



引文格式:耿涛,李钟兴,谢新,等.GNSS接收机伪距偏差确定方法及其对定位的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1134-1145.DOI:10.13203/j.whugis20210276

Citation: GENG Tao, LI Zhongxing, XIE Xin, et al. GNSS Receiver-Related Pseudorange Bias Determination Method and Its Effect on Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1134-1145. DOI: 10.13203/j.whugis20210276

GNSS接收机伪距偏差确定方法及其对定位的影响

耿 涛¹ 李钟兴¹ 谢 新¹ 马 壮¹ 赵齐乐¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘要: 全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)接收机伪距偏差是指卫星导航信号非理想特征导致的不同接收机的伪距测量常数偏差。研究表明,接收机伪距偏差无法被钟差参数吸收,将影响GNSS精密应用。选取了多GNSS实验全球跟踪网的9条零/短基线,将基线按照接收机类型分为3组,即相同厂商相同型号、不同厂商以及相同厂商不同型号,通过双差法确定了每组基线GPS/北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)/伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)的接收机伪距偏差,并分析了接收机伪距偏差的稳定性及其对整周模糊度解算和伪距相对定位的影响。结果表明,不同厂商接收机构成的基线,伪距偏差可达160 cm,即使同一厂商不同型号的接收机间也存在不可忽略的伪距偏差;对于GPS、BDS和Galileo, Galileo伪距偏差最小,BDS伪距偏差最大。此外,接收机伪距偏差具有良好的稳定性,60 d标准差不超过12 cm。接收机伪距偏差改正后, GPS、BDS、Galileo双差宽巷 Melbourne-Wübbena组合非整周部分均方根分别降低了17%、22%、14%, GPS、BDS、Galileo伪距相对定位三维误差分别从84.4、77.3、60.0 cm降低到80.1、72.1、57.0 cm。

关键词: 接收机伪距偏差;零/短基线;模糊度解算;MW组合;伪距相对定位

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-09-06

DOI:10.13203/j.whugis20210276

文章编号:1671-8860(2023)07-1134-12

GNSS Receiver-Related Pseudorange Bias Determination Method and Its Effect on Positioning

GENG Tao¹ LI Zhongxing¹ XIE Xin¹ MA Zhuang¹ ZHAO Qile¹

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

Abstract: Objectives: Global navigation satellite system (GNSS) satellite chip shape distortions lead to individual biases in the pseudorange measurements. These biases are the results of the correlator's tracking response and thus depend on the correlator and front-end design of the receiver. As a result, different receivers are likely to exhibit inconsistent biases, called receiver-related pseudorange biases. The researches show that the receiver-related pseudorange biases cannot be absorbed by clock offset, which will affect GNSS precision applications. Methods: We estimate the receiver-related pseudorange biases of global positioning system (GPS) / BeiDou satellite navigation system (BDS) / Galileo satellite navigation system (Galileo) from 9 short/zero-baselines stations from the multi-GNSS experiment network using double difference method. The baselines are divided into three groups according to the combinations of two receivers of one baseline. Results: The results indicate that the receiver-related pseudorange biases of receivers with different manufacturers even the same manufacturers with different models cannot be neglected. For base-

基金项目:国家自然科学基金(41974036);湖北省自然科学基金(2019CFA051);中央高校基本科研业务费专项资金(2042021kf0062);中国博士后科学基金(2020M682482)。

第一作者:耿涛,博士,教授,主要从事卫星导航精密数据处理研究工作。gt.gengtao@whu.edu.cn

通讯作者:谢新,博士。xiexin@whu.edu.cn

lines with receivers from different manufacturers, the inconsistencies of pseudorange biases can reach up to 160 cm. **Conclusions:** Among GPS, Galileo and BDS, Galileo shows the smallest pseudorange biases, while BDS in general is the largest. Furthermore, the stability of pseudorange biases is analyzed, the results suggest that estimated receiver-related pseudorange biases are quite stable with the standard deviation less than 12 cm for the three systems. We investigate the effect of receiver-related pseudorange biases on integer ambiguity resolution and pseudorange relative positioning, with the pseudorange biases correction, the root mean squares of fractional parts of double difference Melbourne-Wübbena combination are decreased by 17%, 22%, and 14% for GPS, BDS, Galileo, respectively. An improvement of pseudorange relative positioning accuracy is also confirmed, the 3D positioning errors of GPS, BDS, Galileo are reduced from 84.4, 77.3 and 60.0 to 80.1, 72.1 and 57.0 cm, respectively.

Key words: receiver-related pseudorange bias; short/zero-baselines; integer ambiguity resolution; MW combination; pseudorange relative positioning

随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的不断发展,为满足日益严苛的定位、导航和授时需求^[1],GNSS高精度数据处理应充分考虑包括硬件偏差在内的所有误差源。卫星和接收机硬件的物理限制导致GNSS偏差有多种表现形式,例如系统间偏差^[2]、载波相位非整周偏差^[3]以及伪距偏差^[4]。

针对伪距偏差,20世纪90年代,有学者在利用GPS开展电离层研究过程中发现了卫星端伪距偏差^[5-6],这种偏差源于测距信号码失真,在不同卫星和信号频点间存在差异^[7]。该偏差可通过广播星历中播发的时间群延迟参数(time group delay, TGD)^[8-9],或国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)分析中心发布的差分码偏差(differential code bias, DCB)产品进行改正^[10]。此外,北斗二号卫星导航系统(BeiDou-2 satellite navigation system, BDS-2)还发现了由星上多路径引起的随卫星高度角变化的偏差,其幅度可达1 m,针对这一问题,文献[11-12]提出了改正模型,模型改正后,模糊度固定成功率、精密单点定位精度^[12]以及精密定轨精度^[13]显著提高。

在GNSS精密数据处理时,通常认为伪距偏差较为稳定,且卫星端伪距偏差对所有接收机相同,接收机伪距偏差对使用码分多址(code division multiple access, CDMA)信号体制的同一系统所有卫星都相同^[14]。然而,文献[15-17]等研究表明,不同硬件配置(例如相关器间隔、前端带宽等)的接收机对卫星信号失真的跟踪响应存在差异,进而导致不同类型接收机、不同卫星的伪距观测值产生系统性偏差(即伪距偏差)。这种现象最早发现于1993年,由于GPS空间飞行器编号(space vehicle number, SVN)19号卫星发生故障导致下行信号异常,引起使用不同类型接收机

的差分定位误差显著增大^[18]。后续研究表明,即使健康卫星同样也存在接收机伪距偏差^[19-22],这类偏差和码元构造^[20]、相关器间隔^[23-24]以及整个信号链的传递函数^[25]相关。为削弱其对定位应用的影响,在GPS接口控制文件中明确定义了相关器间距和前端带宽的适用值^[8],然而北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)和伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)目前还暂未提供相关的适用值。

