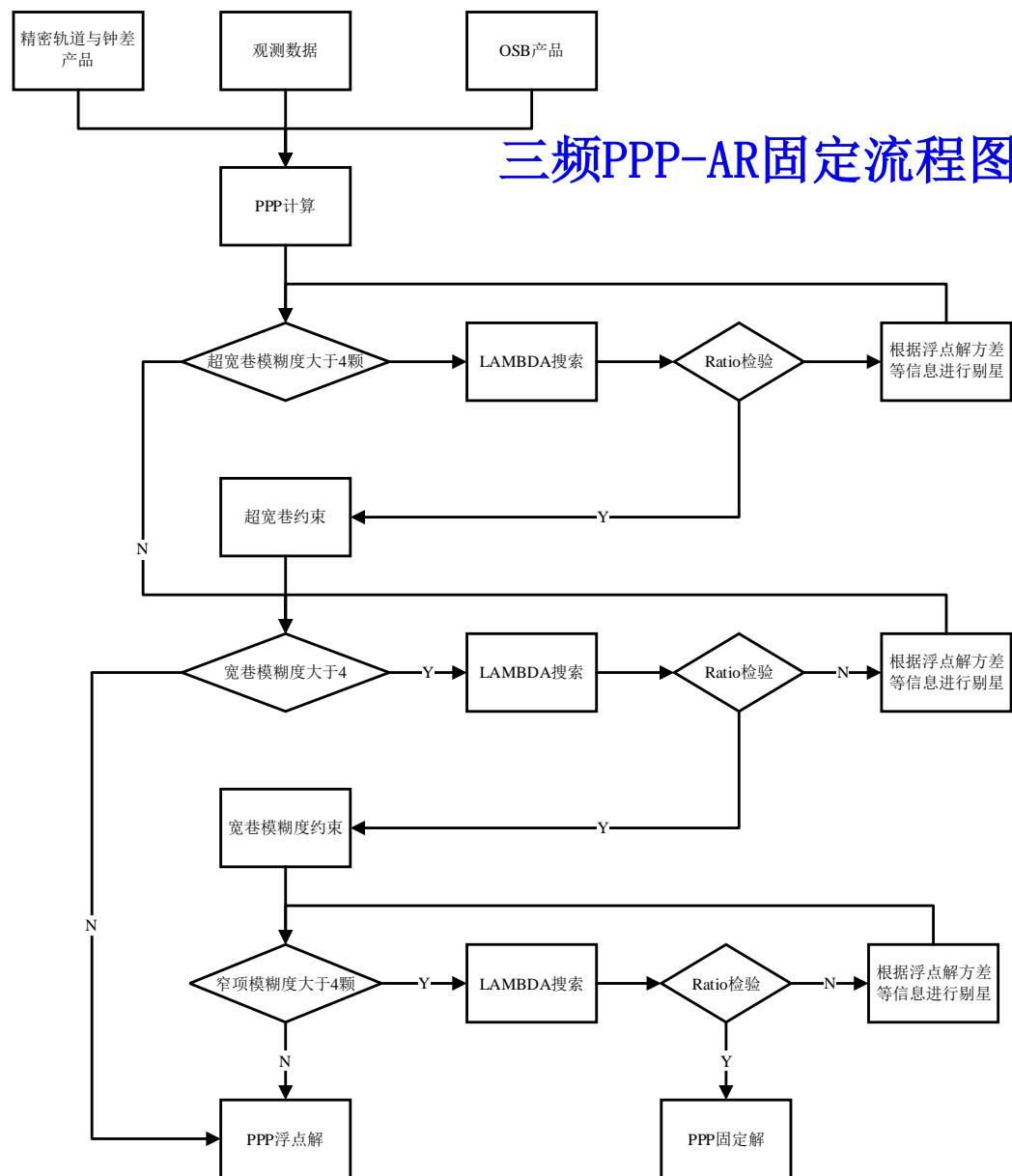


2、非差非组PPP-AR

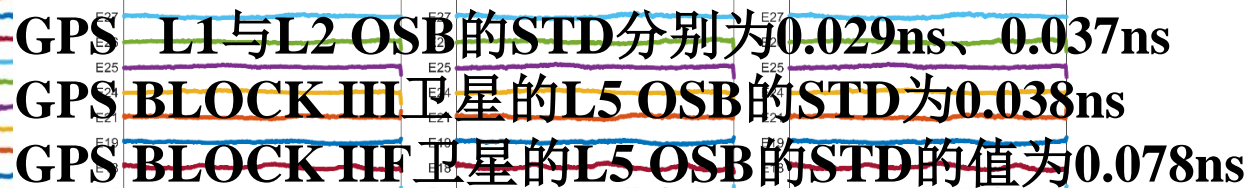
➤ 三频PPP-AR

$$\begin{cases} P_{r,1}^s = u_r^s x + d\bar{t}_r + m_r^s Z_r + \bar{I}_{r,1}^s + \delta b_{r,1}^s + \varepsilon_{r,1}^s \\ P_{r,2}^s = u_r^s x + d\bar{t}_r + m_r^s Z_r + \mu_2 \bar{I}_{r,1}^s + \delta b_{r,2}^s + \varepsilon_{r,2}^s \\ P_{r,3}^s = u_r^s x + d\bar{t}_r + m_r^s Z_r + \mu_3 \bar{I}_{r,1}^s + IFB_r + \delta b_{r,3}^s + \varepsilon_{r,3}^s \\ L_{r,1}^s = u_r^s x + d\bar{t}_r + m_r^s Z_r - \bar{I}_{r,1}^s + \lambda_1 \bar{N}_{r,1}^s + \zeta_{r,1}^s \\ L_{r,2}^s = u_r^s x + d\bar{t}_r + m_r^s Z_r - \mu_2 \bar{I}_{r,1}^s + \lambda_2 \bar{N}_{r,2}^s + \zeta_{r,2}^s \\ L_{r,3}^s = u_r^s x + d\bar{t}_r + m_r^s Z_r - \mu_3 \bar{I}_{r,1}^s + \lambda_3 \bar{N}_{r,3}^s + IFCB + \zeta_{r,3}^s \end{cases}$$

核心思想：利用OSB产品，恢复多频PPP模糊度固定，最终实现模糊度的固定解。需要按照先易后难的顺序依次固定EWL、WL和NL模糊度，并利用前一步骤固定解信息进行约束，加速下一步的多频非差模糊度的固定。



