



引文格式:王龙雨,郭靖,李振洪,等.非差模糊度固定的高分三号SAR卫星厘米级定轨[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(9):1546-1555.DOI:10.13203/j.whugis20240077

Citation: WANG Longyu, GUO Jing, LI Zhenhong, et al. Centimeter Level Orbit Determination for GF3A SAR Satellite with Zero-Difference Ambiguity Resolution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(9): 1546-1555. DOI: 10.13203/j.whugis20240077

非差模糊度固定的高分三号SAR卫星 厘米级定轨

王龙雨¹ 郭靖¹ 李振洪^{2,3,4,5} 余琛^{2,3,4,5} 王晨^{2,4} 赵齐乐¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

3 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054

4 长安大学地学与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054

5 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

摘要:利用高分三号(GF3A)卫星星载全球定位系统(global positioning system, GPS)观测值,研究了星载接收机天线相位中心改正以及整周模糊度固定对GF3A精密定轨的影响。数据质量分析结果表明,单历元可用GPS卫星的平均数量稳定在7个左右,C1和P2码观测值多路径分别为0.89 m和0.34 m,且变化稳定。精密定轨结果表明,通过在轨校正星载GPS天线相位中心,可将径向、切向和法向重叠轨道差异分别从7.9 mm、12.8 mm和15.5 mm提升至4.3 mm、6.6 mm和8.6 mm。通过非差模糊度固定,可进一步将定轨精度提升至3.3 mm、3.5 mm和3.3 mm,实现了优于1 cm的精密定轨。相关定轨结果与重处理的Sentinel-1相当,为GF3A科学任务实施提供了有力保障。

关键词:高分三号卫星;精密定轨;非差模糊度固定;天线相位中心变化

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2024-03-08

DOI:10.13203/j.whugis20240077

文章编号:1671-8860(2024)09-1546-10

Centimeter Level Orbit Determination for GF3A SAR Satellite with Zero-Difference Ambiguity Resolution

WANG Longyu¹ GUO Jing¹ LI Zhenhong^{2,3,4,5} YU Chen^{2,3,4,5}

WANG Chen^{2,4} ZHAO Qile¹

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

2 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Loess, Xi'an 710054, China

4 Big Data Center for Geosciences and Satellites, Chang'an University, Xi'an 710054, China

5 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: Objective: This study investigates the impact of onboard receiver antenna phase center correction and zero-difference ambiguity resolution on the precise orbit determination (POD) of the Gaofen-3 (GF3A) satellite. **Methods:** The reduced-dynamic precise orbit determination for GF3A was carried out using onboard global positioning system (GPS) observation from December 2016 to February 2017, and the orbit accuracy was evaluated by orbit overlap comparison. **Results:** The data quality analysis shows that the average of available GPS satellites per epoch remains around 7. The multipath errors for C1 and P2 code observations are 0.89 m and 0.34 m. POD results indicate that the radial, along-track, and cross-track overlapping orbit differences have been reduced from 7.9 mm, 12.8 mm, and 15.5 mm to 4.3 mm, 6.6 mm, and 8.6 mm by modeling onboard

基金项目:国家自然科学基金(41974035)。

第一作者:王龙雨,硕士生,主要研究方向为低轨卫星精密定轨。longyuwang@whu.edu.cn

通讯作者:李振洪,博士,教授。zhenhong.li@chd.edu.cn

GPS antenna phase center correction. Furthermore, the orbit accuracy can be further improved to 3.3 mm, 3.5 mm, and 3.3 mm by fixing the zero-difference ambiguities. **Conclusions:** Generally, the orbit accuracy of GF3A is comparable to that of the reprocessed Sentinel-1 satellite, achieving a precision better than 1 cm. The high level of accuracy provides a reliable guarantee for the successful implementation of the GF3A scientific mission.

Key words: GF3A; precise orbit determination; zero-difference ambiguity resolution; phase center variation

2016-08-10 发射的高分三号卫星(Gaofen-3, GF3A)是国家高分辨率对地观测系统重大专项中唯一的民用微波遥感成像卫星,也是中国首颗分辨率达到 1 m 的 C 频段多极化高分辨率合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星。GF3A 卫星具有高分辨率、大成像幅宽、高辐射精度、多成像模式和长时工作的特点,能够全天候和全天时实现全球海洋和陆地信息的监视监测,对中国实施海洋开发、陆地环境资源监测和防灾减灾提供重要的技术支撑^[1]。卫星轨道精度是制约 GF3A 成像几何参数误差、形变监测精度和灾害监测与预警能力的基础^[2-3]。GF3A 设计指标要求星上的实时轨道确定精度优于 10 m,事后轨道精度优于 20 cm,为此卫星搭载双频全球定位系统(global positioning system, GPS)接收机以实现精密定轨。

在过去 20 年中,利用星载全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测数据进行国内外 SAR 卫星绝对和相对精密定轨已获得大量研究。通过使用宏模型进行卫星非保守力计算以及使用非差模糊度固定技术,卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)检核表明,德国宇航局研制的 TerraSAR-X/TanDEM-X 径向轨道精度分别达到 1.6 ± 11.4 mm 和 -3.5 ± 12.5 mm^[4]。相类似,通过采用最新的光压力模型,精化 GPS 天线相位中心位置以及实现星载 GPS 观测值模糊度固定,重处理的 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 卫星三维轨道一致性从 6~7 cm 提升至优于 1 cm^[5]。作为中国首个采用双星编队运行进行干涉测量的卫星系统,SLR 检核表明天绘二号卫星单星定轨精度优于 3 cm,星间相对定轨精度优于 2 mm^[6],而中国自主研发用于地质灾害调查监测的陆地探测一号 01 组 SAR 卫星重叠轨道和星间基线差异已分别优于 1 cm 和 1 mm^[7]。

卫星在轨飞行期间,星载 GPS 接收机天线相位中心会随空间环境发生改变,天线相位中心改正的准确建模有助于改善定轨精度。Montenbruck 等^[8]对地面校正和利用载波相位残差校正天线相位中心变化(phase center variation, PCV)进行了详细讨论,并在轨估计 TerraSAR-X 和 GRACE-B 星载 GPS 天线的 PCV,进行 PCV 改

