



星间单差模糊度固定的GRACE-FO、SWARM和SENTINEL卫星定轨精度分析

郑有司, 杨志鑫, 王斌, 刘晖, 唐菲菲, 林娜, 魏启蒙, 张桓

引用本文:

郑有司, 杨志鑫, 王斌, 等. 星间单差模糊度固定的GRACE-FO、SWARM和SENTINEL卫星定轨精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2026, 46(6): 668–678.

Zheng Yousi, Yang Zhixin, Wang Bin, et al. Orbit Determination Accuracy of GRACE-FO, SWARM and SENTINEL Satellites with Single-Difference Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(6): 668–678.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.08.270>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

SWARM卫星时变重力场反演及其精度

Inversion and Accuracy of the SWARM Time-Variable Gravity by SWARM Satellites

大地测量与地球动力学. 2023, 43(12): 1240–1245 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.03.120>

基于广播星历的GPS/BDS-3非差非组合PPP

GPS/BDS-3 Undifferenced and Uncombined PPP Based on Broadcast Ephemeris

大地测量与地球动力学. 2023, 43(12): 1281–1287 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.12.013>

GRACE-FO卫星非差运动学精密定轨及精度分析

Zero-Difference Kinematic Precise Orbit Determination and Accuracy Analysis of GRACE-FO Satellite

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1178–1182 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.014>

基于几何分析法的低轨星座设计

LEO Constellation Design Based on Geometric Analysis Method

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1003–1007 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.003>

InSAR约束下的2021年西藏比如M_w5.7地震断层几何参数及滑动分布

Fault Geometry Parameters and Slip Distribution of the 2021 Biru, Tibet M_w5.7 Earthquake Constraint by InSAR

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1086–1089,1100 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.017>

星间单差模糊度固定的 GRACE-FO、SWARM 和 SENTINEL 卫星定轨精度分析

郑有司¹ 杨志鑫^{1,2} 王 斌² 刘 晖³
唐菲菲¹ 林 娜¹ 魏启蒙⁴ 张 桓¹

1 重庆交通大学智慧城市学院,重庆,400074

2 重庆市地理信息和遥感应用中心,重庆,401147

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉,430079

4 中国星网网络应用有限公司,重庆,401121

摘 要:基于低轨(LEO)卫星定轨和星间单差模糊度固定方法,分别使用未校准相位延迟(uncalibrated phase delay, UPD)和绝对信号偏差(observable-specific signal bias, OSB)产品,实现了 GRACE-C/D、SWARM-A/B/C、SENTINEL-3A/3B/6A 八颗 LEO 卫星的精密定轨,并评估这 2 种产品对定轨精度的影响。结果显示,2 种产品均实现了近 100% 的宽巷模糊度固定率;除 GRACE 卫星窄巷固定率约为 85% 外,其余卫星窄巷固定率均接近 95%。模糊度固定显著提升了定轨精度,使用 UPD 和 OSB 产品获得的固定解三维精度相当,GRACE-FO、SWARM 和 SENTINEL 系列卫星分别达到 1.5 cm、1.7 cm 和 0.9 cm,较浮点解提升最高达 50%。此外,对 SENTINEL-6A 卫星的多系统分析显示,GPS/Galileo 组合定轨固定解精度为 0.9 cm,较单 GPS 和单 Galileo 系统分别提升约 10% 和 18%。研究证实,模糊度固定能有效提高 LEO 卫星定轨精度,为未来大规模 LEO 星座定轨研究提供参考。

关键词:低轨卫星;精密定轨;模糊度固定;未校正相位延迟(UPD);绝对信号偏差(OSB)

中图分类号:P228

文献标识码:A

随着 LEO 星座的快速发展,精密定轨(precise orbit determination, POD)技术已成为支持科学探测任务和大规模星座运行的关键。其中,简化动力学定轨方法凭借其结合动力学模型与星载观测数据的独特优势,在多项科学任务中得到了广泛应用^[1]。该方法通过降低对动力学模型精度的依赖,同时充分利用 GNSS 观测信息,显著提升了定轨精度和鲁棒性。简化动力学定轨首次成功应用于 Topex/Poseidon 卫星,实现了 3~4 cm 的径向轨道精度^[2]。随后在 GRACE 任务中,双星固定解的定轨精度已提升至 2~3 cm^[3],充分验证了简化动力学定轨方法的高效性与可靠性。在 SWARM 任务中,简化动力学定轨结合星间单差模糊度固定技术,使得轨

道各方向定轨精度均优于 2 cm^[4]。近年来,随着 GNSS 观测数据质量和星载接收机性能的不断提升,简化动力学定轨方法在多系统融合中得到了进一步发展。例如,SENTINEL-6 系列卫星搭载支持 GPS 和 Galileo 的多模 GNSS 接收机,通过融合多模 GNSS 数据,在复杂环境中依然能够维持厘米级的轨道精度^[5]。此外,多颗新型 LEO 卫星(如网通一号^[6],天津大学一号^[7],海洋二号^[8])也搭载了多模 GNSS 接收机,利用简化动力学定轨技术实现了厘米级定轨精度,为未来巨型 LEO 星座定轨创造了有利条件。

尽管当前 GNSS 定轨精度已非常高,但优化模糊度固定方法仍能进一步提高精度,其中最具代表性的方法是小数偏差校正方法,有 UPD^[9]和

收稿日期:2025-08-05

项目来源:重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-LZX0150, CSTB2023NSCQ-MSX0327, CSTB2023NSCQ-LZX0122, 2024NSCQ-MSX1488);重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-KPX0098);重庆市教育委员会科学技术研究计划(KJQN202300747, KJQN202400708)。

第一作者简介:郑有司,硕士生,主要从事低轨卫星精密定轨研究, E-mail:1838204515@qq.com。

通讯作者简介:杨志鑫,博士,讲师,主要从事低轨卫星导航增强 GNSS 研究, E-mail:zhixinyang@cqjtu.edu.cn。

OSB 两种形式,以及将偏差与钟差参数一同处理的整数钟法^[10]和去耦钟法^[11]。Montenbruck 等^[12]对 SWARM 卫星的星载 GPS 数据进行处理,通过使用整数钟产品固定星间单差模糊度,结果表明,运动学轨道性能得到显著提升,SLR 残差误差减少 50%,简化动力学轨道的精度提高约 30%。Arnold 等^[13]采用单差模糊度固定技术对 GRACE、SWARM 及 SENTINEL-3 卫星进行轨道确定,并与双差结果对比后发现,单差模糊度固定能够显著提升轨道解算精度。Allende-Alba 等^[14]同样采用星间单差模糊度固定技术对编队卫星轨道进行解算,最终实现了优于 5 mm 的基线精度,为高精度编队飞行任务提供了重要的技术保障。Li 等^[15]提出一种新型的整数模糊度分辨率(integer ambiguity resolution, IAR)质量控制方法,利用 1 个月的 SENTINEL-6A 卫星星载观测数据对 GPS 与 Galileo 的观测数据进行实时精确轨道解算,结果表明,模糊度固定解的精度相较于浮点解从 5.17 cm 提升至 3.61 cm,效率提高 30%。

本文基于 GRACE-C/D、SWARM-A/B/C、SENTINEL-3A/3B/6A 共 8 颗卫星的星载 GNSS 数据,采用简化动力学方法对 2024-04-04—10 共 7 d 的卫星轨道进行解算。随后,分别采用 UPD 产品以及 OSB 产品进行单差模糊度固定,通过分析模糊度固定率、外部参考轨道比较误差以及载波相位残差,评估模糊度固定对 LEO 定轨精度的提升,并针对 SENTINEL-6A 卫星进行多系统定轨分析。

