

引文格式:田福娟,聂琳娟,周晓慧.不同分析中心BDS-3姿态四元数产品比较及其在PPP中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(10):1891-1899.DOI:10.13203/j.whugis20230366



Citation: TIAN Fujuan, NIE Linjuan, ZHOU Xiaohui. Comparison of BDS-3 Satellite Attitude Quaternions Products from Different Analysis Centers and Their Application to PPP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(10):1891-1899. DOI:10.13203/j.whugis20230366

# 不同分析中心 BDS-3 姿态四元数产品比较及其在 PPP 中的应用

田福娟<sup>1</sup> 聂琳娟<sup>1</sup> 周晓慧<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 湖北水利水电职业技术学院水利工程系,湖北 武汉,430070

<sup>2</sup> 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘要:**国际卫星导航服务组织在第三次重处理中推出了卫星姿态四元数产品,该产品不仅有利于地影期间各分析中心精密产品的综合,同时也有助于提高卫星姿态异常时期精密单点定位(precise point positioning, PPP)的可靠性。对武汉大学(Wuhan University, WHU)、德国地学研究中心和欧洲定轨中心3家分析中心提供的4种北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system, BDS-3)最终/快速姿态四元数产品进行了比较,分析了各个产品对不同类型的BDS-3卫星所采用的姿态模型的特点,并探究了不同卫星姿态对BDS-3动态PPP定位的影响。结果表明,在卫星太阳高度角接近0°时,不同分析中心采用了不同的BDS-3姿态模型,其偏差角差异可高达约120°;使用各个分析中心配套的姿态四元数,地影期间动态PPP三维定位精度都得到一定的提升,其中,采用WHU快速产品的提升率较为显著,与采用名义姿态相比,使用四元数产品后,动态PPP的三维定位精度可提高约18.4%。虽然采用目前公开的BDS-3模型姿态对PPP定位有所改善,但不同分析中心对精密产品估计时采用的卫星姿态可能会有所不同,因此,配套使用各分析中心提供的姿态四元数才能获得可靠的定位结果。

**关键词:**卫星姿态四元数;BDS-3模型姿态;精密单点定位;卫星偏航姿态

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-10-07

DOI:10.13203/j.whugis20230366

文章编号:1671-8860(2024)10-1891-09

## Comparison of BDS-3 Satellite Attitude Quaternions Products from Different Analysis Centers and Their Application to PPP

TIAN Fujuan<sup>1</sup> NIE Linjuan<sup>1</sup> ZHOU Xiaohui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Hydraulic Engineering, Hubei Water Resources Technical College, Wuhan 430070, China

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

**Abstract: Objectives:** The satellite attitude quaternion products have been proposed by International GNSS Service in the third data reprocessing campaign (repro3). These satellite attitude quaternion products are not only contributed to combining the precise satellite products during the eclipse season, but also can improve the reliability of precision point positioning (PPP) when satellites are in abnormal yaw attitude. **Methods:** The four final and rapid BeiDou-3 satellite navigation system (BDS-3) satellite attitude products provided by Wuhan University (WHU), Geo Forschungs Zentrum and Center for Orbit Determination in Europe have been compared. Attitude model characteristic of BDS-3 with different type from different analysis centers have been also analyzed in the eclipse seasons, and the effect of different satellite model on satellite clock and kinematic PPP have been investigated. **Results:** The results demonstrate that the BDS-3 yaw angle difference can reach up about 120° from different analysis centers when the sun elevation angle is ap-

基金项目:国家自然科学基金(42274035)。

第一作者:田福娟,副教授,主要从事工程测量实践和GNSS数据处理方法研究工作。Fjtian@whu.edu.cn

通讯作者:聂琳娟,博士,教授。ljnie@whu.edu.cn

proximately  $0^\circ$ . In this period, different analysis centers used different attitude models. Furthermore, when the satellite attitude quaternions are used from different analysis centers, the PPP positioning accuracy can be improved during the eclipse season. In detail, a significant improvement rate is achieved by using WHU rapid products, compared with nominal attitude strategy, the 3D positioning accuracy of kinematic PPP solutions with satellite attitude quaternions can be improved approximately 18.4%. **Conclusion:** Although the positioning accuracy of PPP solutions can be improved by using the publicly BDS-3 attitude model, various attitude strategies may be adopted in different analysis centers. Therefore, in order to obtain reliable PPP results, the satellite attitude quaternions should be used.

**Key words:** satellite attitude quaternions; BDS-3 model attitude; precise point positioning; satellite yaw attitude

当卫星的轨道平面太阳高度角较低时,大多数北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system, BDS-3)卫星在轨道近日点和远日点附近会在短时间内翻转约 $180^\circ$ ,但受卫星动量轮的条件速率限制,卫星硬件所能提供的最大偏航角速率无法达到名义偏航角速率,从而导致卫星无法维持名义姿态而产生姿态异常现象<sup>[1-2]</sup>。在这一时间段,大多数国际卫星导航服务组织(International GNSS Service, IGS)分析中心等研究机构在解算精密轨道和钟差产品时会采用不同的卫星姿态模型<sup>[3-4]</sup>。在BDS-3精密数据处理中,卫星的天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)和相位缠绕需要根据卫星的姿态来进行精确计算和校正<sup>[4]</sup>。此外,卫星端相位缠绕改正对地面所有静止的测站影响都相同,因此各分析中心采用不同卫星姿态模型所产生的相位缠绕误差将会被精密钟差所吸收,这将不利于地影期间精密钟差与相位偏差产品的综合与评估<sup>[5-7]</sup>。而且,大多数精密单点定位(precise point positioning, PPP)用户都无法获取各个分析中心所采用的卫星姿态模型,从而不一致的卫星姿态将会降低PPP的可靠性与准确性<sup>[8-9]</sup>。因此,IGS在进行第3次重处理中建议各分析中心发布ORBEX格式的多系统卫星姿态四元数产品<sup>[10-11]</sup>。

