

卫星差分码偏差对北斗三号双频精密单点定位的影响

杜彦君¹, 贾小林^{2*}, 姚顽强¹, 许 瑾³

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054;
3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为探讨北斗三号系统不同频点组合卫星差分码偏差(differential code bias, DCB)对精密单点定位(PPP)的影响, 推导北斗三号系统不同频点无电离层组合卫星端 DCB 改正模型, 并基于 MGEX 跟踪站连续 7 天 4 站的观测数据按 7 种不同双频组合进行 DCB 改正实验。结果表明, DCB 改正对 PPP 精度在最初的历元有明显提升, 有助于滤波的收敛及提高单天解的均方根, 但对于最终定位精度无明显提升。B2a/B3I 及 B2b/B3I 组合定位精度及收敛速度明显低于其他组合, DCB 改正后有所提升。其他 5 种组合改正后定位精度及收敛时间相当: 静态 PPP 单天解均方根在 E、N 和 U 方向约为 5.50 cm、2.50 cm 和 6.25 cm, 较未改正前提升 20%~65%; 平均收敛时间为 38 min, 提升约 6%; 动态 PPP 平均收敛时间为 59 min, 提升约 20%; 最终定位精度水平方向优于 5 cm, 高程方向优于 7 cm。

关键词:北斗三号系统; 差分码偏差; 精密单点定位; 精度; 收敛时间

中图分类号: P228 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1001-2486(2024)01-042-09



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of satellite differential code bias on BDS-3 dual-frequency precise point positioning

DU Yanjun¹, JIA Xiaolin^{2*}, YAO Wanqiang¹, XU Jin³

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

3. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To explore the influence of BDS-3 (BeiDou navigation satellite system phase III) different frequency combination satellite DCB (differential code bias) on PPP (precise point positioning), the BDS-3 different frequency ionospheric-free combined satellite DCB correction model was derived and performed DCB correction experiments by seven different dual-frequency combinations based on the observation data of four MGEX stations during seven consecutive days. The results show that the DCB correction has a significant improvement of the PPP accuracy in the initial epoch, which helped to converge the filtering and improve the RMS of the single-day solution, but weakly in the final positioning accuracy. Although the positioning accuracy of the B2a/B3I and B2b/B3I combinations' convergence speed are considerably thinner than other combinations, it still enhances after DCB correction. Otherwise, the positioning accuracy and convergence time of the other 5 combinations are equivalent after correction. The RMS of the static PPP single-day solution is about 5.50 cm, 2.50 cm, and 6.25 cm in the E, N, and U directions, which are approximately 20%~65% higher than before. The average convergence time, an increase of about 6%, is 38 minutes. And the kinematic PPP, an increase of about 20%, is 59 minutes. The final positioning accuracy is better than 5 cm in the horizontal component and 7 cm in the elevation component.

Keywords: BDS-3; differential code bias; precise point positioning; accuracy; convergence time

北斗三号卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system phase III, BDS-3)已正式开通服务, 相较于 BDS-2 在空间信号、星座设计、信号体制等方面都有所改进, 并能为全球用户提供高精度、全天候的定位、导航、授时及短报文等服务^[1-4]。

BDS-3 包含 B1C(1 575.42 MHz)、B1I(1 561.098 MHz)、B2a(1 176.45 MHz)、B2b(1 207.14 MHz)和 B3I(1 268.52 MHz)5 个频率信号, 其中 B1C、B2a 与 B2b 是新增的频率^[5-6]。

差分码偏差(differential code bias, DCB)是不

收稿日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41874041)

第一作者: 杜彦君(1997—), 男, 贵州贵阳人, 博士研究生, E-mail: duyanjun@stu.xust.edu.cn

*通信作者: 贾小林(1972—), 男, 四川南充人, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: 13891907401@139.com

同频率或同一频率不同测距码由卫星和接收机硬件造成的时延差,在进行精密单点定位(precise point positioning, PPP)解算时,接收机端 DCB 通常归算到接收机钟差中进行参数估计,而卫星端 DCB 则需要改正^[7-8]。文献[9]对 BDS-3 不同频点进行双频无电离层组合定位解算,除 B1I/B1C 因频率接近、观测噪声大无法进行定位外,其余频点组合均能进行定位;文献[10]推导了 BDS B1、B2、B3 频点单、双频无电离层组合 PPP DCB 改正公式,并分析其对定位精度的影响;文献[11]对 BDS 不同伪距组合的 DCB 改正模型进行了单点定位分析;文献[12]分析了 BDS 双、三频 TGD 及 DCB 改正模型对单点定位精度的影响。

目前, BDS PPP 卫星端 DCB 研究多在于分析 B1、B2、B3 频点,对于 BDS-3 新频点,已有文献对 B1C/B2a 组合进行改正或分析双、三频非组合 DCB 改正的影响^[13-14],但其他频点组合的 DCB 研究较少。基于此,为进一步分析 DCB 改正对定位性能的影响,本文推导了 BDS-3 不同频点无电离层组合的卫星端 DCB 改正模型,采用多模 GNSS 实验计划(multi-GNSS experiment, MGEX)跟踪站数据进行 PPP 解算,从定位偏差的均方根(root mean square, RMS)、最终定位精度和收敛时间等方面综合分析 BDS-3 不同频点组合的 DCB 改正对其定位的影响。