➤ 三频非差非组合PPP-AR——OSB产品分析

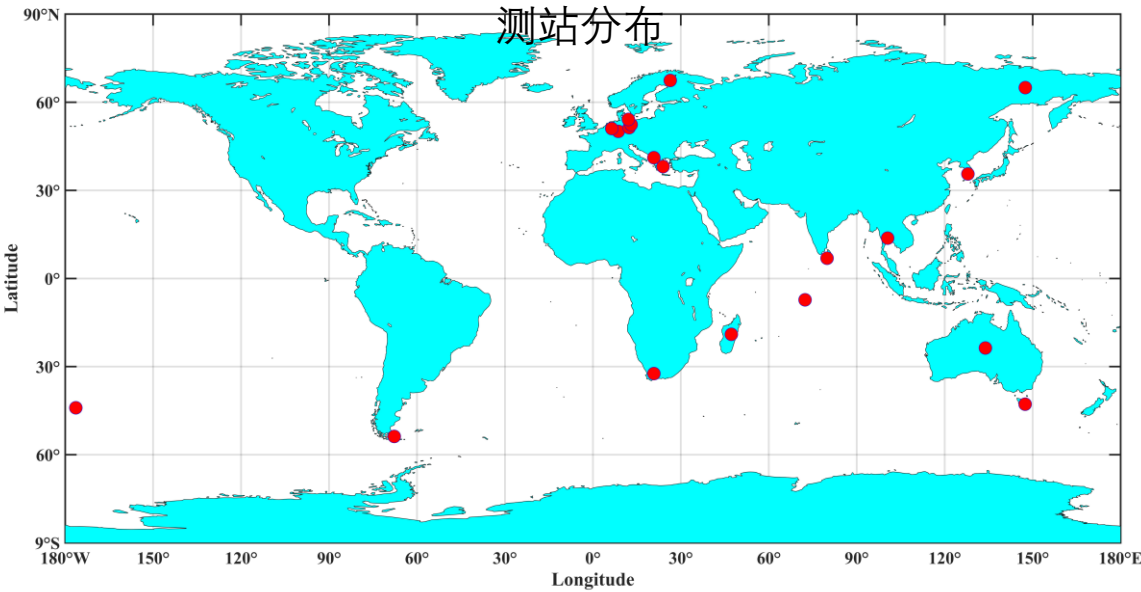


三、主要研究内容与方法



2、非差非组PPP-AR

➤ 三频非差非组合PPP-AR——实验验证



选取20个MGEX测站2022年1月1日-7日的GNSS观测数据

- (1) “G2” 表示单GPS系统双频PPP精度
- (2) “G3” 表示单GPS系统进行三频PPP解算；
- (3) “G3-AR” 表示单GPS系统进行三频PPP-AR解算
- (4) “GCE2” 表示BDS-3/GPS/Galileo系统双频PPP精度
- (5) “GCE3” 表示BDS-3/GPS/Galileo三系统进行三频PPP解算
- (6) “GCE3-AR” 表现BDS-3/GPS/Galileo三系统进行三频PPP-AR解算

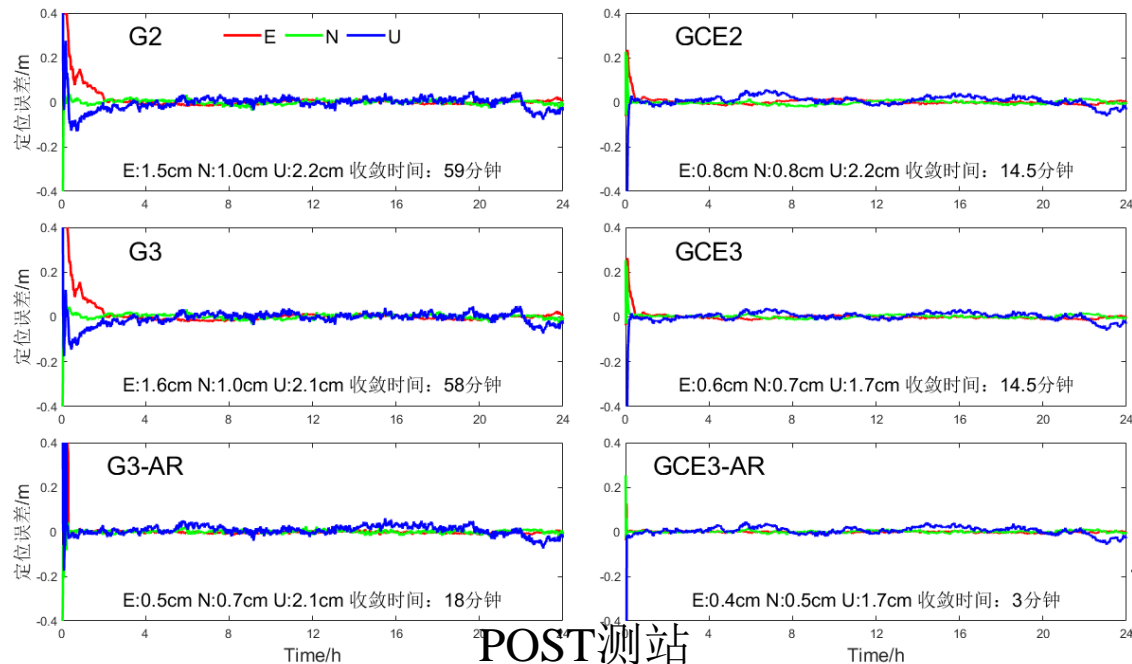
策略	方法
系统	GPS, BDS-3和Galileo
频点	GPS: L1/L2/L5 BDS-3: B1I/B3I/B2a Galileo: E1/E5a/E5b
采样率	30s
高度角	10°
位置	静态模式:常数估计 动态模式:白噪声
接收机钟差	白噪声
系统间偏差	白噪声
电离层延迟	白噪声
对流层	干延迟使用 Saastamoinen模型 湿延迟使用随机游走进 行估计
模糊度	浮点与固定
伪距频间偏差IFB	常数估计
卫星天线改正	igs14.atx
接收机天线改正	igs14.atx

三、主要研究内容与方法



2、非差非组PPP-AR

➤ 三频非差非组合PPP-AR——实验验证



与“G3-AR”相比，“GCE3-AR”的E、N、U方向的定位精度提高了30.5%、41.3%、43.7%。

“GCE3-AR”平均收敛时间为5.32分钟，相较浮点解收敛速度提高了63.1%。

模式	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/分钟
G2	1.95	1.43	3.55	48.33
G3	1.82	1.36	3.42	47.61
G3-AR	0.83	1.05	2.84	18.63
GCE2	0.90	0.81	2.21	14.65
GCE3	0.84	0.78	2.06	14.41
GCE3-AR	0.64	0.74	1.98	5.32