正后,TerraSAR-X 和 GRACE-B 卫星简化动力学轨道 SLR 残差的均方根值(root mean square, RMS)均优于 1.5 cm。Jäggi 等^[9]对 GRACE 卫星分别使用残差法和直接法估计 PCV,两种方法得到了相同的 K 波段测距系统(K-band ranging, KBR)检核结果,结果表明,考虑 PCV 改正后,KBR 残差的标准差减小约 40%。胡志刚等^[10]通过残差法对 GRACE 卫星的 PCV 进行建模,考虑 PCV 估值后,GRACE 双星基线结果有明显改进,KBR 残差的标准差可达 1.46 mm。

早期研究表明,GF3A 卫星事后定轨精度达到 4 cm^[1],随着星载 GNSS 数据处理模型和算法逐步精化,其定轨性能将进一步提升。本文开展了 GF3A 卫星星载双频 GPS 观测数据的重处理,基于优化的轨道动力学模型,分析了星载接收机天线相位中心改正、整周模糊度固定对 GF3A 精密定轨的影响,实现了与 Sentinel-1 卫星相当的定轨精度。

1 GF3A 卫星状态

GF3A 卫星由中国空间技术研究院抓总研制,卫星以 ZY1000B 平台为基线,主要包括 SAR 和星载双频 GPS 接收机载荷等。卫星重量约为 2 779 kg,在轨设计寿命 8 a。卫星运行在轨道高度约 755 km 的太阳同步回归晨昏轨道,采用侧视成像飞行状态,以便大大降低重访问隔时间。卫星采用三轴稳定对地定向控制模式,指向精度优于 0.03° ,稳定度优于 $5 \times 10^{-4}/s$,具备 $\pm 31.5^\circ$ 侧摆能力,形成左侧视或右侧视飞行状态以开展 SAR 成像观测,此时卫星星固系原点为卫星质心,X 轴指向卫星前进方向,Z 轴垂直 X 轴并与卫星对地方向呈 31.5° (左侧视)或 -31.5° (右侧视)夹角,Y 轴垂直 X 和 Z 轴构成右手坐标系。

为了满足 SAR 成像对高精度轨道的需求,GF3A 采用双频 GPS 系统实现精密定轨,其由航天恒星科技有限公司研制的星载双频 GPS 接收机、优化的双频 GPS 接收机天线和前置放大器组成。星载双频 GPS 接收机可跟踪 GPS L1 和 L2 频点伪距和相位观测数据,卫星系统创新性地实现了自主健康管理,以便对双频 GPS 接收机单粒子翻转进行自主监测

与恢复,确保高性能星载GPS观测值。此外,GF3A卫星对GPS天线进行了优化设计,以便减小卫星舱体对天线接收性能的影响,提高天线相位中心的稳定性。图1为GF3A卫星星固系示意图,表1列出了双频GPS接收机天线相位中心在星固系下(satellite reference frame,SRF)的坐标。

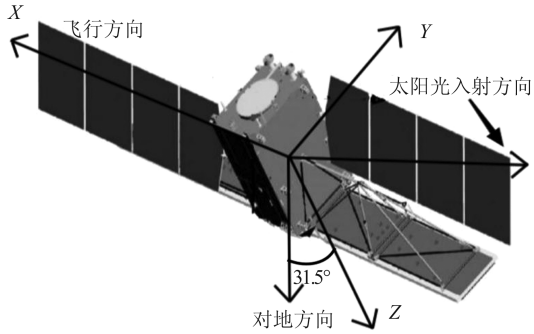


图1 GF3A卫星星固系示意图^[1]

Fig. 1 Schematic View on Satellite Reference Frame of GF3A^[1]

表1 星固系下星载GPS接收机天线L1和L2频点相位中心坐标

Tab. 1 Phase Center Offset of Onboard GPS Antenna for L1 and L2 Frequencies in SRF

频点	频率/MHz	X_{SRF}/m	Y_{SRF}/m	Z_{SRF}/m
L1	1 575.42			
L2	1 227.60	-0.520 1	0.897 1	-2.285 1

2 数据处理策略

2.1 非差模糊度固定

整周模糊度固定可将相位观测值转化为毫米级精度的测距观测值,对于利用GNSS实现高精度定位定轨至关重要。常用的单星模糊度固定方法主要有未校准相位延迟(uncalibrated phase delay,UPD)、整数钟和去耦钟法,3种方法虽然在产品和算法实现上存在一些差异,但其数学模型是等价的^[11-12]。为了满足非差模糊度固定的需求,在国际GNSS服务组织(International GNSS Service,IGS)精密单点定位模糊度固定(precise point positioning-ambiguity resolution,PPP-AR)工作组的倡议下,当前多个IGS分析中心已经提供高精度GNSS轨道、钟差及相位偏差产品以支持PPP-AR。其中,欧洲航天局空间操作中心提供伪距钟差以及宽巷(wide-lane,WL)和窄巷(narrow-lane,NL)UPD产品;法国空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNES)^[13]、欧洲定轨中心(Center for Orbit Deter-

mination in Europe, CODE)、格拉茨技术大学(Graz University of Technology,TUG)提供相位钟以及伪距和相位信号偏差产品;加拿大自然资源局提供基于去耦钟模型的轨道和偏差产品。Montenbruck等^[14-15]研究表明非差模糊度固定可将轨道精度提升30%~50%。谭涵等^[16]利用CNES发布的整数钟产品,实现了GRACE-C和GRACE-D系列卫星非差模糊度固定,并通过SLR检核等方式评估定轨结果,结果表明,相比于浮点解轨道,非差模糊度固定可分别将轨道精度提升32%和24%。金彪等^[17]利用CODE发布的观测值偏差及对应的精密星历和钟差产品实现Sentinel-6A卫星非差模糊度固定,结果表明,GPS/Galileo双系统运动学固定解轨道SLR残差RMS优于14mm。

