引文格式: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),2026,51(5):914-924.DOI:10.13203/j.whugis20240155

Citation: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,2026,51(5):914-924.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[1] 赵 普[1] 谢 新[1] 程凌岳[2]

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 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GNSS服务(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。选取的4个IGS多GNSS实验分析中心包括武汉大学(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'Etudes Spatiales,CNES),评估了2023年全年4个分析中心的GPS与北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system,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、天方向的动态精密单点定位精度分别提升了31%、20%、28%。

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

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-07

DOI:10.13203/j.whugis20240155 **文章编号**:1671-8860(2026)05-0914-11

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

GENG Tao[1] *ZHAO Pu*[1] *XIE Xin*[1] *CHENG Lingyue*[2]

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

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

Abstract: **Objectives**: Satellite attitudes have a significant impact on global navigation satellite system (GNSS) precise data processing. International GNSS service (IGS) analysis centers publish satellite attitude products in quaternion form using ORBEX (ORBit EXchange) format. **Methods**: This paper selects 4 multi-GNSS experiment (MGEX) analysis centers including WUM (Wuhan University), COD (Center for Orbit Determination in Europe), GFZ (GeoForschungsZentrum) and CNES (Centre National d' Etudes Spatiales), and collect GPS and BeiDou-3 satellite navigation system (BDS-3) satellite attitude products spanning the whole year of 2023 from different analysis centers. First, based on satellite attitude quaternions, the yaw angles of GPS/BDS-3 satellites are computed and compared by using corresponding conversion formulas. And the differences of yaw angles during the satellite yaw maneuvers are emphatically

基金项目:广东省重点领域研发计划(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_gengtao@whu.edu.cn

通信作者:谢新,博士,副研究员。xiexin@whu.edu.cn

compared and analyzed. Then, GPS/BDS-3 precise satellite clock estimation and precise point positioning are conducted by using 122 global MGEX tracking stations, and the impact of satellite yaw attitude on GPS/BDS-3 precise data processing is investigated using different attitude products. **Results:** Different attitude models are adopted by different analysis centers during yaw maneuvers. The model adopted by GFZ differs significantly from that of the other centers, and the yaw angle differences can be up to 180° while abnormal jumps are observed. Except for GPS Block 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. Compared with the nominal attitudes, the attitude products can achieve the accuracy improvements of 31%, 20%, and 28% for east, north, and up components, respectively. **Conclusions:** We recommend that the 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[1]。国际GNSS服务(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[2]。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,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[3]。分析中心的卫星姿态差异会影响卫星天线相位中心偏差(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[4-5]。因此,为了获得高精度的数据处理结果,需要保证用户端与服务端卫星姿态信息的一致性,IGS模糊度固定精密单点定位(precise point positioning with ambiguity resolution,PPP-AR)工作组推荐ORBEX(ORBit EXchange)格式,以四元数形式发布卫星姿态产品[2]。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'Etudes Spatiales,CNES)共4个IGS多GNSS实验(multi-GNSS experiment,MGEX)分析中心日常发布多GNSS系统的卫星姿态产品。

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[6-9]。然而,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,为姿态优化和用户数据处理提供建议。近年来,国内外学者对卫星姿态产品进行了评估。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发布了Galileo卫星偏航机动模型[10],各分析中心提供的Galileo卫星姿态产品一致性较好,但未涉及北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)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,但仅涉及单一分析中心产品;文献[12]介绍了BDS卫星的姿态控制模式,比较了不同分析中心的BDS卫星姿态四元数产品差异。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的动态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]研究表明,卫星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%。

北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system,BDS-3)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[15-18],其对精密数据处理的影响仍有待深入研究。此外,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,本文首先给出了基于四元数的卫星姿态表示与评估方法,然后对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

在名义姿态下,卫星星固系三轴单位向量$\begin{bmatrix}\boldsymbol{e}_x & \boldsymbol{e}_y & \boldsymbol{e}_z\end{bmatrix}$的表达式为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{e}_x=\boldsymbol{e}_y\times\boldsymbol{e}_z\\ \boldsymbol{e}_y=\dfrac{\boldsymbol{e}_\odot\times\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{e}_\odot\times\boldsymbol{r}|}\\ \boldsymbol{e}_z=-\dfrac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|}\end{cases}\tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{e}_\odot$是卫星指向太阳的单位向量;$\boldsymbol{r}$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φ_n的计算式为:

$$\varphi_n=\arctan 2(-\tan\beta,\sin\mu)\tag{2}$$

式中,β为太阳-地球连线与卫星轨道面的夹角;μ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。四元数$\boldsymbol{q}_{\theta,\boldsymbol{u}}$的表达式为:

$$\boldsymbol{q}_{\theta,\boldsymbol{u}}=\begin{bmatrix}q_0 & q_1 & q_2 & q_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\dfrac{\theta}{2} & -\sin\dfrac{\theta}{2}\cdot\boldsymbol{u}\end{bmatrix}\tag{3}$$

