引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20220455

Citation: 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.DOI:10.13203/j.whugis20220455

星载GPS/Galileo数据Sentinel-6A卫星运动学精密定轨研究

金 彪[1] 陈姗姗[2] 李 敏[3] 李子潇[1] 原晋栩[1]

1 航天恒星科技有限公司,北京,100094

2 北京六分科技有限公司,北京,100094

3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘 要:哨兵(Sentinel)-6A海洋测高卫星搭载了GPS/Galileo双模接收机,为研究基于全球导航卫星系统多星座的低轨卫星精密定轨提供了契机。固定载波相位模糊度可提升低轨卫星的定轨精度,利用在轨实测数据研究GPS/Galileo双系统组合以及模糊度固定对低轨卫星运动学定轨精度的影响。分别采用欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)、法国国家空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)、德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)和中国武汉大学(Wuhan University, WHU)发布的观测值偏差及对应的精密星历和钟差产品开展单接收机模糊度固定。结果表明:GPS/Galileo双系统组合可明显改善定轨几何构型。双系统组合浮点解轨道三维精度优于30 mm,相对于GPS单系统提升超过20%。模糊度固定显著提升了运动学定轨精度,组合固定解轨道精度优于20 mm,相对于GPS提升30%。基于CODE、CNES和GFZ产品的GPS和Galileo单系统模糊度固定率分别优于93%和95%,WHU产品的Galileo固定率则偏低。利用卫星激光测距(satellite laser ranging,SLR)观测数据对运动学定轨结果进行检核,单系统固定解轨道SLR残差均方根误差(root mean square, RMS)为13~15 mm,双系统组合固定解RMS则达到12~14 mm,提升超过10%。

关键词:Sentinel-6A卫星;GPS/Galileo;运动学定轨;单接收机模糊度固定

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-02-03

DOI:10.13203/j.whugis20220455 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0042-11

Kinematic Precise Orbit Determination of Sentinel-6A Satellite with Spaceborne GPS/Galileo Observations

JIN Biao[1] *CHEN Shanshan*[2] *LI Min*[3] *LI Zixiao*[1] *YUAN Jinxu*[1]

1 Space Star Technology Co. Ltd, Beijing 100094, China

2 Beijing Sixents Technology Co. Ltd, Beijing 100094, China

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

Abstract: **Objectives**: The Sentinel-6A spacecraft is equipped with a GPS/Galileo dual-constellation global navigation satellite system (GNSS) receiver which provides an opportunity to investigate the precise orbit determination (POD) accuracy of low Earth orbit (LEO) satellites based on multi-GNSS. Ambiguity resolution plays an important role in GNSS-based precise positioning and orbit determination. The single receiver ambiguity resolution is explored and the GPS/Galileo measurements are combined to further improve the kinematic orbit determination accuracy. **Methods**: Observation specific bias (OSB) product is employed to calibrate the satellite dependent phase delay, and single difference (SD) observation between GNSS satellites is applied to remove the phase delay of receiver. Combined with the related GNSS precise orbit and

基金项目:国家自然科学基金(42304045)。

第一作者:金彪,博士,主要从事卫星精密定轨和GNSS完好性研究。jinb@spacestar.com.cn

通信作者:李敏,博士,教授。limin@whu.edu.cn

clock products, the wide lane and narrow lane ambiguities are fixed to integers. Then the SD ionosphere free (IF) ambiguities are recovered with the fixed ambiguities and are taken as pseudo observations to constrain the undifferenced IF ambiguities. The effect of GPS/Galileo combination and ambiguity resolution on kinematic orbit determination is analyzed with Sentinel-6A onboard data. GNSS products provided by the Center for Orbit Determination in Europe (CODE), Centre National d' Etudes Spatiales (CNES), German Research Centre for Geosciences (GFZ) and Wuhan University (WHU) are used for single receiver ambiguity resolution and POD. Different kinematic orbits including GPS-only, Galileo-only and GPS/Galileo combined solutions are generated. The reduced dynamic orbits with ambiguity resolution are also calculated to assess the accuracy of kinematic orbits. **Results:** Results show that the visible satellites and position dilution of precision are significantly improved in dual-GNSS solution. The three dimensional (3D) accuracy of the dual-constellation kinematic orbit with float ambiguity achieves 30 mm and shows an improvement of 20% when comparing with the GPS-only result. Fixing the ambiguity to integer significantly improves the POD accuracy. The 3D accuracy of the GPS/Galileo ambiguity fixed orbit is 20 mm, which is 30% better than that of the GPS-only result. With the products of CODE, CNES and GFZ, more than 93% of the GPS and 95% of the Galileo ambiguities are successfully fixed and is further improved to 97% in the case of dual-GNSS solution. The ambiguity fixing rate shows degraded performance when using the WHU product. Independent satellite laser ranging (SLR) observations are used to validate the kinematic orbits. The root mean square (RMS) of SLR residuals of GPS-only solution with fixed ambiguity is 13-15 mm while it is 12-14 mm for the orbits derived with dual-constellation observations and an average improvement of 10% is achieved by introducing the Galileo data. **Conclusions:** Fixing the ambiguity to integers improves the accuracy and stability of POD results. Compared with the GPS-only solution, GPS/Galileo combined solution improves the ambiguity fixing rate which then leads to an improvement of kinematic orbit determination accuracy.

Key words: Sentinel-6A satellite; GPS/Galileo; kinematic orbit determination; single receiver ambiguity resolution

低轨卫星在遥感、通信、导航等一系列科学研究和工程应用中发挥着不可或缺的作用。低轨卫星精密位置信息是完成上述任务的前提和基础。自 GPS 成功应用于 TOPEX 卫星精密定轨后[1-2],利用 GPS 进行低轨卫星定轨已广泛应用于重力场恢复和气候试验卫星(gravity recovery and climate experiment, GRACE)[3]、挑战性微型卫星载荷(challenging mini-satellite payload, CHAMP)[4-5]、海洋[6]、风云[7-8]等卫星。利用 GPS 精密轨道和钟差产品,低轨卫星浮点解定轨精度可达 1~3 cm[9-10]。

