

引文格式: 糜晓龙, 袁运斌, 张宝成. BDS-3和Galileo组合的RTK定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 113-118. DOI:10.13203/j.whugis20200483



Citation: MI Xiaolong, YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng. RTK Positioning Performance Analysis for Combined BDS-3 and Galileo[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1): 113-118. DOI:10.13203/j.whugis20200483

BDS-3和Galileo组合的RTK定位性能分析

糜晓龙^{1,2} 袁运斌¹ 张宝成¹

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉, 430071

2 中国科学院大学, 北京, 100049

摘要:北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)已全面建成并向全球用户提供可靠的定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务。为了实现与其他全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的兼容性和互操作性, BDS-3在BDS-2的基础上调制了B1C和B2a两个新信号, 与伽利略系统(Galileo)的E1和E5a实现了频率的复用。系统间偏差(inter-system bias, ISB)对于实现不同GNSS之间的融合处理至关重要, 为此提出了基于单差模型的ISB估计与应用算法, 并对BDS-3与Galileo重叠频率之间的ISB进行了分析。基于可跟踪BDS-3新信号的几类接收机, 揭示了BDS-3和Galileo之间的ISB的特性, 在此基础上分析了BDS-3和Galileo组合的实时动态(real-time kinematic, RTK)定位性能。结果表明, 基于相同类型的接收机B1C-E1和B2a-E5a之间是不存在ISB的, 而基于不同类型的接收机是存在明显的ISB的。此外, BDS-3和Galileo的组合的RTK定位性能相对于单BDS-3和Galileo在模糊度固定成功率和定位精度上都有10%以上的提升。该研究表明, 引入ISB的组合RTK定位性能相比于单系统更具优势。

关键词:北斗三号卫星导航系统; 伽利略系统; 系统间偏差; 实时动态定位; 模糊度固定

中图分类号: P228

文献标识码: A

收稿日期: 2021-09-28

DOI: 10.13203/j.whugis20200483

文章编号: 1671-8860(2023)01-0113-06

RTK Positioning Performance Analysis for Combined BDS-3 and Galileo

MI Xiaolong^{1,2} YUAN Yunbin¹ ZHANG Baocheng¹

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Objectives: BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3) has been fully completed and provides reliable positioning, navigation, and timing services to global users. In order to achieve compatibility and interoperability with other global navigation satellite systems (GNSS), B1C and B2a signals have been modulated by BDS-3 based on BDS-2, which enable frequency multiplexing with E1 and E5a signals of Galileo. The inter-system biases (ISBs) are important for the fusion processing of different GNSS. **Methods:** This paper proposes an ISB estimation and application model based on the single-differenced observations and analyzes the ISBs between the overlapping frequencies of BDS-3 and Galileo. Based on several receivers of the new trackable BDS-3 signals, the characteristics of ISBs between BDS-3 and Galileo are revealed, and the real-time kinematic (RTK) positioning performance of BDS-3 and Galileo is analyzed. **Results:** The results show that the ISBs of B1C-E1 and B2a-E5a exist in different types of receivers but not in the same type of receivers. In addition, compared with BDS-3-only and Galileo-only, the combination of BDS-3 and Galileo has an improvement of more than 10% in both the success rate of ambiguity resolution and positioning accuracy. **Conclusions:** The multi-constellation RTK positioning per-

基金项目:国家自然科学基金(42022025, 41774042);中科院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20190063);国家重点研发计划(2016YFB0501900)。

第一作者:糜晓龙, 博士生, 研究方向为GNSS精密定位及应用。xiaolong_mi@asch.whigg.ac.cn

通讯作者:袁运斌, 博士, 研究员。yybgps@whigg.ac.cn

formance with the introduction of ISBs is more advantageous than that of a single constellation.

