

引文格式:匡开发,杨宇晨,温芳瑩,等.非差模糊度固定北斗三号实时滤波精密定轨[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1223-1231.DOI:10.13203/j.whugis20230055



Citation: KUANG Kaifa, YANG Yuchen, WEN Fangying, et al. BDS-3 Real-Time Filtered Precise Orbit Determination with Undifferenced Ambiguity Resolution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1223-1231. DOI: 10.13203/j.whugis20230055

# 非差模糊度固定北斗三号实时滤波精密定轨

匡开发<sup>1</sup> 杨宇晨<sup>1</sup> 温芳瑩<sup>1</sup> 陈 铮<sup>1</sup> 韩厚增<sup>1</sup> 王 坚<sup>1</sup>

1 北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京,102616

**摘要:**模糊度固定是全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)高精度数据处理的关键。不同于传统的双差模糊度固定,非差模糊度固定无需构建双差模糊度,更为简单高效。将非差模糊度固定引入北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 global navigation satellite system,BDS-3)中地球轨道卫星实时滤波定轨,分析非差模糊度固定对实时滤波轨道收敛速度及精度的影响。利用国际GNSS服务组织全球测站网观测数据进行实时滤波精密定轨实验,以德国地学研究中心的事后快速轨道为参考评定精度。结果表明:非差模糊度固定对收敛速度影响很小,但可以有效提升轨道切向、法向精度;相比浮点解轨道,固定解轨道径向、切向、法向精度分别提高1.0%、18.5%、19.5%,误差均方根分别达到6.0、7.4、6.2 cm;受切向、法向影响,中国空间技术研究院类型卫星轨道精度优于上海微小卫星工程中心类型卫星轨道;顾及窄巷固定率与轨道精度的相关性,窄巷固定率可以作为实时轨道质量的重要指标之一。实时滤波轨道精度的进一步提升有赖于BDS-3数据处理模型的持续精化。

**关键词:**非差模糊度固定;实时滤波定轨;BDS-3;精密定轨

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2023-02-14

DOI:10.13203/j.whugis20230055

文章编号:1671-8860(2023)07-1223-09

## BDS-3 Real-Time Filtered Precise Orbit Determination with Undifferenced Ambiguity Resolution

KUANG Kaifa<sup>1</sup> YANG Yuchen<sup>1</sup> WEN Fangying<sup>1</sup> CHEN Zheng<sup>1</sup>  
HAN Houzeng<sup>1</sup> WANG Jian<sup>1</sup>

1 School of Geomatics and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China

**Abstract:** Objectives: Ambiguity resolution is the key for global navigation satellite system(GNSS) high-accuracy data processing. Different from traditional double-difference ambiguity resolution, the undifferenced ambiguity resolution does not need to construct double-difference ambiguity, which is simpler and more efficient. Methods: The undifferenced ambiguity resolution is introduced into the BeiDou-3 satellite navigation system (BDS-3) medium Earth orbit satellite real-time filtered orbit determination, and the influence of undifferenced ambiguity resolution on the convergence speed and accuracy of the real-time filtered orbit is analyzed. With observation data from International GNSS Service global network stations, simulated real-time filtered precise orbit determination experiment is conducted with German Research Centre for Geosciences post-processed precise orbit for accuracy assessment. Results: The results indicate that while undifferenced ambiguity resolution has little effect on the convergence, it can effectively improve the orbit tangential/normal accuracy; compared with the ambiguity-float orbit, the accuracy of ambiguity-fixed orbit is improved by 1.0%, 18.5%, 19.5% and the error root mean square reaches 6.0, 7.4, 6.2 cm for the radial, tangential, normal directions respectively. Affected by the tangential, normal direction, the orbit accuracy of China Academy of Space Technology type satellites is better than that of Shanghai Engineering Center for

基金项目:国家自然科学基金(42204025)。

第一作者:匡开发,博士,讲师,主要从事北斗/GNSS精密数据处理方面的研究。kuangkaifa@bucea.edu.cn

通讯作者:陈铮,博士生,实验师。chenzheng@bucea.edu.cn

Microsatellites type satellites; considering the correlation between narrow lane ambiguity fixed rate and orbit accuracy, narrow lane fixed rate can be used as one of the important indicators of real-time orbit quality. **Conclusions:** Further improvement of real-time filtered orbit relies on the continuous refinement of BDS-3 data processing models.

**Key words:** undifferenced ambiguity resolution; real-time filtered orbit determination; BDS-3; precise orbit determination

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)利用卫星轨道和钟差实现时空基准传递,因此,实时轨道是GNSS精密定位的关键基础之一,尤其是对于采用状态空间改正的精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术<sup>[1-2]</sup>。为满足实时用户需求,国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)于2013年成立实时服务(real-time service, RTS)工作组,致力于实时轨道/钟差产品估计与综合<sup>[3]</sup>。

GNSS卫星实时轨道确定目前主要采用事后拟合预报以及实时滤波估计两种模式<sup>[4]</sup>。事后拟合预报模式通过处理事后观测数据,拟合得到轨道初始状态,进而预报得到实时轨道,该模式的精度影响因素主要包括背景模型、拟合弧长以及预报弧长,其中,背景模型和拟合弧长影响轨道预报初始状态,而轨道预报弧长越短,轨道预报精度则越高。在IGS的推动下,GNSS数据处理背景模型不断完善,但太阳辐射压(solar radiation pressure, SRP)等模型仍有不足,并且短期内难以提高。对轨道拟合弧长的分析表明,基于扩展的欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)轨道模型(extended CODE orbit model, ECOM)的预报轨道精度在拟合弧长为40 h左右时最高<sup>[5-6]</sup>。因此,缩短预报弧长成为提高轨道预报精度的重要途径<sup>[7]</sup>。以IGS超快(IGS ultra-rapid, IGU)轨道为例,由于数据处理延迟,实际可用的实时轨道为预报部分的3~9 h,严重限制了实时轨道精度。相比事后拟合预报,实时滤波估计直接处理实时观测数据得到实时轨道,最大限度地缩短了实时轨道延迟,并且能够及时调整参数,实时轨道的精度更为均匀<sup>[8-10]</sup>。