式中,$q_0=\cos\dfrac{\theta}{2}$是四元数的标量部分;$\begin{bmatrix}q_1 & q_2 & q_3\end{bmatrix}=-\sin\dfrac{\theta}{2}\cdot\boldsymbol{u}$是四元数的向量部分,该四元数表达了以单位向量$\boldsymbol{u}$为轴、角度为$\theta$的旋转。星固系三轴单位向量的计算式为:

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

四元数偏航角φ_q的计算式为[11]:

$$\begin{aligned}\varphi_q&=\arccos(\boldsymbol{e}_T\cdot\boldsymbol{e}_x)\cdot f_{\mathrm{SIGN}}\\ f_{\mathrm{SIGN}}&=\begin{cases}-1,\arccos(\boldsymbol{e}_N\cdot\boldsymbol{e}_x)\leqslant 90^\circ\\ 1,\arccos(\boldsymbol{e}_N\cdot\boldsymbol{e}_x)>90^\circ\end{cases}\end{aligned}\tag{5}$$

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

本文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分别为$\boldsymbol{q}_{\theta_1,\boldsymbol{u}_1}$与$\boldsymbol{q}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}$,求解偏航角差值的计算式为[2]:

$$\boldsymbol{q}_{\theta_1,\boldsymbol{u}_1}*\bar{\boldsymbol{q}}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}=\boldsymbol{q}_{\theta_d,\boldsymbol{u}_d}=\begin{bmatrix}\cos\dfrac{\theta_d}{2} & -\sin\dfrac{\theta_d}{2}\cdot\boldsymbol{u}_d\end{bmatrix}\tag{6}$$

式中,$*$为四元数乘法运算;$\bar{\boldsymbol{q}}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}$为$\boldsymbol{q}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}$的共轭四元数,表示$\boldsymbol{q}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}$的同角度反向旋转;$\boldsymbol{q}_{\theta_d,\boldsymbol{u}_d}$表达了$\boldsymbol{q}_{\theta_1,\boldsymbol{u}_1}$与$\bar{\boldsymbol{q}}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}$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$\boldsymbol{u}_d$与$Z$轴平行,旋转角$\theta_d$即为$\boldsymbol{q}_{\theta_1,\boldsymbol{u}_1}$与$\boldsymbol{q}_{\theta_2,\boldsymbol{u}_2}$偏航角差值的绝对值。当$\boldsymbol{u}_d$与$Z$轴正向$\begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$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 三家分析中心的卫星姿态产品包括 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 系统,CNES 分析中心仅包括 GPS、GLONASS、Galileo,采样间隔均为 30 s。本文首先评估 2023 年全年各分析中心产品的偏航角差异,然后分析偏航机动时期各产品的偏航角变化规律。

对于 GPS 卫星,各分析中心均宣称使用文献[6]中模型,但后续发射的 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[15-19]被提出,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有待进一步的全面评估。

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 β 角随时间的变化,结果如图 1 所示,其中灰色阴影为 $|\beta|<10°$ 的时段,下文统称为地影期,此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°;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(b)某年积日的放大图所示。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°。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°,而 WUM 与 COD 产品一致性较好。

