

引文格式: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. DOI:10.11947/j.AGCS.2022.20220022.
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. DOI:10.11947/j.AGCS.2022.20220022.

GBM 快速轨道产品及非差模糊度固定对其精度的改进

邓志国¹,王君刚^{1,2},葛茂荣^{1,3}

1. 德国地学中心大地测量,德国 波茨坦 14473; 2. 中国科学院上海天文台,上海 200030; 3. 柏林工业大学,德国 柏林 10553

The GBM rapid product and the improvement from undifferenced ambiguity resolution

DENG Zhiguo¹, WANG Jungang^{1,2}, GE Maorong^{1,3}

1. GFZ German Research Centre for Geosciences, Geodesy, Potsdam 14473, Germany; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 3. Technical University of Berlin, Berlin 10553, Germany

Abstract: Global navigation satellite systems (GNSS) plays a critical role for providing real-time positioning and navigation services, and the precise satellite orbit and clock products are essential for the high-precision GNSS applications. The international GNSS service (IGS) and its analysis centers (ACs) have been working on the study on precise GNSS data processing and provision of the precise products. The German research center for geosciences (GFZ), as one of the ACs, also provides the multi-GNSS rapid product: the GBM product. We introduce the GBM data processing strategy, analyze the precision of GBM multi-GNSS orbits from 2015 to 2021, and present the impact of applying the undifferenced ambiguity resolution on satellite orbits. The GPS orbits of GBM products agree with the IGS final orbits at the level of 11~13 mm in the three directions, and the GPS orbit 6 hour prediction precision is around 6 cm. The 6 hour prediction precision of GLONASS is around 12 cm, slightly worse than that of Galileo, which holds an average value of 10 cm in the same period but shows a significant improvement to around 5 cm after the end of 2016. The prediction precision of BDS medium earth orbit (MEO) satellites are around 10 cm, and that of the BDS geostationary earth orbit, (GEO) satellites and QZSS satellites are at the level of 1 to 3 meter. The satellite laser ranging (SLR) residuals show that the orbit precision of Galileo, GLONASS, and BDS3-MEO are 23, 41, and 47 mm, respectively. Moreover, comparing the double-differenced ambiguity resolution, adopting the undifferenced ambiguity resolution improves the 6 hour orbit prediction precision by 9%~15%, 15%~18%, 11%~13%, 6%~17% and 14%~25% for the GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2 and BDS-3 MEO satellites, respectively.

Key words: GNSS; precise orbit determination; ambiguity fixing

Foundation support: Helmholtz-OCPC Post Program (ZD202121)

摘 要:GNSS 是实时定位导航最重要的方法,精密卫星轨道钟差产品是 GNSS 高精度服务的前提。国际 GNSS 服务中心(IGS)及其分析中心长期致力于 GNSS 数据处理的研究及高精度轨道和钟差产品的提供。GFZ 作为分析中心之一,提供 GBM 多系统快速产品。本文基于 2015—2021 年 GBM 提供的精密轨道产品,阐述了数据处理策略,分析了轨道的精度,介绍了非差模糊度固定的原理和对精密定轨的影响。结果表明:GBM 快速产品中的 GPS 轨道精度与 IGS 后处理精密轨道相比的精度约为 11~13 mm,轨道 6 h 预报精度约为 6 cm;GLONASS 预报精度约为 12 cm, Galileo 在该时期的精度均值为 10 cm,但是在 2016 年底以后精度提升到 5 cm 左右;北斗系统的中轨卫星(medium earth orbit, MEO)在 2020 年以后预报精度约为 10 cm;北斗的静止轨道卫星(geostationary earth orbit, GEO)卫星和

QZSS 卫星的预报精度在米级;卫星激光测距检核表明,Galileo、GLONASS、BDS-3 MEO 卫星轨道精度分别为 23、41、47 mm;此外,采用 150 d 观测值的试验结果表明,采用非差模糊度固定能显著改善 MEO 卫星轨道精度,对 GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2 和 BDS-3 的 MEO 卫星的 6 h 时预报精度改善率分别为 9%~15%、15%~18%、11%~13%、6%~17%和 14%~25%。

关键词:GNSS;精密定轨;模糊度固定

中图分类号:P227

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2022)04-0544-12

基金项目:中德博士后交流项目(ZD202121)

GNSS 在实时定位、导航、授时领域有重要的应用,也是对地观测的重要工具和地球监测的重要手段,在地表形变监测^[1-2]、大气反演^[3-4]、空间天气监测^[5]等领域有着广泛的应用。精密卫星轨道钟差产品是 GNSS 服务的基础,是高精度 GNSS 应用的前提。也是用户获取国际大地参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)^[6]的主要技术手段。

国际 GNSS 服务中心负责提供高精度的 GNSS 产品,为大地测量学和地球动力学服务^[7]。其产品包括卫星轨道钟差、测站坐标、地球定向参数(Earth rotation parameters, ERP)、对流层延迟、电离层延迟等。IGS 的数据分析中心包括欧洲定轨中心(CODE)、美国喷气动力实验室(JPL)、中国武汉大学(WHU)等,不同分析中心提供独立解算的产品,IGS 对不同分析中心的产品进行综合处理生成 IGS 的官方产品。IGS 及分析中心的产品主要有事后产品、(超)快速产品、实时产品等。德国地学中心(GFZ)作为 IGS 分析中心之一,提供高精度后处理的 GPS 和 GLONASS 轨道钟差产品(GFZ 产品)^[8],以及多系统快速产品,即 GBM (GFZ BeiDou multi-GNSS)产品。GBM 产品从 2014 年开始提供快速精密轨道钟差,最初包含 BDS-2 和 GPS 卫星,在后期的完善中逐步加入了 GLONASS、Galileo、QZSS 和 BDS-3,成为 IGS 分析中心中最为完备的多系统轨道钟差产品。GBM 产品基于 IGS 全球观测站的 24 h 弧段数据进行处理,提供轨道、钟差、ERP 和测站坐标等^[9-10]。

GNSS 数据处理的基本观测值是伪距和相位,高精度的相位观测值是 GNSS 高精度产品的保证,而模糊度固定技术能够显著提高产品解算精度。在 GNSS 的网解中,常用的模糊度固定方法是基于双差观测值或者双差模糊度^[11-13],即双差模糊度固定(double-differenced ambiguity fixing)。为提高精密单点定位技术(precise point positioning, PPP)^[14]的精度和收敛速度,可以通

过估计卫星端模糊度小数部分(uncalibrated phase delay, UPD)并播发给用户实现用户端的 PPP 模糊度固定(PPP ambiguity resolution, PPP-AR)^[15-17]。对于 GNSS 网,同样可以采用估计 UPD 的方式实现非差模糊度固定(undifferenced ambiguity fixing)。理论上,双差模糊度固定和非差模糊度固定对于 GNSS 网解精度应该是等价的^[18],而后者效率更高^[19-20],但研究表明,非差模糊度固定的解算精度较双差固定有一定的提高,比如采用相同测站的非差模糊度固定比双差固定的轨道精度有 10%的改善^[19],非差模糊度固定相比传统的独立双差模糊度固定对测站坐标的重复率有 5%的提高^[21]。对于非差模糊度固定表现好于双差模糊度固定的理解,文献^[19]认为非差模糊度能够把不同弧段的模糊度连接起来,减少了自由度从而改善解的强度;文献^[21]认为双差模糊度固定存在部分错误固定的模糊度,这些模糊度在非差的时候能够被正确地固定,而且剔除这些错误的固定后双差固定解的精度与非差固定解的精度相当。