固定载波相位模糊度[11-14]能够进一步提升定轨精度。为实现单接收机模糊度固定,国内外学者先后提出了小数周偏差法[15-16]、整数相位钟法[17]和解耦钟差法[18]。文献[19]利用美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提供的相位偏差产品固定模糊度,实现 Jason-2 卫星径向定轨精度优于 1 cm;文献[20]研究了固定模糊度的 GRACE 卫星运动学定轨,相对于浮点解,三轴精度提升 19%~50%;文献[11]利用法国国家空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)发布的整数钟产品[21]对哨兵(Sentinel)-3A 卫星模糊度进行固定,轨道重叠弧段和卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)检核精度均有明显提升;文献[14]实现了基于单接收机模糊度固定的 GRACE 后续星(GRACE follow-on, GRACE-FO)简化动力学定轨,相对于浮点解,定轨精度提升 18%;文献[22]利用 CNES 整数钟产品实现 GRACE-FO 卫星简化动力学和运动学定轨中模糊度参数的固定,相对于浮点解,固定解轨道重叠弧段精度提升 20%。

上述研究多基于星载 GPS 观测数据,文献[7-8]研究了星载 GPS/北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)组合定轨,但尚未实现模糊度固定。Sentinel-6A 卫星于 2020 年 11 月 21 日发射,旨在提供连续的海面测高数据,其轨道高度为 1 336 km,轨道倾角为 66°[23-24]。为满足精密定轨需求,Sentinel-6A 卫星搭载了多普勒无线电定位定轨系统(Doppler orbitography and radio positioning integrated by sate-

llite, DORIS)、GPS/Galileo双模接收机和SLR反射棱镜[13]。星载GPS/Galileo数据为研究基于多模全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和单接收机模糊度固定的低轨卫星精密定轨提供了契机。文献[13]分别利用欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)和CNES产品开展多种模式的Sentinel-6A精密定轨,结果表明,固定模糊度后,单GPS与单Galileo简化动力学定轨结果与GPS/Galileo双系统组合定轨一致性优于1.0 cm;文献[25]利用星载GNSS数据开展基于广播星历的实时定轨研究,得益于Galileo较优的空间信号精度,Sentinel-6A三维实时定轨精度优于10 cm。

由于不依赖力学模型,运动学精密定轨信息可直接用于地球重力场反演,具有重要的科学意义和研究价值[20],同时运动学定轨算法简单、计算资源需求较小,适用于大规模星座自主运行管理。本文利用Sentinel-6A卫星实测数据开展精密定轨,在分析星载GPS、Galileo观测数据质量的基础上,分别利用CODE[26]、CNES[21]、德国地学研究中心[27](German Research Centre for Geosciences, GFZ)和中国武汉大学[28](Wuhan University, WHU)发布的观测值偏差(observation specific biases, OSB)及对应的轨道和钟差产品实现单接收机模糊度固定,研究多模GNSS以及模糊度固定对低轨卫星运动学定轨精度的影响。

1 星载GPS/Galileo模糊度固定

GNSS伪距和载波相位观测值可表示为[29]:

$$\begin{cases} P_{r,j}^{s}=\rho_r^s+c(\mathrm{d}t_r-\mathrm{d}t^s)+I_{r,j}^{s}+T_r^s+b_{r,j}-b_j^s+\varepsilon \\ L_{r,j}^{s}=\rho_r^s+c(\mathrm{d}t_r-\mathrm{d}t^s)-I_{r,j}^{s}+T_r^s+\lambda_j(N_{r,j}^{s}+B_{r,j}-B_j^s)+\xi \end{cases} \tag{1}$$

式中,$P_{r,j}^{s}$和$L_{r,j}^{s}$分别表示伪距和载波相位观测值;r和s分别表示星载接收机和卫星;j表示信号频率;ρ_r^s为接收机和卫星间的几何距离;c为光速,$\mathrm{d}t_r$和$\mathrm{d}t^s$分别为接收机和卫星钟误差;$I_{r,j}^{s}$为电离层延迟;T_r^s表示对流层延迟,对于低轨观测值,该项为零;$b_{r,j}$和b_j^s分别为接收机和卫星端伪距硬件偏差;$B_{r,j}$和B_j^s为载波相位硬件偏差,以周表示;λ_j为频率j对应的载波波长;$N_{r,j}^{s}$为载波相位模糊度;ε和ξ分别为伪距和载波观测值噪声。

构建无电离层组合观测值,以伪距为钟差基准,此时伪距硬件偏差被钟差吸收,式(1)可写为:

$$\begin{cases} P_{r,\mathrm{IF}}^{s}=\rho_r^s+c(\mathrm{d}\bar{t}_r-\mathrm{d}\bar{t}^s) \\ L_{r,\mathrm{IF}}^{s}=\rho_r^s+c(\mathrm{d}\bar{t}_r-\mathrm{d}\bar{t}^s)+\lambda_1\bar{N}_{r,\mathrm{IF}}^{s} \\ \mathrm{d}\bar{t}_r=\mathrm{d}t_r+b_{r,\mathrm{IF}}/c \\ \mathrm{d}\bar{t}^s=\mathrm{d}t^s+b_{\mathrm{IF}}^{s}/c \\ \bar{N}_{r,\mathrm{IF}}^{s}=N_{r,\mathrm{IF}}^{s}+(B_{r,\mathrm{IF}}-b_{r,\mathrm{IF}}/\lambda_1)-(B_{\mathrm{IF}}^{s}-b_{\mathrm{IF}}^{s}/\lambda_1) \end{cases} \tag{2}$$

式中,$P_{r,\mathrm{IF}}^{s}$和$L_{r,\mathrm{IF}}^{s}$为无电离层组合伪距和载波相位观测值;$\mathrm{d}\bar{t}_r$和$\mathrm{d}\bar{t}^s$分别为吸收了伪距硬件偏差的接收机和卫星钟差;$\bar{N}_{r,\mathrm{IF}}^{s}$为利用伪距和载波相位观测值定位定轨时解算得到的浮点解模糊度;$N_{r,\mathrm{IF}}^{s}$为无电离层组合模糊度;$b_{r,\mathrm{IF}}$和b_{IF}^{s}分别为接收机和卫星端无电离层组合伪距硬件偏差;$B_{r,\mathrm{IF}}$和B_{IF}^{s}为无电离层组合载波相位偏差。

无电离层组合模糊度$\bar{N}_{r,\mathrm{IF}}^{s}$可分解为宽巷(wide-lane, WL)和窄巷(narrow-lane, NL)模糊度[29]:

$$\begin{cases} \bar{N}_{r,\mathrm{IF}}^{s}=\dfrac{f_1f_2}{f_1^2-f_2^2}N_{r,\mathrm{WL}}^{s}+\dfrac{f_1}{f_1+f_2}(N_{r,\mathrm{NL}}^{s}+d_{r,\mathrm{NL}}-d_{\mathrm{NL}}^{s}) \\ N_{r,\mathrm{WL}}^{s}=N_{r,1}^{s}-N_{r,2}^{s} \\ N_{r,\mathrm{NL}}^{s}=N_{r,1}^{s} \\ d_{r,\mathrm{NL}}=\dfrac{f_1+f_2}{f_1}(B_{r,\mathrm{IF}}-b_{r,\mathrm{IF}}/\lambda_1) \\ d_{\mathrm{NL}}^{s}=\dfrac{f_1+f_2}{f_1}(B_{\mathrm{IF}}^{s}-b_{\mathrm{IF}}^{s}/\lambda_1) \end{cases} \tag{3}$$

