



引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20200517

Citation: 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. DOI: 10.13203/j.whugis20200517

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

袁海军¹ 章浙涛¹ 何秀凤¹ 徐天扬¹ 徐学永²

¹ 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京, 211100

² 北方信息控制研究院集团有限公司, 江苏 南京, 211153

摘要: 差分码偏差(differential code bias, DCB)是影响电离层监测和导航定位精度的重要因素之一,建立DCB改正模型对高精度定位有重要意义。针对北斗三号卫星的广播星历和精密星历钟差参数时间基准不统一的问题,首先介绍了多星座实验(multi-GNSS experiment, MGEX)发布的DCB产品的估计方法,给出了部分DCB产品的精度评估和分析结果;然后提出了北斗三号卫星单频和双频伪距单点定位以及双频精密单点定位的DCB改正模型;最后利用5个MGEX测站连续5 d的实测数据分别进行了DCB改正前后的定位实验。结果表明,MGEX发布的DCB产品均具有较高的稳定性,经卫星DCB改正后,单频和双频伪距单点定位的定位精度分别提高了48%~85%和71%~91%,双频静态精密单点定位的收敛时间减少了56%~83%。

关键词: 北斗三号卫星;差分码偏差;标准单点定位;精密单点定位;稳定性分析

中图分类号: P228

文献标识码: A

收稿日期: 2020-10-02

DOI: 10.13203/j.whugis20200517

文章编号: 1671-8860(2023)03-0425-08

Stability Analysis of BDS-3 Satellite Differential Code Bias and Its Impacts on Single Point Positioning

YUAN Haijun¹ ZHANG Zhetao¹ HE Xiufeng¹ XU Tianyang¹ XU Xueyong²

¹ School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

² Northern Information Control Research Institute Group Co. Ltd, Nanjing 211153, China

Abstract: Objectives: Differential code bias (DCB) is one of the important factors affecting the accuracy of ionospheric monitoring and high-precision positioning. The establishment of DCB correction model is of great significance for high-precision positioning. **Methods:** Aiming at the problem that the BDS-3 satellite clock time references of broadcast ephemeris and precise ephemeris are not uniform, firstly, we introduce the DCB estimation methods of Chinese Academy of Sciences (CAS) and German Aerospace Center (DLR), and give the accuracy evaluation and analysis results of some DCB products. Secondly, the DCB correction models of BDS-3 single-frequency and dual-frequency standard point positioning (SPP), dual-frequency precise point positioning (PPP) are proposed. Finally, both SPP and PPP experiments are carried out with different schemes by using five-day measured data of the multi-GNSS experiments (MGEX) stations. **Results:** The results show that the MGEX DCB products have high stability. And the accuracies of single-frequency and dual-frequency SPP are increased by 48%—85% and 71%—91% after using DCB correction, respectively. The convergence time of dual-frequency static PPP is reduced by 56%—83% after using DCB correction. **Conclusions:** It can be concluded that the satellite DCB correction can improve

基金项目:国家自然科学基金(41830110,42004014);江苏省自然科学基金青年基金(BK20200530)。

第一作者:袁海军,博士生,主要从事GNSS精密定位研究。navyyuan@yeah.net

通讯作者:何秀凤,博士,教授。xfhe@hhu.edu.cn

the SPP positioning accuracy and reduce the PPP convergence time.

Key words: BDS-3 satellite; differential code bias; standard point positioning; precise point positioning; stability analysis

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)可提供高质量的定位、导航和授时服务,已成为重要的空间信息基础设施^[1]。2020-06-23,第55颗北斗卫星发射成功,标志着北斗三号系统(BDS-3)的建设完成。BDS-3完成了导航信号的升级及关键技术的改进,能为用户提供更高质量的服务,将成为导航定位的核心基础设施。BDS-3卫星产生码信号时,卫星硬件端不同类型信号间的内部时延差称为卫星差分码偏差(differential code bias, DCB)^[2]。DCB不仅影响电离层总电子含量(total electron content, TEC)的精确监测与建模,还是卫星导航定位与授时中的重要系统误差^[3]。由于BDS-3广播星历和大多数精密星历的钟差参数基准分别定义在B3I观测量和B1I/B3I无电离层组合观测量上,因此使用不同于钟差参数基准的观测量时,需引入DCB进行卫星硬件时延偏差改正^[4]。BDS除播发已有的卫星群延时间(time group delay, TGD) TGD₁和TGD₂外,本质上是B1I-B3I和B2I-B3I频点间的DCB^[5],民用导航星历中也新增了针对B1c和B2a频点的TGD。为了方便统一比较,本文仅考虑使用多星座实验(multi-GNSS experiment, MGEX)发布的精度更高的DCB产品。

