

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位
作者: 曹新运, 沈飞, 李建成, 张守建
DOI: 10.13203/j.whugis20210198
收稿日期: 2021-04-14
网络首发日期: 2021-08-31
引用格式: 曹新运, 沈飞, 李建成, 张守建. BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210198>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210198

引用格式：

曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210198 (Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210198)

BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位

曹新运^{1,2,3} 沈飞^{1,2,3} 李建成⁴ 张守建⁴

1 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京, 220023

2 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京, 210023

3 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京, 210023

4 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

摘要：北斗导航卫星系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）全球组网工作全面建成，标志着 BDS-3 系统迈入全球定位、导航和授时服务的新时代。为全面比较 BDS-3 系统与其他全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）非组合精密单点定位（Precise Point Positioning, PPP）性能，重点分析不同分析中心 BDS-3 精密轨道和钟差产品的一致性、BDS-3/GNSS 卫星可用性、BDS-3/GNSS 单系统及多系统融合 PPP 定位性能。结果表明：基于五家分析中心的精密轨道和钟差产品，BDS-3 静态 PPP 三维均方根误差约为 2.31 cm~4.00 cm，其单系统收敛时间明显慢于其余 GNSS 系统，GPS 系统的加入对 BDS-3/GNSS 双系统融合 PPP 改善效果最为明显，且四系统融合能够有效地缩短收敛时间，并提高动态 PPP 定位精度。

关键词：北斗三号导航卫星系统；全球导航卫星系统；卫星可用性；非组合精密单点定位

中图分类号：P228.1

文献标识码：A

项目资助：国家自然科学基金资助项目(41904018, 42077003)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20190714, BK20201374)；江苏省高层次创新创业人才引进计划项目；自然资源部测绘科学与地球空间信息技术重点实验室基金(2020-1-5)

第一作者：曹新运, 博士, 讲师, 研究方向为 GNSS 精密定位及其地学应用。邮箱: xycao@nynu.edu.cn

通讯作者：沈飞, 博士, 副教授, 研究方向为卫星定位及其地学应用。邮箱: shen.f@nynu.edu.cn

北斗导航卫星系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）先后历经先实验、后区域、再全球的三步走战略，于 2020 年 7 月 31 日正式开通北斗三号全球导航卫星系统（BDS-3），其完整星座包括 3 颗地球静止轨道（Geostationary Earth Orbits, GEO）卫星、3 颗倾斜地球同步轨道（Inclined Geo-Synchronous Orbits, IGSO）卫星和 24 颗中圆地球轨道（Medium Earth Orbits, MEO）卫星^[1]，与其他全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）共同向全球用户提供优质的定位、导航和授时（Positioning, Navigation and Timing, PNT）服务^[2]。在 BDS-3 系统组网期间，国内外学者围绕 BDS-3 信号质量^[3,4]、精密定轨^[5,6]、钟差特性^[7,8]等展开了深入

的研究, 研究成果表明, BDS-3 系统在观测噪声、钟差频率稳定度、卫星端空间多路径误差^[9]等方面, 相比 BDS-2 系统具有明显的优势, 同样具有其余 GNSS 系统提供优质 PNT 服务的巨大潜力。

精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 能够在全球区域获取用户在国际地球参考框架下的精确三维地心坐标^[10], 打破了以往只能使用差分技术才能够实现高精度定位的局面。PPP 数学模型包括经典的无电离层组合模型、非差非组合模型和半和模型^[11], 非差非组合 PPP 模型在减小观测值噪声、引入外部电离层增强信息、融合多频观测值等方面具有明显的优势。在 BDS-3 组网期间, 众多学者利用部分 BDS-3 MEO 卫星可以显著提高 BDS-2/BDS-3/GNSS 融合 PPP 定位性能, 特别是远离亚太区域^[12,13]。随着 BDS-3 组网工作完成, 能够跟踪到 BDS-3 信号的地面测站日益增多, 分布均匀的地面观测站有利于进一步提高 BDS-3 轨道和钟差精度, 且越来越多的国际 GNSS 服务组织^[14] (International GNSS Service, IGS) 的多系统实验项目 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) 分析中心开始提供基于 B1I 和 B3I 双频信号的精密轨道和钟差产品, 为 BDS-3/GNSS 系统实现优质 PNT 服务提供了数据基础。

因此, 本文基于不同 IGS 分析中心的精密产品和多系统观测数据, 分别从 BDS-3 精密轨道和钟差产品的一致性、BDS-3/GNSS 卫星可用性、非组合 GNSS PPP 定位性能三个方面, 全面分析 BDS-3 系统与其他 GNSS 系统的非组合 PPP 定位性能的差异。

1 BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位模型

当卫星精密轨道和钟差已知时, 单系统双频非组合 PPP 观测方程表述如下^[15]:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{e}_2 \otimes \boldsymbol{\mu}) \Delta \mathbf{x} + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{M}) z + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{e}_n) dt_r + (\boldsymbol{\gamma} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{l} + \boldsymbol{\varepsilon}_p \quad (1)$$

$$\mathbf{L} = (\mathbf{e}_2 \otimes \boldsymbol{\mu}) \Delta \mathbf{x} + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{M}) z + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{e}_n) dt_r - (\boldsymbol{\gamma} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{l} + (\mathbf{A} \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{a} + \boldsymbol{\varepsilon}_L \quad (2)$$