模糊度固定是GNSS数据处理的重要影响因素。受卫星端以及接收机端硬件延迟影响,非差模糊度失去整数特性,无法直接固定。传统数

$$\begin{cases} C_{r,i}^s = \rho + (c \cdot \Delta t_r + d_{r,C_c,c} + d_{r,C_v,v}) - (c \cdot \Delta t^s + d_{C_c,c}^s + d_{C_v,v}^s) + \gamma_i \cdot I_{r,1}^s + m_r^s \cdot T_r + \epsilon_{r,C_i}^s \\ L_{r,i}^s = \rho + (c \cdot \Delta t_r + d_{r,L_c,c} + d_{r,L_v,v}) - (c \cdot \Delta t^s + d_{L_c,c}^s + d_{L_v,v}^s) - \gamma_i \cdot I_{r,1}^s + m_r^s \cdot T_r - B_{r,i}^s + \epsilon_{r,L_i}^s \end{cases} \quad (1)$$

式中, $C_{r,i}^s$ 、 $L_{r,i}^s$ 分别表示经过天线相位、测站潮汐

据处理利用双差算子消除硬件延迟,实现双差模糊度固定<sup>[11]</sup>。双差模糊度固定的关键在于独立双差模糊度定义,文献[11]提出从基线和网两个层面构建独立双差模糊度,进而利用固定成功率实现独立双差模糊度的优化选取与排序。文献[12]分析表明,在双差模糊度固定后, GPS 实时滤波轨道径向、切向、法向均方根(root mean square, RMS)误差分别由 2.3、5.9、3.4 cm 提高至 2.2、4.7、2.6 cm。不同于复杂的双差模糊度固定,非差模糊度固定通过选取独立模糊度基准消除秩亏,由于能够实现 PPP 模糊度固定,非差模糊度固定成为研究热点<sup>[13-15]</sup>。研究表明,相比双差模糊度固定,非差模糊度固定在卫星轨道精度、测站坐标重复性以及计算效率上均有不同程度的提高<sup>[16-19]</sup>。文献[8-10]的分析表明,固定非差模糊度后, GPS 和伽利略卫星导航系统(Galileo satelliten navigation system, Galileo)实时滤波轨道三维误差 RMS 由浮点解的 8~9 cm 提高至固定解的约 5 cm。

上述研究充分证明了非差模糊度固定的优势,然而,相比 GPS 和 Galileo 实时滤波精密定轨,目前对非差模糊度固定应用于北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 global navigation satellite system, BDS-3)实时滤波定轨的讨论仍然较少,BDS-3已于2020年7月正式开通全球服务,研究非差模糊度固定 BDS-3 中地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星实时滤波定轨,对于提升 BDS-3 全球实时服务精度具有重要意义。因此,本文将围绕 BDS-3 MEO 卫星实时滤波定轨,重点分析非差模糊度固定对实时滤波轨道收敛速度及精度的影响。

## 1 模型算法

对于接收机  $r$  和卫星  $s$ , 频率  $i$  上的 GNSS 原始伪距与相位观测方程可以表示为<sup>[9]</sup>:

位移、对流层干延迟、相对论效应以及相位缠绕

等改正后的伪距、相位观测值;  $\rho$  表示接收机参考点与卫星质心之间的几何距离;  $c$  表示真空中的光速;  $\Delta t_r$  和  $\Delta t^s$  分别表示接收机和卫星钟差;  $d_{r,C_i,c}$ ,  $d_{r,L_i,v}$  分别表示接收机伪距、相位硬件延迟时不变部分;  $d_{r,C_i,v}$ ,  $d_{r,L_i,v}$  分别表示接收机伪距、相位硬件延迟时变部分;  $d_{C_i,c}^s$ ,  $d_{L_i,v}^s$  分别表示卫星伪距、相位硬件延迟时不变部分;  $d_{C_i,v}^s$ ,  $d_{L_i,v}^s$  分别表示卫星伪距、相位硬件延迟时变部分;  $\gamma_i = f_1^2/f_i^2$ ,  $f_i$  表示载波频率;  $I_{r,1}^s$  表示  $f_1$  频率上的电离层延迟;  $m_r^s$  表示对流层延迟投影函数;  $T_r$  表示天顶对流层湿延迟(zenith wet delay, ZWD);  $B_{r,i}^s$  表示相位模糊度;  $\epsilon_{r,C_i}^s$ ,  $\epsilon_{r,L_i}^s$  分别表示伪距、相位残差。

