精密单点定位（PPP）之浅见

周 锋

山东科技大学

E-mail: zhouforme@163.com

2020-02-27

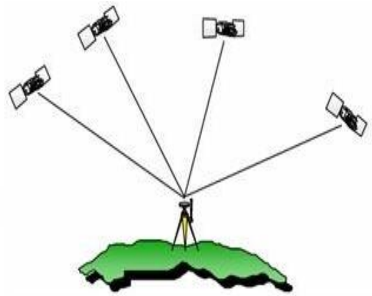
提　要

- 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应用机遇
- PPP应用瓶颈

PPP基本概念(1/6)

■ PPP定义

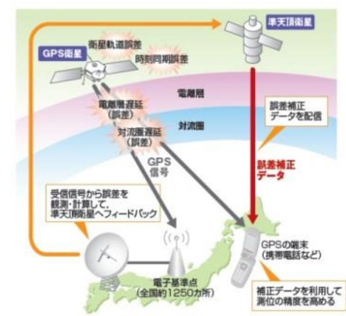
单台接收机



精密轨道和钟差

全球范围精度均匀绝对位置

综合考虑各项误差改正



- **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。

PPP基本概念(2/6)

PPP实现

1. 服务端通过全球跟踪网（GNSS站网）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，通过严密地考虑误差源并进行精细处理，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）

Overview of the IGS and MGEX ACs and precise products

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

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.

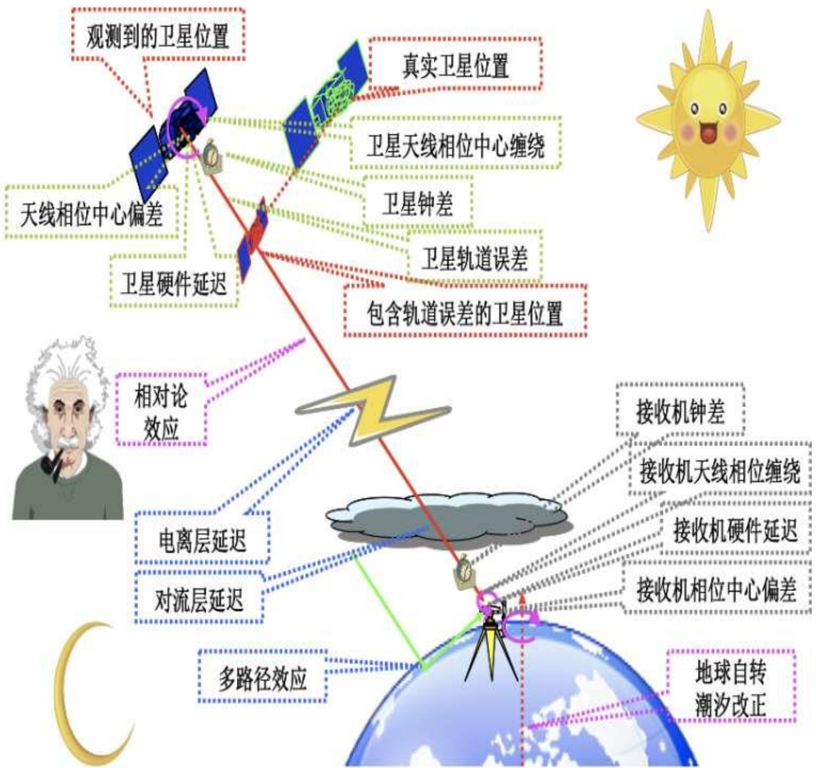
➢ **参考点**

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
Kouba 2009
Kouba 2015

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

1	2	3	4
GPS PPP	GLONASS PPP	BDS PPP	多系统组合PPP

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

1	2	3
无电离层组合PPP	UofC PPP	非差非组合PPP

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

1. PPP浮点解
2. PPP固定解
3. PPP部分固定解

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

1. 双频PPP
2. 单频PPP
3. 三频或多频PPP

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	近实时PPP	实时PPP
1	2	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需要更深入的研究**

- 接下来会有一大波公式来袭！

PPP基本原理(1/3)

