



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: GPS/BDS-3 卫星姿态产品评估及对精密数据处理的影响  
作者: 耿涛, 赵普, 谢新, 程凌岳  
DOI: 10.13203/j.whugis20240155  
收稿日期: 2024-06-07  
网络首发日期: 2024-07-17  
引用格式: 耿涛, 赵普, 谢新, 程凌岳. GPS/BDS-3 卫星姿态产品评估及对精密数据处理的影响[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240155>



**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.whugis20240155

### 引用格式：

耿涛, 赵普, 谢新, 等. GPS/BDS-3 卫星姿态产品评估及对精密数据处理的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240155 (GENG Tao, ZHAO Pu, XIE Xin, et al. Evaluation of GPS/BDS-3 Satellite Attitude Products and Impact on Precise Data Processing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240155)

## GPS/BDS-3 卫星姿态产品评估及对精密数据处理的影响

耿涛<sup>1</sup> 赵普<sup>1</sup> 谢新<sup>1</sup> 程凌岳<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

<sup>2</sup> 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079

**摘要：**卫星姿态对全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)精密数据处理具有重要影响, 国际卫星导航服务组织(international GNSS service, IGS)分析中心使用ORBEX(ORBit EXchange)格式以四元数形式发布卫星姿态产品。评估了2023年全年四家IGS MGEX(multi-GNSS experiment)分析中心的GPS/BDS-3卫星姿态产品, 重点分析了偏航机动时期各分析中心的姿态差异, 并研究了姿态产品对精密数据处理的影响。评估武汉大学(Wuhan university, WUM)、欧洲定轨中心(center for orbit determination in Europe, COD)、德国地学中心(GeoForschungsZentrum, GFZ)和法国国家空间研究中心(centre national d'études spatiales, CNES)姿态产品发现: 在卫星偏航机动时期, 不同分析中心使用了不同姿态模型, 其中GFZ产品与其他分析中心差异较大, 偏航角差异可达180°, 且存在偏航角跳变等现象; 除GPS Block IIF卫星外, WUM与COD产品较为一致。与名义姿态相比, 姿态产品可以显著改善GPS/BDS-3卫星钟差的连续性, 当四元数姿态与名义姿态偏转方向相反时, 钟差二次差序列标准差下降85%。用户需要使用与服务端轨道钟差配套的卫星姿态产品, 不一致的姿态会影响卫星天线相位中心和相位缠绕改正; 与名义姿态相比, 姿态产品使东、北、高方向的动态精密单点定位精度分别提升了31%、20%、28%。

**关键词：**北斗三号; 卫星偏航姿态; 姿态四元数; 卫星钟差估计; 精密单点定位

## Evaluation of GPS/BDS-3 Satellite Attitude Products and Impact on Precise Data Processing

GENG Tao<sup>1</sup> ZHAO Pu<sup>1</sup> XIE Xin<sup>1</sup> CHENG Lingyue<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** Satellite attitudes have a significant impact on GNSS (global navigation satellite system) precise data processing. IGS (international GNSS service) analysis centers (ACs) have been publishing satellite attitude products in quaternion form using the ORBEX (ORBit EXchange) format. **Methods:** The GPS/BDS-3 satellite attitude products from 4 MGEX (multi-GNSS experiment) ACs spanning the year of 2023 are collected. Based on satellite attitude quaternions, the yaw angles of GPS/BDS-3 satellites were computed and compared using

收稿日期: 2024-06-07

项目资助: 广东省重点领域研发计划资助(2023B1111050013); 国家自然科学基金(42204028; 42374030); 中国科协青年人才托举工程(2022ONRC001); 武汉市知识创新专项(2023010201010075)

第一作者: 耿涛, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星导航数据处理理论与方法。gt\_gengtiao@whu.edu.cn

通讯作者: 谢新, 博士, 副研究员。xiexin@whu.edu.cn

corresponding conversion formulas. The differences of yaw angles during the satellite yaw maneuvers were emphatically compared and analyzed. Then, the GPS/BDS-3 precise satellite clock estimation and precise point positioning were conducted using 122 global MGEX tracking stations, the impact of satellite yaw attitude on GPS/BDS-3 precise data processing was investigated by comparing the results using different attitude products.

**Results:** Comparing the quaternion yaw angles from WUM (Wuhan university), GFZ (GeoForschungsZentrum), COD (center for orbit determination in Europe) and CNES (centre national d'études spatiales), we can find that different attitude models are adopted by different ACs during yaw maneuvers. The model adopted by GFZ differs significantly from others', and the yaw angle differences can be up to  $180^\circ$  while abnormal jumps are observed. Except for GPS IIF satellites, the models adopted by WUM and COD are consistent in general. Compared with the nominal attitudes, attitude products can significantly improve the continuity of the GPS/BDS-3 satellite clock estimation and can reduce the standard deviation of the clock quadratic-differences by 85% when opposite yaw directions between the quaternion and nominal attitudes are observed. Kinematic precise point positioning (PPP) experiments show that inconsistent attitude models can cause positioning deviations by affecting the satellite antenna phase center offset and phase wind-up corrections. The attitude products can achieve 31%, 20%, and 28% accuracy improvements for the east, north, and up components, respectively, compared with the nominal attitudes.

**Conclusions:** We recommend that users need to use satellite attitude products matching the corresponding orbit and clock products for GNSS precise data processing.

**Key words:** BDS-3; Satellite attitude; Attitude quaternion; Satellite clock estimation; Precise point positioning

全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 卫星姿态明确了星固系在空间中的指向, 通常遵循名义姿态, 星固系 Z 轴沿卫星天线方向指向地心, Y 轴与太阳能帆板的旋转轴平行, X 轴与 Y 轴、Z 轴构成右手坐标系并指向或背离太阳光入射方向<sup>[1]</sup>。国际卫星导航服务组织 (international GNSS service, IGS) 各分析中心由于使用太阳位置算法不完全相同, 导致名义姿态会存在微小差异<sup>[2]</sup>。当太阳-卫星连线与卫星轨道平面的夹角较小时, 在近日点和远日点附近, GNSS 卫星由于硬件限制或地影遮挡而无法维持名义姿态, 发生偏航机动, 此时各分析中心可能会采用不同模型描述卫星姿态<sup>[3]</sup>。分析中心的卫星姿态差异会影响卫星天线相位中心 (phase center offset, PCO)、相位缠绕等误差改正, 进而导致不同分析中心轨道与钟差产品的差异<sup>[4]</sup>。因此, 为了获得高精度的 GNSS 数据处理结果, 需要保证用户端与服务端卫星姿态信息的一致性, 然而, 大多数用户往往难以获取服务端所使用的卫星姿态信息。为此, IGS PPP-AR (precise point positioning with ambiguity resolution) 工作组推荐使用 ORBEX (ORBit EXchange) 格式, 以四元数形式发布卫星姿态产品<sup>[2]</sup>。截至 2024 年 4 月, 已有武汉大学 (Wuhan university, WUM)、欧洲定轨中心 (center for orbit determination in Europe, COD)、德国地学研究中心 (GeoForschungsZentrum, GFZ) 和法国国家空间研究中心 (centre national d'études spatiales, CNES) 共四家 IGS MGEX (multi-GNSS experiment) 分析中心日常发布多 GNSS 系统的卫星姿态产品。