在相位偏差产品与钟差的综合方面,相关研究表明,不一致的卫星姿态模型对整数恢复钟和解耦钟差最大能造成约1周的差异,因此在进行钟差和相位偏差产品综合时,必须考虑不同分析中心卫星姿态模型的差异<sup>[12]</sup>。由于武汉大学(Wuhan University, WHU)的快速产品对部分北斗二号卫星导航系统(BeiDou-2 satellite navigation system, BDS-2)卫星使用动偏-零偏-动偏姿态控制方式,当采用名义姿态和WHU快速四元数产品对相位钟差进行估计时,BDS-2卫星的姿

态四元数产品对相位钟估计的影响更加显著<sup>[13]</sup>。此外,在PPP模糊度固定方面,与名义姿态相比较,使用四元数产品后模糊度残差分布与定位结果精度都得到了一定的提升<sup>[14]</sup>。基于法国太空研究中心地学团队提供的GPS、伽利略系统和格洛纳斯最终产品,相关文献详细阐述了利用卫星姿态四元数计算偏航角的方法,并比较了四元数偏航角与名义偏航角的差异<sup>[15]</sup>。但是,目前已有多家分析中心提供BDS-3姿态四元数产品,不同分析中心所采用的BDS-3姿态模型有待进一步研究。部分学者通过姿态四元数产品对比了不同分析中心所采用的BDS-2/BDS-3卫星姿态模型差异性,发现欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)与德国地学研究中心(Geo Forschungs Zentrum, GFZ)的偏航角差异的绝对值可高达约 $180^\circ$ ,但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<sup>[16]</sup>。因此,本文根据多个分析中心提供的BDS-3卫星姿态四元数产品,在偏航姿态异常时期,对比各个分析中心对BDS-3卫星所采用的姿态模型策略,评估了地影期间不同分析中心精密钟差的一致性,并采用38 d 12个IGS测站数据进行了BDS-3动态PPP实验,分析了不同分析中心的姿态四元数产品对PPP定位的影响。

## 1 BDS-3卫星偏航姿态模型

### 1.1 BDS-3卫星名义姿态

为保证导航卫星的太阳能帆板能面向太阳,卫星姿态控制系统需要根据太阳、地球和卫星三者的位置不断调整卫星姿态,由于导航卫星星固系的Z轴始终指向地球,因此卫星姿态的变化可仅用偏航角 $\varphi$ 来表示<sup>[17]</sup>。卫星在大部分时间段内都维持名义姿态,其名义偏航角 $\varphi_n$ 可通过太阳

高度角  $\beta$  和轨道角  $\mu$  来计算获得<sup>[18]</sup>:

$$\varphi_n = \arctan(-\sin\mu/\tan\beta) \quad (1)$$

式中,  $\varphi_n$  的符号与  $\beta$  相反。将式(1)对  $\mu$  求偏导, 可得相应的名义偏航角速率  $\bar{\varphi}$ :

$$\bar{\varphi}_n = \frac{\bar{\mu}\tan\beta\cos\mu}{\sin^2\mu + \tan^2\beta} \quad (2)$$

式中,  $\bar{\mu}$  为卫星平均轨道角速率。当 BDS-3 中轨道地球卫星 (medium Earth orbits, MEO) 和倾斜地球同步轨道卫星 (inclined geostationary orbits, IGSO) 的太阳高度角较低且处于近日点和远日点附近时,  $\bar{\varphi}_n$  会超过卫星硬件能提供的最大偏航角速率, 此时卫星将无法维持名义姿态, 从而当  $\mu$  在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  附近时, 卫星会分别出现子夜和正午机动。

## 1.2 BDS-3 卫星模型姿态

相关研究表明, BDS-3 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 for Microsatellites, SECM) 两种类型的卫星在偏航机动时期会采用不同的姿态控制方式。对于 BDS-3 CAST 卫星, 其地影时期的姿态变化情况与伽利略完全作战能力卫星类似, 当太阳高度角的绝对值小于约  $4.1^\circ$  且  $\mu$  处于  $[-6^\circ, 6^\circ]$  和  $[174^\circ, 186^\circ]$  时, BDS-3 CAST 卫星开始偏航机动, 其模型偏航角  $\varphi_m$  可由 WHU 模型进行计算<sup>[19-20]</sup>:

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} \text{sgn}_w + \left[ \varphi(\mu_s) - \frac{\pi}{2} \text{sgn}_w \right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{t_{\max}} \cdot \frac{\mu - \mu_s}{\bar{\mu}}\right) \quad (3)$$

卫星的偏航角的定义为星固系下的 X 轴  $e_x$  与轨道切向方向  $e_T$  的夹角, 因此当获得星固系下的三轴指向和卫星速度方向后, 也可以通过反余弦函数求得两个方向夹角, 即四元数偏航角  $\varphi_q$ <sup>[15]</sup>:

$$\varphi_q = \arccos(e_x, e_T) \text{sgn}_q \quad (7)$$

式中,  $\text{sgn}_q$  为四元数偏航角符号函数 (如图 1 所示, 其中  $e_R$  表示轨道径向方向), 可以通过轨道方向  $e_N$  和星固系下的 X 轴  $e_x$  来确定:

式中,  $\mu_s$  为卫星偏航机动开始时刻的轨道角 (即  $-6^\circ$  或  $174^\circ$ );  $\varphi(\mu_s)$  为机动开始时刻的名义偏航角;  $t_{\max}$  表示卫星偏航机动的最大时间长度, 对于 BDS-3 CAST 的 MEO 和 IGSO 类型分别为 3 090 s 和 5 740 s<sup>[20]</sup>;  $\text{sgn}_w$  为 WHU 模型的符号函数, 可通过开始时刻的名义偏航角正负号来判断<sup>[19]</sup>:

$$\text{sgn}_w = \begin{cases} 1, \varphi(\mu_s) \geq 0 \\ -1, \varphi(\mu_s) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

对于 BDS-3 SECM 卫星, 当太阳高度角的绝对值处于  $[-3^\circ, 3^\circ]$  时, 卫星进行偏航机动。与 CAST 类型卫星不同, SECM 类型卫星的模型偏航角与名义偏航角计算方式相似, 可通过中国卫星导航系统管理办公室 (China Satellite Navigation Office, CSNO) 模型计算获得<sup>[21-22]</sup>:

$$\varphi_m = \arctan(-\sin\mu/\tan\beta_0) \text{sgn}_c \quad (5)$$

式中,  $\beta_0 = 3^\circ$  为设定的太阳高度角阈值;  $\text{sgn}_c$  为 CSNO 模型的符号函数, 可以通过  $\beta$  进行计算:

$$\text{sgn}_c = \begin{cases} -1, \beta \geq 0 \\ 1, \beta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

与 CAST 类型卫星的模型偏航角计算方式不同, SECM 类型卫星的机动区域不限于近日点和远日点附近, 而是在太阳高度角的绝对值小于  $3^\circ$  时, 全时段进行偏航机动。

## 1.3 BDS-3 卫星四元数姿态

除了通过相应的模型计算卫星姿态, 用户也可基于各个分析中心发布的卫星姿态四元数产品  $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]$  直接获得星固系下  $e_x, e_y, e_z$  三轴的指向, 其计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} e_x = [q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2)] \\ e_y = [2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1)] \\ e_z = [2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2] \end{cases}$$

$$\text{sgn}_q = \begin{cases} 1, \arccos(e_x, e_N) < \frac{\pi}{2} \\ -1, \arccos(e_x, e_N) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8)$$

比较分析中心 A 和 B 所采用的姿态模型差异, 可以先通过式(7)分别计算出两个分析中心的四元数偏航角  $\varphi_{q,A}$  和  $\varphi_{q,B}$ , 然后将两个四元数偏航角相减获得其差值  $\Delta\varphi_{q,A-B}$ :

$$\Delta\varphi_{q,A-B} = \varphi_{q,A} - \varphi_{q,B} \quad (9)$$

此外, 用户也可以通过两个分析中心提供的

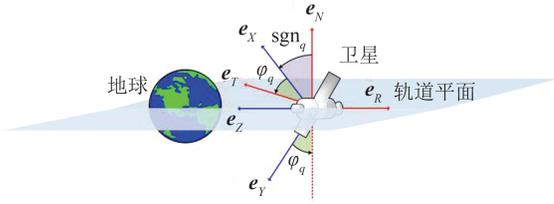


图1 姿态四元数计算BDS-3卫星偏航角示意图  
Fig. 1 BDS-3 Satellite Yaw Angle Calculated by Using Attitude Quaternion

姿态四元数产品直接计算偏航角之间的差异值<sup>[23]</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_{\text{cross}} = [\bar{q}_0 \ \bar{q}_1 \ \bar{q}_2 \ \bar{q}_3] = \mathbf{q}_A^{-1} \times \mathbf{q}_B \\ \Delta\varphi_{q,A-B} = 2\arctan(\bar{q}_0/\bar{q}_3) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{q}_A^{-1}$  为分析中心 A 姿态四元数的逆;  $\mathbf{q}_B$  为分析中心 B 的姿态四元数;  $\mathbf{q}_{\text{cross}}$  为四元数的交叉积;  $\bar{q}_0, \bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3$  为交叉积  $\mathbf{q}_{\text{cross}}$  的元素。

截至 2023-09, 已有 4 种公开的产品提供 BDS-3 卫星姿态四元数, 它们分别是 WHU 最终产品 (WUM\_FIN)、WHU 快速产品 (WUM\_RAP)、GFZ 快速产品 (GFZ\_RAP) 和 CODE 最终产品 (CODE\_FIN), 4 种产品开始提供的时间分别为 2021-12-26、2020-01-01、2021-06-15、2021-01-03, 采样率分别为 30 s、30 s、30/300 s、30 s。值得注意的是, CODE\_FIN 产品在 2022-11-20 之前只提供 300 s 采样率的姿态四元数产品, 在此之