单系统与多系统

动态定位精度与收敛时间

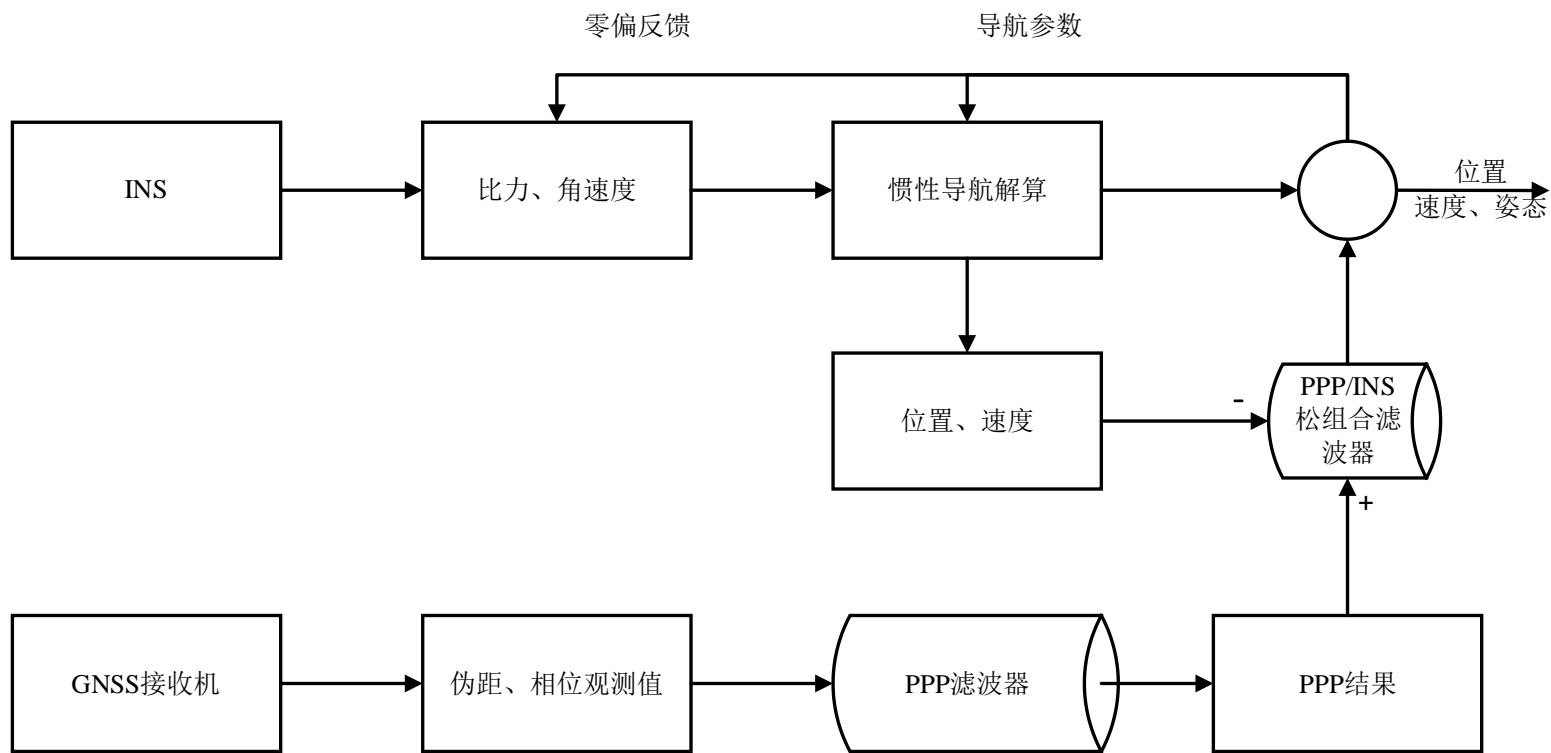


三、主要研究内容与方法



3、PPP-AR/INS组合定位

➤ PPP/INS松、紧组合



PPP/INS松组合

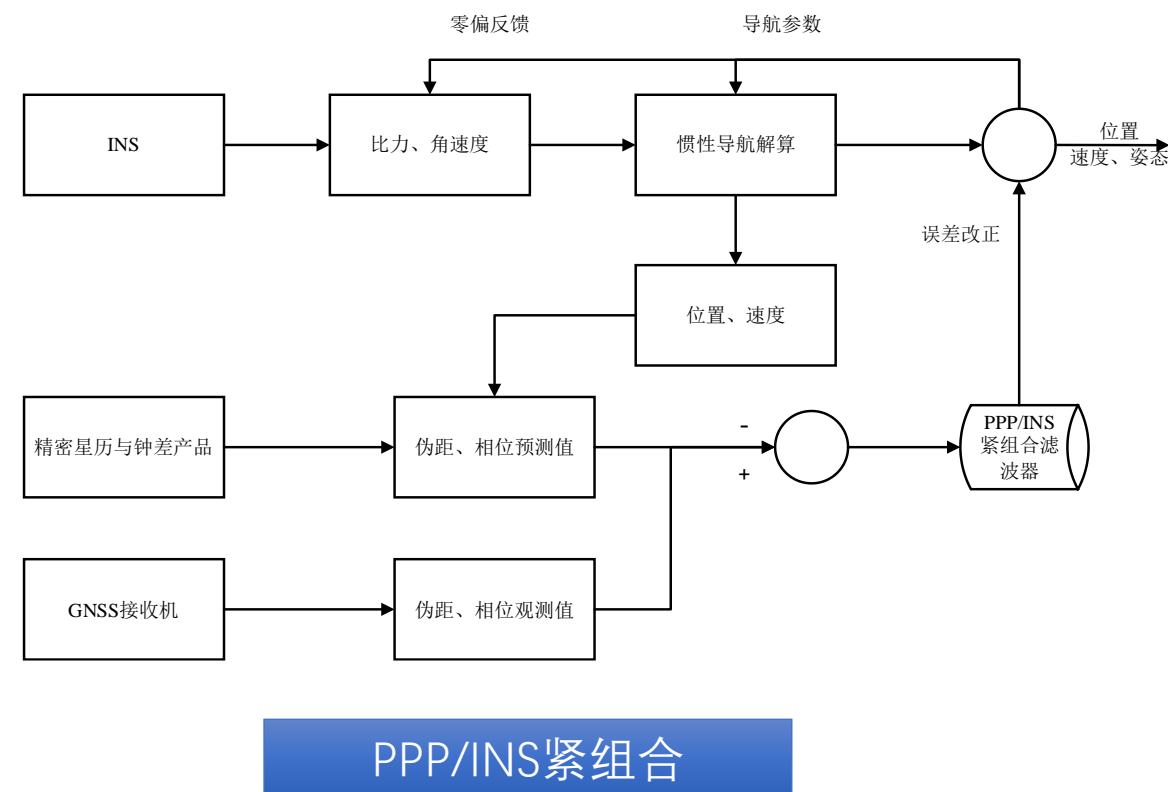
三、主要研究内容与方法



3、PPP-AR/INS组合定位研究

➤ PPP/INS松、紧组合

$$\begin{bmatrix} P_1^{s,sys} - P_{INS}^{s,sys} \\ P_2^{s,sys} - P_{INS}^{s,sys} \\ L_1^{s,sys} - L_{INS}^{s,sys} \\ L_2^{s,sys} - L_{INS}^{s,sys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_r^{s,sys} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & m_r^{s,sys} & R_r^{sys} & 0 & 0 \\ u_r^{s,sys} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & m_r^{s,sys} & R_r^{sys} & 0 & 0 \\ u_r^{s,sys} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & m_r^{s,sys} & -R_r^{sys} & \lambda_1^{sys} & 0 \\ u_r^{s,sys} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & m_r^{s,sys} & -R_r^{sys} & 0 & \lambda_2^{sys} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta r^e \\ \delta v^e \\ \phi \\ B_a \\ B_g \\ S_a \\ S_b \\ \delta dt_r^{-sys} \\ \delta Z_r \\ \delta \bar{I}_{r,1}^{s,sys} \\ \delta \bar{N}_{r,1}^{s,sys} \\ \delta \bar{N}_{r,2}^{s,sys} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{r,1}^{s,sys} \\ \varepsilon_{r,2}^{s,sys} \\ \zeta_{r,1}^{s,sys} \\ \zeta_{r,2}^{s,sys} \end{bmatrix}$$