非差非组合观测方程

接收机和卫星端伪距硬件延迟

$$P_{r,j}^{s} = \rho_r^s + dt_r - \boxed{dt^s} + T_r^s + \mu_j \cdot I_{r,1}^s + \boxed{d_{r,j} + d_j^s} + \varepsilon_{r,j}^s$$

$$L_{r,j}^{s} = \rho_r^s + dt_r - \boxed{dt^s} + T_r^s - \mu_j \cdot I_{r,1}^s + N_{r,j}^s + \boxed{\varphi_{r,j} + \varphi_j^s} + \xi_{r,j}^s$$

卫星钟差

接收机和卫星端载波硬件延迟

$$\begin{aligned} dt_{\mathrm{IF12}}^s &= dt^s - (\alpha_{12} \cdot d_1^s + \beta_{12} \cdot d_2^s) - \\ &\quad (\alpha_{12} \cdot \delta\varphi_1^s + \beta_{12} \cdot \delta\varphi_2^s) \\ &= dt^s - d_{\mathrm{IF12}}^s - \delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^s \end{aligned}$$

$$\varphi_j^s = \bar{\varphi}_j^s + \delta\varphi_j^s$$

$$\varphi_{r,j} = \bar{\varphi}_{r,j} + \delta\varphi_{r,j}$$

$$\begin{cases} d_1^s = -a + b \\ d_2^s = -a + \mu_2 b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = -(\alpha_{12} d_1^s + \beta_{12} d_2^s) = d_{\mathrm{IF12}}^s \\ b = \dfrac{1}{1-\mu_2}(d_1^s - d_2^s) = \beta_{12} \cdot \mathrm{DCB}_{12}^s \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha_{mn} = \dfrac{(f_m^s)^2}{(f_m^s)^2 - (f_n^s)^2},\ \beta_{mn} = -\dfrac{(f_n^s)^2}{(f_m^s)^2 - (f_n^s)^2} \\ \mathrm{DCB}_{mn}^s = d_m^s - d_n^s,\ \mathrm{DCB}_{r,mn} = d_{r,m} - d_{r,n} \\ \delta\,\mathrm{DPB}_{mn}^s = \delta\varphi_m^s - \delta\varphi_n^s,\ \delta\,\mathrm{DPB}_{r,mn} = \delta\varphi_{r,m} - \delta\varphi_{r,m} \\ d_{\mathrm{IF}mn}^s = \alpha_{mn} \cdot d_m^s + \beta_{mn} \cdot d_n^s,\ d_{r,\mathrm{IF}mn} = \alpha_{mn} \cdot d_{r,m} + \beta_{mn} \cdot d_{r,n} \\ \delta\varphi_{\mathrm{IF}mn}^s = \alpha_{mn} \cdot \delta\varphi_m^s + \beta_{mn} \cdot \delta\varphi_n^s,\ \delta\varphi_{r,\mathrm{IF}mn} = \alpha_{mn} \cdot \delta\varphi_{r,m} + \beta_{mn} \cdot \delta\varphi_{r,n} \end{cases}$$

PPP基本原理(2/3)

■ 观测方程的线性化

$$\tilde{p}_{r,j}^{s} = \boldsymbol{g}_r^s \cdot \boldsymbol{x} + dt_r + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w} + \mu_j \cdot I_{r,1}^s + d_{r,j} + (d_j^s - d_{\mathrm{IF12}}^s) - \delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^s + \varepsilon_{r,j}^s$$

$$l_{r,j}^s = \boldsymbol{g}_r^s \cdot \boldsymbol{x} + dt_r + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w} - \mu_j \cdot I_{r,1}^s + (N_{r,j}^s + \bar{\varphi}_{r,j} + \bar{\varphi}_j^s - d_{\mathrm{IF12}}^s) + \delta\varphi_{r,j} + (\delta\varphi_j^s - \delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^s) + \xi_{r,j}^s$$

$$p_{r,1}^s = \tilde{p}_{r,1}^s - \beta_{12} \cdot \mathrm{DCB}_{12}^s$$

$$p_{r,2}^s = \tilde{p}_{r,2}^s + \alpha_{12} \cdot \mathrm{DCB}_{12}^s$$

$$p_{r,3}^s = \tilde{p}_{r,3}^s + \alpha_{12} \cdot \mathrm{DCB}_{13}^s + \beta_{12} \cdot \mathrm{DCB}_{23}^s$$