式中,f_1和f_2分别为载波L_1和L_2的频率;$N_{r,\mathrm{WL}}^{s}$和$N_{r,\mathrm{NL}}^{s}$分别为整数宽巷和窄巷模糊度;$N_{r,1}^{s}$和$N_{r,2}^{s}$分别为载波L_1和L_2的模糊度;$d_{r,\mathrm{NL}}$和d_{NL}^{s}分别为接收机和卫星端伪距和载波硬件偏差的窄巷组合。整数宽巷模糊度$N_{r,\mathrm{WL}}^{s}$可利用Melbourne-Wübbena组合[30-31]解算:

$$\left(\frac{f_1L_{r,1}^{s}-f_2L_{r,2}^{s}}{f_1-f_2}-\frac{f_1P_{r,1}^{s}+f_2P_{r,2}^{s}}{f_1+f_2}\right)/\lambda_{\mathrm{WL}}=N_{r,\mathrm{WL}}^{s}+d_{r,\mathrm{WL}}-d_{\mathrm{WL}}^{s} \tag{4}$$

式中,$d_{r,\mathrm{WL}}$和d_{WL}^{s}分别为接收机和卫星端宽巷硬件偏差;λ_{WL}为宽巷波长。分别对接收机和卫星端宽巷偏差进行改正,可实现宽巷模糊度固定。宽巷模糊度固定后,代入式(3)中可得:

$$\frac{f_2}{f_1-f_2}N_{r,\mathrm{WL}}^{s}-\frac{f_1+f_2}{f_1}\bar{N}_{r,\mathrm{IF}}^{s}=N_{r,\mathrm{NL}}^{s}+d_{r,\mathrm{NL}}-d_{\mathrm{NL}}^{s} \tag{5}$$

对接收机和卫星端窄巷偏差进行改正可以

实现窄巷模糊度固定。实际处理时，卫星端宽巷和窄巷偏差可利用地面站网解算并向用户提供，用户端偏差可采用星间单差消除。固定星间单差宽巷和窄巷模糊度后，可根据式(6)恢复无电离层组合模糊度：

$$\Delta N_{r,\mathrm{IF}}^{s_1,s_2}=\frac{f_1 f_2}{f_1^2-f_2^2}\Delta N_{r,\mathrm{WL}}^{s_1,s_2}+\frac{f_1}{f_1+f_2}\left(\Delta N_{r,\mathrm{NL}}^{s_1,s_2}-\Delta d_{\mathrm{NL}}^{s_1,s_2}\right) \tag{6}$$

式中，s_1和s_2为导航卫星；$\Delta N_{r,\mathrm{IF}}^{s_1,s_2}$为单差无电离层组合模糊度；$\Delta N_{r,\mathrm{WL}}^{s_1,s_2}$和$\Delta N_{r,\mathrm{NL}}^{s_1,s_2}$分别为已固定的单差宽巷和窄巷模糊度；$\Delta d_{\mathrm{NL}}^{s_1,s_2}$为卫星端窄巷偏差的星间单差值。之后，利用恢复的单差无电离层组合模糊度作为虚拟观测值对非差模糊度进行约束，得到固定解轨道。

2　Sentinel-6A 运动学定轨

2.1　数据源

Sentinel-6A 卫星搭载了澳大利亚 RUAG 公司开发的 PODRIX GPS/Galileo 双模接收机[13]，支持接收 L1/E1、L2 和 L5/E5a 信号，根据不同类型的 GPS 卫星输出不同的伪距观测值，具体观测数据类型及对应的接收机独立交换格式版本 3 (receiver independent exchange formation version 3, Rinex 3)标识见表 1。由于缺乏 Galileo E14 和 E18 卫星的历书数据，接收机未跟踪该两颗卫星的信号[13]。

表 1　Sentinel-6A 接收机输出的 GPS 和 Galileo 观测值类型

Table 1　GPS and Galileo Observation Types Supported by Sentinel-6A Receiver

GNSS 卫星	伪距	载波
GPS IIR	C1C、C1W、C2W	L1C、L2W
GPS IIR-M、IIF、Ⅲ	C1C、C2L	L1C、L2L
Galileo	C1C、C5Q	L1C、L5Q

利用 2021 年年积日第 175—250 天的 GPS C1W、C2W、L1C、L2W 和 Galileo C1C、C5Q、L1C、L5Q 观测数据进行运动学定轨。利用 CODE 的 OSB 产品将 GPS IIR-M、IIF、Ⅲ卫星的 C1C、C2L、L2L 数据转换成 C1W、C2W、L2W 观测值。Sentinel-6A 星载 GNSS 天线参考点、相位中心偏差(phase center offset, PCO)、卫星质心和 SLR 反射器在星固系下的坐标如表 2 所示[32]。

伪距观测质量将影响定轨精度和模糊度固定效果[33]。利用 Anubis 软件[34]对 GPS 和 Galileo 观测值伪距多径进行分析，结果如图 1 所示。可以看出，GPS C1W 和 C2W 伪距多径均值分别为 12.7 和 15.3 cm，Galileo C1C 和 C5Q 伪距多径均值分别为 7.4 和 3.9 cm，主要是由于 Galileo E1 和 E5 信号采用二进制偏置载波调制，相对于 GPS 采用的二进制相移键控调制，具有更强的抗干扰和多路径抑制能力[35]。Galileo 较高伪距精度有利于后续模糊度的固定。

表 2　星载 GNSS 天线 PCO、卫星质心和 SLR 反射器在星固系下的坐标/mm

Table 2　Positions of Onboard GNSS Antenna, SLR Retroreflector and Center of Mass in Satellite Reference Frame/mm

设备名称	X	Y	Z
GNSS 天线参考点	+2 474.8	+0.1	−1 080.3
GNSS 天线 GPS PCO	0	0	+75.0
GNSS 天线 Galileo PCO	0	0	+93.0
SLR 反射棱镜	+1 624.8	−400.6	+664.8
卫星质心	+1 533.0	−7.0	+37.0