Key words: BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3); Galileo; inter-system bias (ISB); real-time kinematic positioning; ambiguity resolution

2020-07-31, 中国宣布北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)正式建成并开通全球服务。BDS-3目前已建成由30颗卫星组成的完整星座,其中地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星3颗,倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)卫星3颗,中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星24颗,该星座将为全球用户提供可靠的定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务^[1]。BDS-3目前公开调制了5个频率的信号,包括B1I、B3I、B1C、B2a和B2b,其中B1C和B2a与GPS的L1和L5以及Galileo的E1和E5a实现了频率复用,为实现多系统的兼容互操作奠定了基础^[2-3]。

联合多个全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)进行实时动态(real-time kinematic, RTK)定位主要有两种模式。一种是各系统之间独立选择参考星,然后联合多系统方程进行解算,然而该方法未能充分利用多系统的优势^[4-5];另一种是为了最大限度地利用来自不同的导航系统的数据,采用多系统重叠频率的共用参考星的紧组合模式^[6-7],然而紧组合模式引入了系统间偏差(inter-system bias, ISB),如何妥善地处理ISB是紧组合应用于RTK定位的关键问题。

ISB是GNSS接收机的不同星座之间的硬件延迟,它同时存在于伪距和载波相位中^[8-9]。已有学者对ISB有了初步的研究,但通常使用双差模型并且只针对重叠频率^[10]。文献[11]对GPS、Galileo、日本的QZSS(quasi-zenith satellite system)和印度的IRNSS(Indian regional navigation satellite system)重叠频率的ISB进行了估计,并研究了ISB对RTK定位的影响;文献[12]提出通过引入初始约束来估计相位ISB的方法并应用于GPS和Galileo的ISB估计中;文献[13]基于双差模型分析了GPS和BDS之间的ISB并研究了GPS和BDS的组合RTK性能;文献[14]对BDS不同的星座进行了分析,发现了部分接收机组在BDS的不同星座之间存在系统内偏差(inter-satellite-type bias, ISTB),且ISTB会影响RTK定位的性能。目前通过接收机的软件升级,该问题已经得到解决。文献[15]将粒子滤波的方法

引入了ISB估计,该方法适用于多个系统的ISB同时估计;文献[16]提出了基于单差的ISB估计方法,该方法可实现重叠频率和非重叠频率的ISB估计,有利于联合多GNSS的定位应用。

本文提出了基于单差的重叠频率ISB估计与应用模型。由于单差模型存在秩亏,无法直接应用于RTK定位,因此需要首先解决单差模型的秩亏问题,从而获取满秩模型。单差模型和传统双差模型的区别在于双差模型通过共用参考星实现多系统的融合,而单差模型则通过共用基准实现多系统的融合。目前BDS-3与其他系统的互操作性及组合定位性能是研究热点,本文研究了BDS-3与Galileo重叠频率组合的RTK定位性能。

1 基于单差的RTK函数模型

对于几千米以内的短基线,电离层和对流层延迟默认在差分过程中已被消除^[17-18],此时基于单差的RTK定位模型可表示为:

$$\begin{cases} p_{12,j}^{s_A}(i) = \rho_{12}^{s_A}(i) + dt_{12}(i) + d_{12,j}^A(i) + \epsilon_{12,j}^{s_A} \\ \phi_{12,j}^{s_A}(i) = \rho_{12}^{s_A}(i) + dt_{12}(i) + \delta_{12,j}^A(i) + \\ \quad \lambda_j z_{12,j}^{s_A} + e_{12,j}^{s_A} \\ p_{12,j}^{s_B}(i) = \rho_{12}^{s_B}(i) + dt_{12}(i) + d_{12,j}^B(i) + \epsilon_{12,j}^{s_B} \\ \phi_{12,j}^{s_B}(i) = \rho_{12}^{s_B}(i) + dt_{12}(i) + \delta_{12,j}^B(i) + \\ \quad \lambda_j z_{12,j}^{s_B} + e_{12,j}^{s_B} \end{cases} \quad (1)$$