后开始提供 30 s 采样率的姿态四元数产品。

## 2 地影期间各分析中心 BDS-3 偏航姿态模型对比

本文基于 4 种卫星姿态四元数产品, 对 BDS-3 CAST 和 SECM 类型卫星的名义偏航角、模型偏航角以及四元数偏航角进行对比, 其中 CAST 和 SECM 类型的模型偏航角分别通过 WHU 和 CSNO 姿态模型计算得到。如图 2(a) 所示, 本文以 C20 CAST 为例给出了 2023-01-17 不同分析中心的 3 种子夜机动偏航角对比图, 该颗卫星的太阳高度角的变化范围约为  $[0.01^\circ, 0.06^\circ]$ 。从图 2(a) 中可以看出, CODE\_FIN、WUM\_FIN 和 WUM\_RAP 3 种产品对 CAST 类型卫星采用的都是 WHU 姿态模型, 在远日点附近偏航角约为  $90^\circ$ 。相较于其他 3 种产品, GFZ\_RAP 的四元数偏航角出现了提前机动, 在轨道角约为  $-10^\circ$  时卫星姿态就开始进行旋转, 在远日点时, 四元数偏航角已经接近  $0^\circ$ 。此后, GFZ\_RAP 的四元数偏航角出现了约  $120^\circ$  的反向旋转, 当轨道角约为  $10^\circ$  时, GFZ\_RAP 的四元数偏航角跳变回到  $0^\circ$ 。通常情况下, 卫星偏航角速率每秒不会超过  $0.2^\circ$ , 这种突然的跳变可能是因为 GFZ\_RAP 产品没有对 CAST 类型卫星精确建模。

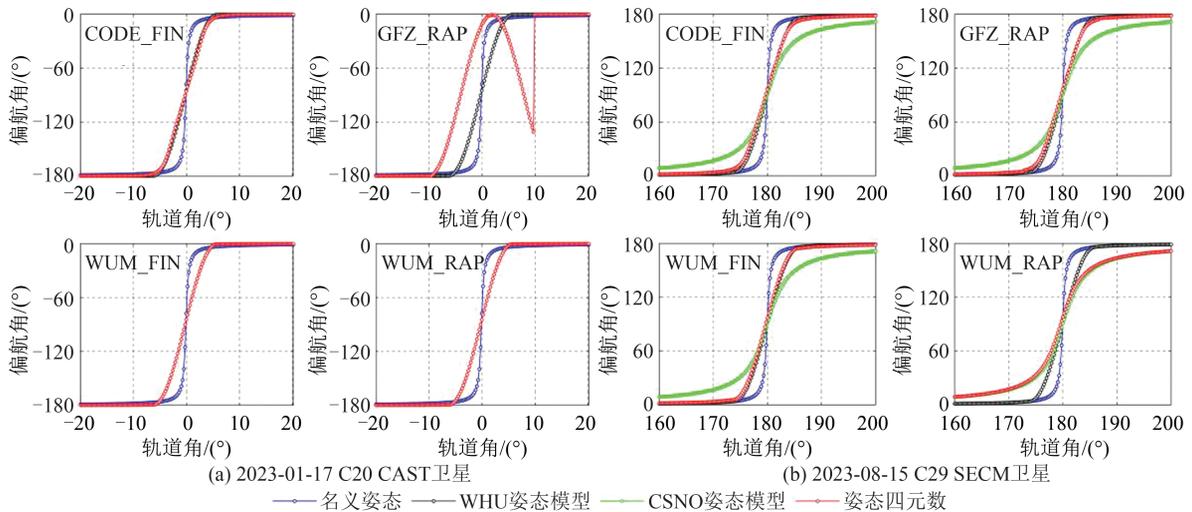


图2 CODE\_FIN、GFZ\_RAP、WUM\_FIN 和 WUM\_RAP 产品的四元数偏航角与名义偏航角和模型偏航角比较  
Fig. 2 Comparison of Quaternion, Nominal and Model Yaw Angles with CODE\_FIN, GFZ\_RAP, WUM\_FIN and WUM\_RAP Products

对于 BDS-3 SECM 类型的卫星, 图 2(b) 给出了 C29 SECM 卫星在 2023-08-15 4 种正午机动偏航角变化示意图, C29 卫星的太阳高度角变化范围为  $[-0.61^\circ, -0.58^\circ]$ 。由图 2(b) 可见,

CODE\_FIN、WUM\_FIN 和 GFZ\_RAP 的产品对于 SECM 卫星使用的是 WHU 姿态模型, 而 WUM\_RAP 的产品使用的是 CSNO 姿态模型。对比两种姿态模型可以发现, 相较于 WHU 模型,

CSNO 模型的偏航角速率较小,这使得 SECM 卫星采用 CSNO 模型的偏航角更加平滑,从而导致地影期间的机动时间更长。

为进一步探究 GFZ 分析中心的 BDS-3 CAST 卫星四元数偏航角跳变现象,图 3 给出了 CAST 卫星同一个轨道平面不同时间段的 GFZ 四元数偏航角示意图。从图 3(a)中可以看出,在 2023 年年积日(day of year, DOY)第 10 天,太阳高

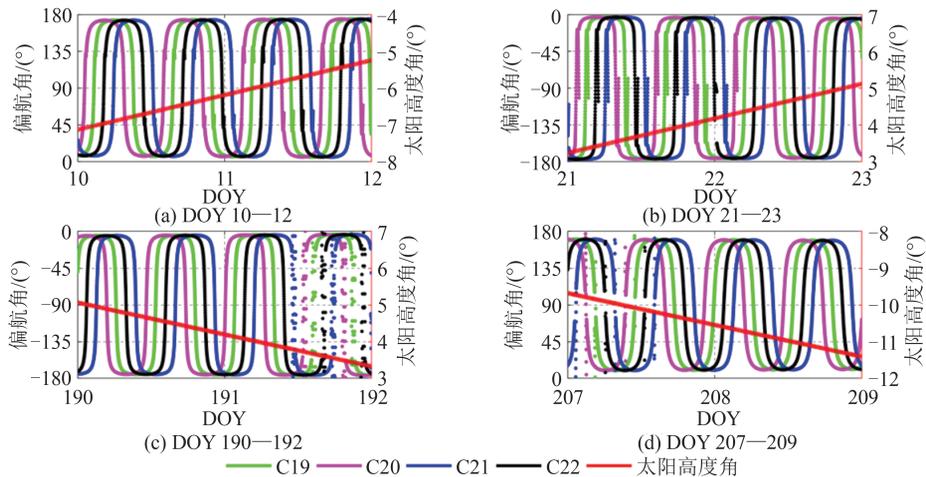


图 3 GFZ\_RAP 产品的同一轨道平面上的 CAST 卫星四元数偏航角

Fig. 3 Quaternion Yaw Angle for CAST Satellite in the Same Orbital Plane with GFZ\_RAP Products

