



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: MGEX 差分码偏差产品对 BDS-3 伪距单点定位的影响研究  
作者: 胡倬铭, 袁海军, 何秀凤, 章浙涛, 王进  
DOI: 10.13203/j.whugis20210454  
收稿日期: 2022-08-18  
网络首发日期: 2022-10-18  
引用格式: 胡倬铭, 袁海军, 何秀凤, 章浙涛, 王进. MGEX 差分码偏差产品对 BDS-3 伪距单点定位的影响研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20210454>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210454

引用格式:

胡倬铭, 袁海军, 何秀凤, 等. MGEX差分码偏差产品对BDS-3伪距单点定位的影响研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210454 (Hu Zhuoming, Yuan Haijun, He Xiufeng, et al. Research on the Influence of MGEX Differential Code Bias Products on BDS-3 Pseudo-range Single Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210454)

## MGEX 差分码偏差产品对 BDS-3 伪距单点定位的影响研究

胡倬铭<sup>1</sup> 袁海军<sup>1</sup> 何秀凤<sup>1</sup> 章浙涛<sup>1</sup> 王进<sup>2</sup>

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:** 为研究不同差分码偏差(differential code bias,DCB)产品对 BDS-3 伪距单点定位的影响, 推导了 BDS-3 单频和双频无电离层组合伪距单点定位卫星端 DCB 改正模型, 基于多模 GNSS 实验跟踪网(the Multi-GNSS Experiment, MGEX)发布的中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)和德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)两种 DCB 产品, 并结合全球不同纬度均匀分布的国际 GNSS 服务(The International GNSS Service, IGS)测站连续 7d 的 BDS-3 实测数据对 B1I、B1C 和 B2a 单频与 B1C/B2a、B1I/B3I 两种常用无电离层组合伪距单点定位精度进行对比分析。结果表明, 在 B1I、B1C、B2a 三个频率和 B1C/B2a、B1I/B3I 两种组合中, CAS 产品改正后的定位精度整体上优于 DLR 产品改正后的定位精度。

**关键词:** 北斗三号卫星; 差分码偏差; 伪距单点定位; 定位精度; 无电离层组合

**中图分类号:** P228

**文献标志码:** A

卫星和接收机硬件引起的信号传播时延称为硬件延迟, 主要与信号类型、信号频率、卫星和接收机类型有关<sup>[1-2]</sup>。卫星内部时延通常是指卫星内部产生全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)信号的时间与信号离开发射天线的时延之差。直接测定某个信号的内部时延较为困难, 通常可测定两个信号的内部时延差, 即卫星端差分码偏差(differential code bias,DCB)。

BDS-3 卫星端 DCB 的绝对值可达几十纳秒, 其直接影响着利用伪距进行导航定位与授时的精度, 误差可达数米<sup>[3-5]</sup>。随着频点数的增加, 不同频点间的硬件延迟偏差成了影响定位精度的重要因素之一。目前, 中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)和德国宇航中心(German Aerospace Center, DLR)两个机构公开发布 BDS-3 卫星 DCB 产品。DLR 利用全球多模 GNSS 实验跟踪网(the

**收稿日期:** 2022-08-18

**项目资助:** 国家自然科学基金(41830110, 42004014); 江苏省自然科学基金青年基金(BK20200530); 中国博士后科学基金资助项目(2020M671324); 江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z412); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2020-3-8-E); 南京市留学人员科技创新项目

**第一作者:** 胡倬铭, 硕士, 主要从事 GNSS 精密定位研究。1360162379@qq.com

**通讯作者:** 何秀凤, 博士, 教授。Xfhe@hhhu.edu.cn

Multi-GNSS Experiment, MGEX)测站计算的高精度全球电离层图(Global Ionosphere Maps, GIM)修正卫星信号在传播路径上的电离层延迟,从而计算出卫星和接收机的差分码偏差<sup>[6-8]</sup>; CAS 则利用观测站数据建立电离层总电子含量 (Total Electron Content, TEC)模型并解算卫星和接收机的差分码偏差<sup>[9-10]</sup>。文献[11]提出了一种用于 GNSS 精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)的联合处理模型,并给出了卫星端 DCB 的改正方法,结果表明多系统非组合 PPP 能够提高收敛速度和单频定位精度,但只研究了单频和双频的 DCB 改正,未涉及到三频。文献[12]阐述了 BDS-2 时间群延迟(Timing Group Delay, TGD)与 DCB 间的关系,推导了三频情况下的 TGD 与 DCB 改正模型,并讨论分析了不同方案下的 BDS-2 卫星伪距单点定位(Standard Point Positioning, SPP)和 PPP 定位性能。文献[13]提出联合 GPS 和北斗卫星观测数据并采用低阶球谐模型建模的方式计算北斗卫星和接收机的 DCB,但未进行 DCB 改正的定位实验。文献[14]推导了 BDS-2 非组合 PPP DCB 改正模型,并基于 CAS DCB 产品详细分析讨论了卫星 DCB 改正对非组合 PPP 定位精度和状态参数的影响,但其仅分析了单一 DCB 产品。文献[15]详细比较分析了 DLR 与 CAS 两个机构解算的 BDS-2 卫星和部分 BDS-3 卫星差分码偏差的日解值、月平均值和稳定性等特征,但其未对 DCB 改正模型进行研究。

文献[16]分析了 BDS-2 卫星不同伪距组合的 DCB 改正模型,并利用 CAS DCB 产品与国家连续运行参考站 (Continuously Operating Reference Stations, CORS)实测数据进行了北斗 SPP 和 PPP 实验,其缺乏对 BDS-3 卫星 DCB 改正模型的讨论。文献[17]推导了 BDS-3 B1C/B2a 双频组合卫星端 DCB 改正模型,并利用 CAS DCB 产品与 MGEX 测站观测数据进行了 BDS-3 卫星非差非组合和无电离层组合模型下的 PPP 定位实验,同时对不同组合和不同模型下的定位精度做了对比分析。文献[18]首次估计了 22 种不同类型的北斗卫星 DCB,并全面比较分析了各类 DCB 的内符合精度、外符合精度及月稳定度。文献[19]提出了一种改进的相位平滑伪距的方法,这排除了接收机 DCB 显著天内变化对相关电离层参数质量的影响,同时这种方法用于检测单个接收机的 DCB 历元间波动具有重要意义。此外,还有学者针对接收机 DPB 显著天内变化对电离层观测值的影响进行了研究,如文献[20]证明了接收机 DPB 由于环境温度的原因,在一天内特定时段的变化远超噪声水平。文献[21]推导了 BDS-3 卫星端 DCB 改正模型,着重分析了卫星端 DCB 改正前后对单点定位的影响。文献[22]提出了一种基于闭合差约束的 BDS-2 卫星频间偏差估计方法,估计的频间偏差与 CAS 估计的频间偏差精度相当。文献[23]利用 Swarm 低轨卫星、GPS 卫星、低轨 (low earth orbit, LEO) 卫