鉴于卫星姿态对 GNSS 精密数据处理的重要性, 国内外学者对地影期间 GNSS 卫星姿态进行了大量的建模研究, 提出了多种导航卫星姿态模型<sup>[5-9]</sup>。然而, 当前导航卫星类型众多, 不同类型卫星往往采用不同的姿态控制模式, 不同分析中心针对每类卫星所使用的姿态模型也不尽相同, 对姿态产品的分析评估有助于明确分析中心所用的姿态模型, 为分析中心模型优化和用户端精密数据处理提供建议。近年来, 国内外已有学者对卫星姿态产品进行了评估, 并研究了其对精密数据处理的影响。文献[2]评估了 IGS 第三次重处理中各分析中心提供的 2014 年全年四元数姿态产品, 结果表明不同分析中心对 GPS 和 GLONASS 卫星采用了不同的偏航机动姿态模型, 由于欧洲卫星导航系统管理中心已经发布了 Galileo 卫

星偏航机动模型<sup>[10]</sup>，各分析中心基于该模型所提供的 Galileo 卫星姿态产品一致性较好，但该研究未涉及 BDS 卫星和目前在轨的 GPS Block IIIA 卫星。文献[11]阐述了 CNES 对 GPS/Galileo/GLONASS 卫星的偏航机动姿态建模策略，但该研究仅涉及单一分析中心产品，未进行不同姿态产品的分析。文献[12]评估了不同分析中心发布的 BDS 卫星姿态产品，但评估时长较短，且仅比较了其卫星姿态的差异性，并未指出这些分析中心采用何种卫星姿态模型。卫星姿态对精密单点定位（precise point positioning, PPP）、卫星钟差估计、卫星钟差综合等精密数据处理具有显著影响。文献[2]研究表明，与名义姿态相比，姿态产品可使东方向和高程方向动态 PPP 误差减小约 50%。文献[11]研究表明，姿态产品对卫星相位缠绕误差改正具有高达 1 周的影响，可使卫星钟差精度提升约 70%。文献[13]就卫星姿态对 PPP 模糊度固定的影响展开了研究，与名义姿态相比，姿态产品可显著改善窄巷模糊度残差分布及定位精度。文献[14]研究表明，卫星姿态与卫星钟差相互耦合，使用姿态产品后，地影期间 GPS 精密钟差产品综合残差减小幅度可达 80%。

2020 年建成的 BDS-3 系统空间部分包括地球静止轨道（geostationary earth orbit, GEO）卫星、倾斜同步轨道（inclined geosynchronous orbit, IGSO）卫星和中圆地球轨道（medium earth orbit, MEO）卫星，由中国空间技术研究院（China academy of space technology, CAST）和上海微小卫星工程中心（Shanghai engineering center of microsatellites, SECM）两家厂商制造，不同厂商不同轨道类型的卫星偏航机动机制不同，不同分析中心可能采用了不同的姿态建模策略<sup>[15-18]</sup>，其对精密数据处理的影响仍有待深入研究。此外，对于近几年投入使用的 Block IIIA 卫星，其偏航机制尚不明确，当前缺少各分析中心所用姿态模型的研究。因此，本文首先给出基于四元数的卫星姿态表示与评估方法，随后对 2023 年全年 IGS 不同分析中心的 GPS/BDS-3 姿态产品进行评估，重点分析偏航机动时期各分析中心的姿态模型，最后利用卫星钟差估计和动态 PPP 实验研究姿态产品对精密数据处理的影响。

## 1 卫星姿态与偏航角

### 1.1 名义姿态与偏航角

名义姿态下，卫星星固系三轴单位向量 ( $e_x$   $e_y$   $e_z$ ) 由下式确定：

$$\begin{cases} e_z = -\frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \\ e_y = \frac{\mathbf{e}_\odot \times \mathbf{r}}{|\mathbf{e}_\odot \times \mathbf{r}|} \\ e_x = e_y \times e_z \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{e}_\odot$  是卫星指向太阳的单位向量， $\mathbf{r}$  是地心指向卫星的单位向量。

GNSS 卫星的 Z 轴始终沿天线指向地心，因此卫星姿态可仅由星固系相对于轨道坐标系的偏航角来描述。名义偏航角  $\varphi_n$  由下式计算：

$$\varphi_n = \arctan 2(-\tan \beta, \sin \mu) \quad (2)$$

式中， $\beta$  为太阳-地球连线与卫星轨道面的夹角； $\mu$  为轨道角，其起算点为远日点。

## 1.2 四元数姿态与偏航角

卫星姿态四元数提供了从卫星星固系到地心地固系的转换信息，本质上是对坐标轴旋转的表达<sup>[19]</sup>。假设有四元数 $\mathbf{q}_{\theta,\mathbf{u}}$ ，其表示方式如下：

$$\mathbf{q}_{\theta,\mathbf{u}} = (q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3) = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \mathbf{u}\right) \quad (3)$$

式中， $q_0 = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$  是四元数标量部分， $(q_1 \quad q_2 \quad q_3) = -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \mathbf{u}$  是四元数向量部分，该四元数表达了以单位向量 $\mathbf{u}$ 为轴、角度为 $\theta$ 的旋转。星固系三轴单位向量的计算方式如下<sup>[20]</sup>：

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_x &= \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) \end{bmatrix} \\ \mathbf{e}_y &= \begin{bmatrix} 2(q_1q_2 + q_0q_3) \\ q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 \\ 2(q_2q_3 - q_0q_1) \end{bmatrix} \\ \mathbf{e}_z &= \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

四元数偏航角 $\varphi_q$ 可由下式计算得到<sup>[11]</sup>：

$$\begin{aligned} \varphi_q &= \arccos(\mathbf{e}_T \times \mathbf{e}_x) \cdot \text{SIGN} \\ \text{SIGN} &= \begin{cases} -1 & \arccos(\mathbf{e}_N \cdot \mathbf{e}_x) \leq 90^\circ \\ 1 & \arccos(\mathbf{e}_N \cdot \mathbf{e}_x) > 90^\circ \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\mathbf{e}_T$ 、 $\mathbf{e}_N$ 分别为卫星轨道坐标系的切向、法向单位向量， $\text{SIGN}$ 为与 $\mathbf{e}_x$ 和 $\mathbf{e}_N$ 相关的符号判断函数。

上述四元数偏航角的计算需要卫星轨道信息，在本文全年评估中，使用以下更便捷的方式进行四元数姿态比较。假设来自两个分析中心、描述同一时刻同一卫星姿态的四元数 $\mathbf{q}_{\theta_1,\mathbf{u}_1}$ 与 $\mathbf{q}_{\theta_2,\mathbf{u}_2}$ ，可通过下式求解两组四元数表示的偏航角差值<sup>[2]</sup>：

$$\mathbf{q}_{\theta_1,\mathbf{u}_1} * \bar{\mathbf{q}}_{\theta_2,\mathbf{u}_2} = \mathbf{q}_{\theta_d,\mathbf{u}_d} = \left(\cos\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \quad -\sin\left(\frac{\theta_d}{2}\right) \cdot \mathbf{u}_d\right) \quad (6)$$

式中， $*$ 为四元数乘法运算； $\bar{\mathbf{q}}_{\theta_2,\mathbf{u}_2}$ 为 $\mathbf{q}_{\theta_2,\mathbf{u}_2}$ 的共轭四元数，表示 $\mathbf{q}_{\theta_2,\mathbf{u}_2}$ 的同角度反向旋转； $\mathbf{q}_{\theta_d,\mathbf{u}_d}$ 表达了 $\mathbf{q}_{\theta_1,\mathbf{u}_1}$ 与 $\bar{\mathbf{q}}_{\theta_2,\mathbf{u}_2}$ 两次旋转的叠加。由于不同产品四元数姿态的Z轴指向地心且保持一致，旋转轴 $\mathbf{u}_d$ 与Z轴平行，旋转角 $\theta_d$ 即为 $\mathbf{q}_{\theta_1,\mathbf{u}_1}$ 与 $\mathbf{q}_{\theta_2,\mathbf{u}_2}$ 偏航角差值的绝对值。当 $\mathbf{u}_d$ 与Z轴正向 $(0 \ 0 \ 1)^T$ 同向时，偏航角差值为 $\theta_d$ ；反之，偏航角差值为 $-\theta_d$ 。