本文采用相位钟和原始观测值的绝对信号偏差(observable-specific signal bias,OSB)产品实现GF3A卫星星载GPS数据处理和非差模糊度固定。将OSB产品直接改正到原始伪距和相位观测值上,能够消除观测值中存在的卫星端伪距和相位硬件延迟。低轨卫星 r 相对于GPS卫星 s 在第 i 个频点加入OSB产品改正后的载波 ϕ 和伪距 ρ 的观测方程可以表示为:

$$\begin{cases} \rho_{a,i}^s = R_a^s + c\delta t_a - c\delta\tilde{t}^s + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_a^s + d_{e_{a,i}} + \epsilon_{\rho_{a,i}^s} \\ \phi_{a,i}^s = R_a^s + c\delta t_a - c\delta\tilde{t}^s - \frac{f_1^2}{f_i^2} I_a^s + \lambda_i(N_{a,i}^s + d_{\phi_{a,i}^s}) + \epsilon_{\phi_{a,i}^s} \end{cases} \quad (1)$$

式中, R_a^s 为测站至卫星间几何距离; c 为真空中光速; $c\delta t_a$ 为接收机钟差; $c\delta\tilde{t}^s$ 为基于无电离层组合解算的卫星精密钟差; f_i 为第 i 个频点的频率,其相应波长为 λ_i ; I_a^s 为L1频点站星间倾斜电离层延迟; $N_{a,i}^s$ 为载波相位整周模糊度参数; $d_{e_{a,i}}$ 为第 i 个频点的伪距观测值接收机端硬件延迟; $d_{\phi_{a,i}^s}$ 为第 i 个频点的相位观测值接收机端硬件延迟; $\epsilon_{\rho_{a,i}^s}$ 和 $\epsilon_{\phi_{a,i}^s}$ 分别为第 i 个频点的伪距和相位观测值噪声。式(1)忽略了相位缠绕改正、多路径、天线相位中心改正、潮汐改正、相对论效应、高阶电离层延迟等几何误差。

本文采用双频消电离层组合(linear combination,LC)进行精密定轨,其观测方程如下:

$$\begin{cases} \rho_{a,LC}^s = R_a^s + c\delta t_a - c\delta\tilde{t}^s + \alpha d_{e_{a,1}} - \beta d_{e_{a,2}} + \epsilon_{\rho_{a,LC}^s} \\ \phi_{a,LC}^s = R_a^s + c\delta t_a - c\delta\tilde{t}^s + \lambda_1(N_{a,LC}^s + \alpha d_{\phi_{a,1}^s} - \frac{f_1}{f_2} \beta d_{\phi_{a,2}^s}) + \epsilon_{\phi_{a,LC}^s} \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} N_{a,LC}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} N_{a,1}^s - \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{a,2}^s \\ \alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \beta = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \end{cases} \quad (3)$$

考虑到接收机端伪距硬件延迟被接收机钟差吸收,式(2)可写为:

$$\begin{cases} \varrho_{a,LC}^s = R_a^s + c\delta\tilde{t}_a - c\delta\tilde{t}^s + \varepsilon_{\varrho_{a,LC}^s} \\ \phi_{a,LC}^s = R_a^s + c\delta\tilde{t}_a - c\delta\tilde{t}^s + \lambda_1 \bar{N}_{a,LC}^s + \varepsilon_{\phi_{a,LC}^s} \end{cases} \quad (4)$$

式中,

$$\begin{cases} c\delta\tilde{t}_a = c\delta t_a + \alpha d_{\varrho_1} - \beta d_{\varrho_2} \\ \bar{N}_{a,LC}^s = N_{a,LC}^s + d_{a,LC} \\ d_{a,LC} = \alpha d_{\phi_{a,1}} - \frac{f_1}{f_2} \beta d_{\phi_{a,2}} - (\alpha d_{\varrho_{a,1}} - \beta d_{\varrho_{a,2}}) / \lambda_1 \end{cases} \quad (5)$$

由于伪距和相位存在硬件延迟,消电离层组合模糊度只能作为浮点参数估计。通常将非差消电离层组合模糊度分解为整数宽巷模糊度和浮点窄巷模糊度,即:

$$\bar{N}_{a,LC}^s = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{a,WL}^s + \frac{f_1}{f_1 + f_2} \bar{N}_{a,NL}^s \quad (6)$$

$$\begin{cases} N_{a,WL}^s = N_{a,1}^s - N_{a,2}^s \\ \bar{N}_{a,NL}^s = N_{a,NL}^s + d_{a,NL} \\ N_{a,NL}^s = N_{a,1}^s \\ d_{a,NL} = d_{a,LC} \cdot (f_1 + f_2) / f_1 \end{cases} \quad (7)$$

首先,宽巷模糊度通过 HMW (Hatch-Melbourne-Wübbena) 组合进行固定:

$$\bar{N}_{a,WL}^s = \left(\frac{f_1 \phi_{a,1}^s - f_2 \phi_{a,2}^s}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 \varrho_{a,1}^s + f_2 \varrho_{a,2}^s}{f_1 + f_2} \right) / \lambda_{WL} = N_{a,WL}^s + d_{a,WL} \quad (8)$$

式中,

$$\begin{cases} d_{a,WL} = d_{\phi_{a,1}} - d_{\phi_{a,2}} - \\ \quad (f_1 d_{\varrho_{a,1}} + f_2 d_{\varrho_{a,2}}) / (f_1 + f_2) / \lambda_{WL} \\ \lambda_{WL} = c / (f_1 - f_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $d_{a,WL}$ 为接收机端宽巷小数偏差; $\bar{N}_{a,WL}^s$ 在扣除接收机端宽巷小数偏差后即可恢复宽巷模糊度的整数特性,即

$$N_{a,WL}^s = \bar{N}_{a,WL}^s - d_{a,WL} \quad (10)$$

然后,基于整数宽巷模糊度和定轨解算的消电离层组合浮点模糊度可计算窄巷模糊度 $\bar{N}_{a,NL}^s$, $\bar{N}_{a,NL}^s$ 在改正接收机端窄巷小数偏差后即可恢复窄巷模糊度的整数特性,即

$$N_{a,NL}^s = \bar{N}_{a,NL}^s - d_{a,NL} \quad (11)$$

一旦宽巷和窄巷模糊度固定后,可实现消电离层组合模糊度固定:

$$\bar{N}_{a,LC}^s = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{a,WL}^s + \frac{f_1}{f_1 + f_2} N_{a,NL}^s \quad (12)$$