式中,下标1和2代表两台接收机, $(\bullet)_{12} = (\bullet)_2 - (\bullet)_1$ 表示站间单差; A 、 B 代表星座; s 、 j 、 i 分别代表卫星号、频率和历元; $p_{12,j}^{s_A}(i)$ 和 $\phi_{12,j}^{s_A}(i)$ 代表星座 A 中的 s_A 卫星在 j 频率的单差伪距和相位观测值; $p_{12,j}^{s_B}(i)$ 和 $\phi_{12,j}^{s_B}(i)$ 类似; $\rho_{12}^{s_A}(i)$ 和 $\rho_{12}^{s_B}(i)$ 代表单差站星距; $dt_{12}(i)$ 代表接收机钟差; λ_j 和 $z_{12,j}^{s_A}$ ($z_{12,j}^{s_B}$)分别代表波长和单差模糊度; $d_{12,j}^A(i)$ ($d_{12,j}^B(i)$)和 $\delta_{12,j}^A(i)$ ($\delta_{12,j}^B(i)$)分别是接收机伪距和相位偏差; ϵ 和 e 分别代表单差伪距和相位观测值的随机噪声及未建模的误差。

此时单差RTK定位模型是存在秩亏的,需要通过选取 S 基准消除设计矩阵中接收机钟差与接收机伪距/相位偏差之间的列相关引起的秩亏以及相位偏差和模糊度参数的列相关引起的秩亏^[19-20]。在解决了上述秩亏问题后,ISB被引入

RTK 定位模型中,此时基于单差的 RTK 定位模型可以表示为:

$$\begin{cases} p_{12,j}^{s_A}(i) = \rho_{12}^{s_A}(i) + d\tilde{t}_{12}^A(i) + \tilde{d}_{12,j}^A(i) + \epsilon_{12,j}^{s_A} \\ \phi_{12,j}^{s_A}(i) = \rho_{12}^{s_A}(i) + d\tilde{t}_{12}^A(i) + \tilde{\delta}_{12,1}^A(i) + \tilde{\delta}_{12,j}^A(i) + \lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_A} + e_{12,j}^{s_A} \\ p_{12,j}^{s_B}(i) = \rho_{12}^{s_B}(i) + d\tilde{t}_{12}^A(i) + \tilde{d}_{12,j}^A(i) + \tilde{d}_{12,j}^{AB}(i) + \epsilon_{12,j}^{s_B} \\ \phi_{12,j}^{s_B}(i) = \rho_{12}^{s_B}(i) + d\tilde{t}_{12}^A(i) + \tilde{\delta}_{12,1}^A(i) + \tilde{\delta}_{12,j}^A(i) + \tilde{\delta}_{12,j}^{AB}(i) + \lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_B} + e_{12,j}^{s_B} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中参数重整的含义见表 1,该模型可适用于重叠频率和非重叠频率的多系统融合。由于本文研究重叠频率的多系统融合,

因此 $\lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_B} - \lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_A}$ 存在整周特性,基于单差的 ISB 估计可以直接得到其小数部分 $\delta_{12,j}^B(i) - \delta_{12,j}^A(i)$ 。

表 1 参数重整的含义

Tab.1 Meaning of Reformed Parameters

符号和公式	参数含义
$\tilde{d}_{12,j}^A(i) = d_{12,j}^A(i) - d_{12,1}^A(i)$	接收机差分码偏差(differential code bias, DCB),其中 $j \geq 2$
$\tilde{\delta}_{12,1}^A(i) = \delta_{12,1}^A(i) - d_{12,1}^A(i) + \lambda_1 \tilde{z}_{12,1}^{1_A}$	第一个频率的相位偏差
$\tilde{\delta}_{12,j}^A(i) = \delta_{12,j}^A(i) - \delta_{12,1}^A(i) + \lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_A} - \lambda_1 \tilde{z}_{12,1}^{1_A}$	接收机差分相位偏差(differential phase bias, DPB),其中 $j \geq 2$
$\tilde{d}_{12,j}^{AB}(i) = d_{12,j}^B(i) - d_{12,j}^A(i)$	接收机伪距 ISB
$\tilde{\delta}_{12,j}^{AB}(i) = \delta_{12,j}^B(i) - \delta_{12,j}^A(i) + \lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_B} - \lambda_j \tilde{z}_{12,j}^{1_A}$	接收机相位 ISB