## 2 卫星姿态产品评估

WUM、COD、GFZ和CNES四家分析中心的卫星姿态产品信息见表1。四种产品均包含GPS卫星；除CNES外，其他三种产品均包含BDS-3卫星。本文首先计算并评估2023年全年各分析中心产品的偏航角差异，随后分析偏航机动时期各产品的偏航角变化规律。

根据分析中心发布的数据处理策略 (<https://files.igs.org/pub/center/analysis/>) 和公开发表的文献，可初步了解各个分析中心在精密数据处理中所采用的卫星偏航姿态模型。对于GPS卫星，各分析中心均宣称使用文献[6]中模型，但对于后续发现的GPS IIF卫星实际姿



态相较于名义姿态逆向偏航现象及相应的模型[8]是否被应用在分析中心的数据处理中仍有待研究，且分析中心实际使用的模型与其发布的数据处理策略中简单描述的参考模型也可能不完全相符。此外，当前各分析中心也未公布所使用的 GPS IIIA 卫星姿态模型。对于 BDS-3 卫星，多种偏航姿态模型<sup>[15-18, 21]</sup>被提出，且有研究表明 BDS-3 CAST 和 SECM 卫星的偏航姿控规律不一致，各分析中心具体使用哪种模型尚不明确，有待进一步的全面评估。

表 1 IGS MGEX 分析中心的姿态产品

Tab.1 Attitude Quaternion Products Provided by IGS MGEX Analysis Centers

分析中心	采样间隔/s	系统
COD	30	GRECJ
GFZ	30	GRECJ
CNES	30	GRE
WUM	30	GRECJ

注：G、R、E、C、J 分别表示 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 和 QZSS 系统

## 2.1 GPS 卫星姿态产品

考虑到 COD 分析中心卫星姿态产品的数据完整性较好，本文以其作为参考，分别选用 G13、G08 和 G04 作为 GPS Block IIR、Block IIF 和 Block IIIA 的代表卫星，采用式 (6) 计算 CNES、WUM 和 GFZ 产品相对于 COD 产品的偏航角差值，并描绘出  $\beta$  角随时间的变化，结果如图 1 所示，灰色阴影为  $|\beta| < 10^\circ$  的时段（以下统称为“地影期”），期间卫星会经历偏航机动。在地影期外，卫星遵循名义姿态，各产品偏航角差值小于  $0.1^\circ$ ；而在地影期内，不同产品的偏航角出现了与卫星类型相关的差异，细节如图 1 右列所示。对于 Block IIR 卫星，除 GFZ 产品外，其他产品与 COD 产品的一致性较好。对于 Block IIF 卫星，CNES、GFZ、WUM 产品与 COD 产品的偏航角差异显著，偏航角差值可达  $180^\circ$ 。对于 Block IIIA 卫星，CNES 和 GFZ 产品均与 COD 产品有明显差异，其中 GFZ 与 COD 产品的偏航角差值可达  $180^\circ$ ；而 WUM 与 COD 产品一致性较好。

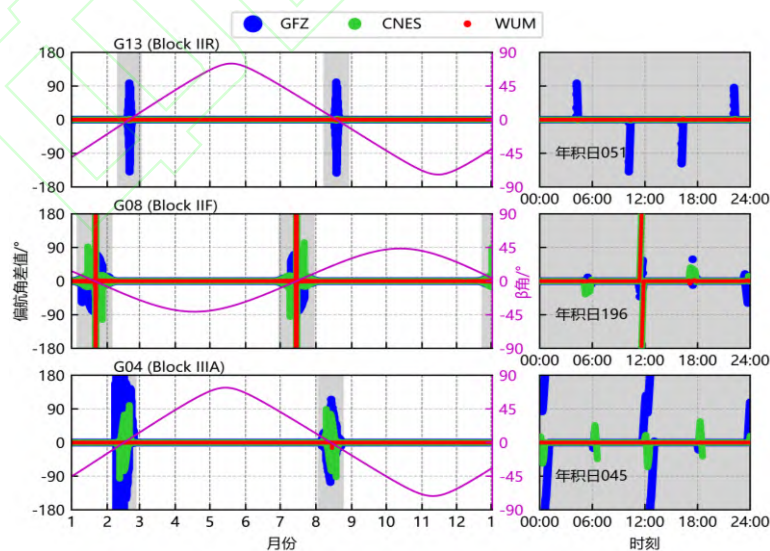


图 1 2023 年 MGEX 分析中心 GPS 卫星姿态产品偏航角差值

Fig.1 Attitude Differences between MGEX Analysis Centers in 2023 for GPS Satellites

为进一步分析偏航机动时期的 GPS 卫星姿态产品，使用式 (5) 计算四元数偏航角，并与式 (2) 得到的名义偏航角进行对比，如图 2 所示，其中左列为正午机动，右列为午夜机动，阴影表示地影时期。对于 Block IIR 卫星 G13，由于未受到地影影响，正午机动和午夜机动偏航规律相同<sup>[6]</sup>。COD、CNES 和 WUM 姿态产品表明：卫星偏航机动均开始于近日点 ( $\mu = 180^\circ$ ) 或远日点 ( $\mu = 0^\circ$ ) 前，随后以硬件最大速率匀速偏航，直至四元数偏航角与名义偏航角相等，这一规律与文献[6]中模型一致；而 GFZ 则使用了名义姿态。对于 Block IIF 卫星 G08，午夜机动持续了整个地影时期，COD、GFZ 和 WUM 的姿态行为较为接近，均表现为近匀速偏航，其中 GFZ 姿态在午夜点附近有轻微抖动；与其他产品相比，CNES 开始午夜机动的时刻较晚，首先以低角速率匀速偏航，随后以较高角速率偏航直至退出地影。正午机动期间，COD、CNES 和 WUM 对 Block IIF 卫星使用以硬件最大速率匀速偏航至机动结束的策略，其中 CNES 偏航角发生了跳变，可能是不恰当的建模所致<sup>[11]</sup>，GFZ 则采用了先匀速偏航到约 $100^\circ$ 偏航角再跳变到 $180^\circ$ 的建模策略。对于 Block IIIA 卫星 G04，COD 和 WUM 使用的偏航模式与 Block IIR 卫星相似，这与文献[22]一致；CNES 则使用了与 Block IIF 卫星相似的偏航模式。对于 GFZ 姿态，在正午机动期间，卫星以均匀角速率偏航直至四元数偏航角与名义偏航角相等；在午夜机动期间，卫星机动时间比其他产品更长，偏航角变化范围更大。