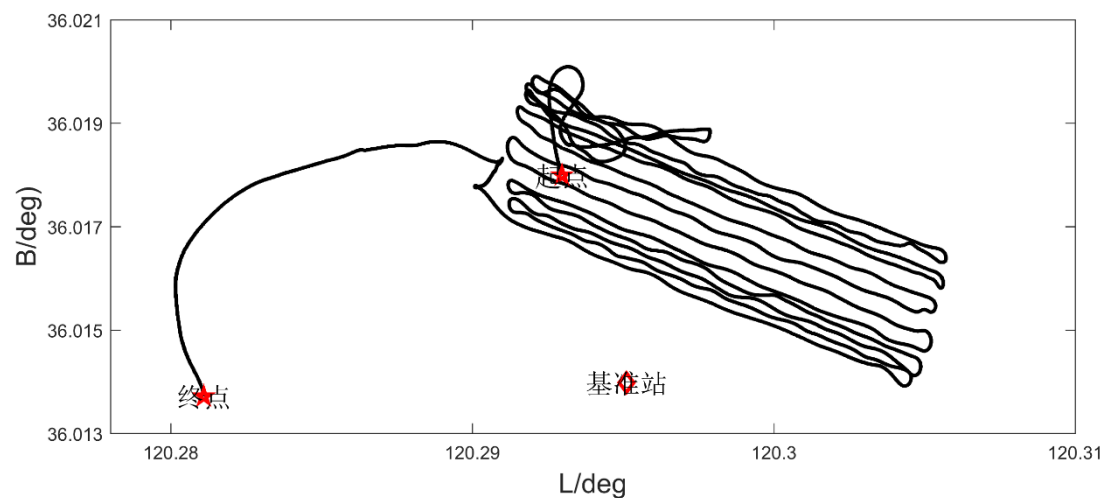
三、主要研究内容与方法



航天工程大学
space engineering university

3、PPP-AR/INS组合定位研究

➤ PPP/INS松、紧组合——实验验证



时间：2021年8月3号 06:59:47至10:05:17

地点：山东省青岛市后岔湾

采样率：其中IMU采样间隔为0.005s，GNSS数据采样率间隔为1s

环境：整体观测环境良好，其中基准站距离测区不超过1.5km，因此处于短基线范围；

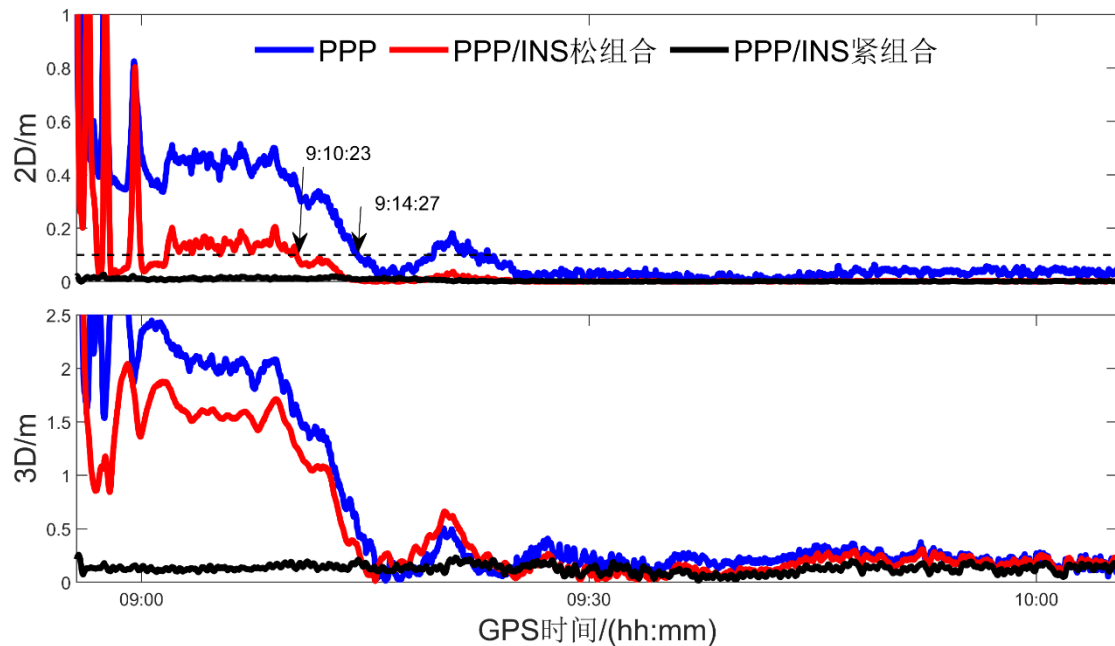
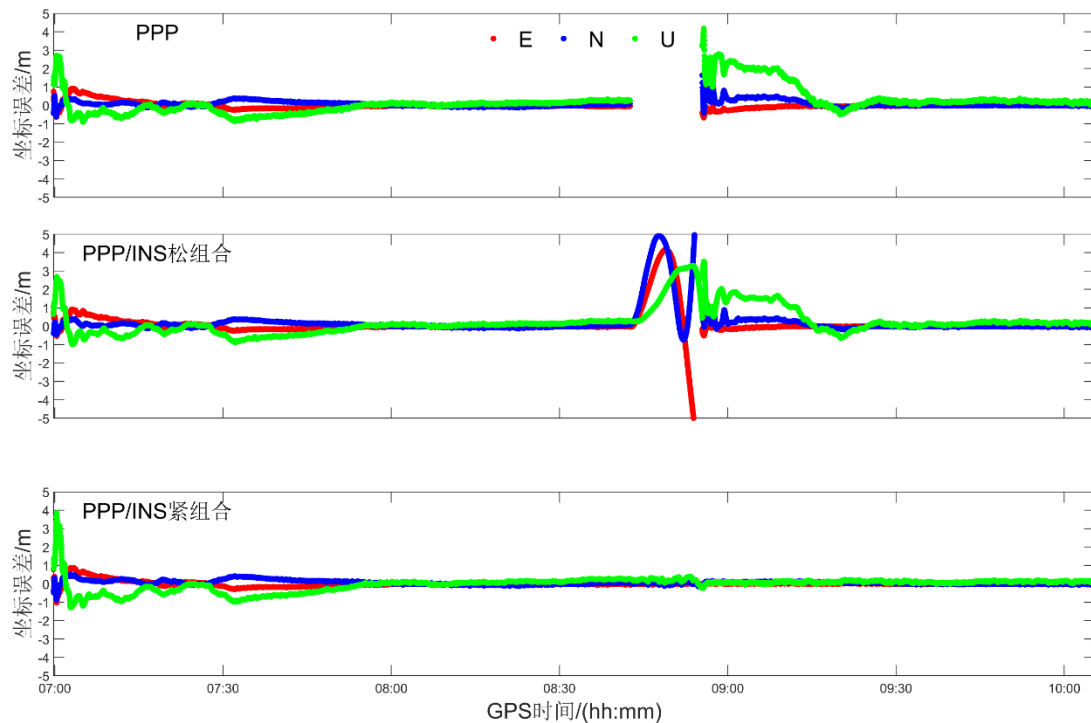