由于接收机端的小数偏差通常是未知的,通过构建星间单差模糊度进行消除,即可恢复单差宽巷和窄巷模糊度的整数特性。单差消电离层组合模糊度计算如下:

$$\nabla \bar{N}_{a,LC}^{s_0,s} = \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \nabla N_{a,WL}^{s_0,s} + \frac{f_1}{f_1 + f_2} \nabla N_{a,NL}^{s_0,s} \quad (13)$$

通过式(13)获取的单差消电离层组合模糊度可作为定轨中的伪观测值,约束定轨中的非差消电离层组合模糊度参数:

$$\nabla \bar{N}_{a,LC}^{s_0,s} = \bar{N}_{a,LC}^s - \bar{N}_{a,LC}^{s_0}, W_a^{s_0,s} \quad (14)$$

式中, $W_a^{s_0,s}$ 是权重。至此,便可实现单星单差模糊度固定。

2.2 精密定轨策略

本文使用 2016-12-05 (年积日 (day of year, DOY) 340) 至 2017-02-09 (DOY 040) 共 67 天的 GF3A 星载 GPS 观测数据,基于武汉大学自主研发的定位和导航数据分析软件 (PANDA) 进行 GF3A 卫星简化动力学定轨,表 2 列出了详细的数据处理策略。数据处理时,采用 30 h 定轨弧段,也即从第一天 21 点开始至第三天 3 点结束。在保守力模型方面,本文使用 130 阶 EIGEN-6C2 模型计算地球非球形引力,并考虑时变项至 50 阶^[18], N 体引力采用 JPL DE430 行星星历^[19];地球固体潮汐、相对论效应等根据 IERS Conventions 2010^[20] 计算;海潮模型采用 120 阶 EOT11a 模型^[21];对于光压力、大气阻力和地球反照辐射等非保守力建模,本文采用盒翼模型^[22] 描述卫星结构,大气密度模型使用 DTM2013^[23],采用云与地球辐射能量系统 (clouds and the earth's radiant energy system, CERES) 辐射数据计算地球反照辐射^[24]。GPS 卫星天线相位中心采用 IGS14_2247.ATX 改正,星载接收机天线相位中心改正分别采用表 1 中先验值或者在轨标定值。由于数据处理期间 IGS 仅提供高精度轨道、钟差等产品,缺乏相位偏差产品,因此本文采用 IGS 第三次重处理中的 TUG 的高精度产品进行精密定轨和非差模糊度固定。定轨时,除估计弧段初始时刻卫星位置和速度外,为了补偿模型误差,分别估计切向和法向常偏量经验力参数和 1 cpr (one cycle per resolution) 的周期性经验力参数,其他待估参数还包括接收机钟差和模糊度。非差模糊度固定采用 §2.1 中所描述的算法,固定采用 Dong 等^[25] 提出的 boot strapping 方法,相应宽巷和窄巷模糊度的取整阈值分别是 0.25 周和 0.15 周。

表2 GF3A卫星精密定轨策略

Tab. 2 Precise Orbit Determination Strategy of the GF3A

统计项	项目	处理策略
动力学模型	地球重力场	EIGEN-6C2, 130×130阶, 考虑时变项至50阶 ^[18]
	N体引力	JPL DE430行星星历 ^[19]
	地球固体潮、固体极潮、相对论效应	IERS Conventions 2010 ^[20]
	海潮	EOT11a海潮模型 ^[21]
	海洋极潮	Desai 30×30阶 ^[26]
	大气阻力	DTM2013大气密度模型 ^[23]
	地球反照辐射	盒翼模型 ^[22] , CERES数值模型 ^[24]
	太阳光压	盒翼模型 ^[22]
观测模型	GPS天线相位中心	IGS14_2247.ATX
	GF3A星载GPS接收机天线相位中心	厂商提供天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)值或在轨PCO、PCV标定值
	GF3A星载GPS观测值	非差双频消电离层组合, 30 s采样率
	观测值噪声	伪距: 0.4 m, 相位: 2 mm
	观测值权重	卫星之间根据高度角定权
	截止高度角	0°
	GPS精密轨道	IGS第三次重处理TUG产品, 采样间隔: 5 min
	GPS精密钟差	IGS第三次重处理TUG产品, 采样间隔: 30 s
待估参数	相位偏差产品	IGS第三次重处理TUG产品
	GF3A卫星定轨弧段初始状态	初始历元三维惯性系位置和速度
	经验力参数	切向、法向常量及1 cpr经验力参数, 每90 min估计一组
	载波相位观测值模糊度	每个模糊度弧段、每颗卫星一个
	GF3A星载GPS接收机钟差	作为白噪声每个历元估计

本文共解算了6组轨道,具体策略见表3。每个实验方案使用6位字母来表示,NO或EO表示定轨中PCO采用表1中的厂商值或者进行在轨估计;NV或EV表示GF3A星载接收机天线PCV不改正或者采用在轨标定值进行改正;FA或IA表示浮点模糊度解或模糊度固定解。由于GF3A卫星未搭载卫星激光角反射器,本文采用30 h相邻定轨弧段间的6 h重叠轨道进行轨道精度评定。

表3 实验方案具体策略

Tab. 3 Specific Strategy of the Experimental Schemes

实验方案	PCO改正	PCV改正	模糊度
NONVFA	采用表1值	不考虑	浮点解
EONVFA	在轨估计	不考虑	浮点解
EOEVFA	在轨估计	在轨估计	浮点解
NONVIA	采用表1值	不考虑	固定解
EONVIA	在轨估计	不考虑	固定解
EOEVIA	在轨估计	在轨估计	固定解