1 定轨模型

1.1 观测方程

由于 LEO 卫星的星载 GNSS 观测数据不受对流层延迟影响,其伪距和载波相位的观测方程可以相应地表示为:

$$\begin{cases} P_{r,j}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + c(b_{r,j} - b_j^s) + I_{r,j}^s + \omega_{r,j}^s \\ L_{r,j}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda_j(B_{r,j} - B_j^s) + \lambda_j N_{r,j}^s - I_{r,j}^s + \epsilon_{r,j}^s \end{cases} \quad (1)$$

式中,上标 s 表示 GNSS 卫星,下标 r 和 j 分别表示低轨卫星上的星载 GNSS 接收机以及信号频率; dt_r 和 dt^s 分别表示星载接收机和低轨卫星的

钟差; c 表示光速; λ_j 表示 GNSS 信号的波长; $I_{r,j}^s$ 表示电离层延迟; $b_{r,j}$ 和 b_j^s 分别表示星载接收机和低轨卫星的伪距硬件延迟; $B_{r,j}$ 和 B_j^s 分别表示星载接收机和低轨卫星的载波相位偏差; $N_{r,j}^s$ 表示载波相位模糊度; $\omega_{r,j}^s$ 和 $\epsilon_{r,j}^s$ 分别表示为伪距和载波相位观测值的多路径效应和随机噪声等未模型化误差。

为消除一阶电离层延迟的影响,通常采用双频无电离层(ionosphere-free, IF)组合。由于伪距硬件延迟与接收机钟差之间的耦合关系,导致待估卫星钟差和接收机钟差分别吸收了伪距硬件延迟和载波相位偏差,同时待估的模糊度参数也会吸收伪距和载波相位系统偏差,从而影响模糊度参数的整数特性^[16]。IF 组合的伪距和载波相位观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(d\hat{t}_{r,IF} - d\hat{t}_{IF}^s) + \omega_{r,IF}^s \\ L_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(d\hat{t}_{r,IF} - d\hat{t}_{IF}^s) + \lambda_{IF}\hat{N}_{r,IF}^s + \epsilon_{r,IF}^s \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} d\hat{t}_{r,IF} = dt_r + b_{r,IF} \\ d\hat{t}_{IF}^s = dt^s + b_{IF}^s \\ \hat{N}_{r,IF}^s = N_{r,IF}^s + (B_{r,IF} - B_{IF}^s - b_{r,IF} + b_{IF}^s)/\lambda_{IF} \end{cases} \quad (3)$$

式中, λ_{IF} 表示 IF 组合的波长; $b_{r,IF}$ 和 b_{IF}^s 分别表示星载接收机和低轨卫星的 IF 组合下伪距硬件延迟; $B_{r,IF}$ 和 B_{IF}^s 分别表示星载接收机和低轨卫星的 IF 组合载波相位偏差; $d\hat{t}_{r,IF}$ 和 $d\hat{t}_{IF}^s$ 分别为吸收了伪距硬件延迟的接收机和卫星的钟差参数; $\hat{N}_{r,IF}^s$ 表示吸收了相位偏差和伪距偏差的无电离层组合载波相位模糊度参数。

低轨卫星在绕地球轨道运动时,受到地球引力、大气阻力、太阳光压以及相对论效应等多种力的综合作用。为了便于计算和处理这些复杂的动力学问题,通常需要对卫星观测方程进行线性化处理,并引入卫星状态转移矩阵。通过状态转移矩阵,可以将卫星的状态(包括位置、速度等)从一个时刻传递到另一个时刻,从而更精确地描述卫星的运动。在低轨卫星观测方程中引入状态转移矩阵后可以表示为:

$$\begin{cases} p_{r,IF}^s = e_r^s \cdot \Phi(t, t_0)_r \cdot O_{r,0} + c(d\hat{t}_{r,IF} - d\hat{t}_{IF}^s) + \omega_{r,IF}^s \\ l_{r,IF}^s = e_r^s \cdot \Phi(t, t_0)_r \cdot O_{r,0} + c(d\hat{t}_{r,IF} - d\hat{t}_{IF}^s) + \lambda_{IF}\hat{N}_{r,IF}^s + \epsilon_{r,IF}^s \end{cases} \quad (4)$$

其待估参数可表示为:

$$\mathbf{X}_{\text{LEO}} = (O_{r,0}, \hat{d}_{r,\text{IF}}, \hat{d}_{r,\text{IF}}^s, \hat{N}_{r,\text{IF}}^s)^T \quad (5)$$

式中, $p_{r,\text{IF}}^s$ 和 $l_{r,\text{IF}}^s$ 代表伪距和载波相位的观测值与模型值之差; $\mathbf{e}_r^s$ 表示 GNSS 卫星至星载接收机的单位向量; $\boldsymbol{\varphi}(t, t_0)_r$ 表示低轨卫星从参考时刻 t_0 至当前时刻 t 的状态转移矩阵; $O_{r,0}$ 表示低轨卫星的 t_0 时刻初始状态的改正数, 包括低轨卫星的位置改正数 (x_0, y_0, z_0) 、速度改正数 $(v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0})$ 、和力模型参数改正数 $(p_{r,1}, p_{r,2}, \dots, p_{r,n})$ 。

$$\begin{cases} \hat{N}_{r,\text{WL}}^s = \frac{L_{r,1}^s}{\lambda_1} - \frac{L_{r,2}^s}{\lambda_2} - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_{r,1}^s}{\lambda_1} - \frac{P_{r,2}^s}{\lambda_2} \right) = N_{r,\text{WL}}^s + d_{r,\text{WL}} - d_{\text{WL}}^s \\ \hat{N}_{r,\text{NL}}^s = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \hat{N}_{r,\text{IF}}^s - \frac{f_2}{f_1 - f_2} N_{r,\text{WL}}^s = N_{r,\text{NL}}^s + d_{r,\text{NL}} - d_{\text{NL}}^s \end{cases} \quad (6)$$

式中, $d_{r,\text{WL}}$ 、 d_{WL}^s 、 $d_{r,\text{NL}}$ 和 d_{NL}^s 分别表示接收机和卫星端的宽巷和窄巷 UPD; $d_{r,\text{NL}}$ 和 d_{NL}^s 分别表示接收机和卫星端的窄巷 UPD。当宽巷和窄巷模糊度固定后, 便可实现消电离层组合的模糊度固定。

接收机端的小数偏差通常是未知的, 因此可以通过星间单差 (single difference, SD) 方法来消除这些偏差^[18]。经过 UPD 改正后的单差宽巷模糊度 $\bar{N}_{r,\text{WL}}^{s1,s2}$ 和窄巷模糊度 $\bar{N}_{r,\text{NL}}^{s1,s2}$ 可表示为:

$$\begin{cases} \bar{N}_{r,\text{WL}}^{s1,s2} = \hat{N}_{r,\text{WL}}^{s1,s2} + \hat{d}_{\text{WL}}^{s1,s2} \\ \bar{N}_{r,\text{NL}}^{s1,s2} = \frac{f_1 + f_2}{f_1} \hat{N}_{r,\text{IF}}^{s1,s2} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \cdot \bar{N}_{r,\text{WL}}^{s1,s2} + \hat{d}_{\text{NL}}^{s1,s2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $s1$ 和 $s2$ 分别表示参与单差计算的参考卫星和目标卫星; $\hat{N}_{r,\text{WL}}^{s1,s2}$ 和 $\hat{N}_{r,\text{IF}}^{s1,s2}$ 分别表示由观测方程得到的星间单差宽巷浮点模糊度和 IF 组合浮点模糊度; $\hat{d}_{\text{WL}}^{s1,s2}$ 和 $\hat{d}_{\text{NL}}^{s1,s2}$ 分别表示星间单差卫星端宽巷和窄巷 UPD 改正数。