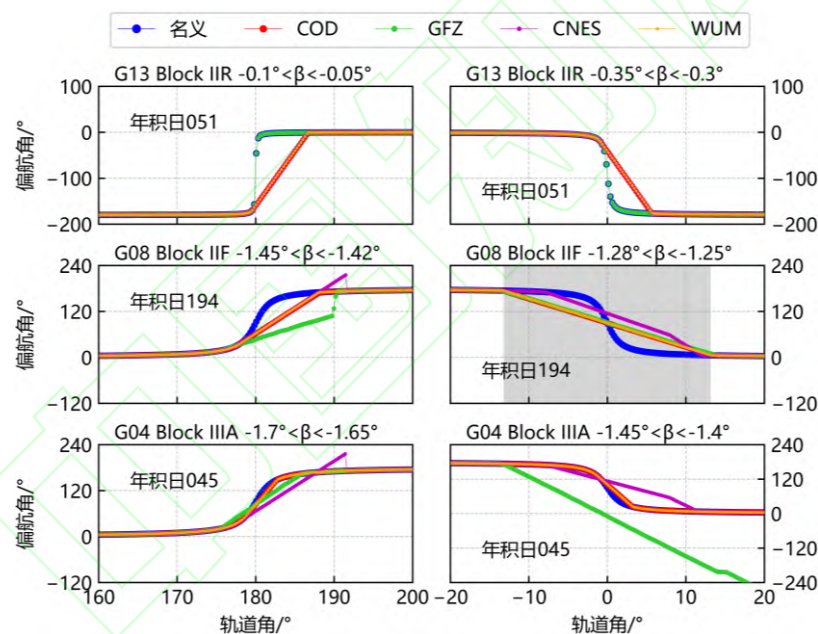


图 2 偏航机动时期 GPS 卫星名义偏航角与四元数偏航角

Fig.2 Nominal and Quaternion Yaw Angles for GPS Satellites in Yaw Maneuvers

根据欧洲航天局 ESA、美国喷气推进实验室 JPL 等机构学者的研究，GPS Block IIF 卫星正午机动在零  $\beta$  角附近其真实姿态会出现逆向偏航的现象，因而需要在姿态模型中引入  $\beta$  角偏差<sup>[7-8,23]</sup>，在上述不同的研究文献中， $-0.9^\circ$ 、 $-0.5^\circ$ 、 $-0.7^\circ$  等不同的  $\beta$  角偏差经验值被建议，而 MGEX 各分析中心在数据处理中是否引入了  $\beta$  角偏差以及采用何种经验值尚不明确。因此，图 3 展示了  $\beta$  角约  $-0.8^\circ \sim 0^\circ$  期间 G08 (Block IIF) 卫星正午机动的名义偏航角与各分析中心四元数偏航角。可以看出，对于 GPS Block IIF，COD 和 GFZ 分析中心并未引入  $\beta$  角偏差，在  $\beta$  角约  $-0.8^\circ \sim 0^\circ$  期间其偏航方向与名义姿态相同，与图 2 中的 G08 卫星结果较为一致，其中 GFZ 偏航角在近日点和远日点附近发生了抖动和跳变。从图 3 左右两幅子

图的对比可以看出，CNES 和 WUM 分析中心在 GPS Block IIF 的姿态模型中引入了经验偏差  $\beta_{bias}$ ，但右图中当  $\beta$  角小于  $-0.75^\circ$  时，仅 WUM 姿态产品出现相较于名义姿态的逆向偏航，这是由于两家分析中心的态度模型中  $\beta_{bias}$  取值不同，WUM 很有可能采用文献[7]中  $-0.9^\circ$  的取值，而 CNES 可能采用文献[23]中  $-0.5^\circ$  或文献[8]中  $-0.7^\circ$  的取值。

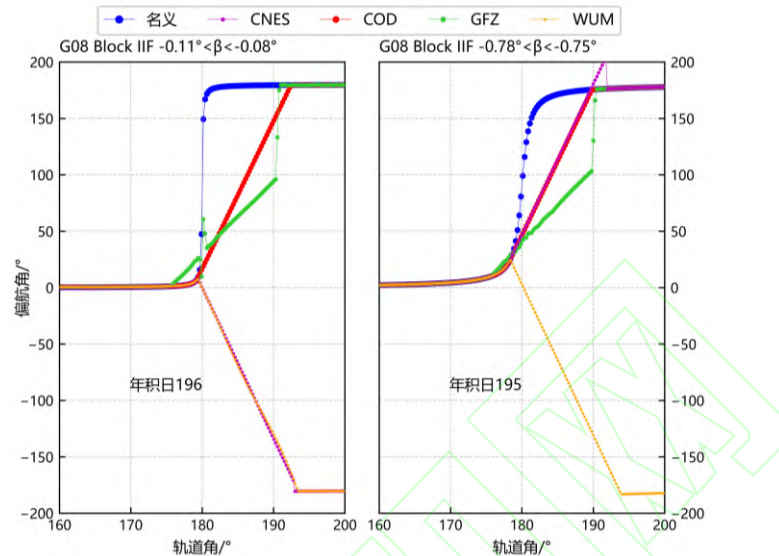


图 3 小  $\beta$  角正午机动期间 G08 (Block IIF) 卫星名义偏航角与四元数偏航角

Fig.3 Nominal and Quaternion Yaw Angles for G08 Satellites in the Noon Maneuver during small negative  $\beta$  angles

## 2.2 BDS-3 卫星姿态产品

根据轨道类型和生产厂家的不同，BDS-3 卫星可以分为 4 类：GEO 卫星、CAST 的 IGSO 卫星 (CAST IGSO) 和 MEO 卫星 (CAST MEO)、SECM 的 MEO 卫星 (SECM MEO)。北斗 GEO 卫星采用零偏姿态控制模式，偏航角始终为 0，因此本文不涉及 BDS-3 GEO 卫星，选取 C27、C32 和 C40 分别作为 SECM MEO、CAST MEO 和 CAST IGSO 的代表卫星，WUM 和 GFZ 产品相对于 COD 产品的偏航角差值如图 4 所示。在地影期外，3 种四元数偏航角的一致性较好。在地影期内，对于 SECM MEO 卫星，3 种四元数偏航角的差异较小，GFZ、WUM 相对于 COD 偏航角的最大差值分别为  $12^\circ$  和  $6^\circ$ ，且出现在  $\beta = 0^\circ$  附近；对于 CAST MEO 卫星，WUM 与 COD 偏航角差异较小，但 GFZ 与 COD 偏航角差异显著，差值可达  $180^\circ$ ；对于 CAST IGSO 卫星，WUM 和 COD 偏航角一致性较好，差值最大约为  $7^\circ$ ，但当  $|\beta| < 3^\circ$  时 GFZ 与 COD 偏航角差异显著。



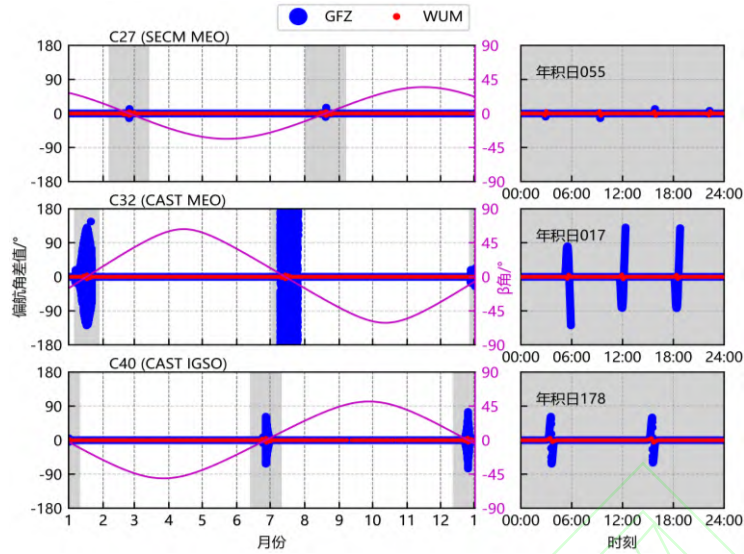


图 4 2023 年 MGEX 分析中心 BDS-3 卫星姿态产品偏航角差值

Fig.4 Attitude Differences between MGEX Analysis Centers in 2023 for BDS-3 Satellites