3 结果与分析

3.1 星载GPS观测值质量

本文从实际和有效跟踪卫星数目、数据完整率和多路径3个方面对GF3A星载GPS观测数据

质量进行分析。实际卫星个数表示双频伪距和载波相位观测值至少跟踪到一个观测值的卫星数目,有效跟踪卫星个数表示双频伪距和相位观测值全部被跟踪到的卫星数目。图2显示了2017年DOY 013 21时至DOY 015 3时共30 h定轨弧段实际(红色)和有效(蓝色)可跟踪到特定GPS卫星数目的历元占总历元的百分比。从图2中可见,实际观测和有效观测卫星数集中在6~9颗,实际跟踪到的卫星数目的中位数为8,而有效跟踪卫星数目的中位数为7。对实际跟踪到的卫星数目而言,全部历元均能跟踪到至少4颗GPS卫星;对有效跟踪到的卫星数目而言,有超过98%的历元能跟踪到5颗及以上数目的GPS卫星。上述结果表明,GF3A卫星星载GPS接收机具有良好的跟踪性能。

图3给出了整个研究期间GF3A卫星星载GPS观测数据缺失率,本文将观测数据缺失率定义为双频伪距和载波相位观测值有任意缺失的观测值个数与全部的双频伪距和载波相位观测值个数的比值。由图3可知,GF3A卫星每日观测数据缺失率在9.3%左右,在2016年DOY 364至2017年DOY 015之间数据缺失率略高于其他时段,其原因需要进一步分析验证。

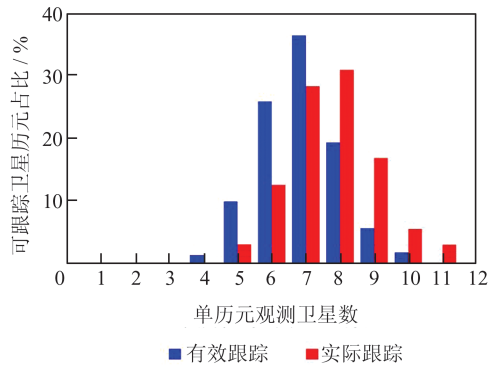


图2 单历元实际跟踪和有效跟踪到GPS卫星平均数量

Fig. 2 Numbers of All Tracked and Useful Tracked GPS Satellites per Epoch

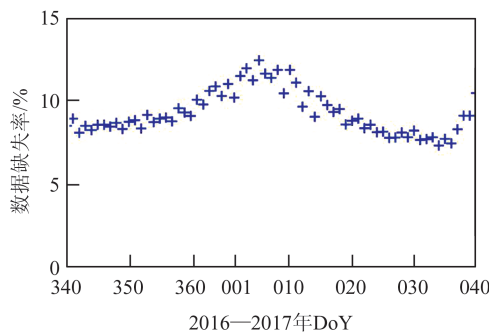


图3 GF3A 观测数据缺失率

Fig. 3 Observations Loss Rate for GF3A

图4给出了GF3A卫星星载GPS数据在L1和L2频点上的伪距观测值多路径误差,其根据文献[27]中所列公式计算。整体而言,GF3A星载GPS伪距观测值变化较为平稳,天与天差异较小;在该时段内,L1和L2频率上的伪距多路径误差分别为0.89 m和0.34 m,其主要是由于星载接收机跟踪的是C1和P2码。上述结果验证了GF3A卫星对GPS天线的优化设计减小了卫星舱体对天线接收性能的影响,提高了观测值的稳定性。

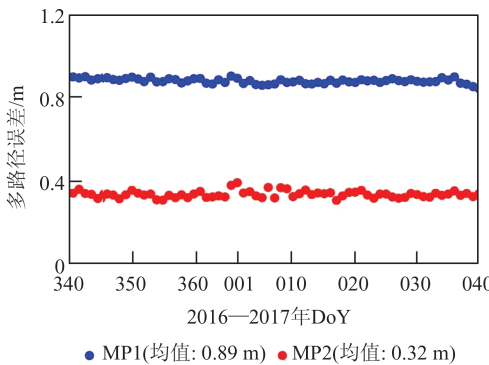


图4 GF3A 卫星伪距观测值多路径误差

Fig. 4 Pseudorange Observation Multi-path Error of GF3A

3.2 天线相位中心在轨标定

由于卫星实际在轨环境与实验室环境存在较大差异,以及由于卫星机动所引起的质心位置变化,将导致卫星天线相位中心产生变化,而准确估计卫星在轨PCO和PCV是提高定轨精度的有效方法。本文基于定轨观测值的残差来实现星载GPS天线PCV的在轨标定,而卫星PCO参数则与轨道参数一起求解。考虑到X和Y方向PCO参数与轨道状态和动力学参数相关性较强,本文仅估计Z方向PCO参数。

图5给出了EONVFA和EONVIA的Z轴PCO估值,这些估计值表示为相对于表1先验值的偏差。整体而言,在2016年DOY 340至2017年DOY 040这67天之内,二者变化都较为稳定,标准差(standard difference, STD)约为0.13 cm,但是二者之间存在约0.26 cm的系统性偏差,且模糊度固定解的Z向PCO参数估计值相对于表1中所列先验值更为接近。Montenbruck等^[28]研究发现,与卫星轨道同时估计的Z向PCO参数与所使用的力模型密切相关。由于卫星径向加速度误差与Z向PCO耦合,因此Z向PCO参数的估计值不能准确地表示从天线相位中心到卫星质心的实际变化。当固定模糊度后可以有效减少这种耦合性,改善Z向PCO估计的准确性。

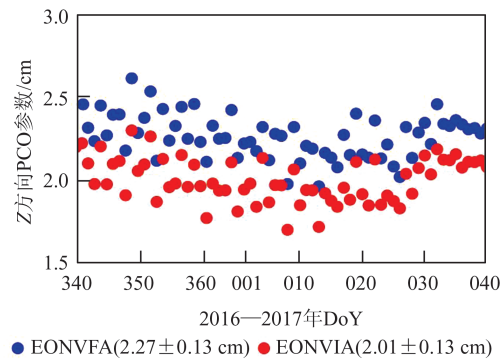


图5 GF3A基于模糊度浮点解和固定解的Z方向天线相位中心偏移(图例为均值和标准差)

Fig. 5 Antenna Phase Center Offset Estimations in Z Direction Based on Ambiguity-Float and Ambiguity-Fixed Solutions for GF3A(the Average and STD Values are Given in the Legend)