在单历元单系统条件下,跟踪 m 颗卫星 f 个频率可组建 $2fm$ 个单差观测值,存在未知数个数 $3 + 2f + f(m - 1)$,多余观测数为 $2fm - (3 + 2f + f(m - 1)) = fm - f - 3$ 。同样拓展到双系统时,假设增加了一个系统的 n 颗卫星,可组建 $2fm + 2fn$ 个单差观测值,存在未知数个数 $3 + 4f + f(m + n - 2)$,多余观测数为 $2fm + 2fn - (3 + 4f + f(m + n - 1)) = fm + fn - 2f - 3$ 。

2 实验分析

本文采用了中科院精密测量科学与技术创新研究院的 4 台 GNSS 接收机进行实验,包含 Trimble ALLOY(版本号均为 5.42)和 Septentrio POLARX5(版本号均为 5.3.0)两种类型的接收机各两台。4 台接收机组成的 3 条短基线具体信息见表 2。

表 2 参与计算的基线信息

Tab.2 Baseline Information Used in Experiment

基线	接收机类型	基线长度/m
IGG01-IGG02	Trimble-Trimble	1.8
IGG02-IGG03	Trimble-Septentrio	1.8
IGG03-IGG04	Septentrio-Septentrio	1.8

基于上述数据,本文对 Galileo 与 BDS-3 重叠频率(E1-B1C、E5a-B2a)的 ISB 进行分析,并进一步评估了 BDS-3+Galileo 组合的 RTK 定位性

能。在数据处理过程中采用高度角定权,不同的系统之间做等权处理。采用广播星历计算卫星轨道和钟差。采用 LAMBDA 进行模糊度固定,其中 ratio 的阈值设为 $2^{[21]}$,模糊度固定成功率是指成功固定的历元数和总历元数的比值^[22]。RTK 的函数模型采用本文提出的单差模型,采用最小二乘逐历元进行参数估计。

图 1 为表 2 中 3 条基线在 2019 年 10-01—10-03 即年积日(day of year, DOY)第 274~276 天重叠频率 E1-B1C 和 E5a-B2a 的 ISB 估计结果,其统计信息见表 3,包括均值和标准差。从图 1 和表 3 可以看出,对于同类型接收机的基线, Galileo 和 BDS-3 之间的重叠频率在伪距和相位上都不存在 ISB,而对于非同类型接收机的基线,伪距和相位上都存在 ISB。因此,在 Galileo 和 BDS-3 组合的 RTK 定位中,同类型的接收机可以直接忽略 ISB,而非同类型接收机需要对 ISB 进行处理。此外,从图 1 的 ISB 时间序列和表 3 的统计信息可以看出,重叠频率的 ISB 在短期内是比较稳定的,因此可以将一天内的重叠频率的 ISB 视为常数,通过预先校正将 ISB 从观测值中直接剔除。

为了进一步验证 BDS-3 和 Galileo 组合的 RTK 定位性能,采用了 2019-10-04(DOY277)的数据对 3 条基线的 RTK 定位性能进行了测试并同时分析了 BDS-3 和 Galileo 单系统的 RTK 定位性能。对于相同类型接收机,ISB 参数在模型中被忽略,而非同类型接收机,ISB 参