宽巷组合波长较长, 且宽巷 UPD 具有较好的稳定性, 因此采用取整法对宽巷模糊度直接固定。对于窄巷模糊度, 则采用 LAMBDA 方法进行搜索, 并确定窄巷模糊度最优解^[19]。最后完成对其他参数的更新, 获得模糊度固定解:

$$\bar{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{Q}_{\text{NN}} \mathbf{Q}_{\text{NN}}^{-1} (\nabla \bar{N}_n - \nabla \hat{N}_n) \quad (8)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}$ 和 $\bar{\mathbf{x}}$ 分别表示浮点解和固定解; $\nabla \bar{N}_n$ 和 $\nabla \hat{N}_n$ 分别表示经过 UPD 改正后的单差窄巷模糊度和固定为整数的单差窄巷模糊度; $\mathbf{Q}_{\text{NN}}$ 和 $\mathbf{Q}_{\text{NN}}^{-1}$ 为协方差矩阵。

值得注意的是, 上述基于 UPD 的方法是处理模糊度固定的经典模型。随着 GNSS 向多频

1.2 星间单差模糊度固定

由于 IF 组合的模糊度参数 $\hat{N}_{r,\text{IF}}^s$ 不具备整周特性, 不能直接固定, 通常将其分解为宽巷 (wide-line, WL) 模糊度和窄巷 (narrow-line, NL) 模糊度的组合进行处理^[17], 宽巷模糊度参数 $\hat{N}_{r,\text{WL}}^s$ 通常采用 MW (Melbourne-Wübbena) 组合进行求解, 宽巷模糊度固定为整数后, 将其从 IF 组合的模糊度参数 $\hat{N}_{r,\text{IF}}^s$ 中减去, 就可得到窄巷模糊度参数 $\hat{N}_{r,\text{NL}}^s$ 。具体公式如下:

多系统发展, 一种更为灵活的 OSB 改正模型被提出并得到广泛应用。与 UPD 在模糊度组合 (如宽巷、窄巷) 层面进行改正不同, OSB 模型在数据处理的最前端, 即直接对原始的伪距和载波相位观测方程进行偏差修正。具体而言, 在使用 OSB 产品时, 原始观测方程被修正为:

$$\begin{cases} P_{r,j}^s - d_{P,j}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{r,j}^s + \omega_{r,j}^s \\ L_{r,j}^s - d_{L,j}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda_j N_{r,j}^s - I_{r,j}^s + \epsilon_{r,j}^s \end{cases} \quad (9)$$

式中, $d_{P,j}^s$ 和 $d_{L,j}^s$ 分别代表伪距和载波相位 OSB 改正值。通过这种方式, 模糊度参数的整数特性在数据处理的初始阶段即被恢复。因此, 后续形成的任何组合模糊度 (包括宽巷、窄巷等) 的浮点解都能自然地趋近于其整数真值, 无需再针对特定组合进行二次改正。该方法理论上更为严谨, 且在处理多系统时具有更好的灵活性和一致性。

2 定轨数据及方法

2.1 数据来源

本文分析了 3 种用于科学探测的 8 颗 LEO 卫星, 分别为 GRACE-C、GRACE-D、SWARM-A、SWARM-B、SWARM-C、SENTINEL-3A、SENTINEL-3B 和 SENTINEL-6A。具体参数如表 1 所示^[20-22]。

本文采用 2024-04-04—10 的低轨卫星星载观测数据进行简化动力学定轨分析。其中, GRACE-FO 数据包括 GPS 星载观测数据、卫星姿态数据以及精密轨道产品, 这些数据可从 GFZ 的网站下载; SWARM 卫星也包含类似的 GPS 星载

表 1 GRACE-FO、SWARM 和 SENTINEL 卫星具体参数
Tab.1 Specific parameters of GRACE-FO, SWARM and SENTINEL satellites

卫星名	轨道高度/km	轨道倾角/(°)	天线 PCO/mm
GRACE-C	492.0	89.10	−6.30,253.90,−476.97
GRACE-D	492.0	89.10	−1.07,260.04,−476.18
SWARM-A	480.0	87.40	−7.82,330.50,−471.00
SWARM-B	530.0	87.80	−7.98,319.40,−471.00
SWARM-C	480.0	87.40	−9.82,322.00,−471.00
SENTINEL-3A	814.5	98.65	−413.00,1 372.00,−870.00
SENTINEL-3B	814.5	98.65	−416.00,1 378.00,−870.00
SENTINEL-6A	1 336.0	65.90	7.00,942.00,−1 185.00

数据、卫星姿态数据和精密轨道产品,可从欧洲航天局网站获取;SENTINEL-3 和 SENTINEL-6 系列卫星的数据,包括星载 GPS 和 Galileo 观测数据、卫星姿态数据以及精密轨道产品,可从哥白尼数据空间生态系统官网获取。

2.2 定轨策略

星载 GNSS 观测中,瞬时相位中心的位置会随外部环境而变化。通常采用平均相位中心(mean antenna phase center, MAPC)作为其平均表征。MAPC 与几何参考点的固定距离称为天线相位中心偏差(phase center offset, PCO),而其与瞬时相位中心的变化量则定义为天线相

位中心变化(phase center variation, PCV)^[23]。本文基于卫星 PCO 值利用残差法^[24]对载波相位观测值的验后残差进行处理,并通过多次迭代优化 PCV 参数,针对每颗卫星建立 PCV 模型。该方法能够有效校正由天线相位中心偏移所引起的误差,从而提高定轨精度。图 1 展示了本文所估计的 8 颗 LEO 卫星 PCV 模型结果,可以看出,GRACE-FO 系列的 2 颗卫星的 PCV 显著高于其余 6 颗卫星,而 SWARM 与 SENTINEL 系列卫星的 PCV 较小,说明其在运行过程中天线相位中心位置更加稳定,可以有效减少系统误差带来的影响。

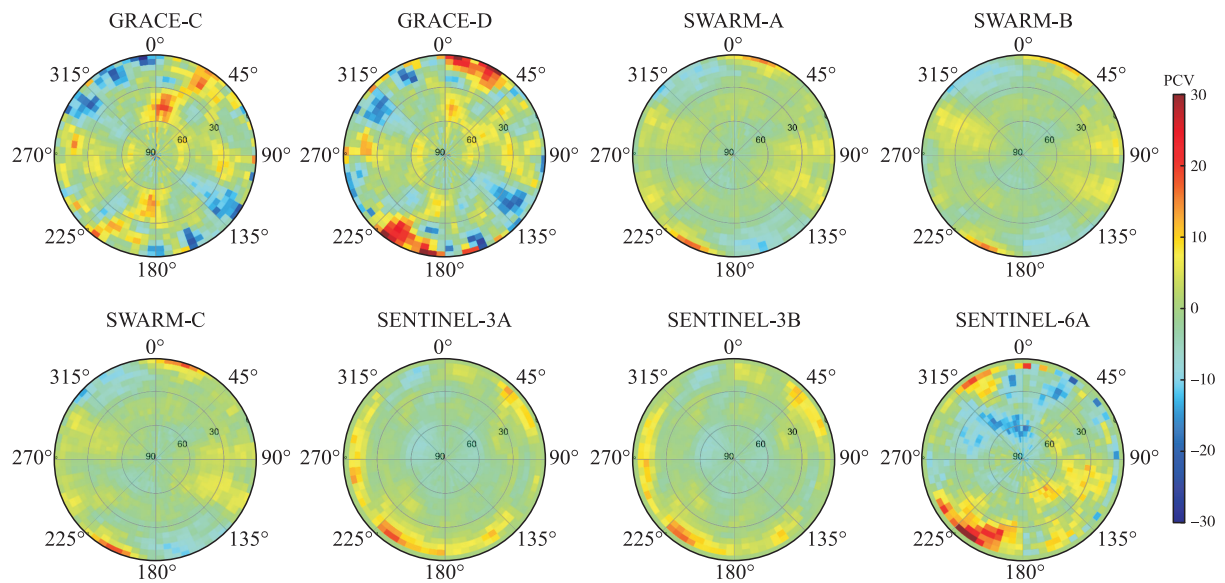


图 1 估计的 GRACE、SWARM、SENTINEL 卫星 PCV 模型
Fig.1 Estimated PCV models for GRACE, SWARM and SENTINEL satellites