1 观测方程及 DCB 改正模型

1.1 PPP 观测方程

PPP 解算中常用双频无电离层组合消除电离层一阶项的误差,本文采用不同频率的伪距及载波相位观测值进行组合,其基本观测方程如式(1)和式(2)所示。

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + b_{r,IF} - b_{IF}^s + \varepsilon_{r,IF}^s \quad (1)$$

$$L_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_r^s + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + \lambda_{IF}(B_{r,IF} - B_{IF}^s) + \xi_{r,IF}^s \quad (2)$$

其中: $P_{r,IF}^s$ 和 $L_{r,IF}^s$ 分别为无电离层组合的伪距及载波相位观测值; s 和 r 分别代表卫星和接收机;IF表示两频点无电离层组合; ρ_r^s 表示卫星至接收机之间的几何距离; c 为真空中的光速; dt^s 和 dt_r 分别为卫星及接收机钟差; T_r^s 为对流层延迟; b_{IF}^s 和 $b_{r,IF}$ 分别为卫星端及接收机端的伪距硬件延迟; λ_{IF} 为载波波长; $N_{r,IF}^s$ 为模糊度; B_{IF}^s 和 $B_{r,IF}$ 分别为卫星端和接收机端相位延迟; $\varepsilon_{r,IF}^s$ 和 $\xi_{r,IF}^s$ 分别为

伪距及载波观测噪声。

1.2 BDS-3 卫星端 DCB 改正模型

目前,德国地学研究中心发布的 BDS-3 GBM 精密钟差产品是基于 B1I、B3I 无电离层组合观测量得到的,故 B1I 与 B3I 组合时不需要改正,而在其他频点组合计算时应改正,使钟差产品与观测量保持一致。

GBM 精密产品中的卫星钟差为:

$$\tilde{dt}^s = dt^s - \frac{f_{B1I}^2 \cdot \tau_{B1I}^s - f_{B3I}^2 \cdot \tau_{B3I}^s}{f_{B1I}^2 - f_{B3I}^2} \quad (3)$$

式中: \tilde{dt}^s 为精密产品中的卫星钟差, f_{B1I} 和 f_{B3I} 分别为 B1I 和 B3I 的频率, τ_{B1I}^s 和 τ_{B3I}^s 分别为 B1I 和 B3I 频点的卫星端硬件延迟参数。

若采用频点 a 与 b 进行组合,则包含卫星码硬件延迟的卫星钟差如式(4)所示。

$$\overline{dt}_{a,b}^s = dt^s - \frac{f_a^2 \cdot \tau_a^s - f_b^2 \cdot \tau_b^s}{f_a^2 - f_b^2} \quad (4)$$

结合精密产品,将其归算到 B1I 和 B3I 组合的基准下,有:

$$\overline{dt}_{a,b}^s = \overline{dt}^s + \bar{b}_{a,b}^s \quad (5)$$

式中, $\bar{b}_{a,b}^s$ 为结合精密产品的 a 与 b 频点组合的卫星端伪距硬件延迟,其具体表达式为:

$$\bar{b}_{a,b}^s = \frac{f_{B1I}^2 \cdot \tau_{B1I}^s - f_{B3I}^2 \cdot \tau_{B3I}^s}{f_{B1I}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_a^2 \cdot \tau_a^s - f_b^2 \cdot \tau_b^s}{f_a^2 - f_b^2} \quad (6)$$

中国科学院目前发布的 DCB 产品已支持 BDS-3,其具体定义如式(7)所示。

$$\begin{cases} DCB_{C1X-C5X} = \tau_{B1C}^s - \tau_{B2a}^s \\ DCB_{C21-C6I} = \tau_{B1I}^s - \tau_{B3I}^s \\ DCB_{C1X-C6I} = \tau_{B1C}^s - \tau_{B3I}^s \\ DCB_{C1X-C7Z} = \tau_{B1C}^s - \tau_{B2b}^s \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),即可得 BDS-3 各频点无电离层组合卫星端 DCB 改正公式,如式(8)所示。

2 实验与分析

2.1 数据来源及处理方案

为分析 BDS-3 卫星端 DCB 改正对 PPP 的影响,本文采用 2021 年 6 月 13 日至 20 日(年积日:第 164 ~ 170 天)连续 7 天 4 个 MGEX 跟踪站(CHPG、GODS、LPGS、WUH2)的 BDS 连续 24 h 观测数据进行不同频点组合的 PPP 解算,数据采样率为 30 s,截止高度角为 7°,精密产品采用德国地学研究中心发布的 GBM 精密星历和精密钟差,测站真实坐标从国际 GNSS 服务组织(international GNSS