目前已有不少学者对BDS卫星DCB进行了相关研究,文献[6]基于全球电离层地图(global ionospheric map, GIM)产品,对两种不同基准约束条件下的BDS DCB进行了解算及精度评估;文献[7]提出了一种附加闭合差约束的BDS DCB估计模型,结果表明附加闭合差约束的DCB闭合差优于独立解算;文献[8]基于MGEX和国际全球导航卫星系统监测网解算了BDS-3 DCB,并进一步分析了北斗二号系统(BDS-2)和BDS-3系统间的DCB差异,但其未对BDS卫星DCB改正模型进行研究;文献[9-10]对MGEX发布的DCB产品稳定性进行了比较分析,结果表明DCB产品具有较高的稳定性;文献[11-12]讨论了卫星DCB的改正模型,并分析了其对单点定位的影响,但以上研究仅对BDS-2卫星DCB产品或改正模型进行了讨论分析。和BDS-2相比,BDS-3新增了B1c和B2a等频点,因此对BDS-3卫星DCB产品质量、DCB改正模型及相关误差

处理进行研究,可进一步提升BDS的服务性能,具有重要的研究意义。

在已有研究的基础上,本文首先介绍了MGEX发布的DCB产品的估计方法,并评估了部分DCB产品的稳定性;然后提出了基于BDS-3的单频和双频标准单点定位(standard point positioning, SPP)和双频精密单点定位(precise point positioning, PPP)的卫星DCB改正模型;最后利用MGEX测站多天的实测数据定量分析了卫星DCB改正对SPP和静态PPP的影响,以期得到有益的结论。

1 DCB估计方法

目前, MGEX对外正式公布BDS-3 DCB产品的机构主要有中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)和德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR),以上两类DCB产品是分别采用不同的处理策略解算得到的^[13]。CAS DCB产品是基于逐测站局部电离层TEC建模并进行同步解算获得^[14-15],约束条件为挑选码偏差相对更稳定的部分卫星,并将其和约束为零。该方法对基准站数量及分布依赖性较弱,但需建立高精度的电离层模型。DLR DCB产品是采用GIM产品扣除卫星信号传播路径上的TEC并进行解算获得^[16],约束条件为将所有可视卫星的码偏差之和约束为零。该方法的解算精度主要取决于所采用的电离层产品精度。

卫星DCB的稳定性是指DCB在一定时间段内的天变化差异,一定程度上可反映DCB的解算精度。卫星DCB稳定性的评估通常以月为单位计算DCB的标准差,该值越小,表示卫星DCB越稳定^[17],计算公式为:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (B_i - B_{ave})^2}{N-1}} \quad (1)$$

式中, $\hat{\sigma}$ 表示卫星DCB的月稳定性; N 表示当月天数; B_i 表示卫星第*i*天的DCB日解值; B_{ave} 表示卫星当月DCB均值。

2 DCB改正模型

BDS-3卫星的B1c、B1I、B3I和B2a信号的波

长分别为 0.190 3、0.192 0、0.236 3、0.254 8 m, 它们的频率分别为 1 575.420、1 561.098、1 268.520、1 176.450 MHz, 其原始伪距观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_{B1I} = \rho + d + I_1 + t_r - t^s + D_{B1I} \\ P_{B1c} = \rho + d + \alpha I_1 + t_r - t^s + D_{B1c} \\ P_{B2a} = \rho + d + \beta I_1 + t_r - t^s + D_{B2a} \\ P_{B3I} = \rho + d + \gamma I_1 + t_r - t^s + D_{B3I} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P 是原始伪距观测值; ρ 是卫星和接收机间的几何距离; d 是对流层延迟和观测误差; I_1 是 B1I 频点的一阶电离层延迟; t_r 、 t^s 分别是接收机钟差和卫星钟差; $\alpha = f_{B1I}^2 / f_{B1c}^2$, $\beta = f_{B1I}^2 / f_{B2a}^2$, $\gamma = f_{B1I}^2 / f_{B3I}^2$, f 表示相应频点的信号频率; D_{B1I} 、 D_{B1c} 、 D_{B2a} 、 D_{B3I} 分别是相应频点在卫星端的硬件延迟。接收机端硬件延迟在单点定位中可被接收机钟差参数吸收^[18], 故未将其单独列出。

2.1 广播卫星钟差改正模型

BDS-3 广播星历卫星钟差 t_{brd}^s 是以 B3I 频点为参考基准, 其形式为:

$$t_{brd}^s = t^s - D_{B3I} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得 BDS-3 单频 SPP 的卫星 DCB 改正模型为:

$$\begin{cases} P_{B1I} = \rho + d + I_1 + t_r - t_{brd}^s - D_{B1IB3I} \\ P_{B1c} = \rho + d + \alpha I_1 + t_r - t_{brd}^s - D_{B1cB3I} \\ P_{B2a} = \rho + d + \beta I_1 + t_r - t_{brd}^s - D_{B2aB3I} \\ P_{B3I} = \rho + d + \gamma I_1 + t_r - t_{brd}^s \end{cases} \quad (4)$$