设备：Vsure-w测量系统组合，其中测系统中包含了双频GNSS接收机与IMU等传感器；

三、主要研究内容与方法



3、PPP-AR/INS组合定位研究

➤ PPP/INS松、紧组合——实验验证



模式	E/cm	N/cm	U/cm	3D/cm
PPP	2.76	4.91	14.87	15.90
PPP/INS松组合	2.57	4.82	14.80	15.77
PPP/INS紧组合	2.61	4.84	13.51	14.59

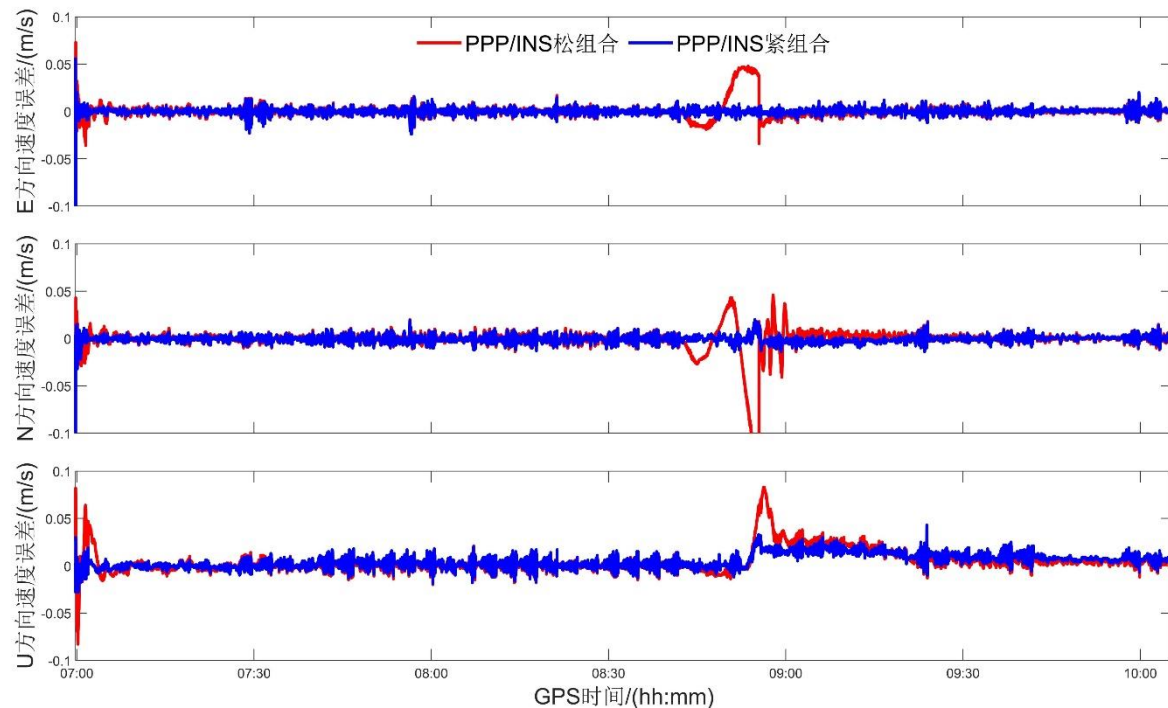
PPP在9:14:27重新收敛至10cm;
PPP/INS松组合则在9:10:23;
相较于PPP, PPP/INS松组合收敛速度提升21.6%。