接收机伪距偏差的确定方法包括并置接收机双差法、伪距残差法、基于DCB残差的偏差计算方法等。文献[7, 10]利用并置接收机双差法计算了GPS、Galileo以及BDS-2卫星的接收机伪距偏差,分析了其对DCB和钟差估计的影响。文献[26]利用伪距残差法标定了BDS-2卫星的接收机伪距偏差,伪距偏差改正后标准单点定位和卫星钟差估计精度有所提高。随着GNSS快速发展,尤其是2020年全面建成的北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system, BDS-3),有必要研究其不同频点、不同接收机类型的伪距偏差特性。由于不同卫星、不同接收机类型的伪距偏差不一致,接收机伪距偏差无法被钟差参数吸收,将影响一些典型的GNSS精密应用。因此,本文首先介绍了接收机伪距偏差确定方法,并通过不同类型接收机组合的基线计算了多GNSS系统、多频点的接收机伪距偏差,然后研究了接收机伪距偏差特性及其对模糊度固定、相对定位等精密应用的影响。

1 接收机伪距偏差确定方法

考虑接收机伪距偏差的GNSS伪距观测方

程为^[10]:

$$P_{r,i}^s = \rho_{r,i}^s + c \cdot (t_r - t^s) + b_{r,i}^s + I_{r,i}^s + T_r^s + \epsilon_{P,i} \quad (1)$$

式中,上标 s 和下标 r,i 分别代表卫星、接收机以及频点编号; P 为伪距观测值; ρ 表示卫星和接收机间的几何距离; c 为真空中的光速; t^s 和 t_r 分别代表卫星和接收机钟差; $b_{r,i}^s$ 为接收机伪距偏差; $I_{r,i}^s$ 和 T_r^s 分别为电离层延迟和对流层延迟; $\epsilon_{P,i}$ 为伪距观测噪声,服从白噪声分布。

假设不存在接收机伪距偏差,零基线的伪距双差观测值仅包含观测噪声;对于距离不超过2 km的短基线,由于电离层和对流层延迟具有强空间相关性,伪距双差几乎可以消除大气延迟、卫星和接收机钟差的影响^[24]。因此,在某一历元 k ,接收机 r_1, r_2 和卫星 s_1, s_2 的双差伪距观测方程为:

$$\Delta \nabla P_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i = \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i + \Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i + \Delta \nabla \epsilon(k)_i \quad (2)$$

式中, $\Delta \nabla P_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i$ 和 $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i$ 分别为双差伪距观测值和几何距离; $\Delta \nabla \epsilon(k)_i$ 为双差伪距观测噪声; $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i$ 为 k 历元的双差接收机伪距偏差。零基线的双差几何距离 $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i$ 为零, 短基线的双差几何距离可通过广播星历以及IGS提供的站坐标消除。因此, 双差接收机伪距偏差 $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 可表示为:

$$\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} = E \{ \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i \} \quad (3)$$

式中, $E \{ \cdot \}$ 为数学期望; $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i$ 为不含几何距离的双差伪距观测值。

为了分析不同卫星的双差接收机伪距偏差的特性, 分别以G01、C12、E01作为GPS、BDS、Galileo的基准星。因此, 3个系统的接收机伪距偏差表达式为:

$$\begin{cases} \Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{G01s_l}_i = E \{ \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{G01s_l}(k)_i \} (l=1, 2, \dots, n_G) \\ \Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{C12s_l}_i = E \{ \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{C12s_l}(k)_i \} (l=1, 2, \dots, n_C) \\ \Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{E01s_l}_i = E \{ \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{E01s_l}(k)_i \} (l=1, 2, \dots, n_E) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{G01s_l}_i$ 、 $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{C12s_l}_i$ 、 $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{E01s_l}_i$ 分别为以G01、C12、E01为基准星的接收机伪距偏差; l 为卫星编号; $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{G01s_l}(k)_i$ 、 $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{C12s_l}(k)_i$ 、 $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{E01s_l}(k)_i$ 分别为以G01、C12、E01作为基准星的双差伪距观测值; n_G, n_C, n_E 分别为GPS、BDS、Galileo的卫星数。

若卫星 s_1 和基准星 s_{ref} 共视, 则卫星 s_1 的接收机伪距偏差可由式(4)求得; 若卫星 s_2 不与基准星 s_{ref} 共视但与 s_1 共视, 则卫星 s_2 相对基准星 s_{ref} 的接

收机伪距偏差 $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_{\text{ref}} s_2}$ 为:

$$\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_{\text{ref}} s_2} = \Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_{\text{ref}} s_1} + \Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} = E \{ \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_{\text{ref}} s_1}(k)_i \} + E \{ \Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i \} \quad (5)$$

式中, $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_{\text{ref}} s_1}$ 为卫星 s_1 相对基准星 s_{ref} 的接收机伪距偏差; $\Delta \nabla b_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 为卫星 s_2 相对卫星 s_1 的接收机伪距偏差; $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_{\text{ref}} s_1}(k)_i$ 为卫星 s_1 相对基准星 s_{ref} 的双差伪距观测值; $\Delta \nabla \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}(k)_i$ 为卫星 s_2 相对卫星 s_1 的双差伪距观测值。

2 数据说明

本文数据采用多GNSS实验(the multi-GNSS experiment, MGEX)全球跟踪网16个测站构成的9条零/短基线, 时间跨度为2019年年积日第300—360天, 数据采样间隔为30 s。为了削弱多路径误差影响, 卫星截止高度角取30°。对于BDS, 因地球同步轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星轨道精度较差, 本文暂不考虑。根据接收机的生产厂商和型号将基线分为3组: 相同厂商且相同型号接收机组(第1组)、不同厂商接收机组(第2组)、相同厂商但不同型号接收机组(第3组), 详细信息见表1。此外, 对于GPS的L1、L2、L5频点, 本文使用的观测值类型分别为C1C、C2W、C5Q/C5X; 对于BDS的B1I、B2I、B3I频点, 本文使用的观测值类型分别为C2I、C7I、C6I; 对于Galileo的E1、E5a、E5b频点, 本文使用的观测值类型分别为C1C/C1X、C5Q/C5X、C7Q/C7X。

表1 零/短基线详细信息

Tab. 1 Details of Zero-/Short-Baselines

分组	基线	接收机1	接收机2	长度/m
1	MAT1_MATE	Leica Gr30	Leica Gr30	10.7
	USN7_USN8	Sept Polarx5tr	Sept Polarx5tr	0
	ZIM2_ZIM3	Trimble Netr9	Trimble Netr9	0
2	WTZR_WTZZ	Leica Gr50	Javad Tre_3	1.6
	CHPI_CHPG	Sept Polarx5	Trimble Netr9	1 850.5
3	STR1_STR2	Sept Polarx5tr	Trimble Netr9	70.3
	MAT1_MATG	Leica Gr30	Leica Gr10	9.6
3	WTZ3_WTZZ	Javad Tre_G3th	Javad Tre_3	67.1
	YAR2_YAR3	Sept Polarx4tr	Sept Polarx5	18.2

3 接收机伪距偏差分析

3.1 相同厂商相同型号接收机伪距偏差

以基线USN7_USN8为例, GPS、BDS和

Galileo 的接收机伪距偏差分别如图 1(a)~1(c) 所示。由图 1 可知,3 系统的伪距偏差分别不超过 7.5、8.5、5.0 cm, 其中 GPS L2 频点伪距偏差明显小于 L1 和 L5 频点; BDS B3I 频点伪距偏差最小, B1I 频点伪距偏差最大; 而 Galileo 不同频点的伪距偏差量级几乎一致。值得注意的是, 图 1 中部分卫星和频点观测数据缺失, 因为对于 GPS, 测