BDS-3 IGSO 和 MEO 卫星均采用机动偏航控制模式，在 $\beta$ 角小于 $3^\circ$ 时发生正午/午夜机动<sup>[21]</sup>。图 5 展示了偏航机动时期 BDS-3 卫星的四元数偏航角和名义偏航角，其中左列为正午机动，右列为午夜机动，可以看出，COD 与 WUM 对三类卫星均采用了相似的姿态模型，偏航角呈现出与时间相关的余弦函数特征，两者差值最大约为 $6^\circ$ ，且卫星在 $\mu$ 角处于约 $[-6^\circ\sim 6^\circ]$ 或 $[174^\circ\sim 186^\circ]$ 范围时进行偏航机动，偏转角度为 $180^\circ$ 。对于 SECM MEO 卫星 C27，GFZ 与 COD、WUM 偏航角一致性较好，但在近日点和远日点附近发生了偏航角跳变。对于 CAST MEO 卫星 C32，GFZ 偏航角也表现出余弦函数特征，但偏转时间更长，在机动末期有约 $150^\circ$ 的跳变，这说明 GFZ 采用的姿态模型与 COD、WUM 一致，可能采取了在 $\mu$ 角处于约 $[-10^\circ\sim 10^\circ]$ 或 $[170^\circ\sim 190^\circ]$ 范围时进行偏航机动的策略。对于 CAST IGSO 卫星 C40，GFZ 则采用了名义姿态。

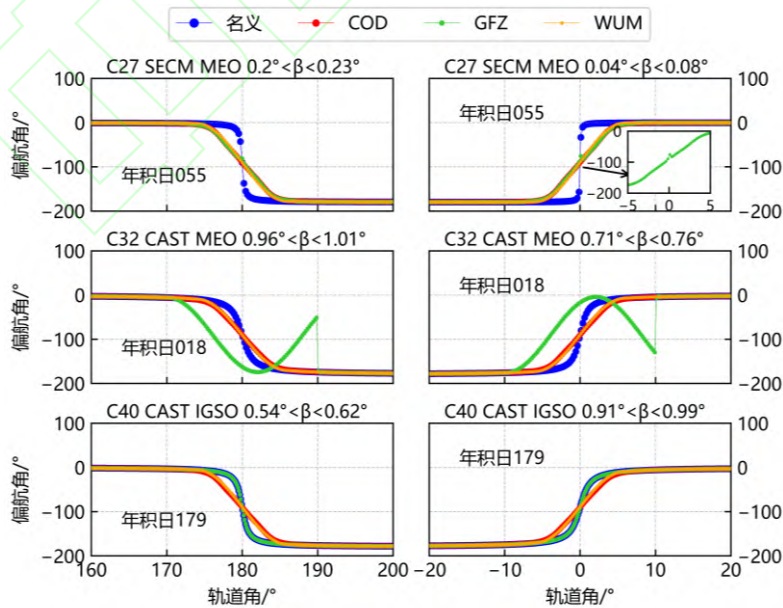


图 5 偏航机动时期 BDS-3 卫星名义偏航角与四元数偏航角

Fig.5 Nominal and Quaternion Yaw Angles for BDS-3 Satellites in Yaw Maneuvers

### 3 卫星姿态产品对精密数据处理的影响

#### 3.1 数据及处理策略

基于图 6 中全球均匀分布的 122 个 MGEX 测站观测数据，进行地影期间 GPS/BDS-3 卫星钟差估计和动态 PPP 实验，数据采样间隔为 30s，处理策略如表 2 所示。

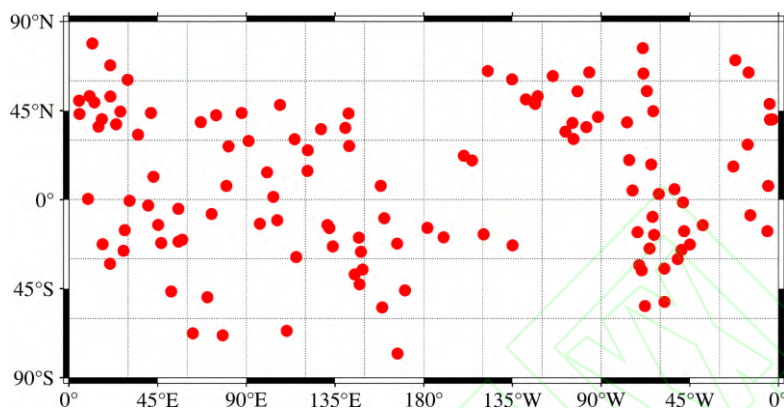


图 6 实验用 MGEX 测站分布

Fig.6 Distribution of MGEX Stations Used in the Experiment

表 2 卫星钟差估计和精密单点定位实验处理策略

Tab.2 Processing Strategies of Satellite Clock Estimation and Precise Point Positioning

项目	处理策略
测站坐标	钟差估计：固定为 IGS 周解坐标
卫星钟差	PPP：白噪声估计 钟差估计：白噪声
卫星姿态	PPP：固定为 WUM 精密钟差产品
截止高度角	名义姿态/四元数姿态产品
PCO/PCV	7°
观测值类型	igs20.atx
对流层	双频非差无电离层组合 干分量：Saastamoinen 模型 <sup>[24]</sup>
接收机钟差	投影函数：VMF1 <sup>[25]</sup> ；残余湿分量：分段常数 白噪声，估计 1 个接收机钟差和系统间偏差
卫星相位缠绕	采用模型改正 <sup>[26]</sup>
模糊度	常数，浮点解

#### 3.2 卫星钟差估计实验

为研究姿态产品对卫星精密钟差估计的影响，分别采用名义姿态和 WUM 四元数姿态产品计算卫星钟差，并与 WUM 最终精密钟差进行比较。图 7 展示了 2023 年第 196 天 G08 和 C21 卫星的钟差二次差时间序列，并给出了偏航角与 $\beta$ 角的变化情况，图中灰色阴影表示卫星机动时段。