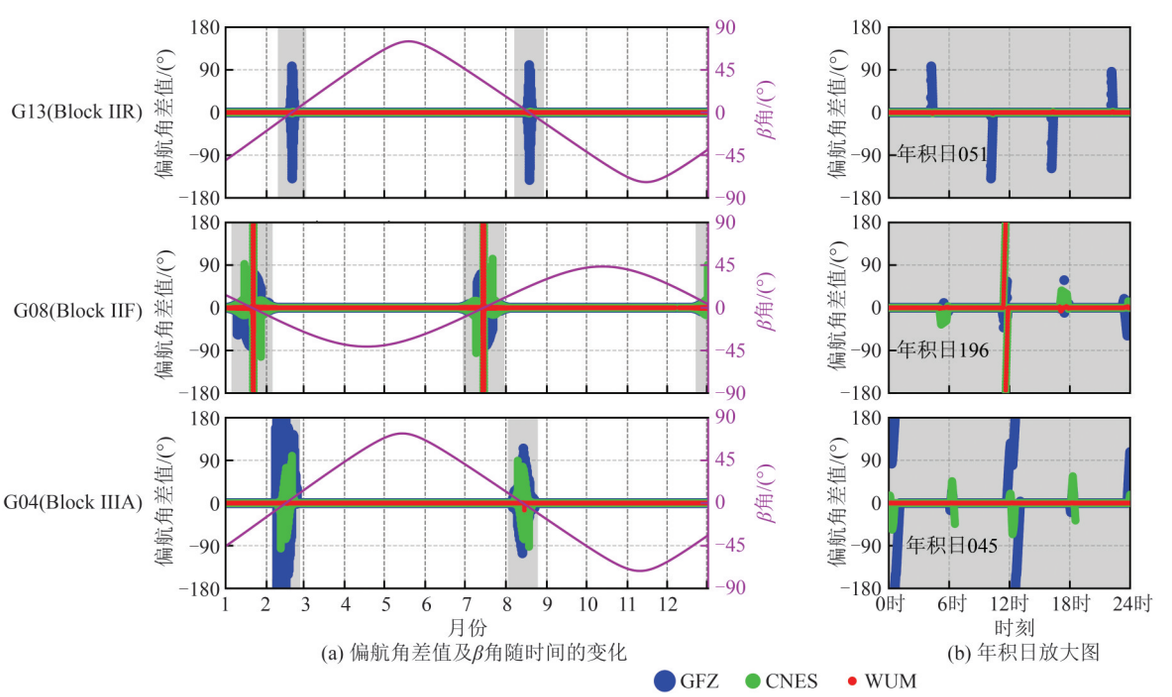


图 1　2023 年 MGEX 分析中心 GPS 卫星姿态产品偏航角差值

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

为了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,结果如图 2 所示,其中左列为正午机动,右列为午夜机动,阴影表示地影期。对于 Block IIR 卫星 G13,由于未受到地影期影响,正午机动和午夜机动的偏航规律相同[6]。COD、CNES 和 WUM 姿态产品表明,卫星偏航机动均开始于近日点($\mu=180°$)或远日点($\mu=0°$)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[11],GFZ采用了先匀速偏航到约100°偏航角、再跳变到180°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[20]结果一致;CNES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。