$$p_{r,j}^s = \boldsymbol{g}_r^s \cdot \boldsymbol{x} + dt_r + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w} + \mu_j \cdot I_{r,1}^s + d_{r,j} - \delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^s + \varepsilon_{r,j}^s$$

$$l_{r,j}^s = \boldsymbol{g}_r^s \cdot \boldsymbol{x} + dt_r + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w} - \mu_j \cdot I_{r,1}^s + (N_{r,j}^s + \bar{\varphi}_{r,j} + \bar{\varphi}_j^s - d_{\mathrm{IF12}}^s) + \delta\varphi_{r,j} + (\delta\varphi_j^s - \delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^s) + \xi_{r,j}^s$$

PPP基本原理(3/3)

■ 观测方程的线性化

$$p_{r,j}^{s}=\boldsymbol{g}_{r}^{s}\cdot\boldsymbol{x}+d\bar{t}_{r}+m_{r,w}^{s}\cdot Z_{r,w}+\mu_{j}\cdot\bar{I}_{r,1}^{s}+\Omega_{r,j}+\delta\bar{b}_{r,j}^{s}+\varepsilon_{r,j}^{s}$$

$$l_{r,j}^{s}=\boldsymbol{g}_{r}^{s}\cdot\boldsymbol{x}+d\bar{t}_{r}+m_{r,w}^{s}\cdot Z_{r,w}-\mu_{j}\cdot\bar{I}_{r,1}^{s}+\bar{N}_{r,j}^{s}+\Theta_{r,j}^{s}+\xi_{r,j}^{s}$$

$$d\bar{t}_{r}=dt_{r}+d_{r,\mathrm{IF12}}+\delta\varphi_{r,\mathrm{IF12}}$$

$$\bar{I}_{r,1}^{s}=I_{r,1}^{s}+\beta_{12}\cdot\mathrm{DCB}_{r,12}-\beta_{12}(\delta\,\mathrm{DPB}_{12}^{s}+\delta\,\mathrm{DPB}_{r,12})$$

$$\bar{N}_{r,j}^{s}=N_{r,j}^{s}+\bar{\varphi}_{r,j}+\bar{\varphi}_{j}^{s}-d_{\mathrm{IF12}}^{s}-d_{r,\mathrm{IF12}}+\mu_{j}\cdot\beta_{12}\cdot\mathrm{DCB}_{r,12}$$

$$\Omega_{r,j}=\begin{cases}0, & j=1,2\\ \beta_{12}/\beta_{13}\cdot\mathrm{DCB}_{r,12}-\mathrm{DCB}_{r,13}, & j=3\end{cases}$$

$$\Theta_{r,j}^{s}=\begin{cases}0, & j=1,2\\ (\delta\varphi_{j}^{s}-\delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^{s}-\mu_{j}\cdot\beta_{12}\cdot\delta\,\mathrm{DPB}_{12}^{s})+ \\ (\delta\varphi_{r,j}-\delta\varphi_{r,\mathrm{IF12}}-\mu_{j}\cdot\beta_{12}\cdot\delta\,\mathrm{DPB}_{r,12}), & j=3\end{cases}$$

$$\delta\bar{b}_{r,j}^{s}=\mu_{j}\cdot\beta_{12}(\delta\,\mathrm{DPB}_{12}^{s}+\delta\,\mathrm{DPB}_{r,12})-(\delta\varphi_{\mathrm{IF12}}^{s}+\delta\varphi_{r,\mathrm{IF12}})$$

◆ **比较严谨的通用的非组合PPP观测方程！**

- **IFCB在三频非组合观测方程中的表达**
- **伪距观测方程存在的系统性偏差**

PPP常用模型(1/3)

■ PPP常用模型简介

单、双与三频PPP常用模型简介

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常用模型(2/3)