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{b}_{B1C, B2a}^s &= \frac{f_{B11}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_{B2a}^2 \cdot DCB_{C1X-C5X}}{f_{B1C}^2 - f_{B2a}^2} - DCB_{C1X-C6I} \\ \bar{b}_{B1C, B2b}^s &= \frac{f_{B2b}^2 \cdot DCB_{C1X-C7Z}}{f_{B1C}^2 - f_{B2b}^2} - \frac{f_{B11}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - DCB_{C1X-C6I} \\ \bar{b}_{B1I, B2a}^s &= \frac{f_{B3I}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_{B2a}^2 \cdot (DCB_{C21-C6I} - DCB_{C1X-C6I} + DCB_{C1X-C5X})}{f_{B11}^2 - f_{B2a}^2} \\ \bar{b}_{B1I, B2b}^s &= \frac{f_{B3I}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_{B2b}^2 \cdot (DCB_{C21-C6I} - DCB_{C1X-C6I} + DCB_{C1X-C7Z})}{f_{B11}^2 - f_{B2b}^2} \\ \bar{b}_{B1C, B3I}^s &= \frac{f_{B11}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_{B1C}^2 \cdot DCB_{C1X-C6I}}{f_{B1C}^2 - f_{B3I}^2} \\ \bar{b}_{B2a, B3I}^s &= \frac{f_{B11}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_{B2a}^2 \cdot (DCB_{C1X-C6I} - DCB_{C1X-C5X})}{f_{B2a}^2 - f_{B3I}^2} \\ \bar{b}_{B2b, B3I}^s &= \frac{f_{B11}^2 \cdot DCB_{C21-C6I}}{f_{B11}^2 - f_{B3I}^2} - \frac{f_{B2b}^2 \cdot (DCB_{C1X-C6I} - DCB_{C1X-C7Z})}{f_{B2b}^2 - f_{B3I}^2} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

service, IGS) 发布的 SNX 文件中获得, DCB 改正参数采用中国科学院发布的 BSX 文件。

由于 BDS-3 中地球同步轨道 (geosynchronous orbit, GEO) 卫星不播发 B1C、B2a、B2b 信号, 所以实验只使用 C19 ~ C46 进行解算, 已有文献表明 B1C/B1I 组合观测噪声大, 不适合进行定位解算^[9]。本文在前期实验中发现 B2a/B2b 同样不适合定位, 故不采用此两种组合进行实验。在数据处理时首先对 B1I/B3I 组合进行静态 PPP 解算并分析其精度, 之后采用两种不同数据处理方案。方案 1: 对 B1C/B2a、B1C/B2b、B1I/B2a、B1I/B2b、B1C/B3I、B2a/B3I 和 B2b/B3I 共 7 种不同的双频无电离层组合进行静态 PPP 解算, 动态 PPP 解算时采用前 5 种频点组合, 不考虑卫星端的 DCB 改正 (NO-DCB); 方案 2: 对方案 1 中不同组合在解算中加入卫星端 DCB 改正, 其余处理策略均相同。

2.2 可见卫星数及位置精度因子

分析了 BDS-3 的可见卫星数及位置精度因子 (position dilution of precision, PDOP)。图 1 为 GODS 站年积日第 168 天 BDS-3 可见卫星及 PDOP 值。由图 1 可得: BDS-3 的可见卫星数为 5 ~ 11, 平均为 7.4; PDOP 在 1.4 ~ 2.7 之间, 平均约为 2.3。

2.3 静态 PPP 精度分析

按照方案 1 与方案 2 进行 BDS-3 静态双频 PPP 实验, 将单天解结果坐标与真值作差后计算其 RMS, 收敛时间为连续 20 个历元 *E*、*N*、*U* 三个方向的定位偏差均小于 10 cm 所需的时间, 将 24 h 解最后 10 个历元定位偏差的 RMS 视为最终

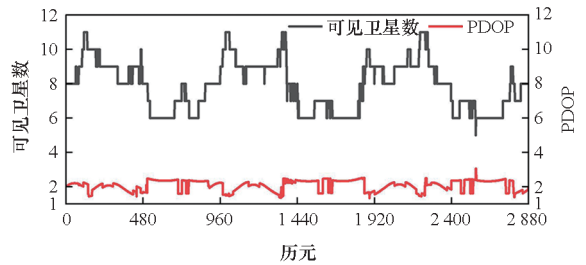


图 1 BDS-3 可见卫星数及 PDOP

Fig. 1 BDS-3 number of visible satellites and PDOP

定位精度。图 2 为 GODS 站年积日第 168 天 B1I/B3I 组合 24 h 定位误差时间序列图。

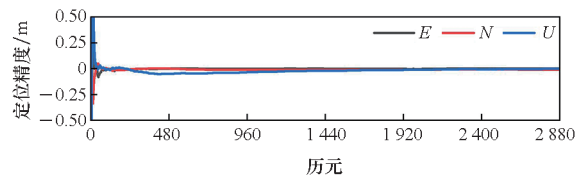
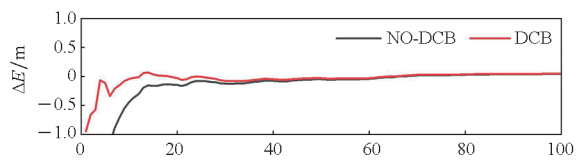