式中, n 表示可见卫星数, \otimes 表示克罗内克积, \mathbf{P} 和 \mathbf{L} 分别表示误差改正后的伪距和相位观测向量, 待估参数包括测站坐标增量 $\Delta \mathbf{x}$ 、测站天顶对流层湿延迟 z 、接收机钟差 dt_r 、第一频率电离层斜延迟向量 \mathbf{l} 和双频浮点模糊度向量 \mathbf{a} , $\boldsymbol{\mu}$ 和 \mathbf{M} 分别为 $\Delta \mathbf{x}$ 和 z 对应的余弦矩阵和系数向量, \mathbf{e} 和 \mathbf{I} 分别表示元素为 1 的向量和单位矩阵, 其下标均表示维数, 双频电离层系数向量 $\boldsymbol{\gamma} = [1 \quad \lambda_2^2/\lambda_1^2]^T$, 双频浮点模糊度对应的波长向量 $\mathbf{A} = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_L$ 分别为伪距和相位未建模误差向量。

相比较 BDS-2 而言, BDS-3 IGSO/MEO 卫星在播发 B1I 和 B3I 导航信号的同时, 也播发新的导航信号, 即 B1C (1575.42 MHz) 和 B2a (1176.45 MHz), 其分别与 GPS L1/Galileo E1 和 GPS L5/Galileo E5a 重叠, 因此, 多频信号的引入为 GNSS 兼容性和互操作性提供了新的机遇与挑战^[16,17]。为了消除多频伪距码间偏差 (Differential Code Bias, DCB), 多频非组合 PPP 模型的伪距观测值需要修正各频卫星端 DCB^[18], 即第一、第二和多频 ($f \geq 3$) 伪距观测值的 DCB 改正数分别为 $-\beta DCB_{12}^s$, αDCB_{12}^s , $DCB_{1f}^s - \beta DCB_{12}^s$, 并引入新的频间偏差 (Inter-Frequency bias, IFB) 参数以消除接收机端 DCB 的影响, 即多频 (下标 $f \geq 2$) 伪距观测方程如式 (3) 所示, 其中, $\gamma_f = \lambda_f^2/\lambda_1^2$, $\alpha = \gamma_2/(\gamma_2 - 1)$, $\beta = -1/(\gamma_2 - 1)$ 。

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{u}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{M}\mathbf{Z}_r + \mathbf{e}_n dt_r + (\gamma_f \otimes \mathbf{I}_n) \mathbf{I} + \mathbf{e}_n \mathbf{I} \mathbf{F} \mathbf{B}_f + \boldsymbol{\varepsilon}_{P_f} \quad (3)$$

为避免观测值粗差（如未探测出的小周跳和伪距粗差）对参数估计的影响，引入基于 IGG-III 权函数的抗差 Kalman 滤波^[19]，以降低异常观测值的权重。抗差 Kalman 滤波时间更新和测量更新过程如下所示：

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{x}}_k = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{x}}_k} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1}} \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_k \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{x}}_k} \mathbf{A}_k^T (\mathbf{A}_k \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{x}}_k} \mathbf{A}_k^T + \bar{\mathbf{R}}_k)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k = \bar{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{x}}_k) \\ \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}_k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_{\bar{\mathbf{x}}_k} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $\bar{\mathbf{x}}_k$ 和 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 分别为历元 k 时刻的状态预测值和状态更新值， $\mathbf{P}_{\bar{\mathbf{x}}_k}$ 和 $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{x}}_k}$ 分别表示对应状态的协方差矩阵， $\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵， \mathbf{Z}_k 和 \mathbf{A}_k 分别为观测值向量及设计矩阵， \mathbf{K}_k 为增益矩阵， \mathbf{Q}_k 为过程噪声矩阵， $\bar{\mathbf{R}}_k$ 为抗差调节后的观测值方差阵，其对角线元素如下所示：

$$\bar{\sigma}^2 = \sigma^2 / \gamma \quad (6)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 & |\tilde{v}| \leq k_0 \\ \frac{k_0}{|\tilde{v}|} \left(\frac{k_1 - |\tilde{v}|}{k_1 - k_0} \right)^2 & k_0 < |\tilde{v}| \leq k_1 \\ 0 & |\tilde{v}| > k_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中， σ^2 和 $\bar{\sigma}^2$ 分别为观测值先验方差和调节后的等效方差， γ 为方差膨胀因子， \tilde{v} 为残差标准差，阈值 k_0 和 k_1 一般分别选取为 1.2~2.0 和 3.0~8.5。当相位观测值的标准化残差超过 k_1 时，引入新的模糊度参数^[20]。

2 BDS-3 精密轨道和钟差产品一致性

截至 2021 年 3 月，能够提供 BDS-3/GPS/GLONASS/Galileo 精密卫星轨道和钟差产品的 IGS MGEX 分析中心共有五家，分别为中国武汉大学（Wuhan University, WHU）、德国波茨坦地学研究中心（GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ）、俄罗斯空间局信息分析中心（Information and Analysis Center, IAC）、欧洲定轨中心（Center for Orbit Determination in Europe, CODE）、中国科学院上海天文台（Shanghai Astronomical Observatory, SHAO），五家分析中心的精密产品详情如表 1 所示。

表 1 五家分析中心的 BDS-3/GNSS 精密轨道和钟差产品

Tab.1 BDS-3/GNSS Precise Orbit and Clock Products of Five Analysis Centers

| 机构简称 | 产品前缀 | 卫星系统 | BDS-3 最大 PRN | 轨道/钟差采样率 |
|------|------|------|--------------|-------------|
| WHU | WUM | GREC | C46 | 15 min/30 s |

| | | | | |
|------|-----|------|-----|-------------|
| GFZ | GBM | GREC | C60 | 5 min/30 s |
| IAC | IAC | GREC | C60 | 5 min/30 s |
| CODE | COM | GREC | C46 | 5 min/30 s |
| SHAO | SHA | GREC | C59 | 5 min/5 min |

