



精密单点定位 (PPP) 之浅见

周 锋

博士/硕导(山东科技大学)

E-mail: zhouforme@163.com

2020-02-27



提 要



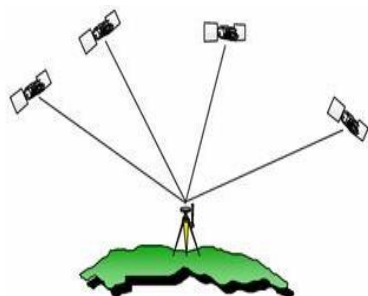
- PPP基本概念
- PPP发展历程
- PPP基本原理
- PPP常用模型
- PPP软件实现
- PPP应用瓶颈
- PPP实现突破
- 结论与展望



PPP基本概念(1/6)

■ PPP定义及实现

单台接收机



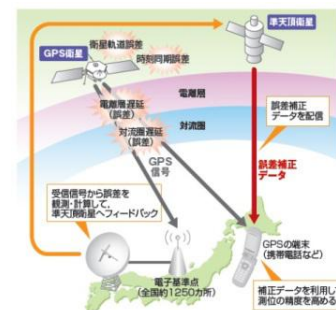
精密轨道和
钟差



全球范围
精度均匀
绝对位置



综合考各项
误差改正





PPP基本概念(2/6)



■ PPP定义及实现

- **定义：**精密单点定位（precise point positioning, PPP）是指利用外部组织（如IGS或个人）提供的精密卫星轨道和钟差产品，在综合考虑各项误差精确改正的基础上，采用合理的参数估计策略（如最小二乘或Kalman 滤波等），利用单台GNSS接收机实现全球精密绝对定位（mm–dm级）的技术。
- **实现：**1) 服务端通过全球跟踪网估计得到精密卫星轨道和钟差信息；
2) 用户端固定卫星轨道和钟差，通过严密地考虑各类 GNSS 误差并进行精细处理，同时求解用户坐标、接收机钟差、对流层延迟、电离层延迟、相位模糊度等参数，可在全球范围内获得高精度位置信息。



PPP基本概念(3/6)



■ 精密轨道和钟差产品（事后）

Table 1 Overview of the IGS and MGEX ACs and precise products

Institution	Prefix	System	Orbit/clock	Remarks
IGS				
CODE	<i>cod</i>	GR	15 min/5 s	—
NRCan	<i>emr</i>	G	15 min/30 s	—
ESA/ESOC	<i>esa</i>	GR	15 min/30 s	—
GFZ	<i>gfz</i>	GR	15 min/30 s	—
CNES/CLS	<i>grg</i>	GR	15 min/30 s	—
IGS	<i>igs</i>	G	15 min/30 s	Official combined products
JPL	<i>jpl</i>	G	15 min/30 s	—
MIT	<i>mit</i>	G	15 min/30 s	—
NGS	<i>ngs</i>	G	15 min/15 min	Excluded
SIO	<i>sio</i>	G	15 min/15 min	Excluded
MGEX				
CODE	<i>com</i>	GRCEJ	5 min/30 s	—
GFZ	<i>gbm</i>	GRCEJ	5 min/30 s	—
CNES/CLS	<i>grm</i>	GRE	15 min/30 s	—
JAXA	<i>jax</i>	GRJ	5 min/30 s	—
SHAO	<i>sha</i>	GRCE	15 min/5 min	Excluded
TUM	<i>tum</i>	CEJ	5 min/5 min	Excluded
WHU	<i>wum</i>	GRCEJ	15 min/30 s	—

➤ IGS产品

<ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products>

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products>

➤ MGEX产品

<ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex>

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex>

➤ BDS-3产品

wum、gbm产品



PPP基本概念(4/6)



■ 精密轨道和钟差产品（实时）

Table 1 Details of the selected IGS RTS products

ACs	Mount point	Reference point	Messages	Ultra-rapid orbits	Softwares
BKG	CLK01	CoM	1059,1060, 1065,1066	CODE	RTNet + BNC
CNES	CLK93	CoM	1059,1060	IGS	PPP-Wizard + BNC
ESA/ ESOC	CLK50	CoM	1059,1060	NAPEOS 2h Update	RETINA + BNC
GFZ	CLK71	CoM	1059,1060	IGS	EPOS-RT + BNC
GMV	CLK81	CoM	1059,1060, 1065,1066	Internal	magicGNSS + magicGNSS
WHU	CLK15	CoM	1059,1060	IGS	PANDA + BNC
CMB	IGC01	CoM	1059,1060	IGS	COMBI + BNC

In the “Softwares” column, the first one is used for satellite orbit/clock determination/estimation, the second one is used for satellite orbit/clock corrections encoding. In addition, CODE denotes Center for Orbit Determination in Europe. NAPEOS is short for NAVigation Package for Earth Orbiting Satellites.