$$\begin{cases} C_{r,1}^s = \rho + c \cdot \Delta t_{r,12} - c \cdot \Delta t_{12}^s + \gamma_1 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_r^s \cdot T_r + \hat{\epsilon}_{r,C_1}^s \\ C_{r,2}^s = \rho + c \cdot \Delta t_{r,12} - c \cdot \Delta t_{12}^s + \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_r^s \cdot T_r + \hat{\epsilon}_{r,C_2}^s \\ L_{r,1}^s = \rho + c \cdot \Delta t_{r,12} - c \cdot \Delta t_{12}^s - \gamma_1 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_r^s \cdot T_r - \hat{B}_{r,1}^s + \hat{\epsilon}_{r,L_1}^s \\ L_{r,2}^s = \rho + c \cdot \Delta t_{r,12} - c \cdot \Delta t_{12}^s - \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_r^s \cdot T_r - \hat{B}_{r,2}^s + \hat{\epsilon}_{r,L_2}^s \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} \hat{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s + b_{12}(d_{r,C_1,c} - d_{C_1,c}^s - d_{r,C_2,c} + d_{C_2,c}^s - d_{r,L_1,v} + d_{L_1,v}^s + d_{r,L_2,v} - d_{L_2,v}^s) \\ \hat{B}_{r,1}^s = B_{r,1}^s + (a_{12} - b_{12})(d_{r,C_1,c} - d_{C_1,c}^s) + 2b_{12}(d_{r,C_2,c} - d_{C_2,c}^s) - d_{r,L_1,c} + d_{L_1,c}^s \\ \hat{B}_{r,2}^s = B_{r,2}^s + 2a_{12}(d_{r,C_1,c} - d_{C_1,c}^s) - (a_{12} - b_{12})(d_{r,C_2,c} - d_{C_2,c}^s) - d_{r,L_2,c} + d_{L_2,c}^s \\ \hat{\epsilon}_{r,C_1}^s = \epsilon_{r,C_1}^s - (a_{12} - b_{12})(d_{r,L_1,v} - d_{L_1,v}^s) - 2b_{12}(d_{r,L_2,v} - d_{L_2,v}^s) + d_{r,C_1,v} - d_{C_1,v}^s \\ \hat{\epsilon}_{r,C_2}^s = \epsilon_{r,C_2}^s - 2a_{12}(d_{r,L_1,v} - d_{L_1,v}^s) + (a_{12} - b_{12})(d_{r,L_2,v} - d_{L_2,v}^s) + d_{r,C_2,v} - d_{C_2,v}^s \end{cases}$$

利用 IF 组合消除电离层一阶项, 同时忽略高阶项, 得到双频 IF 组合观测方程为:

$$\begin{cases} C_{r,12}^s = \rho + c \Delta t_{r,12} - c \Delta t_{12}^s + m_r^s T_r + \hat{\epsilon}_{r,C_{12}}^s \\ L_{r,12}^s = \rho + c \Delta t_{r,12} - c \Delta t_{12}^s + m_r^s T_r - \hat{B}_{r,12}^s + \hat{\epsilon}_{r,L_{12}}^s \end{cases} \quad (4)$$

固定测站坐标, 基于卫星参考轨道, 线性化得到:

$$\begin{cases} \Delta C_{r,12}^s = \partial \rho / \partial \mathbf{o}^s \cdot \Delta \mathbf{o}^s + c \Delta t_{r,12} - c \Delta t_{12}^s + m_r^s T_r + \hat{\epsilon}_{r,C_{12}}^s \\ \Delta L_{r,12}^s = \partial \rho / \partial \mathbf{o}^s \cdot \Delta \mathbf{o}^s + c \Delta t_{r,12} - c \Delta t_{12}^s + m_r^s T_r - \hat{B}_{r,12}^s + \hat{\epsilon}_{r,L_{12}}^s \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\Delta C_{r,12}^s$  和  $\Delta L_{r,12}^s$  表示 IF 组合伪距/相位验前

$$\begin{cases} \Delta C_{r,12}^s = \partial \rho / \partial \mathbf{o}^s \cdot \Phi(t, t_0) \cdot \Delta \mathbf{o}^s(t_0) + c \Delta t_{r,12} - c \Delta t_{12}^s + m_r^s T_r + \hat{\epsilon}_{r,C_{12}}^s \\ \Delta L_{r,12}^s = \partial \rho / \partial \mathbf{o}^s \cdot \Phi(t, t_0) \cdot \Delta \mathbf{o}^s(t_0) + c \Delta t_{r,12} - c \Delta t_{12}^s + m_r^s T_r - \hat{B}_{r,12}^s + \hat{\epsilon}_{r,L_{12}}^s \end{cases} \quad (7)$$

式(7)即为基于双频 IF 组合观测值的浮点解实时定轨模型。采用宽巷(wide lane, WL)/窄巷(narrow lane, NL)级联模糊度固定策略, 双频 IF 组合浮点模糊度可以分解为:

$$\hat{B}_{r,12}^s = \lambda_{LC} \left( \frac{f_2}{f_1 - f_2} N_{r,WL}^s + N_{r,NL}^s + D_{r,NL}^s - D_{r,WL}^s \right) \quad (8)$$

IGS 分析中心数据处理目前采用双频消电离层(ionospheric-free, IF)组合钟差基准, 其定义为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} c \cdot \Delta t_{r,12} = c \cdot \Delta t_r + a_{12}(d_{r,C_1,c} + d_{r,L_1,v}) + b_{12}(d_{r,C_2,c} + d_{r,L_2,v}) \\ c \cdot \Delta t_{12}^s = c \cdot \Delta t^s + a_{12}(d_{C_1,c}^s + d_{L_1,v}^s) + b_{12}(d_{C_2,c}^s + d_{L_2,v}^s) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $a_{12} = f_1^2/(f_1^2 - f_2^2)$  和  $b_{12} = -f_2^2/(f_1^2 - f_2^2)$  表示 IF 组合系数。

基于 IGS 钟差基准进行重参数化, 得到 GNSS 双频原始伪距与相位观测方程为:

利用 IF 组合消除电离层一阶项, 同时忽略高阶项, 得到双频 IF 组合观测方程为:

残差;  $\partial \rho / \partial \mathbf{o}^s$  表示几何距离对卫星轨道参数的偏导数;  $\Delta \mathbf{o}^s$  表示卫星轨道参数改正数。

顾及卫星轨道参数转移关系:

$$\Delta \mathbf{o}^s(t) = \Phi(t, t_0) \cdot \Delta \mathbf{o}^s(t_0) \quad (6)$$

式中,  $\Delta \mathbf{o}^s(t_0)$  和  $\Delta \mathbf{o}^s(t)$  分别表示  $t_0$  和  $t$  时刻的卫星轨道参数改正数;  $\Phi(t, t_0)$  表示  $t_0$  到  $t$  时刻的状态转移矩阵。