图 2 B1I/B3I 24 h 定位误差

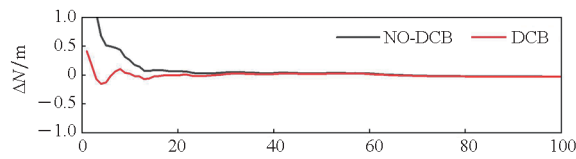
Fig. 2 24-hour positioning error of B1I/B3I

由图 2 可以看出, B1I/B3I 组合收敛后坐标波动平缓, 数据分析得其收敛时间约为 34.7 min, 最终定位精度在水平及高程方向上均优于 2 cm。

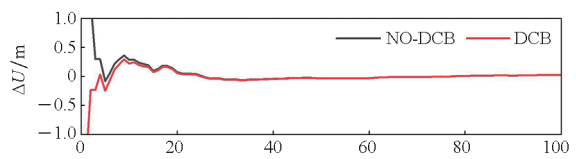
图 3 ~ 9 给出了方案 1 与方案 2 中具有代表性的 GODS 站第 168 天在 *E*、*N*、*U* 三个方向上前 100 个历元的坐标偏差时间序列, 图 10 为方案 1 与方案 2 的最终定位精度, 表 1 统计了方案 1 与方案 2 在 *E*、*N*、*U* 方向上单天解定位偏差的 RMS, 表 2 根据文献[15]计算了方案中 7 种 BDS-3 双频无电离层组合系数和噪声放大因子。



(a) *E*



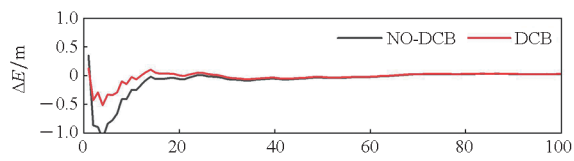
(b) *N*



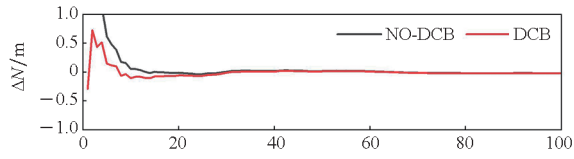
(c) *U*

图 3 B1C/B2a 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

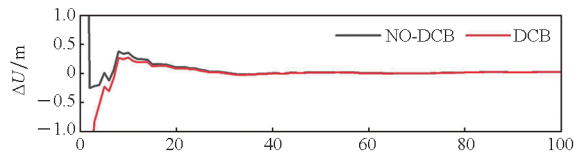
Fig. 3 Positioning error of the first 100 epochs between B1C/B2a combination static PPP scheme 1 and scheme 2



(a) *E*



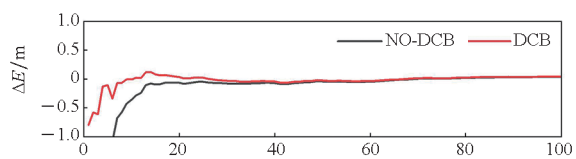
(b) *N*



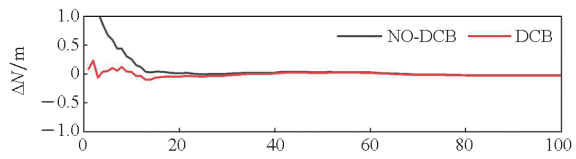
(c) *U*

图 5 B1I/B2a 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

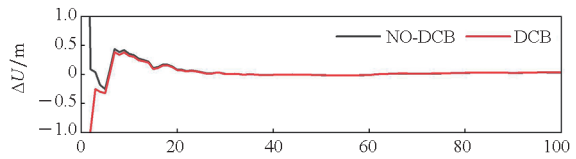
Fig. 5 Positioning error of the first 100 epochs between B1I/B2a combination static PPP scheme 1 and scheme 2



(a) *E*



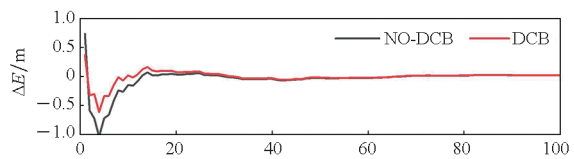
(b) *N*



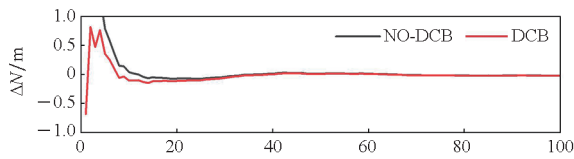
(c) *U*

图 4 B1C/B2b 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

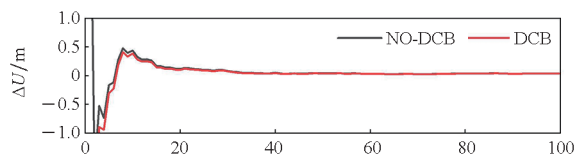
Fig. 4 Positioning error of the first 100 epochs between B1C/B2b combination static PPP scheme 1 and scheme 2