PPP观测模型表达

$$\begin{cases} \boldsymbol{p}_r^s = \begin{bmatrix} p_{r,1}^s & p_{r,2}^s & p_{r,3}^s \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{l}_r^s = \begin{bmatrix} l_{r,1}^s & l_{r,2}^s & l_{r,3}^s \end{bmatrix}^T \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \boldsymbol{p}_{r,xxx}^s = \boldsymbol{A}_{xxx} \cdot \boldsymbol{p}_r^s \\ \boldsymbol{l}_{r,xxx}^s = \boldsymbol{A}_{xxx} \cdot \boldsymbol{l}_r^s \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_{r,\mathrm{IF12}}^s = \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF12}} \cdot \boldsymbol{p}_r^s \\ l_{r,\mathrm{IF12}}^s = \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF12}} \cdot \boldsymbol{l}_r^s \end{cases}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{IF12}} = \begin{bmatrix} \alpha_{12} & \beta_{12} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} p_{r,1}^s \\ p_{r,2}^s \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC12}} \cdot \boldsymbol{p}_r^s \\ \begin{bmatrix} l_{r,1}^s \\ l_{r,2}^s \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC12}} \cdot \boldsymbol{l}_r^s \end{cases}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{UC12}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} p_{r,\mathrm{IF12}}^s \\ p_{r,\mathrm{IF13}}^s \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF1213}} \cdot \boldsymbol{p}_r^s \\ \begin{bmatrix} l_{r,\mathrm{IF12}}^s \\ l_{r,\mathrm{IF13}}^s \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF1213}} \cdot \boldsymbol{l}_r^s \end{cases}$$

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{IF1213}} = \begin{bmatrix} \alpha_{12} & \beta_{12} & 0 \\ \alpha_{13} & 0 & \beta_{13} \end{bmatrix}$$

PPP常用模型(3/3)

■ PPP随机模型表达

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} &= \mathrm{diag}(\sigma_{P_1}^2, \sigma_{P_2}^2, \sigma_{P_3}^2, \sigma_{L_1}^2, \sigma_{L_2}^2, \sigma_{L_3}^2) \\
&= \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_P^2, \sigma_P^2, \sigma_L^2, \sigma_L^2, \sigma_L^2)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC1}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC1}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC1}}^T = \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_L^2) \\
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC12}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC12}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC12}}^T = \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_P^2, \sigma_L^2, \sigma_L^2) \\
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC13}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC13}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC13}}^T = \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_P^2, \sigma_L^2, \sigma_L^2) \\
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC123}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC123}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{UC123}}^T \\
&= \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_P^2, \sigma_P^2, \sigma_L^2, \sigma_L^2, \sigma_L^2)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{IF12}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF12}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF12}}^T = (\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2) \cdot \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_L^2) \\
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{IF13}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF13}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF13}}^T = (\alpha_{13}^2 + \beta_{13}^2) \cdot \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_L^2) \\
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{IF123}} &= \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF123}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF123}}^T = (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) \cdot \mathrm{diag}(\sigma_P^2, \sigma_L^2)
\end{aligned}
$$

$$
\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{IF1213}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF1213}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{UC}} \boldsymbol{A}_{\mathrm{IF1213}}^T = \begin{bmatrix}
(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)\sigma_P^2 & \alpha_{12}\alpha_{13}\sigma_P^2 & 0 & 0 \\
\alpha_{12}\alpha_{13}\sigma_P^2 & (\alpha_{13}^2 + \beta_{13}^2)\sigma_P^2 & 0 & 0 \\
0 & 0 & (\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)\sigma_L^2 & \alpha_{12}\alpha_{13}\sigma_L^2 \\
0 & 0 & \alpha_{12}\alpha_{13}\sigma_L^2 & (\alpha_{13}^2 + \beta_{13}^2)\sigma_L^2
\end{bmatrix}
$$