将式(6)代入式(5), 可以得到:

式中,  $\lambda_{LC}$  为 IF 组合模糊度波长;  $N_{r,*}^s$  为宽巷或窄巷整数模糊度;  $D_{r,NL}^s$  和  $D_{r,WL}^s$  为接收机和卫星窄巷未校正相位延迟(uncalibrated phase delay, UPD)。利用 MW(Melbourne - Wübbena)以及 IF 组合观测值, 分别得到宽巷、窄巷浮点模糊度  $\hat{N}_{r,WL}^s$ ,  $\hat{N}_{r,NL}^s$ , 进而得到宽巷、窄巷非差模糊度固定观测方程为:

$$\begin{cases} \hat{N}_{r,\text{WL}}^s = N_{r,\text{WL}}^s + D_{r,\text{WL}} - D_{\text{NL}}^s \\ \hat{N}_{r,\text{NL}}^s = N_{r,\text{NL}}^s + D_{r,\text{NL}} - D_{\text{WL}}^s \end{cases} \quad (9)$$

由于秩亏,根据式(9)无法直接估计,需要引入整数模糊度以及UPD基准。对于UPD基准,

$$P_0 = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} [f\left(\frac{i - |a - n|}{\sqrt{2}\sigma}\right) - f\left(\frac{i + |a - n|}{\sqrt{2}\sigma}\right)] \quad (10)$$

式中, $P_0$ 表示成功率; $f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$ ; $a$ 为经

过UPD改正的浮点模糊度; $\sigma$ 为 $a$ 的标准差; $n$ 为最接近 $a$ 的整数。

基于整数模糊度以及UPD,为得到固定解轨道,构建约束方程为:

$$\hat{B}_{r,12}^s = \lambda_{\text{LC}} \left( \frac{f_2}{f_1 - f_2} N_{r,\text{WL}}^s + N_{r,\text{NL}}^s + D_{r,\text{NL}} - D_{\text{NL}}^s \right), P = 1 \times 10^6 \quad (11)$$

非差模糊度固定实时滤波定轨总体流程如图1所示,主要包括浮点解轨道确定、非差模糊度固定、固定解轨道确定3个部分。

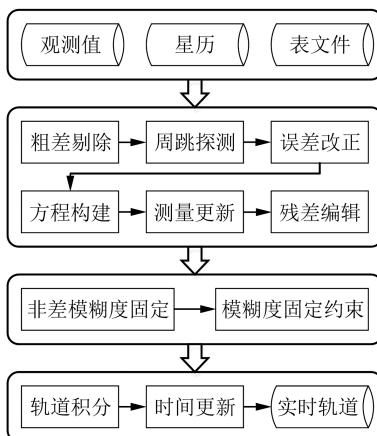


图1 非差模糊度固定实时滤波定轨流程图

Fig. 1 Flowchart of Real-Time Filtered Orbit Determination with Undifferenced Ambiguity Resolution

## 2 北斗实时滤波精密定轨实验分析

实验采用2022年1月约90个IGS测站的事后观测数据模拟实时处理,共24颗BDS-3 MEO卫星,其中14颗卫星由中国空间技术研究院(China Academy of Space Technology, CAST)研制,10颗由上海微小卫星工程中心(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, SECM)研制。IGS分析中心目前主要采用B1I、B3I信号处理BDS-3数据<sup>[23]</sup>,为与分析中心一致,采用中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)观测值相关偏差(observation specific bias, OSB)产品<sup>[24]</sup>对伪距进行改正。表1和表2给出了实时滤波定

可以采用卫星端零和基准;对于整数模糊度基准,则可以根据GNSS模糊度图论算法确定<sup>[15,21]</sup>。

在非差模糊度固定中,为确定模糊度是否能够固定,采用的成功率函数为<sup>[22]</sup>:

$$P_0 = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} [f\left(\frac{i - |a - n|}{\sqrt{2}\sigma}\right) - f\left(\frac{i + |a - n|}{\sqrt{2}\sigma}\right)] \quad (10)$$

轨处理策略以及参数设置。实时轨道精度评定以德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)事后快速轨道<sup>[25]</sup>为参考,统计误差RMS。

表1 BDS-3实时滤波定轨处理策略

Tab. 1 Processing Strategy of BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Determination

项目	模型
观测值	非差IF组合伪距、相位,截止高度角10°,采样率30 s
定权策略	原始伪距、相位噪声为0.3 m、0.3 cm,高度角权函数为1/sine
天线相位	igs14.atx <sup>[26]</sup> ,接收机端采用GPS相近频率数值替代
卫星姿态	建模
对流层	干延迟:Saastamoinen公式 <sup>[27]</sup> ;气压:GPT2w模型 <sup>[28]</sup> ;湿延迟:估计,随机游走模型,Vienna投影函数 <sup>[29]</sup> ;水平梯度:不考虑
电离层	一阶项:IF组合消除;高阶项:不考虑
潮汐位移	固体潮、海潮、极潮,IERS Conventions 2010 <sup>[30]</sup> ,FES2004海潮模型 <sup>[31]</sup>
相位缠绕	改正 <sup>[32]</sup>
接收机钟差	估计,白噪声模型
卫星钟差	估计,白噪声模型
相位模糊度	估计,弧段常数
地球引力	EGM2008模型 <sup>[33]</sup> ,IERS Conventions 2010 <sup>[30]</sup>
三体引力	日月以及其他行星,点质量模型,JPL DE405行星坐标
潮汐摄动	固体潮、海潮、极潮,IERS Conventions 2010 <sup>[30]</sup> ,FES2004海潮模型 <sup>[31]</sup>
相对论效应	IERS Conventions 2010 <sup>[30]</sup>
太阳辐射压	5参数ECOM模型 <sup>[34]</sup>
地球辐射压	不考虑
天线反推力	根据IGS卫星元数据计算 <sup>[35]</sup>
测站坐标	固定为IGS SINEX解
EOP	固定为IERS Bulletin A解
数值积分器	RKF7(8),30 s步长
参数估计器	扩展卡尔曼滤波