(a) *E*



(b) *N*



(c) *U*

图 6 B1I/B2b 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

Fig. 6 Positioning error of the first 100 epochs between B1I/B2b combination static PPP scheme 1 and scheme 2

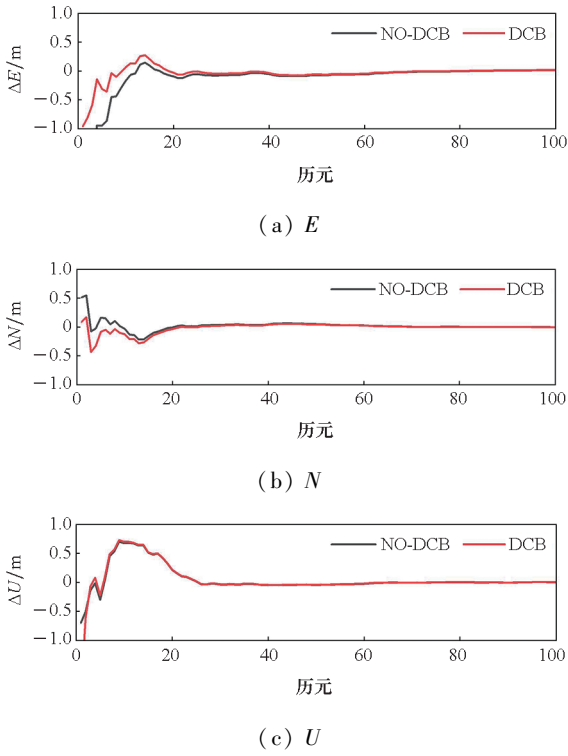


图 7 B1C/B3I 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

Fig. 7 Positioning error of the first 100 epochs between B1C/B3I combination static PPP scheme 1 and scheme 2

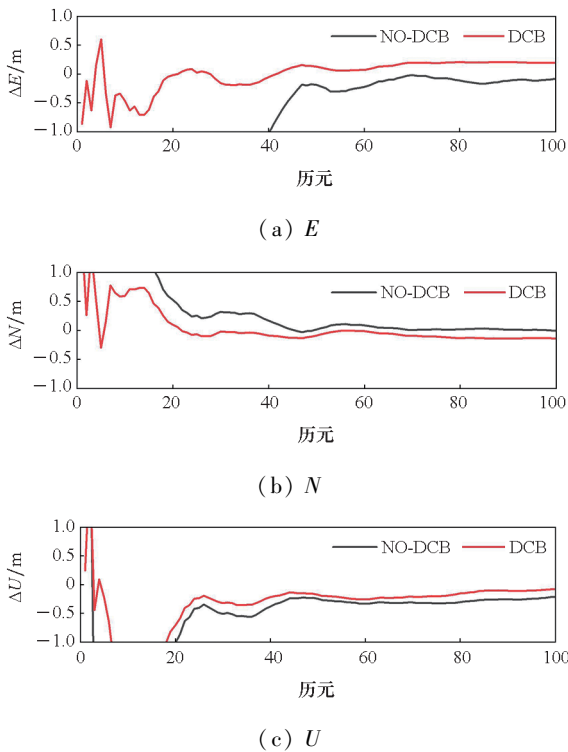


图 8 B2a/B3I 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

Fig. 8 Positioning error of the first 100 epochs between B2a/B3I combination static PPP scheme 1 and scheme 2

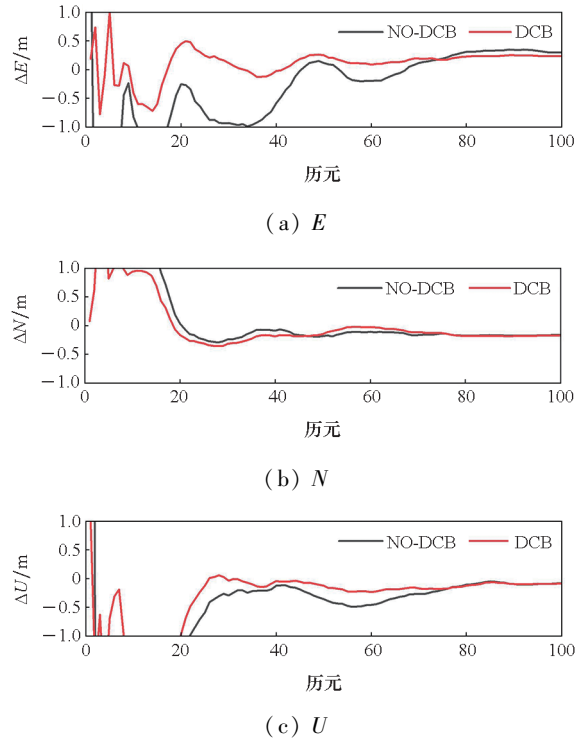
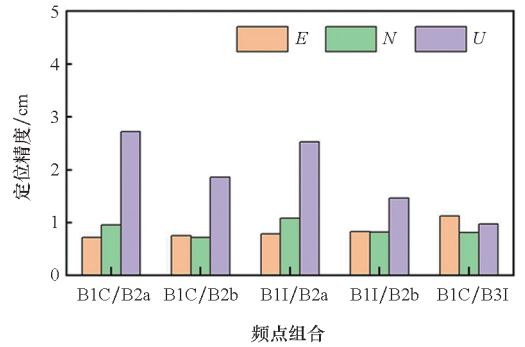