表 1 第四列给出了各家分析中心产品包含的 BDS-3 最大卫星伪随机码(pseudo-random noise sequences, PRN)，由于 BDS-3 MEO/IGSO 卫星的最大 PRN 为 C46。因此，五家分析中心目前均已提供 BDS-3 MEO/IGSO 卫星精密轨道和钟差，其中，WHU 和 CODE 的产品并不支持 BDS-3 GEO 卫星解算。此外，C61 卫星仍然处于在轨测试阶段，因此，后续产品质量分析、卫星可用性及定位性能分析的结果均不包含 BDS-3 GEO 卫星。

精密卫星产品的精度和可靠性是 PPP 模型取得高精度定位的前提，为量化不同分析中心精密卫星产品的一致性，本文下载了上述五家分析中心于 GPS 2148 周的精密产品，将不同分析中心的卫星轨道作差，计算其在轨道径向、切向和法向的均方根误差（root-mean-square, RMS），并统计 BDS-3 星座的平均轨道三维 RMS 值，如表 2 所示；与此同时，消除不同分析中心的钟差基准，并统计 BDS-3 星座的平均钟差标准差（standard deviation, STD），如表 3 所示。

表 2 不同分析中心 BDS-3 卫星轨道差异的三维 RMS (cm)

Tab.2 3D RMS values of BDS-3 satellite orbit differences among different analysis centers (cm)

| | | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| 产品 | WUM | GBM | IAC | COM | SHA |
| WUM | - | 10.81 | 14.71 | 14.16 | 23.67 |
| GBM | | - | 11.65 | 10.17 | 23.20 |
| IAC | | | - | 12.35 | 26.39 |
| COM | | | | - | 23.47 |
| SHA | | | | | - |

表 3 不同分析中心 BDS-3 卫星钟差差异的 STD (cm)

Tab.3 STD values of BDS-3 satellite clock differences among different analysis centers (cm)

| | | | | | |
|-----|-----|------|------|------|------|
| 产品 | WUM | GBM | IAC | COM | SHA |
| WUM | - | 4.15 | 7.00 | 7.96 | 6.12 |
| GBM | | - | 5.88 | 6.89 | 6.14 |
| IAC | | | - | 6.33 | 7.81 |
| COM | | | | - | 8.48 |
| SHA | | | | | - |

由表 2 可知，WUM、GBM、IAC、COM 产品的 BDS-3 轨道一致性较好，轨道差异的三维

RMS 值为 10.81 cm~14.71 cm，而 SHAO 的 BDS-3 轨道产品与其余分析中心在 RMS 上表现出明显不一致，其数值接近为其余分析中心轨道差异 RMS 值的两倍。由表 3 可知，五家分析中心的 BDS-3 钟差一致性较好，钟差差异的 STD 值为 4.15 cm~8.48 cm，其中，WUM 和 GBM 的钟差一致性最优。

3 BDS-3/GNSS 卫星可用性

GNSS 卫星可用性是 PPP 模型取得连续、稳定定位性能的关键因素之一^[21]，为了更好地比较 BDS-3 系统与其余 GNSS 系统的卫星可用性，按照经纬度 $5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率划分格网，测站截止高度角设置为 5° ，采样间隔为 5 min，测站平均高程设置为 25 m，分别计算 BDS-3、GPS、GLONASS 和 Galileo 系统在各自星座重复周期内（分别为 7 天、1 天、8 天和 10 天）的平均可见卫星数和位置精度因子（Position Dilution of Precision, PDOP），分别如图 1 和图 2 所示。为清晰表达各个 GNSS 系统的卫星可见性差异，图 1 各子图平均可见卫星数范围设置为 6-12，图 2 各子图平均 PDOP 值范围设置为 1-3。