PPP软件实现（1/11）

- 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（2/11）

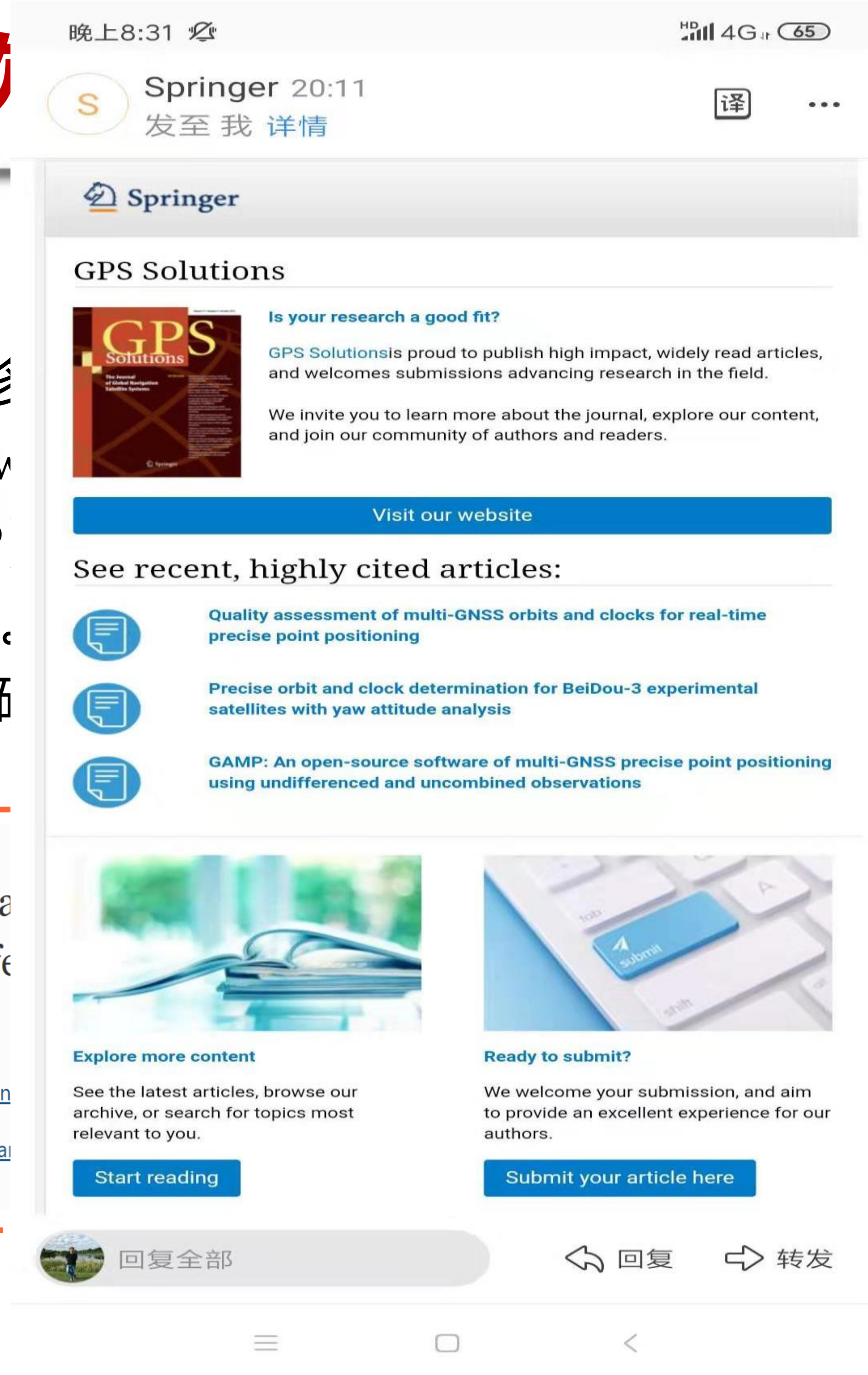
■ GNSS数据分类

- 观测值文件（*yy*d、*yy*o）
- 广播星历（*yy*g、*yy*n、*yy*m）
- 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（*yy*zpd、TRO）
- 电离层延迟（*yy*i、*yy*I）
- 天线相位中心改正（atx）

PPP软

■ GAMP

开发了多星座多 … 软件甘普（GNSS data Analysis softw… -frequency precise Positioning，GAMP … 目前，下载量已突破3800，被引34次。… 意大利、土耳其、巴西等多个国家的研 … 相关问题。



GPS Toolbox | Published: 16 January 2018

GAMP: An open-source softwa… point positioning using undiffe… observations

Feng Zhou, Danan Dong, Weiwei Li, Xinyuan Jiang, Jen…

GPS Solutions 22, Article number: 33 (2018) | Cite this a…

3881 Accesses | 34 Citations | 2 Altmetric | Metrics

…S precise point positioning using undifferenced and

…Vickert(3,5), and Harald Schuh(3,5)

…ina Normal University, No. 500 Dongchuan Road, Shanghai 200241, China
…ast China Normal University, No. 500 Dongchuan Road, Shanghai 200241, China
… 14473, Germany
…Qingdao 266590, China

…ata 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 … unified 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.