➤ 参考点

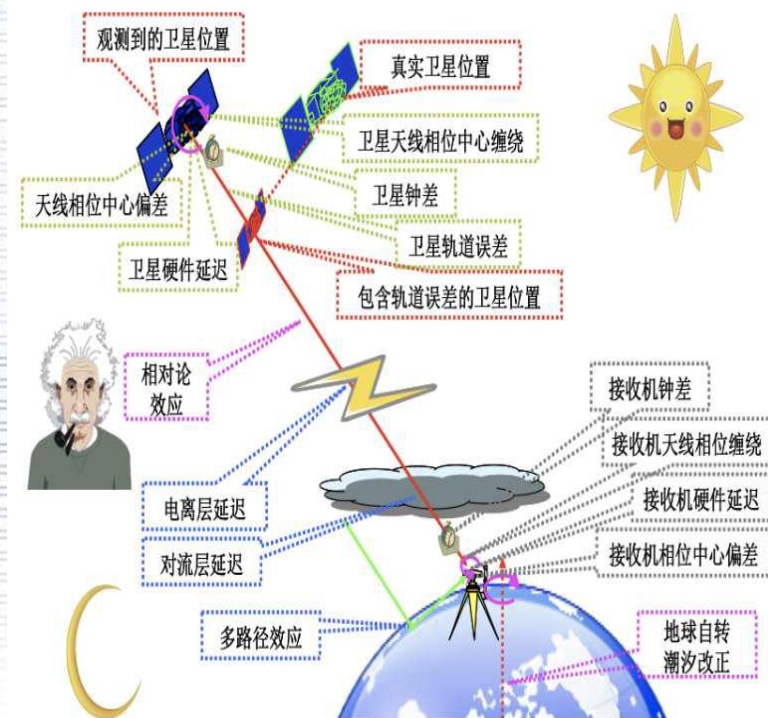
Center of mass：卫星质量中心

Antenna phase center：天线相位中心

PPP基本概念(5/6)



■ 误差源



➤ 卫星端误差

卫星光压、卫星姿态、地球辐射压等

➤ 接收机端误差

非潮汐负荷（大气压、积雪、土壤水等）改正等

➤ 传输过程误差

对流层梯度、电离层闪烁等

误差改正依据

✓ IERS Convention 2010

✓ <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>



PPP基本概念(6/6)

■ 误差源

误差源改正还有哪些需要解决的问题呢？



误差 ?= 信号

- **卫星端误差**
 - 光压模型
 - 天线相位中心
 - 卫星姿态
 - ...
- **接收机端误差**
 - 天线相位中心 (BDS、Galileo等)
 - 多路径误差 (动态、海上)
 - ...
- **传输过程误差**
 - 电离层闪烁
 - 精密对流层斜延迟获取
 - 电离层延迟高阶项
 - ...



PPP发展历程(1/6)



概念提出、实现

Malys and Jensen 1990

计算效率的对比

Zumberge et al. 1997

单差法AR的提出

Gabor and Nerem 1999

误差源的改正模型

Kouba and Héroux 2001

非组合模型的提出

Keshin et al. 2006

PPP-AR的实现

Collins et al. 2008
Ge et al. 2008
Laurichesse et al. 2009

区域增强PPP

Li et al. 2011

三频PPP-AR

Geng et al. 2013



PPP发展历程 (2/6)

■ 卫星系统组合

研究 阶段

GPS PPP

GLONASS PPP

BDS PPP

多系统组合PPP

1

2

3

4

1. 20世纪90年代，首次提出并实现GPS PPP技术，一直研究至今
2. 2011年10月，GLONASS系统逐步恢复
3. 2012年底，BDS形成亚太区域定位服务能力
4. GPS+GLO+BDS+GAL四系统PPP，**各类GNSS偏差的精细区分和对待**