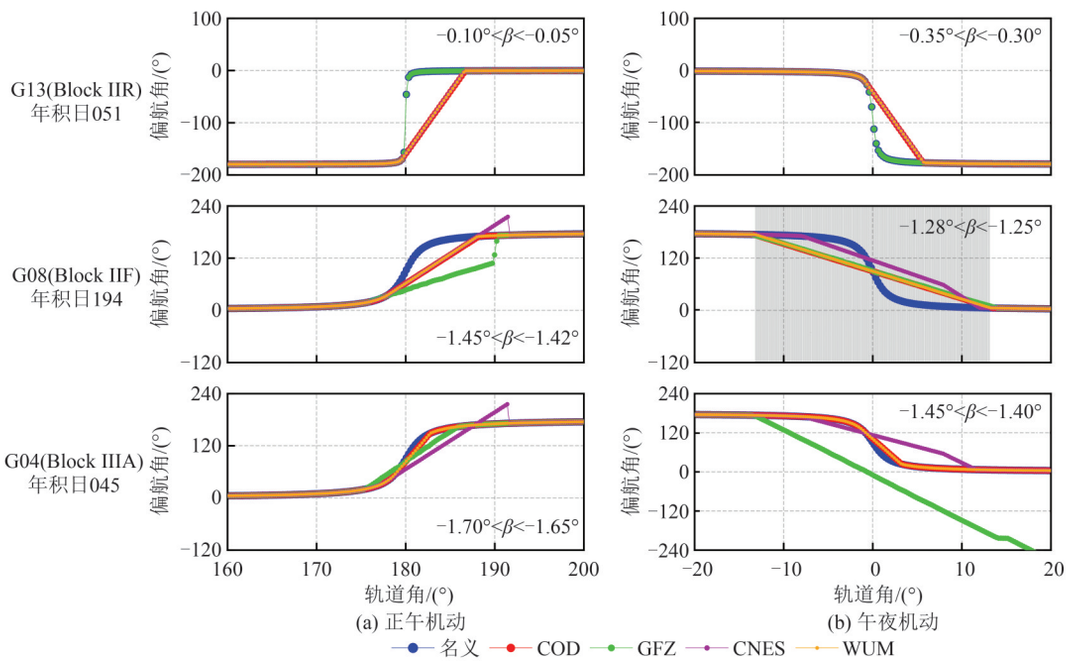


图2 偏航机动时期GPS卫星名义偏航角与四元数偏航角

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

根据欧洲航天局、美国喷气推进实验室等机构学者的研究,GPS Block IIF卫星正午机动在β角为0°附近的真实姿态会出现逆向偏航现象,因此需要在姿态模型中引入β角偏差[7-8,21],在上述研究文献中,−0.9°、−0.5°、−0.7°等不同的β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β角偏差以及采用何种经验值尚不明确。因此,图3展示了β角约为−0.8°~0°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。由图3可以看出,对于GPS Block IIF卫星,COD和GFZ分析中心并未引入β角偏差,在β角约−0.8°~0°期间的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中两幅子图的对比可以看出,CNES和WUM分析中心在GPS Block IIF卫星的姿态模型中引入了经验偏差β_{bias},但当$\beta<-0.75°$时,仅WUM姿态产品出现相较名义姿态的逆向偏航,这是由于两家分析中心的姿态模型中β_{bias}取值不同,WUM很可能采

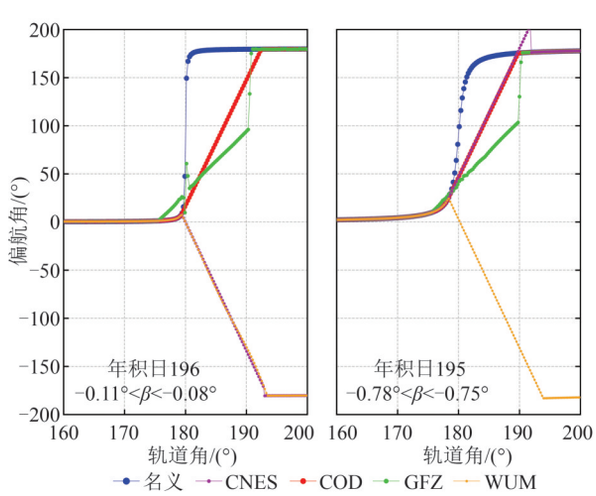


图3 小β角正午机动期间G08(Block IIF)卫星的名义偏航角与四元数偏航角

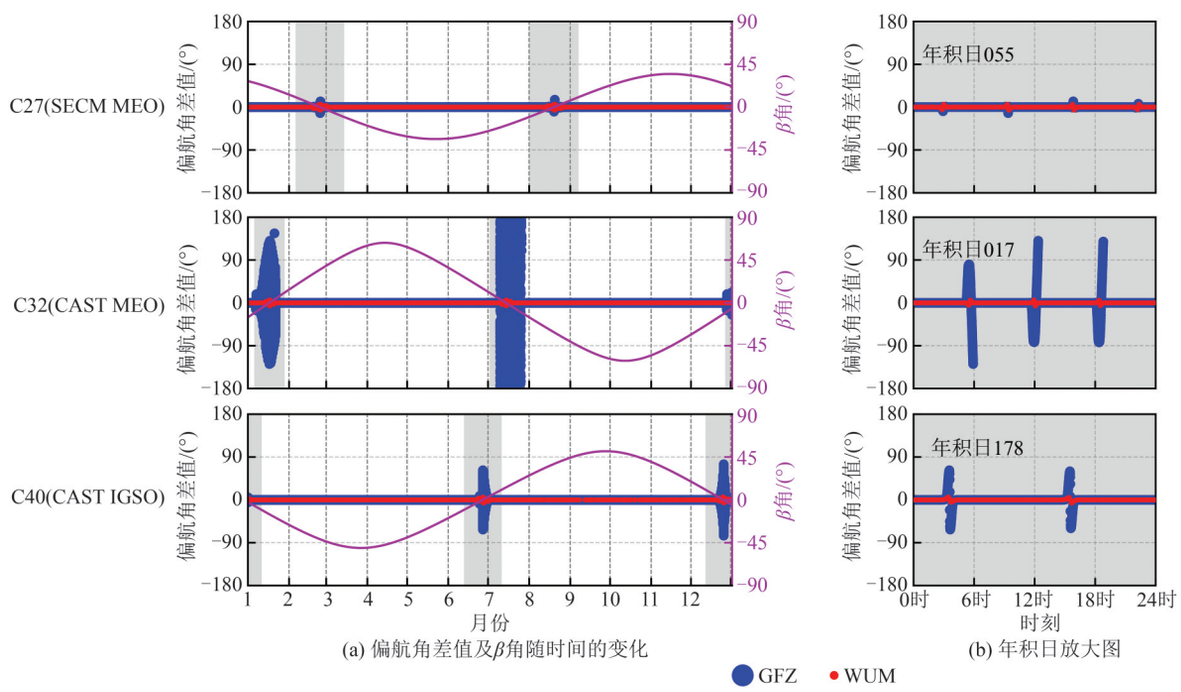
Fig. 3 Nominal and Quaternion Yaw Angles for G08 (Block IIF) Satellite in Noon Maneuver During Small Negative β Angles