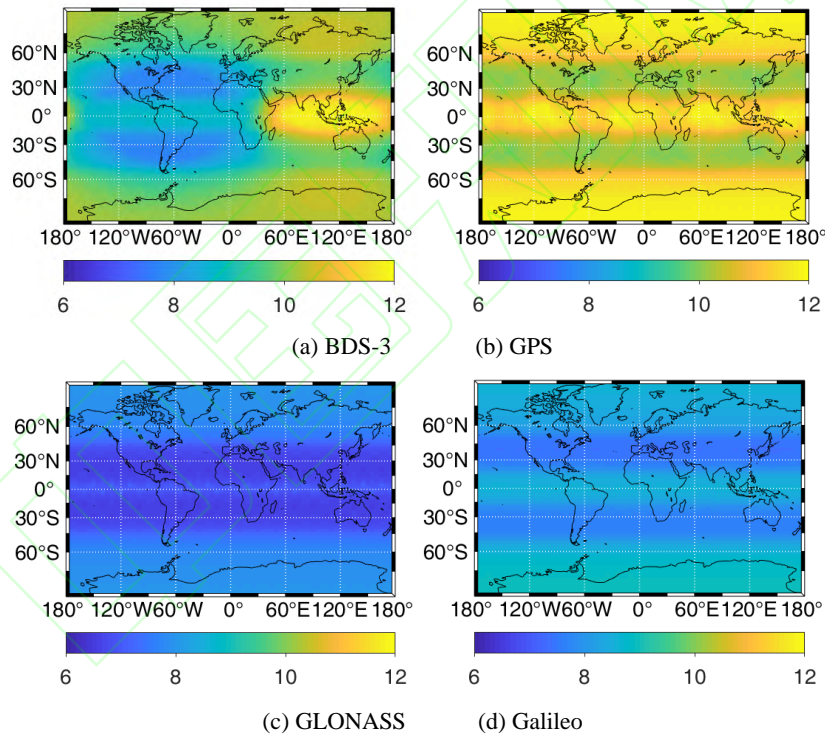


图 1 GNSS 可见卫星数

Fig.1 The number of visible satellites for GNSS

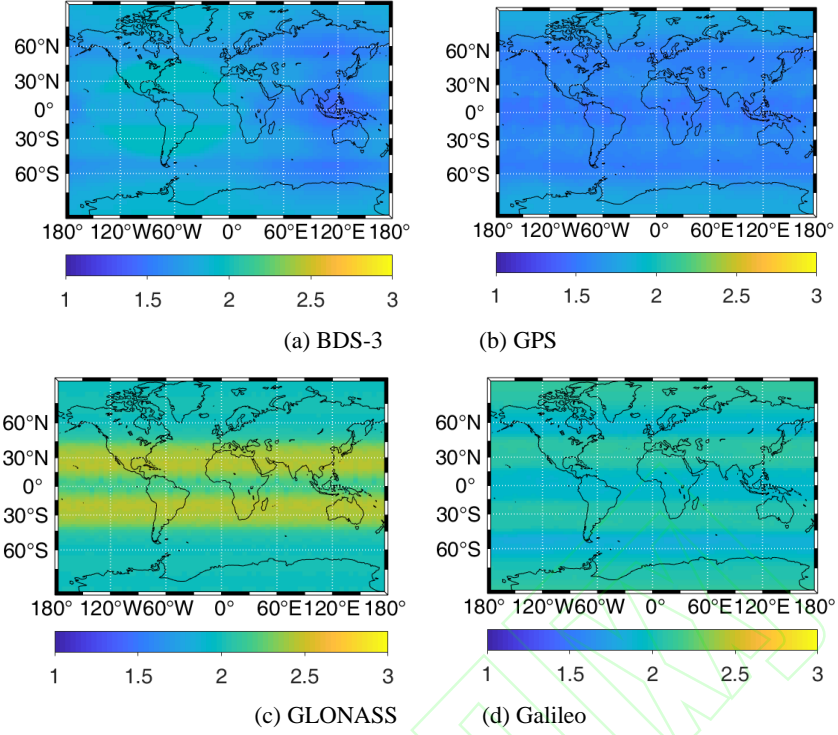


图 2 GNSS 位置精度因子

Fig.2 The position dilution of precision for GNSS

由图 1 可知，相比其余 GNSS 系统，BDS-3 多个轨道类型导致其在全球区域可见卫星数分布不均。在亚太区域，BDS-3 系统的可见卫星数与 GPS 系统近似，可达 10 颗以上，在全球其余区域，BDS-3 可见卫星数约为 7-10 颗，克服了 BDS-2 在远离亚太区域无法定位的缺陷。由图 2 可知，PDOP 值呈现出与可见卫星数分布类似的规律，在亚太区域，BDS-3 和 GPS 系统的 PDOP 值明显小于 GLONASS 和 Galileo 系统，而在全球其余大部分区域，四个系统的 PDOP 值关系近似为：GPS<BDS-3<Galileo<GLONASS。由此可见，与其余 GNSS 系统类似，BDS-3 在系统全面建成之后的平均可见卫星数和 PDOP 足以满足高精度导航定位需求，在全球多个区域可以取得优于 GLONASS 和 Galileo 系统的卫星可见性。

4 BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位性能

4.1 实验数据及处理策略

为了更好地比较 BDS-3 系统相比其余 GNSS 系统的定位性能，选取 GPS 2148 周的 33 个 IGS MGEX 测站的观测数据，所选测站均能够接收四个系统双频卫星信号，且接收机能够接收到的 BDS-3 最大卫星号均超过 C37，其分布如图 3 所示。采用非组合 PPP 模型，利用五家分析中心的精密轨道和钟差产品，分别进行 BDS-3/GNSS 单系统定位和 BDS-3/GNSS 多系统融合定位，包括单 BDS-3 (C)、单 GPS (G)、单 GLONASS (R)、单 Galileo (E)、BDS-3+GPS (CG)、BDS-3+GLONASS (CR)、BDS-3+Galileo (CE)、BDS-3+GPS+GLONASS+Galileo (CGRE) 8 种模式，分析不同模式下的定位性能。由于部分测站的双频数据缺失、数据预处理数据剔除等原因，导致其单系统可见卫星数低于 5 颗，如中纬度 GLONASS 系统，因此单系统仅进行静态

定位，多系统分别进行静态定位和伪动态定位。采用连续 20 个历元三维定位偏差优于 10 cm 作为其收敛时间^[22]，统计每个测站收敛后均方根误差 RMS 值，详细的数据处理策略如表 4 所示。其中，为避免外部电离层延迟精度影响非组合 PPP 定位性能，本文未引入外部斜电离层延迟约束及其时空约束。

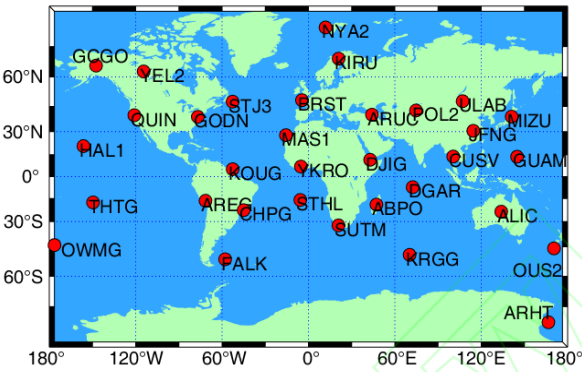


图 3 测站地理分布

Fig.3 The geographical distribution of selected stations

表 4 非组合 PPP 处理策略

Tab.4 Processing strategies of uncombined PPP

| 类别 | 策略 |
|--------|--------------------------------------|
| 截止高度角 | 5° |
| 参数估计方法 | 抗差 Kalman 滤波 |
| 电离层模型 | 估计一阶电离层斜延迟（白噪声） |
| 对流层模型 | 先验模型 ^[23] +估计测站天顶湿延迟 |
| 相位缠绕 | 模型改正 ^[24] |
| 天线相位改正 | IGS14 天线文件改正 ^[25] |
| 潮汐改正 | 固体潮+海潮+极潮（IERS2010 ^[26] ） |