…P.zip)

PPP软件实现(4/11)

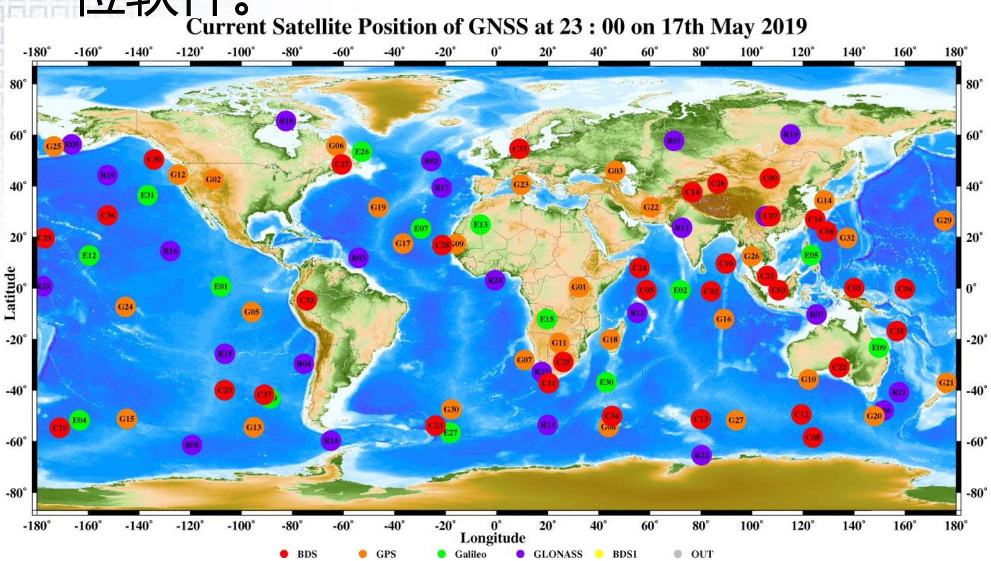
■ GAMP II

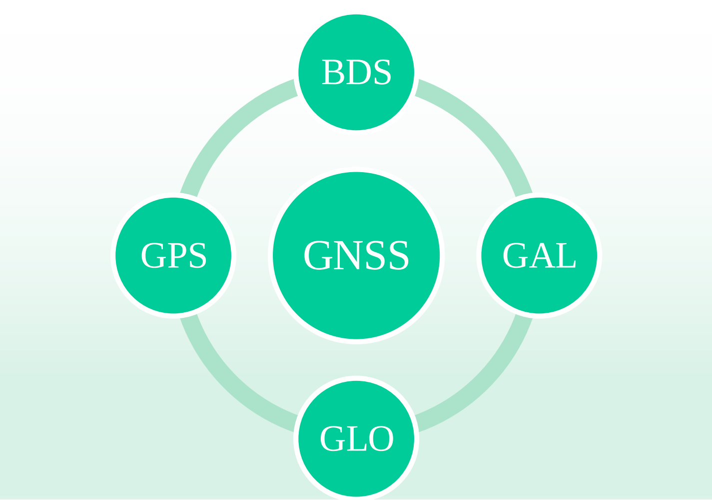
基于C/C++研发了一套兼具服务端与用户端解算功能的跨平台软件GAMP II

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。





PPP软件实现（5/11）

■ GAMP II

GAMP

解决方案“gamp_c”(1 个
- gamp_c
  - 引用
  - 外部依赖项
  - 头文件
  - 源文件
    - brdceph.c
    - gampPos.c
    - ionex.c
    - lambda.c
    - main.c
    - myMath.c
    - myPpp.c
    - myRinex.c
    - myRtkcmn.c
    - myStr.c
    - ppp.c
    - preceph.c
    - prePpp.c
    - results.c
    - rinex.c
    - rtkcmn.c
    - spp.c
    - tides.c
  - 资源文件