图6给出了基于残差法估计的方位角和高度角分辨率均为2°的双频无电离层组合观测值的PCV值,其分别采用2016年DOY 340至2017年DOY 040共67天EONVFA和EONVIA简化动力学定轨观测值残差计算而得,方位角起算方向为星固系+X轴。在本文数据处理时段内,GF3A卫星处于右侧

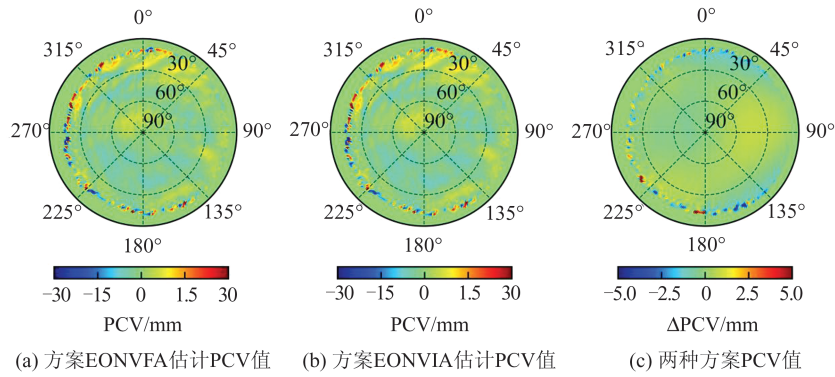


图6 GF3A天线相位中心变化空间分布

Fig. 6 PCV Spatial Distribution for GF3A

视飞行状态(为卫星的主要姿态模式),因此姿态固定为右视模式。图1给出了卫星对地右侧视 31.5° 成像示意图,其相应的星固系 Z 轴与轨道径向呈 31.5° 夹角。在计算星固系至惯性系转换矩阵时,首先将卫星星固系绕 X 轴旋转 31.5° 以获得轨道坐标系,其相应转换矩阵为:

$$T_{s-o} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 31.5^\circ & \sin 31.5^\circ \\ 0 & -\sin 31.5^\circ & \cos 31.5^\circ \end{bmatrix} \quad (15)$$

其次,卫星轨道坐标系到惯性系的转换矩阵为 $T_{o-j} = [b_1 \ b_2 \ b_3]$, b_1 、 b_2 和 b_3 分别为:

$$b_3 = \frac{-r}{|r|}, b_2 = \frac{b_3 \times v}{|b_3 \times v|}, b_1 = b_2 \times b_3 \quad (16)$$

式中, r 和 v 是低轨卫星在惯性系下的位置和速度矢量,将二者相乘可以得到星固系到惯性系的转换矩阵: $T_{s-j} = T_{s-o} \cdot T_{o-j}$,从而确定低轨卫星名义姿态,以计算相应高度角和方位角,并给出残差和相位中心变化随高度角和方位角的变化结果。

从图6中可见,较大的PCV值集中于低高度角区域,最大可达到30 mm,其主要是由于低高度角观测值误差较大、相应残差较大所引起。此外,在卫星飞行方向(方位角为 $-45^\circ \sim 45^\circ$)的低高度角(30° 以下)区域,集中了数值较大的PCV,PCV值随高度角增加而逐渐减小,在 60° 以上PCV值又逐渐变大。将二者求差(图6(c)),可以发现二者差异主要集中于 30° 以下低高度角区域,其主要受观测噪声影响。

图7给出了NONVFA、EONVFA以及EOEVFA三组解2017年DoY 013简化动力学定轨双频无电离层组合观测值残差。图7(a)为采用表1值进行PCO改正(NONVFA)所得到的观测值残差,图7(b)为仅估计PCO(EONVFA)所得到的观测值残差,图7(c)为改正PCV并同时估计PCO(EOEVFA)所得到的观测值残差。从图7可以看到,当加入PCV改正后,观测值残差显著减小。

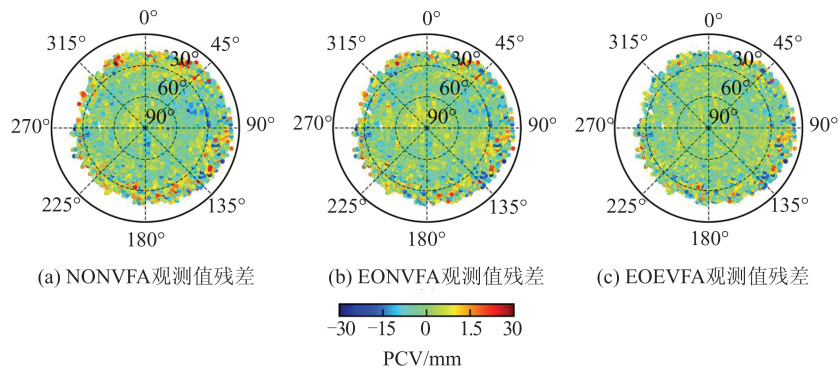


图7 GF3A 2017年DOY 013消电离层组合观测值残差

Fig. 7 Observation Residuals for DOY 013 of 2017 for the Ionosphere-Free Linear Combination of GF3A

为了验证星载GPS天线PCO和PCV改正对定轨的影响,本文分别统计表2中所列出的GF3A卫星浮点解轨道重叠弧段RMS值,图8给出了其轨道差值在切向、法向和径向的时间序

列,表4中列出了具体统计值。从图8和表4中可见,相比于使用PCO先验值的NONVFA轨道,估计 Z 向PCO参数方案(EONVFA)所得到的轨道精度在切向、法向和径向上均有提升,提

升幅度分别约为 34.4%、31.0% 和 32.9%。在加入 PCV 改正后,方案 EOEVFA 相比于方案 EONVFA,在切向、法向和径向的轨道精度分别从 8.4 mm、10.7 mm 和 5.3 mm 提升至 6.6 mm、8.6 mm 和 4.3 mm,提升幅度分别约为 21.4%、19.6% 和 18.9%。在 3 个方向中,轨道切向精度提升最显著,法向和径向轨道精度也有明显改善,三维 RMS 从 15.0 mm 降低至 12.0 mm,这表明正确估计星载 GPS 接收机天线 PCO 和 PCV 有助于提升定轨效果。