三、主要研究内容与方法



3、PPP-AR/INS组合定位研究

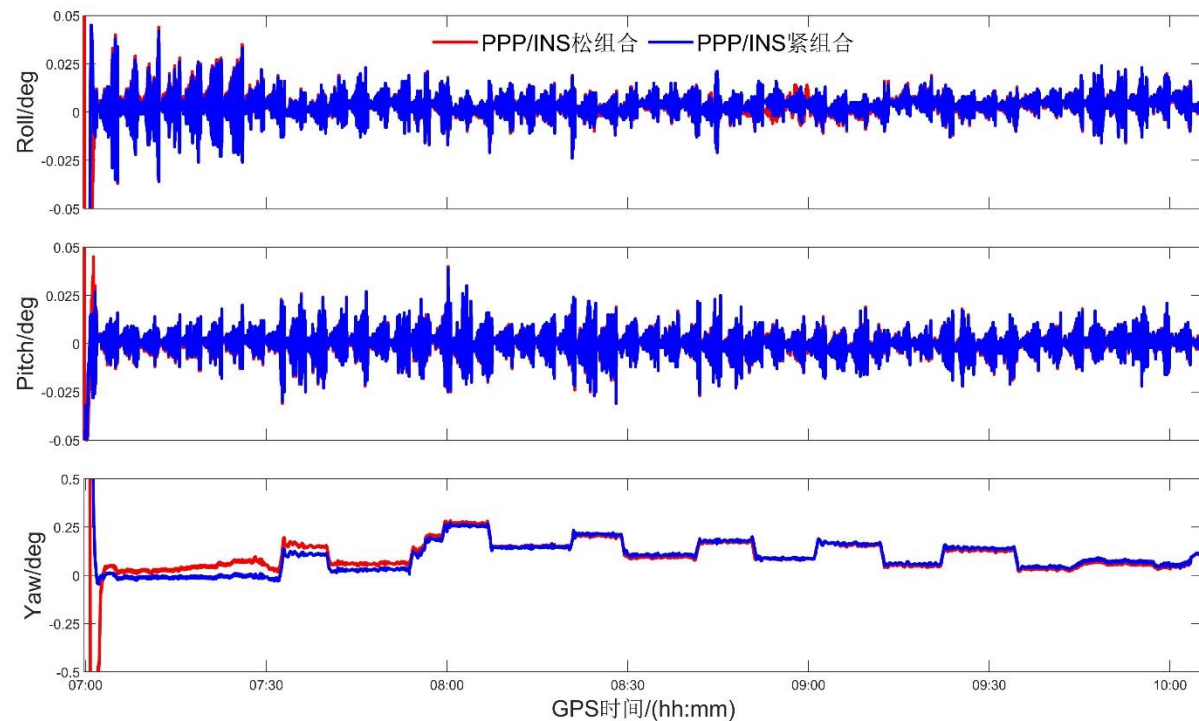
➤ PPP/INS松、紧组合——实验验证



PPP/INS紧组合在E、N、U方向速度的精度为0.3cm/s、0.3cm/s和0.9cm/s

PPP/INS松组合在E、N、U方向速度的精度在0.8cm/s, 1.5cm/s, 1.3cm/s

PPP/INS紧组合的速度精度要优于PPP/INS松组合。



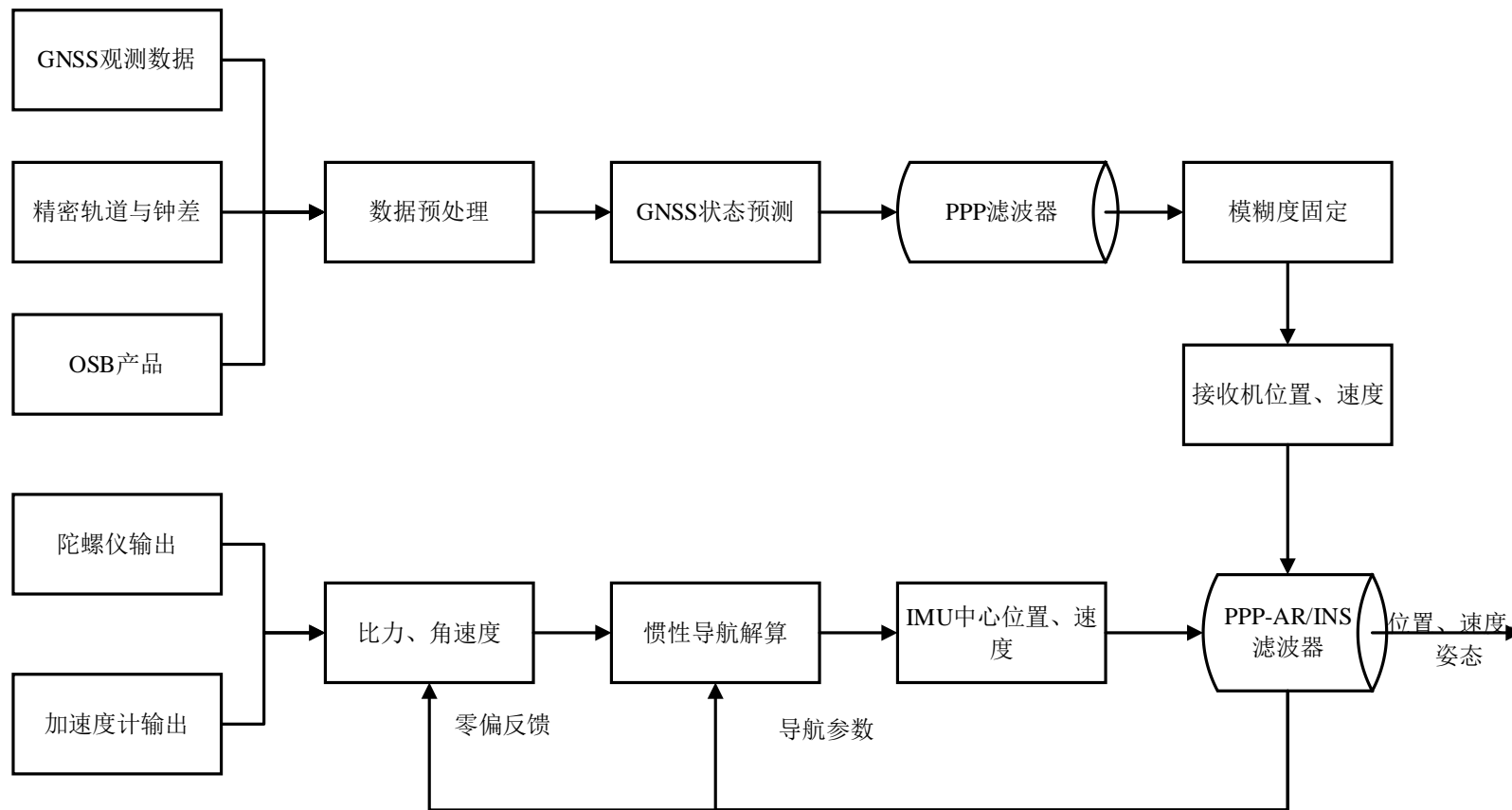
PPP/INS紧组合与PPP/INS松组合姿态误差基本一致。
PPP/INS紧组合姿态误差相较于PPP/INS松组合在初始化阶段更具有优势