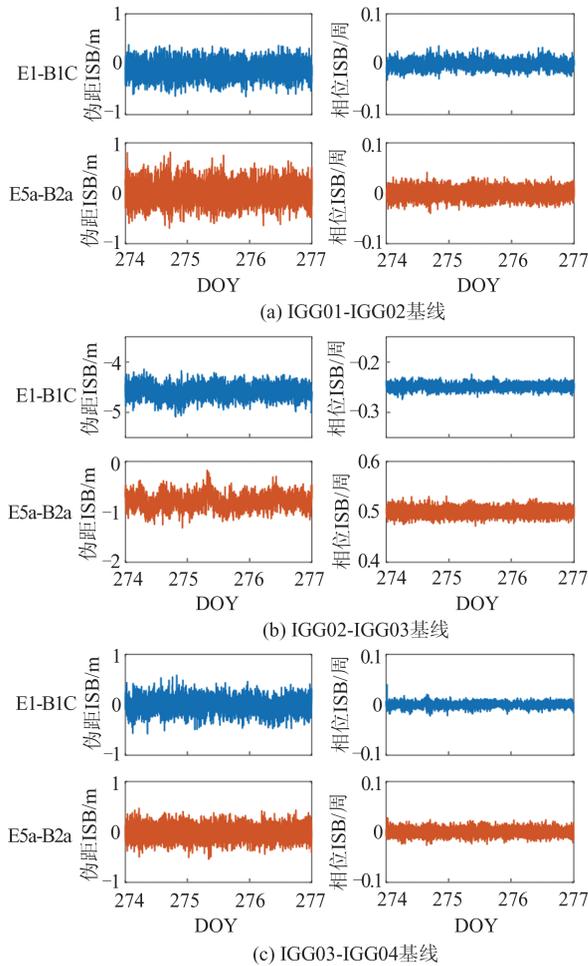


图1 3条基线Galileo与BDS-3的ISB

Fig.1 ISB of Galileo and BDS-3 for Three Baselines

数被预先校正,校正采用了前3天的ISB估计结果。模糊度固定成功率结果见表4。从表4可以看出,BDS-3的模糊度固定成功率要比Galileo

高,这主要得益于BDS-3在中国区域内可见的卫星数比Galileo要多。值得注意的是,3条基线BDS-3+Galileo模糊度固定成功率都是100%,相比于单BDS-3和单Galileo结果明显提升。

表3 ISBs估值的统计信息

Tab.3 Statistical Information of Estimated ISBs

基线	频率	伪距ISBs/m		相位ISBs/周	
		均值	标准差	均值	标准差
IGG01-	E1-B1C	0.093	0.153	0.000	0.008
IGG02	E5a-B2a	-0.013	0.183	0.000	0.009
IGG02-	E1-B1C	-4.585	0.122	-0.250	0.006
IGG03	E5a-B2a	-0.786	0.151	0.500	0.008
IGG03-	E1-B1C	-0.071	0.104	-0.000	0.005
IGG04	E5a-B2a	0.012	0.139	-0.000	0.007

表4 3条基线RTK定位中模糊度固定成功率/%

Tab.4 Ambiguity Resolution Rate of RTK Positioning for Three Baselines/%

基线	BDS-3	Galileo	BDS-3+Galileo
IGG01-IGG02	93.4	59.4	100
IGG02-IGG03	83.6	62.3	100
IGG03-IGG04	91.3	74.7	100

与模糊度固定成功率一样,定位精度也是RTK定位性能的重要评价指标。以IGG02-IGG03基线为例,其定位结果如图2所示。从图2可以看出,BDS-3和Galileo在一天内都存在一定的不可用时段,这与表4的结果是相符的。