星联合解算接收机端 DCB, 实验证明联合估计得到的 DCB 的稳定性较独立估计方案提高了 16.6%。然而, 以往学者多基于 BDS-2 卫星开展卫星端 DCB 改正模型研究, 而针对 BDS-3 卫星新增频率的相关研究较少, 其次针对 BDS-3 卫星端 DCB 改正仅基于 CAS 或 DLR 单一产品进行讨论分析, 鲜有学者对 MGEX 公开发布的两种 DCB 产品对 BDS-3 卫星伪距单点定位结果进行比较

分析。

本文基于 CAS 与 DLR 两种 BDS-3 DCB 产品, 首先选取两种产品连续三个月的数据对 C2I-C6I、C1X-C6I 和 C5X-C6I DCB 组合的互差进行比较分析, 然后结合全球不同纬度均匀分布的 MGEX 测站连续 7d 的 BDS-3 实测数据对 B1I、B1C 和 B2a 单频以及 B1C/B2a 和 B1I/B3I 两种常用无电离层组合伪距单点定位精度进行对比分析。

## 1 广播星历卫星钟差 DCB 改正模型

BDS-3 原始伪距观测方程为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} P_{B1I} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt^s) + c \cdot d_{B1I} + \varepsilon_{P_1} \\ P_{B3I} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + \alpha I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt^s) + c \cdot d_{B3I} + \varepsilon_{P_2} \\ P_{B1C} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + \beta I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt^s) + c \cdot d_{B1C} + \varepsilon_{P_3} \\ P_{B2a} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + \gamma I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt^s) + c \cdot d_{B2a} + \varepsilon_{P_4} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\rho_s^r$  为卫星和接收机天线相位中心间的几何距离;  $dT_r$  为对流层延迟;  $m_r$  为对流层延迟映射函数;  $I_{r,1}$  为 B1I 频点的电离层延迟;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为  $f_{B1I}^2/f_{B3I}^2$ 、 $f_{B1I}^2/f_{B1C}^2$ 、 $f_{B1I}^2/f_{B2a}^2$ ;  $c$  为光速;  $dt_r$ 、 $dt^s$  分别为卫星和接收机钟差;  $d_{B1I}$ 、 $d_{B3I}$ 、 $d_{B1C}$ 、 $d_{B2a}$  分别

为相应频点的卫星端码硬件延迟,  $\varepsilon_{P_i}$  为各个频点的伪距观测误差, 需要说明的是接收机端硬件延迟在定位中可被接收机钟差参数吸收<sup>[24]</sup>。BDS-3 广播星历卫星钟差参数以 B3I 频点的天线相位中心为参考, 即:

$$dt_{br}^s = dt^s - d_{B3I} \quad (2)$$

由(1)和(2)式可推导得 BDS-3 单频伪距单点定位卫星端 DCB 改正模型为:

$$\begin{cases} P_{B1I} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - c \cdot dcb_{B1IB3I} + \varepsilon_{P_1} \\ P_{B3I} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + \alpha I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) + \varepsilon_{P_2} \\ P_{B1C} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + \beta I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - c \cdot dcb_{B1CB3I} + \varepsilon_{P_3} \\ P_{B2a} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + \gamma I_{r,1} + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - c \cdot dcb_{B2aB3I} + \varepsilon_{P_4} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $dcb_{B1IB3I} = d_{B3I} - d_{B1I}$ ,  $dcb_{B1CB3I} = d_{B3I} - d_{B1C}$ ,  $dcb_{B2aB3I} = d_{B3I} - d_{B2a}$ 。B3I 信号频点的卫星钟差与广播星历相同, 因此其进行单频伪距单点定位时无需考虑卫星端

DCB 改正。由式(3)可推导得四种噪声系数较小的 BDS-3 双频无电离层伪距单点定位 DCB 改正模型为:

$$\begin{cases} PC_{B1cB2a} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - \frac{\mu}{\mu-1} dcb_{B1cB3I} + \frac{1}{\mu-1} dcb_{B2aB3I} \\ PC_{B1I B3I} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - \frac{\alpha}{\alpha-1} dcb_{B1I B3I} \\ PC_{B1I B2a} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - \frac{\gamma}{\gamma-1} dcb_{B1I B3I} + \frac{1}{\gamma-1} dcb_{B2aB3I} \\ PC_{B1cB3I} = \rho_s^r + m_r \cdot dT_r + c \cdot (dt_r - dt_{br}^s) - \frac{\theta}{\theta-1} dcb_{B1cB3I} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\mu$ 、 $\theta$ 分别为 $f_{B1c}^2/f_{B2a}^2$ 、 $f_{B1c}^2/f_{B3I}^2$ 。

## 2 不同 BDS-3 DCB 产品的互差分析

由于 CAS 与 DLR 两个机构的 BDS-3 DCB 产品解算策略不同,故其 DCB 产品间存在差异。本文采用两种产品 2021 年年积日 1~90 天的数据对 C2I-C6I、C1X-C6I 和 C5X-C6I DCB 互差进行比较分析。

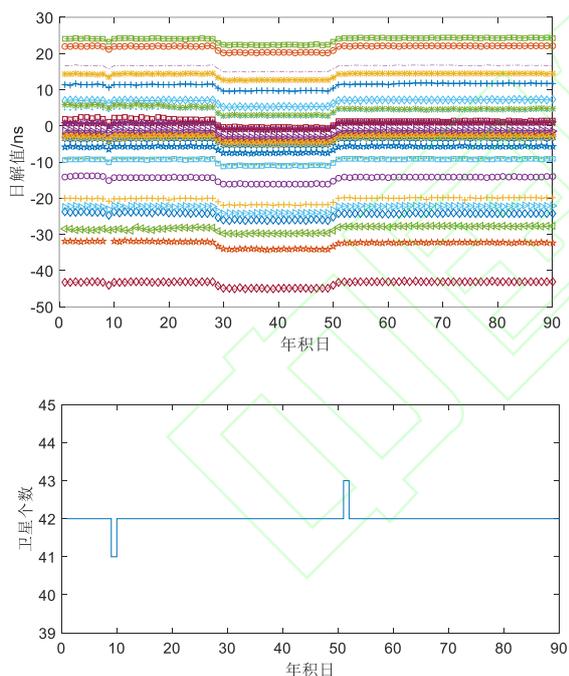


图 1 BDS-3 卫星 CAS 产品 $DCB_{C2I-C6I}$ 日解值时间序列和参与解算卫星个数

Fig.1 Time series of daily solution value of BDS-3 satellite CAS product  $DCB_{C2I-C6I}$  and the number of satellites in calculating