式中, $D_{B1IB3I} = D_{B3I} - D_{B1I}$; $D_{B1cB3I} = D_{B3I} - D_{B1c}$; $D_{B2aB3I} = D_{B3I} - D_{B2a}$, 以后将不加说明地给出两频点间的 DCB 参数, 定义与此类似。其中, 当利用 B3I 频点进行单频 SPP 时, 不需考虑卫星 DCB 改正, 因此本文单频 SPP 实验仅包括其他 3 种频率。

表 1 是 BDS-3 双频无电离层组合的组合系数和噪声系数, 可以发现, B1I/B1c 和 B2a/B3I 组合的噪声系数相对较大。因此, 本文双频 SPP 实验仅对其他 4 种组合进行比较分析。

$$\begin{cases} P_{B1I} = \rho + d + I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{1}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \\ P_{B1c} = \rho + d + \alpha I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB1c} - \frac{1}{\gamma - 1} D_{B3IB1c} \\ P_{B2a} = \rho + d + \beta I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB2a} - \frac{1}{\gamma - 1} D_{B3IB2a} \\ P_{B3I} = \rho + d + \gamma I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \end{cases} \quad (7)$$

由于利用 B1I/B3I 无电离层组合时不需考虑 DCB 改正, 而 B1I/B1c 和 B2a/B3I 组合的噪声系

表 1 无电离层组合的组合系数和噪声系数

Tab.1 Combination Coefficient and Noise Coefficient of Ionospheric-Free Combination

组合频点	系数 a	系数 b	噪声系数
B1I/B1c	-54.25	55.25	77.43
B1I/B2a	2.31	-1.31	2.66
B1I/B3I	2.94	-1.94	3.53
B1c/B2a	2.26	-1.26	2.59
B1c/B3I	2.84	-1.84	3.39
B2a/B3I	-6.15	7.15	9.43

由式(4)可得双频无电离层组合 SPP 的卫星 DCB 改正模型为:

$$\begin{cases} P_{B1I/B2a} = \rho + d + t_r - t_{brd}^s - \frac{\beta}{\beta - 1} D_{B1IB3I} + \frac{1}{\beta - 1} D_{B2aB3I} \\ P_{B1I/B3I} = \rho + d + t_r - t_{brd}^s - \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \\ P_{B1c/B2a} = \rho + d + t_r - t_{brd}^s - \frac{\mu}{\mu - 1} D_{B1cB3I} + \frac{1}{\mu - 1} D_{B2aB3I} \\ P_{B1c/B3I} = \rho + d + t_r - t_{brd}^s - \frac{\theta}{\theta - 1} D_{B1cB3I} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\mu = f_{B1c}^2 / f_{B2a}^2$; $\theta = f_{B1c}^2 / f_{B3I}^2$ 。

2.2 精密卫星钟差改正模型

目前, 大多数 BDS-3 精密钟差 t_{pre}^s 产品是以 B1I 和 B3I 频点的无电离层组合为参考基准, 计算公式为:

$$t_{pre}^s = t^s - \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1I} - \frac{1}{\gamma - 1} D_{B3I} \right) \quad (6)$$

当利用不同伪距组合进行 PPP 时, 须考虑卫星 DCB 改正。由式(2)和式(6)可得相应频点的卫星 DCB 改正模型为:

$$\begin{cases} P_{B1I} = \rho + d + I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{1}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \\ P_{B1c} = \rho + d + \alpha I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB1c} - \frac{1}{\gamma - 1} D_{B3IB1c} \\ P_{B2a} = \rho + d + \beta I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB2a} - \frac{1}{\gamma - 1} D_{B3IB2a} \\ P_{B3I} = \rho + d + \gamma I_1 + t_r - t_{pre}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \end{cases} \quad (7)$$

数相对较大, 因此本文仅给出了 B1I/B2a、B1c/B2a 和 B1c/B3I 无电离层组合 PPP 的卫星 DCB

改正模型,其形式为:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{B1I/B2a} &= \rho + d + t_r - t_{pre}^s - \frac{1}{\beta - 1} D_{B1IB2a} + \\ &\quad \frac{1}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \\ P_{B1c/B2a} &= \rho + d + t_r - t_{pre}^s + \frac{\mu}{\mu - 1} D_{B1IB1c} - \\ &\quad \frac{1}{\mu - 1} D_{B1IB2a} + \frac{1}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \\ P_{B1c/B3I} &= \rho + d + t_r - t_{pre}^s + \frac{\theta}{\theta - 1} D_{B3IB1c} + \\ &\quad \frac{\gamma}{\gamma - 1} D_{B1IB3I} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

3 DCB产品稳定性分析

考虑到CAS和DLR实际发布的DCB产品类型不同,本文仅对CAS C2I-C6I、C1X-C6I、C1X-C5X和DLR C2I-C6I、C2I-C1X、C2I-C5X各3种类型DCB进行稳定性分析,其他类型DCB均可由以上DCB线性组合得到^[19]。由于2020年4月前参与BDS-3卫星DCB解算的卫星数目变化较快且未包含大部分BDS-3卫星,并考虑到