重构

GAMP II

- 头文件
  - AstroUtils.h
  - CoordUtils.h
  - gamp.h
  - GampPos.h
  - IonoModel.h
  - LambdaUtils.h
  - LoadBias.h
  - LoadFiles.h
  - LoadNav.h
  - LoadObs.h
  - LoadPeph.h
  - LoadSsr.h
  - MathLibs.h
  - Matrix.h
  - Model.h
  - PcvModel.h
  - PppAR.h
  - PppCorr.h
  - PppUtils.h
  - PrePpp.h
  - Results.h
  - RtkUtils.h
  - SatPrn.h
  - SppUtils.h
  - StringUtils.h

- 源文件
  - AstroUtils.cpp
  - CoordUtils.cpp
  - GampPos.cpp
  - IonoModel.cpp
  - LambdaUtils.cpp
  - LoadBias.cpp
  - LoadFiles.cpp
  - LoadNav.cpp
  - LoadObs.cpp
  - LoadPeph.cpp
  - LoadSsr.cpp
  - MathLibs.cpp
  - Matirx.cpp
  - Model.cpp
  - PcvModel.cpp
  - ppp_run.cpp
  - PppAR.cpp
  - PppCorr.cpp
  - PppUtils.cpp
  - PrePpp.cpp
  - Results.cpp
  - RtkUtils.cpp
  - SatPrn.cpp
  - SppUtils.cpp
  - StringUtils.cpp

PPP软件实现(6/11)

■ GAMP II

GPS单系统双频信号	→	GNSS多系统多频信号
事后处理流程和算法	→	实时处理流程和算法
模糊度浮点解	→	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 ◆实时轨道和钟差是实时PPP的前提
- ◆实时GNSS UPD的快速估计 ◆实时UPD产品是实现PPP-AR的前提
- ◆多频多系统实时GNSS PPP ◆多频多系统提高用户PPP定位性能
- ◆实时GNSS PPP非差模糊度固定 ◆提高用户PPP定位精度和可靠性
- ◆模型的自洽性，如卫星姿态 ◆保证服务端和客户端的一致性
- ◆GNSS大气增强产品生成 ◆实现单测站用户快速精密定位

PPP软件实现(7/11)

■ GAMP II应用场景（实际应用）

- ◆ 某互联网公司星基产品播发后完好性监测
- ◆ PPP、PPP-RTK相关的理论研究、数据处理等日常工作

PPP软件实现(8/11)

■ 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%?)
- …

PPP软件实现(9/11)

■ 结果分析之成图工具

- Excel
- Origin
- MATLAB
- Gnuplot
- Python
- GMT
- …

PPP软件实现（10/11）

■ 结果分析之成图工具

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

PPP软件实现（11/11）

■ 结果分析之成图工具

GMT6绘图 https://gmt-china.org/#

PPP应用机遇(1/3)

■ PPP优点

- 产品可通过卫星、互联网播发
- 单向通讯，理论上可服务海量用户或终端
- 无需基站，操作便捷
- 解算参数多，可满足不同科学或工程需要
- …

PPP应用机遇(2/3)

■ 科学应用

- 大气可降水量反演
- 电离层建模与反演
- 地震海啸预警
- 海平面监测
- 地壳形变监测
- GNSS坐标序列解算、坐标框架维持
- …

PPP应用机遇(3/3)

■ 工程应用

- 精密授时
- 海洋测绘
- 车辆导航
- 精细农业
- 空中三角测量
- …

PPP应用瓶颈

- 高精度、高可靠性卫星轨道、钟差、相位小数偏差、大气延迟产品的获取

实时卫星轨道（预报轨道精度的提升）、钟差产品（中断重收敛问题）精度和可靠性？低纬度或电离层活跃期的电离层产品的精度有限；涉及到基础设施的比拼（如计算、运维、网络传输、产品播发能力等）

- 大气产品（如对流层、电离层延迟）的精度信息

用户使用这类产品目前基本靠经验给定

- PPP对卫星轨道和钟差产品的强依赖

PPP解算的可靠性问题

- PPP的（重）收敛问题

即使采用多系统PPP模糊度固定最快也要5min左右收敛到0.1米

- 模糊度固定算法在实时场景下的正确性、可靠性问题
- …

谢谢