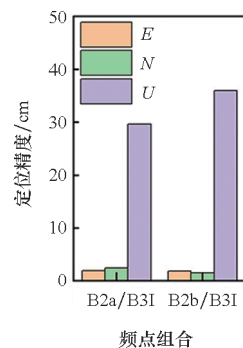
图 9 B2b/B3I 组合静态 PPP 方案 1 与方案 2 前 100 个历元偏差时间序列

Fig. 9 Positioning error of the first 100 epochs between B2b/B3I combination static PPP scheme 1 and scheme 2



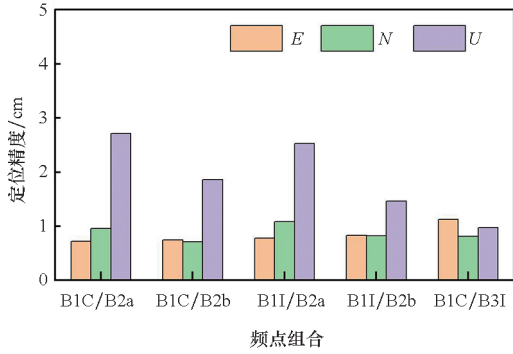
(a) 方案 1 B1C/B2a、B1C/B2b、B1I/B2a、B1I/B2b 和 B1C/B3I 组合

(a) Combination of B1C/B2a, B1C/B2b, B1I/B2a, B1I/B2b and B1C/B3I in scheme 1



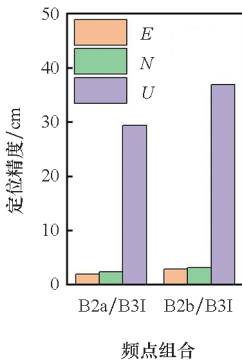
(b) 方案 1 B2a/B3I 和 B2b/B3I 组合

(b) Combination of B2a/B3I and B2b/B3I in scheme 1



(c) 方案 2 B1C/B2a、B1C/B2b、B1I/B2a、B1I/B2b 和 B1C/B3I 组合

(c) Combination of B1C/B2a, B1C/B2b, B1I/B2a, B1I/B2b and B1C/B3I in scheme 2



(d) 方案 2 B2a/B3I 和 B2b/B3I 组合

(d) Combination of B2a/B3I and B2b/B3I in scheme 2

图 10 静态 PPP 最终定位精度

Fig. 10 Static PPP final positioning accuracy

从图 3 ~ 10 中可得,7 种不同频点组合的 PPP 在加入 DCB 改正后,前 100 个历元的残差值小于未改正前,特别是对于最初的历元,在进行 DCB 改正后精度得到明显提升,有助于滤波的收敛,缩短了收敛时间,同时减小了单天解定位误差的平均 RMS,但对于最终定位精度而言,DCB 改正前后没有明显提升。

由图 10 及表 1 可得:

1) B2a/B3I 组合及 B2b/B3I 组合定位精度较差,其 E 、 N 和 U 方向 RMS 远大于其余组合,特别是 U 方向,即使是最终定位精度也难以达到 cm 级,并且在解算过程中存在部分历元缺失。经 DCB 改正后,RMS 有所提升,但相较其余组合仍然有明显差距。由于收敛前定位误差较大,且滤波收敛时间较长,RMS 大幅增加,对于最终定位误差,水平方向能达到 cm 级, U 方向仅能达到 dm 级。对于该两种频率组合定位精度不佳,可能的原因是频率组合的噪声放大因子过大,由表 2 可知,B2a/B3I 和 B2b/B3I 组合的噪声放大因子分别为 9.43 和 14.29,且 B2a/B3I 的定位精度优于 B2b/B3I,而其余 5 种频点组合的噪声放大因子仅为 2 ~ 4,故在 BDS-3 双频无电离层组合时,不建议使用该两种频点组合。

表 1 静态 PPP 方案 1 与方案 2 单天解 RMS

Tab. 1 The average RMS of single-day solution for static PPP scheme 1 and scheme 2

单位:cm

方案	方向	B1C/B2a	B1C/B2b	B1I/B2a	B1I/B2b	B1C/B3I	B2a/B3I	B2b/B3I
方案 1	E	13.42	14.28	10.64	10.64	9.14	48.37	92.06
	N	6.00	6.20	5.23	5.08	3.86	19.28	34.49
	U	14.37	15.63	10.63	11.22	8.67	59.63	101.57
方案 2	E	4.84	4.83	5.07	5.23	7.55	23.26	35.56
	N	2.29	2.18	2.58	2.68	2.78	9.71	49.18
	U	5.43	6.12	6.39	6.78	6.53	35.25	37.49