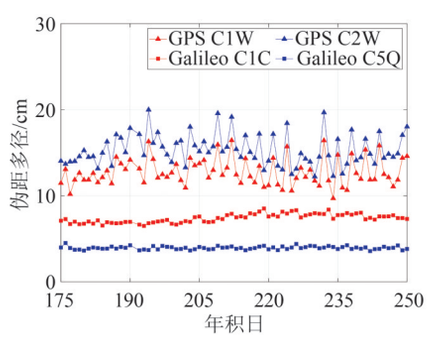


图 1　GPS C1W/C2W 和 Galileo C1C/C5Q 伪距多径

Fig. 1　Code Multipath of GPS C1W/C2W and Galileo C1C/C5Q Observations

2.2　定轨策略

利用 Sentinel-6A 星载 GPS/Galileo 数据开展 3 种模式的运动学定轨，包括 GPS 单系统、Galileo 单系统以及 GPS/Galileo 双系统组合定轨，其中每种定轨模式根据模糊度是否固定又分为浮点解和固定解。GPS 和 Galileo 卫星轨道和钟差分别采用 CODE[26]、CNES[21]、GFZ[27]以及 WHU[28]分析中心发布的多模 GNSS 实验(multi-GNSS experiment, MGEX)产品，同时利用 OSB 产品对载波相位偏差进行改正，以实现模糊度的固定。定轨时首先基于无电离层组合观测值得到浮点解轨道，之后根据§1 介绍的方法依次固定宽巷和窄巷模糊度并恢复无电离层组合模糊度，最终得到固定解轨道。Sentinel-6A 卫星运动学定轨策略见表 3。由于目前尚无机构提供 Sentinel-6A 精

表3 Sentinel-6A卫星运动学定轨策略

Table 3 Sentinel-6A Precise Orbit Determination Strategy Based on Kinematic Method

模型	参数	说明
使用数据和产品	观测数据	非差无电离层组合
	定轨弧长/h	24
	采样间隔/s	10
	截止高度角/(°)	3
	GNSS轨道和钟差	CODE, CNES, GFZ, WHU MGEX产品
	GNSS相位偏差	CODE, CNES, GFZ, WHU OSB产品
	GNSS天线	igs14.atx
	接收机天线	改正
	相位缠绕	改正
	相对论改正	IERS 2010
参数估计	卫星位置	随机游走,过程噪声5 m/s,每历元估计
	接收机钟差	随机游走,过程噪声30 m/s,每历元估计
	模糊度	常数,每跟踪弧段估计1个

密轨道产品,为评估不同模式运动学定轨精度,利用CODE产品开展GPS/Galileo组合简化动力学定轨并固定模糊度参数。

3 星载GPS/Galileo运动学定轨精度分析

3.1 可视卫星数和观测值残差

可视卫星数和位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP)与运动学定轨精度密切相关,首先分析GPS/Galileo双系统组合对可视卫星数和PDOP值的影响。对75 d的观测数据进行统计,GPS平均可视卫星数为7.5颗,Galileo为6.4颗,主要是因为Galileo系统卫星数较少,且Sentinel-6A接收机未跟踪E14和E18卫星[13]。图2为运动学定轨中GPS单系统和GPS/Galileo组合系统的PDOP值分布,GPS单系统平均PDOP为2.2,Galileo单系统为2.5,双系统组合PDOP为1.5,显著提升了定轨的几何构型。

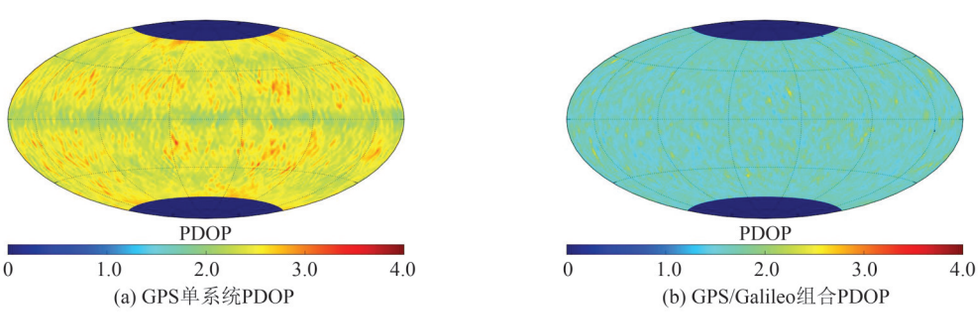


图2 PDOP值全球分布

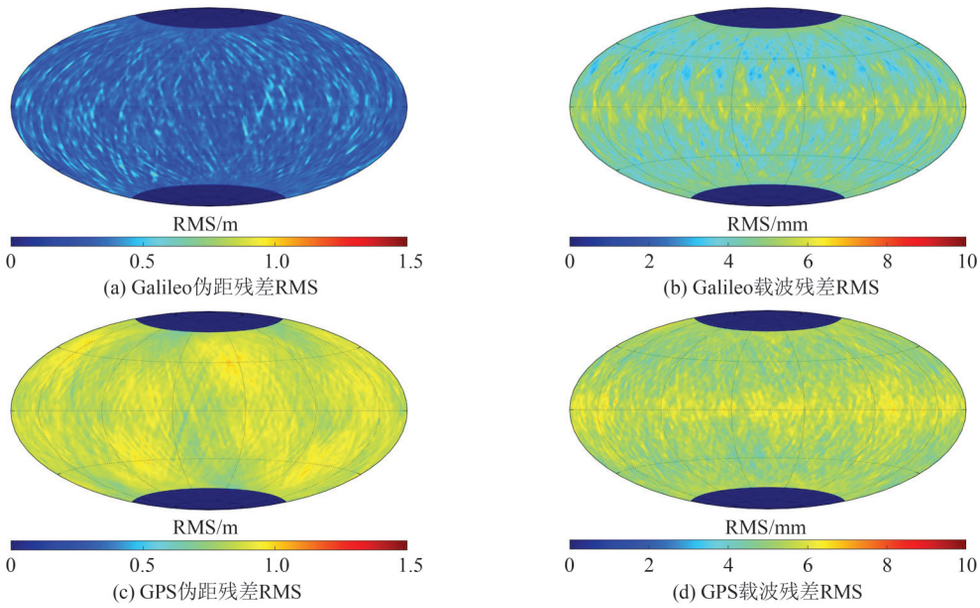
Fig. 2 Global Distribution of PDOP

观测值残差能够反映所使用的模型和测量值之间的一致性。图3为使用CODE产品时GPS和Galileo运动学固定解定轨中伪距和载波相位残差均方根(root mean square,RMS)的全球分布图。图3(a)和图3(c)为伪距残差RMS,其中GPS为0.85 m,而Galileo为0.35 m,明显优于GPS,与图1中伪距多径分析结果一致。图3(b)和图3(d)为载波残差RMS值,GPS为5.5 mm,Galileo为4.8 mm,较小的观测值残差显示出Galileo较优的信号性能。