DLR DCB产品的更新周期较长(每3个月更新),因此本文仅对2020年年积日第92—182天的CAS和DLR DCB产品进行稳定性比较分析。限于篇幅,仅代表性地给出CAS和DLR C2I-C6I DCB日解值时间序列,如图1所示,其他类型DCB仅给出稳定性统计结果。由图1可知,CAS和DLR C2I-C6I DCB日解值均具有较高稳定性,但不同卫星间的DCB日解值存在差异。其中,CAS C2I-C6I DCB日解值分布于 $-43.95 \sim 24.42$ ns,DLR为 $-34.98 \sim 53.59$ ns,但两类产品中相同两卫星间的DCB日解值差值相近,原因是两类产品解算时采取的参考基准不一致。此外,图1中的CAS C2I-C6I DCB日解值在第156天发生了整体跳变现象,跳变幅度约为 -0.79 ns,原因是C42号卫星未参与当天DCB解算。由于CAS在分离卫星和接收机DCB时,采用零均值基准约束,当参与解算的卫星数发生改变,约束条件随之改变,引起原先所有卫星DCB日解值发生整体常数跳变。图1也给出了CAS和DLR C2I-C6I DCB参与解算的卫星个数变化情况。DLR C2I-C6I DCB日解值也分别在第102天和第175天发生整体较大跳变,跳变原因与CAS类似。

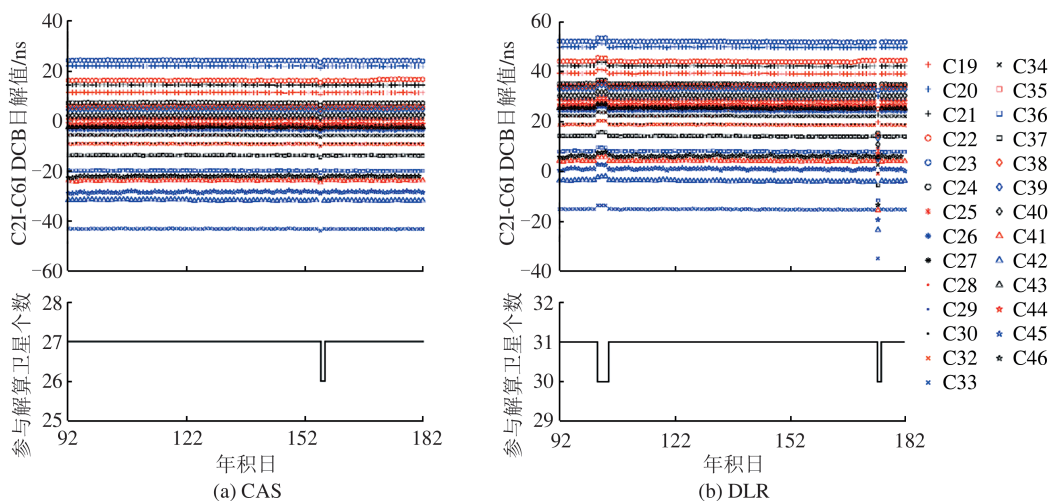


图1 CAS和DLR C2I-C6I DCB日解值及参与解算卫星个数

Fig.1 CAS and DLR C2I-C6I DCB Daily Solutions and the Number of Satellites for Calculating

图2是CAS和DLR各卫星DCB的月稳定性统计结果。由于本文中各类型DCB日解值仅有极少数天发生整体跳变且跳变后又恢复至原先水平,因此本文采取去除跳变天再计算DCB的月稳定性。可以发现,CAS和DLR各类型DCB的月稳定性表现出较好的一致性,两者大部分卫星的DCB月稳定性均优于 0.2 ns。但不同类型和不同卫星间的DCB月稳定性存在些许差异,其中DLR C2I-C1X DCB月稳定性相对较高,所有卫

星的月稳定性均值分别为 0.055 ns、 0.056 ns和 0.061 ns,而DLR C2I-C5X相对较差。此外,部分卫星的DCB月稳定性相对较差(如C28号卫星5月DCB月稳定性),原因可能与当月该卫星的工作健康状态有关。

进一步比较分析不同类型卫星的DCB产品稳定性,其中C19~C37和C41~C46为中圆地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星,C38~C40为倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous or