本文在对 8 颗 LEO 卫星进行精密定轨时,采取了一致的定轨策略以确保方法上的统一性。所有的定轨解算与数据处理工作,均基于武汉大学研发的 PANDA 软件完成。所需的 GNSS 卫星精密轨道、钟差以及 OSB 产品均来源于欧洲定轨中心(CODE)发布的最终产品。作为对比,所

用的 UPD 产品是基于全球约 100 个 IGS 测站的观测数据,利用 PANDA 软件自主解算获得。表 2 汇总了各卫星在精密定轨中使用的方法和参数设置。

为分析本文估算的 PCV 模型对定轨精度的具体影响,选取 GRACE-C、SWARM-A 和 SEN-

表 2 LEO 卫星天线 PCO 改正值 Tab.2 Antenna PCO correction value of LEO satellites		
类别	项目	处理策略
观测模型	观测值	GNSS 双频 IF 组合伪距和载波相位观测值
	数据采样率	10 s
	截止高度角	1°
	天线相位缠绕	采用模型改正 ^[25]
	GNSS 天线相位中心	采用 igs20.atx 文件改正
动力学模型	LEO 天线相位中心	PCO 采用官方提供的信息并改正,PCV 利用残差法改正
	对流层延迟	无
	地球重力场	EIGEN6C (120×120 阶)
	N 体引力	JPL DE405 行星星历
	海洋负荷潮	FES 2004 全球海潮模型 ^[26]
	固体潮和极潮	IERS Conventions 2010
	相对论效应	IERS Conventions 2010
	太阳光压	BOX-wing 模型 ^[27]
	大气阻力	DTM94 密度模型 ^[28]
	经验力模型	轨道切向和法向分段周期模型,90 min 一组
参数估计	卫星状态参数	低轨卫星初始状态参数和力模型参数(每 6 h 估计一次大气阻力,每 90 min 估计一组分段周期经验力模型)
	接收机钟差	逐历元估计
	相位模糊度固定	每个弧段估计一个模糊度参数

TINEL-3A 三颗具有代表性的卫星,进行有无 PCV 改正的对比实验,结果如表 3 所示。可以看出,实施 PCV 改正能够有效提升低轨卫星的定轨精度,尤其是在模糊度固定解中效果更为显著。以 SENTINEL-3A 卫星为例,在应用 PCV 模型后,其浮点解精度从 2.4 cm 提升至 2.2 cm,固定解精度则从 1.0 cm 提升至 0.9 cm。对于 GRACE-C 卫星,其固定解精度也得到明显改善,从 1.7 cm 提升至 1.5 cm。而 SWARM-A 卫星的定轨精度在 PCV 改正前后没有变化,这主要是由于该卫星自身的天线相位中心位置非常稳定,其 PCV 值本身较小(图 2),因此进行改正所带来的影响几乎可以忽略。综合来看,实验结果验证了本文所估算的 PCV 模型的有效性,证明精确的天线相位中心修正是实现 cm 级精密定轨不可或缺的一步。

3 结果与讨论

3.1 模糊度固定分析

本文通过 UPD 和 OSB 两类产品对低轨卫

表 3 PCV 对 LEO 卫星定轨精度的影响对比 Tab.3 Comparison of the impact of PCV on the POD of LEO satellites				
卫星名称	无 PCV		有 PCV	
	浮点解/cm	固定解/cm	浮点解/cm	固定解/cm
GRACE-C	1.9	1.7	1.9	1.5
SWARM-A	2.4	1.7	2.4	1.7
SENTINEL-3A	2.4	1.0	2.2	0.9

星进行模糊度固定分析,其中模糊度固定率被用作评估该方法的关键参数。结合表 4 可以看出,宽巷模糊度固定率普遍接近 100%,表现出较高的稳定性;窄巷模糊度固定率整体虽维持在较高水平,但存在一定波动。以 GRACE-C 和 GRACE-D 卫星为例,其窄巷模糊度固定率相比宽巷模糊度固定率波动较为明显,这种差异可能受到特定卫星观测环境、信号质量及参数处理复杂性的影响。值得注意的是,SENTINEL 系列卫星在窄巷模糊度固定率上的表现优于 SWARM 系列卫星。例如,基于 UPD 产品模糊度固定后,SENTINEL-3A 和 SENTINEL-3B 的窄巷模糊度固定率分别为 98.17%和 98.16%,均明显高于 SWARM 系列卫星的 94.92%~96.37%。这表明 SENTINEL 系列卫星在窄巷模糊度固定方面更加稳定。

表 4 不同产品的平均模糊度固定率统计
Tab.4 Statistics of average ambiguity fixing rate with different products

卫星名称	UPD	OSB
	(宽巷/窄巷)/%	(宽巷/窄巷)/%
GRACE-C	96.32/82.97	95.88/82.16
GRACE-D	96.89/81.67	96.50/81.16
SWARM-A	100/94.92	99.96/95.40
SWARM-B	100/96.37	100/96.28
SWARM-C	100/95.87	100/95.13
SENTINEL-3A	99.92/98.17	99.92/98.13
SENTINEL-3B	99.96/98.16	99.96/97.63
SENTINEL-6A	99.49/94.11	99.41/94.73

3.2 基于 UPD 产品的轨道结果评估

为检验定轨精度,分别将浮点解与使用 UPD 产品得到的固定解与精密科学轨道(precise science orbit, PSO)进行比较,图 2~4 和表 5 展示了一周内 8 颗卫星在切向(A)、法向(C)、径向(R)和三维(3D)方向上的均方根误差(root mean square, RMS)。

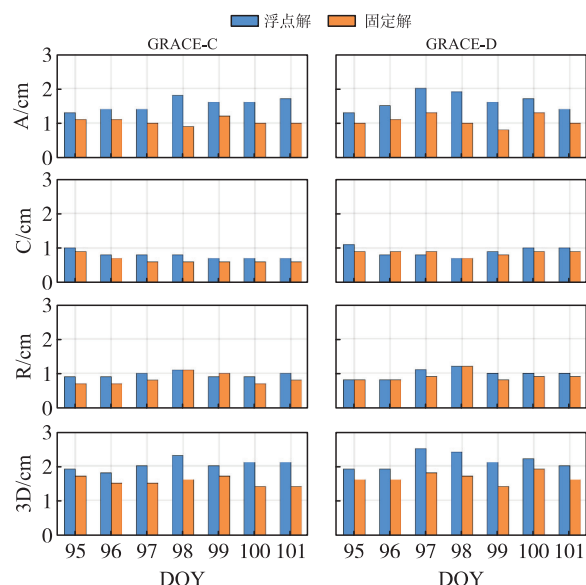


图 2 基于 UPD 产品的 GRACE-C/D 浮点解与固定解轨道误差 RMS 值
Fig.2 The orbit differences RMS of GRACE-C/D float and fixed solutions with UPD products

表 5 基于 UPD 产品的浮点解与固定解平均轨道误差 RMS 统计

Tab.5 Statistics of average orbit differences RMS for float and fixed solutions with UPD products