3.2 模糊度固定率

模糊度固定率为定轨弧段内固定为整数的模糊度数量与总的模糊度个数的比值,可以反映算法模型和定轨结果的正确性及精度。利用取整法[36]对浮点模糊度进行固定,宽巷、窄巷模糊度固定阈值均为0.2周。图4(a)、4(b)分别给出了使用CODE产品Sentinel-6A卫星宽巷和窄巷模糊度的固定率。红色、绿色和蓝色点分别表示GPS单系统(G_kin)、Galileo单系统(E_kin)和GPS/Galileo双系统组合(GE_kin)运动学定轨模糊度固定结果。GPS和Galileo宽巷模糊度固定率分别为99.6%和99.9%,双系统组合固定率为99.7%;GPS和Galileo窄巷固定率分别为93.5%和95.2%,双系统组合可进一步提升窄巷固定率至96.7%,原因在于双系统组合提升了运动学定轨精度以及浮点模糊度的估计精度。图4中同时给出了GPS/Galileo双系统组合动力学参考轨道(GE_dyn)的模糊度固定结果,以粉色点表示,宽巷和窄巷模糊度固定率分别为99.8%和97.9%。

图5(a)和图5(b)为使用各分析中心产品时GPS单系统运动学定轨中宽巷和窄巷模糊度固定率,红色、绿色、蓝色和粉色点分别对应CODE、CNES、GFZ和WHU分析中心产品结果,

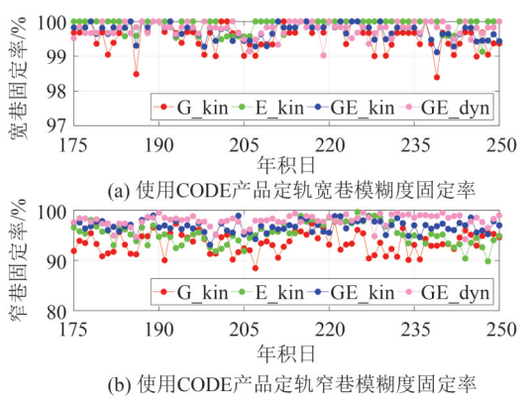


(a) Galileo伪距残差RMS　(b) Galileo载波残差RMS

(c) GPS伪距残差RMS　(d) GPS载波残差RMS

图 3　运动学固定解定轨 GPS 和 Galileo 伪距和载波残差 RMS 分布

Fig. 3　Code and Carrier Phase Residual RMS of GPS and Galileo Derived from Kinematic Orbit Determination with Ambiguity Resolution



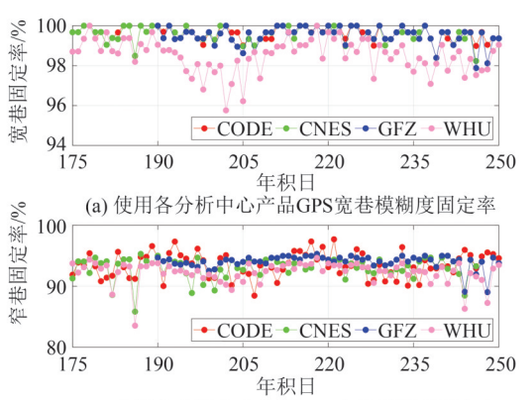
(a) 使用CODE产品定轨宽巷模糊度固定率

(b) 使用CODE产品定轨窄巷模糊度固定率

图 4　使用 CODE 产品不同定轨模式的宽巷和窄巷模糊度固定率

Fig. 4　Wide Lane and Narrow Lane Ambiguity Fixing Rates of Different Orbit Determination Solutions Using CODE Product

GFZ 从 2021 年年积日第 190 天开始提供 OSB 产品。各分析中心 GPS 宽巷模糊度固定率均优于 98%（CODE 产品为 99.6%，GFZ 为 99.5%，CNES 为 99.6，WHU 为 98.5%），窄巷固定率优于 92%（CODE 产品为 93.5%，GFZ 为 94.0%，CNES 为 93.0%，WHU 为 92.2%），体现出较好的产品性能。WHU 产品宽巷固定率相较于其他分析中心低 1% 左右。图 6(a)为 Galileo 单系统的宽巷模糊度固定率，其中基于 CODE 和 CNES 产品的固定率为 99.9%，GFZ 产品为 99.7%。基于 WHU 产品的 Galileo 宽巷模糊度固定率偏低，为 94%，并最终影响了窄巷模糊度的固定。图 6(b)为 Galileo 窄巷模糊度固定率，CODE 和 CNES 为 95.3%，GFZ 为 95.2%，WHU 为 89.5%，由于宽巷模糊度固定直接采用 Melbourne-Wübbena 组合观测值，尚未涉及 GNSS 卫星轨道和钟差，因此原因可能是伪距 OSB 精度影响了 WHU 产品宽巷模糊度的固定。



(a) 使用各分析中心产品GPS宽巷模糊度固定率

(b) 使用各分析中心产品GPS窄巷模糊度固定率

图 5　基于各分析中心产品的 GPS 运动学定轨宽巷和窄巷模糊度固定率

Fig. 5　GPS Wide Lane and Narrow Lane Ambiguity Fixing Rates for Kinematic Orbit Determination Using Products of Different Analysis Centers

为进一步验证 WHU 精密轨道、钟差以及窄巷模糊度固定性能，图 7 分别给出了使用 CODE 和 WHU 产品时 Galileo 的模糊度总数（图 7(a)）、固定的宽巷模糊度数（图 7(b)）以及固定的窄巷与宽巷模糊度个数的比值（图 7(c)）。可以看出，使用 CODE 和 WHU 产品时 Galileo 模糊度总数基本一致，使用 WHU 产品固定的宽巷模糊度明

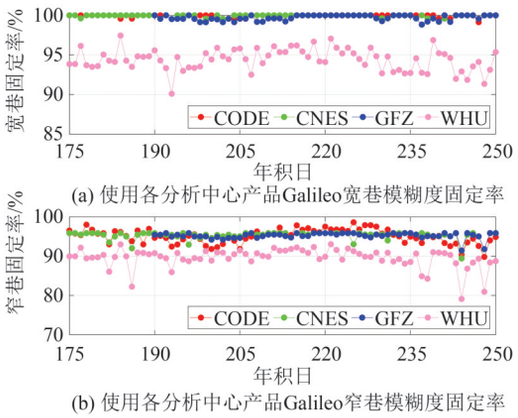


图6 基于各分析中心产品的Galileo运动学定轨宽巷和窄巷模糊度固定率

Fig. 6 Galileo Wide Lane and Narrow Lane Ambiguity Fixing Rates for Kinematic Orbit Determination Using Products of Different Analysis Centers