为进一步研究 GFZ\_RAP 产品中 CAST 卫星四元数偏航角跳变的触发规律,对该轨道平面的 CAST 卫星再次处于低太阳高度角时期进行探究。图 3(c)、3(d)给出了 C19、C20、C21、C22 卫星在 2023 年 DOY 190—192 和 DOY 207—209 的四元数偏航角。从图 3(c)中可以看出,这些卫星在太阳高度角约为  $3.8^\circ$  时,GFZ\_RAP 产品的四元数偏航角出现了明显的跳变,并且相较于 2023 年 DOY 10—12 的四元数偏航角,其跳变幅度更加剧烈。此后,如图 3(d)所示,在太阳高度角约为  $-10^\circ$  时,四元数偏航角的跳变消失。综合图 3 可以看出,目前 GFZ 分析中心对 CAST 卫星采用的姿态模型在太阳高度角较低时会出现明显的突变,但是该四元数偏航角的突变与太阳高度角无明显的对应关系。

### 3 PPP 实验结果分析

#### 3.1 数据及处理策略

为分析地影期间姿态四元数产品对 BDS-3 动态 PPP 的影响,本文结合 CODE\_FIN、GFZ\_RAP、WUM\_FIN 和 WUM\_RAP 4 种精密轨道和钟差产品,对全球分布的 12 个 IGS 测站进行 PPP 解算,以 IGS 发布的周解坐标作为参考

度角约为  $-7^\circ$  时,该轨道平面 C19、C20、C21、C22 卫星的 GFZ 四元数偏航角在卫星机动时刻都出现了小幅度跳变。随着太阳高度角绝对值变小,四元数偏航角的跳变幅度逐渐增加。在太阳高度角约为  $-5^\circ$  时,跳变幅度可高达约  $30^\circ$ 。同时,从图 3(a)、3(b)中可以看出,当太阳高度角约为  $4.5^\circ$  时,该平面所有 CAST 卫星的四元数偏航角不再出现跳变,其四元数偏航角的变化较为平滑。

解,将定位坐标精度作为统计指标评估定位性能。其中,PPP 定位软件采用武汉大学 PRIDE 团队开源的 PRIDE PPP-AR 软件<sup>[24-26]</sup>,定位解算的具体策略如表 1 所示。

测试时间段分为两个部分,分别为 2023 年 DOY 9—27(部分 CAST 卫星处于地影时期)和 DOY 218—236(部分 SECM 卫星处于地影时期)。此外,考虑到 BDS-3 的高轨道卫星轨道和钟差精度较差<sup>[27]</sup>,因此本文并未使用地球静止轨道类型的卫星,而仅采用 BDS-3 IGSO 和 MEO 卫星进行 PPP 定位。分别设计了 3 种不同的姿态策略:(1)卫星姿态采用名义姿态;(2)对于 CAST 类型的卫星采用 WHU 姿态模型,而对于 SECM 类型的卫星则采用 CSNO 模型,称之为模型姿态;(3)卫星姿态采用各个分析中心的态度四元数产品,称之为四元数姿态。

#### 3.2 不同姿态模型对 BDS-3 PPP 定位结果的影响

顾及地面测站对地影时期卫星的可见性,本文以 2023 年 DOY 17 的 ALIC 测站为例,基于 GFZ\_RAP 和 WUM\_RAP 精密产品,图 4 分别给出了 BDS-3 动态 PPP 在东、北和天方向的定位时间序列。从图 4 中 15:00—16:00 时间段可以看

表1 BDS-3动态PPP误差模型和处理策略

Tab. 1 Parameter Models and Processing Strategies for BDS-3 Kinematic PPP

参数	策略
观测值频率	BDS-3: B1I和B3I
先验噪声	伪距观测值:0.03 m;相位观测值:0.01周
估计器	最小二乘
轨道、钟差和地球自转参数	各个分析中心的轨道、钟差和地球自转参数产品
截止高度角/(°)	7
采样间隔/s	30
卫星/接收机端PCO	采用igs20_2274.atx文件
观测值权重	高度角 $\theta > 30^\circ$ 时,权重为1; $\theta < 30^\circ$ 时,权重为 $4\sin^2\theta$
对流层延迟	天顶对流层延迟:使用Saastamoinen模型,改正后,残余量每1h估计一个,先验精度0.2 m,过程噪声0.02 m;使用GMF映射函数 <sup>[26]</sup>
电离层延迟	水平对流层梯度:每12h估计一个,先验精度0.005 m,过程噪声0.002 m
无电离层模糊度	采用双频无电离层组合,忽略二阶电离层的影响
	保持浮点解,不固定模糊度

出,当使用名义姿态进行定位时,采用GFZ\_RAP和WUM\_RAP产品的动态PPP在天方向的定位误差分别高达约20 cm和15 cm。使用姿态四元数产品后,PPP定位精度得到了一定的改善,在部分时间段天顶方向的定位误差可减小约5 cm。