LEO 卫星系列	模式	切向/cm	法向/cm	径向/cm	3D RMS/cm
GRACE	浮点解	1.6	0.9	1.1	2.1
	固定解	1.0	0.7	1.0	1.5
SWARM	浮点解	1.6	0.9	1.2	2.1
	固定解	0.9	0.8	1.5	1.5
SENTINEL	浮点解	1.4	0.7	0.8	1.8
	固定解	0.5	0.5	0.5	0.9

根据一周内所有定轨弧段的 RMS 平均值分析,固定解相较于浮点解在切向、法向和径向方向上的表现均有显著提升。GRACE-C 固定解为 1.4 cm,总体精度提升 30%,其中切向、法向、径向从 1.6 cm、0.8 cm、0.8 cm 降至 1.0 cm、0.8 cm、0.8 cm。GRACE-D 固定解为 1.5 cm,提升幅度略低,为 28.57%。SWARM 系列卫星中,SWARM-A、

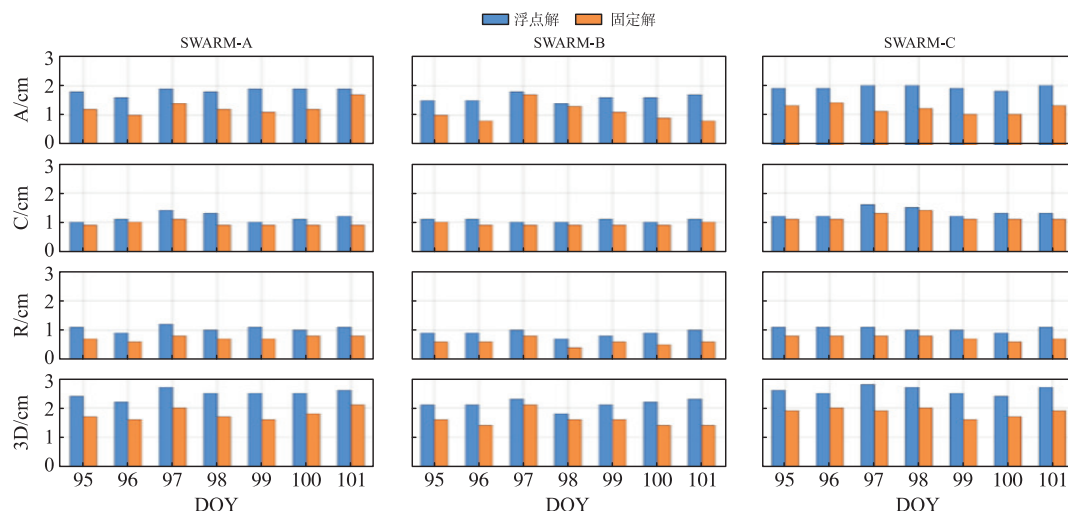


图 3 基于 UPD 产品的 SWARM-A/B/C 浮点解与固定解轨道误差 RMS 值
Fig.3 The orbit differences RMS of SWARM-A/B/C float and fixed solutions with UPD products

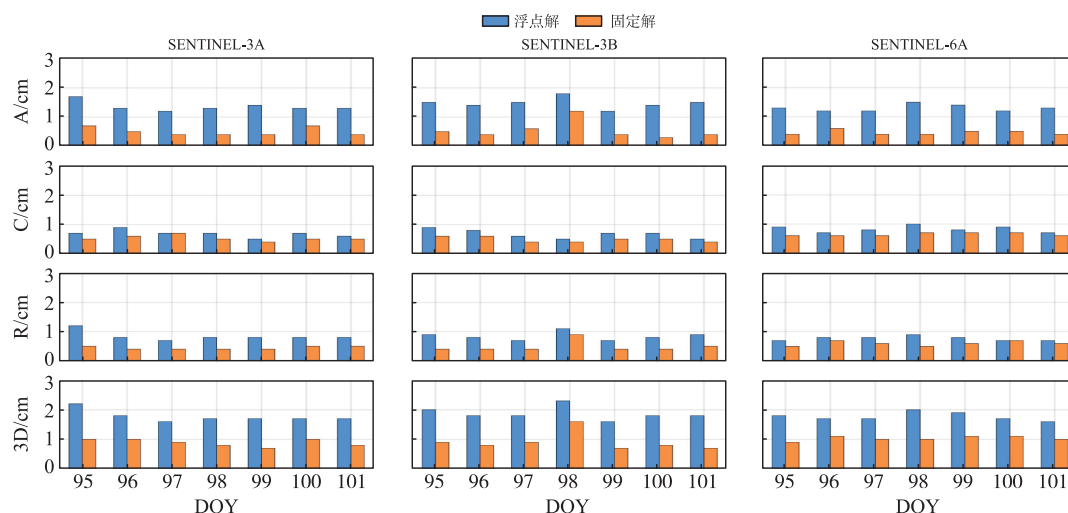


图 4 基于 UPD 产品的 SENTINEL-3A/3B/6A 浮点解与固定解轨道误差 RMS 值
Fig.4 The orbit differences RMS of SENTINEL-3A/3B/6A float and fixed solutions with UPD products

SWARM-B 和 SWARM-C 的定轨精度分别提升 32.0%、23.8% 和 26.9%，其中 SWARM-B 表现最佳，切向误差从 1.6 cm 降至 1.1 cm，径向误差从 1.0 cm 降至 0.9 cm，法向误差从 0.9 cm 降至 0.6 cm，3D RMS 从 2.1 cm 降至 1.6cm。SENTINEL 系列卫星中，SENTINEL-3A 和 SENTINEL-3B 的固定解均为 0.9 cm，较浮点解分别提升 50.0% 和 52.6%，SENTINEL-6A 的固定解为 1.0 cm，精度提升 44.0%。综合来看，GRACE-FO、SWARM 和 SENTINEL 系列卫星的固定解平均 3D RMS 分别为 1.5 cm、1.5 cm 和 0.9 cm，较浮点解的 2.1 cm、2.1 cm 和 1.8 cm，分别提升约 25%、29% 和 50%。

3.3 基于 OSB 产品的轨道结果评估

检验定轨效果的另一方法是将浮点解与 OSB 产品得到的固定解与精密科学轨道进行对比。图 5~7 及表 6 详细呈现了使用 OSB 产品一周内 8 颗卫星在切向(A)、法向(C)、径向(R)以及三维(3D)方向上的均方根误差。

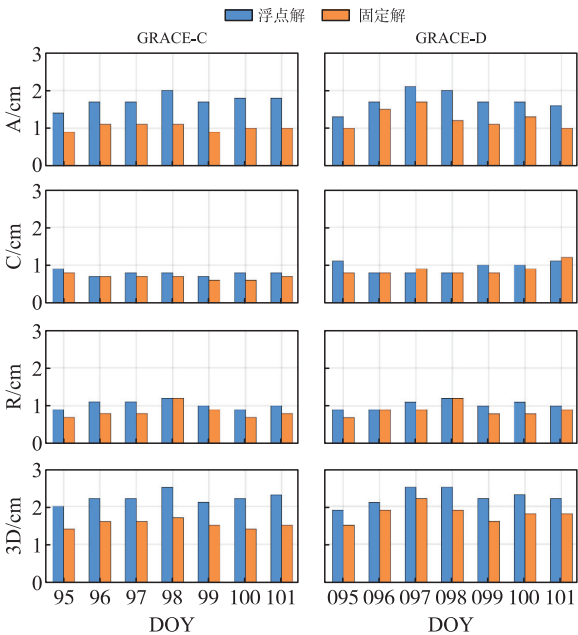


图 5 基于 OSB 产品的 GRACE-C/D 浮点解与固定解轨道误差 RMS 值

Fig.5 The orbit differences RMS of GRACE-C/D float and fixed solutions with OSB products