显少于CODE产品,固定的窄巷与宽巷模糊度个数的比值为95%,说明WHU产品模糊度固定性能主要受伪距OSB影响,窄巷模糊度固定性能与CODE无明显差异。

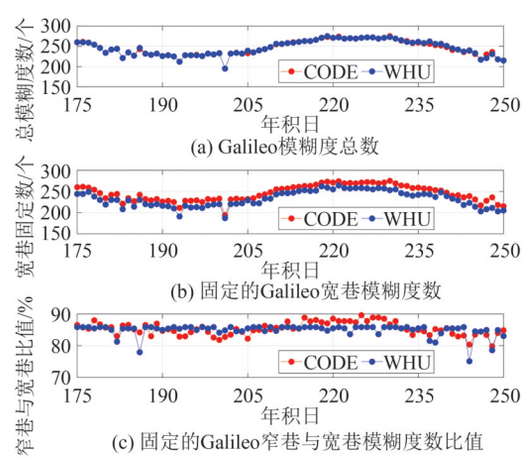


图7 使用CODE和WHU产品时Galileo运动学定轨模糊度总数、固定的宽巷模糊度数和固定的窄巷与宽巷模糊度数的比值

Fig. 7 Galileo Total Ambiguity, Fixed Wide-Lane Ambiguity and Ratio of Fixed Narrow-Lane to Wide-Lane Ambiguity Using CODE and WHU Products

3.3 与动力学定轨结果对比

以GPS/Galileo双系统组合动力学固定解轨道为参考,对不同模式的运动学定轨结果进行评估。图8为2021年年积日第175天使用CODE产品运动学浮点解轨道与参考轨道在切向、法向和径向的差异,其中红色、蓝色和绿色点分别表示GPS单系统(G)、Galileo单系统(E)和GPS/Galileo组合(GE)定轨结果。可以看出,相对于单系统,双系统浮点解定轨精度提升较为明显,Galileo单系统在14时和20时处可视卫星数只有4颗,导致定轨差异较大,双系统组合增加了可视卫星数,定轨结果较为平稳。

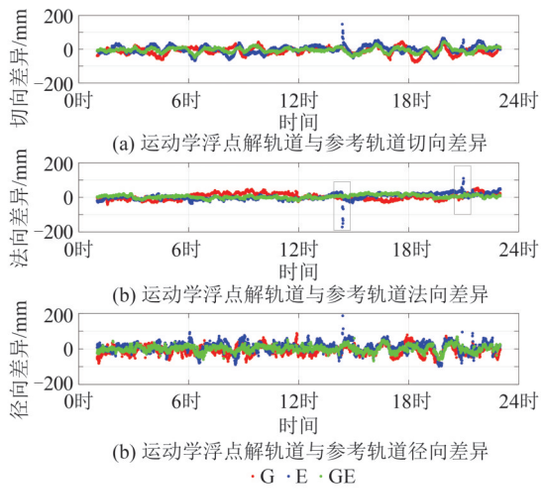


图8 2021年年积日第175天运动学浮点解轨道与参考轨道的差异

Fig. 8 Orbit Differences Between Kinematic Orbits with Float Ambiguity and Reference Orbits on Day of Year 175 in 2021

图9为2021年年积日第175—250天运动学浮点解轨道与参考轨道在切向(图9(a))、法向(图9(b))和径向(图9(c))的差异,三轴差异统计值在表4中列出。与参考轨道相比,运动学浮点解定轨结果系统性偏差较小,为1~4 mm,表明动力学定轨中的力学参数较好地描述了卫星的受力情况。GPS单系统(G)浮点解轨道三维精度为38.4 mm,Galileo单系统(E)为57.1 mm,双系统组合(GE)明显提升了浮点解定轨精度,三维精度优于30 mm,相对于GPS提升超过20%。在分析时段内双系统浮点解轨道未出现明显离散点,提升了运动学定轨的可用性。

为分析模糊度固定对运动学定轨精度的影响,图10给出了使用CODE产品时运动学固定解轨道与参考轨道的差异,三轴差异统计值也在表4中列出。与图9相比,固定模糊度后,定轨精度明显提升,浮点解轨道法向上的波动得到显著消除,同时与参考轨道切向和法向的系统性偏差在1 mm之内,径向小于2 mm。GPS(G)和Galileo(E)单系统固定解轨道三维精度分别为24.8和28.3 mm,相对于浮点解结果分别提升了35%和50%。双系统组合(GE)进一步提升定轨精度至16.5 mm,相对于GPS单系统提升超30%。

分别利用各分析中心产品进行Sentinel-6A卫星运动学定轨并固定模糊度,包括GPS单系

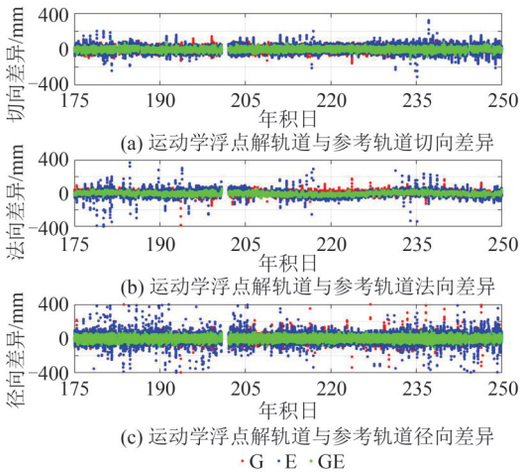


图 9　使用 CODE 产品时运动学浮点解轨道与参考轨道的差异

Fig. 9　Orbit Differences Between Kinematic Orbits with Float Ambiguity and Reference Orbits Using CODE Product

表 4　使用 CODE 产品时运动学定轨结果与参考轨道差异统计值/mm

Table 4　Statistics of Orbit Differences Between Kinematic Orbits and Reference Orbits Using CODE Product/mm

定轨模式	切向	法向	径向	三维
GPS 浮点解	−3.1±22.5	−0.1±18.9	−1.1±24.5	38.4
Galileo 浮点解	−2.7±30.5	−3.7±31.5	3.1±36.2	57.1
GPS/Galileo 浮点解	−2.9±16.2	−2.2±15.1	1.5±17.7	28.6
GPS 固定解	0.4±9.5	−1.0±10.4	−1.5±20.3	24.8
Galileo 固定解	−0.8±9.2	−0.7±12.0	1.7±23.8	28.3
GPS/Galileo 固定解	−0.3±6.0	−0.9±7.8	1.2±13.1	16.5