表 2 BDS-3 无电离层组合系数和噪声放大因子

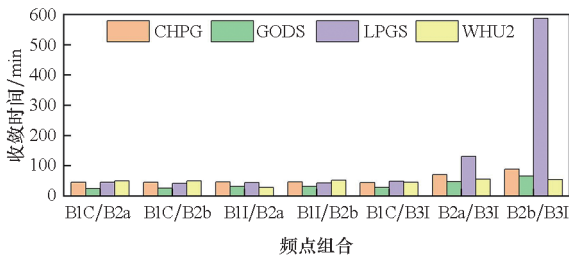
Tab. 2 Ionosphere-free coefficients and noise amplification factors for BDS-3

项目	B1C/B2a	B1C/B2b	B1I/B2a	B1I/B2b	B1C/B3I	B2a/B3I	B2b/B3I
系数 1	2.26	2.42	2.31	2.49	2.84	7.15	10.59
系数 2	-1.26	-1.42	-1.31	-1.49	-1.84	-6.15	-9.59
噪声放大因子	2.59	2.81	2.66	2.90	3.39	9.43	14.29

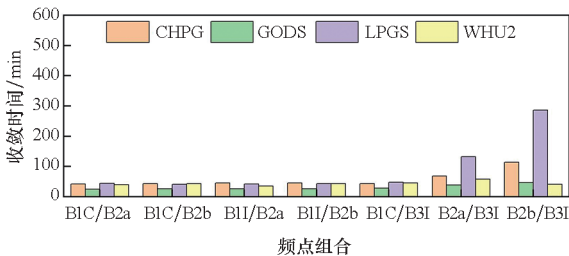
2) 对于前 5 种频点组合, B1C/B2a 组合经 DCB 改正后 E 、 N 和 U 方向单天解 RMS 分别提升 63.9%、61.8% 和 62.2%, B1C/B2b 组合经 DCB 改正后 E 、 N 和 U 方向单天解 RMS 分别提升 66.2%、64.8% 和 60.8%, B1I/B2a 组合经 DCB 改正后 E 、 N 和 U 方向单天解 RMS 分别提升 52.3%、50.7% 和 39.9%, B1I/B2b 组合经 DCB 改正后 E 、 N 和 U 方向单天解 RMS 分别提升 50.8%、47.2% 和 39.6%, B1C/B3I 较其余 4 种组合提升较少, 经 DCB 改正后 E 、 N 和 U 方向单天解 RMS 分别提升 17.4%、28.0% 和 24.7%。可见, 在加入 DCB 改正模型后, 所有频点组合的单天解 RMS 均有明显提升, 除 B1C/B3I 提升约 20% 外, 其余 4 种组合提升率在 40% ~ 65%, 但 DCB 改正仅对前 100 个左右历元有明显的精度提升, 对于最终定位精度而言, DCB 改正前后未有明显变化, 5 种频点组合的最终定位精度相当, 水平方向优于 2 cm, 高程方向优于 3 cm。

2.4 静态 PPP 收敛时间分析

为分析 DCB 改正前后定位的收敛时间, 图 11 给出了静态 PPP 方案 1 与方案 2 中各测站的平均收敛时间, 表 3 统计了方案 1 与方案 2 的平均收敛时间。



(a) 方案 1
(a) Scheme 1



(b) 方案 2
(b) Scheme 2

图 11 静态 PPP 方案 1 与方案 2 中各测站平均收敛时间
Fig. 11 The average convergence time of each station in static PPP scheme 1 and scheme 2

由于 B2a/B3I、B2b/B3I 组合定位误差较大, 特别是 U 方向难以收敛, 故在统计时间时仅考虑

表 3 静态 PPP 方案 1 与方案 2 平均收敛时间

Tab. 3 The average convergence time of static PPP in scheme 1 and scheme 2

组合	收敛时间/min		方案 2 较方案 1 提升率/%
	方案 1	方案 2	
B1C/B2a	41.8	37.8	9.6
B1C/B2b	40.9	38.6	5.6
B1I/B2a	37.8	37.4	1.1
B1I/B2b	43.5	39.2	9.9
B1C/B3I	41.3	41.0	0.7
B2a/B3I	76.4	74.4	2.6
B2b/B3I	199.1	126.3	36.6

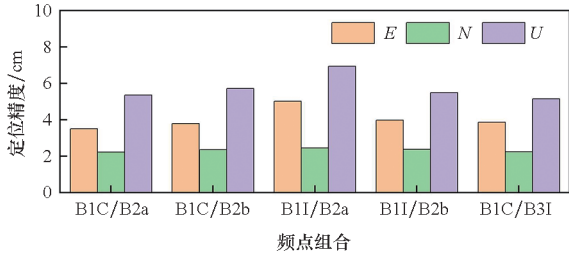
E 、 N 方向, LPGS 站在该两种频点组合中定位精度差, 收敛时间较长, 其原因可能是多方面的: LPGS 站平均可见卫星数为 6.0, 低于其余三站均值 7.7。对 LPGS B2b 和 B3I 频点数据进行质量分析后, 数据完整率稍低, 卫星高度角大于 10° 时, B2b 和 B3I 数据完整率分别为 94.34% 和 93.67%, B3I 频点多路径效应和伪距噪声稍大, 其多路径 RMS 为 0.38 m, 伪距噪声 RMS 为 0.53 m, 且本身 B2a/B3I 和 B2b/B3I 组合噪声放大因子过大, 定位效果不佳, 导致收敛时间长。方案 2 较方案 1 在收敛时间上有所提升, 其中 B2b/B3I 组合提升约为 36%, B1C/B2a 与 B1I/B2b 提升约 10%。整体而言, 除 B2a/B3I、B2b/B3I 组合收敛时间较长外, 经 DCB 改正后的 BDS-3 双频无电离层组合 PPP 的收敛时间约 38 min, 较未改正前平均提升约 6%。