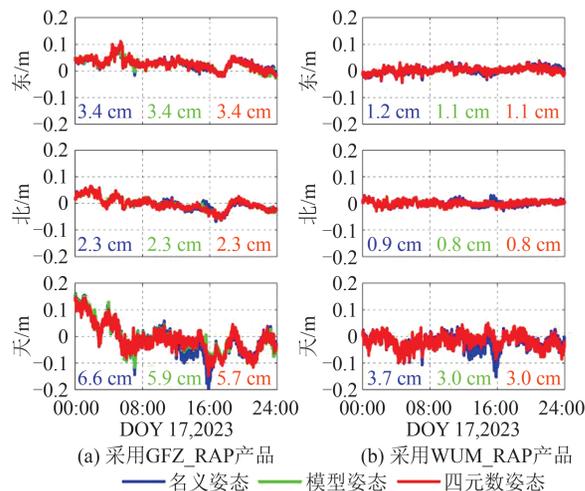


图4 ALIC测站BDS-3动态PPP在东、北和天方向的定位误差

Fig. 4 Positioning Biases of the East, North and Up Components for BDS-3 Kinematic PPP with GFZ\_RAP Products and WUM\_RAP Products for ALIC Station

由于WUM\_RAP产品对CAST和SECM类型的卫星姿态分别采用WHU和CSNO模型,这两种模型与本文的模型姿态策略保持一致,因此当采用WUM\_RAP产品时,模型姿态与四元数姿态的定位结果基本一致。此外,从图4中均方根值(root mean square, RMS)可以看出,3种策略的PPP定位精度在东、北方向的较小,而在天

方向差异较大。以GFZ\_RAP产品的定位精度为例,采用名义姿态、模型姿态和四元数姿态的PPP在天顶方向定位精度RMS分别约为6.6 cm、5.9 cm和5.7 cm,相较于名义姿态,采用姿态四元数后的PPP天顶方向定位精度RMS可提高约13.3%。

为进一步分析姿态异常的卫星对PPP的影响,以C21 CAST卫星为例,图5给出了C21卫星在04:45—06:25时间段的3种策略的偏航角变化图和ALIC测站的相位残差时间序列图,其中C21在该时间段的太阳高度角 $\beta \approx 0.03^\circ$ 。从图5中可以看出,C21卫星的机动时间约为30 min,卫星偏航角翻转接近 $180^\circ$ 。当C21卫星进入机动区域后,随着名义偏航角和四元数偏航角的差异值不断增加,名义姿态载波相位残差高达约2.5 cm。使用WUM姿态模型后,GFZ\_RAP产品的相位残差得到了一定减少,但在部分时刻也高达约3 cm,而与名义姿态和模型姿态相比较,姿态四元数策略采用与分析中心一致的卫星姿态。因此使用姿态四元数之后,GFZ\_RAP的载波相位残差得到了有效的降低。

为探究BDS-3不同卫星姿态模型对动态PPP的影响,本文选取12个IGS测站2023年DOY 9—27和DOY 218—236的观测数据,基于不同分析中心产品,分别统计了3种不同策略的PPP定位精度。图6(a)给出了CAST类型卫星地影时期的PPP三维定位精度时间序列,阴影部分表示CAST类型卫星处于深地影时段(该轨道平面太阳高度角为 $-4^\circ \sim 4^\circ$ ),其定位精度RMS也标注在图6中。从图6(a)中可以看出,与名

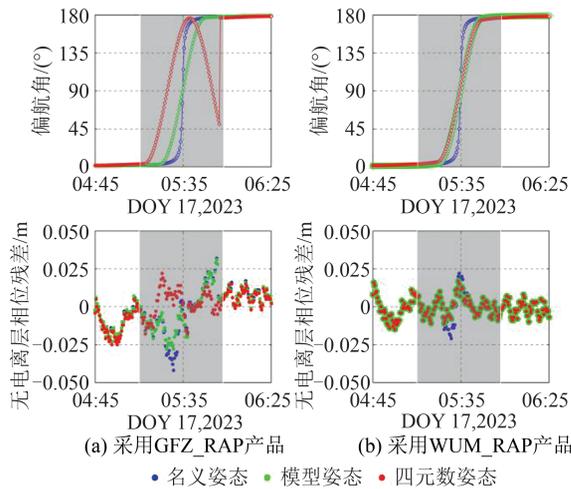


图 5 不同卫星姿态模型的 C21 CAST 卫星的偏航角和无电离层载波相位残差

Fig. 5 The Yaw Angle and Ionosphere-Free Phase Residuals for C21 CAST Satellite with Different Satellite Attitude Models

义姿态相比较,模型姿态和四元数姿态在东、北、天 3 个方向上的定位精度都有一定的提高。以 WUM\_RAP 产品为例,采用名义姿态时,PPP 的三维定位精度 RMS 约为 0.28 cm,而使用姿态四元数后,三维定位精度提高到了约 0.40 cm,深地影期间的提升幅度高达约 14.2%。值得注意的是,相较于四元数姿态,GFZ\_RAP 产品的名义姿态和模型姿态在非深地影时期也出现了较大的差异。这是由于在 2023 年 DOY 10,太阳高度角约为  $-7^\circ$  时,该轨道平面的 CAST 卫星的 GFZ\_RAP 四元数偏航角已经出现了跳变(见图 3(a)),从而