试期间 G04 和 G18 处于非健康状态, 且仅 Block II-F 和 Block III-A 卫星提供 L5 频点信号; 对于 BDS-2, 基线 USN7_USN8 位于美国, 无法接收到倾斜同步轨道 (inclined geosynchronous orbit, IGSO) 卫星信号; 对于 BDS-3, 由于测试期间接收机固件未升级, 无法接收 C37 以上卫星信号, 且 BDS-3 不提供 B2I 频点信号。

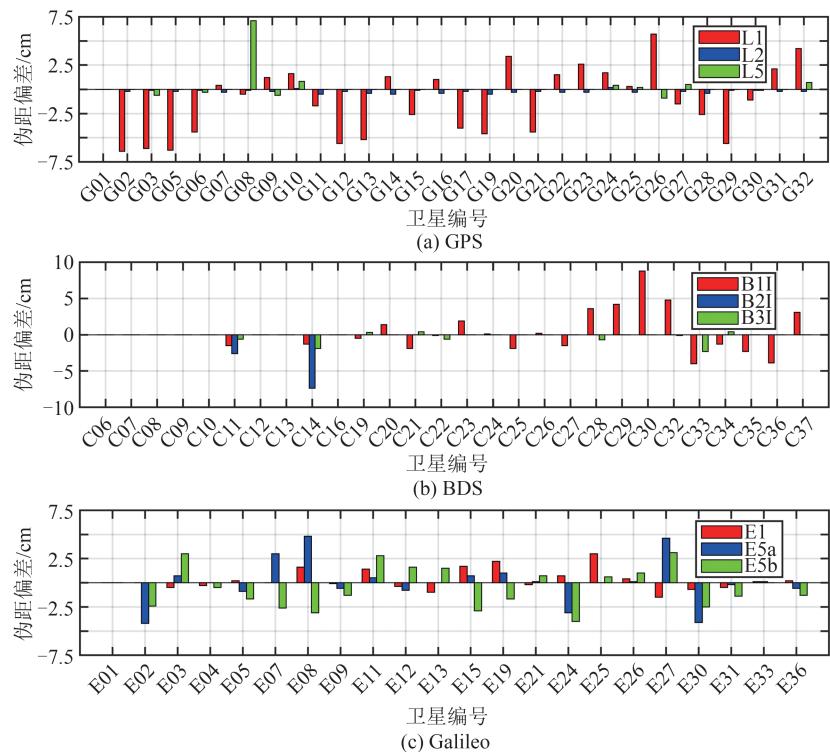


图 1 基线 USN7_USN8 的 GPS、BDS、Galileo 接收机伪距偏差

Fig. 1 Receiver-Related Pseudorange Biases of Baseline USN7_USN8 for GPS, BDS and Galileo

本文用相同频点接收机伪距偏差的最大值与最小值之差表示该频点的最大伪距偏差。相同厂商且相同型号接收机组成的 3 条基线 MAT1_MATE、USN7_USN8、ZIM2_ZIM3 在各频点的最大伪距偏差分别如图 2(a)~2(c) 所示。从图 2 中可以看出, 各系统各频点的接收机最大伪距偏差值较小, 均不超过 25 cm, 这可能是由于相同厂商相同型号的接收机硬件配置差异不大, 测量的伪距一致性较好。

3.2 不同厂商接收机伪距偏差分析

以基线 STR1_STR2 为例, 各系统接收机伪距偏差如图 3 所示。GPS L5 频点的伪距偏差整体稍大于 L1 频点, 最大可达 80 cm, L2 频点伪距偏差最小, 不超过 15 cm。对于 BDS, B1I 频点伪距偏差明显大于 B2I 和 B3I, 最大可达 160 cm。值得注意的是, BDS-3 卫星的 B1I 频点伪距偏差明显大于 BDS-2, 且接收机伪距偏差符号表现出系统性, 这可能是由 BDS-3 和 BDS-2 卫星间的系

统性偏差所引起^[27-28]。对于 Galileo, 接收机伪距偏差整体上小于 GPS 和 BDS, 其中 E1 频点伪距偏差稍大于 E5a 和 E5b 频点, 最大值约为 31 cm, 表明不同类型接收机间的 Galileo 伪距一致性优于 GPS 和 BDS。

为了分析接收机伪距偏差的稳定性, 以 STR1_STR2 为例, GPS、BDS、Galileo 典型卫星的 L1、B1I、E1 频点伪距偏差时间序列见图 4。可以看出, 伪距偏差时间序列较为平稳, 未见明显的趋势性变化。图 5 给出了 STR1_STR2 两个月的伪距偏差标准差 (standard deviation, STD), 由图 5 可知, GPS 和 Galileo 各频点接收机伪距偏差 STD 均不超过 10 cm, BDS 除 C23 和 C24 卫星在 B1I 频点的 STD 达 12 cm, 其余卫星各频点的 STD 同样不超过 10 cm。上述结果表明, 接收机伪距偏差具有较好的稳定性。

图 6(a)~6(c) 分别为基线 WTZR_WTZZ、CHPI_CHPG、STR1_STR2 各频点的最大伪距

偏差。可以看出,3条基线中B1I频点伪距偏差最大,可达180 cm;L5频点最大伪距偏差仅次于B1I频点,最大约为100 cm;L1频点最大伪距偏差低于B1I和L5频点,但高于其他频点,最大值约为60 cm;E5a频点伪距偏差最小,最大不超过25 cm。Galileo最大伪距偏差总体上优于GPS和BDS。由于图6中不同厂商的接收机采用了不同的相关器间隔和前端带宽设计,其接收机伪距偏差明显大于图2中相同厂商相同型号接收机的伪距偏差。

3.3 相同厂商不同型号接收机伪距偏差分析

以MAT1_MATE为例,各系统接收机伪距偏差如图7所示。GPS各频点伪距偏差量级相近,除G32号卫星的L5频点伪距偏差达到34 cm,其余卫星各频点均不超过20 cm。BDS B1I频点伪距偏差明显大于B2I,最大值可达35 cm,由于接收机无法接收到B3I频点信号,造成该频点数据缺失。Galileo各频点伪距偏差均低于20 cm,低于GPS和BDS。伪距偏差STD如图8所示,所有系统各频点均不超过10 cm,表明

伪距偏差具有良好的稳定性。

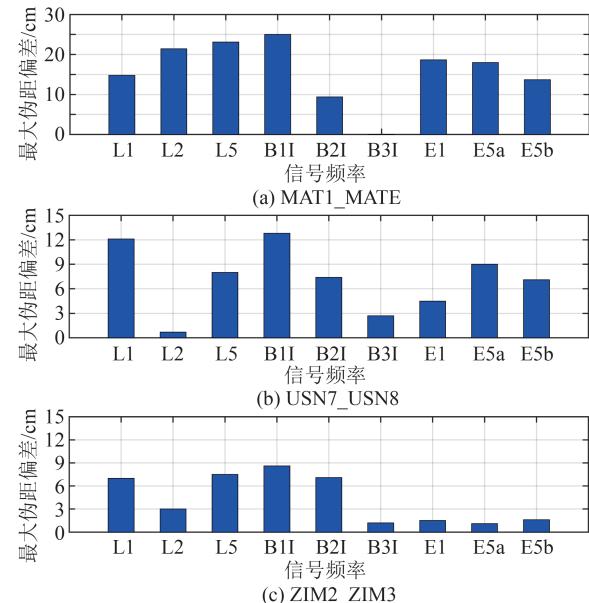


图2 基线MAT1_MATE、USN7_USN8、ZIM2_ZIM3
最大接收机伪距偏差

Fig. 2 Receiver-Related Pseudorange Max Biases of
Baselines MAT1_MATE, USN7_USN8, and
ZIM2_ZIM3