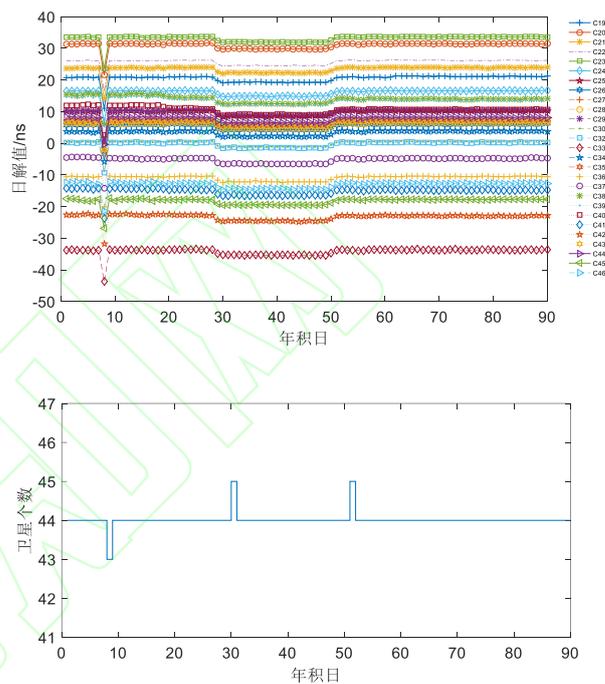


图 2 BDS-3 卫星 DLR 产品 $DCB_{C2I-C6I}$ 日解值时间序列和参与解算卫星个数

Fig.2 Time series of daily solution value of BDS-3 satellite DLR product  $DCB_{C2I-C6I}$  and the number of satellites in calculating

图 1 和图 2 以 $DCB_{C2I-C6I}$ 为例分别给出了两种产品的日解值时间序列与参与解算卫星 DCB 的变化情况。从图中可以看出两者都有较高的稳定性。CAS 产品日解值范围在 $-44.92 \sim 24.4ns$ , DLR 产品日解值范围在 $-43.72 \sim 33.72ns$ , 两类产品相同卫星 DCB 日解值范围不同而不同卫星 DCB 日解值差值相近的原因是两种产品的解算卫星数目

不同,如:DLR 产品中的 $DCB_{C2I-C6I}$ 有 C56、C57 两颗 BDS-3 卫星参与而 CAS 产品中则没有。CAS 产品和 DLR 产品分别在在年积日第 9d、30d, 51d 和第 8d、30d, 51d 日解值发生了跳变。以 CAS 产品年积日第 9d 的跳变为例: 因为 C42 卫星未参与当天 DCB 产品解算而导致解算卫星数发生了变化, 解算基准也随之改变, 故当天所有卫星的 DCB 日解值有一个整体的跳变, 其他天的跳变也是因为 DCB 的解算基准改变所致。其中, CAS 产品 $DCB_{C2I-C6I}$ 值在这三天的跳变值均小于 1ns, DLR 产品在第 30d 和 51d 的跳变值小于 1ns, 第 8d 的跳变值在 10ns 左右。

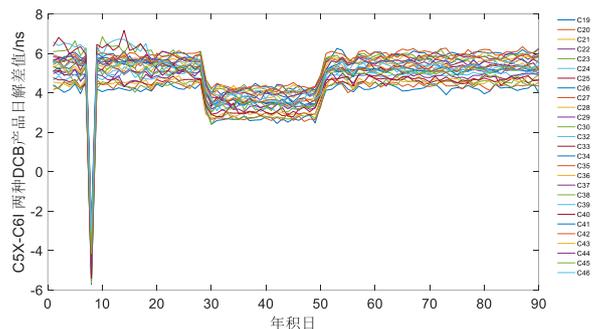
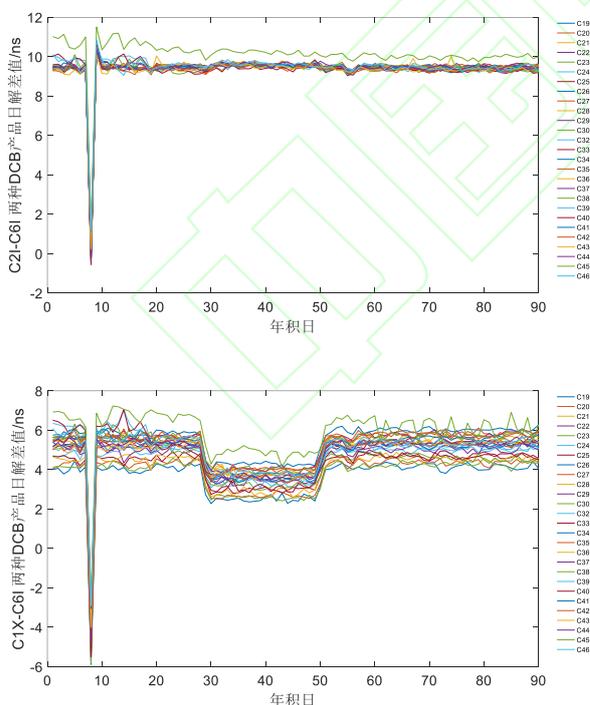


图 3 BDS-3 卫星 C2I-C6I、C1X-C6I 和 C5X-C6I 组合两种 DCB 产品日解差值时间序列  
Fig.3 Two DCB products daily solution difference time series of BDS-3 satellite C2I-C6I, C1X-C6I and C5X-C6I combination

由图 1 图 2 分析可以得知图 3 中  $DCB_{C2I-C6I}$  日解互差值在第 8d 发生跳变是 DLR 产品  $DCB_{C2I-C6I}$  日解值在当天发生跳变所导致, 而第 30d 和 51d  $DCB_{C2I-C6I}$  日解互差值较为平稳是因为两种产品  $DCB_{C2I-C6I}$  日解值在当天发生跳变的值相差不大。图 3 中  $DCB_{C1X-C6I}$ 、 $DCB_{C5X-C6I}$  日解互差值同样在第 8d、30d 和 51d 发生跳变, 原因是 CAS 产品的日解值一直比较平稳, 而 DLR 产品的日解值在第 8d、30d 和 51d 发生了跳变所导致。除年积日第 8d 外, 两种产品  $DCB_{C2I-C6I}$  的差值范围在 9.05 ~ 11.5ns, 两种产品  $DCB_{C1X-C6I}$  和  $DCB_{C5X-C6I}$  的互差值范围在 2.27 ~ 7.23ns。