三、主要研究内容与方法



3、PPP-AR/INS组合定位研究

➤ PPP-AR/INS松组合



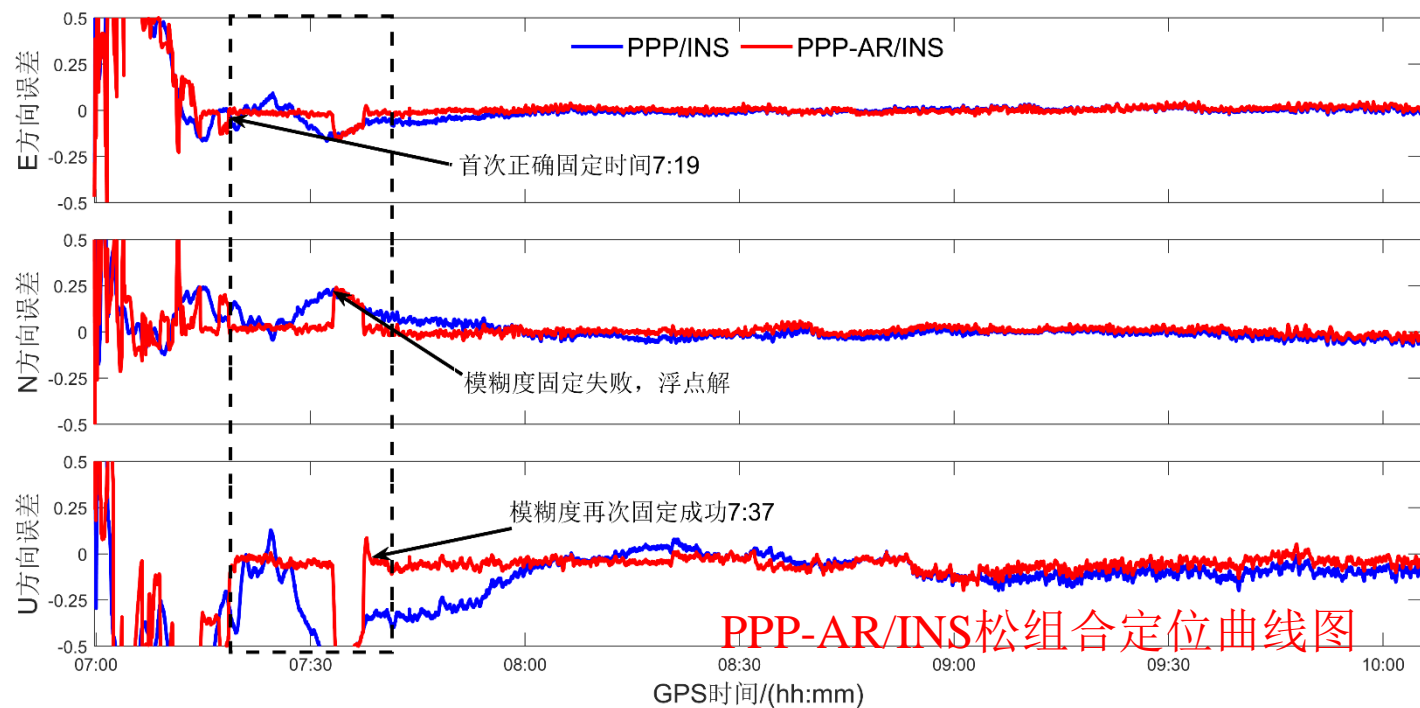
PPP-AR/INS松组合

三、主要研究内容与方法



3、PPP-AR/INS组合定位研究

➤ PPP-AR/INS松组合——实验验证



PPP/INS三个方向收敛至10cm为7:59:59。

PPP-AR/INS相较于PPP/INS收敛时间提升68.08%。

PPP-AR/INS相较于PPP/INS三维定位精度提升53.36%。

PPP-AR/INS松组合定位曲线图

PPP/INS与
PPP-AR/INS定位精度



模式	E/cm	N/cm	U/cm
PPP/INS	2.22	3.28	13.74
PPP-AR/INS	1.38	1.84	6.26
提升	37.8%	43.9%	54.4%

总结

- 针对相位硬件延迟时变部分对三频PPP定位精度造成较大影响的问题，实现IFCB产品生成，通过IFCB校正后，GPS三频PPP的三维定位精度为4.75cm，收敛时间为39.61分钟，与不顾及IFCB的三频PPP相比**三维定位精度提高17.34%，收敛时间提高15.22%**。
- 提出了基于OSB产品的BDS-3/GPS/Galileo三频非差非组合PPP-AR方法，实现了多系统三频非差非组合PPP-AR，在仿动态模型下，GPS三频PPP-AR收敛时间相较于PPP**提升了60.9%**，三维定位**精度提升23.5%**，BDS-3/GPS/Galileo三频PPP-AR的三维定位精度达到2.2cm，平均收敛时间**缩短到5.32分钟**。
- 实现了非差非组合PPP-AR/INS松组合定位技术。PPP-AR/INS的E、N、U定位精度达到1.38cm、1.84cm、6.26cm，与PPP/INS相比分别提升了37.8%、43.9%、54.4%，**收敛时间提升了68.08%**。