本文给出了 GBM 快速产品的数据处理流程与策略,着重介绍了 GBM 产品非差模糊度固定的方法策略。分析了 2015—2021 年 GBM 轨道产品的精度,包括 GPS 卫星轨道与 IGS 最终产品的比较结果,多系统轨道的 6 h 预报精度,以及卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)的外符合精度验证。针对 GBM 产品 2021 年处理策略的升级,即采用非差模糊度固定取代双差模糊度固定,本文详细分析了轨道产品精度的相应改善。

1 GBM 多系统解算模型与策略

1.1 多系统 GNSS 数据处理模型

首先以精密定轨为例,采用无电离层组合,对于接收机 r 和卫星 s ,伪距 P_r^s 和相位 L_r^s 的观测值在地心天球参考系统(geocentric celestial reference system, GCRS)中为

$$\left. \begin{aligned} P_r^s &= \rho_r^s + c \cdot (\Delta t_r - \Delta t^s) + T + (b_r + b^s) + \\ &\quad \text{ISFB} + \epsilon_p \\ L_r^s &= \rho_r^s + c \cdot (\Delta t_r - \Delta t^s) + T + \lambda \cdot N_r^s + \\ &\quad B_r + B^s + \text{ISFB} + \epsilon_L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, ρ_r^s 为信号从卫星发射端到地面接收端的几何距离; Δt_r 和 Δt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差; T 为对流层斜路径延迟; b_r 和 b^s 分别为接收机端和卫星端的伪距硬件延迟; B_r 和 B^s 分别为接收机端和卫星端的相位硬件延迟; $\lambda \cdot N_r^s$ 为无电离层组合的模糊度。ISFB 为不同频率的信号之间的频间偏差, 对于除 GLONASS 之外的其他系统, 由于同一个系统内所有卫星的信号是一致的, 因此只需要估计各个系统相对于 GPS 系统的系统间偏差, 而 GPS 作为参考系统, 本身不需要 ISFB 参数。 ϵ_p 和 ϵ_L 分别为伪距和相位观测值噪声。可以看到, 相位硬件延迟与模糊度是强相关的, 因此模糊度的固定需要精确校准的相位硬件延迟。

几何距离 ρ_r^s 在 GCRS 中为

$$\rho_r^s = | \mathbf{x}^s - \mathbf{R}_{t2c} \cdot \mathbf{x}_r | \quad (2)$$

式中, \mathbf{x}^s 为卫星信号发射端在 GCRS 中的位置; \mathbf{x}_r 为地面信号接收端在国际地球参考系统 (international terrestrial reference system, ITRS) 中的位置; \mathbf{R}_{t2c} 为 GCRS 与 ITRS 之间的转换矩阵。在时刻 t 信号在卫星发射端的位置 $\mathbf{x}^s(t)$ 为

$$\mathbf{x}^s(t) = F(\mathbf{x}_0^s, \mathbf{v}_0^s, \mathbf{q}, t) + d\mathbf{x}^s \quad (3)$$

式中, $F(\mathbf{x}_0^s, \mathbf{v}_0^s, \mathbf{q}, t)$ 表达了卫星质心在 GCRS 的位置; \mathbf{x}_0^s 和 \mathbf{v}_0^s 分别为参考时刻的卫星坐标和速度; \mathbf{q} 为卫星动力学参数 (即太阳光压参数) 矢量; $d\mathbf{x}^s$ 表达卫星质心到信号发射相位中心的矢量, 包括卫星相位中心改正 (phase center offset & phase center variations, PCO&PCV) 和卫星质心矢量改正 (center of mass correction, CoM)。

在精密定轨中, 地面接收机的位置先验坐标通常是由 IGS 参考框架给出参考历元的坐标和速度。IGS 参考框架是 ITRF 在 GNSS 技术中的实现, 主要是在 ITRF 测站坐标上修正了接收机天线引起的系统性偏差。地面信号接收端在时刻 t 的位置 $\mathbf{x}_r(t)$ 在 ITRS 可以表达为

$$\mathbf{x}_r(t) = \mathbf{x}_{r,0} + \mathbf{v}_{r,0} \cdot (t - t_0) + \sum d\mathbf{x} + d\mathbf{x}_r \quad (4)$$

式中, $\mathbf{x}_{r,0}$ 和 $\mathbf{v}_{r,0}$ 分别为参考历元 t_0 的测站坐标和速度; $\sum d\mathbf{x}$ 为测站的位置变化改正, 主要包括固体潮、海潮、极潮、海洋极潮、大气潮等; $d\mathbf{x}_r$ 为测站坐标的参考位置到信号接收位置的矢量, 主

要包括接收机端的天线相位中心偏差 (PCO&PCV) 及天线参考位置 (antenna reference point, ARP) 到测站参考位置的矢量。

式(4)给出的是地面测站在基于参考时刻位置和速度实现的参考框架中的计算方法, 比如 ITRF 和 DTRF^[22], 它们给出的测站坐标是以参考历元时刻的坐标、速度及震后形变函数 (post-seismic deformation, PSD) 表达的。对于瞬时历元地球参考框架, 比如 JTRF^[23], 直接给出测站坐标任意时刻的值, 因此不需要进行速度修正。本文主要针对的是高精度 GNSS 解算, 比如精密轨道钟差确定。对于定位用户, 根据实际应用和精度需求, 式(4)中的部分改正并不需要。

最后, 由于测站坐标通常是在 ITRS 中定义和表达, 而精密定轨中的卫星轨道需要在 GCRS 中表达, 因此 ITRS 与 GCRS 之间需要通过矩阵 \mathbf{R}_{t2c} 进行转换, 该矩阵主要包括岁差、章动、极移和地球自转改正对应的矩阵构成, 在精密定轨中, 需要求得该矩阵对极移 (polar motion) 和日长变化 (length of day) 的偏导, 从而解算地球自转参数 (Earth rotation parameter, ERP, 包括极移和日长变化)。对于利用精密轨道进行定位或者钟差确定的应用, 由于精密轨道通常是在 ITRS 给出, 因此, 不需要进行 GCRS 到 ITRS 之间的转换。

在 GNSS 高精度数据处理中, 参数估计方法是重要的一部分。精密定轨处理通常采用事后处理模式, 即整体最小二乘的批处理。经典精密定轨模型化、参数化等已有较为成熟的研究^[24-26], 多系统的数据处理也有较多研究^[27-29]。另一方面, 虽然部分研究针对轨道高频更新需求探索了实时定轨的滤波解^[30-31], 现有的大多 IGS 分析中心在事后、快速和超快速轨道都是采用批处理。

1.2 双差模糊度固定

对于 4 个同一系统的卫星-测站观测值对, 双差无电离层组合伪距观测值 $\nabla \Delta P_{r1,r2}^{s1,s2}$ 和相位观测值 $\nabla \Delta L_{r1,r2}^{s1,s2}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \Delta P_{r1,r2}^{s1,s2} &= \nabla \Delta \rho_r^s + \nabla \Delta T + \nabla \Delta \epsilon_p \\ \nabla \Delta L_{r1,r2}^{s1,s2} &= \nabla \Delta \rho_r^s + \nabla \Delta T + \lambda \cdot \nabla \Delta N_{r1,r2}^{s1,s2} + \nabla \Delta \epsilon_L \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, $\nabla \Delta \rho_r^s$ 和 $\nabla \Delta T$ 分别为双差后的几何距离和对流层延迟; $\nabla \Delta \epsilon_p$ 和 $\nabla \Delta \epsilon_L$ 分别为伪距和相位噪声。 $\lambda \cdot \nabla \Delta N_{r1,r2}^{s1,s2}$ 为无电离层组合的双差模糊度, 可以分解为宽巷模糊度 $\nabla \Delta WL_{r1,r2}^{s1,s2}$ 和窄巷模糊度 $\nabla \Delta NL_{r1,r2}^{s1,s2}$ 线性组合

$$\lambda \cdot \nabla \Delta N_{r1,r2}^{s1,s2} = \lambda_1 \cdot \nabla \Delta NL_{r1,r2}^{s1,s2} - \lambda_{WL} \cdot \nabla \Delta WL_{r1,r2}^{s1,s2} \quad (6)$$