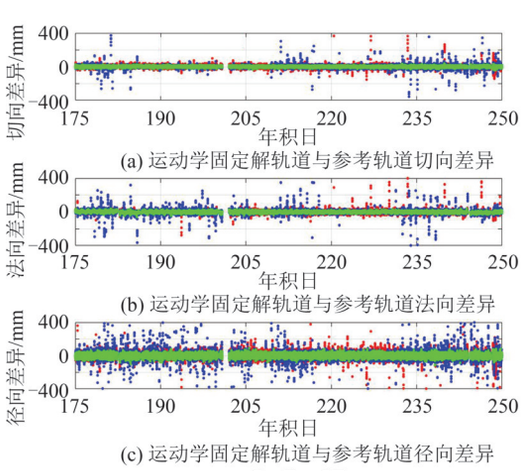


图 10　使用 CODE 产品时运动学固定解轨道与参考轨道的差异

Fig. 10　Orbit Differences Between Kinematic Orbits with Fixed Ambiguity and Reference Orbits Using CODE Product

统、Galileo 单系统以及 GPS/Galileo 双系统组合模式。图 11 为各分析中心不同模式运动学固定解轨道与参考轨道的三维差异。GPS/Galileo 双系统组合明显提升了定轨精度，与参考轨道的三维差异优于 20 mm，相对于 GPS 单系统平均提升 30%。Galileo 单系统定轨精度偏低，主要原因是 Galileo 可用卫星较少，导致 DOP 值偏大，基于 WHU 产品的 Galileo 固定解轨道由于模糊度固定率较低，导致与参考轨道差异较大。

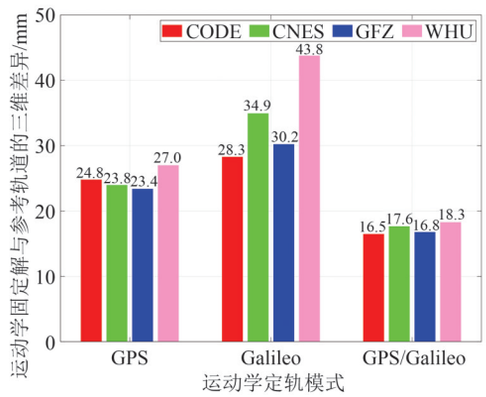


图 11　基于各分析中心产品的运动学固定解轨道与参考轨道的三维差异

Fig. 11　Orbit Differences Between Kinematic Orbits with Fixed Ambiguity and Reference Orbits Using Products of Different Analysis Centers

3.4　SLR 检核

Sentinel-6A 卫星搭载了 SLR 反射器，SLR 测距值可作为独立手段对卫星定轨结果进行评估。Sentinel-6A 卫星激光反射棱镜阵列由一个中心棱镜和其周围的 8 个棱镜组成，对于波长 532 nm 的激光可产生约 49 mm 的系统性误差[13]，文中计算 SLR 残差时对该系统性偏差进行改正。选取 11 个质量较好的 SLR 测站（Arequipa、Beijing、Graz、Greenbelt、Haleakala、Hartebeesthoek、Herstmonceux、Mount Stromlo、Papeete、Wettzell、Yarragadee）对运动学定轨结果进行评估。

图 12 为使用 CODE 产品时 GPS 单系统（G_kin）、Galileo 单系统（E_kin）以及 GPS/Galileo 双系统组合运动学（GE_kin）浮点解轨道的 SLR 残差。GPS 和 Galileo 单系统浮点解轨道 SLR 残差的 RMS 分别为 19 和 23 mm，双系统组合则优于 15 mm，相对于 GPS 单系统提升了 20%。图 13 为使用各分析中心产品时 Sentinel-6A 运动学固定解轨道 SLR 残差的 RMS。与浮点解结果相比，固定模糊度可明显提升定轨精度。GPS 单系统 RMS 为 13～15 mm，GPS/Galileo 双系统组合

RMS为12～14 mm,相对单系统提升超10%。与前述分析一致,使用WHU产品的Galileo单系统定轨精度稍差,除此之外,各分析中心结果之间的差异小于1.5 mm。

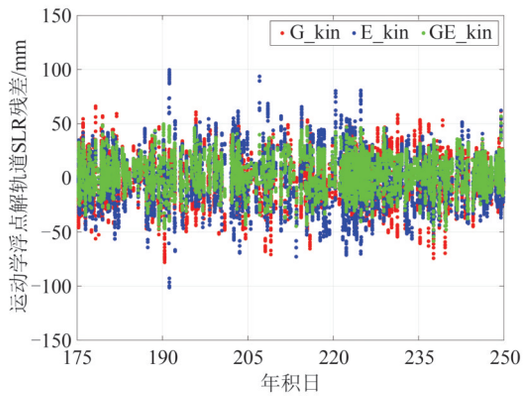


图12 使用CODE产品时运动学浮点解轨道SLR残差

Fig. 12 SLR Residuals of Kinematic Orbits with Float Ambiguity Using CODE Product

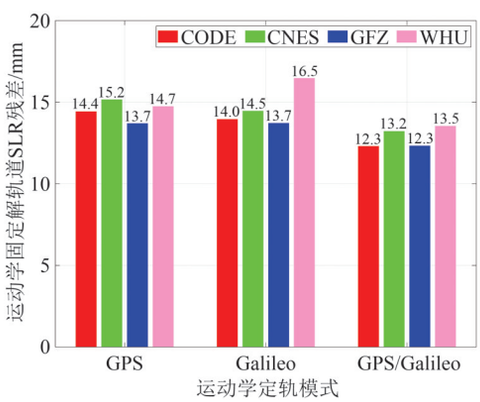


图13 基于各分析中心产品的固定解轨道SLR残差RMS

Fig. 13 SLR Residuals RMS of Different Orbits with Fixed Ambiguity Using Products of Different Analysis Centers

4 结 语

Sentinel-6A卫星搭载的GPS/Galileo双模接收机为研究基于多模GNSS的低轨卫星精密定轨提供了数据支撑,使用2021年年积日第175—250天在轨实测数据,开展GPS单系统、Galileo单系统以及GPS/Galileo组合运动学定轨。同时,利用CODE、CNES、GFZ和WHU发布的GNSS精密轨道、钟差和OSB产品,实现单接收机模糊度固定。以动力学固定解轨道为参考,GPS/Galileo双系统组合运动学浮点解和固定解轨道三维精度分别优于30和20 mm,相对于GPS单系统结果分别提升了20%和30%。基于CODE、CNES和GFZ分析中心产品的GPS模糊度固定率优于93%,Galileo优于95%,利用WHU产品的模糊度固定率则相对较低,具体原因需进一步分析。GPS单系统运动学固定解轨道SLR残差RMS为13～15 mm,双系统组合结果为12～14 mm,提升超过10%。相对于GPS单系统,GPS/Galileo组合能够显著提升低轨卫星运动学定轨的精度和可用性,对大规模低轨星座自主定轨和载荷研制具有借鉴意义。

参 考 文 献

[1] BERTIGER W I, BAR-SEVER Y E, Christensen E J, et al. GPS Precise Tracking of TOPEX/POSEIDON: Results and Implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24449-24464.