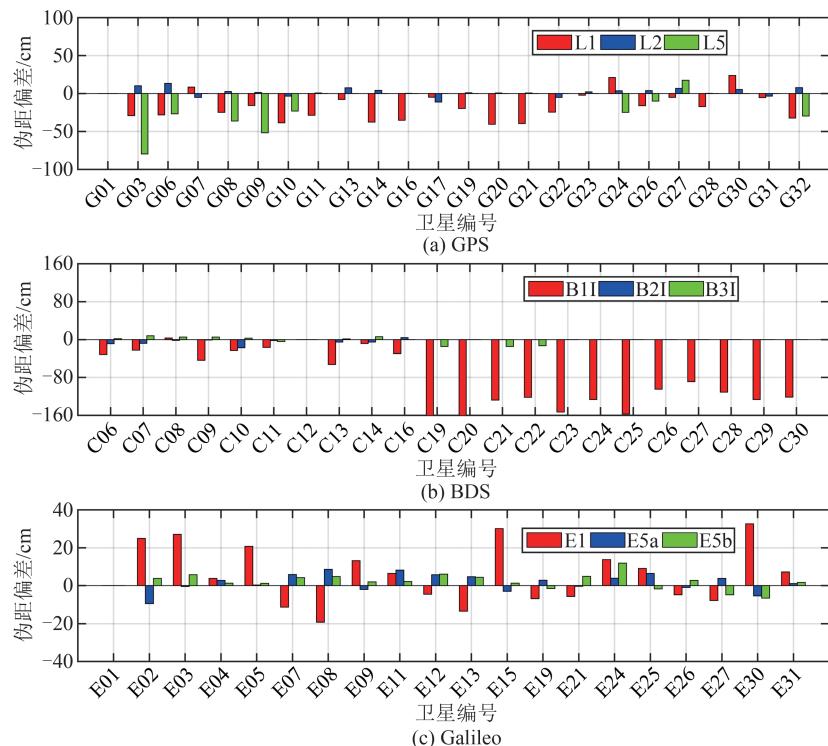


图3 基线STR1_STR2的GPS、BDS、Galileo接收机伪距偏差
Fig. 3 Receiver-Related Pseudorange Biases of Baseline STR1_STR2 for GPS, BDS, and Galileo

图9给出了基线MAT1_MATE、WTZ3_WTZ2、YAR2_YAR3在各频点的最大伪距偏差。可以看出,3条基线各频点的最大伪距偏差

值均不超过90 cm,其量级低于图6中不同厂商接收机的伪距偏差但高于图2中相同厂商相同型号接收机的伪距偏差。对于基线MAT1_MATE、

YAR2_YAR3, B1I 频点伪距偏差最大, L5 频点次之。需要说明的是, 基线 MAT1_MATE 无法接收到 B3I 频点信号; 基线 WTZ3_WTZ2 的测站 WTZ3 无法接收到 BDS 信号和 Galileo E5b 频点信号; 基线 YAR2_YAR3 的测站 YAR2 无法接收到 Galileo E01 卫星信号, 因此造成了相应的结果缺失。

4 接收机伪距偏差对定位影响

由 §3.2 可知接收机伪距偏差在不同厂商的接收机间可达 1.6 m, 对基于伪距观测值的精密定位的影响无法忽略。因此, 本节研究接收机伪距偏差对双差模糊度固定以及伪距相对定位的

影响。

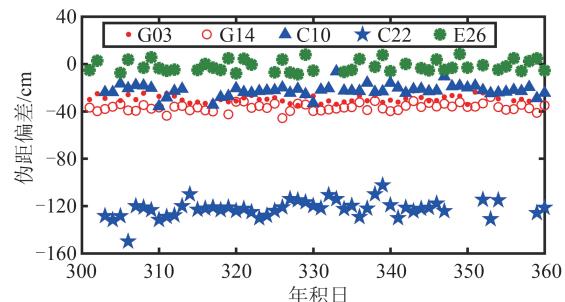


图 4 GPS、BDS、Galileo 典型卫星的接收机伪距偏差时间序列

Fig. 4 Time Series of Receiver-Related Pseudorange Biases for Typical Satellites of GPS, BDS and Galileo

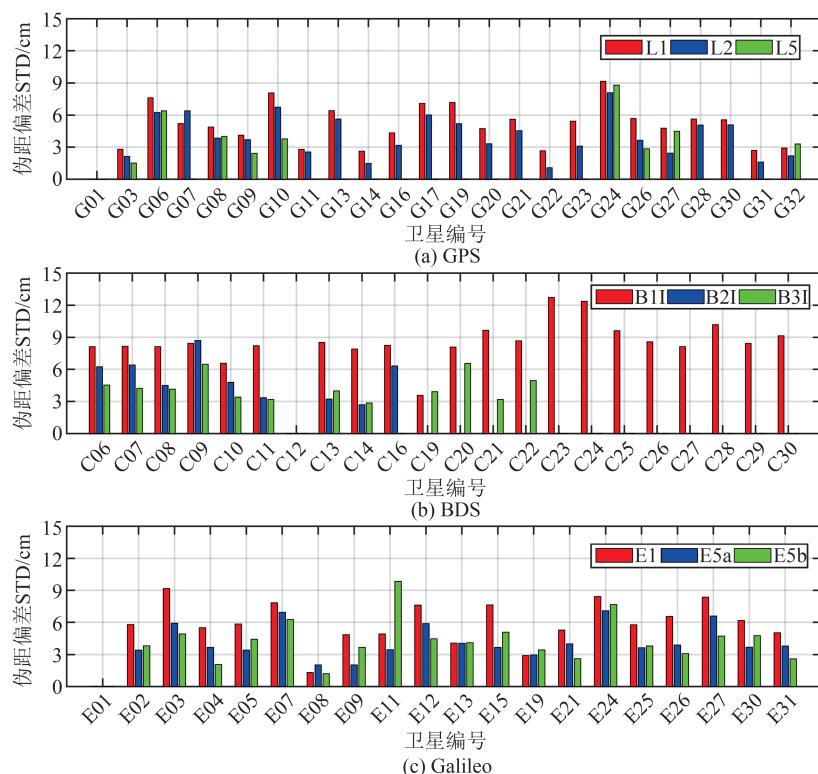


图 5 基线 STR1_STR2 的 GPS、BDS、Galileo 接收机伪距偏差 STD

Fig. 5 STD of Receiver-Related Pseudorange Biases of Baseline STR1_STR2 for GPS, BDS and Galileo

4.1 伪距偏差对宽巷模糊度固定的影响

基于双频伪距和载波相位观测值的 MW (Melbourne-Wübbena) 组合通常应用于宽巷模糊度解算, 计算公式为^[11]:

$$M_r^s = \left(\frac{L_1}{\lambda_1} - \frac{L_2}{\lambda_2} \right) - \left(\frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{(f_1 + f_2) \lambda_w} \right) = (N_{r,M}^s + \phi_{r,M} - \phi_M^s) + B_{r,M}^s \quad (6)$$