用文献[7]中－0.9°的取值,而 CNES 可能采用文献[21]中－0.5°或文献[8]中－0.7°的取值。

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,即 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。

由图 4 可以看出,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° 和 6°,且出现在 $\beta=0°$ 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°;对于 CAST IGSO 卫星,WUM 和 COD 偏航角一致性较好,差值最大约为 7°,但当 $|\beta|<3°$ 时,GFZ 与 COD 偏航角差异显著。



(a) 偏航角差值及β角随时间的变化　　(b) 年积日放大图

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 的 IGSO 和 MEO 卫星均采用机动偏航控制模式,当 $\beta<3°$ 时发生正午/午夜机动[19]。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。由图 5 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°,且卫星在 μ 角大约处于[－6°,6°]或[174°,186°]范围时进行偏航机动,偏转角度为 180°。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°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 μ 角处于约[－10°,10°]或[170°,190°]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。

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 30 s,处理策略如表 1 所示。

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

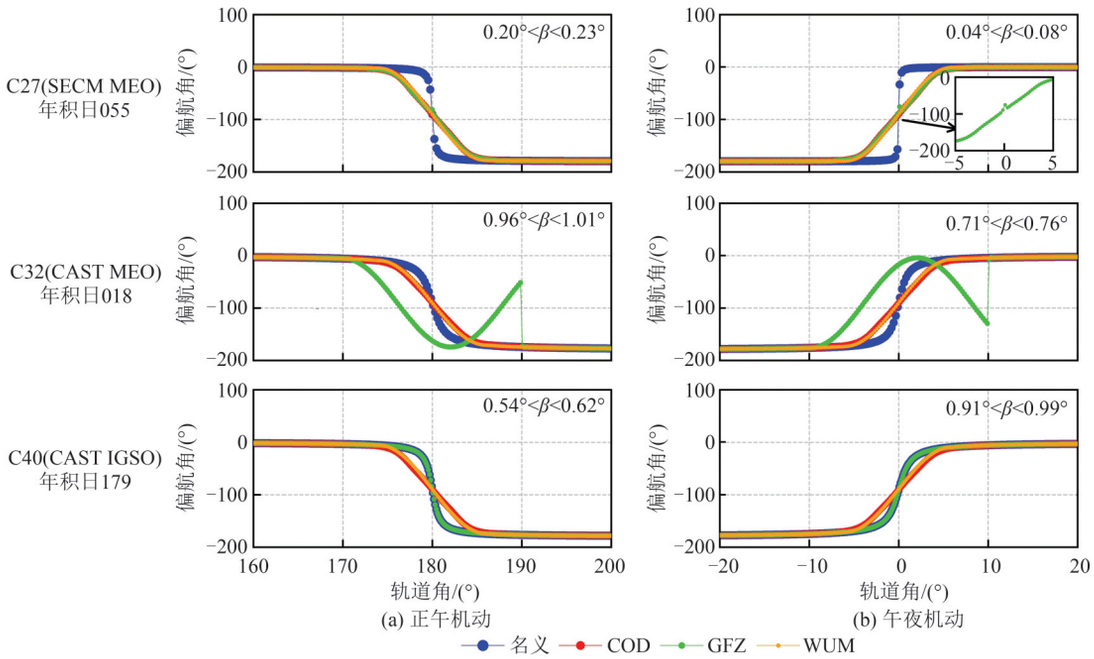


图5 偏航机动时期BDS-3卫星名义偏航角与四元数偏航角

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

表1 卫星钟差估计和精密单点定位实验处理策略

Table 1 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 PPP:白噪声估计
卫星钟差	钟差估计:白噪声 PPP:固定为WUM精密钟差产品
卫星姿态	名义姿态/四元数姿态产品
截止高度角/(°)	7
PCO/相位中心变化	igs20.atx
观测值类型	双频非差无电离层组合
对流层	干分量:Saastamoinen模型 投影函数:VMF1;残余湿分量:分段常数
接收机钟差	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
模糊度	常数,浮点解

卫星钟差,并与WUM最终精密钟差进行比较。图6是2023年年积日第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β角的变化情况,其中灰色阴影表示卫星机动时段。由图6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°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0.4 ns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0.1 ns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卫星钟差二次差的标准差(standard deviation,STD)分别为0.224 ns和0.030 ns;而使用WUM姿态产品后,STD减小为0.033 ns和0.028 ns,减小幅度分别达到85%和7%。

3.3 动态PPP实验

为了分析姿态产品对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7展示了2023年年积日第196天JOZE站(21.0°E,52.1°N)在东(E)、北(N)、高(U)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7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U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N方向和U方向误差增大幅度可达5 cm。由§2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