为分析实时滤波轨道收敛情况,统计了实时滤波轨道误差星座均值RMS,结果如图2所示。以连续1 h轨道误差RMS不大于20 cm作为收敛标准,浮点解轨道径向、切向、法向收敛时间分别约为9.53、6.36、6.63 h,固定解轨道径向、切向、法

向收敛时间分别约为 9.47、6.36、6.63 h, 由于收敛阈值比较宽松, 浮点解和固定解收敛时间差异很小。收敛之后, 轨道误差基本稳定, 其中, 1月 27 日存在轨道误差变大现象, 其原因是 C27 卫星连续 4 个历元(01:14:00—01:15:30)观测数据缺失, 导致滤波出现重收敛, 采用相同的收敛标准, 浮点解轨道径向、切向、法向收敛时间分别约为 6.21、2.07、3.03 h, 固定解轨道径向、切向、法向

重收敛时间分别约为 5.05、2.13、2.93 h, 相比 1 月 1 日的收敛阶段, 重收敛速度明显加快, 这主要得益于测站钟差、对流层湿延迟等参数的约束, 在 C27 卫星数据缺失时, 测站相关参数仍然可以由其他卫星数据准确确定。在非差模糊度固定后, 轨道径向误差 RMS 几乎没有变化, 而切向、法向误差 RMS 明显减小, 表明切向、法向受观测模型影响更大。

表 2 BDS-3 实时滤波定轨参数设置

Tab. 2 Parameter Setting of BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Determination

参数	初始状态	初始方差	过程噪声
卫星位置	GFZ 事后解	$1 \times 10^4 \text{ m}^2$	$0 \text{ m}^2$
卫星速度	GFZ 事后解	$1 \times 10^{-4} (\text{m/s})^2$	$1 \times 10^{-16} \times 30 (\text{m/s})^2$
SRP 系数	$D_0$ 为 $-100.0 \text{ nm/s}^2$ , 其余为 $0.0 \text{ nm/s}^2$	$1 \times 10^4 (\text{nm/s}^2)^2$	$1 \times 10^{-7} \times 30 (\text{nm/s}^2)^2$
卫星钟差	GFZ 事后解	$1 \times 10^4 \text{ m}^2$	
接收机钟差	伪距单点定位	$1 \times 10^4 \text{ m}^2$	
测站 ZWD	0.0 m	$0.25 \text{ m}^2$	$3 \times 10^{-8} \times 30 \text{ m}^2$
相位模糊度	对齐伪距	$1 \times 10^6 \text{ m}^2$	$0 \text{ m}^2$
卫星宽巷 UPD	0.0 周	$1 \times 10^2 \text{ 周}^2$	$1 \times 30 \text{ 周}^2$
接收机宽巷 UPD	0.0 周	$1 \times 10^2 \text{ 周}^2$	$1 \times 30 \text{ 周}^2$
卫星窄巷 UPD	0.0 周	$1 \times 10^2 \text{ 周}^2$	$1 \times 30 \text{ 周}^2$
接收机窄巷 UPD	0.0 周	$1 \times 10^2 \text{ 周}^2$	$1 \times 30 \text{ 周}^2$

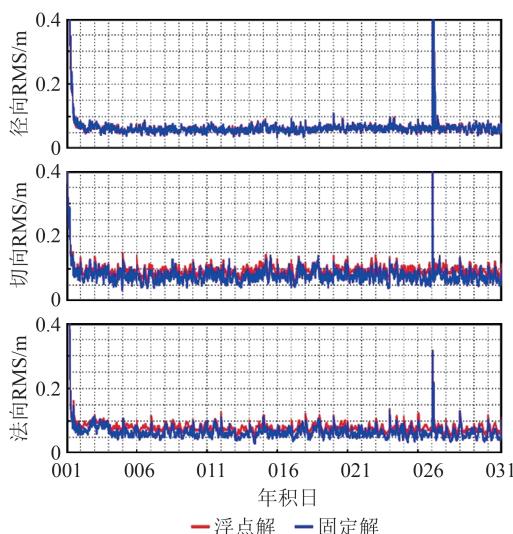


图 2 BDS-3 实时滤波轨道误差星座均值 RMS  
Fig. 2 BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Error  
Constellation-Mean RMS

为分析实时滤波轨道精度, 不考虑收敛阶段(1月 1 日所有卫星)以及重收敛阶段(1月 27 日 C27 卫星), 以 d 为单位, 统计所有卫星浮点解以及固定解径向、切向、法向轨道误差 RMS, 结果如图 3 所示。一方面, 相比浮点解轨道, 固定解轨道在切向、法向上精度提升明显, 尤其是法向, 在非

差模糊度固定后, 误差 RMS 明显减小, 部分数值甚至达到 4 cm 以内; 另一方面, C27~C30 卫星以及 C43~C44 卫星的浮点解切向、法向轨道误差 RMS 存在偏大现象, 在非差模糊度固定后, 这一现象得到一定程度的削弱, 但是仍然存在, 与切向、法向不同, C19~C22 卫星和 C43 卫星的浮点解以及固定解径向轨道误差 RMS 均存在偏大现象, 表明这些卫星的轨道模型仍需改进。需要说明的是, 实验期间, 所有卫星均未进入地影期间, 因而并不存在卫星偏航姿态异常, 上述误差 RMS 偏大现象与卫星偏航姿态无关。