式中, M_r^s 为 MW 组合观测值, L_1, L_2 分别为频点 1、2 的载波相位观测值; λ_1, λ_2 分别为频点 1、2 的

波长; f_1, f_2 分别为频点 1、2 的信号频率; P_1, P_2 分别为频点 1、2 的伪距观测值; λ_w 为宽巷波长; $N_{r,M}^s$ 为具有整周特性的宽巷模糊度; $\phi_{r,M}$ 和 ϕ_M^s 分别为与接收机和卫星相关的相位硬件延迟; $B_{r,M}^s$ 为接收机伪距偏差对 MW 组合的影响。

根据式(6), 构造双差形式的 MW 组合, 计算公式为:

$$\Delta \nabla M_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} = \left(\frac{\Delta \nabla L_{r_1 r_2, 1}^{s_1 s_2}}{\lambda_1} - \frac{\Delta \nabla L_{r_1 r_2, 2}^{s_1 s_2}}{\lambda_2} \right)$$

$$\frac{f_1 \Delta \nabla P_{r_1 r_2 1}^{s_1 s_2} + f_2 \Delta \nabla P_{r_1 r_2 2}^{s_1 s_2}}{(f_1 + f_2) \lambda_w} + \frac{f_1 \Delta \nabla b_{r_1 r_2 1}^{s_1 s_2} + f_2 \Delta \nabla b_{r_1 r_2 2}^{s_1 s_2}}{(f_1 + f_2) \lambda_w} = \Delta \nabla N_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} + \Delta \nabla B_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} \quad (7)$$

$$\Delta \nabla B_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} = \frac{f_1 \Delta \nabla b_{r_1 r_2 1}^{s_1 s_2} + f_2 \Delta \nabla b_{r_1 r_2 2}^{s_1 s_2}}{(f_1 + f_2) \lambda_w} \quad (8)$$

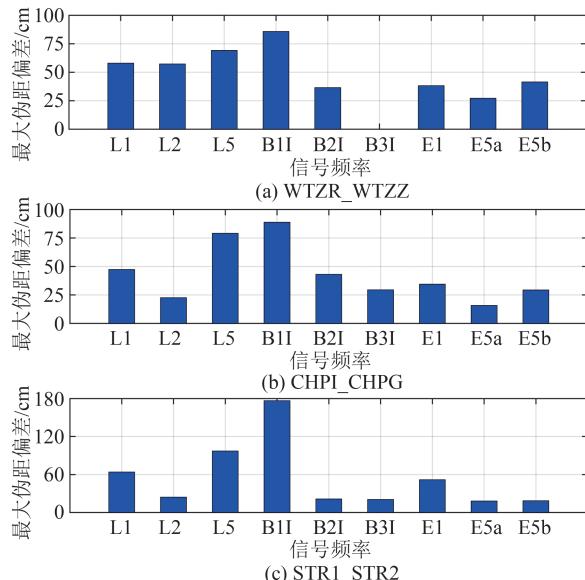


图 6 基线 WTZR_WTZZ、CHPI_CHPG、STR1_STR2 最大接收机伪距偏差

Fig. 6 Receiver-Related Pseudorange Max Biases of Baselines WTZR_WTZZ, CHPI_CHPG and STR1_STR2

式中, $\Delta \nabla M_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 为双差 MW 组合观测值; $\Delta \nabla L_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 、 $\Delta \nabla L_{r_1 r_2 2}^{s_1 s_2}$ 分别为频点 1、2 的双差载波相位观测值; $\Delta \nabla P_{r_1 r_2 1}^{s_1 s_2}$ 、 $\Delta \nabla P_{r_1 r_2 2}^{s_1 s_2}$ 分别为频点 1、2 的双差伪距观测值; $\Delta \nabla b_{r_1 r_2 1}^{s_1 s_2}$ 、 $\Delta \nabla b_{r_1 r_2 2}^{s_1 s_2}$ 分别为频点 1、2 的双差接收机伪距偏差; $\Delta \nabla N_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 为具有整周特性的双差宽巷模糊度; $\Delta \nabla B_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 为双差接收机伪距偏差对双差 MW 组合的影响。由式(7)、式(8)可知,与接收机和卫星相关的非整周相位硬件延迟可通过双差消除,而接收机伪距偏差对 MW 组合的影响无法通过双差消除,需要进行接收机伪距偏差改正以削弱其影响。

选取 GPS L1、L2 频点, Galileo E1、E5a 频点以及 BDS B1I、B3I 频点构造 MW 组合,并研究接收机伪距偏差对宽巷模糊度解算的影响。以基线 USN7_USN8、WTZR_WTZZ、WTZ3_WTZZ 为例,统计伪距偏差改正前/后 GPS 双差宽巷模

糊度非整周部分在各区间的百分比,如图 10 所示。可以看出,基线 USN7_USN8 的非整周部分均方根(root mean square, RMS)明显小于基线 WTZR_WTZZ、WTZ3_WTZZ 的,这是由于基线 USN7_USN8 的接收机为相同厂商相同型号,接收机伪距偏差量级及其对双差宽巷模糊度解算的影响较小。此外,对于部分误差(如多路径误差、几何距离误差等),短基线的消除或削弱程度不如零基线。伪距偏差改正后,3 条基线宽巷模糊度非整周部分的正态分布特性更加显著,RMS 值分别从 0.039、0.200、0.159 周降低到 0.028、0.146、0.100 周,分别降低了 22%、27%、37%。

基于相同方法统计了伪距偏差改正前后 GPS、BDS、Galileo 双差 MW 组合的宽巷模糊度非整周部分 RMS,结果见表 2。由表 2 可知,伪距偏差改正后, GPS、BDS、Galileo 非整周部分 RMS 分别从 0.092、0.170、0.065 周减小到 0.076、0.123、0.056 周,分别降低了 17%、22%、14%。

4.2 伪距偏差对伪距相对定位的影响

选取 2019 年年积日第 300、330、359 天的数据,以基线 STR1_STR2 为例,图 11 给出了接收机伪距偏差改正前后的 GPS、BDS、Galileo 的 L1、B1I、E5a 频点伪距相对定位误差时间序列图。由图 11 可知,伪距偏差改正后 3 系统的相对定位精度在东(east, E)、北(north, N)、天(up, U)方向均有所提高, GPS 和 Galileo 的三维定位误差 RMS 分别从 142.0、97.5 cm 下降到 137.1、93.2 cm。由于 BDS 在基线 STR1_STR2 的接收机伪距偏差比 GPS 和 Galileo 的量级大,因此定位精度的提高幅度更大,E、N、U 方向的定位误差 RMS 分别从 0.826、0.836、1.472 m 下降到 0.607、0.647、1.272 m,定位精度分别提高 27%、38%、13%。

接收机伪距偏差改正前后的表 1 中每组 2 条基线伪距相对定位三维误差统计结果见表 3。可以看出,偏差改正后,相对定位精度整体上均有所提高,其中基线 USN7_USN8 的三维定位误差在改正前后变化不大,其原因是 USN7_USN8 的各系统伪距偏差量级较小。总体上,接收机伪距偏差改正后,相同厂商相同型号接收机、不同厂商接收机、相同厂商不同型号接收机的平均三维定位误差分别从 56.6、84.7、89.8 cm 降低到 54.4、76.8、84.9 cm; GPS、BDS、Galileo 的平均三维定位误差分别从 84.4、77.3、60.0 cm 下降到了 80.1、72.1、57.0 cm。