PPP发展历程 (3/6)

■ 函数模型

研究阶段

无电离层
组合PPP

1

UofC PPP

2

非差非组合PPP

3

1. 20世纪90年代，PPP技术的实现即采用，最常用的PPP模型
2. 2001年，加拿大Calgary大学高扬教授提出
3. 最早由荷兰Delft大学的Keshin等 (Keshin et al, 2006) 最先提出，张宝成在其基础上对GPS非组合PPP进行了完善并做了一系列研究，为当前研究热点之一



PPP发展历程 (4/6)

■ 模糊度解算策略

研究阶段

PPP浮点解

1

PPP固定解

2

PPP部分固定解

3

1. 从PPP技术的实现到现在一直流行
2. 2008年, 钟差去耦法 (Collins et al., 2008)、星间单差平均法 (Ge et al., 2008)、整数卫星钟差法 (Laurichesse et al., 2009)
3. 最优子集的选取策略



PPP发展历程 (5/6)

■ 频率组合

研究阶段

双频PPP

1

单频PPP

2

三频或多频PPP

3

1. 20世纪90年代，PPP技术的实现即是基于双频载波和伪距观测值，至今仍是双频PPP应用的最广泛
2. 21世纪初，导航型接收机的普及
3. 2012年以后，GPS的现代化以及BDS、Galileo全星座播发三频信号



PPP发展历程 (6/6)

■ 解算模式

研究 阶段

后处理PPP

1

近实时PPP

2

实时PPP

3

1. 从PPP技术的实现到现在一直流行
2. 2000年11月3日, IGS发布GPS超快轨道和钟差产品
3. 2013年4月1日, IGS实时服务正式启动, **实时PPP研究刚刚起步**



PPP基本原理(1/9)



■ 理论



软件(1/9)



■ 理论

Table Summary of PPP models with single-, dual-, and triple-frequency observations

Item	Description
IF1	Single-frequency (L1) ionospheric-free combined observation
IF12	Dual-frequency (L1/L2) ionospheric-free combined observation
IF13	Dual-frequency (L1/L3) ionospheric-free combined observation
IF1213	Triple-frequency (L1/L2 and L1/L3) ionospheric-free combined observation
IF123	Triple-frequency (L1/L2/L3) ionospheric-free combined observation
UC1	Single-frequency (L1) uncombined observation
UC12	Dual-frequency (L1/L2) uncombined observation
UC13	Dual-frequency (L1/L3) uncombined observation
UC123	Triple-frequency (L1/L2/L3) uncombined observation



PPP软件实现(1/6)



- 数据获取是基础
- 软件实现是核心
- 结果分析是关键



PPP软件实现(1/6)



■ GNSS数据分类

- 观测值文件 (yyd、yyo)
- 广播星历 (yyg、yyn、yym)
- 精密星历 (sp3、eph)、钟差 (clk、clk_05s、clk_30s)
- 地球定向参数 (erp)
- SINEX解 (snx)
- 码偏差 (DCB、BSX)
- 对流层延迟 (yyzpd、TRO)
- 电离层延迟 (yyi、yyI)
- 天线相位中心改正 (atx)



软件(

GAMP

开发了多星座多频
data Analysis software for
Positioning, GAMP. 已
破3800, 被引34次。
巴西等多个国家的研



GPS Solutions

April 2018, 22:33 | [Cite as](#)

GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations

Authors [Authors and affiliations](#)

Feng Zhou, Danan Dong, Weiwei Li , Xinyuan Jiang

GPS Toolbox

First Online: 16 January 2018

3 Shares 3.1k Downloads

晚上8:31

HD 4G 65



Springer 20:11

发至 我 详情



...

Springer

GPS Solutions



Is your research a good fit?

GPS Solutions is proud to publish high impact, widely read articles, and welcomes submissions advancing research in the field.

We invite you to learn more about the journal, explore our content, and join our community of authors and readers.

[Visit our website](#)

See recent, highly cited articles:



Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning



Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis



GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations



Explore more content

See the latest articles, browse our archive, or search for topics most relevant to you.

[Start reading](#)



Ready to submit?

We welcome your submission, and aim to provide an excellent experience for our authors.