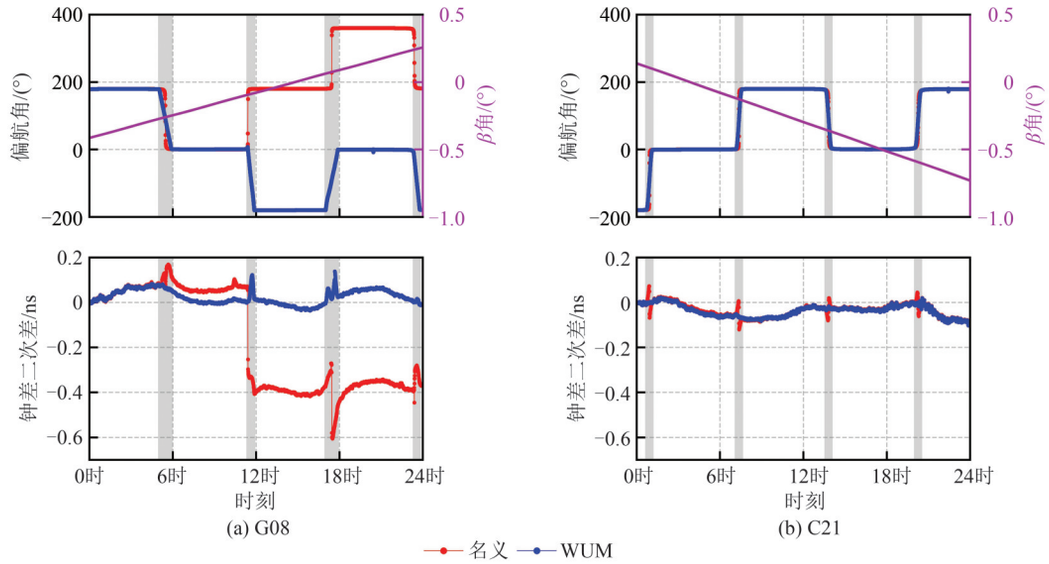


图 6　2023年年积日第196天卫星偏航角与钟差二次差时间序列

Fig. 6　Time Series of the Yaw Angles and Clock Differences on DOY 196, 2023

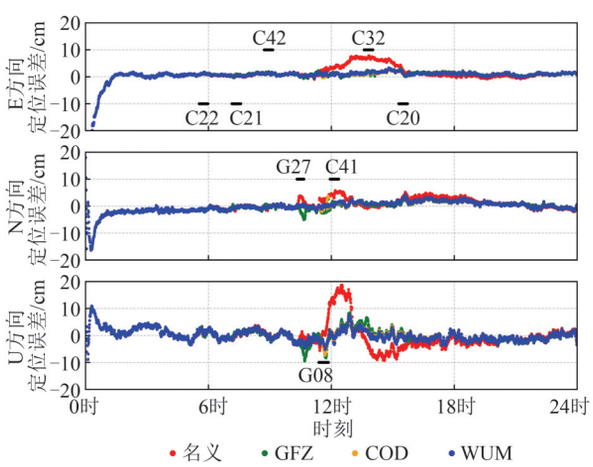


图 7　2023年年积日第196天JOZE站定位误差时间序列

Fig. 7　Time Series of Positioning Errors at JOZE Station on DOY 196, 2023

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N方向和U方向误差增大幅度约为3 cm。

图8进一步展示了JOZE站G08(Block IIF)卫星在该天11时－12时30分的偏航角、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8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7 cm和11 cm的差异,相位残差增大幅度达8 cm。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到7 cm和8.5 cm,相位缠绕改正差异可达11 cm,相位残差序列均发生了明显波动。

图9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9可知,在E、N、U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在E、N、U方向的RMS分别由2.26 cm、1.85 cm、4.26 cm减少到1.56 cm、1.48 cm、3.05 cm,减少幅度分别为31%、20%、28%。

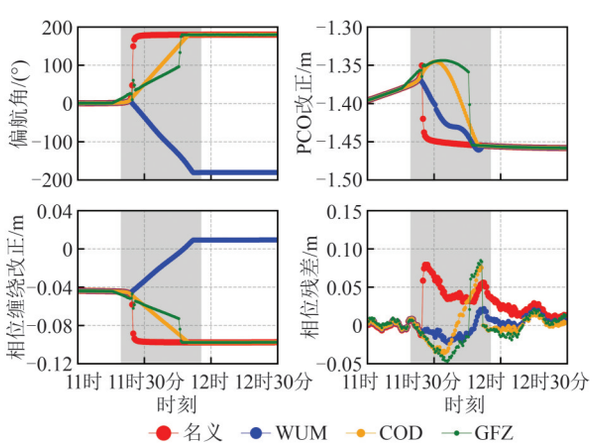


图 8　不同偏航姿态下G08卫星偏航角、卫星PCO改正、相位缠绕改正与相位残差时间序列

Fig. 8　Time Series of the Yaw Angles, PCO Corrections, Phase Wind-up Corrections and Phase Residuals for G08 Satellite Using Different Attitude Products