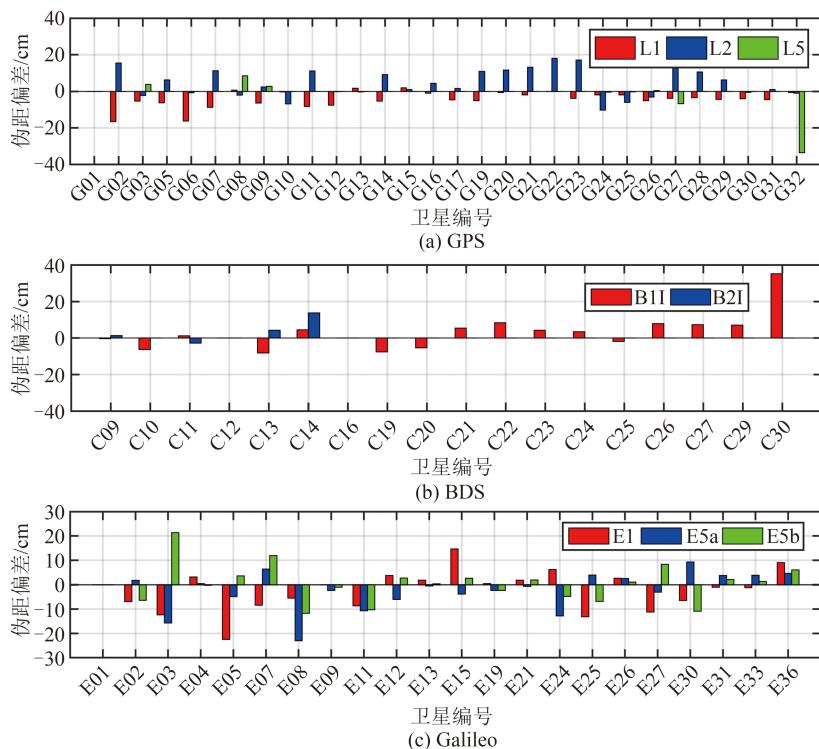


图 7 基线 MAT1_MATG 的 GPS、BDS、Galileo 接收机伪距偏差
Fig. 7 Receiver-Related Pseudorange Biases of Baseline MAT1_MATG for
GPS, BDS and Galileo

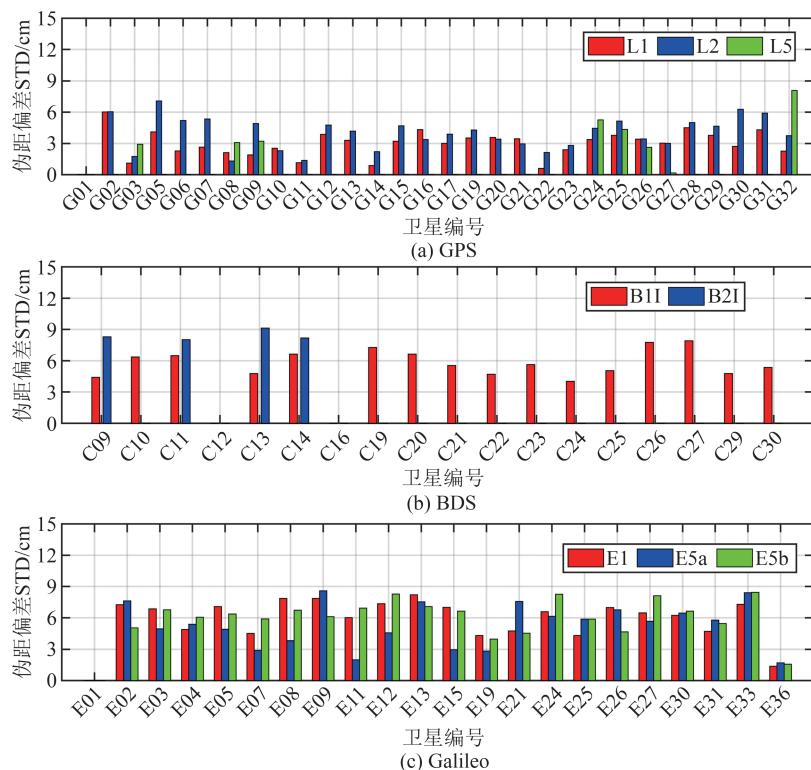


图 8 基线 MAT1_MATG 的 GPS、BDS、Galileo 接收机伪距偏差 STD
Fig. 8 STD of Receiver-Related Pseudorange Biases of Baseline MAT1_MATG for
GPS, BDS and Galileo

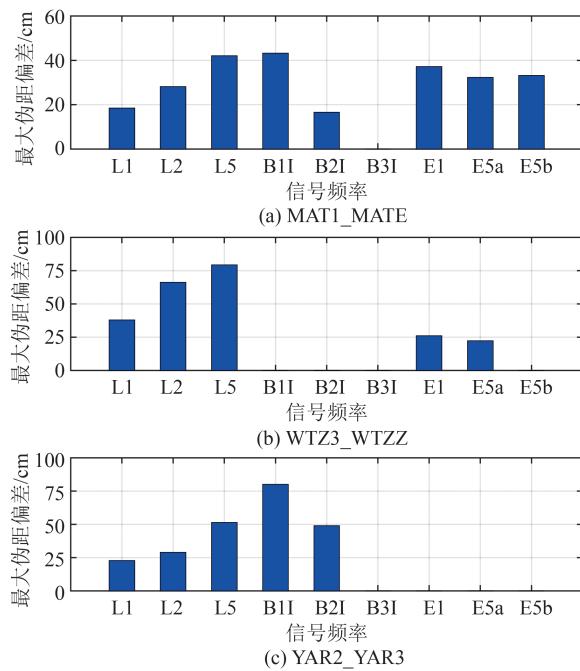


图 9 MAT1_MATE、WTZ3_WTZZ、YAR2_YAR3
最大接收机伪距偏差

Fig. 9 Receiver-Related Pseudorange Max Biases of
MAT1_MATE, WTZ3_WTZZ and YAR2_YAR3