式中, λ_{WL} 为宽巷模糊度的波长。在固定宽巷模糊度及获得精度足够的无电离层组合模糊度 $\lambda \cdot \nabla \Delta N_{r1,r2}^{s1,s2}$ 后, 可以固定窄巷模糊度 $\nabla \Delta NL_{r1,r2}^{s1,s2}$ 。把所有固定的双差模糊度作为对相应 4 个非差模糊度的约束加到浮点解里, 即可得到模糊度固定解。

1.3 非差模糊度固定

已有研究表明接收机端和卫星端的相位硬件延迟 b_r 、 b^s 、 B_r 和 B^s 在较长时间内比较稳定, 因此可以将一定时间段内的相位硬件延迟的小数部分 UPD 当作常数处理。在双差模糊度固定后, 求解得到无电离层的非差模糊度与钟差等参数成功分离, 使得 UPD 在网解构建成的模糊度域内具有了一致性。

具体处理策略为, 基于观测值构建所有非差 Melbourne-Wübbena 宽巷模糊度 WL_r^s , 对其取整得到小数部分, 即宽巷 UPD 观测值 $UPD_{WL_r}^s$, 它由收机端和卫星端两部分 UPD_{WL}^s 、 $UPD_{WL_r}^s$ 组成

$$UPD_{WL_r}^s = UPD_{WL}^s + UPD_{WL_r}^s + \epsilon_{WL} \quad (7)$$

式中, ϵ_{WL} 为观测值噪音。对于一个 GNSS 网, 使用所有卫星测站对的宽巷 UPD 观测值通过最小二乘方法可以解算每个测站和卫星的 UPD

$$\begin{bmatrix} UPD_{WL_{r1}}^{s1} \\ \vdots \\ UPD_{WL_{rn}}^{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} UPD_{WL}^{s1} \\ \vdots \\ UPD_{WL}^{sn} \\ UPD_{WL_{r1}}^{s1} \\ \vdots \\ UPD_{WL_{rn}}^{sn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

需要注意的是, 式(8)是秩亏的, 需要施加额外的基准条件进行求解。GBM 产品的基准通过定义一个参考站宽巷 UPD 为零实现, 该参考站根据观测值的可用性和质量进行择优选取。在判断宽巷模糊度的固定与否时以 0.3 周为阈值

$$\left| (UPD_{WL_r}^s - (\overline{UPD_{WL}^s} + \overline{UPD_{WL_r}^s})) \right| < 0.3 \text{ cycle} \left\{ \begin{array}{l} \overline{WL_r^s} = NL_r^s - (\overline{UPD_{WL}^s} + \overline{UPD_{WL_r}^s}) \end{array} \right. \quad (9)$$

现有的 GNSS 卫星和地面测量型接收机性

能稳定, 本文试验表明, GPS 和 Galileo 卫星系统的固定率可以达到 99%, BDS-2 和 BDS-3 的宽巷模糊度固定率优于 95%。

双差固定解得到的非差模糊度在改正固定宽巷模糊度 $\overline{WL_r^s}$ 后, 通过取整可以得到窄巷 UPD 观测值 $UPD_{NL_r}^s$

$$UPD_{NL_r}^s = \frac{\lambda \cdot N_r^s + \lambda_{WL} \cdot \overline{WL_r^s}}{\lambda_1} = UPD_{NL}^s + UPD_{NL_r}^s + \epsilon_{NL} \quad (10)$$

对于 GNSS 网的每个测站卫星对的窄巷 UPD, 可以采用和宽巷类似的方式(式(8))平差得到每个测站和卫星的窄巷 UPD 平差值 $\overline{UPD_{NL_r}^s}$ 和 $\overline{UPD_{NL}^s}$ 。在判断窄巷模糊度是否能固定时, 本文使用 0.12 周为阈值

$$\left| (UPD_{NL_r}^s - (\overline{UPD_{NL}^s} + \overline{UPD_{NL_r}^s})) \right| < 0.12 \text{ cycle} \left\{ \begin{array}{l} \overline{NL_r^s} = NL_r^s - (\overline{NL_{UPD}^s} + \overline{NL_{UPD_r}^s}) \end{array} \right. \quad (11)$$

本文试验显示, GPS 和 Galileo 卫星系统的窄巷模糊度固定率可以达到 95%, BDS-2 和 BDS-3 的窄巷模糊度固定率约为 80%。在 GBM 的数据处理中, 宽巷和窄巷 UPD 均作为单天常数进行估计。

在完成非差模糊度的窄巷固定以后, 将具有整数特性的非差模糊度 $\overline{NL_r^s}$ 代入构建的法方程中, 并加以强约束得到非差模糊度固定下的定轨解算结果。

2 试验与分析

本文介绍了 GBM 产品的日常处理策略与流程。GBM 选用 IGS 核心站以及部分非核心站, 根据观测值的可用性和质量, 地面网会不定期进行适当调整。以 2021 年 11 月 30 日为例, 图 1 给出了地面测站的分布图以及各个测站处理的 GNSS 系统。可以看到, 虽然欧洲区域测站分布相对密集, 且整体分布较为均匀, 该天处理的 153 个测站均包括 GPS 观测值, 对于 GLONASS、Galileo、北斗及 QZSS, 对应的测站个数分别为 149、129、98 和 50。除 QZSS 系统的测站主要分布在亚太地区外, 其他系统的测站分布都比较均匀。

图 2 给出了 2015—2021 GBM 产品包含的卫星个数。卫星个数从 2015 年的 70 颗左右, 增长到 2019 年底的接近 100 颗, 这段时间 GPS、

GLONASS 和北斗卫星个数较为稳定,其中北斗主要是 BDS-2 的卫星,随着 Galileo 系统卫星的发射,GBM 产品包含的 Galileo 卫星慢慢增加。2020 年初开始,GBM 产品包含 BDS-3 的卫星,处理的总卫星个数接近 120,2020 年中开始提供 5 系统约 125 颗卫星的产品。

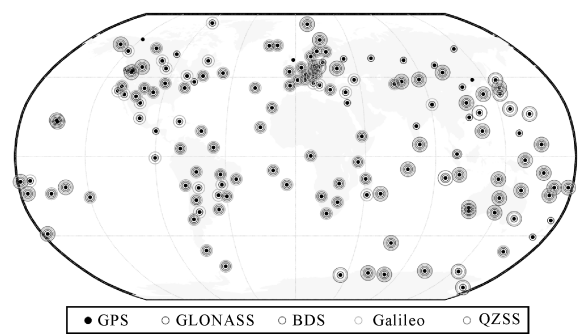


图 1 GBM 快速产品的地面测站分布及各测站处理的 GNSS 系统(以 2021 年 11 月 30 日为例)

Fig.1 Distribution of the multi-GNSS stations used in the GFZ rapid product processing (November 30, 2021)