进一步统计所有卫星浮点解以及固定解轨道误差单天均值 RMS 分布, 结果如图 4 所示。对于浮点解, 轨道误差 RMS 分布整体比较分散, 其中, 径向误差 RMS 均值约为 6.1 cm, 最大值达到 12 cm 以上, 最小值约为 2 cm, 处于 4~7 cm 区间内的最多, 占比达到约 65%; 切向误差 RMS 均值约为 9.1 cm, 最大值超过 18 cm, 最小值约为 3 cm, 处于 6~11 cm 区间内的最多, 占比达到约 60%; 法向误差 RMS 均值约为 7.7 cm, 最大值超过 16 cm, 最小值约为 2 cm, 处于 4~10 cm 区间内的最多, 占比达到约 75%。对于固定解, 轨道误差 RMS 分布整体更为集中, 其中, 径向误差 RMS

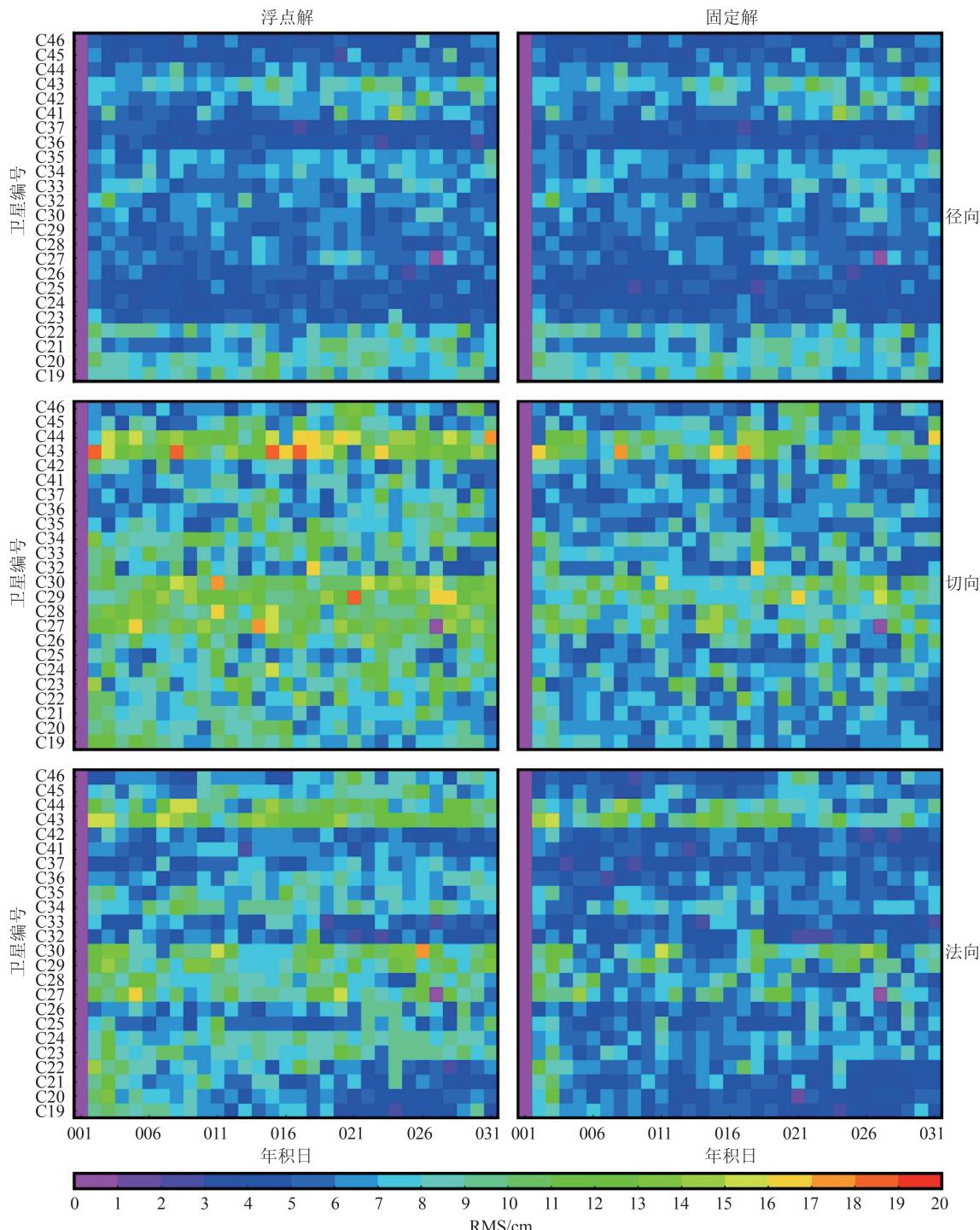


图3 BDS-3实时滤波轨道误差单天均值 RMS

Fig. 3 BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Error Daily-Mean RMS

变化不大,均值约为6.0 cm,处于4~7 cm区间内的占比仍然约为65%,但≤5 cm区间内的占比略有提高;切向、法向变化明显,切向误差RMS处于4~9 cm区间内的最多,占比达到约80%,法向误差RMS处于3~8 cm区间内的最多,占比达到约80%。相比浮点解,固定解轨道精度在径向、切向、法向分别提升约1.0%、18.5%、19.5%,误差RMS分别达到6.0、7.4、6.2 cm。然而,对

献[9-10]中的GPS、Galileo实时滤波定轨,非差模糊度固定对BDS-3实时滤波定轨精度提升相对较低,说明BDS-3数据处理模型仍需精化,例如太阳辐射压等非保守力模型以及天线相位中心改正等观测模型。