目 录

- 一 ▶ 研究背景及意义
- 二 ▶ 国内外研究现状
- 三 ▶ 主要研究内容与方法
- 四 ▶ PPP应用

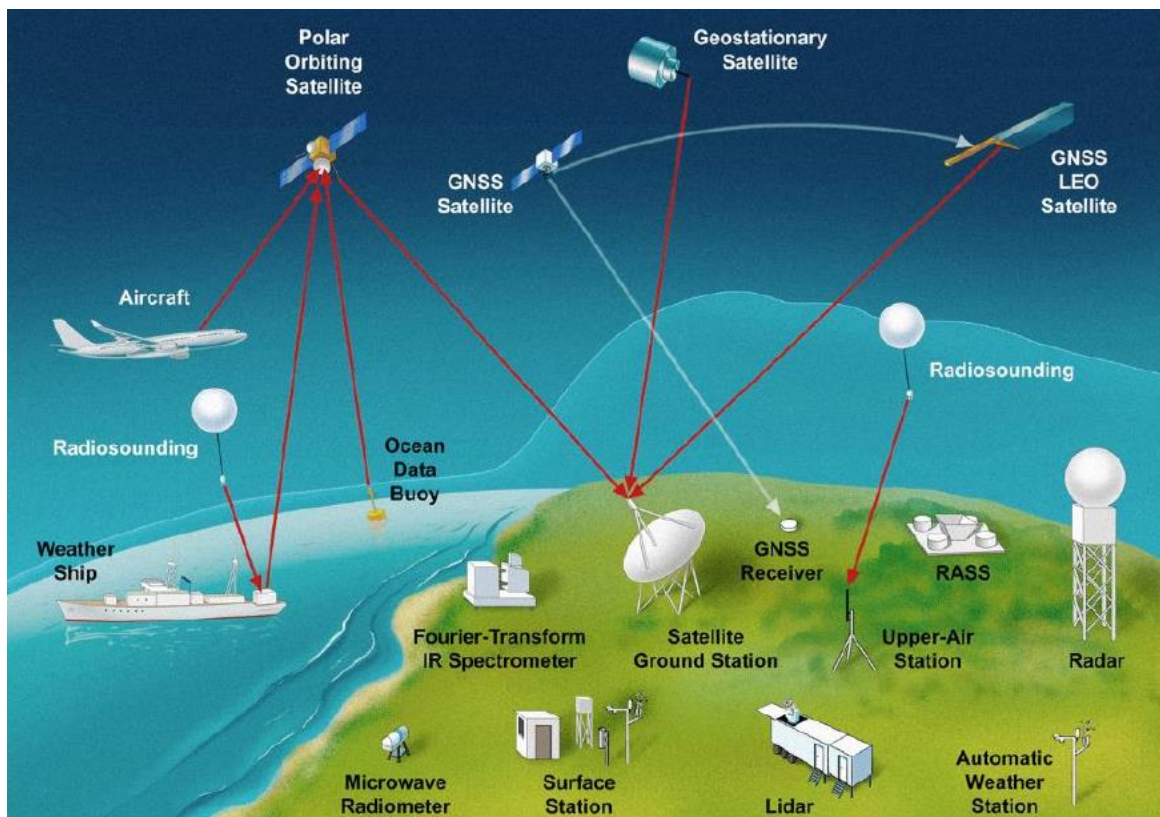
四、PPP应用



1、GNSS水汽遥感

Gendt采用精密单点定位技术对德国境内170个站网为期2a的观测数据进行分析，获得了1~2mm的近实时综合水汽含量。

Rocken利用精密单点定位技术进行海洋水汽监测，其结果与无线电探空仪和船载水汽辐射计的测量结果吻合较好，差异仅为2~3mm。



张小红采用快速精密星历和快速精密钟差，近实时地反演了美国SumitNet网中8个测站的可降水量，获得了优于1mm的PWV值。

李星星通过与ECMWF数值天气模型进行对比，结果表明多GNSS组合PPP可反演出精度更高、可靠性更强、几何分布更均匀的实时对流层产品

四、PPP应用



航天工程大学
space engineering university

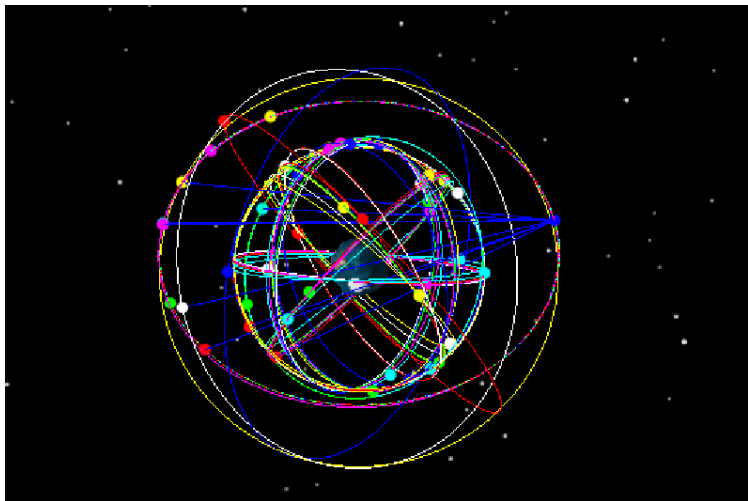
1、卫星定轨

技术优点： 定轨精度与卫星轨道高度无关；运动学轨道能够用于精化地球物理模型

Bisnath利用精密单点定位技术对CHAMP、GRACE卫星进行定轨，取得了事后dm级的定轨精度。

李建成采用纯几何法对GRACE卫星定轨，取得了单天3-5cm的轨道精度。

李星星利用少量IGS跟踪站的观测数据，通过计算未检校的相位小数偏差改正信息，并播发送给用户使用，实现了基于PPP固定解的快速精密定轨系统。



首先介绍了 GNSS 以及星载 GNSS 定轨技术的发展概况。然后使用卫星工具包对高轨卫星所搭载的 GNSS 接收机可见性进行了分析和仿真验证，建立了星载 GNSS 高轨卫星定轨系统的数学模型，并给出了完整仿真流程，为后续的研究工作奠定基础。

首先，本文基于 STK 构建了仿真模型。根据卫星星历信息构建了四大导航星座，并设置发射机以及接收机的相关参数，实现了星间通信链路仿真，为研究的提供真实的仿真平台。

(2) 搭建星座模型，仿真分析了高轨星载接收机在不同灵敏度下的可见卫星数，由于高轨星载接收机接收信号难，本文采用了不同卫星系统的组合导航，分别研究了 GEO (Geostationary Orbit) 轨道和 HEEO 轨道星载接收机的卫星可见性情况。



航天工程大学
space engineering university

请老师、各位同学批评指正