5 结语

本文基于并置接收机双差法确定了 GPS、

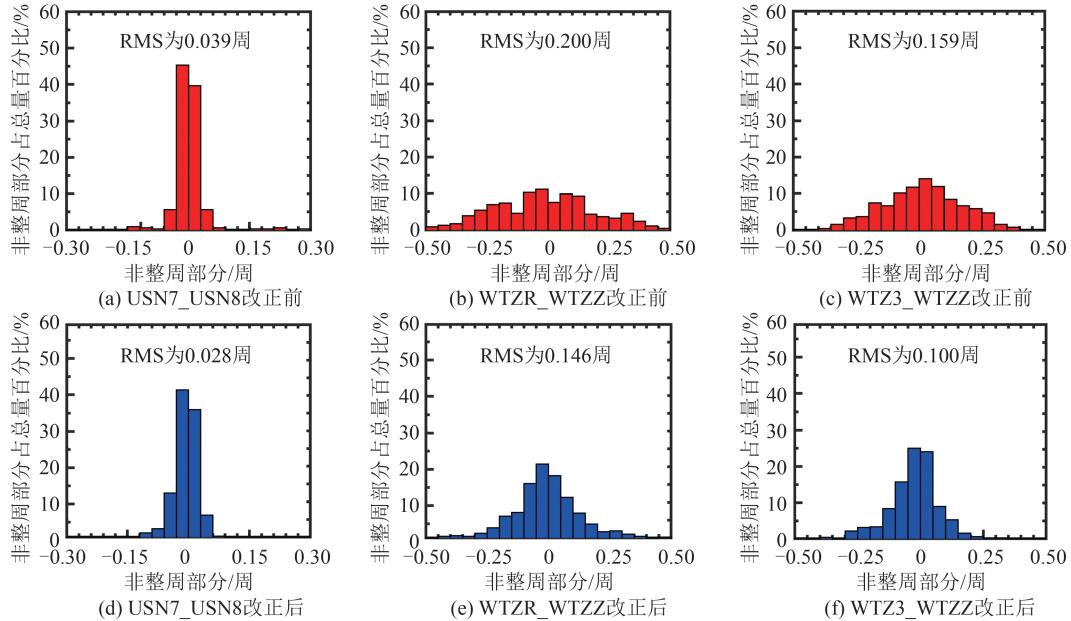


图 10 接收机伪距偏差改正前后基线 WTZR_WTZZ、WTZ3_WTZZ、USN7_USN8 的
GPS 双差 MW 组合宽巷模糊度非整周部分的分布直方图

Fig. 10 Distribution of Ambiguity Fractional Parts of GPS Double Difference MW Combination over Three Baselines
WTZR_WTZZ, WTZ3_WTZZ, and USN7_USN8, Without and with Receiver-Related Pseudorange Biases Correction

本文采用的伪距偏差确定方法是基于并置接收机的双差法,结果表明伪距偏差对模糊度解算和相对定位精度有重要影响。由于双差法要求测

BDS、Galileo 的接收机伪距偏差,并按照接收机厂商和型号分为 3 组基线:相同厂商相同型号接收机、不同厂商接收机、相同厂商不同型号接收机,分别对其伪距偏差特性进行了分析。结果显示,相同厂商相同型号接收机伪距偏差最小,所有系统各频点伪距偏差均不超过 10 cm;相同厂商不同型号接收机其次,偏差值最大约 45 cm;不同厂商接收机伪距偏差最大,BDS B1I 频点可达 160 cm,表明接收机伪距偏差与其硬件配置(如相关器间隔、前端带宽设计等)有关。3 个系统中,Galileo 接收机伪距偏差明显小于 GPS 和 BDS,各系统的伪距偏差具有良好的稳定性,60 d 内的 STD 不超过 12 cm。

本文还研究了接收机伪距偏差对双差宽巷模糊度解算和伪距相对定位的影响。伪距偏差改正后, GPS、BDS、Galileo 双差 MW 组合宽巷模糊度非整周部分 RMS 分别从 0.092、0.170、0.065 周降低到 0.076、0.123、0.056 周,分别降低 17%、22%、14%;对伪距相对定位的影响与伪距偏差的量级相关,偏差改正后 GPS、BDS、Galileo 的平均三维定位误差分别从 84.4、77.3、60.0 cm 下降到了 80.1、72.1、57.0 cm。

站分布为零基线或者短基线,因此在后续工作中将使用非差估计方法标定接收机伪距偏差,根据接收机类型发布接收机伪距偏差改正产品,这对

多模 GNSS 精密数据处理有重要意义。此外,下一步将以 BDS-3 新体制信号的接收机伪距偏差以及 BDS-2 和 BDS-3 之间的系统性偏差为重点开展研究工作。

表 2 接收机伪距偏差改正前后双差 MW 组合的宽巷模糊度非整周部分 RMS/周

Tab. 2 RMS of Ambiguity Fractional Cycle Parts of All Double Difference MW Combination with and Without Receiver-Related Pseudorange Biases Correction/Cycle

系统	第 1 组				第 2 组				第 3 组			
	ZIM2_ZIM3		USN7_USN8		WTZR_WTZZ		CHPI_CHPG		WTZ3_WTZZ		YAR2_YAR3	
	改正前	改正后										
BDS					0.250	0.220					0.140	0.080
GPS	0.029	0.014	0.039	0.028	0.200	0.146	0.140	0.130	0.159	0.100	0.080	0.078
Galileo	0.023	0.009	0.044	0.026	0.120	0.090	0.088	0.083	0.111	0.096		