4.2 单系统定位性能

由于 IGSO 卫星和 GEO 卫星的存在，BDS-3 仍然会存在类似于 BDS-2 系统可见性略差的椭球区域（约以赤道 70°W 为中心，分别沿着经度和纬度方向延伸 70°和 45°），因此在亚太区域和椭球区域分别选取两个纬度大致相当的测站，即 JFNG 测站和 GODN 测站，在两测站采用 GBM 产品得到 2021 年 3 月 8 日 BDS-3 静态 PPP 解算结果及 PDOP 值，如图 4 所示。两个测站 PPP 收敛后的平面精度和高程精度均达到 1 cm 以内，JFNG 测站的平均可见卫星数和 PDOP 值分别为 9.60 和 1.74，GODN 测站分别为 7.60 和 1.98。在 BDS-2 无法提供服务的椭球区域，BDS-3 能够显著弥补这一缺陷^[13]，在测站观测状态较好的情况下，由于 BDS-3 MEO 卫星分布均匀且

IGSO 卫星数目占比较少, 椭球区域可以取得与亚太区域相近的定位性能, 这一点与 BDS-2 系统显著不同。对比图 4(a)-(b)和图 4(c)-(d), 多频观测值的引入取得的效果并不明显, 滤波完全收敛之后, 两个测站的平面定位精度上基本一致, 其中 GODN 测站的收敛时间略微缩短。

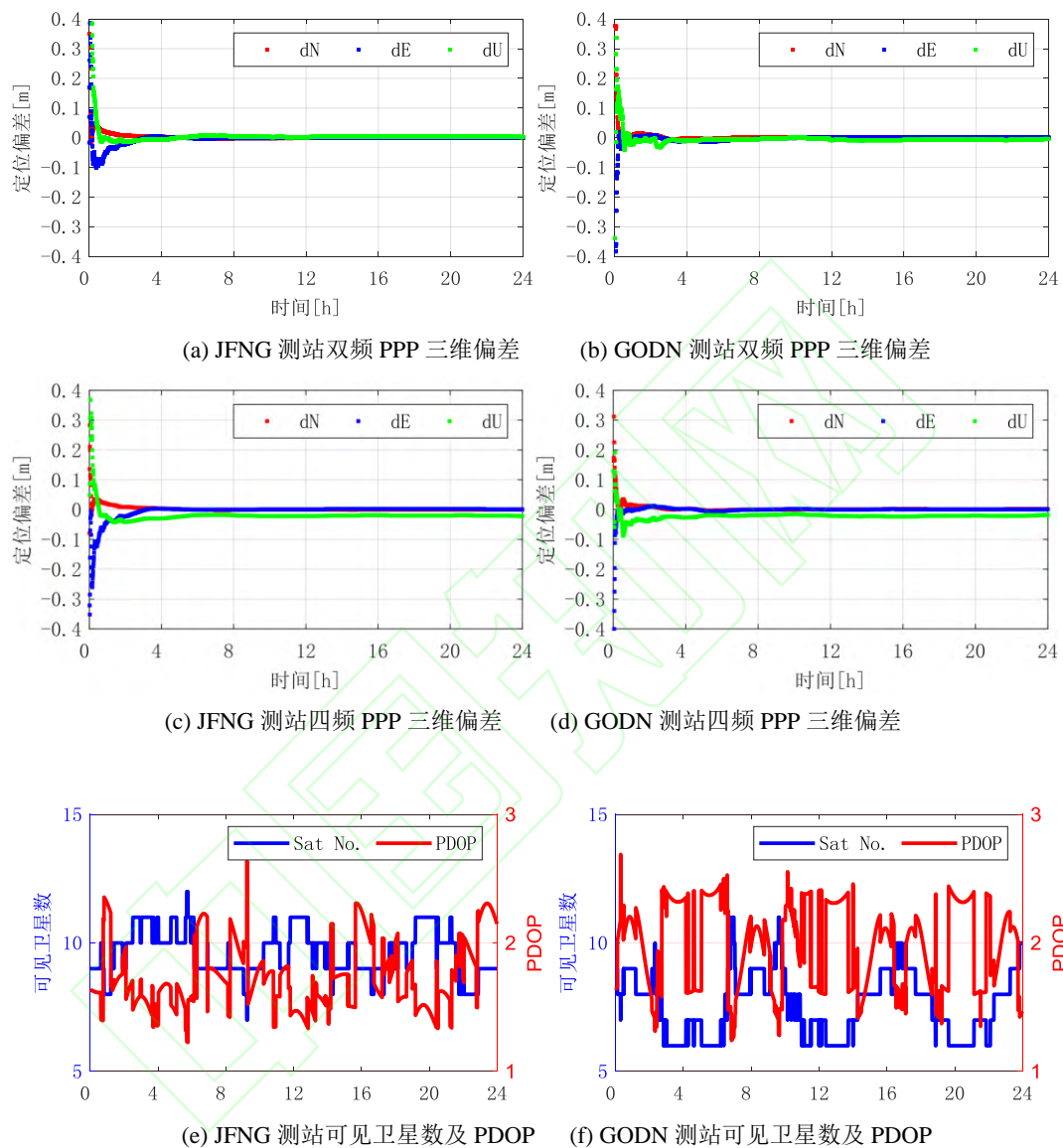


图 4 JFNG 测站和 GODN 测站 BDS-3 静态 PPP 解算结果

Fig.4 The static PPP of BDS-3 at station JFNG and GODN

为了进一步量化 BDS-3 与其余导航卫星系统静态 PPP 定位性能, 表 5 和图 5 分别给出各自单系统定位精度和收敛时间。横向对比各个分析中心产品, 可以发现: (1) WUM 和 GBM 取得的定位精度和收敛时间相当, 特别是 GPS 系统和 GLONASS 系统, 该结果与表 2 和表 3 分析结果相符; (2) 由于 SHA 的钟差间隔为 5 min, 较大的钟差内插误差导致其定位精度显著降低, 特别是收敛时间明显变慢。纵向对比各个系统, 不难发现: (1) BDS-3 静态 PPP 三维 RMS 值约为 2.31 cm~2.69 cm, 而 GPS 静态 PPP 定位精度最优, 约为 1.68 cm~2.11 cm, GLONASS 和