[2] TAPLEY B D, RIES J C, DAVIS G W, et al. Precision Orbit Determination for TOPEX/POSEIDON [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C12): 24383-24404.

[3] KANG Z G, TAPLEY B, BETTADPUR S, et al. Precise Orbit Determination for the GRACE Mission Using Only GPS Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(6): 322-331.

[4] VAN DEN IJSSEL J, VISSER P, PATIÑO RODRIGUEZ E. Champ Precise Orbit Determination Using GPS Data[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(8): 1889-1895.

[5] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. CHAMP卫星cm级精密定轨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(10): 879-882.
ZHAO Qile, LIU Jingnan, GE Maorong, et al. Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite with cm-Level Accuracy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(10): 879-882.

[6] 郭靖, 赵齐乐, 李敏, 等. 利用星载GPS观测数据确定海洋2A卫星cm级精密轨道[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(1): 52-55.
GUO Jing, ZHAO Qile, LI Min, et al. Centimeter Level Orbit Determination for HY2A Using GPS Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(1): 52-55. ()

[7] LI M, LI W W, SHI C, et al. Precise Orbit Determination of the Fengyun-3C Satellite Using Onboard GPS and BDS Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(11): 1313-1327.

[8] LI X X, ZHANG K K, MENG X G, et al. Precise Orbit Determination for the FY-3C Satellite Using

Onboard BDS and GPS Observations from 2013, 2015, and 2017[J]. *Engineering*, 2020, 6(8): 904-912.

[9] JÄGGI A, HUGENTOBLER U, BOCK H, et al. Precise Orbit Determination for GRACE Using Undifferenced or Doubly Differenced GPS Data[J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(10): 1612-1619.

[10] HACKEL S, MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, et al. Model Improvements and Validation of TerraSAR-X Precise Orbit Determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(5): 547-562.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] JIN B, LI Y Q, JIANG K C, et al. GRACE-FO Antenna Phase Center Modeling and Precise Orbit Determination with Single Receiver Ambiguity Resolution[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4204.

[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.

[16] 李浩东, 赵齐乐, 陶钧, 等. 北斗三号卫星FCB估计及其模糊度固定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1439-1446.
LI Haodong, ZHAO Qile, TAO Jun, et al. FCB Estimation and Ambiguity Resolution of BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1439-1446.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] SCHARROO R, BONEKAMP H, PONSARD C, et al. Jason Continuity of Services: Continuing the Jason Altimeter Data Records as Copernicus Sentinel-6[J]. *Ocean Science*, 2016, 12(2): 471-479.

[24] DONLON C J, CULLEN R, GIULICCHI L, et al. The Copernicus Sentinel-6 Mission: Enhanced Continuity of Satellite Sea Level Measurements from Space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112395.

[25] MONTENBRUCK O, KUNZI F, HAUSCHILD A. Performance Assessment of GNSS-Based Real-Time Navigation for the Sentinel-6 Spacecraft[J]. *GPS Solutions*, 2021, 26(1): 12.

[26] SCHAER S, VILLIGER A, ARNOLD D, et al. The CODE Ambiguity-Fixed Clock and Phase Bias Analysis Products: Generation, Properties, and Performance[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(7): 81.

[27] DENG Z, FRITSCHE M, UHLEMANN M, et al. Reprocessing of GFZ Multi-GNSS Product GBM[C]//IGS Workshop 2016, Sydney, Australia, 2016.

[28] GENG J H, CHEN X Y, PAN Y X, et al. A Modified Phase Clock/Bias Model to Improve PPP Ambiguity Resolution at Wuhan University[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(10): 2053-2067.

[29] BLEWITT G. Carrier Phase Ambiguity Resolution

for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2 000 km[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B8): 10187-10203.

[30] MELBOURNE W. The Case for Ranging in GPS Based Geodetic Systems[C]//The First International Symposium on Precise Positioning with GPS, Rockville, Maryland, USA, 1985.

[31] WÜBBENA G. Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements [C]//The First International Symposium on Precise Position with GPS, Rockville, Maryland, USA, 1985.

[32] CULLEN R. Sentinel-6A POD Context[EB/OL]. (2021-07-21)[2022-04-20]. ftp://ftp.ids-doris.org/pub/ids/satellites/Sentinel6A_PODcontext.pdf, 2021.

[33] XIA Y W, LIU X, GUO J Y, et al. On GPS Data Quality of GRACE-FO and GRACE Satellites: Effects of Phase Center Variation and Satellite Attitude on Precise Orbit Determination[J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2021, 56(1): 93-111.

[34] VACLAVOVIC P, DOUSA J. G-Nut/Anubis: Open-Source Tool for Multi-GNSS Data Monitoring with a Multipath Detection for New Signals, Frequencies and Constellations[C]//IAG Scientific Assembly, Postdam, Germany, 2016.

[35] PROCHNIEWICZ D, GRZYMALA M. Analysis of the Impact of Multipath on Galileo System Measurements[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2295.

[36] BOCK Y. Global Positioning System Network Analysis with Phase Ambiguity Resolution Applied to Crustal Deformation Studies in California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B4): 3949-3966.

(上接第41页)

[M]. 北京:地质出版社, 1991.
LUO Xiaokuan, GUO Shaoyong. Course of Applied Geophysics: Gravity and Magnetic[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.

[41] 叶其孝,沈永欢. 实用数学手册[M]. 北京:科学出版社, 2019.
YE Qixiao, SHEN Yonghuan. Practical Mathematics Manual[M]. Beijing: Science Press, 2019.

[42] 张春灌, 张明华, 安玉林. 青藏高原重力异常与地形高程的负相关校正[J]. 物探与化探, 2007, 31(3):236-238.
ZHANG Chunguan, ZHANG Minghua, AN Yulin. The Negative Correlation Correction Between Gravity Anomaly and Topography of Tibetan Plateau[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(3):236-238.