导致 CAST 卫星在非地影时期采用名义姿态或模型姿态的 PPP 定位精度较差。

此外,图 6(b)给出了 SECM 卫星 DOY 217—237 的三维定位精度统计图,此时间段内部分 SECM 卫星处于地影时期。从图 6(b)中可以看出,当使用 GFZ\_RAP 产品时,与 CAST 卫星不同,SECM 采用不同姿态模型的 PPP 定位精度差异仅体现在深地影时期。然而,对于非深地影时段,3 种姿态模型的动态 PPP 定位精度相当。综合图 6 的统计结果可以看出,相较于名义姿态,在深地影时期使用四元数姿态对定位结果都有一定的提升,对于 CODE\_FIN、GFZ\_RAP、WUM\_FIN 和 WUM\_RAP 的三维精度 RMS 分别提高了约 17.5%、12.6%、17.9% 和 18.4%。由于 WUM\_RAP 的四元数姿态与 WHU、CSNO 姿态模型一致,因此在使用 WUM\_RAP 产品时,本文的模型姿态与四元数姿态定位精度没有明显差异。值得注意的是,采用 GFZ\_RAP 产品进行 PPP 定位时,其精度 RMS 约为其他 3 个分析中心的 2 倍。这可能是由于 GFZ\_RAP 产品中 BDS-3 轨道和钟差产品精度较低,从而影响了 PPP 的定位精度(具体见 [https://files.igs.org/pub/resource/working\\_groups/pppar/IGS\\_PPPAR\\_2023114\\_Summary.pdf](https://files.igs.org/pub/resource/working_groups/pppar/IGS_PPPAR_2023114_Summary.pdf))。此外,PRIDE 软件所用的函数模型(如接收机/卫星端 PCO、对流层模型等)与 GFZ\_RAP 产品可能存在一定的差异,这些不一致的函数模型也能对 PPP 定位结果产生一定的影响。

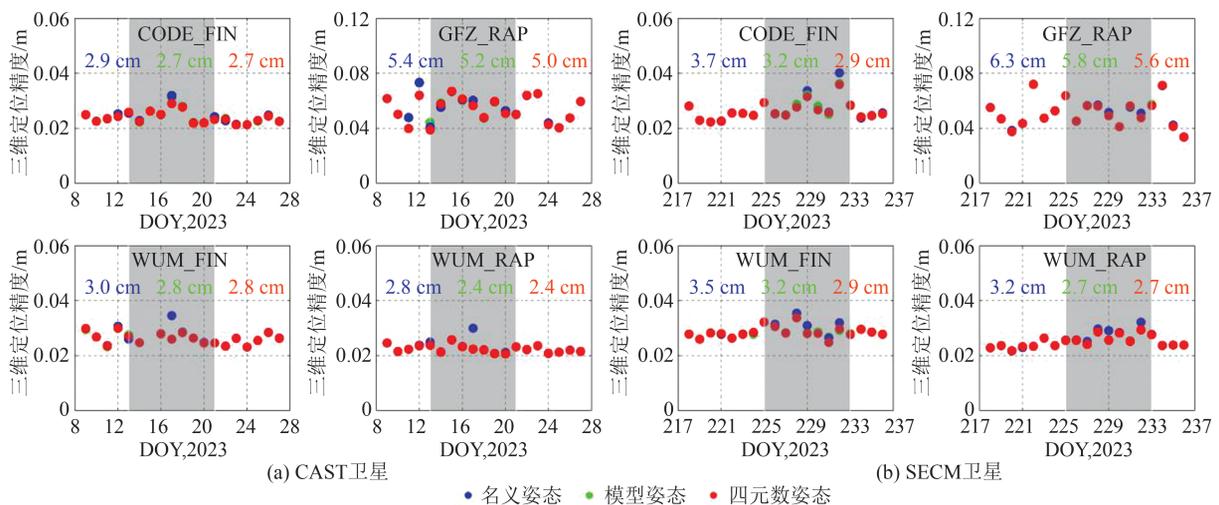


图 6 当 BDS-3 CAST 和 SECM 卫星处于地影期间,各个分析中心在不同卫星姿态模型下的动态 PPP 三维定位精度图(阴影部分为太阳高度角从  $-4^\circ$  变化到  $4^\circ$ )

Fig. 6 Kinematic PPP 3D Positioning Accuracy with Different Analysis Centers and Different Attitude Models When BDS-3 CAST and SECM Satellites Is in the Eclipsing Period (the Shaded Bar Indicates that the Sun Angle is Greater than  $-4^\circ$  but Less than  $4^\circ$ )

## 4 结 语

本文基于不同分析中心提供的4种BDS-3姿态四元数产品(CODE\_FIN、GFZ\_RAP、WUM\_FIN和WUM\_RAP),对比了各个分析中心所采用的BDS-3姿态模型的差异和特点,基于2023年38 d 12个IGS测站的实测数据比较了不同策略下BDS-3动态PPP的定位精度,得到以下结论:

1)在BDS-3 CAST卫星处于地影时期, CODE\_FIN、WUM\_RAP和WUM\_FIN产品对其采用的是WHU姿态模型;对于BDS-3 SECM卫星, CODE\_FIN、GFZ\_RAP和WUM\_FIN产品仍采用WHU姿态模型, WUM\_RAP产品则采用CSNO模型。

2)在BDS-3卫星处于地影期间, GFZ\_RAP产品可能对BDS-3 CAST卫星姿态没有精确建模,导致其四元数偏航角在地影期间会出现跳变;随着太阳高度角绝对值变小, GFZ\_RAP产品的四元数偏航角的跳变幅度逐渐增加。在太阳高度角约为 $0^\circ$ 时, GFZ\_RAP的四元数偏航角可瞬间跳变约 $120^\circ$ 。