Galileo 结果介于两者之间；（2）BDS-3 静态 PPP 收敛时间约为 51.52 min~66.20 min，明显慢于其余导航卫星系统，而 GPS 系静态 PPP 收敛时间最短，约为 28.98 min~33.62 min；（3）当引入 BDS-3 B1C 和 B2a，四频静态 PPP 定位精度与双频静态 PPP 模型相当，意味着多频观测值对于 PPP 浮点解的作用不明显^[16]。

表 5 不同分析中心精密产品的 PPP 三维 RMS (cm)

| 方案 | WUM | GBM | IAC | COM | SHA |
|-------|------|------|------|------|------|
| G | 1.70 | 1.83 | 2.11 | 1.68 | 2.30 |
| R | 2.07 | 1.90 | 2.37 | 1.89 | 2.54 |
| E | 2.23 | 2.11 | 2.58 | 2.15 | 3.09 |
| C(双频) | 2.45 | 2.31 | 2.69 | 2.37 | 4.00 |
| C(四频) | 2.48 | 2.35 | 2.75 | 2.34 | 3.26 |

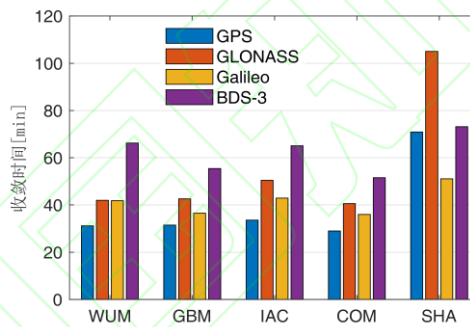


图 5 不同分析中心精密产品的 PPP 收敛时间

Fig.5 The convergence time of precise point positioning using precise products from different analysis centers

4.3 多系统融合定位性能

为了进一步研究 BDS-3 与其余 GNSS 系统融合效果，分别进行双系统和四系统静态和动态 PPP。图 6 给出了采用 GBM 产品在 2021 年 3 月 8 日 GC 和 GREC 动态 PPP 解算结果及 PDOP 值。对比图 4，双系统融合能够显著提高可见卫星数，其平均 PDOP 值从 1.74 降低为 1.17，特别是四系统观测值均可获取时，其 PDOP 值甚至小于 1，且平均可见卫星数达到 30.76 颗。测站观测几何结构强度的提升，有利于明显缩短收敛时间，GC 和 GREC 动态 PPP 收敛时间分别为 2100 s 和 1830 s。