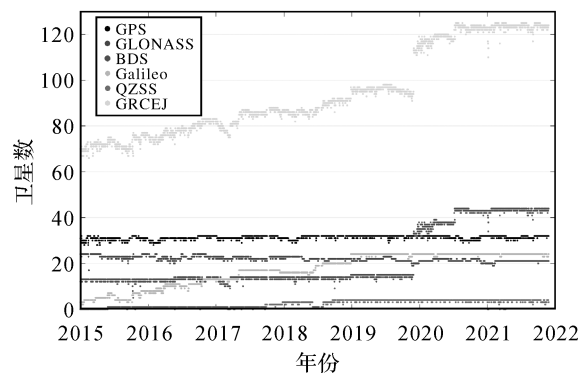


图 2 2015—2021 年 GBM 快速产品卫星个数

Fig.2 The satellite processed at the GBM rapid product from 2015 to 2021

图 3 给出了 GBM 快速产品的处理流程,详细的数据处理策略在表 1。作为 IGS 的日常分析中心,GBM 的数据处理策略和采用的模型定期进行更新并且与 IGS 的数据处理标准保持一致,包括卫星光压模型、测站坐标、卫星和测站天线相位偏差等,表 1 展示了所采用的最新模型。GBM 产品在精密定轨中采用 5 min 采样间隔的观测值,在轨道确定后进行钟差加密解算,此时将卫星轨道、测站坐标及模糊度参数固定,采用 30 s 的观测值计算卫星和接收机的钟差。

表 1 GBM 快速产品的处理策略	
Tab.1 Data processing strategy of the GBM rapid product	
基本观测值	GPS: L1&-L2; GLONASS: L1&-L2; BDS-2/ BDS-3: B1I&-B3I; Galileo: E1&-E5a; QZSS: L1&-L2
观测值模型	非差无电离层组合伪距和相位
处理弧长/h	24
采样间隔	定轨: 5 min, 钟差确定: 30 s
观测值权重	伪距和相位权重比: 500 : 1; 高度角相关定权: 2sinele 在高度角小于 30° 的时候
测站坐标	紧约束到 IGS14 ^[32]
地表形变改正	与 IERS2010 协议 ^[33] 一致, 包括固体潮、海潮、极潮、海洋极潮、大气潮
ERP 先验模型	IERS Bulletin A 产品, 线性内插
ERP 参数化估计	极移参数: 每天常偏和速率, 日长变化; 单天常数
电离层延迟	一阶项通过无电离层组合消除, 无高阶项改正 先验天顶干延迟由 VMF1 ^[34] 提供, 天顶湿延迟和水平梯度分段线性函数估计, 天顶延迟映射函数: VMF1, 梯度映射函数: Chen & Herring ^[35]
对流层延迟	
轨道动力学模型	GPS; BLOCK IIR 和 BLOCK II F 采用 ECOM1 ^[36] 估计模型, 不采用先验模型, 其余卫星采用 ECOM2 ^[37] , 先验模型采用 BOX-WING 模型; Galileo 和 QZSS: 先验模型采用 DLR 的 BOX-WING 模型 ^[38] , 经验模型采用 ECOM1; GLONASS: ECOM2 经验模型; 北斗: TUM ^[39] 和 WHU ^[40] 的 BOX-WING 先验模型, 经验模型采用 ECOM1
地球反照辐射	应用模型 ^[41]
卫星天线推力	应用模型 ^[42]
模糊度固定	除北斗的 GEO 和 GLONASS 卫星之外, 其他卫星都进行模糊度固定处理, BDS-2 和 BDS-3 联合固定; 2021 年 DOY 176 之前: 双差模糊度固定; 2021 年 DOY 176 之后: 非差模糊度固定
钟差	卫星和接收机钟差作为白噪声估计
伪距码偏差 DCB	GPS: CODE DCB 产品, 其他卫星系统: 未使用
天线相位中心改正	IGS14 改正模型
系统间偏差	Galileo、BDS-2、BDS-3、QZSS 估计系统间偏差 (Inter-system Bias, ISB), GLONASS 估计频率间偏差 (inter-frequency bias, IFB), ISB 和 IFB 在 1 d 的时段里作为常数估计

对于模糊度固定,在 2021 年 DOY 176 之前采用的是双差模糊度固定,之后采用的是非差模糊度固定。需要注意的是,非差模糊度固定是在双差固定的基础上进行的,由于浮点解得到的非差模糊度与卫星和接收机钟差参数强耦合,并不

直接具有可固定特性。在通过建立双差观测值消除钟差,固定双差模糊度处理后,求解得到的非差模糊度和钟差成功分离。此时的非差模糊度具有 UPD 整数特性,因此 GBM 产品先固定双差模糊度,再固定非差模糊度,从这个意义上,非差模糊度固定是传统双差模糊度固定的进一步处理。此外,模糊度固定只针对 GPS、Galileo、北斗的 IGSO 和 MEO 卫星进行。GLONASS 卫星由于采用了频分多址,不进行模糊度固定。

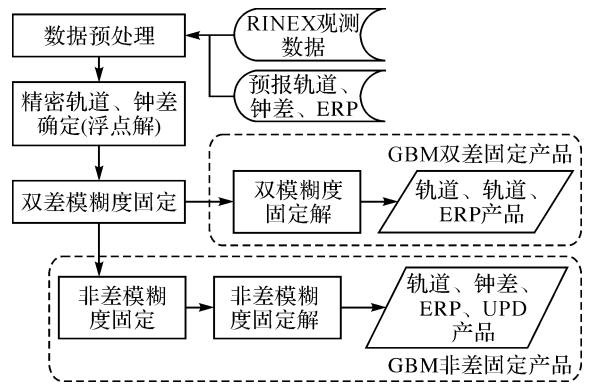


图 3 GBM 快速轨道钟差产品数据处理流程

Fig.3 The GBM multi-GNSS rapid orbit determination

3 GBM 轨道产品精度与非差模糊度的改善

GNSS 卫星轨道质量可以通过内符合和外符合两种精度评估质量,其中内符合精度主要包括天边界连续性,重叠弧段吻合性及预报精度等,外符合精度主要包括其他外部产品的比较和卫星激光测距检核两种。此外,也可以通过精密定位对卫星轨道钟差产品进行质量评估。GBM 的快速产品时 24 h 解算弧段且不存在重叠弧段,因此本文采用预报精度进行内符合精度评估。本节首先介绍 GBM 快速产品的轨道内符合精度,给出和 IGS 最终轨道比较的结果,然后通过卫星激光测距检核外符合精度,最后分析比较非差模糊度固定和双差模糊度固定对不同卫星系统的轨道精度影响。

3.1 轨道预报精度分析

首先给出轨道预报精度的分析。GBM 产品的定轨弧段为 24 h,将每天的轨道预报 6 h 后和第 2 天的前 6 h 定轨结果进行比较,计算如图 4 所示。

图 5 给出了 GBM 快速轨道 6 h 的预报精度

分析结果,包括 GPS、GLONASS、Galileo 及北斗的 MEO 和 IGSO。针对每个单天定轨结果进行 6 h 的预报,将预报弧段与第 2 天的定轨结果进行比较,分别计算每颗卫星轨道残差在径向、法向、切向的均方根(root mean square,RMS),及 3 个方向的均值(1D RMS)。3 个分量的均值没有实际物理意义,相关统计主要是为了更好地阐述分析比较的结果。