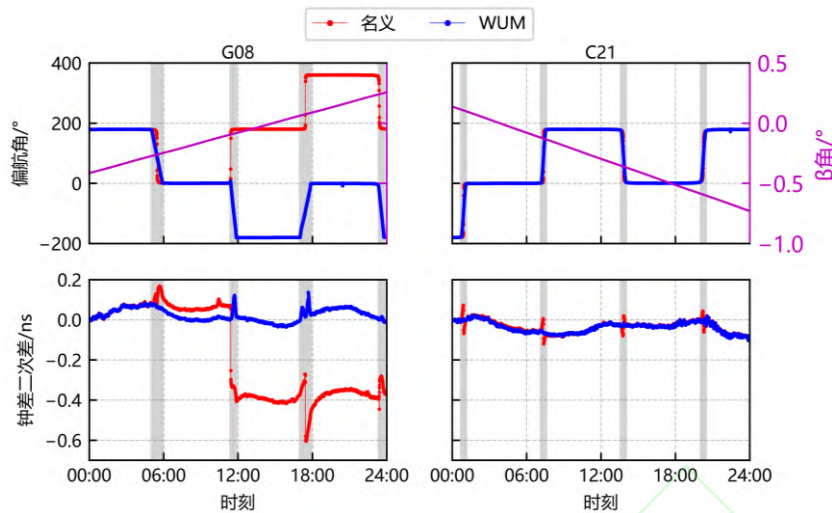


图 7 2023 年第 196 天卫星偏航角与钟差二次差时间序列

Fig.7 Time Series of the Yaw Angles and Clock Differences on DOY 196, 2023

由图 7 可知，在 G08 卫星经过第一次偏航机动之前，两种姿态得到的钟差二次差序列无明显区别；但经每次偏航机动，基于名义姿态的二次差序列出现了明显偏差，这是因为卫星钟差会吸收姿态模型误差造成的卫星 PCO 和相位缠绕改正误差。当 G08 卫星经过第二次偏航机动时，相比于 WUM 姿态，名义姿态发生了反方向的偏转，造成了 $360^\circ$ 的偏航角差异和一周的相位缠绕改正误差，卫星钟差出现约 0.4ns 偏差；而基于 WUM 姿态产品的钟差二次差序列较为平稳。对于 C21 卫星，在每次偏航机动期间，基于名义姿态的钟差二次差序列出现约 0.1ns 的跳变，而基于 WUM 姿态产品的钟差二次差序列较为平稳。当使用名义姿态时，G08、C21 卫星钟差二次差 STD 分别为 0.224ns 和 0.030ns；而使用 WUM 姿态产品后，STD 减小为 0.033ns 和 0.028ns，减小幅度分别达到 85%和 7%。

### 3.3 动态 PPP 实验

为分析姿态产品对 PPP 性能的影响，在使用 WUM 精密轨道和钟差产品基础上，分别基于名义姿态和 WUM/GFZ/COD 姿态产品进行动态 PPP 实验。图 8 展示了 2023 年第 196 天 JOZE 站 ( $21.0^\circ$  E,  $52.1^\circ$  N) 东、北、高方向的定位误差序列，其中黑色线段表示 GPS/BDS-3 卫星偏航机动时段。由图 8 可知，基于 WUM 精密轨道和钟差产品配套使用的 WUM 姿态产品定位效果最优，而使用名义姿态会导致偏航机动期间的定位误差显著增大，尤其是高程方向，最大影响达到 15 cm；与 WUM 姿态产品相比，GFZ 姿态产品造成的北方向和高程方向误差增大幅度达 5cm。由第 2 节可知，WUM 与 COD 姿态产品仅在 GPS IIF 卫星上有较显著差异，因此两种定位误差序列在 G08 卫星正午机动时段之外较为一致，在 G08 卫星机动期间，COD 产品造成的北方向和高程方向误差增大幅度约为 3cm。

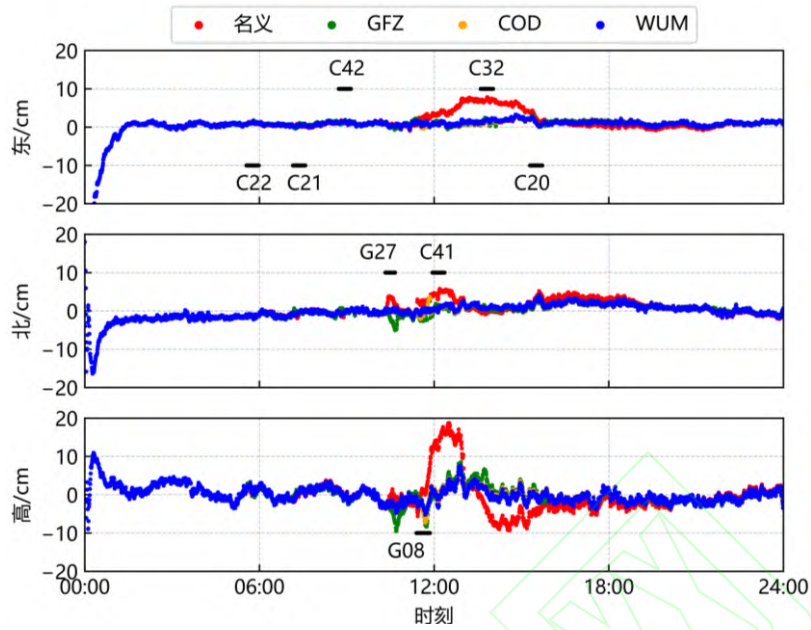


图 8 2023 年第 196 天 JOZE 站定位误差时间序列

Fig.8 Time Series of Positioning Errors at Station JOZE on DOY 196, 2023

图 9 进一步展示了 JOZE 站 G08 (Block IIF) 卫星该天 11:00~12:30 的偏航角、卫星 PCO 改正、相位缠绕改正与相位残差时间序列，其中阴影表示正午机动时段。由图可知，在机动期间，名义姿态与 WUM 四元数姿态的反方向偏转造成了 360° 的偏航角差异，卫星 PCO 与相位缠绕改正出现了最大约为 7cm 和 11cm 的差异，相位残差增大幅度达 8cm。与 WUM 产品相比，COD 与 GFZ 产品造成的卫星 PCO 改正最大差异分别达 7cm 和 8.5cm，相位缠绕改正差异可达 11cm，相位残差序列均发生了明显波动。

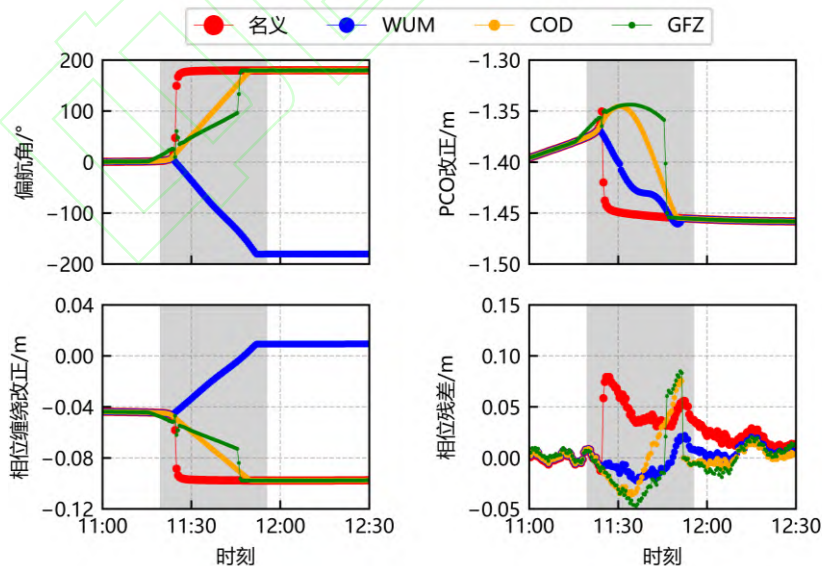


图 9 不同偏航姿态下 G08 卫星偏航角、卫星 PCO 改正、相位缠绕改正与相位残差时间序列

Fig 9 Time Series of the Yaw Angles, PCO Corrections, Phase Wind-up Corrections and Phase Residuals for the G08 Satellite using different attitude products



图 10 统计了在使用 WUM 精密轨道和钟差产品基础上，该天 20 个 MGEX 测站基于不同偏航姿态产品的定位误差均方根（root mean square, RMS）。由图可知，在东、北、高方向，配套使用 WUM 姿态产品均可获得最佳精度，COD 产品次之，使用 GFZ 产品和名义姿态的定位精度较差。与名义姿态相比，WUM 姿态产品的动态 PPP 东、北、高方向 RMS 由 2.26cm、1.85cm、4.26cm 减小到 1.56cm、1.48cm、3.05cm，减小幅度分别为 31%、20%、28%。