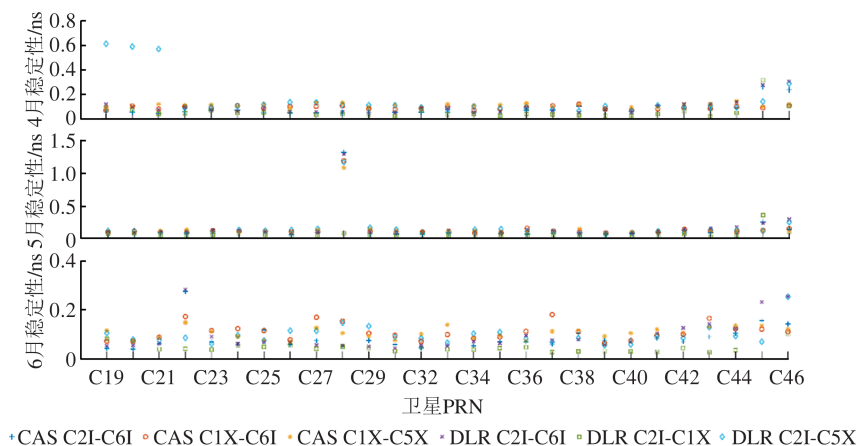


图2 CAS和DLR各卫星的DCB月稳定性

Fig.2 DCB Monthly Stability of CAS and DLR for Each Satellite

bits, IGSO) 卫星, 图3给出了MEO和IGSO卫星各类型DCB的月稳定性均值。可以发现, MEO和IGSO卫星的DCB月稳定性均值均分别小于0.15 ns和0.11 ns, IGSO卫星的月稳定性明显优于MEO卫星。

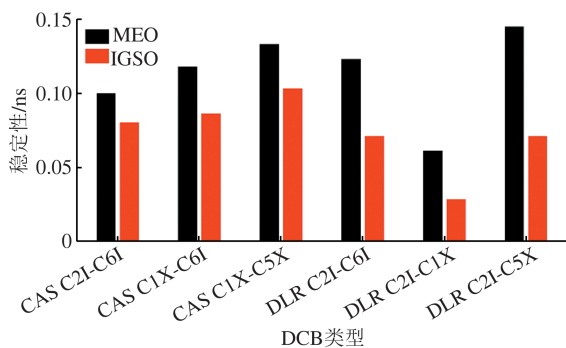


图3 不同类型卫星的DCB稳定性对比

Fig.3 Comparison of DCB Stability for Different Satellite Type

4 DCB改正对单点定位的影响

4.1 SPP实验

本文选取5个MGEX测站(BRST、FFMJ、NYA2、POTS、RGDG)连续5 d(年积日第172—176天)的实测数据进行单频和双频SPP实验, 采样间隔为30 s, 各测站参考坐标采用国际全球导航卫星系统服务组织(international GNSS service, IGS)发布的周解坐标。实验采取两种方案进行对比:(1)方案1, 未改正卫星DCB;(2)方案2, 改正卫星DCB。两种方案的数据处理策略一致, 区别仅在于是否改正卫星DCB。卫星DCB采用CAS发布的DCB产品, 卫星轨道和钟差采用广播星历的轨道和钟差参数, 对流层延迟采用Saastamoinen模型, 单频SPP电离层延迟采用

BDS Klobuchar模型。限于篇幅, 仅代表性地给出了NYA2测站年积日第172天未改正DCB和改正DCB后的定位结果。具体地, 图4和图5是NYA2测站3种频率的单频SPP定位结果, 图6是NYA2测站B1c/B2a双频SPP在东(east, E)、北(north, N)和天(up, U)方向上的定位结果, 表2和表3分别是DCB改正前后的5个测站单频和双频SPP在E、N、U方向上5 d的定位精度均值。需要说明的是, 为充分展示DCB改正前后对SPP各历元定位结果的影响, 图4、图5和图6中并未将定位误差较大的历元视为粗差进行剔除, 但在计算定位精度时, 本文将定位误差大于20 m的历元视为粗差进行剔除^[20]。

由图4和图5可知, 3种频率的单频SPP经卫星DCB改正后的定位误差明显减小, E、N、U方向上分别维持在1 m、3 m和5 m内, 而改正前U方向上的最大误差达35.386 m, 可见卫星DCB改正对单频SPP的影响较大。由表2可知, 卫星DCB改正对3种频率的单频SPP结果的影响为米级。经卫星DCB改正后, 3种频率的单频SPP定位精度在E、N、U方向上分别优于0.6 m、0.9 m和2.5 m, 其中B1I和B1c单频SPP的提高率较接近, 达76%~85%, B2a提高率相对较小, 达48%~77%, 原因可能是B2a与B3I频率相对较近, 导致受DCB改正的影响较小。

由图6可以发现, B1c/B2a双频SPP经卫星DCB改正后的定位精度显著提高。由表3可知, 经卫星DCB改正后, 4种频率组合的双频SPP定位精度有很大改善, 在E、N、U方向上均分别优于1.0 m、1.2 m和2.7 m。此外, 定位精度在E、N、U方向上的提高率达71%~91%, 可见卫星DCB改正对双频SPP定位精度的影响较大。同