由§2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

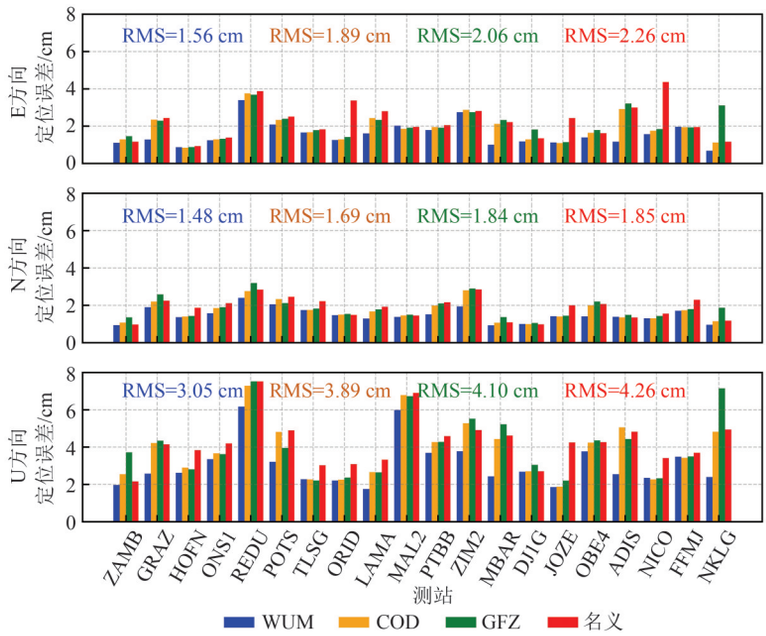


图9 不同姿态产品下的2023年年积日第196天MGEX测站定位误差RMS

Fig. 9 RMS of Positioning Errors for MGEX Stations Using Different Attitude Products on DOY 196, 2023

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,在KOKB站(159.7°W,22.1°N)进行2023年年积日第45天10时—16时的GPS/BDS-3动态PPP实验,定位误差时间序列如图10所示,其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11所示,其中灰色阴影为G04午夜机动时段。

由图11可以看出,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,E、N、U方向定位误差RMS由1.10 cm、1.13 cm、3.00 cm增大到1.43 cm、2.51 cm、7.77 cm,定位精度与采用名义姿态结果相当。值得注意的是,图11中使用GFZ的姿态产品和轨道计算得到的GFZ精密钟差二次项拟合残差STD为0.072 ns,而使用WUM的姿态产品和轨道计算得到的WUM精密钟差二次项拟合残差STD仅为0.026 ns。上述结果表明,尽管