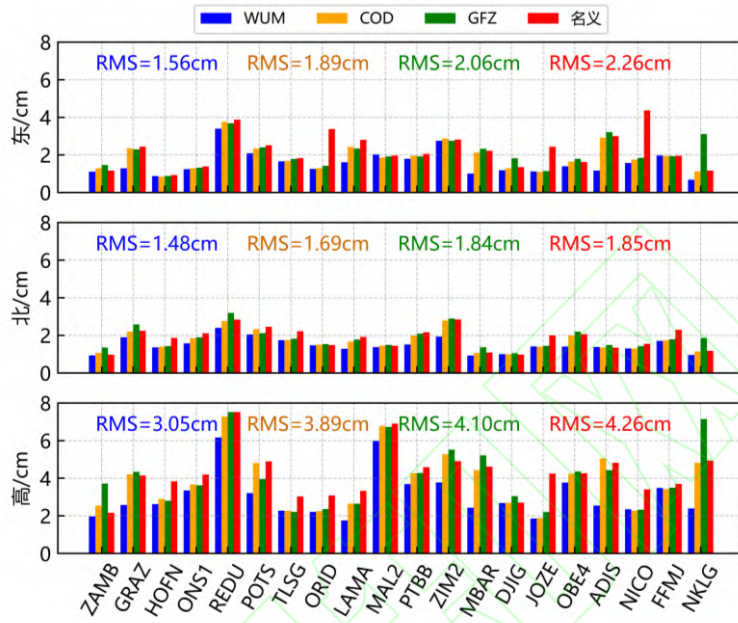


图 10 不同姿态产品下的 2023 年第 196 天 MGEX 测站定位误差 RMS

Fig.10 RMS of Positioning Errors for the MGEX Stations using different attitude products on DOY 196, 2023

由第 2 节可知，GFZ 偏航姿态模型在 GPS IIF、GPS IIIA 以及 BDS-3 MEO 和 IGSO 卫星上与其他分析中心差别较大，且存在偏航角跳变等不符合卫星运行规律的现象。假设 GFZ 采用的姿态模型与卫星实际姿态规律不符，那么配套使用 GFZ 精密轨道/钟差/姿态产品进行定位是否影响定位性能也有待验证。基于 GFZ 精密卫星轨道和钟差产品，分别使用名义姿态、WUM 和 GFZ 姿态产品，进行 2023 年第 45 天 10:00-16:00 的 KOKB 站（159.7°W, 22.1°N）GPS/BDS-3 动态 PPP 实验，定位误差时间序列如图 11 所示，图中黑色线段表示偏航机动时段。G04 卫星的名义/四元数偏航角、动态 PPP 相位残差和 GFZ/WUM 精密钟差二次项拟合残差如图 12 所示，灰色阴影为 G04 午夜机动时段。

由图 12 可知，G04 卫星的 GFZ 和 WUM 四元数偏航角差值在机动期间可达 360°，由于使用与 GFZ 轨道和钟差产品不匹配的卫星姿态，基于 WUM 姿态产品的 PPP 相位残差在机动期间和机动后明显增大，东、北、高方向定位误差 RMS 由 1.10cm、1.13cm、3.00cm 增大到 1.43cm、2.51cm、7.77cm，定位精度与采用名义姿态结果相当。值得注意的是，图 12 中 GFZ 精密钟差（使用 GFZ 的姿态产品和 GFZ 的轨道计算得到）二次项拟合残差 STD 为 0.072ns，而 WUM 精密钟差（使用 WUM 的姿态产品和 WUM 的轨道计算得到）仅为 0.026ns。上述结果表明，尽管 WUM 卫星姿态可能更接近于 G04 卫星实际姿态，但由于绝大部分 GFZ 姿态误差被吸收到 GFZ 钟差产品，使用与 GFZ 轨道钟差产品配套的 GFZ 姿态产品仍能达到更好的定位效果。因此，本文建议用户在进行精密数据处理时需要使用与服务端轨道钟差配套的卫星姿态产品。

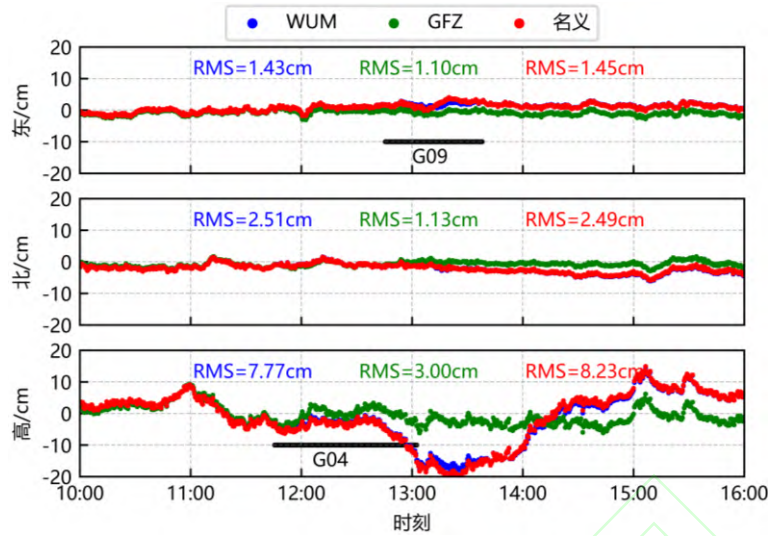


图 11 2023 年第 45 天 KOKB 站定位误差序列

Fig.11 Time Series of Positioning Errors at Station KOKB on DOY 045, 2023

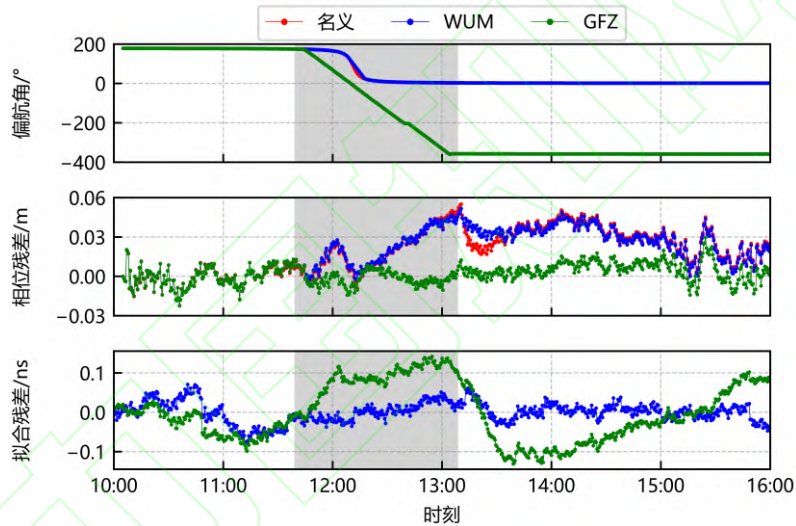


图 12 G04 卫星偏航角、PPP 相位残差和 GFZ/WUM 精密钟差产品二次项拟合残差序列

Fig.12 Time Series of the Yaw Angles, Phase Residuals in PPP and Quadratic Polynomial Fitting Residuals of GFZ/WUM Clocks for G04

## 4 结语

本文评估了四家 IGS MGEX 分析中心提供的 GPS/BDS-3 四元数卫星姿态产品，开展了不同姿态产品下卫星钟差估计和动态 PPP 实验。结论如下：

1) GPS/BDS-3 不同姿态产品间存在明显差异。卫星偏航机动期间，GFZ 采用的姿态模型与其他产品差别较大，GPS Block IIF 和 BDS-3 MEO 卫星姿态产品存在偏航角跳变和偏航速率超过硬件限制等现象；除 GPS Block IIF 卫星之外，WUM 与 COD 姿态产品较为一致。