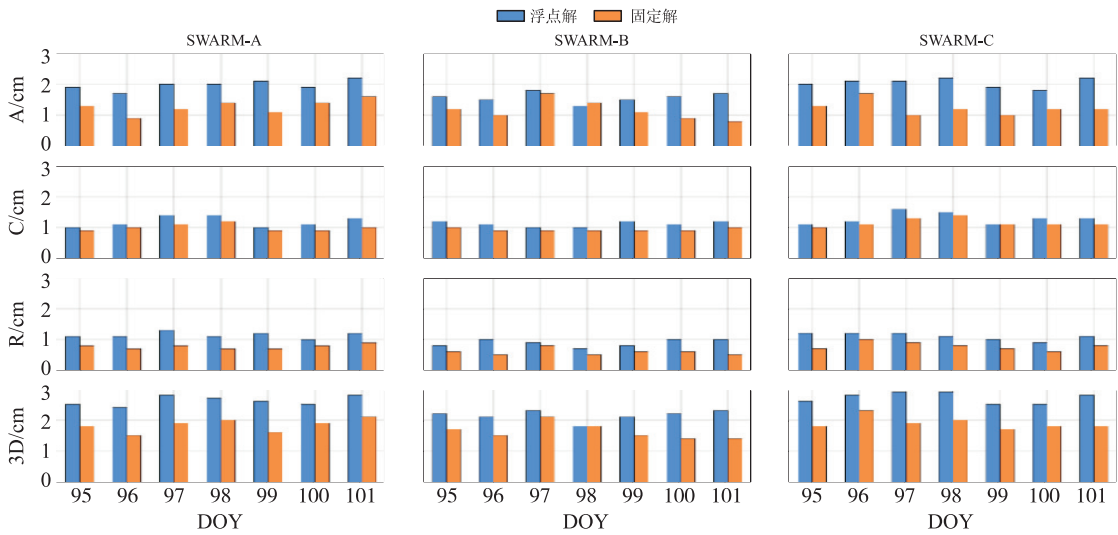


图 6 基于 OSB 产品的 SWARM-A/B/C 浮点解与固定解轨道误差 RMS 值

Fig.6 The orbit differences RMS of SWARM-A/B/C float and fixed solutions with OSB products

表 6 基于 OSB 产品的浮点解与固定解平均轨道误差 RMS 统计

Tab.6 Statistics of average orbit differences RMS for float and fixed solutions with OSB products

卫星	解法	切向/cm	法向/cm	径向/cm	3D RMS/cm
GRACE	浮点解	1.7	0.9	1.0	2.2
	固定解	1.1	0.8	0.9	1.7
SWARM	浮点解	1.9	1.2	1.0	2.5
	固定解	1.2	1.0	0.7	1.8
SENTINEL	浮点解	1.5	0.7	0.8	1.9
	固定解	0.5	0.6	0.6	1.0

图表分析结果显示，使用 OSB 产品模糊度固定后，各系列卫星的定轨精度均显著提高。其中，在 GRACE 系列卫星中，GRACE-C 的固定解在切向、法向、径向误差分别降至 1.0 cm、0.7 cm、0.8 cm，相较于浮点解分别提升 41.2%、12.5% 和 20.0%，3D RMS 从 2.2 cm 降至 1.5 cm，提升 31.8%。GRACE-D 的固定解 3D RMS 从 2.2 cm 降至 1.8 cm，提升幅度为 18.2%。在 SWARM 系列卫星中，SWARM-A 的切向、法向、径向分别提升 35.0%、16.7% 和 27.3%，3D RMS 从 2.6 cm 降至 1.8 cm，提升 30.8%。

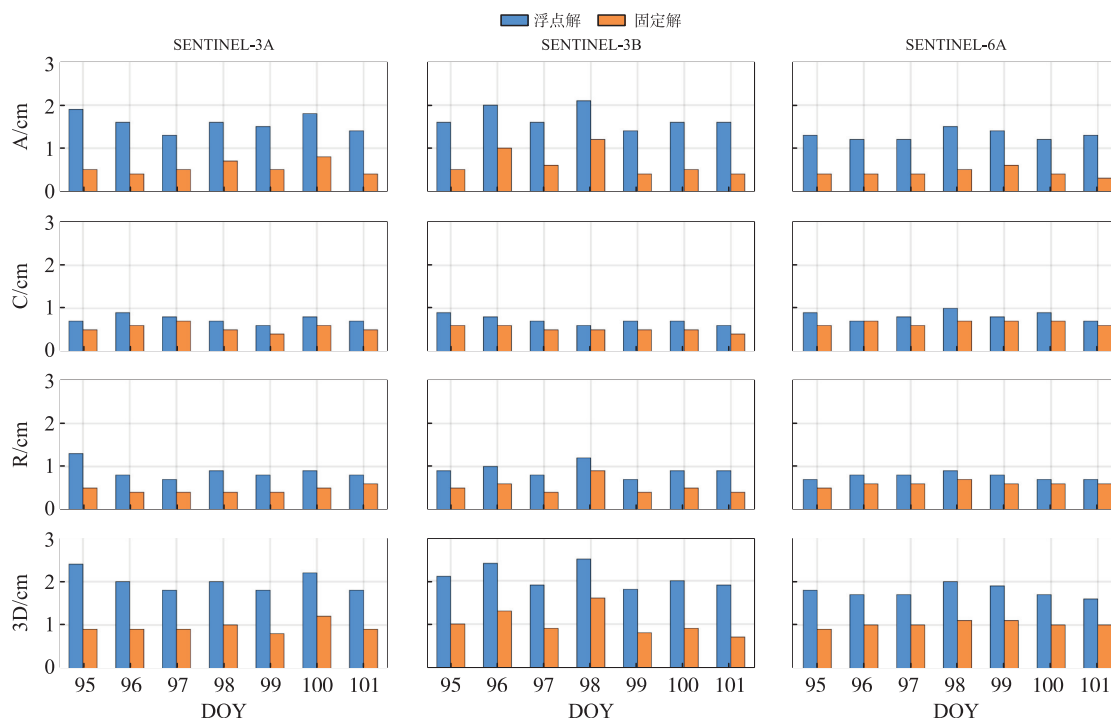


图7 基于 OSB 产品的 SENTINEL-3A/3B/6A 浮点解与固定解轨道误差 RMS 值

Fig.7 The orbit differences RMS of SENTINEL-3A/3B/6A float and fixed solutions with OSB products

SWARM-B 和 SWARM-C 提升同样显著,特别是 SWARM-C,其 3D RMS 从 2.7 cm 降至 1.9 cm,提升 29.6%。在 SENTINEL 系列卫星中,SENTINEL-3A 的切向、法向和径向分别提升 68.8%、28.6% 和 33.3%,3D RMS 降低至 0.9 cm,提升幅度高达 55.0%;SENTINEL-6A 的 3D RMS 从 1.8 cm 降至 1.0 cm,精度提升 44.4%。

3.4 载波相位残差分析

载波相位残差主要由平差过程中的模型误差与未建模误差构成,用以评估简化动力学方法中力学模型的精度。表 7 对模糊度固定前后的载波相位残差进行统计。

表 7 不同产品的浮点解与固定解载波相位残差 RMS 值

Tab.7 Phase residual RMS for float and fixed solutions with different products

卫星 名称	UPD	OSB
	(浮点解/固定解)/cm	(浮点解/固定解)/cm
GRACE-C	0.70/0.86	0.71/0.90
GRACE-D	0.74/0.94	0.75/0.98
SWARM-A	0.78/0.96	0.80/0.98
SWARM-B	0.78/0.93	0.79/0.96
SWARM-C	0.76/0.94	0.77/1.10
SENTINEL-3A	0.69/0.86	0.70/0.90
SENTINEL-3B	0.69/0.83	0.70/0.87
SENTINEL-6A	0.68/0.87	0.68/0.89