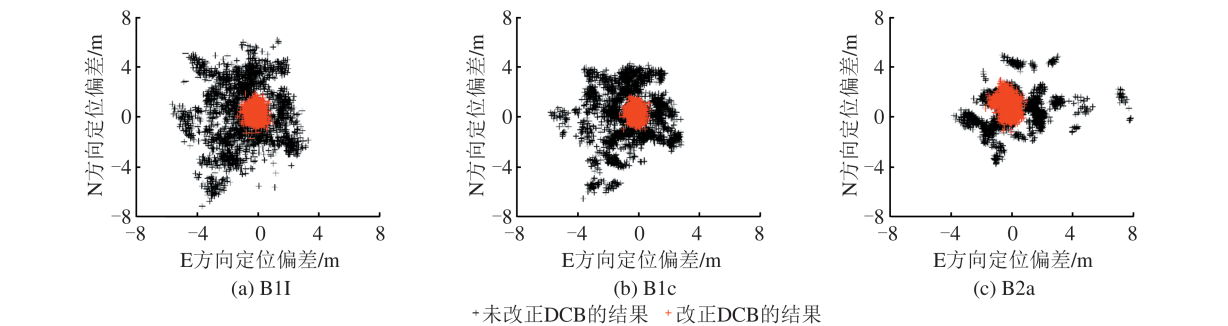


图 4 NYA2测站单频SPP水平方向定位结果

Fig.4 Horizontal Positioning Results of the Single-Frequency SPP for NYA2 Station

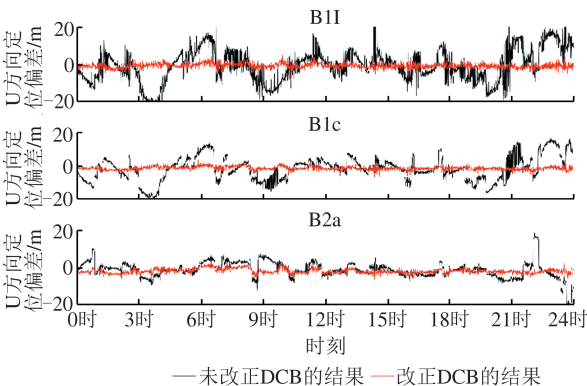


图 5 NYA2测站单频SPP高程方向定位结果

Fig.5 Vertical Positioning Results of Single-Frequency SPP for NYA2 Station

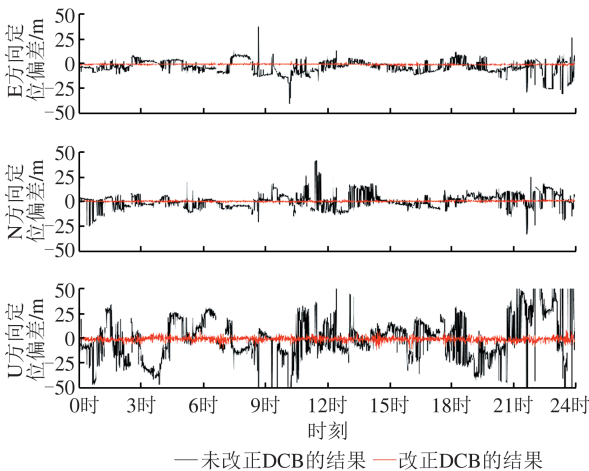


图 6 NYA2测站B1c/B2a组合双频SPP定位结果

Fig.6 Dual-Frequency SPP Positioning Results of B1c/B2a Combination for NYA2 Station

时,卫星DCB改正后的B1c/B2a双频SPP定位精度优于其他频率组合,而B1I/B3I频率组合相对较差,原因可能与不同频率组合的噪声放大系数

有关。

表 2 不同频率的单频SPP定位精度/m

Tab.2 Positioning Accuracy of Single-Frequency SPP for Different Frequency/m

方案	B1I			B1c			B2a		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
未改正DCB	3.028	3.946	8.147	2.746	3.622	7.489	2.161	2.150	4.787
改正DCB	0.500	0.677	1.874	0.414	0.567	1.728	0.510	0.846	2.446
提高率/%	83.5	82.8	77.0	84.9	84.3	76.9	76.4	60.7	48.9

表 3 不同组合的双频SPP定位精度

Tab.3 Positioning Accuracy of Dual-Frequency SPP for Different Combination

组合频率	未改正DCB/m			改正DCB/m			提高率/%		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
B1I/B3I	7.341	7.149	9.324	0.939	1.128	2.679	87.2	84.2	71.3
B1I/B2a	6.748	6.465	9.039	0.747	0.864	2.202	88.9	86.6	75.6
B1c/B3I	7.151	7.055	9.253	0.714	0.881	2.013	90.0	87.5	78.2
B1c/B2a	6.210	6.442	9.443	0.567	0.687	1.716	90.9	89.3	81.8

4.2 静态PPP实验

选取和SPP相同的实验数据和实验方案,静态PPP的处理策略为采用武汉大学发布的30 s

精密钟差和15 min的精密轨道产品,相位中心偏差采用IGS提供的天线文件改正值,电离层延迟采用无电离层组合模型,对流层延迟采用Saas-

tamoinen 模型和随机游走过程进行改正和估计, 固体潮汐、相位缠绕等采用相应模型进行改正。本文定位收敛时间定义为 E、N、U 3 个方向上定位偏差首次小于 0.2 m 并保持至少 20 个历元所需要的时间, 定位精度为当天收敛历元到最后历元的定位精度。