[Submit your article here](#)



回复全部

回复

转发



软件甘普 (GNSS
frequency precise
目前, 下载量已突
意大利、土耳其、
关问题。

precise point positioning using undifferenced and

ickert(3,5), and Harald Schuh(3,5)

na Normal University, No. 500 Dongchuan Road, Shanghai 200241, China
st China Normal University, No. 500 Dongchuan Road, Shanghai 200241, China
14473, Germany
Qingdao 266590, China

ita processing software should be developed that is easy to operate, efficient to run,
a new GNSS analysis software called GAMP (GNSS Analysis software for Multi-
multi-GNSS precise point positioning (PPP) based on undifferenced and uncombined
many improvements, such as cycle slip detection, receiver clock jump repair, and
inified format of output files, including positioning results, number of satellites, satellite
Electron Content (sTEC), is defined for results analysis and plotting. Moreover, a new
improve computational efficiency for post-processing.

No.2.

2.zip)



软件(5/9)



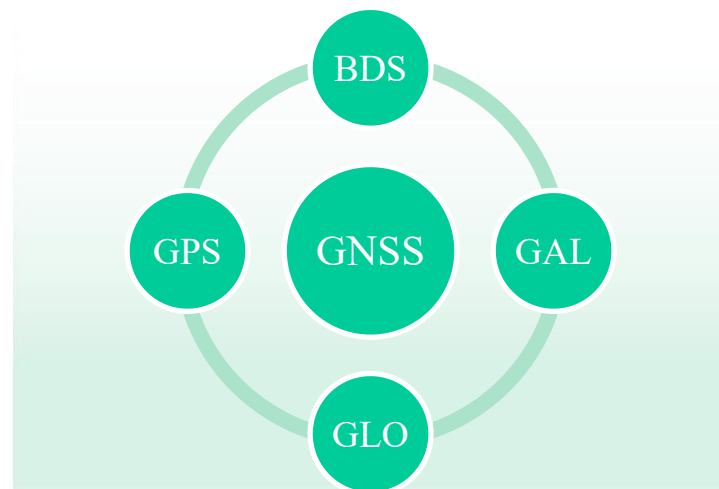
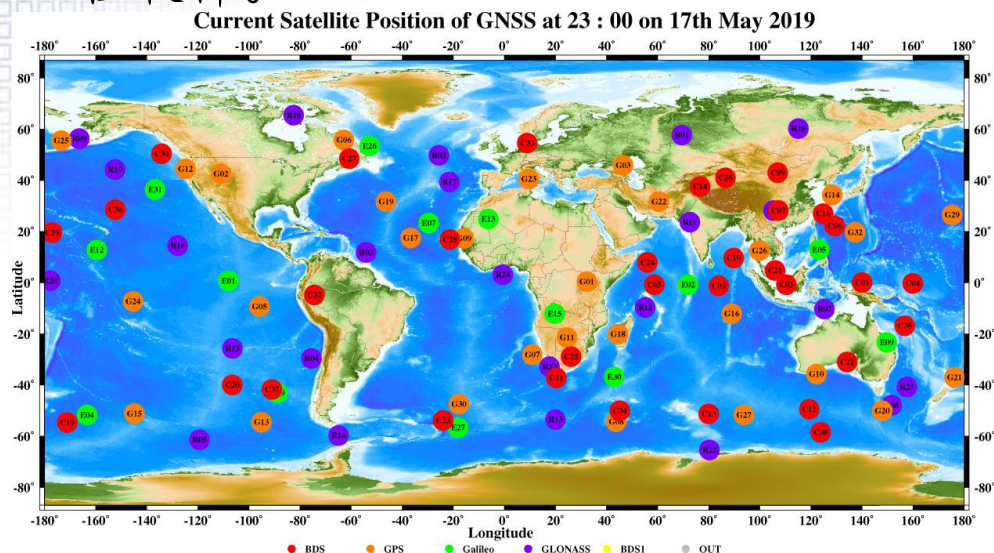
■ GAMP II