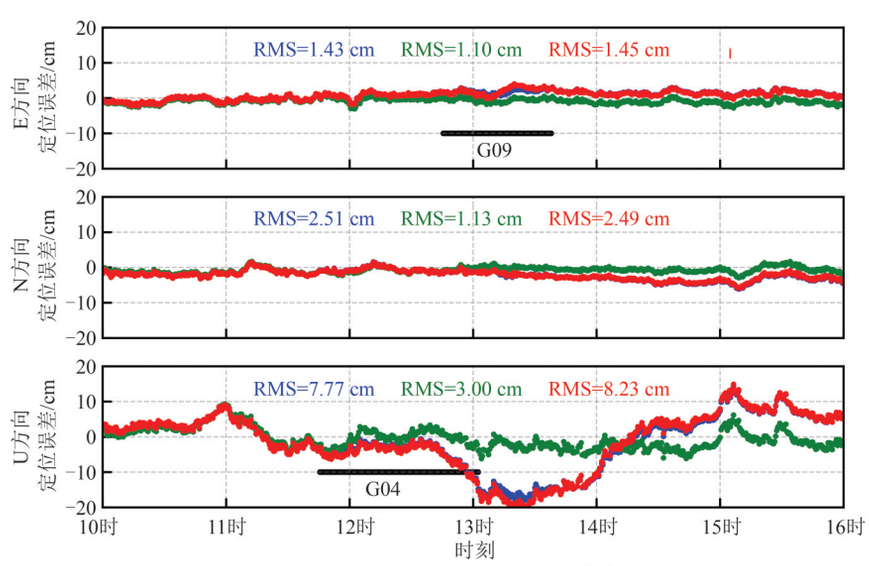


图10 2023年年积日第45天KOKB站定位误差序列

Fig. 10 Time Series of Positioning Errors at Station KOKB on DOY 45, 2023

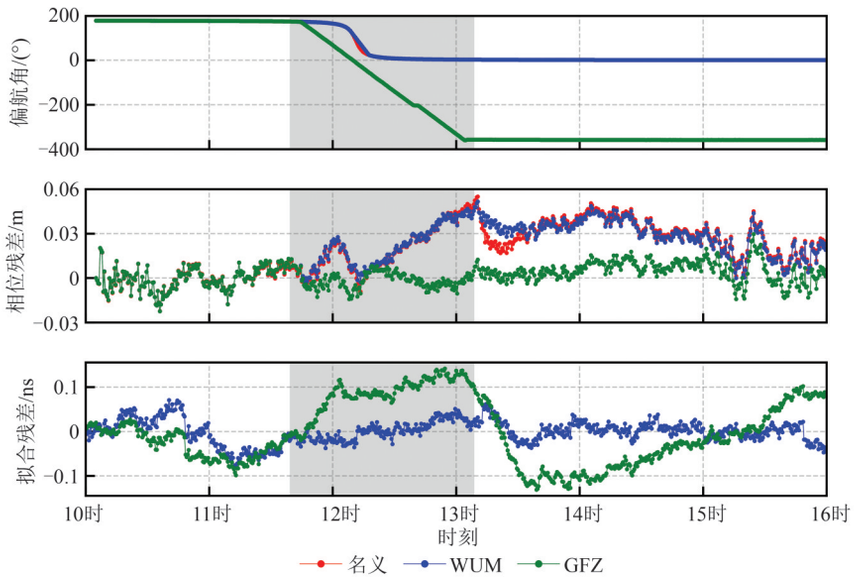


图 11　G04 卫星偏航角、PPP 相位残差和 GFZ/WUM 精密钟差产品二次项拟合残差序列

Fig. 11　Time Series of the Yaw Angles, Phase Residuals in PPP and Quadratic Polynomial Fitting Residuals of GFZ/WUM Clocks for G04 Satellite

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。

4　结　语

本文评估了 4 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。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 U 方向 PPP 精度造成高达 15 cm 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 cm、4 cm。

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 H, et al. Exchanging Satellite Attitude Quaternions for Improved GNSS Data Processing Consistency[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(6): 2441-2452.

[3] 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.
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.

[4] 沈俊烨, 莫凡, 谢俊峰, 等. 高分七号卫星姿态精度评价与分析[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(6): 131-135.
SHEN Junye, MO Fan, XIE Junfeng, et al. Evaluation and Analysis of Attitude Accuracy of Gaofen-7 Satellite[J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(6): 131-135.

[5] 徐鑫哲, 何秀凤, 周峰, 等. 不同分析中心产品精

密单点定位性能评估[J]. 导航定位学报, 2024, 12(5): 9-18.
XU Xinzhe, HE Xiufeng, ZHOU Feng, et al. Performance Assessment of Precise Point Positioning for Products from Different Analysis Centers[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2024, 12(5): 9-18.

[6] 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.
MAO Yue, SONG Xiaoyong, WANG Wei, 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.

[7] KOUBA J. A Simplified Yaw-Attitude Model for Eclipsing GPS Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(1): 1-12.

[8] KUANG D, DESAI S, SIBOIS A. Observed Features of GPS Block IIF Satellite Yaw Maneuvers and Corresponding Modeling[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 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] 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 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.

[12] 王晟哲, 刘腾, 谭冰峰, 等. 姿态四元数产品对BDS PPP的影响研究[J]. 导航定位学报, 2024, 12(3): 16-28.
WANG Shengzhe, LIU Teng, TAN Bingfeng, et al. Research on Impact of Attitude Quaternions Products on BDS PPP[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2024, 12(3): 16-28.

[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] 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.
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.

[15] 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.

[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.

[17] ZHAO Q L, WANG C, GUO J, et al. Precise Orbit and Clock Determination for BeiDou-3 Experimental Satellites with Yaw Attitude Analysis[J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 4.

[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] GB/T 42577—2023 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
GB/T 42577—2023 Definition and Description of High-Precision Application Parameters for BeiDou/Global Satellite Navigation System (GNSS) Satellites[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.

[20] STEIGENBERGER P, THOELERT S, MONTENBRUCK O. GPS III Vespucci: Results of Half a Year in Orbit[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(12): 2773-2785.

[21] 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/eclips-Dec2013note.pdf.