### 3 不同 BDS-3 卫星 DCB 产品改正后的伪距单点定位精度分析

为评估不同 DCB 产品改正对 BDS-3 卫星伪距单点定位结果的影响,分别进行单频和双频无电离层组合两种模式下的实验。选取全球不同纬度均匀分布的 MGEX 测站连续 7d (2021 年年积日 80~86 天),采样间隔为 30s 的 BDS-3 卫星实测数据。卫星轨道和钟差采用 IGS 发布的广播星历轨道和钟差产品。实验采取两种方案: 1: CAS 产品改正卫星端 DCB, 2: DLR 产品改正卫星端 DCB。对流层延迟采用 Saastamoinen 模型进行改正,单频伪距单点定位电离层延迟采用 BDS Klobuchar 模型进行改正,各个测站的参考坐标选用 IGS 发布的周解坐标。两种方案除了采用的 DCB 产品不同其他处理策略均相同。本次实验对 B1I、B1C 和 B2a 单频和 B1C/B2a、B1I/B3I 两种常用无电离层组合伪距单点定位精度进行对比分析。测站分布如图 4 所示。

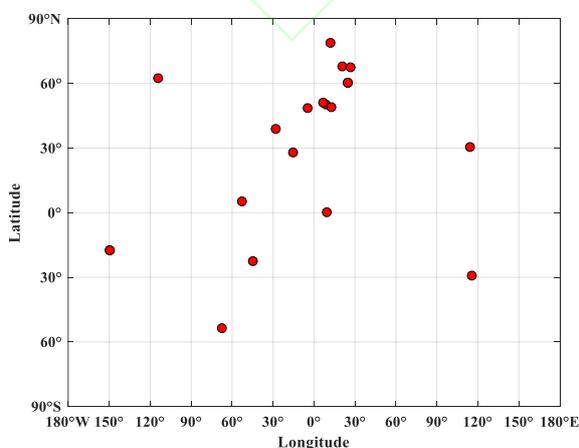


图 4 MGEX 测站分布图

Fig.4 MGEX station distribution map

表 1 和表 2 分别给出了 19 个 IGS 测站在 B1I、B1C 和 B2a 三个频率中,两种 BDS-3 DCB 产品改正后  $E$ 、 $N$ 、 $U$  方向上的 RMS 均值。由表可知, B1I 频率在  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向上两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在 1~3cm 以内,并且大多数测站中, CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 1~2cm。B1C 频率绝大多数测站中,  $E$ 、 $N$  两个方向两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在 5cm 以内,并且 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品,特别是 WTZZ 测站的定位结果, CAS 产品改正后  $E$ 、 $U$  两个方向定位精度优于 DLR 产品达 1dm。所有测站中, B1C 频率  $U$  方向 CAS 产品改正后的定位精度均优于 DLR 产品,并且部分测站在  $U$  方向上有着分米级的定位优势,最大可达 2.3dm。B2a 频率绝大多数测站  $E$ 、 $N$  两个方向两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在 5cm 以内,并且 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品。所有测站 B2a 频率  $U$  方向 CAS 产品改正后的定位精度都要优于 DLR 产品,并且多数测站在  $U$  方向有着分米级的定位优势,最大可达 3.8dm。

表 1 CAS 产品改正后单频伪距单点定位精度 RMS 均值 单位(m)

Tab.1 RMS mean value of single-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy after correction of

测站	CAS product Unit (m)								
	B1I			B1C			B2a		
	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>
CHPG	0.79	0.98	2.2	0.69	0.97	1.85	1.25	1.74	4.78
FAA1	0.81	2.3	2.9	0.78	2.25	2.68	1.23	4.19	5.87
KOUG	1.04	0.98	1.92	0.99	0.93	1.78	1.75	1.62	5.16
MAS1	0.72	2.38	2.53	0.67	2.34	2.43	1.04	4.23	5.38
NKLG	0.79	1.06	3.35	0.73	1.03	3.21	1.19	1.82	6.4
THTG	0.79	2.29	3.21	0.73	2.24	2.97	1.23	4.18	6.53
FFMJ	0.51	0.84	1.95	0.45	0.79	1.86	0.44	1.38	1.3
BRST	0.55	0.89	1.75	0.48	0.85	1.52	0.51	1.44	2.36
ENAO	0.52	0.8	3.17	0.45	0.72	2.78	0.46	1.35	2.1
WTZZ	0.89	1.29	2.54	0.72	1.15	2.18	0.69	1.63	1.84
RIO2	0.48	0.73	2.25	0.48	0.67	2.26	0.56	1.24	1.58
TIT2	0.52	0.85	1.97	0.45	0.79	1.91	0.45	1.37	1.29
WUH2	0.63	1.06	2.49	0.59	1	2.34	0.77	1.98	3.21
KIRU	0.65	0.62	2.27	0.61	0.64	2.26	0.57	0.62	1.44
MET3	0.51	0.69	2.25	0.45	0.58	2.16	0.44	0.88	1.35
METG	0.48	0.58	1.18	0.45	0.52	1.07	0.43	0.86	1.84
NYA2	0.47	0.45	2.96	0.45	0.43	2.92	0.63	0.51	2.02
SOD3	0.57	0.67	2.46	0.54	0.58	2.31	0.57	0.62	1.55
YEL2	0.44	0.64	2	0.41	0.63	1.98	0.52	0.71	1.42

表 2 DLR 产品改正后单频伪距单点定位精度 RMS 均值 单位(m)

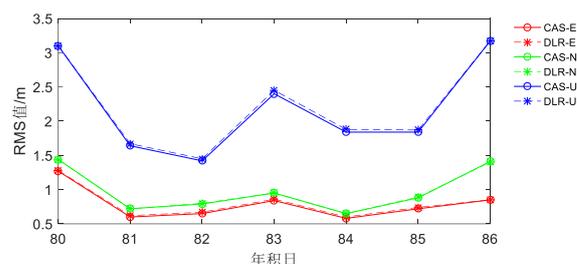
Tab.2 RMS mean value of single-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy after correction of