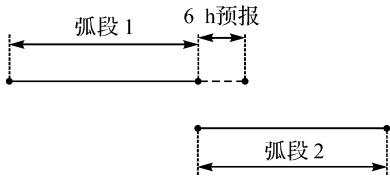


图 4 预报轨道精度分析

Fig.4 The orbit prediction precision analysis

对每个 GNSS 系统,统计该系统所有卫星的中位数(图 5)。图中每个系统在 2015—2021 内的均值在图例中给出。可以看出,4 个系统中 GPS 的轨道预报精度最高,6 h 的预报精度在切向、法向、径向分别为 9.5、3.2、3.2 cm。Galileo 和 GLONASS 的精度在数值统计上相当,一维 RMS 均值均为 10~11 cm,3 个分量中切向和径向精度较高,RMS 值为 5~6 cm。Galileo 系统在 2015—2016 年内精度显著差于 GLONASS,而 2016 年年底以后预报精度有了明显改善,精度提高到与 GPS 相当的水平,这是由于采用了 BOX-WING 的先验光压模型引起的。GLONASS 精度相对比较稳定,但是 2021 年年中(模糊度固定由双差改为非差)开始可见显著改善,尤其是切向。对北斗的 IGSO 和 MEO 卫星,其精度显著差于其他 3 个系统,主要是由于北斗卫星系统星座复杂,其倾斜静止轨道(IGSO)卫星精度通常比中轨(MEO)卫星差,而且 BDS-2 卫星只有 5 颗 IGSO 和 3~4 颗 MEO 卫星,跟踪站也主要集中于亚太地区,因此定轨精度不理想。北斗系统的整体预报精度 2020 年初开始有着显著的提升,尤其是在径向,这是由于 BDS-3 卫星系统纳入解算(图 2),其 MEO 卫星精度显著好于 BDS-2 的解算精度,因此改善了整个北斗系统的统计结果。对于 4 个系统,轨道精度在 2021 年年中以后都有较为显著的改善,这是由于采用了非差模糊度固定的策略引起的,进一步的分析会在下面给出。

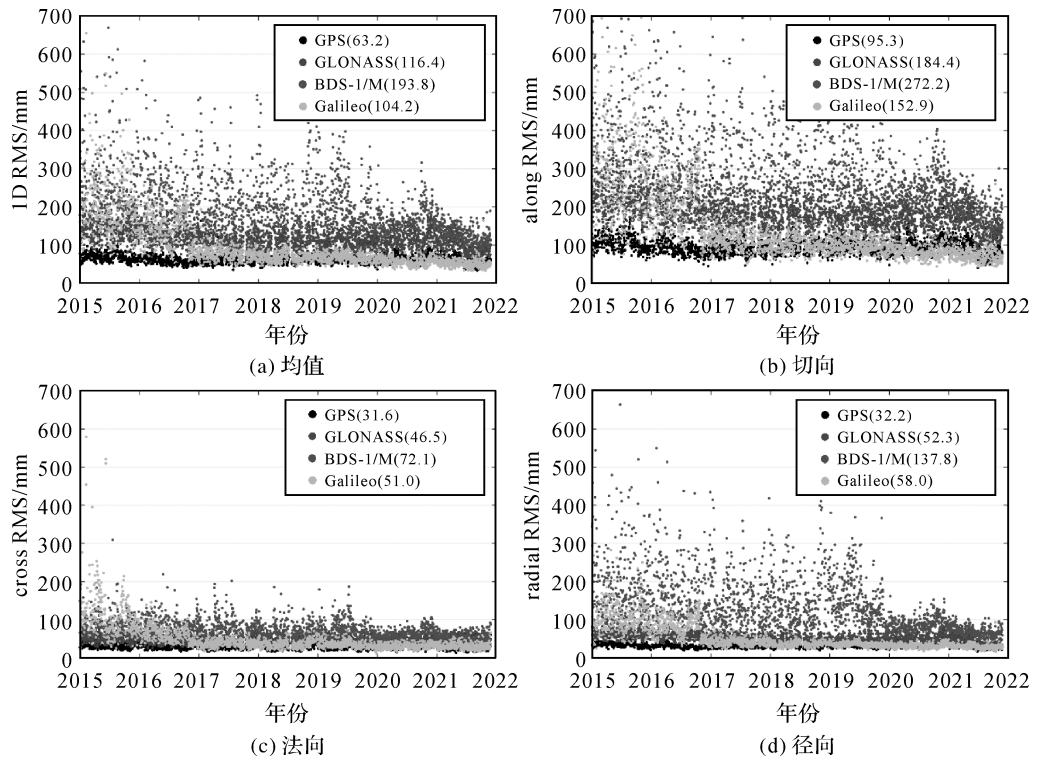


图5 GBM快速产品卫星轨道6 h预报精度
Fig.5 Orbit 6 hour prediction precision of GBM rapid product

由于北斗系统的 GEO 和 QZSS 系统的定轨精度较差,因此将其结果单独统计(图 6)。由图 6 可以看出,北斗 GEO 卫星的 6 h 轨道预报精度为米级,其中切向精度最差,约为 3 m,径向精度约为 1.5 m,法向约为 0.8 m。北斗系统 GEO 卫星的定轨精度在 2018 年年底之后有显著的提升,尤其是在切向,RMS 值从 4 m 改善到 2 m 以内,这是由于测站分布进行了优化。随着能够跟踪北斗卫星的测站增多,GBM 根据各个测站的可用性和数据质量定期更新优化地面网。QZSS 系统的 6 h 轨道预报精度在 1.2 m 左右,其中切向精度最差,约为 1.7 m,法向精度最好,约为 0.4 m,径向精度约为 1.2 m。

3.2 GPS 卫星轨道与 IGS 产品比较

IGS 轨道钟差综合的最终产品 (final product)使用几个分析中心的最终产品作为输入,采用加权平均的方式计算得到,其精度为 1~2 cm,因此比单一分析中心的最终产品有更好的可靠性和更高的精度。笔者采用 IGS 最终轨道产品作为参考,进一步评估 GBM 快速产品的 GPS 和 GLONASS 卫星轨道精度,其 RMS 值如图 7 所示。在作轨道比较的时候,对于切向、法向和径向每个分量,计算每天每个卫星轨道残差的

RMS 值,取所有卫星的中位数作为该天的 RMS 值。此外,轨道产品比较的时候不进行 Helmert 旋转变换。如图 7 所示,GBM 快速产品的 GPS 轨道与 IGS 最终产品吻合度约为 10~15 mm,3 个分量中,径向精度最好,RMS 平均值为 11.7 mm,切向和法向精度略低于径向,RMS 平均值分别为 13.4、13.8 mm。对于 GLONASS 卫星,其与 IGS 综合轨道的吻合度显著低于 GPS 卫星,切向、法向、径向 3 个分量的 RMS 值分别为 27、30 和 18 mm。

3.3 激光测距精度分析

卫星激光测距技术能够提供地面测站到卫星之间的高精度激光观测值,因此常用于 GNSS 卫星轨道的外符合精度验证。选取 IGS MGEX 工作组提供的 2019—2021 年 SLR 检核残差(<https://igs.org/mgex/analysis/#slr-residuals>)进行统计,结果在图 8 中给出。SLR 统计时,对于每颗卫星,计算每天所有测站残差的均值(MEAN)和均方根误差(RMS),对于 2019—2021 年期间的所有均值和均方根误差分别取均值,即为图 8 中的结果。由于该阶段内解算的 GPS 卫星未装备激光反射镜,因此没有 GPS 卫星的结果。对于不同卫星类型,取均值在图中给出。括号内给出该类型所有卫星