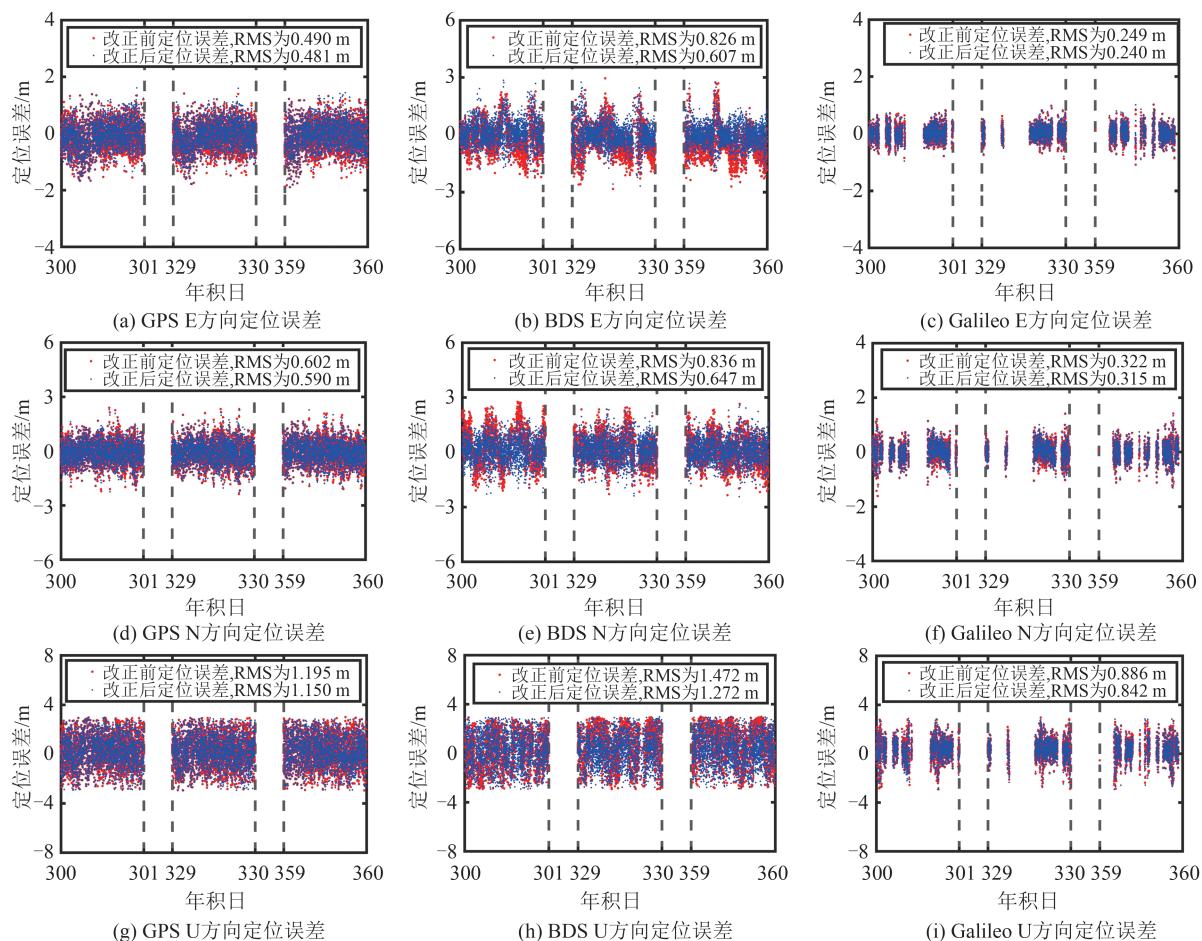


图 11 接收机伪距偏差改正前后基线 STR1_STR2 的 GPS、BDS、Galileo 相对定位误差时间序列

Fig. 11 Pseudorange Relative Positioning Time Series of Baseline STR1_STR2 for GPS, BDS and Galileo with and Without Receiver-Related Pseudorange Biases Correction

表 3 接收机伪距偏差改正前后的伪距相对定位的三维误差/cm

Tab. 3 Pseudorange Relative Positioning 3D Errors with and Without Receiver-Related Pseudorange Biases Correction/cm

系统	第 1 组				第 2 组				第 3 组			
	ZIM2_ZIM3		USN7_USN8		WTZR_WTZZ		CHPI_CHPG		WTZ3_WTZZ		YAR2_YAR3	
	改正前	改正后	改正前	改正后								
BDS	53.1	50.8	73.1	73.1	92.1	80.0					90.9	84.4
GPS	43.3	41.6	76.9	75.2	78.4	70.1	94.7	91.4	150.0	145.2	60.3	56.6
Galileo	25.1	23.4	65.3	62.5	70.2	62.1	88.2	80.6	57.8	53.5		

参考文献

- [1] Montenbruck O. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS): Achievements, Prospects and Challenges [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7): 1671-1697.
- [2] 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.)
- [3] Geng J, Teferle F N, Meng X, et al. Towards PPP-RTK: Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(10): 1664-1673.
- [4] Lou Yidong, Gong Xiaopeng, Gu Shengfeng, et al. The Characteristic and Effect of Code Bias Variations of BeiDou [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1040-1046. (楼益栋, 龚晓鹏, 龚声峰, 等. 北斗卫星伪距码偏差特性及其影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(8): 1040-1046.)
- [5] Coco D S, Coker C, Dahlke S R, et al. Variability of GPS Satellite Differential Group Delay Biases [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(6): 931-938.
- [6] Sardón E, Zarraoa N. Estimation of Total Electron Content Using GPS Data: How Stable Are the Differential Satellite and Receiver Instrumental Biases? [J]. *Radio Science*, 1997, 32(5): 1899-1910.
- [7] Hauschild A, Steigenberger P, Montenbruck O. Inter-receiver GNSS Pseudorange Biases and Their Effect on Clock and DCB Estimation [C]//The 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, Florida, USA, 2019.
- [8] Gruber B. Global Positioning Systems Directorate [M]. New York, USA: Nova Science Publishers, 2012.
- [9] Union E. European GNSS (Galileo) Open Service: Signal in Space Interface Control Document [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- [10] Hauschild A, Montenbruck O. The Effect of Correlator and Front-End Design on GNSS Pseudorange Biases for Geodetic Receivers [J]. *Navigation*, 2016, 63(4): 443-453.
- [11] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 639-648.
- [12] Li Xin, Zhang Xiaohong, Zeng Qi, et al. The Estimation of BeiDou Satellite-Induced Code Bias and Its Impact on the Precise Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1461-1467. (李昕, 张小红, 曾琪, 等. 北斗卫星伪距偏差模型估计及其对精密定位的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(10): 1461-1467.)
- [13] Geng T, Xie X, Zhao Q L, et al. Improving BDS Integer Ambiguity Resolution Using Satellite-Induced Code Bias Correction for Precise Orbit Determination [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1191-1201.
- [14] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [D]. Switzerland: Astronomisches Institute of University Bern, 1999.
- [15] Tang Weiming, Liu Qian, Gao Kefu, et al. Influence of BDS Pseudorange Code Biases on Baseline Resolution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1199-1206. (唐卫明, 刘前, 高柯夫, 等. 北斗伪距码偏差对基线解算的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(8): 1199-1206.)
- [16] Chang Zhiqiao, Liu Li, Hu Xiaogong, et al. Pseudorange-Bias Characteristics and the Weakening Method of BDS Satellites [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2021, 51(1): 85-95. (常志巧, 刘利, 胡小工, 等. 北斗导航卫星伪距偏差特性及减弱方法[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(1): 85-95.)
- [17] Yuan Haijun, Zhang Zhetao, He Xiufeng, et al. Stability Analysis of BDS-3 Satellite Differential Code Bias and Its Impacts on Single Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 425-432. (袁海军, 章浙涛, 何秀凤, 等. 北斗三号卫星差分码偏差稳定性分析及其对单点定位的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 425-432.)
- [18] Edgar C, Czopek F, Barker B. A Co-operative Anomaly Resolution on PRN-19 [C]//The 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, Texas, USA, 2001.
- [19] Mitelman A M, Phelts R E, Akos D M, et al. Signal Deformations on Nominally Healthy GPS Satel-

- lites[C]//The National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, USA, 2004.
- [20] Pini M, Akos D M. Analysis of GNSS Signals as Observed via a High Gain Parabolic Antenna[C]// International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Long Beach, CA, USA, 2005.
- [21] Phelts R E, Akos D M. Effects of Signal Deformations on Modernized GNSS Signals[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2006, 5(1/2): 2-10.
- [22] Gong Xiaopeng. Improving GPS and Galileo Precise Data Processing Based on Calibration of Signal Distortion Biases [J]. *Measurement*, 2021, 174: 108981.
- [23] Lestarquit L, Gregoire Y, Thevenon P. Characterising the GNSS Correlation Function Using a High Gain Antenna and Long Coherent Integration: Application to Signal Quality Monitoring[C]// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Myrtle Beach, USA, 2012.
- [24] Hauschild A, Montenbruck O. A Study on the Dependency of GNSS Pseudorange Biases on Correlator Spacing [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20 (2) : 159-171.
- [25] Vergara M, Sgammini M, Thoelert S, et al. Tracking Error Modeling in Presence of Satellite Imperfections [J]. *Navigation*, 2016, 63(1): 3-13.
- [26] Gong X P, Lou Y D, Zheng F, et al. Evaluation and Calibration of BeiDou Receiver-Related Pseudo-Range Biases [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22 (4): 98.
- [27] Zhao Wen. Research on Key Technology of Combined BeiDou-2 and BeiDou-3 Precise Point Positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020. (赵文. 北斗 2/3 联合精密单点定位关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.)
- [28] Jiao G Q, Song S L, Jiao W H. Improving BDS-2 and BDS-3 Joint Precise Point Positioning with Time Delay Bias Estimation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(2): 025001.