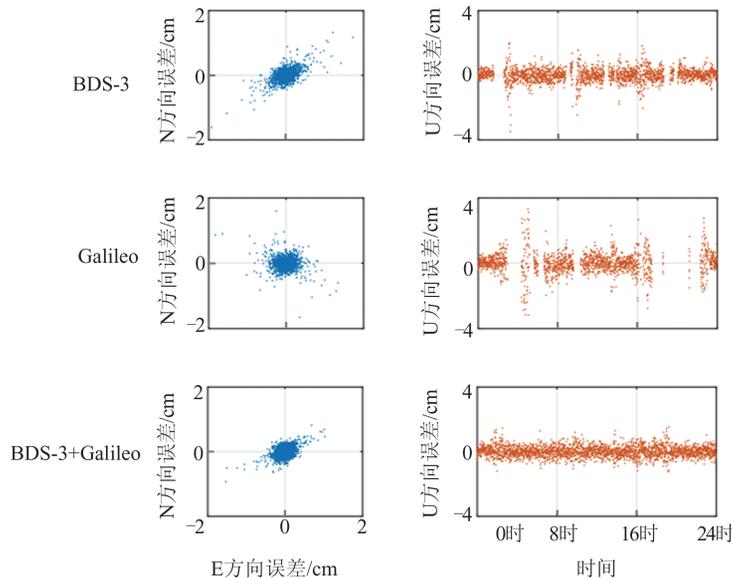


图2 IGG02-IGG03基线的定位结果

Fig.2 Positioning Results of Baseline IGG02-IGG03

3 条基线 RTK 定位误差的均方根 (root mean square, RMS) 见表 5。从表 5 可以看出, 单 BDS-3 的定位精度要略优于单 Galileo 的定位精度, 这是

由于中国区域可见的 BDS-3 卫星的数目要比 Galileo 卫星多。此外, BDS-3+Galileo 的组合定位精度相比于单 BDS-3 和单 Galileo 均有提升。

表 5 3 条基线 RTK 定位误差 RMS/mm

Tab. 5 RMS of RTK Positioning Error for Three Baselines/mm

基线	BDS-3			Galileo			BDS-3+Galileo		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
IGG01-IGG02	2.9	3.0	7.8	3.2	3.4	8.9	1.9	2.0	4.7
IGG02-IGG03	1.8	2.1	4.1	2.3	2.4	6.7	1.3	1.6	3.3
IGG03-IGG04	2.9	2.8	7.0	2.9	2.6	7.2	2.8	1.4	3.9

3 结 语

ISB 的标定是 GNSS 系统之间实现兼容互操作的重要前提, 本文提出了多系统 ISB 估计和应用的单差 RTK 定位方法, 并深入研究了 BDS-3 和 Galileo 之间重叠频率的 ISB 及其对 RTK 定位的影响。利用 4 台可跟踪 BDS-3 信号的多频多模 GNSS 接收机组成了 3 条短基线进行了数据采集, 逐历元估计了伪距和相位 ISB, 并对组合 BDS-3 和 Galileo 的 RTK 定位性能进行了分析。实验结果表明, 两个系统的重叠频率在接收机类型相同时不存在 ISB, 但在接收机类型不同时存在 ISB。此外, 鉴于 ISB 的稳定性对其进行预报, BDS-3+Galileo 组合的 RTK 定位性能在模糊度固定成功率和定位精度两个方面比单 BDS-3 和单 Galileo 有显著提升。

由于目前 BDS-3 完成全球部署并提供服务不久, 可接收 BDS-3 新信号的接收机类型有限。本文仅利用了两种不同类型的接收机对 ISB 进行估计并探讨 BDS-3 和 Galileo 组合的 RTK 定位性能, 并且仅在武汉市进行了测试。随着 BDS-3 的全球化, 后续还需要针对更多类型的接收机和不同的区域进行研究。此外, 本文仅针对 BDS-3 和 Galileo 两个系统进行了分析, 而 BDS-3 和 GPS、Galileo、QZSS 以及 IRNSS 之间都存在重叠频率, 对这些系统之间的系统间偏差估计和 RTK 定位性能的验证也是下一步将要开展的研究工作。

参 考 文 献

[1] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System[J]. *Scientia Sini-*

ca (Terrae), 2018, 48(5): 584-594. (杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测: 试验验证数据分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 584-594.)