基于C/C++研发了一套兼具服务端与用户端解算功能的跨平台软件**GAMP II**

服务端：相位小数偏差/大气延迟增强等产品服务

终端：PPP/PPP-AR/PPP-RTK应用

目前**GAMP II**已扩展为具备实时多星座多频率相位小数偏差估计、PPP模糊度固定、对流层与电离层格网建模、PPP-RTK等功能的实时高精度定位软件。

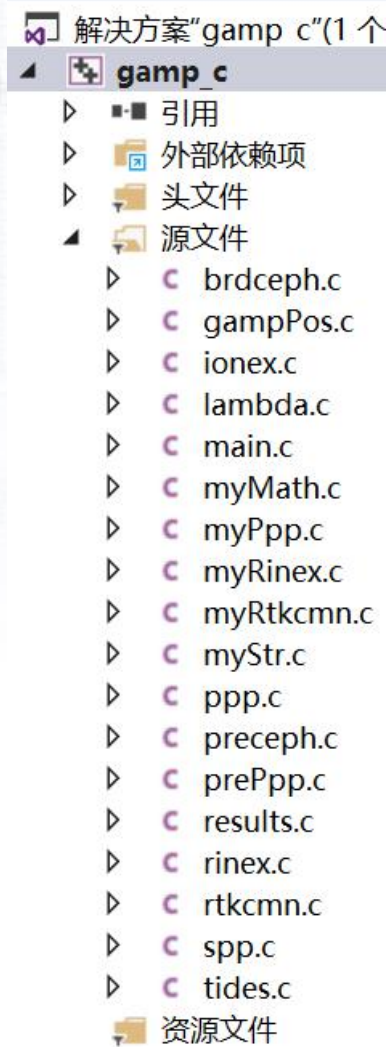




软件(6/9)

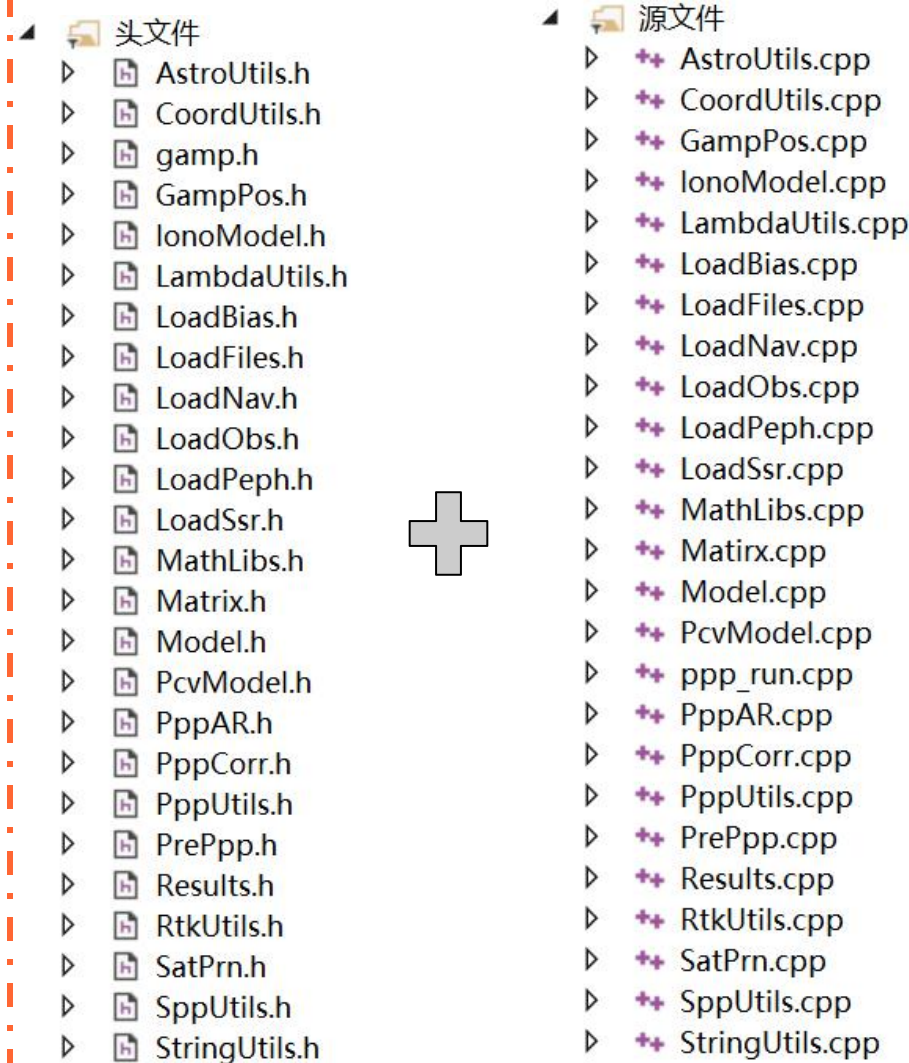


GAMP II



重构

GAMP II





软件(7/9)

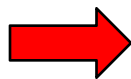


■ GAMP II

GPS单系统双频信号

事后处理流程和算法

模糊度浮点解



GNSS多系统多频信号

实时处理流程和算法

模糊度固定解

TODO
MORE?