2) 与名义姿态相比，IGS 分析中心姿态产品可使地影期间卫星钟差连续性得到明显改善，特别是当四元数姿态与名义姿态偏转方向相反时，钟差二次差 STD 减小幅度可达 85%。

3) 用户需要使用与服务端轨道钟差相配套的卫星姿态产品，以减小卫星 PCO 与相位

缠绕改正等误差。地影期间卫星入境后，使用与轨道钟差不匹配的卫星姿态会影响卫星 PCO 和相位缠绕改正，进而对高程方向 PPP 精度造成高达 15cm 影响，使用配套的产品后，动态 PPP 误差序列保持平稳，水平/高程精度分别优于 2/4cm。

## 参考文献

- [1] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS satellite geometry and attitude models[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1015-1029.
- [2] Loyer S, Banville S, Geng J, et al. Exchanging satellite attitude quaternions for improved GNSS data processing consistency[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(6): 2441-2452.
- [3] Tian F, Nie L, Zhou X. Comparison and analysis of BeiDou-3 satellite attitude quaternions products from different analysis centers and their application in PPP [J/OL]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230366>. (田福娟, 聂琳娟, 周晓慧. 不同分析中心北斗三号姿态四元数产品比较分析及其在 PPP 中的应用[J/OL]. *武汉大学学报 (信息科学版)*. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20230366>.)
- [4] Wang C, Guo J, Zhao Q. Impact of Yaw Attitude on GPS/GLONASS Orbit and Clock Solution[J]. *Geomatics & Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5). (王晨, 郭靖, 赵齐乐. 偏航姿态对 GPS 和 GLONASS 精密轨道和钟差的影响[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2017, 42(5).)
- [5] Mao Y, Song X, Wang W, et al. IGSO Satellite Orbit Determining Strategy Analysis with the Yaw-steering and Orbit-normal Attitude Control Mode Switching[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1352-1356. (毛悦, 宋小勇, 王维, 等. IGSO 姿态控制模式切换期间定轨策略研究[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2014, 39(11): 1352-1356.)
- [6] Kouba J. A simplified yaw-attitude model for eclipsing GPS satellites[J]. *GPS solutions*, 2009, 13: 1-12.
- [7] Dilssner F, Springer T, Enderle W. GPS IIF yaw attitude control during eclipse season[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2011, 2011: G54A-04.
- [8] Kuang D, Desai S, Sibois A. Observed features of GPS Block IIF satellite yaw maneuvers and corresponding modeling[J]. *GPS solutions*, 2017, 21: 739-745.
- [9] Dilssner F, Springer T, Gienger G, et al. The GLONASS-M satellite yaw-attitude model[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(1): 160-171.
- [10] GSA, European Global Navigation Satellite Systems Agency. Galileo Satellite Metadata. [EB/OL]. [2024-04-17] <https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-satellite-metadata>.
- [11] Liu T, Chen H, Jiang W, et al. Assessing the exchanging satellite attitude quaternions from CNES/CLS and their application in the deep eclipse season[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26: 1-14.
- [12] Sun S, Liu C, Wang M, et al. Influence of Quaternion Satellite Attitude Products on BDS PPP[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2023, 43(3): 259-263. (孙爽, 刘长建, 王敏, 等. 四元数卫星姿态产品对 BDS PPP 的影响[J]. *大地测量与地球动力学*, 2023, 43(3): 259-263.)
- [13] Yang S, Zhang Q, Zhang X, et al. Impact of GPS/BDS satellite attitude quaternions on Precise Point Positioning with Ambiguity resolution[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 3035.
- [14] Mao S, Wei N, Wen Q, et al. Multi-GNSS clock combination with satellite attitude correction[J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(2): 13-20. (毛姝尹, 魏娜, 温强, 等. 顾及卫星姿态的多系统精密钟差产品综合[J]. *全球定位系统*, 2022, 47(2): 13-20.)
- [15] Wang C, Guo J, Zhao Q, et al. Yaw attitude modeling for BeiDou I06 and BeiDou-3 satellites[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22: 1-10.
- [16] Dilssner F. A note on the yaw attitude modeling of BeiDou IGSO-6 [R/OL]. (2017-11-20) [2024-05-22] [http://navigation-office.esa.int/attachments/32834483/1/BeiDou\\_IGSO-6\\_Yaw\\_Modeling.pdf](http://navigation-office.esa.int/attachments/32834483/1/BeiDou_IGSO-6_Yaw_Modeling.pdf)

- [17] Zhao Q, Wang C, Guo J, et al. Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. GPS Solutions, 2018, 22: 1-13.
- [18] Xie X, Geng T, Ma Z, et al. Estimation and analysis of BDS-3 satellite yaw attitude using inter-satellite link observations[J]. GPS Solutions, 2022, 26(4): 106.
- [19] Loyer S, Montenbruck O, Hilla S. ORBEX: The Orbit Exchange Format, draft version 0.09 [EB/OL]. (2019-05-06) [2024-04-17] <http://acc.igs.org/misc/ORBEX009.pdf>.
- [20] Loyer S, Banville S, Perosanz F, et al. GNSS Attitude quaternions exchange using ORBEX [R/OL]. (2019-04-30) [2024-04-17] [http://acc.igs.org/misc/proposal\\_orbex\\_april2019.pdf](http://acc.igs.org/misc/proposal_orbex_april2019.pdf).
- [21] CSNO, China Satellite Navigation Office. Definitions and descriptions of BDS/GNSS satellite parameters for high precision application: BD 420025—2019 [S]. Beijing: CSNO, 2019.(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗/全球卫星导航系统(GNSS)卫星高精度应用参数定义及描述: BD 420025—2019 [S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.)
- [22] Steigenberger P, Thielert S, Montenbruck O. GPS III Vespucci: Results of half a year in orbit[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(12): 2773-2785.
- [23] Kouba J. A note on the December 2013 version of the eclips.f subroutine [R/OL]. (2013-12-23) [2024-06-04] <http://acc.igs.org/orbits/eclipsDec2013note.pdf>.
- [24] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction: Part II. Refraction corrections in satellite geodesy[J]. Bulletin Géodésique (1946-1975), 1973, 107: 13-34.
- [25] Boehm J, Werl B, Schuh H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data[J]. Journal of geophysical research: solid earth, 2006, 111(B2).
- [26] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. Astrodynamics 1991, 1992: 1647-1660.

#### 网络首发:

标题: GPS/BDS-3 卫星姿态产品评估及对精密数据处理的影响

作者: 耿涛, 赵普, 谢新, 程凌岳

收稿日期: 2024-06-07

DOI:10.13203/j.whugis20240155

#### 引用格式:

耿涛, 赵普, 谢新, 等. GPS/BDS-3 卫星姿态产品评估及对精密数据处理的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240155 (GENG Tao, ZHAO Pu, XIE Xin, et al. Evaluation of GPS/BDS-3 Satellite Attitude Products and Impact on Precise Data Processing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240155)

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:

##### FY-3D 卫星姿轨误差标校及对定位影响研究

鲁文强, 胡秀清, 黄勇, 高旭东, 赵兴隆

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 256-263.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210403>



一种面向卫星在轨自主任务规划的快速精准轨道预报方法

王密, 陈俊博, 皮英冬, 仵倩玉

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(6): 879-887.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230223>

光学遥感卫星姿态测量数据处理关键技术研究

王艳丽

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 482-482.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210699>