的均值;其中 C003 为 BDS-2 GEO 卫星,C012 为

BDS-2 MEO 卫星,超出上限的数字在图中给出。

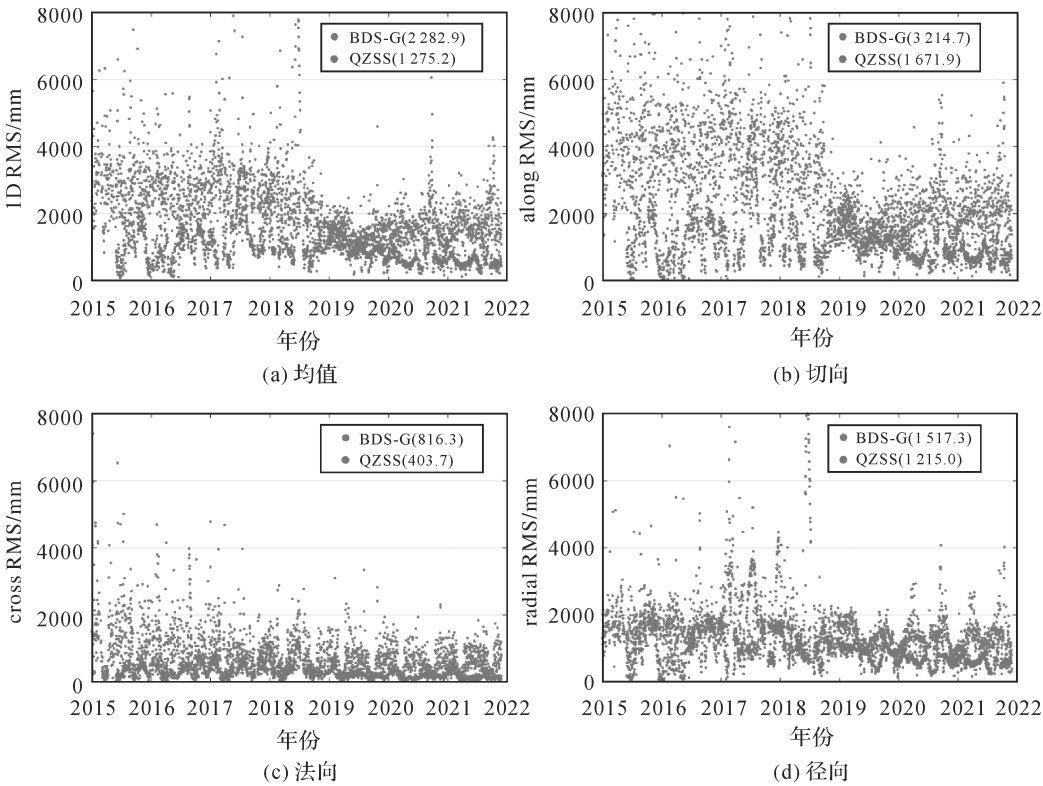
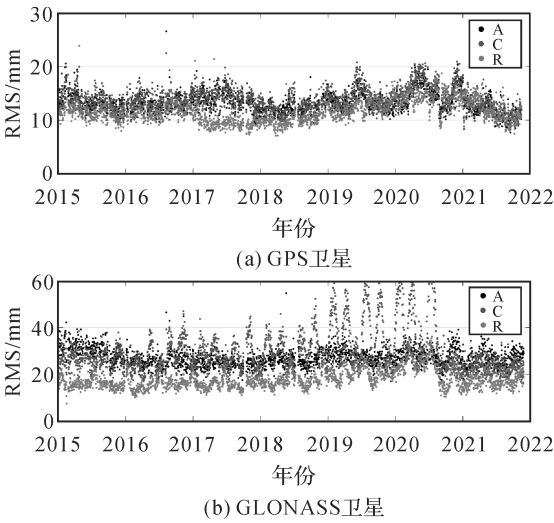


图 6 GBM 快速产品卫星轨道 6 h 预报精度
Fig.6 Orbit 6 hour prediction precision of GBM rapid product



注:GPS 和 GLONASS 纵坐标轴尺度不一样。

图 7 GBM 快速产品中定轨弧段的轨道与 IGS 最终产品比较

Fig.7 Precision of GPS orbit product compared to the IGS final product

可以看到, Galileo FOC 卫星的激光检核残差最小,所有卫星的均值为 0,RMS 为 23 mm,而

且各个卫星的精度相当,不存在特别差的卫星。对于 Galileo 的 IOV (in-orbit validation) 卫星,SLR 检核结果比 FOC 略差,RMS 值为 25 mm,并且 3 颗 IOV 卫星均表现出约 13 mm 的系统性偏差。对于 GLONASS 系统,除 R805 卫星存在 366 mm 的系统偏差外,其他卫星的精度相当,所有 GLONASS 卫星的系统偏差 (MEAN) 和均方根的均值分别为 16 mm 和 55 mm,如果扣除 R805,剩余 GLONASS 卫星的系统偏差均值为 0 mm,RMS 均值为 41 mm。对于北斗系统,BDS-3 MEO 卫星的 RMS 均值为 47 mm,但是 4 颗卫星均表现出较大的系统性偏差;BDS-2 IGSO 卫星的 RMS 均值为 47 mm,除 C008 外其他两颗卫星均无系统性偏差;BDS-2 的 MEO 卫星 C012 呈现出一 25 mm 的系统性偏差,其 RMS 为 35 mm;BDS-2 的 GEO 卫星 C003 精度较差,RMS 为 219 mm。最后,QZSS 的 IGSO 卫星 (J001,J002,J004) RMS 值为 70~90 mm,均值为 83 mm,GEO 卫星 (J003) RMS 值为 204 mm,所有的 QZSS 卫星均有较为明显的系统误差。

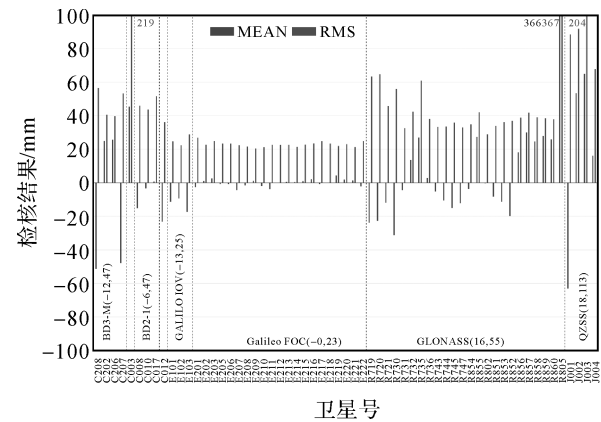


图 8 GBM 快速轨道在 2019—2021 年的 SLR 检核结果

Fig.8 MEAN (blue) and RMS (red) values of the SLR residuals to GBM rapid product from 2019 to 2021

3.4 非差模糊度固定对卫星轨道精度的改善

从 2021 年年中开始,GBM 产品的模糊度固定策略从双差固定切换到非差固定模式,轨道的内符合精度(即 6 h 的预报精度)也有着明显的改善。本小节将进一步比较非差模糊度固定对精密定轨的影响。本文选取了 2021 年 DOY 001—DOY 150,在 GBM 日常处理产品(即双差固定解)的基础上,进一步进行非差模糊度固定解(处理流程如图 3 所示),从而直接比较两种方法对于精密轨道的影响。由于 IGS 最终产品是不同分析中心的综合解,而各个分析中心现阶段都是基于双差模糊度固定,因此不再以 IGS 产品作为参考进行比较,只是给出轨道 6 h 的预报精度分析。需要强调的是,此处的双差和非差模糊度固定解采用的观测值、模型化、参数化均是严格一致的,具体处理细节参见表 1,唯一的区别便是模糊度固定的方式。

图 9 给出了 5 个系统、6 h 预报的卫星轨道精度,其中“DD”和“UD”分别表示双差和非差模糊度固定解。MEO 卫星和 GEO/IGSO 卫星的轨道精度量级相差较大,由图 9 可以看出,对于 GPS、Galileo、BDS-2 和 BDS-3 的 MEO 卫星,采用非差模糊度固定都显著改善了轨道精度。对于 GPS 卫星,切向、法向、径向 3 个分量的改善率分别为 12%、15%、9%,对于 Galileo 卫星,相应的改善率分别为 13%、13%、11%,对于北斗 MEO 卫星、BDS-3 的改善率要高于 BDS-2 的改善率,前者在 3 个分量的改善率为 25%、21%、14%,后