为分析不同卫星实时滤波轨道精度,首先统计轨道误差单天均值RMS,进而得到轨道误差实验期间的均值RMS,结果如图5所示。在所有卫

星中,C37 卫星轨道精度最高,浮点解以及固定解轨道径向、切向、法向误差 RMS 分别为 4.2、7.4、

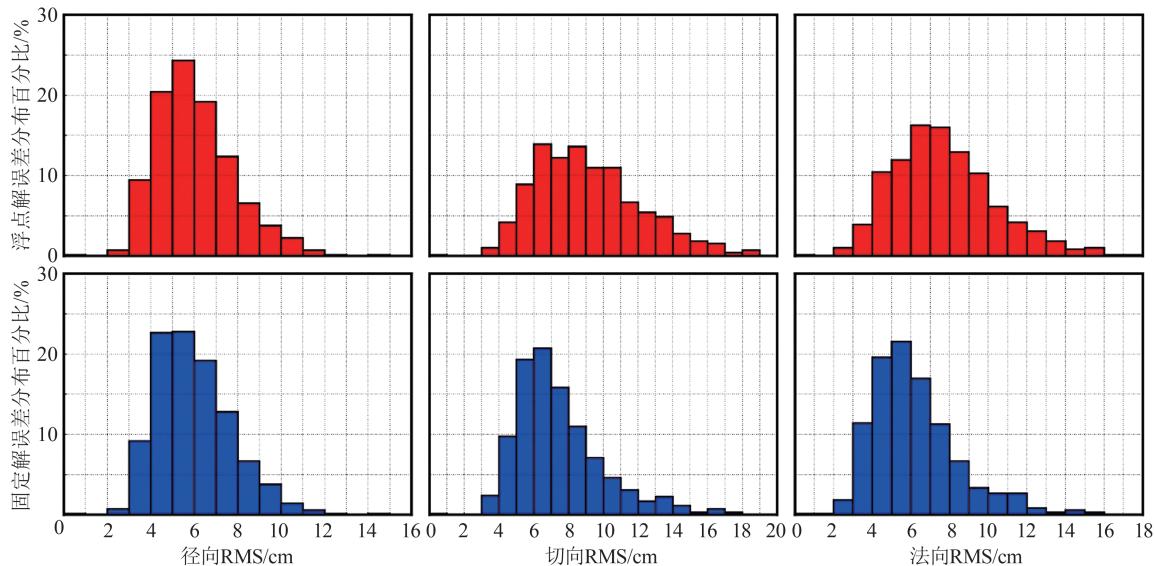


图 4 BDS-3 实时滤波轨道误差单天均值 RMS 分布

Fig. 4 BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Error Daily-Mean RMS Distribution

5.9 cm 以及 4.4、6.0、4.5 cm,C43 卫星轨道精度最低,浮点解以及固定解轨道径向、切向、法向误差 RMS 分别为 8.0、13.7、12.1 cm 以及 8.0、11.0、10.0 cm。在不同类型卫星中,CAST 类型卫星浮点解轨道径向、切向、法向误差 RMS 分别为 6.1、7.9、6.7 cm, 固定解轨道径向、切向、法向误差 RMS 分别为 6.0、6.7、5.4 cm, SECM 类型卫星浮点解轨道径向、切向、法向误差 RMS 分别为 6.0、10.8、9.1 cm, 固定解轨道径向、切向、法向误差 RMS 分别为 5.9、8.5、7.3 cm。由于切向、法向差异,CAST 类型卫星轨道精度整体优于 SECM 类型卫星轨道精度。

在非差模糊度固定中,相比宽巷模糊度固定,窄巷模糊度固定对实时滤波定轨的作用更为关键。为分析实时滤波定轨非差模糊度固定效果,类似地,不考虑收敛以及重收敛阶段,以 d 为单位,统计所有卫星窄巷固定率,结果如图 6 所示。不同卫星窄巷固定率存在明显差异,其中,C27~C30 卫星窄巷固定率相对较低,约为 60%,而 C32~C37 卫星以及 C41、C42 卫星窄巷固定率相对较高,最高达到 90% 以上。对比图 5 可以发现,窄巷固定率与轨道精度存在一定程度的相关性,其原因主要包括两个方面:(1)窄巷模糊度固定依赖于 IF 组合浮点模糊度精度;(2)窄巷模糊度固定效果又直接影响模糊度固定约束。因此,在实时滤波定轨中,窄巷固定率可以作为实时轨道质量的重要指标之一。

图 5 BDS-3 实时滤波轨道误差径向/切向/法向平均 RMS

Fig. 5 BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Error Radial/Tangential/Normal Average RMS

### 3 结语

本文研究了非差模糊度固定 BDS-3 MEO 卫星实时滤波精密定轨。基于双频 IF 组合观测模型以及宽巷、窄巷级联模糊度固定策略,建立了非差模糊度固定实时滤波定轨模型。利用 1 个月的 IGS 全球测站网观测数据模拟 BDS-3 MEO 卫星实时滤波定轨,结果表明,非差模糊度固定对收敛速度影响不明显,但可以有效提升轨道切向、法向精度。收敛之后,相比浮点解,固定解轨

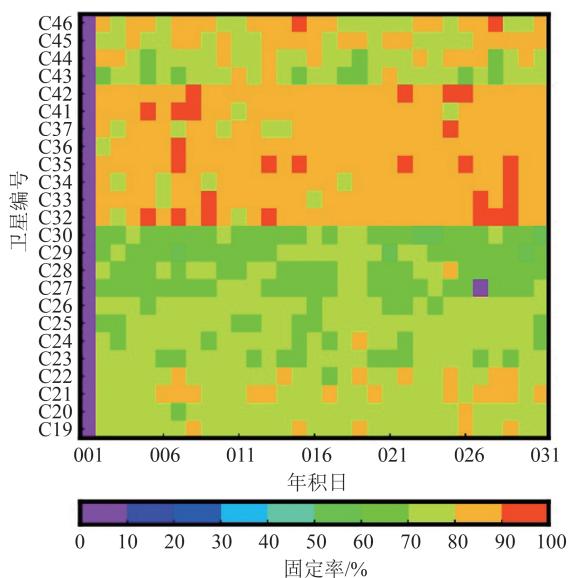


图 6 BDS-3 实时滤波轨道窄巷单天均值固定率

Fig. 6 BDS-3 Real-Time Filtered Orbit Narrow Lane

Daily-Mean Fixed Rate

道径向、切向、法向精度分别提高 1.0%、18.5%、19.5%，误差 RMS 分别达到 6.0、7.4、6.2 cm，受切向、法向影响，CAST 类型卫星轨道精度优于 SECM 类型卫星，由于窄巷固定率与轨道精度的相关性，窄巷固定率可以作为实时轨道质量的重要指标之一。实时滤波轨道精度的进一步提升有赖于 BDS-3 数据处理模型的持续精化。