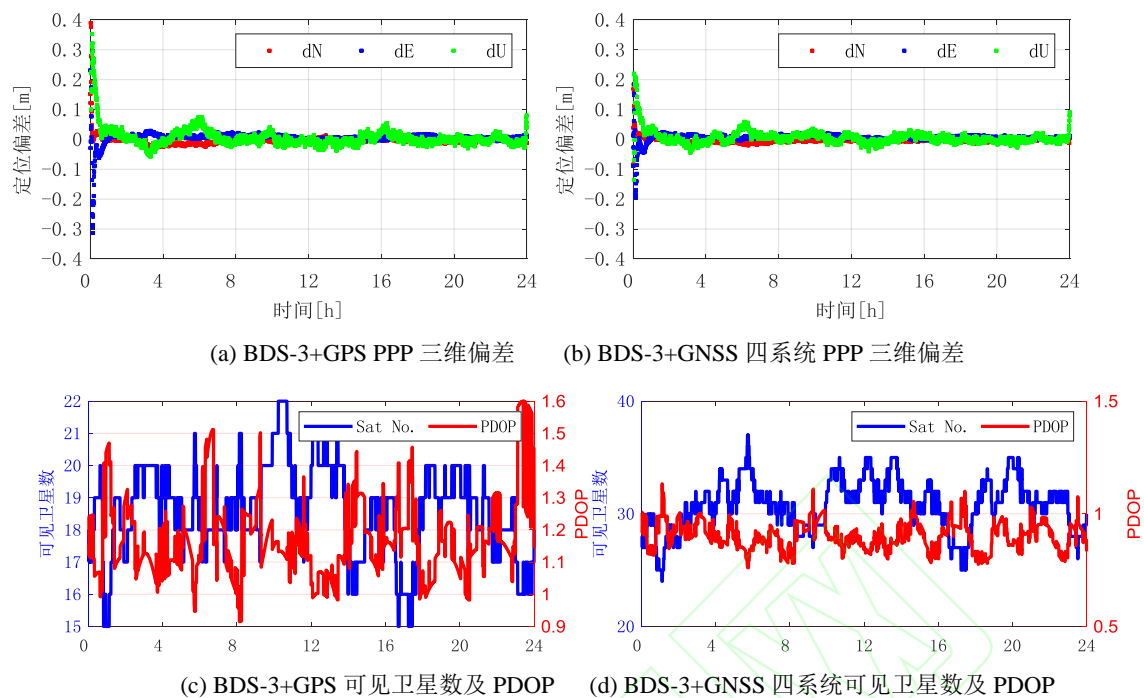


图 6 JFNG 测站双系统和四系统动态 PPP

Fig.6 The kinematic PPP at station JFNG for dual-system and quad-system

表 6 和图 7 分别给出多系统融合 PPP 定位精度和收敛时间。较大的轨道误差和钟差内插误差，导致基于 SHA 产品 PPP 的三维 RMS 值和收敛时间显著差于其余分析中心产品结果。相比 Galileo 和 GLONASS，引入 GPS 融合 BDS-3 静态 PPP 取得的定位精度最高，其中使用 COM 产品的 GC 静态 PPP 三维 RMS 值优于 1.50 cm，且使用 WUM/GBM/IAC/COM 产品的 GC 融合 PPP 收敛时间均优于 31 min；在此基础上，四系统静态 PPP 精度提升并不明显，但是其收敛时间仍然能够进一步显著缩短，五家分析中心四系统静态 PPP 收敛时间分别为 19.74 min/22.74 min/25.74 min/20.83 min/40.60 min。与静态 PPP 类似，GPS/BDS-3 融合动态 PPP 定位精度优于其余双系统组合。除 SHA 产品以外，其三维 RMS 值均优于 4.00 cm，且收敛时间均优于 41 min；在此基础上，四系统动态 PPP 精度进一步提升约为 11.45%~16.76%，收敛时间将进一步缩短至 28 min 以内。

表 6 不同分析中心精密产品的多系统融合 PPP 三维 RMS (cm)

Tab.6 3D RMS values of multi-system precise point positioning using precise products from different analysis centers

| | | (cm) | | | | |
|----|----|------|------|------|------|------|
| 方案 | | WUM | GBM | IAC | COM | SHA |
| 静态 | GC | 1.51 | 1.47 | 1.99 | 1.42 | 2.18 |
| | RC | 1.74 | 1.60 | 2.20 | 1.65 | 2.58 |
| | EC | 1.77 | 1.59 | 2.20 | 1.66 | 2.18 |

| | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|
| 动态 | GREC | 1.44 | 1.31 | 1.93 | 1.32 | 1.98 |
| | GC | 3.66 | 3.72 | 3.80 | 3.75 | 7.60 |
| | RC | 5.09 | 5.32 | 5.60 | 5.37 | 9.31 |
| | EC | 4.49 | 4.30 | 4.66 | 4.43 | 5.49 |
| | GREC | 3.21 | 3.11 | 3.45 | 3.12 | 5.16 |

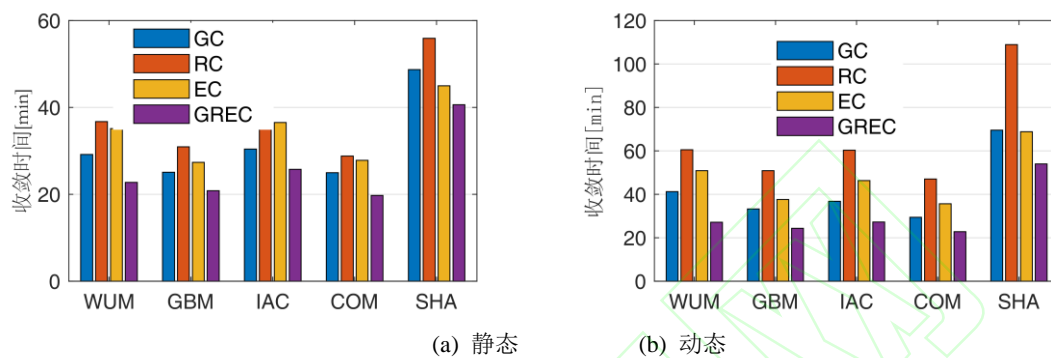


图 7 不同分析中心精密产品的多系统 PPP 收敛时间

Fig.7 The convergence time of multi-GNSS precise point positioning using precise products from different analysis centers

5 结论

基于五家 IGS 分析中心的精密轨道/钟差产品和 33 个分布均匀的 IGS MGEX 测站，详细评估了 BDS-3/GNSS 单系统和多系统非组合 PPP 定位性能，得到如下结论：

(1) WUM、GBM、IAC、COM 的 BDS-3 轨道差异的三维 RMS 值约为 10.81 cm~14.71 cm，而 SHAO 与其余分析中心的 BDS-3 轨道差异数值接近为其两倍，且五家分析中心的 BDS-3 钟差差异的 STD 值为 4.15 cm~8.48 cm；

(2) 在亚太区域，BDS-3 可以取得与 GPS 系统相似的卫星可见性，而在其余大部分区域，可见卫星数和 PDOP 值略优于 GLONASS 和 Galileo 系统；

(3) 无论是单系统还是多系统融合 PPP，BDS-3 均能够在全球区域取得较优的定位精度，四系统融合后的静态和仿动态 PPP 三维定位精度可以分别达到 1.31 cm~1.98cm 和 3.11~5.16 cm，其仿动态 PPP 收敛时间能够显著缩短至 28 min。

由于 IGS 跟踪站观测质量较好，且本文给出的动态定位结果属于仿动态，因此结果相对较优。由于模糊度固定能够增加 PPP 的可靠性和定位性能，因此在后续研究中，将进一步研究 BDS-3 PPP 模糊度固定，推进 BDS-3 早日提供更优质的 PNT 服务。

参考文献

[1] China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou Navigation Satellite System

(Version 4.0)[R]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2019.

中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0版)[R], 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.