者为 10%、6%、17%,究其原因,笔者认为主要是 BDS-3 的 MEO 卫星数量远大于 BDS-2,模糊度固定对精度的提升更为显著,因此模糊度固定策略的升级更能提升相应的解算精度。虽然 GLONASS 没有进行模糊度固定,即 GLONASS 的数据处理策略完全相同,GLONASS 卫星轨道预报精度有显著改善,在切向、法向、径向的改善率分别为 15%、17%、18%。GLONASS 轨道精度的改善可以通过不同系统之间的公共参数来解释:由于其他系统的轨道精度得到了改善,引起地球定向参数、测站坐标、接收机钟差及大气参数精度的提高,从而间接地改善了 GLONASS 卫星轨道的精度。关于非差模糊度对于这些不同系统公共参数的改善,将在后续研究中做进一步的分析与验证。

对于北斗的 IGSO 和 GEO 卫星,以及 QZSS 的卫星,模糊度固定的作用相对有限。对于北斗的 GEO 卫星,BDS-2 的精度在切向降低了 10%,在法向改善了 4%,在径向改善率 1%,BDS-3 的精度在 3 个方向均有降低,其中切向降低了 12%,法向和径向降低了 4%。由于 GEO 卫星的保持相对地面静止不动和轨道高度较大(36 000 km,MEO 卫星约为 20 000 km)的轨道特性,其地面跟踪网分布不均匀(集中在星下点附近的区域网),卫星动力学模型不完善(缺乏足够的物理信息,以及额外的通信天线导致光压建模更加复杂),因此 GEO 卫星精度一直是一个难点,现阶段的轨道精度大多在米级。另一方面,GEO 并未参与到模糊度固定中,因此轨道精度的降低只能是由于公共参数等引起,详细的效果需要进一步研究。对于北斗的 IGSO 卫星,精度有轻微的改善,其中 BDS-2 卫星在切向和法向都改善了 2%,在径向改善了 6%,而 BDS-3 卫星在 3 个分量分别改善了 4%、1%、6%。最后,QZSS 卫星的精度几乎没有影响,只有在径向精度略有降低(1%)。

笔者认为,双差模糊度优于非差模糊度的原因,在 DD 使用独立基线固定模糊度的情况下,双差模糊度是由同时来自 2 对卫星测站的 4 个观测值组成,这就使得双差模糊度本身在时间和空间上有了限制。而在非差模糊度固定时,是通过求解卫星和接收机端的 UPD 来实现的,这样就没有双差模糊度固定的时空限制,更为自由。试验数据显示,通过 UD 可以固定的模糊度个数比

DD 多大概 10%，在法方程上增加的模糊度约束条件个数约 30%。此外，在 DD 中大部分固定的双差模糊度是来自短基线，由于其时空相关性较

高，对卫星轨道等全球参数误差并不敏感。非常模糊度固定可以最大程度地降低模糊度固定在时空上的相关性，提高对全球参数解算的精度。

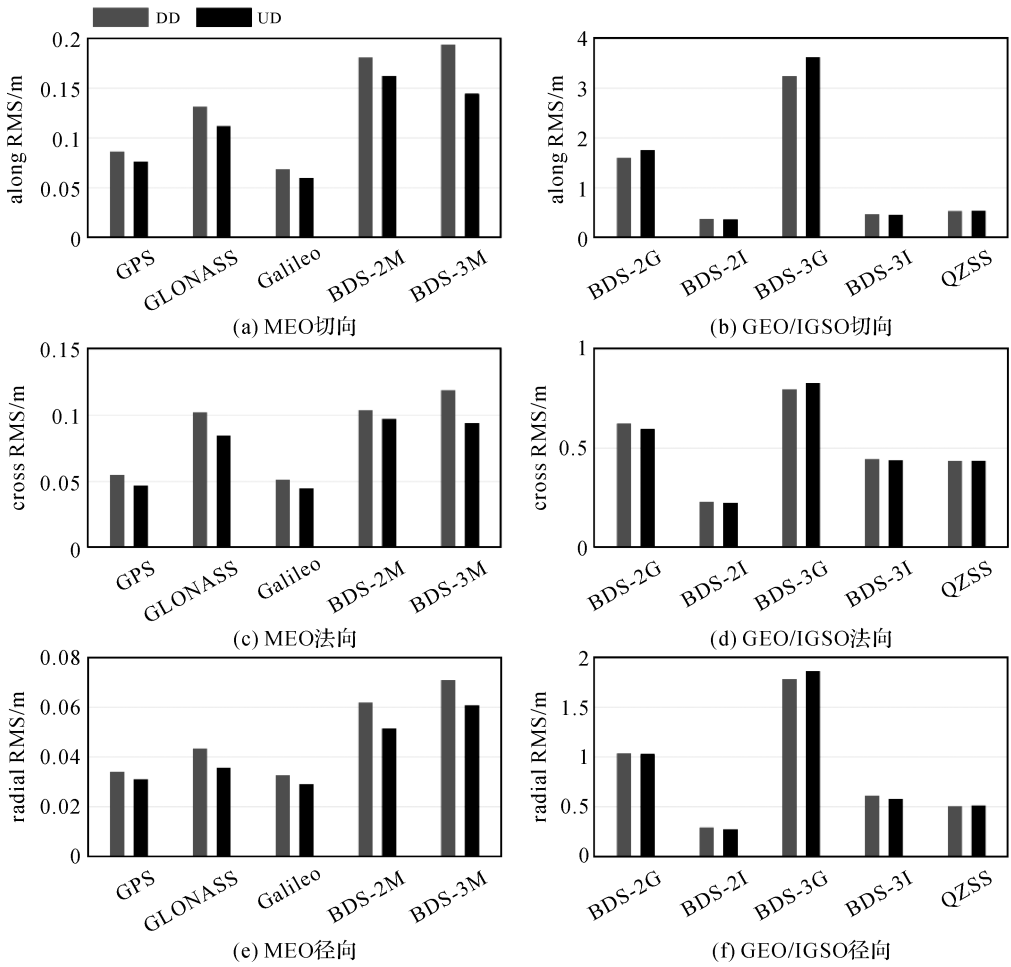


图 9 GBM 快速产品在 2021 年 DOY 001—DOY 150 期间轨道产品的 6 h 预报精度

Fig.9 GBM orbit 6 hour prediction precision during the period of DOY 001 to DOY 150 in 2021

4 结 论

本文给出了 GBM 快速产品的数据处理流程与策略。GBM 产品采用全球分布的约 150 个多系统测站，处理包括 GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3 及 QZSS 几个系统的数据。GBM 产品传统的处理方法采用双差模糊度固定，于 2021 年年中采用了非差模糊度固定策略。本文分析了 GBM 多系统轨道产品在 2015—2021 年的精度。在轨道 6 h 预报结果的统计上，GPS 卫星的精度约 6 cm，其他系统为 10~20 cm，其中 Galileo 系统 2016 年底开始精度提升到与 GPS 相当的水平。对于 GPS 卫星，GBM 产品和 IGS 最终产品的吻合度在径向达到了 11.7 mm，其他两个分量约为 13 mm。此外，通过卫星激光测距

的分析，Galileo 卫星轨道精度约为 23 mm，GLONASS 卫星为 41 mm，BDS-3 的 MEO 卫星为 47 mm。由于采用了非差模糊度固定，GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3 的 MEO 卫星定轨精度都有明显的提升，改善幅度约为 9%~15%、15%~18%、11%~13%、6%~17% 和 14%~25%。下一步的研究将深入量化非差模糊度固定对 GNSS 精密定轨的影响，系统分析对其他参数的影响，并且从原理角度阐述非差模糊度固定相对双差固定的优势。

参考文献：

[1] LARSON K M, BODIN P, GOMBERG J. Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake [J]. Science, 2003 (300): 1421-1424.