**致谢：**感谢 IGS 提供观测数据，GFZ 提供精密产品。

## 参 考 文 献

- [1] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [2] Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 92-100. (曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 92-100.)
- [3] Johnston G, Riddell A, Hausler G. The International GNSS Service [M]//Teunissen P J G, Montenbruck O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [4] Lou Y D, Dai X L, Gong X P, et al. A Review of Real-Time Multi-GNSS Precise Orbit Determination Based on the Filter Method [J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 15.
- [5] Choi K K, Ray J, Griffiths J, et al. Evaluation of GPS Orbit Prediction Strategies for the IGS Ultra-Rapid Products [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17 (3): 403-412.
- [6] Ye F, Yuan Y B, Zhang B C. Impact Analysis of Arc Length in Multi-GNSS Ultra-Rapid Orbit Determination Based on the One-Step Method [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(5): 055012.
- [7] Li X X, Chen X H, Ge M R, et al. Improving Multi-GNSS Ultra-rapid Orbit Determination for Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(1): 45-64.
- [8] Bertiger W, Bar-Sever Y, Dorsey A, et al. GipsyX/RTGX, a New Tool Set for Space Geodetic Operations and Research [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(3): 469-489.
- [9] Kuang K, Li J, Zhang S, et al. Improve Real-Time GNSS Orbit with Epoch-Independent Undifferenced Ambiguity Resolution [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(11): 4544-4555.
- [10] Dai X L, Gong X P, Li C L, et al. Real-Time Precise Orbit and Clock Estimation of Multi-GNSS Satellites with Undifferenced Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(10): 73.
- [11] Ge M, Gendt G, Dick G, et al. Improving Carrier-Phase Ambiguity Resolution in Global GPS Network Solutions [J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 79 (1): 103-110.
- [12] Li Z N, Li M, Shi C, et al. Impact of Ambiguity Resolution with Sequential Constraints on Real-Time Precise GPS Satellite Orbit Determination [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 85.
- [13] Ge M, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399.
- [14] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination [J]. *Navigational*, 2009, 56(2): 135-149.
- [15] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing [J]. *Navigational*, 2010, 57(2): 123-135.
- [16] Chen H, Jiang W P, Ge M R, et al. An Enhanced Strategy for GNSS Data Processing of Massive Net-

- works [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88 (9) : 857–867.
- [17] Ruan R G, Wei Z Q. Between-Satellite Single-Difference Integer Ambiguity Resolution in GPS/GNSS Network Solutions[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9) : 1367–1379.
- [18] Geng J H, Mao S Y. Massive GNSS Network Analysis Without Baselines: Undifferenced Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(10) : e2020JB021558.
- [19] Deng Zhiguo, Wang Jungang, Ge Maorong. The GBM Rapid Product and the Improvement from Undifferenced Ambiguity Resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(4) : 544–555. (邓志国, 王君刚, 葛茂荣. GBM 快速轨道产品及非差模糊度固定对其精度的改进[J]. 测绘学报, 2022, 51(4) : 544–555.)
- [20] 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.
- [21] Lannes A, Prieur J L. Calibration of the Clock-phase Biases of GNSS Networks: The Closure-Ambiguity Approach[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87 (8) : 709–731.
- [22] 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.
- [23] Steigenberger P, Deng Z, Guo J, et al. BeiDou-3 Orbit and Clock Quality of the IGS Multi-GNSS Pilot Project[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71(1) : 355–368.
- [24] Wang N B, Li Z S, Duan B B, et al. GPS and GLONASS Observable-Specific Code Bias Estimation: Comparison of Solutions from the IGS and MGEX Networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94 (8) : 74.
- [25] Deng Z, Nischan T, Bradke M. Multi-GNSS Rapid Orbit-, Clock- & EOP-Product Series [EB/OL]. (2017-01-01) [2023-03-15]. <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2017.002>.
- [26] Rebischung P, Schmid R. IGS14/igs14. atx: A New Framework for the IGS Products[C]// AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016.
- [27] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy by Radio Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Baseline Length [J]. *Radio Science*, 1985, 20(6) : 1593–1607.
- [28] Böhm J, Möller G, Schindelegger M, et al. Development of an Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w) [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3) : 433–441.
- [29] 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) : B02406.
- [30] Petit G, Luzum B. IERS Conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36) [EB/OL]. (2019-04-26) [2023-03-15]. [http://iers-conventions.obspm.fr/conventions\\_versions.php#official\\_target](http://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#official_target).
- [31] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Modelling the Global Ocean Tides: Modern Insights from FES2004 [J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56 (5) : 394–415.
- [32] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. *Scripta Geodaetica*, 1993, 18: 91–98.
- [33] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117 (B4) : B04406.
- [34] Arnold D, Meindl M, Beutler G, et al. CODE's New Solar Radiation Pressure Model for GNSS Orbit Determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89 (8) : 775–791.
- [35] Ruan Rengui, Jia Xiaolin, Feng Laiping, et al. Non-conservative Force Modeling of BeiDou-3 MEO Satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(9) : 1862–1869. (阮仁桂, 贾小林, 冯来平, 等. 北斗三号 MEO 卫星非保守力建模[J]. 测绘学报, 2022, 51(9) : 1862–1869.)