通过分析表中数据发现,固定解的载波相位残差 RMS 值均略高于浮点解。在浮点解中,模糊度参数被当作实数进行估计。这赋予了它们

较高的自由度,使其不仅可以估算模糊度的真值,还能吸收一部分未被精确建模的误差(例如微小的动力学模型误差、观测模型偏差等)。而在固定解中,本文对模糊度参数施加了非常强的整数约束,这一约束消除了模糊度参数吸收其他模型误差的能力。因此,原先被浮点模糊度所吸收的这部分模型误差,在模糊度被强制固定为整数后,便会转移并最终体现在验后的载波相位残差中,导致残差的 RMS 值出现轻微的增大。具体来看,GRACE-C 和 GRACE-D 卫星在使用 UPD 产品时的浮点解和固定解 RMS 值分别为 0.70 cm 和 0.86 cm、0.74 cm 和 0.94 cm,而在使用 OSB 产品时分别为 0.71 cm 和 0.90 cm、0.75 cm 和 0.98 cm,两者数值相近。相较 GRACE 系列,SWARM 系列卫星在使用 UPD 和 OSB 产品时的 RMS 值整体略高,其浮点解和固定解的 RMS 值介于 0.76~1.10 cm 之间,其中 SWARM-C 的 OSB 固定解 RMS 值达到 1.10 cm。相比之下,SENTINEL 系列卫星的 RMS 值明显较低,尤其是 SENTINEL-6A,其使用 UPD 产品时的浮点解和固定解 RMS 值分别为 0.68 cm 和 0.87 cm。综合来看,使用 UPD 和 OSB 产品时的载波相位残差均较低,说明其具有较高的定轨精度。

3.5 SENTINEL-6A 不同系统轨道精度对比分析

SENTINEL-6A 卫星搭载了澳大利亚 RUAG 公司研发的 PODRIX/Galileo 双模接收

机,该设备支持 L1/L2/L5 和 E1/E5a 多频段信号接收,可以有效提高信号接收的覆盖范围与精度。因此,本文分析了 SENTINEL-6A 卫星在仅使用 Galileo 系统定轨时的性能,并将其与 GPS 和 Galileo 系统联合定轨的结果进行对比研究(图 8)。表 8 为 SENTIENL-6A 卫星在不同系统下使用 UPD 产品的简化动力学定轨统计结果。结果表明,在仅使用 Galileo 系统时,沿轨道方向的浮点解精度较差,模糊度固定后精度显著提升。相比之下,采用 GPS 与 Galileo 组合系统后,所有方向上的精度均有所提高,其固定解整体精度为 0.9 cm,相比单 Galileo 系统精度提升 18%。此外,与单 GPS 系统相比,GPS 和 Galileo 双系统组合的定位精度也有约 10%的提升。总体而言,GPS + Galileo 双系统组合在所有方向上的定位精度均优于单一系统,充分显示出双系统组合在低轨卫星定轨中的优势。

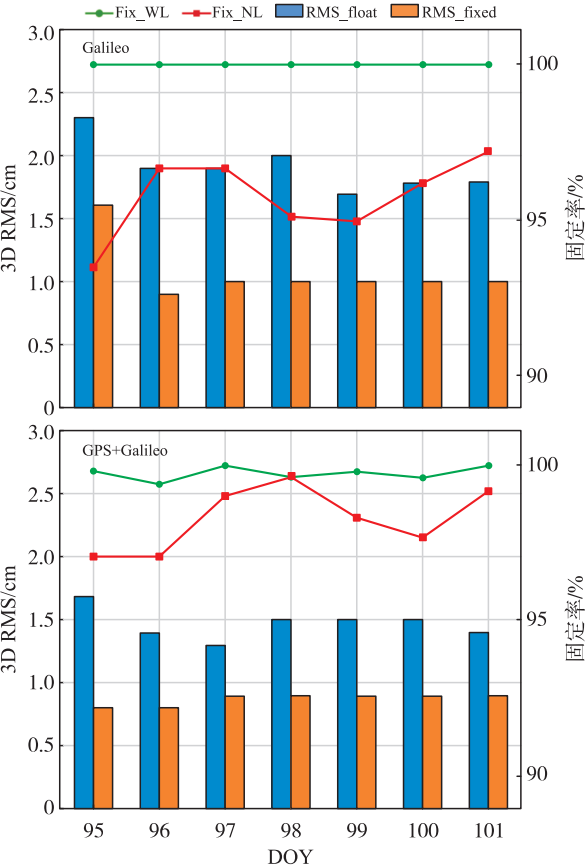


图 8 基于 UPD 产品的 SENTINEL-6A 卫星不同系统模糊度固定结果
Fig.8 Ambiguity fixing results for different systems of the SENTINEL-6A satellite with UPD products

4 结 语

本文基于 2024-04-04—10 的 LEO 星载观测数据,评估了不同产品和系统的模糊度固定与定

表 8 基于 UPD 产品的 SENTINEL-6A 不同系统浮点解与固定解平均轨道误差 RMS 统计

Tab.8 Statistics of average orbit differences RMS for different systems of SENTINEL-6A for float and fixed solutions with UPD products

系统		切向/cm	法向/cm	径向/cm	3D/cm
单 Galileo	浮点解	1.4	0.9	0.8	1.9
	固定解	0.5	0.6	0.6	1.1
GPS + Galileo	浮点解	1.0	0.8	0.7	1.5
	固定解	0.3	0.6	0.5	0.9

轨精度,通过分析模糊度固定结果、外部参考轨道误差以及载波相位残差,并对 SENTINEL-6A 卫星进行多系统定轨评估,得出以下结论:

1)使用 UPD 和 OSB 产品进行模糊度固定时,宽巷固定率均接近 100%,除 GRACE 卫星的窄巷模糊度固定率约为 85%外,其余卫星的窄巷模糊度固定率均接近 95%。

2)基于 UPD 和 OSB 产品改正的单差固定解均可显著提升低轨卫星定轨精度。使用 UPD 产品时,GRACE-FO、SWARM 和 SENTINEL 卫星的固定解精度分别为 1.5 cm、1.7 cm、0.9 cm,较浮点解分别提升约 25%、29%、50%;而使用 OSB 产品时,各卫星的固定解精度分别为 1.7 cm、1.8 cm、1.0 cm,分别提升约 23%、28%、47%。此外,大多数卫星的固定解平均相位残差 RMS 值均低于 1 cm。

3)SENTINEL-6A 卫星在不同 GNSS 系统下的定轨精度评估结果表明,采用 GPS 和 Galileo 双系统组合的固定解精度为 0.9 cm,相较于单 GPS 和单 Galileo 系统,精度分别提升约 10%和 18%。双系统组合在低轨卫星定轨中显示出优势。

4)对比 UPD 与 OSB 产品可以发现,两者在提升 LEO 卫星定轨精度上的效果基本相同。在数据获取的便捷性和使用的复杂程度上,两者也无明显差异。但考虑到 OSB 模型在理论上更为严谨和具有灵活性,是未来偏差改正技术的发展趋势,因此在实际应用中更推荐使用 OSB 产品。这一结论可为相关研究和工程应用提供参考。

综上,本文通过对多颗典型 LEO 卫星的定轨分析表明,基于 UPD 与 OSB 产品的模糊度固定方法能够显著提高定轨精度。不同卫星任务的定轨性能存在系统性差异,其中轨道较高的卫星在模糊度固定率和最终定轨精度上均表现更优。对比 2 种偏差改正产品可以发现,尽管 UPD