- [2] Dow J M, Neilan R E, Rizos C. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3): 191-198.
- [3] Zhang X, Wu M, Liu W, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: New-generation navigation signals[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(10): 1225-1240.
- [4] He Y. Quality Analysis of Satellite Signal for BDS-3 Simplest System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 394-402. (何义磊. 北斗三号最简系统卫星信号质量分析[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2020, 45(3): 394-402.)
- [5] Yang Y, Yang Y, Hu X, et al. Inter-satellite link enhanced orbit determination for BeiDou-3[J]. *The Journal of Navigation*, 2020, 73(1): 115-130.
- [6] Cai H, Meng Y, Geng T, et al. Initial Results of Precise Orbit Determination Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations for BDS-3 Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1493-1500. (蔡洪亮, 孟轶男, 耿涛, 谢新. 北斗三号卫星星地星间联合精密定轨初步结果[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2020, 45(10): 1493-1500.)
- [7] Yan X, Huang G, Zhang Q, et al. Early analysis of precise orbit and clock offset determination for the satellites of the global BeiDou-3 system[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(3): 1270-1279.
- [8] Mao Y, Wang Q, Hu C, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 53-61. (毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3卫星钟差特性分析[J]. *武汉大学学报信息科学版*, 2020, 45(1): 53-61.)
- [9] Wanninger L, Beer S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 639-648.
- [10] Zumberge J, Heflin M, Jefferson D, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [11] Li B, Ge H, Shen Y. Comparison of Ionosphere-free, Uofc and Uncombined PPP Observations Models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 734-740. 李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、Uofc和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. *测绘学报*, 2015, 44(7): 734-740.
- [12] Zhang Z, Li B, Nie L, et al. Initial assessment of BeiDou-3 global navigation satellite system: signal quality, RTK and PPP[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 1-12.
- [13] Shi J, Ouyang C, Huang Y, et al. Assessment of BDS-3 global positioning service: Ephemeris, SPP,

-
- PPP, RTK, and new signal[J]. GPS Solutions, 2020, 24(3): 1-14.
- [14] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)—achievements, prospects and challenges[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(7): 1671-1697.
- [15] Teunissen P, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M]. Springer, 2017.
- [16] Li J, Yang Y, He H, et al. Benefits of BDS-3 B1C/B1I/B2a triple-frequency signals on precise positioning and ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 1-10.
- [17] Li R, Wang N, Li Z, Zhang Y, et al. Precise orbit determination of BDS-3 satellites using B1C and B2a dual-frequency measurements[J]. GPS Solutions, 2021, 25(3): 1-14.
- [18] Wang, N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3): 209-228.
- [19] Yang Y, Song L, Xu T. Robust estimator for correlated observations based on bifactor equivalent weights[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(6): 353-358.
- [20] Zhang X, Guo F, Li P, et al. Real-time Quality Control Procedure for GNSS Precise Point Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(8): 940-944.
(张小红, 郭斐, 李盼, 等. GNSS精密单点定位中的实时质量控制[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2012, 37(8): 940-944.)
- [21] Cao X, Shen F, Zhang S, et al. Satellite availability and positioning performance of uncombined precise point positioning using BeiDou-2 and BeiDou-3 multi-frequency signals[J]. Advances in Space Research, 2021, 67(4): 1303-1316.
- [22] Zhang X, Zuo X, Li P, et al. Convergence Time and Positioning Accuracy Comparison between BDS and GPS Precise Point Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256.
(张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256.)
- [23] Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(6): 1069-1073.
- [24] Wu J, Wu S, Hajj G, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[C]. Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference, San Diego, USA, 1992, 19-22 August, 1647-1660.
- [25] Rebischung P, Schmid R. (2016). IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products[C]. AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2016, 12-16 December.
- [26] Petit G, Luzum B. IERS conventions (2010)[R]. IERS Technical Note No. 36, IERS Convention Centre, 2010. <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>

BDS-3/GNSS uncombined precise point positioning

Cao Xinyun^{1,2,3} *Shen Fei*^{1,2,3} *Li Jiancheng*⁴ *Zhang Shoujian*⁴

1 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing, 210023, China

2 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing, 210023, China

3 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application,
Nanjing, 210023, China

4 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan, 430079, China

Abstract: The global constellation networking of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) has been completed, which means that the BDS-3 has entered a new era of providing high-quality positioning, navigation and timing service for global users. To comprehensively compare the performance of BDS-3 uncombined precise point positioning (PPP) with other global navigation satellite systems (GNSS), three aspects are focused: the consistency of BDS-3 precise orbit and clock products among different analysis centers, the satellite availability of BDS-3/GNSS, the positioning performance of BDS-3/GNSS single-system and multi-system PPP. Based on the precise orbit and clock products from five analysis centers, the three-dimensional root mean square error of BDS-3 static PPP is about 2.31 cm~4.00 cm, and its convergence time is significantly slower than that of other GNSS. The introduction of GPS observations can achieve the most obvious improvement among BDS-3/GNSS dual-system joint PPP. Besides, the quad-constellation observations can effectively shorten the convergence time of PPP and improve the positioning accuracy on kinematic mode.

Key words: BeiDou-3 Navigation Satellite System; global navigation satellite system; satellite availability; uncombined precise point positioning

Foundation support: National Natural Science Foundation of China (41904018, 42077003); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20190714, BK20201374); High-level Innovation and Entrepreneurship Talent Plan of Jiangsu Province; Key Laboratory of Surveying and Mapping Science and Geospatial Information Technology, Ministry of Natural Resource (2020-1-5).

First Author: CAO Xinyun, PhD, lecturer, specializes in GNSS high-precision positioning and its geoscience applications. E-mail: xyciao@njnu.edu.cn

Corresponding author: SHEN Fei, PhD, associate professor, specializes in satellite positioning and its geoscience applications. E-mail: shen.f@njnu.edu.cn

网络首发:

标题: BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位

作者: 曹新运, 沈飞, 李建成, 张守建

收稿日期: 2021-04-14

DOI:10.13203/j.whugis20210198

引用格式:

曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210198 (Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20210198)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估

宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200686

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=WHCH20210611000>

一种北斗非差非组合长距离基准站模糊度解算方法

李博, 程鹏飞, 秘金钟, 等.

武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200555

<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=WHCH20210506001>