- DOI: 10.1126/science.1084531.
- [2] BOCK Y, MELGAR D. Physical applications of GPS geodesy: a review [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79 (10): 106801. DOI: 10.1088/0034-4885/79/10/106801.
 - [3] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D14): 15787-15801. DOI: 10.1029/92jd01517.
 - [4] WANG Jungang, WU Zhilu, SEMMLING M, et al. Retrieving precipitable water vapor from shipborne multi-GNSS observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(9): 5000-5008. DOI: 10.1029/2019gl082136.
 - [5] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J, et al. The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85 (12): 887-907. DOI: 10.1007/s00190-011-0508-5.
 - [6] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, MÉTIVIER L, et al. ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121 (8): 6109-6131. DOI: 10.1002/2016jb013098.
 - [7] MÄNNEL B, BRANDT A, NISCHAN T, et al. GFZ final product series for the international GNSS service (IGS) [EB/OL]. [2021-05-16]. <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2020.002>.
 - [8] JOHNSTON G, RIDDELL A, HAUSLER G. The international GNSS service[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 967-982.
 - [9] UHLEMANN M, GENDT G, RAMATSCHI M, et al. GFZ global multi-GNSS network and data processing results [M]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 673-679.
 - [10] DENG Z G, FRITSCH M, NISCHAN T, et al. Multi-GNSS ultra rapid orbit-, clock- & eop-product series[EB/OL]. [2021-05-16]. <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2016.003>.
 - [11] BLEWITT G. Carrier phase ambiguity resolution for the global positioning system applied to geodetic baselines up to 2000 km[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10187-10203. DOI: 10.1029/JB094iB08p10187.
 - [12] DONG Danan, 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. DOI: 10.1029/JB094iB04p03949.
 - [13] GE M, GENDT G, DICK G, et al. A new data processing strategy for huge GNSS global networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(4): 199-203. DOI: 10.1007/s00190-006-0044-x.
 - [14] 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. DOI: 10.1029/96jb03860.
 - [15] 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. DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4.
 - [16] 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]. *Navigation*, 2009, 56 (2): 135-149. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x.
 - [17] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing[J]. *Navigation*, 2010, 57 (2): 123-135. DOI: 10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x.
 - [18] BERTIGER W, DESAI S D, HAINES B, et al. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(5): 327-337. DOI: 10.1007/s00190-010-0371-9.
 - [19] CHEN Hua, JIANG Weiping, GE Maorong, et al. An enhanced strategy for GNSS data processing of massive networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(9): 857-867. DOI: 10.1007/s00190-014-0727-7.
 - [20] RUAN Rengui, WEI Ziqing. Between-satellite single-difference integer ambiguity resolution in GPS/GNSS network solutions[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1367-1379. DOI: 10.1007/s00190-019-01251-z.
 - [21] GENG Jianghui, MAO Shuyin. Massive GNSS network analysis without baselines: undifferenced ambiguity resolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(10): e2020JB021558. DOI: 10.1029/2020jb021558.
 - [22] SEITZ M, ANGERMANN D, BLOßFELD M, et al. The 2008 DGFI realization of the ITRS: DTRF2008 [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(12): 1097-1123. DOI: 10.1007/s00190-012-0567-2.
 - [23] ABBONDANZA C, CHIN T M, GROSS R S, et al. JTRF2014, the JPL Kalman filter and smoother realization of the international terrestrial reference system [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(10): 8474-8510. DOI: 10.1002/2017jb014360.
 - [24] 刘林.人造地球卫星轨道力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
 - LIU Lin. Orbit mechanics of artificial earth satellite[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.
 - [25] 葛茂荣. GPS 卫星精密定轨理论及软件研究[D]. 武汉:武汉测绘科技大学, 1995.
 - GE Maorong. Study on theory and software of precise orbit determination for GPS satellite[D]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995.

- [26] 赵齐乐. GPS 导航星座及低轨卫星的精密定轨理论和软件研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.
ZHAO Qile. Research on GNSS and LEO precise orbit determination theory and software [D]. Wuhan:Wuhan University,2004.
- [27] 李敏.多模融合精密定轨理论及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2011.
LI Min. Research on multi-GNSS precise orbit determination theory and application [D]. Wuhan:Wuhan University,2011.
- [28] 何丽娜. 多系统 GNSS 卫星精密轨道确定研究[D]. 上海:同济大学,2013.
HE Lina. The research of multi-GNSS satellite precise orbit determination[D]. Shanghai: Tongji University,2013.
- [29] 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.
GUO Jing. The impacts of attitude, solar radiation and function model on precise orbit determination for GNSS satellites [D]. Wuhan:Wuhan University,2014.
- [30] 楼益栋. 导航卫星实时精密轨道与钟差确定[D]. 武汉:武汉大学,2008.
LOU Yidong. Research on real-time precise GPS orbit and clock offset determination [D]. Wuhan: Wuhan University,2008.
- [31] 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.
DAI Xiaolei. Real-time precise GNSS satellite orbit determination using the SRIF method: theory and implementation [D].Wuhan:Wuhan University,2016.
- [32] REBISCHUNG P, SCHMID R. IGS14/igs14. atx: a new framework for the IGS products[C]//Proceedings of 2016 AGU Fall Meeting. San Francisco, CA:[s.n.].
- [33] PETIT G, LUZUM B. IERS Conventions (2010) (IERS Technical Note No. 36) [EB/OL]. [2021-03-22]. http://iers-conventions.obspm.fr/conventions_versions.php#official_target.
- [34] BÖHM 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), B02406. DOI: 10.1029/2005jb003629.
- [35] CHEN G, HERRING T A. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102 (B9): 20489-20502.
- [36] SPRINGER T A, BEUTLER G, ROTHACHER M. A new solar radiation pressure model for GPS[J]. Advances in Space Research, 1999, 23(4): 673-676. DOI: 10.1016/s0273-1177(99)00158-1.
- [37] ARNOLD D, MEINDL M, BEUTLEI G, et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(8): 775-791. DOI: 10.1007/s00190-015-0814-4.
- [38] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HUGENTOBLE U. Enhanced solar radiation pressure modeling for Galileo satellites[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89 (3): 283-297. DOI: 10.1007/s00190-014-0774-0.
- [39] DUAN Bingbing, HUGENTOBLE U, SELMKE I. The adjusted optical properties for Galileo/BeiDou-2/QZS-1 satellites and initial results on BeiDou-3e and QZS-2 satellites[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(5): 1803-1812. DOI: 10.1016/j.asr.2018.11.007.
- [40] WANG Chen, GUO Jing, ZHAO Qile, et al. Empirically derived model of solar radiation pressure for BeiDou GEO satellites[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(6): 791-807. DOI: 10.1007/s00190-018-1199-y.
- [41] RODRIGUEZ-SOLANO C J, HUGENTOBLE U, STEIGENBERGER P, et al. Impact of Earth radiation pressure on GPS position estimates[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86 (5): 309-317. DOI: 10.1007/s00190-011-0517-4.
- [42] STEIGENBERGER P, THOELERT S, MONTENBRUCK O. GNSS satellite transmit power and its impact on orbit determination[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92 (6): 609-624.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期:2021-09-11

修回日期:2022-03-24

第一作者简介:邓志国(1978—),男,博士,研究员,研究方向为 GNSS 卫星定轨,GNSS 高精度数据处理及 GNSS 大气。

First author: DENG Zhiguo (1978—), male, PhD, researcher, majors in GNSS POD, GNSS data analysis and GNSS remote sensing.

E-mail: deng@gfz-potsdam.de

通信作者:王君刚

Corresponding author: WANG Jungang

E-mail: jgwang@gfz-potsdam.de