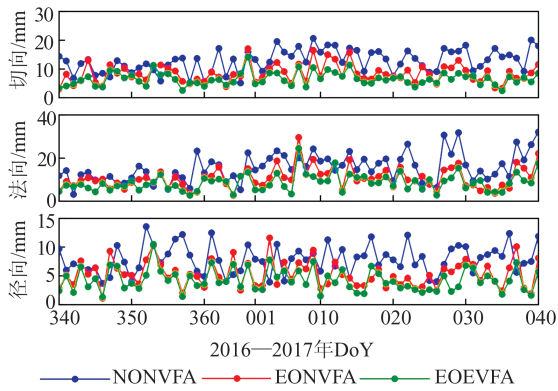


图 8 PCV 应用前后轨道重叠误差在各方向上的 RMS

Fig. 8 RMS of Orbit Overlapping Errors in Different Directions Before and After PCV Correction

表 4 PCV 应用前后 GF3A 卫星轨道重叠弧段 RMS/mm

Tab. 4 Overlapping Orbit RMS for GF3A Before and After PCV Correction/mm

方案	切向	法向	径向	3D
NONVFA	12.8	15.5	7.9	22.1
EONVFA	8.4	10.7	5.3	15.0
EOEVFA	6.6	8.6	4.3	12.0

3.3 非差模糊度固定

图 9 给出了 2016 年 DOY 340 至 2017 年 DOY 040 的 GF3A 星载 GPS 观测值宽巷和窄巷模糊度小数偏差。整体而言,宽巷模糊度残差的标准差为 0.19 周,宽巷模糊度残差在 0.25 周以内的占比达 77.91%;窄巷模糊度残差的标准差为 0.07 周,窄巷模糊度残差在 0.15 周以内的占比达 97.17%。这表明其相位观测值具有良好的整数特性,宽巷和窄巷模糊度残差均表现出正态分布特征,窄巷模糊度残差比宽巷模糊度残差的分布更加集中。

图 10 进一步给出了研究时段内每一天定轨中宽巷和窄巷模糊度固定率,其定义为成功固定的宽巷/窄巷星间单差模糊度个数与在阈值范围

内的星间单差模糊度个数的比值。整体而言,宽巷和窄巷模糊度固定率都较高,在 94% 以上,平均宽巷和窄巷模糊度固定率分别为 98.15% 和 97.12%。但由于观测值缺失较多,卫星轨道精度有所降低,导致 2017 年 DOY 001—020 模糊度固定率降低。

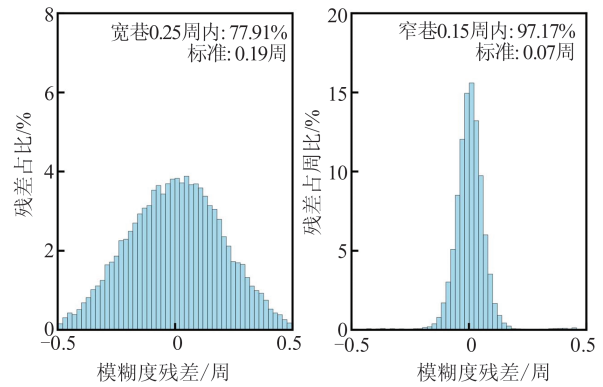


图 9 GF3A 卫星模糊度残差分布图

Fig. 9 Distribution of Ambiguity Residuals for GF3A

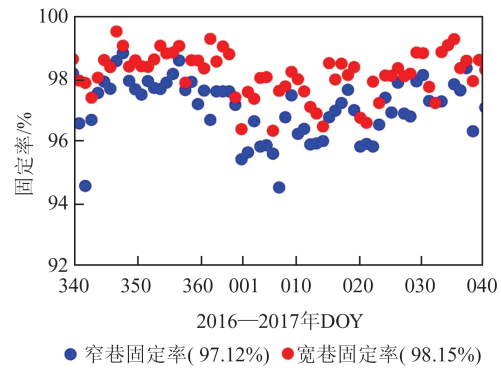


图 10 GF3A 卫星模糊度固定率

Fig. 10 Ambiguity Fixing Rate of GF3A

统计结果表明,相比于浮点解(EOEVFA),模糊度固定(EOEVIA)后,GF3A 卫星轨道切向、法向和径向误差分别从 6.6 mm、8.6 mm 和 4.3 mm 提升至 3.5 mm、3.3 mm 和 3.3 mm,提升幅度分别约为 47.0%、61.6% 和 23.3%。轨道法向精度提升最显著,切向和径向轨道精度也有明显改善,表明非差模糊度固定对定轨结果有较大影响。图 11 给出了 GF3A 卫星模糊度固定前后的轨道重叠误差。受观测数据影响,2017 年 DOY 001—020 定轨精度较其他天有所降低。

4 结 语

本文利用最新的数据处理策略和轨道动力学模型,重新处理了 GF3A 卫星 2016 年 DOY 340 至 2017 年 DOY 040 的星载双频 GPS 观测数据。

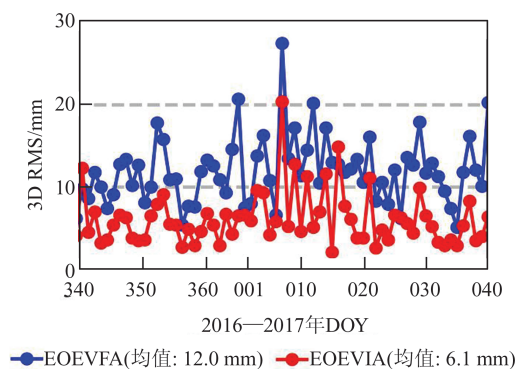


图 11 GF3A 卫星轨道浮点解和固定解轨道重叠误差 3D RMS

Fig. 11 3D RMS of Orbit Overlapping Errors in Ambiguity-Float and Ambiguity-Fixed Solutions for GF3A

星载 GPS 观测数据质量分析表明,单历元可用 GPS 卫星的平均数量稳定在 7 个左右。通过残差法估计天线 PCV,实际定轨结果表明 PCV 的在轨标定可将轨道切向精度提升约 21.4%。使用 IGS 第三次重处理 TUG 发布的 GPS 精密轨道、钟差和相位偏差产品进行星间单差模糊度固定时,宽巷模糊度固定率为 98.15%,窄巷模糊度固定率为 97.12%,模糊度固定后,GF3A 卫星 3D 重叠轨道差异为 6.1 mm,满足 GF3A 卫星定轨精度的设计要求,为后续科学任务实施提供了有力保障。