- [2] He Yilei. Quality Analysis of Satellite Signal for BDS-3 Simplest System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 394-402. (何义磊. 北斗三号最简系统卫星信号质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 394-402.)
- [3] Mi X L, Zhang B C, Yuan Y B, et al. Characteristics of GPS, BDS2, BDS3 and Galileo Inter-System Biases and Their Influence on RTK Positioning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(1): 015009.
- [4] Gioia C, Borio D. A Statistical Characterization of the Galileo-to-GPS Inter-System Bias[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11): 1279-1291.
- [5] Luo Cuicui, Wang Guangying, Ye Changbin, et al. Analysis of Relative Positioning Accuracy of QZSS and GPS Overlapping Frequency Tight Combination [J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(4): 13-18. (罗翠翠, 王光盈, 叶长斌, 等. QZSS 与 GPS 重叠频率紧组合相对定位精度分析[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(4): 13-18.)
- [6] Wu Mingkui, Liu Wanke, Wang Wang, et al. Differential Inter-System Biases Estimation and Initial Assessment of Instantaneous Tightly Combined RTK with BDS-3, GPS, and Galileo [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1430.
- [7] Sui Xin, Shi Chuang, Xu Aigong, et al. The Stability of GPS/BDS Inter-System Biases at the Receiver End and Its Effect on Ambiguity Resolution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 175-182. (隋心, 施闯, 徐爱功, 等. GPS/BDS 接收机端系统偏差稳定性对整周模糊度固定的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 175-182.)

- [8] Dang Yamin, Zhang Longping, Chen Junyong. ISB/IFB Estimation and Characteristic Analysis with Multi-GNSS Precise Orbit Determination[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2079-2084. (党亚民, 张龙平, 陈俊勇. 多GNSS系统精密定轨 ISB/IFB 估计及特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2079-2084.)
- [9] Wu Mingkui, Liu Wanke, Zhang Xiaohong, et al. Initial Assessment of Tightly Combined Relative Positioning for Short Baselines with Observations from GPS, Galileo, and BDS-3 Experimental Satellites [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 13-20. (吴明魁, 刘万科, 张小红, 等. GPS/Galileo/BDS-3 试验星短基线紧组合相对定位性能初步评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 13-20.)
- [10] Gao W, Meng X L, Gao C F, et al. Combined GPS and BDS for Single-Frequency Continuous RTK Positioning Through Real-Time Estimation of Differential Inter-System Biases [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 20.
- [11] Odijk D, Nadarajah N, Zaminpardaz S, et al. GPS, Galileo, QZSS and IRNSS Differential ISBs: Estimation and Application [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 439-450.
- [12] Paziewski J, Wielgosz P. Accounting for Galileo - GPS Inter-System Biases in Precise Satellite Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(1): 81-93.
- [13] Gao W, Gao C F, Pan S G, et al. Inter-System Differencing Between GPS and BDS for Medium-Baseline RTK Positioning [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 948.
- [14] Nadarajah N, Teunissen P J G, Sleewaegen J M, et al. The Mixed-Receiver BeiDou Inter-Satellite-Type Bias and Its Impact on RTK Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 357-368.
- [15] Tian Y M, Liu Z Z, Ge M R, et al. Multi-Dimensional Particle Filter-Based Estimation of Inter-System Phase Biases for Multi-GNSS Real-Time Integer Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 1073-1087.
- [16] Mi X L, Zhang B C, Yuan Y B. Multi-GNSS Inter-System Biases: Estimability Analysis and Impact on RTK Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 81.
- [17] Odolinski R, Teunissen P G, Odijk D. Combined GPS + BDS for Short to Long Baseline RTK Positioning [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(4): 045801.
- [18] Deng C L, Tang W M, Liu J N, et al. Reliable Single-Epoch Ambiguity Resolution for Short Baselines Using Combined GPS/BeiDou System [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 375-386.
- [19] Odolinski R, Teunissen P J G, Odijk D. Combined BDS, Galileo, QZSS and GPS Single-Frequency RTK [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 151-163.
- [20] Odolinski R, Teunissen P J G, Odijk D. First Combined COMPASS/BeiDou-2 and GPS Positioning Results in Australia. Part II: Single- and Multiple-Frequency Single-Baseline RTK Positioning [J]. *Journal of Spatial Science*, 2014, 59(1): 25-46.
- [21] 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.
- [22] Odijk D, Teunissen P J G. Characterization of Between-Receiver GPS-Galileo Inter-System Biases and Their Effect on Mixed Ambiguity Resolution [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 521-533.