测站	DLR products Unit (m)								
	B1I			B1C			B2a		
	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>
CHPG	0.8	0.98	2.23	0.72	0.94	1.9	1.27	1.71	4.8
FAA1	0.82	2.3	2.89	0.81	2.23	2.78	1.25	4.16	5.95
KOUG	1.04	0.98	1.92	1.01	0.94	1.86	1.75	1.62	5.2
MAS1	0.72	2.39	2.53	0.7	2.35	2.5	1.05	4.25	5.45
NKLG	0.79	1.06	3.34	0.77	1.05	3.22	1.21	1.84	6.41
THTG	0.8	2.28	3.21	0.77	2.22	3.04	1.25	4.15	6.6
FFMJ	0.52	0.84	1.96	0.5	0.8	1.88	0.48	1.37	1.43
BRST	0.56	0.9	1.78	0.53	0.86	1.67	0.56	1.44	2.56
ENAO	0.53	0.8	3.19	0.5	0.75	3.01	0.51	1.38	2.48
WTZZ	0.91	1.31	2.56	0.84	1.25	2.36	0.84	1.68	2.16
RIO2	0.48	0.74	2.27	0.54	0.7	2.36	0.62	1.26	1.67

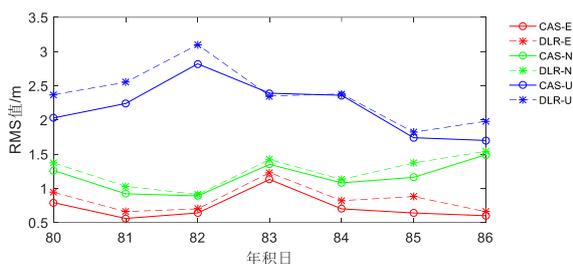
TIT2	0.53	0.86	1.98	0.5	0.8	1.93	0.49	1.37	1.42
WUH2	0.64	1.07	2.49	0.64	1.04	2.41	0.79	2.02	3.24
KIRU	0.64	0.62	2.27	0.62	0.68	2.34	0.6	0.64	1.57
MET3	0.52	0.7	2.27	0.48	0.61	2.18	0.47	0.87	1.45
METG	0.49	0.58	1.17	0.48	0.55	1.14	0.46	0.87	1.93
NYA2	0.47	0.45	2.95	0.47	0.47	2.98	0.64	0.54	2.08
SOD3	0.57	0.68	2.47	0.56	0.62	2.37	0.59	0.64	1.67
YEL2	0.44	0.64	2	0.44	0.65	2.01	0.52	0.73	1.52

图 5 代表性地给出了 CHPG 测站 B1I 频率、WTZZ 测站 B1C 频率和 ENAO 测站 B2a 频率 7 天的伪距单点定位精度 RMS 值。可以发现, B1I 频率在大多数天中,  $E$ 、 $U$  两个方向 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 1~3cm,  $N$  方向两种产品改正后的定位精度相当。B1C 频率年积日第 83 天  $U$  方向 CAS 产品改正后的定位精度要略低于 DLR 产品, 除此之外,  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 2cm~3.4dm。B2a 频率在大多数天中,  $E$ 、 $N$  两个方向 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 1cm~1dm,  $U$  方向 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 1.4dm~5.8dm。CAS 产品改正后的定位精度整体上均优于 DLR 产品。其中 B1I 频率两种产品改正后的定位精度相差不大的原因是 CAS 与 DLR 两个机构都直接提供  $DCB_{C2I-C6I}$  产品, 不需要通过各自的其它 DCB 产品进行线性组合得到, 两者的相对误差小。然而, B2a 频率两个机构都不直接提供  $DCB_{C5X-C6I}$  产品, 需要通过各自的其它 DCB 产品进行线性组合得到, CAS 产品通过  $DCB_{C1X-C5X}$  与  $DCB_{C1X-C6I}$  线性组合得到

$DCB_{C5X-C6I}$  产品, DLR 产品通过  $DCB_{C2I-C6I}$  与  $DCB_{C2I-C5X}$  线性组合得到  $DCB_{C5X-C6I}$  产品, 由于受误差传播的影响, 间接法获得的各机构之间的 DCB 差值明显更大, 一致性较差<sup>[18]</sup>, 所以两者的相对误差大, 两种产品改正后的定位精度相差较大。B1C 频率两种产品改正后的定位精度相差较大的原因也与 B2a 类似。图 6 是 B1I、B1C 和 B2a 频率两种 DCB 产品改正后的各测站伪距单点定位精度 RMS 均值, 图中显示的结果与表 1 表 2 中得出的结论是一致的。

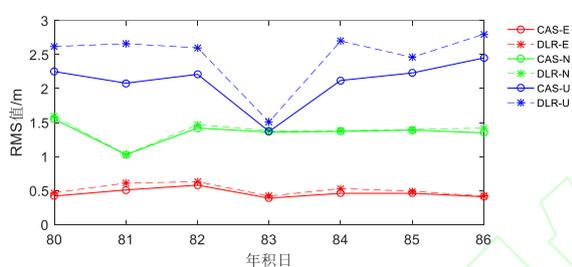


(a) CHPG 测站 B1I 频率单天伪距单点定位精度 RMS 值  
(a) RMS value of single-day pseudo-range single-point positioning accuracy of CHPG station B1I frequency



(b) WTZZ 测站 B1C 频率单天伪距单点定位精度 RMS 值

(b) RMS value of single-day pseudo-range single-point positioning accuracy of WTZZ station B1C frequency

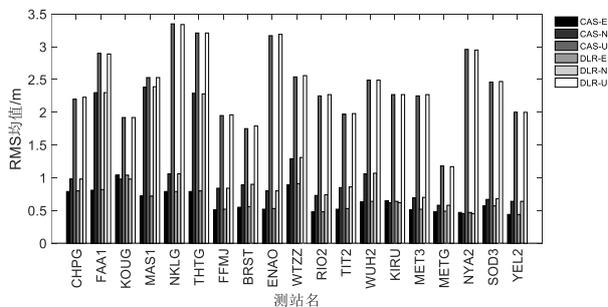


(c) ENAO 测站 B2a 频率单天伪距单点定位精度 RMS 值

(c) RMS value of single-day pseudo-range single-point positioning accuracy of ENAO station B2a frequency

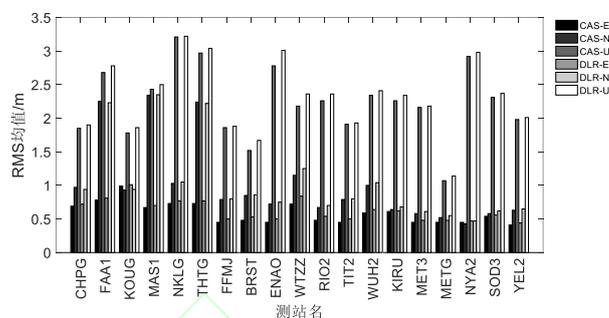
图 5 单天单频伪距单点定位精度 RMS 值

Fig.5 RMS value of single-day single-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy



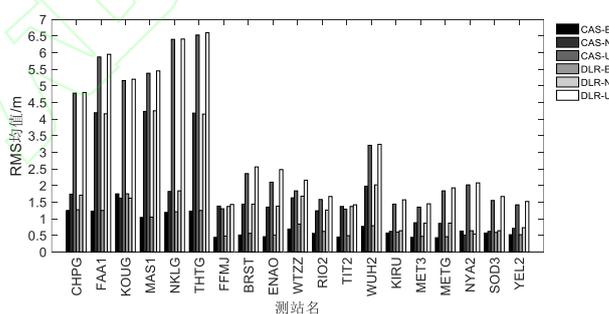
(a) B1I 频率两种 DCB 产品改正后各测站伪距单点定位精度 RMS 均值

(a) RMS mean value of pseudo-range single-point positioning accuracy of each station after correction for two DCB products at B1I frequency



(b) B1C 频率两种 DCB 产品改正后各测站伪距单点定位精度 RMS 均值

(b) RMS mean value of pseudo-range single-point positioning accuracy of each station after correction for two DCB products at B1C frequency



(c) B2a 频率两种 DCB 产品改正后各测站伪距单点定位精度 RMS 均值

(c) RMS mean value of pseudo-range single-point positioning accuracy of each station after correction for two DCB products at B2a frequency

图 6 两种 DCB 产品改正后各测站单频伪距单点定位精度 RMS 均值

Fig.6 The RMS mean value of the single-frequency pseudo-range single-point positioning accuracy of

each station after correction of the two DCB products

表 3 和表 4 分别给出了 19 个 MGEX 测站在 B1C/B2a、B1I/B3I 两种组合中, 两种 BDS-3 DCB 产品改正后  $E$ 、 $N$ 、 $U$  方向上的 RMS 均值。由表可知, B1C/B2a 组合绝大多数测站中,  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在分米级以内并且 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品, 少量测站如:FFMJ、WTZZ、ENAO、TIT2, CAS 产品改正后  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三

个方向中一个或两个的定位精度对 DLR 产品有着分米级的定位优势。B1I/B3I 组合在绝大多数测站中,  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在分米级以内并且多数测站 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品, 少量测站如:BRST、ENAO, CAS 产品改正后  $U$  方向的定位精度对 DLR 产品有着分米级的定位优势。

表 3 CAS 产品改正后双频无电离层组合伪距单点定位精度 RMS 均值 单位(m)

Tab.3 RMS mean value of single-point positioning accuracy of dual-frequency ionospheric combined

pseudorange after correction of CAS products Unit (m)

测站	B1C/B2a			B1I/B3I		
	$E$	$N$	$U$	$E$	$N$	$U$
CHPG	0.63	0.62	2.06	1.19	1.17	4.69
FAA1	0.85	0.81	3.06	1.19	1.11	4.1
KOUG	0.6	0.48	1.78	1.01	0.82	2.55
MAS1	0.65	0.66	1.78	0.96	0.95	2.58
NKLG	0.6	0.46	4.03	0.88	0.77	4.1
THTG	0.65	0.6	3.19	1.07	1.01	4.28
FFMJ	0.51	0.61	1.51	0.84	0.98	2.13
BRST	0.62	0.83	2.91	1.08	1.4	3.99
ENAO	0.48	0.61	2.09	1.06	1.12	3.79
WTZZ	0.98	1.26	2.51	1.58	1.98	3.77
RIO2	0.47	0.63	1.29	0.51	0.66	1.41
TIT2	0.51	0.63	1.4	0.83	0.97	1.96
WUH2	0.69	0.76	1.82	1.41	1.18	3.23
KIRU	0.65	0.75	1.83	0.86	1.08	2.57
MET3	0.53	0.67	1.26	0.97	1.35	2.58
METG	0.46	0.58	2.36	0.82	0.84	2.49
NYA2	0.44	0.47	1.7	0.51	0.71	2.35
SOD3	0.47	0.62	1.42	0.83	1.21	2.92
YEL2	0.48	0.5	1.17	0.57	0.75	1.53

表 4 DLR 产品改正后双频无电离层组合伪距单点定位精度 RMS 均值 单位(m)

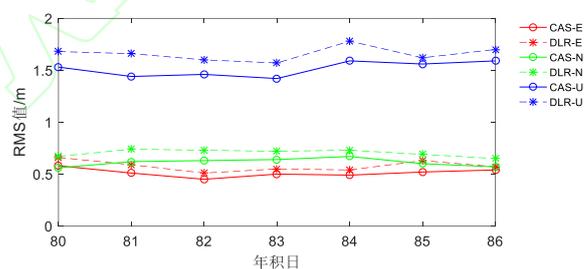
Tab.4 RMS mean value of single point positioning accuracy of dual-frequency ionospheric combined

pseudorange after correction of DLR products Unit (m)

低纬度测	B1C/B2a	B1I/B3I
------	---------	---------

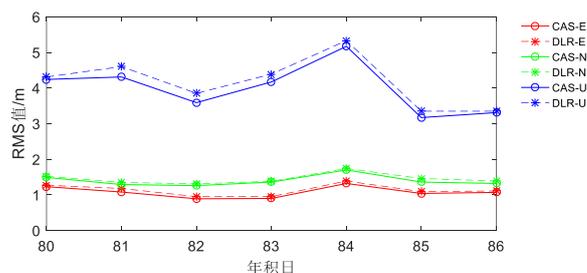
站	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>U</i>
CHPG	0.66	0.63	2.13	1.28	1.21	4.78
FAA1	0.86	0.8	3.11	1.19	1.1	4.09
KOUG	0.64	0.47	1.79	1	0.8	2.52
MAS1	0.7	0.68	1.82	0.96	0.94	2.55
NKLG	0.64	0.46	4.05	0.88	0.78	4.11
THTG	0.67	0.6	3.19	1.06	1	4.26
FFMJ	0.58	0.7	1.66	0.87	1.02	2.2
BRST	0.66	0.88	2.97	1.13	1.45	4.17
ENAO	0.54	0.63	2.25	1.07	1.12	3.89
WTZZ	1.07	1.38	2.77	1.62	2.01	3.83
RIO2	0.55	0.66	1.34	0.5	0.63	1.36
TIT2	0.58	0.72	1.53	0.85	1	2.02
WUH2	0.73	0.75	1.85	1.43	1.19	3.23
KIRU	0.66	0.78	1.88	0.87	1.08	2.58
MET3	0.54	0.69	1.3	0.99	1.37	2.65
METG	0.49	0.61	2.39	0.83	0.83	2.45
NYA2	0.5	0.54	1.77	0.53	0.72	2.33
SOD3	0.49	0.66	1.49	0.85	1.23	3
YEL2	0.53	0.51	1.21	0.57	0.74	1.53