与 OSB 产品在最终定轨性能上基本等价,但考虑到 OSB 模型在理论上的先进性,更推荐在未来应用中使用。此外,多 GNSS 系统组合定轨较单系统具有明显优势,能有效提高定轨精度及可靠性。随着巨型 LEO 星座的快速发展,这些基于先进偏差产品和多系统组合的精密定轨策略及性能规律,将为未来大规模星座的运行和应用提供重要参考。

参考文献

- [1] Wu S C, Yunck T P, Thornton C L. Reduced-Dynamic Technique for Precise Orbit Determination of Low Earth Satellites [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1991, 14(1): 24-30
- [2] Fu L L, Christensen E J, Yamarone C A Jr, et al. TOPEX/POSEIDON Mission Overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24369-24381
- [3] 张小红, 李盼, 左翔. 固定模糊度的精密单点定位几何定轨方法及结果分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2013, 38(9): 1009-1013 (Zhang Xiaohong, Li Pan, Zuo Xiang. Kinematic Precise Orbit Determination Based on Ambiguity-Fixed PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1009-1013)
- [4] 田英国, 郝金明. Swarm 卫星天线相位中心校正及其对精密定轨的影响[J]. *测绘学报*, 2016, 45(12): 1406-1412 (Tian Yingguo, Hao Jinming. Swarm Satellite Antenna Phase Center Correction and Its Influence on the Precision Orbit Determination[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(12): 1406-1412)
- [5] 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*, 2025, 50(1): 42-52 (Jin Biao, Chen Shanshan, Li Min, et al. Kinematic Precise Orbit Determination of Sentinel-6A Satellite with Spaceborne GPS/Galileo Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(1): 42-52)
- [6] Wu Z Q, Yu B G, Sheng C Z, et al. In-Flight Performance Analysis of the Navigation Augmentation Payload on LEO Communication Satellite: A Preliminary Study on WT01 Mission[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2022, 25(1): 88-103
- [7] Gong X W, Li X X, Wang P C, et al. High-Precision Orbit Determination of the Small TJU-1 Satellite Using GPS, GLONASS, and BDS[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(12): 13340-13350
- [8] Jiang K C, Li W W, Li M, et al. Precise Orbit Determination of Haiyang-2D Using Onboard BDS-3 B1C/B2a Observations with Ambiguity Resolution [J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1)
- [9] 张小红, 李星星. 非差模糊度整数固定解 PPP 新方法及实验[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2010, 35(6): 657-660 (Zhang Xiaohong, Li Xingxing. A New Method for Zero-Differenced Integer Ambiguity Resolution and Its Application to PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 657-660)
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Montenbruck O, Hackel S, van den Ijssel J, et al. Reduced Dynamic and Kinematic Precise Orbit Determination for the Swarm Mission from 4years of GPS Tracking [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3):
- [13] Arnold D, Schaer S, Villiger A, et al. Single-Receiver Ambiguity Fixing for GPS-Based Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters using CODE's New Clock and Phase Bias Products[C]. *EGU General Assembly Conference, Vienna, 2019*
- [14] Allende-Alba G, Montenbruck O, Hackel S, et al. Relative Positioning of Formation-Flying Spacecraft Using Single-Receiver GPS Carrier Phase Ambiguity Fixing[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3)
- [15] Li X X, Zhao Y H, Zhang K K, et al. LEO Real-Time Ambiguity-Fixed Precise Orbit Determination with Onboard GPS/Galileo Observations [J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(4): 1-20
- [16] 吴家齐. 基于非差模糊度固定技术的卫星精密轨道确定 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020 (Wu Jiaqi. Precise GNSS and LEO Orbit Determination with Zero-Difference Ambiguity Resolution[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020)
- [17] 李星星, 张伟, 袁勇强, 等. GNSS 卫星精密定轨综述: 现状、挑战与机遇[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1271-1293 (Li Xingxing, Zhang Wei, Yuan Yongqiang, et al. Review of GNSS Precise Orbit Determination: Status, Challenges, and Opportunities[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1271-1293)
- [18] 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 (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)
- [19] Teunissen P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1): 65-82
- [20] Li X X, Qin Y J, Zhang K K, et al. Precise Orbit Determination for LEO Satellites: Single-Receiver Ambiguity Resolution Using GREAT Products [J]. *Geo-spatial Informa-*

- tion Science, 2022, 25(1): 63-73
- [21] Schreiner P, König R, Neumayer K H, et al. On Precise Orbit Determination Based on DORIS, GPS and SLR Using Sentinel-3A/B and -6A and Subsequent Reference Frame Determination Based on DORIS-Only[J]. Advances in Space Research, 2023, 72(1): 47-64
- [22] 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)
- [23] Huang W, Männel B, Brack A, et al. Two Methods to Determine Scale-Independent GPS PCOs and GNSS-Based Terrestrial Scale: Comparison and Cross-Check[J]. GPS Solutions, 2020, 25(1)
- [24] 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
- [25] Lichten S M, Bar-Sever Y E, Wu C W. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. Manuscripta Geodaetica, 1993, 18: 91-98
- [26] 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
- [27] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. Adjustable Box-Wing Model for Solar Radiation Pressure Impacting GPS Satellites[J]. Advances in Space Research, 2012, 49(7): 1113-1128
- [28] Berger C, Biancale R, Ill M, et al. Improvement of the Empirical Thermospheric Model DTM: DTM94-a Comparative Review of Various Temporal Variations and Prospects in Space Geodesy Applications[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(3): 161-178

Orbit Determination Accuracy of GRACE-FO, SWARM and SENTINEL Satellites with Single-Difference Ambiguity Resolution

ZHENG Yousi¹ YANG Zhixin^{1,2} WANG Bin² LIU Hui³ TANG Feifei¹
LIN Na¹ WEI Qimeng⁴ ZHANG Huan¹

¹ School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

² Chongqing Geographic Information and Remote Sensing Application Center, Chongqing 401147, China

³ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

⁴ China Satellite Network Exploration Co Ltd, Chongqing 401121, China

Abstract: Based on the methods of low Earth orbit (LEO) satellite orbit determination and inter-satellite single-difference ambiguity resolution, this paper utilizes uncalibrated phase delay (UPD) and observable-specific signal bias (OSB) products to achieve precise orbit determination for eight LEO satellites, namely GRACE-C/D, SWARM-A/B/C, and SENTINEL-3A/3B/6A, and evaluates the impact of these two products on orbit determination accuracy. The results indicate that both products achieve a nearly 100% fixed rate for wide-lane ambiguities; except for the GRACE satellites, which have a narrow-lane fixed rate of approximately 85%, the remaining satellites achieve rates close to 95%. Ambiguity resolution significantly enhances orbit determination accuracy, with the fixed solutions obtained using UPD and OSB products showing comparable three-dimensional accuracy, reaching 1.5 cm, 1.7 cm, and 0.9 cm for the GRACE-FO, SWARM, and SENTINEL series satellites, respectively, representing improvements of up to 50% compared to the float solutions. Additionally, a multi-system analysis of the SENTINEL-6A satellite reveals that the fixed solution accuracy for the combined GPS/Galileo orbit determination is 0.9 cm, representing improvements of 10% and 18% compared to single-GPS and single-Galileo systems, respectively. This study confirms that ambiguity resolution can effectively improve the orbit determination accuracy of LEO satellites and provides a reference for future research on orbit determination for large-scale LEO constellations.

Key words: low Earth orbit (LEO) satellite; precision orbit determination (POD); ambiguity resolution; uncalibrated phase delay (UPD); observable-specific signal bias (OSB)