表 4 是卫星 DCB 改正前后的 5 个测站 3 种组合静态 PPP 在 E、N、U 方向上 5 d 的定位精度均

值。可以发现, 两种不同方案的静态 PPP 在 E、N、U 3 个方向上的平均定位精度最大差异仅为 0.004 m。由此可知, 卫星 DCB 改正前后的静态 PPP 在收敛后的定位精度基本相当, 平均定位精度差异仅为 0~4 mm。原因可能是当卫星 DCB 未改正时, 其可被其他参数吸收, 会导致其他参数的收敛时间延长, 而在参数收敛后, 静态 PPP 定位精度基本不受卫星 DCB 改正的影响。

表 4 不同组合的双频静态 PPP 定位精度/m

Tab.4 Positioning Accuracy of Dual-Frequency Static PPP for Different Combinations/m

方案	B1I/B2a			B1c/B3I			B1c/B2a		
	E	N	U	E	N	U	E	N	U
未改正 DCB	0.026	0.010	0.023	0.027	0.012	0.021	0.028	0.011	0.023
改正 DCB	0.023	0.009	0.024	0.025	0.013	0.021	0.024	0.011	0.024

图 7 是 DCB 改正前后的 5 个测站 3 种频率组合静态 PPP 的平均收敛时间。可以发现, 经卫星 DCB 改正后, 静态 PPP 的收敛时间得以显著减少。当未改正卫星 DCB 时, 3 种频率组合静态 PPP 的收敛时间分别为 76.7 min、44.9 min 和 94.7 min。而改正卫星 DCB 后, 收敛时间分别为 26.4 min、19.5 min 和 16.3 min, 分别减少了 65.6%、56.6% 和 82.8%。限于篇幅, 图 8 仅给出了 NYA2 测站 B1c/B2a 组合静态 PPP 年积日第 172 天的收敛阶段的定位误差序列。可以发现, 改正卫星 DCB 后的收敛时间明显优于未改正卫星 DCB, 由此可知, 卫星 DCB 改正能加快收敛。

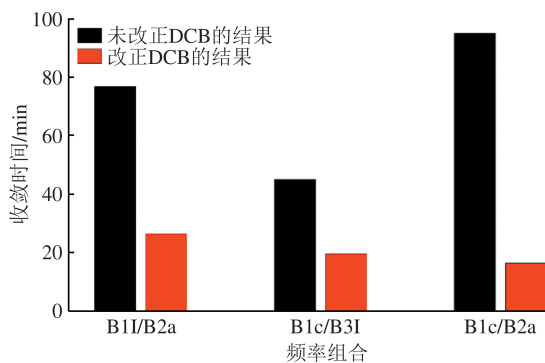


图 7 不同组合的双频静态 PPP 的平均收敛时间

Fig.7 Mean Convergence Time of Dual-Frequency Static PPP for Different Combinations

5 结 语

针对 BDS-3 卫星 DCB 产品稳定性分析及其对单点定位的影响研究, 本文得出以下结论:

1) CAS 和 DLR C2I-C6I DCB 日解值均具有较高的稳定性, 但 DCB 日解值存在整体跳变情

况, 原因与参与 DCB 解算的卫星数有关。CAS 和 DLR DCB 月稳定性表现出较好的一致性, 两者大部分卫星的 DCB 月稳定性均优于 0.2 ns, IGSO 卫星的月稳定性明显优于 MEO 卫星。

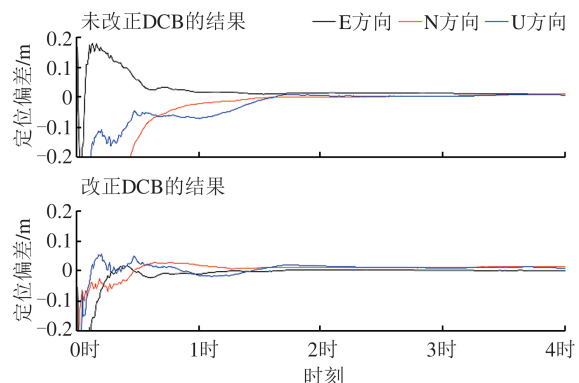


图 8 NYA2 测站 B1c/B2a 组合双频 PPP 定位结果

Fig.8 Dual-Frequency PPP Positioning Results of B1c/B2a Combination for NYA2 Station

2) 3 种频率的单频 SPP 经 DCB 改正后的定位精度显著提高, 其中 B1I 和 B1c 提高率达 76%~85%, B2a 提高率达 48%~77%。4 种频率组合的双频 SPP 经 DCB 改正后, 定位精度在 E、N、U 方向上的提高率达 71%~91%, 卫星 DCB 改正对双频 SPP 定位精度的影响较大。