图 7 代表性地给出了 FFMJ 测站 B1C/B2a 组合、BRST 测站 B1I/B3I 组合 7 天的伪距单点定位精度 RMS 值,可以发现, B1C/B2a 组合 *E*、*N*、*U* 三个方向 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 3cm~2.2dm。 B1I/B3I 组合 *E*、*N*、*U* 三个方向 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 3cm~2.9dm。CAS 产品改正后的定位精度整体上是优于 DLR 产品。图 8 是 B1C/B2a、B1I/B3I 组合两种 DCB 产品改正后各测站伪距单点定位精度 RMS 均值, 图中显示的结果与表 3 表 4 中得出的结论是一致的。



(a) FFMJ 测站 B1C/B2a 组合单天伪距单点定位精度 RMS 值

(a) RMS value of single-day pseudo-range single-point positioning accuracy of FFMJ station B1C/B2a combination

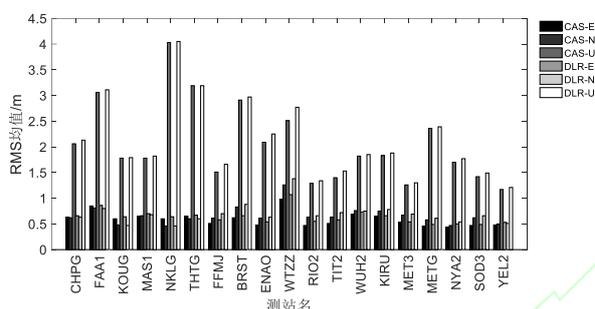


(b) BRST 测站 B1I/B3I 组合单天伪距单点定位精度 RMS 值

(b) RMS value of single-day pseudo-range single-point positioning accuracy of BRST station B1I/B3I combination

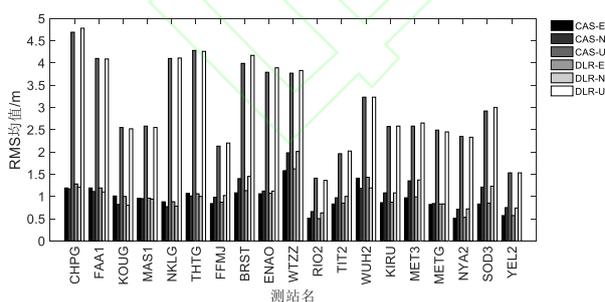
图 7 单天双频无电离层组合伪距单点定位精度 RMS 值

Fig.7 Single-day dual-frequency ionospheric-free combined pseudorange single-point positioning accuracy RMS value



(a) B1C/B2a 组合两种 DCB 产品改正后各测站双频无电离层组合伪距单点定位精度 RMS 均值

(a) B1C/B2a combination of two DCB products after correction, the dual-frequency ionospheric-free combination pseudo-range single-point positioning accuracy RMS average of each station



(b) B1I/B3I 组合两种 DCB 产品改正后各测站双频无电离层组合伪距单点定位精度 RMS 均值

(b) B1I/B3I combination of two DCB products after correction, the dual-frequency ionospheric-free combination pseudo-range single-point positioning accuracy RMS average of each station

图 8 两种 DCB 产品改正后各测站双频无电离层组合伪距单点定位精度 RMS 均值

Fig.8 The RMS mean value of the single-point positioning accuracy of the dual-frequency ionospheric combined pseudorange at each station after the correction of the two DCB products

### 4 结语

本文推导了 BDS-3 卫星广播星历卫星端 DCB 改正模型, 选取了 CAS 与 DLR 两种 BDS-3 DCB 产品连续三个月的数据对 C2I-C6I、C1X-C6I 和 C5X-C6I DCB 组合的互差进行分析, 并结合全球不同纬度均匀分布的 MEGX 测站连续 7d 的 BDS-3 实测数据对 B1I、B1C 和 B2a 单频和 B1C/B2a、B1I/B3I 两种常用无电离层组合伪距单点定位精度进行对比分析。实验结果表明:

(1) 除 2021 年年积日第 8d 外, 两种产品 DCB<sub>C2I-C6I</sub> 的差值范围在 9.05 ~ 11.51ns, 两种产品 DCB<sub>C1X-C6I</sub> 和 DCB<sub>C5X-C6I</sub> 的互差值范围在 2.27 ~ 7.23ns。

(2) B1I 频率 E、N、U 三个方向上两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在 1~3cm 以内, 并且大多数测站中, CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品 1~2cm。B1C、B2a 频率绝大多数测站中, E、N 两个方向两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在 5cm 以内, 并且 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品。所有测站中, U 方向上 B1C、B2a 频率 CAS 产

品改正后的定位精度均优于 DLR 产品, 并且多数测站中,  $U$  方向有着分米级的定位优势。

(3) B1C/B2a、B1I/B3I 组合绝大多数测站中,  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向两种产品改正后的定位精度 RMS 均值相差在分米级以内并且 CAS 产品改正后的定位精度要优于 DLR 产品。少量测站中, CAS 产品改正后  $E$ 、 $N$ 、 $U$  三个方向中一个或两个的定位精度对 DLR 产品改正后的定位精度有着分米级的定位优势。