实时多系统
PPP
-
RTK
服务系统

◆ GNSS卫星轨道/钟差的快速估计;

◆ 实时GNSS UPD的快速估计;

◆ 多频多系统实时GNSS PPP;

◆ 实时GNSS PPP非差模糊度固定;

◆ 模型的自治性, 如卫星姿态;

◆ GNSS大气增强产品生成;

◆ 实时轨道和钟差是实时PPP的前提;

◆ 实时UPD产品是实现PPP-AR的前提;

◆ 多频多系统提高用户PPP定位性能;

◆ 提高用户PPP定位精度和可靠性;

◆ 保证服务端和客户端的一致性;

◆ 实现单测站用户快速精密定位;



软件(8/9)

■ GAMP II应用场景 (实际应用)

- ◆ 千寻北斗地基增强站坐标实时监控、星基产品播发后完好性监测
- ◆ 国家授时中心PPP时频传递算法和应用研究
- ◆ PPP、PPP-RTK相关的理论研究、数据处理等日常工作



数据处理与结果分析(6/14)



■ 结果分析之统计指标

- 收敛时间
- 定位精度
- 固定率
- 首次固定时间
- ...
- 均值mean
- 中位数median (优点?)
- 标准差std
- 均方根误差rms
- 分位数percentile (68%? 95%?)
- ...



数据处理与结果分析(7/14)



■ 结果分析之成图工具

- Excel
- Origin
- MATLAB
- Gnuplot
- Python
- GMT
- ...



数据处理与结果分析(8/14)

■ 结果分析之成图工具

Python绘图 <https://matplotlib.org/gallery.html>





数据处理与结果分析(9/14)

■ 结果分析之成图工具

GMT6绘图 <https://gmt-china.org/#>

- 用户手册（中文）

← → × <https://docs.gmt-china.org/6.0/> ☆

GMT中文手册

v6.0 ▼

搜索文档

目录

1 简介

2 安装

3 入门教程

4 GMT基础

5 表数据

6 网格文件

7 CPT文件

8 标准选项

9 投影方式

10 配置参数

11 地学数据集

12 中文支持

13 模块手册

首页 » GMT中文手册

编辑本页

GMT中文手册



欢迎来到 [Generic Mapping Tools](#) 的世界。

本文档是由 [GMT中文社区](#) 维护整理的GMT中文手册。手册详尽地介绍了GMT的用法并提供了大量的实用示例。其既可以作为初学者的入门读物，也可以作为日常使用的参考书。

文档源码在 [GitHub](#) 上开源，欢迎更多的志愿者加入到文档的维护工作中来。

快速链接：



科研的切入点(10/14)

■ PPP系统间偏差的产生

$$\begin{aligned} cdt_{\text{IF}_{12}}^{s,Q} &= c[dt^{s,Q} + (\alpha_{12}^Q \cdot d_1^{s,Q} + \beta_{12}^Q \cdot d_2^{s,Q}) + dD^Q] \\ &= c(dt^{s,Q} + d_{\text{IF}_{12}}^{s,Q} + dD^Q) \end{aligned}$$

$$\text{ISB}_r^Q = (d_{r,\text{IF}_{12}}^Q - d_{r,\text{IF}_{12}}^G) + (dD^Q - dD^G) \quad (Q \neq G)$$



结论



- 非差非组合PPP是当前研究热点，基于非组合PPP的相位小数偏差估计、PPP模糊度固定、电离层延迟提取等；
- 多系统GNSS PPP的ISB产生机制和时空特性分析还需更深入的研究；
- BDS-3-only、Galileo-only是另一个研究切入点，如何将工作做得特色鲜明有一定难度；
- 无论什么研究方向，一旦选定，要坚持、深入地做下去，持之以恒，要善于思考，善于总结，要发挥主观能动性，不要做工具人，这样不出好的成果都难！



谢谢