3)在BDS-3动态PPP定位方面,与名义姿态相比较,采用公开的模型姿态和姿态四元数产品都能提高PPP三维定位精度。其中,当卫星处于地影期间,采用各分析中心的四元数产品时,定位精度提高程度显著,对于CODE\_FIN、GFZ\_RAP、WUM\_FIN和WUM\_RAP的三维精度RMS可分别提高约17.5%、12.6%、17.9%、18.4%。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Chen, Guo Jing, Zhao Qile. Impact of Yaw Attitude on GPS/GLONASS Orbit and Clock Solutions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(5): 624-629. (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): 624-629.)
- [2] Guo Jing. Influence of Attitude, Optical Pressure and Function Model on Precise Orbit Determination of Navigation Satellite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.)
- [3] Lou Y D, Zheng F, Gu S F, et al. The Impact of Non-nominal Yaw Attitudes of GPS Satellites on Kinematic PPP Solutions and Their Mitigation Strategies [J]. *Journal of Navigation*, 2015, 68 (4) : 718-734.
- [4] Xia F Y, Ye S R, Chen D Z, et al. Observation of BDS-2 IGSO/MEOs Yaw-Attitude Behavior During Eclipse Seasons [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23 (3): 71.
- [5] Mao Shuyin, Wei Na, Wen Qiang, 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.)
- [6] Pan Yuanxin. Product Synthesis of Precise Clock Error and Phase Deviation for BeiDou /GNSS Nondifferential Ambiguity Fixation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021. (潘元欣. 面向北斗/GNSS非差模糊度固定的精密钟差和相位偏差产品综合[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.)
- [7] Geng Jianghui, Yan Zhe, Wen Qiang. Multi-GNSS Satellite Clock and Bias Product Combination: The Third IGS Reprocessing Campaign [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1070-1081. (耿江辉, 闫哲, 温强. 多系统GNSS卫星钟差和偏差产品综合: IGS第3次重处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1070-1081.)
- [8] 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. (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.)
- [9] Chen Xiude, Liu Hui, Yu Baoguo, et al. BeiDou/GNSS Wide-Area Precise Positioning Technology and Service: Current Situation and Prospects [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230472. (陈秀德, 刘惠, 蔚保国, 等. 北斗/GNSS广域精密定位技术与服务: 现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230472.)
- [10] Loyer S, Montenbruck O, Hilla S. ORBEX: The Orbit Exchange Format. Draft Version 0.09 [EB/OL]. (2019-01-10)[2023-01-10]. <http://acc.igs.org/misc/ORBEX009.pdf>, 2019.
- [11] Loyer S, Banville S, Geng J H, et al. Exchanging Satellite Attitude Quaternions for Improved GNSS

- Data Processing Consistency[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(6): 2441-2452.
- [12] Seepersad G, Bisnath S. An Assessment of the Interoperability of PPP-AR Network Products [J]. *The Journal of Global Positioning Systems*, 2017, 15(1): 4.
- [13] Yang S F, Zhang Q Y, 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] Yang Songfeng. Impact of Multi-GNSS Phase Biases and Attitude Quaternions on PPP-AR [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022. (杨淞锋. Multi-GNSS 相位偏差和姿态四元数对 PPP-AR 的影响研究[D]. 武汉:武汉大学, 2022.)
- [15] Liu T J, Chen H, Jiang W P, et al. Assessing the Exchanging Satellite Attitude Quaternions from CNES/CLS and Their Application in the Deep Eclipse Season[J]. *GPS Solutions*, 2021, 26(1): 11.
- [16] Sun Shuang, Liu Changjian, Wang Min, 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.)
- [17] Dai Xiaolei. Real-Time Precise Orbit Determination Theory and Method of GNSS Navigation Satellite Based on Square Root Information Filtering [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016. (戴小蕾. 基于平方根信息滤波的 GNSS 导航卫星实时精密定轨理论与方法[D]. 武汉:武汉大学, 2016.)
- [18] Bar-Sever Y E. A New Model for GPS Yaw Attitude [J]. *Journal of Geodesy*, 1996, 70 (11) : 714-723.
- [19] Wang C, Guo J, Zhao Q L, et al. Yaw Attitude Modeling for BeiDou I06 and BeiDou-3 Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(4): 117.
- [20] Wang Chen. Study on the Construction and Refinement of Optical Pressure Model of Beidou Navigation Satellite [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. (王晨. 北斗导航卫星光压模型构建与精细化研究[D]. 武汉:武汉大学, 2019.)
- [21] Xia L, Lin B J, Liu Y C, et al. Satellite Geometry and Attitude Mode of BDS-3 MEO Satellites Developed by SECM [C]//The 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, Florida, 2018.
- [22] Yang C, Guo J, Zhao Q L. Yaw Attitudes for BDS-3 IGSO and MEO Satellites: Estimation, Validation and Modeling with Intersatellite Link Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(1): 6.
- [23] Mao Shuyin. Product Synthesis of Multi-system Clock Error and Phase Deviation in the Third Reprocessing of IGS [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022. (毛姝尹. IGS 第三次重处理中的多系统钟差和相位偏差产品综合[D]. 武汉:武汉大学, 2022.)
- [24] Geng J H, Chen X Y, Pan Y X, et al. PRIDE PPP-AR: An Open-Source Software for GPS PPP Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23 (4): 91.
- [25] Geng J H, Yang S F, Guo J. Assessing IGS GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 Phase Bias Products with PRIDE PPP-AR[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2 (1): 17.
- [26] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (7) : L07304.
- [27] Guo J, Wang C, Chen G, et al. BDS-3 Precise Orbit and Clock Solution at Wuhan University: Status and Improvement [J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(2):15.