#### 参考文献

- [1] Dach R, Lutz S, Walser P, et al. Bernese GNSS Software Version 5.2[M]. Berne: Astronomical Institute of University of Berne, 2015
- [2] Martin Håkansson et al. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 849-860.
- [3] Wilson B D , Yinger C H , Feess W A , et al. New and improved: The broadcast interfrequency biases[J]. Gps World, 1999, 10(9):56-66.
- [4] 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(08):919-928.  
Wang Ningbo,Yuan Yunbin,Zhang Baocheng, et al.Accuracy analysis of ISC parameters in GPS civil broadcast ephemeris and its influence on navigation and positioning[J].Journal of Surveying and Mapping,2016,45(08):919-928.
- [5] 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(01):53-57.  
Zeng Tian,Sui Lifen,Bao Yadong, et al.Study on the influence of BDS satellite differential code deviation on positioning and the correction model[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2017,37(01):53- 57.
- [6] 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.  
Zhang Qiang,Zhao Qile,Zhang Hongping, et al.Using Beidou Observation and Experiment Network to Solve the Difference of Beidou Satellite Differential Code Deviation[J].Journal of Wuhan University (Information Science Edition),2016,41(12):1649-1655.
- [7] Li X , Xie W , Huang J , et al. Estimation and analysis of differential code biases for BDS3/BDS2 using iGMAS and MGEX observations[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(3):419-435.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Li Z , Yuan Y , Hui L , 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.
- [11] Lou Y , Zheng F , Gu S , et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models[J]. GPS Solutions, 2016, 20(4):849-862.
- [12] Guo F , Zhang X , Wang J . Timing group delay and differential code bias corrections for BeiDou positioning[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(5):427-445.
- [13]舒宝,刘晖,张明,等.北斗系统硬件延迟解算及精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(02):279-284.
- Shu Bao,Liu Hui,Zhang Ming, et al.Beidou system hardware delay calculation and accuracy analysis[J].Journal of Wuhan University (Information Science Edition),2016,41(02):279-284.
- [14]张辉,郝金明,刘伟平,等.卫星差分码偏差对非组合精密单点定位的影响分析[J/OL].武汉大学学报(信息科学版):1-8[2021-07-05].
- Zhang Hui,Hao Jinming,Liu Weiping, et al.Analysis of the influence of satellite differential code deviation on non-combined precision single point positioning[J/OL].Journal of Wuhan University (Information Science Edition):1-8[2021-07-05].
- [15]梅登奎,闻德保.MGEX 北斗差分码偏差两种精确处理方法对比分析[J].空间科学学报,2019,39(05):662-669.
- Mei Dengkui,Wen Debao.Comparison analysis of two accurate processing methods for MGEX Beidou differential code deviation[J].Journal of Space Science,2019,39(05):662-669.
- [16]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.
- Gu Shiming,Dang Yamin,Wang Hu, et al.The influence of Beidou differential code deviation correction on single point positioning[J].Science of Surveying and Mapping,2020,45(10):10-15.
- [17]王利军,焦文海,贾小林,等.BDS-3 精密单点定位性能比较分析[J].大地测量与地球动力学,2021,41(04):357-361.
- Wang Lijun,Jiao Wenhai,Jia Xiaolin, et al.Comparative analysis of BDS-3 precision single point positioning performance[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2021,41(04):357-361.
- [18]邓远帆,郭斐,张小红,等.北斗三号卫星多频多通道差分码偏差估计与分析[J].测绘学报,2021,50(04):448-456.
- Deng Yuanfan,Guo Fei,Zhang Xiaohong, et al.Beidou-3 satellite multi-frequency

- and multi-channel differential code bias estimation and analysis[J].*Journal of Surveying and Mapping*,2021,50(04):448-456.
- [19] Baocheng Zhang, Peter J. G. Teunissen, Yunbin Yuan et al. A modified carrier-to-code leveling method for retrieving ionospheric observables and detecting short-term temporal variability of receiver differential code biases[J]. *Journal of Geodesy*,2019,93(1):
- [20] Baocheng Zhang, Peter J. G. Teunissen, Yunbin Yuan. On the short-term temporal variations of GNSS receiver differential phase biases[J]. *Journal of Geodesy*,2017,91(5):
- [21] 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/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*:1-14[2022-03-13].
- Yuan Haijun, Zhang zhetao, he Xiufeng, et al Stability analysis of differential code deviation of beidou-3 satellite and its influence on single point positioning [J / OL] *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*: 1-14 [2022-03-13].
- [22] 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(04):520-529.
- Xu Lei, Chang Guobin, Gao Jingxiang, et al BDS inter-frequency deviation estimation model with closure constraint [J] *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2021,46 (04): 520-529.
- [23] 林高宇, 王磊, 何飞扬, 等. Swarm 低轨卫星星座的 GPS 接收机差分码偏差估计[J/OL]. *武汉大学学报(信息科学版)*:1-7[2022-03-13].
- Lin Gaoyu, Wang Lei, he Feiyang, et al Differential code deviation estimation of GPS receiver for swarm LEO satellite constellation [J / OL] *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*: 1-7 [2022-03-13].
- [24] 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌等. 基于 GPS 双频原始观测值的精密单点定位算法及应用[J]. *测绘学报*,2010,39(05):478-483.
- BaochengZhang, JiKun Ou, Yunbin Yuan et al. Precise single-point positioning algorithm and application based on GPS dual-frequency original observations[J]. *Journal of Surveying and Mapping*,2010,39(05):478-483

## Research on the Influence of MGEX Differential Code Bias Products on BDS-3 Pseudorange Single Point Positioning

Hu Zhuoming<sup>1</sup> Yuan Haijun<sup>1</sup> He Xiufeng<sup>1</sup> Zhang Zhetao<sup>1</sup> Wang Jin<sup>2</sup>

1 School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100

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

**Abstract:** In order to study the influence of different differential code bias (DCB) products on BDS-3 pseudorange single-point positioning, the BDS-3 single-frequency and dual-frequency ionospheric-free combined pseudo-range single-point positioning satellite-side DCB correction model was derived, based on the two DCB products released by the Multi-GNSS Experiment (MGEX), the Chinese Academy of Sciences (CAS) and the German Aerospace Center (DLR), combined with the BDS-3 measured data from the International GNSS Service (The International GNSS Service, IGS) stations evenly distributed in different latitudes around the world for 7 days of B1I, B1C and B2a single frequency and B1C/B2a, B1I/B3I two commonly used non-ionospheric combined pseudorange single-point positioning accuracy for comparison and analysis. The results show that in the three Lfrequencies of B1I, B1C, and B2a and the two combinations of B1C/B2a and B1I/B3I, the positioning accuracy of CAS products after correction is better than that of DLR products as a whole.

**Keywords:** BeiDou-3 satellite; differential code deviation; pseudo-range single-point positioning; positioning accuracy; ionospheric-free combination

**First author:** HU Zhuoming, master, specializes in precision positioning. 1360162379@qq.com

**Corresponding author:** HE Xiufeng, doctor, professor. Xfhe@hhu.edu.cn

网络首发:

标题: MGEX差分码偏差产品对BDS-3伪距单点定位的影响研究

作者: 胡倬铭, 袁海军, 何秀凤, 章浙涛, 王进

DOI: 10.13203/j.whugis20210454

收稿日期: 2022-08-18

引用格式:

胡倬铭, 袁海军, 何秀凤, 等. MGEX差分码偏差产品对BDS-3伪距单点定位的影响研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210454 (Hu Zhuoming, Yuan Haijun, He Xiufeng, et al. Research on the Influence of MGEX Differential Code Bias Products on BDS-3 Pseudo-range Single Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210454)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

估计接收机差分码偏差的GPS/BDS非组合精密单点定位模型

张辉, 郝金明, 刘伟平, 周蕊, 田英国

武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(4): 495-500, 592

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20170119>