参 考 文 献

- [1] Zhang Qingjun. System Design and Key Technologies of the GF-3 Satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269-277. (张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 269-277.)
- [2] Li Zhenhong, Liu Jingnan, Xu Caijun. Error Analysis in InSAR Data Processing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 72-76. (李振洪, 刘经南, 许才军. InSAR 数据处理中的误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(1): 72-76.)
- [3] He Ping, Xu Caijun. Research on Effects of Satellite Orbit Error on Sar Interferometry [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(5): 54-57. (何平, 许才军. 卫星轨道误差对 SAR 干涉处理的影响研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5): 54-57.)
- [4] Hackel S, Gisinger C, Balss U, et al. Long-Term Validation of TerraSAR-X and TanDEM-X Orbit Solutions with Laser and Radar Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 762.
- [5] Fernández M, Peter H, Arnold D, et al. Copernicus Sentinel - 1 POD Reprocessing Campaign [J]. *Advances in Space Research*, 2022, 70(2): 249-267.
- [6] Lou Liangsheng, Liu Zhiming, Zhang Hao, et al. TH-2 Satellite Engineering Design and Implementation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(10): 1252-1264. (楼良盛, 刘志铭, 张昊, 等. 天绘二号卫星工程设计与实现[J]. 测绘学报, 2020, 49(10): 1252-1264.)
- [7] Liu Bin, Zhang Li, Ge Daqing, et al. Application of InSAR Monitoring Large Deformation of Landslides Using Lutan-1 Constellation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230478. (刘斌, 张丽, 葛大庆, 等. 陆地探测-1号卫星滑坡大变形 InSAR 监测应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230478.)
- [8] Montenbruck O, Garcia-Fernandez M, Yoon Y, et al. Antenna Phase Center Calibration for Precise Positioning of LEO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(1): 23-34.
- [9] Jäggi A, Dach R, Montenbruck O, et al. Phase Center Modeling for LEO GPS Receiver Antennas and Its Impact on Precise Orbit Determination [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(12): 1145-1162.
- [10] Hu Zhigang, Zhao Qile, Guo Jing, et al. Research on Impact of GPS Phase Center Variation on Precise Orbit Determination of Low Earth Orbit Satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(S1): 34-38. (胡志刚, 赵齐乐, 郭靖, 等. GPS 天线相位中心校正对低轨卫星精密定轨的影响研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(S1): 34-38.)
- [11] Geng J H, Meng X L, Dodson A H, et al. Integer Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning: Method Comparison [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(9): 569-581.
- [12] Shi J B, Gao Y. A Comparison of Three PPP Integer Ambiguity Resolution Methods [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(4): 519-528.
- [13] Loyer S, Perosanz F, Mercier F, et al. Zero-Difference GPS Ambiguity Resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 991-1003.
- [14] Montenbruck O, Hackel S, Jäggi A. Precise Orbit Determination of the Sentinel-3A Altimetry Satellite Using Ambiguity-Fixed GPS Carrier Phase Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(7): 711-726.
- [15] Montenbruck O, Hackel S, van den Ijssel J, et al. Reduced Dynamic and Kinematic Precise Orbit Determination for the Swarm Mission from 4 Years of

- GPS Tracking[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 79.
- [16] Tan Han, Wu Jiaqi. Accuracy Assessment for LEO Precise Orbit Determination with Single-Difference Ambiguity Resolution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1460-1469. (谭涵, 吴家齐. 星间单差模糊度固定的低轨卫星精密定轨精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1460-1469.)
- [17] Jin Biao, Chen Shanshan, Li Min, et al. Kinematic Precise Orbit Determination of Sentinel-6A Satellite with GPS/Galileo Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220455. (金彪, 陈姗姗, 李敏, 等. 星载 GPS/Galileo 数据 Sentinel-6A 卫星运动学精密定轨研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220455.)
- [18] Förste C, Balmino S L, Flechtner F, et al. A Preliminary Update of the Direct Approach GOCE Processing and a New Release of EIGEN-6C [C]// American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, San Francisco, USA, 2012.
- [19] Folkner W M, Williams J G, Boggs D H, et al. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431 [R]. Interplanetary Network Progress Report, 2014.
- [20] Petit G, Luzum B. IERS Conventions (2010)[R]. IERS Technical Note No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany, 2010
- [21] Rieser D, Mayer-Gürr T, Savcenko R, et al. The Ocean Tide Model EOT11a in Spherical Harmonics Representation [R]. Technical Note, Institute of Theoretical Geodesy and Satellite Geodesy (ITSG), Graz, Austria, 2012.
- [22] Wen H, Kruizinga G, Paik M, et al. GRACE-FO Level-1 Data Product User Handbook [EB/OL]. [2023-12-21] ftp://isdceftp.gfz-potsdam.de/grace-fo/DOCUMENTS/Level-1/GRACE-FO_L1_Data_Product_User_Handbook_20190911.pdf.
- [23] Bruinsma S. The DTM-2013 Thermosphere Model [J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2015, 5: A1.
- [24] Priestley K J, Smith G L, Thomas S, et al. Radiometric Performance of the CERES Earth Radiation Budget Climate Record Sensors on the EOS Aqua and Terra Spacecraft Through April 2007[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28(1): 3-21.
- [25] Dong D N, Bock Y. Global Positioning System Network Analysis with Phase Ambiguity Resolution Applied to Crustal Deformation Studies in California [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B4): 3949-3966.
- [26] Desai S D. Observing the Pole Tide with Satellite Altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C11): 3186.
- [27] Zhu Jingran. Quality Analysis and Software Implementation of Multi-system GNSS Real-Time Data [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (朱静然. 多系统 GNSS 实时数据质量分析及软件实现[D]. 南京: 东南大学, 2015.)
- [28] Montenbruck O, Hackel S, Wermuth M, et al. Sentinel-6A Precise Orbit Determination Using a Combined GPS/Galileo Receiver[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(9): 109.