3) 卫星 DCB 改正前后的 3 种频率组合静态 PPP 在 E、N、U 方向上的平均定位精度最大差异为 0.004 m, 定位精度基本相当。但静态 PPP 的收敛时间经 DCB 改正后得以显著减少, 未改正 DCB 时的 3 种频率组合静态 PPP 收敛时间分别为 76.7 min、44.9 min 和 94.7 min, 改正 DCB 时分别为 26.4 min、19.5 min 和 16.3 min, 分别减少了 65.6%、56.6% 和 82.8%。

参 考 文 献

- [1] Zhang Xiaohong, Hu Jiahuan, Ren Xiaodong. New Progress of PPP/PPP-RTK and Positioning Performance Comparison of BDS/GNSS PPP[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(9): 1084-1100. (张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK新进展与北斗/GNSS PPP定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1084-1100.)
- [2] Wang Ningbo, Yuan Yunbin, Zhang Baocheng, et al. Accuracy Evaluation of GPS Broadcast Inter-signal Correction (ISC) Parameters and Their Impacts on GPS Standard Positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(8): 919-928. (王宁波, 袁运斌, 张宝成, 等. GPS民用广播星历中ISC参数精度分析及其对导航定位的影响[J]. 测绘学报, 2016, 45(8): 919-928.)
- [3] Zhang Qiang, Zhao Qile, Zhang Hongping, et al. BDS Differential Code Bias Estimation Using BeiDou Experimental Tracking Stations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(12): 1649-1655. (张强, 赵齐乐, 章红平, 等. 利用北斗观测实验网解算北斗卫星差分码偏差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(12): 1649-1655.)
- [4] Montenbruck O, Hauschild A. Code Biases in Multi-GNSS Point Positioning [C]// ION ITM 2013, San Diego, USA, 2013.
- [5] Guo F, Zhang X H, Wang J L. Timing Group Delay and Differential Code Bias Corrections for BeiDou Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(5): 427-445.
- [6] Yao Yibin, Liu Lei, Kong Jian, et al. Estimation of BDS DCB Combining GIM and Different Zero-Mean Constraints [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(2): 135-143. (姚宜斌, 刘磊, 孔建, 等. GIM和不同约束条件相结合的BDS差分码偏差估计[J]. 测绘学报, 2017, 46(2): 135-143.)
- [7] Xu Lei, Chang Guobin, Gao Jingxiang, et al. Estimation of BDS DCB Based on Closure Constraint[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 520-529. (徐磊, 常国宾, 高井祥, 等. 附加闭合差约束的BDS频间偏差估计模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(4): 520-529.)
- [8] Li X X, Xie W L, Huang J X, et al. Estimation and Analysis of Differential Code Biases for BDS-3/BDS-2 Using iGMAS and MGEX Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(3): 419-435.
- [9] Liu Qiankun, Sui Lifen, Xiao Guorui, et al. Quality Analysis of MGEX BDS Differential Code Bias[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(11): 963-967. (刘乾坤, 隋立芬, 肖国锐, 等. MGEX北斗差分码偏差产品质量分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(11): 963-967.)
- [10] Mei Dengkui, Wen Debao. Stability Analysis and Short-Term Predictions of BDS Differential Code Bias [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(7): 746-750. (梅登奎, 闻德保. BDS卫星差分码偏差稳定性分析及其短期预报[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(7): 746-750.)
- [11] Zeng Tian, Sui Lifen, Bao Yadong, et al. The Impact of Satellite Differential Code Bias on BDS Positioning and Correction Model Research [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(1): 53-57. (曾添, 隋立芬, 鲍亚东, 等. BDS卫星端差分码偏差对定位的影响及改正模型研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(1): 53-57.)
- [12] Gu Shiming, Dang Yamin, Wang Hu, et al. The Effect of BeiDou DCB Correction on Single Point Positioning [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(10): 10-15. (谷世铭, 党亚民, 王虎, 等. 北斗差分码偏差改正对单点定位的影响[J]. 测绘科学, 2020, 45(10): 10-15.)
- [13] Li Zishen, Wang Ningbo, Yuan Yunbin. A Unified Definition and Processing Method of Observable-Specific Signal Biases for Multi-mode and Multi-frequency Global Navigation Satellite System [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(5): 10-20. (李子申, 王宁波, 袁运斌. 多模多频卫星导航系统码偏差统一定义与处理方法[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 10-20.)
- [14] Li Z, Yuan Y, Li H, et al. Two-Step Method for the Determination of the Differential Code Biases of COMPASS Satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1059-1076.
- [15] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Determination of Differential Code Biases with Multi-GNSS Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 209-228.
- [16] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps [J]. *Navigation*, 2015, 61(3): 191-201.
- [17] Nie Wenfeng. Multi-GNSS Global Ionosphere Monitoring and the Unified Handling of the Differential