2.5 动态 PPP 性能分析

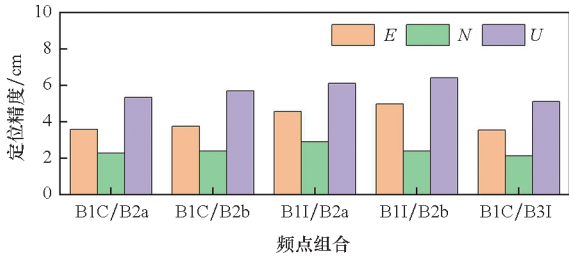
动态 PPP 具有更广泛的应用前景和价值, 为进一步分析 DCB 改正对动态 PPP 性能的影响, 进行了仿动态实验。因 LPGS 站数据质量不佳, B2a/B3I 和 B2b/B3I 组合观测噪声因子过大, 实验仅采用其余三站进行 5 种频点组合解算。以 E 、 N 、 U 方向均连续 10 个历元小于 20 cm 视为动态 PPP 收敛。

图 12 为动态 PPP 方案 1 与方案 2 最终定位精度, 表 4 统计了动态 PPP 方案 1 与方案 2 的平均收敛时间。

由图 12 及表 4 可得, 方案 2 较方案 1 收敛时间均有所提升, 除 B1C/B3I 提升 4.0% 外, 其余组合提升 18% ~ 27%, 平均收敛时间为 59 min, 较未改正前平均提升约 20%。最终定位精度方面,



(a) 方案 1
(a) Scheme 1



(b) 方案 2
(b) Scheme 2

图 12 动态 PPP 最终定位精度

Fig. 12 Kinematic PPP final positioning accuracy

表 4 动态 PPP 方案 1 与方案 2 平均收敛时间

Tab. 4 The average convergence time of kinematic PPP in scheme 1 and scheme 2

组合	收敛时间/min		方案 2 较方案 1 提升率/%
	方案 1	方案 2	
B1C/B2a	74.8	61.3	18.0
B1C/B2b	80.7	58.9	27.0
B1I/B2a	71.4	53.7	24.8
B1I/B2b	72.0	54.3	24.6
B1C/B3I	67.6	64.9	4.0

各频点间定位精度相当,均是水平方向优于高程方向,方案 2 较方案 1 变化不明显,最大差异约为 0.01 m,最终定位精度水平方向优于 5 cm,高程方向优于 7 cm。

3 结论

本文推导了 BDS-3 不同频点卫星端 DCB 改正模型,利用 MGEX 数据中心连续 7 天 4 站的观测数据及德国地学研究中心提供的精密星历及钟差按两种不同方案进行双频无电离层组合 PPP 实验,分析了 DCB 改正前后对 BDS-3 PPP 性能影响,结论如下:

1) BDS-3 可见卫星数约为 5 ~ 11,平均为 7.4,PDOP 在 1.4 ~ 2.7 间,平均约为 2.3。

B1I/B3I组合静态 PPP 滤波平缓,收敛时间约 34.7 min,最终定位精度在 E、N 和 U 方向上均优于 2 cm。

2) B2a/B3I 及 B2b/B3I 组合定位精度及收敛速度较其他组合有明显差距,其 E、N 方向收敛前定位误差较大,且收敛时间长,静态 PPP 最终能收敛至 cm 级,而 U 方向只能达到 dm 级。该两种频点组合定位精度不佳的原因可能与无电离层组合噪声放大有关,B2a/B3I 和 B2b/B3I 组的噪声放大因子分别为 9.43 和 14.29,远大于其余 5 种频点组合的 2 ~ 4,在 BDS-3 无电离层组合时,不建议使用这两种频点组合。

3) B1C/B2a、B1C/B2b、B1I/B2a、B1I/B2b 和 B1C/B3I 组合间定位精度和收敛时间相差不大,DCB 改正对最初的历元精度提高明显,有助于滤波的收敛,但最终定位精度没有明显提升。静态 PPP 单天解的 RMS 在 E、N 和 U 方向约为 5.50 cm、2.50 cm 和 6.25 cm,较未改正前提升 20% ~ 65%,收敛时间平均为 38 min,较未改正前平均提升约 6%,最终定位精度水平方向优于 2 cm,高程方向优于 3 cm;动态 PPP 收敛时间平均为 59 min,较未改正前平均提升约 20%,最终定位精度水平方向优于 5 cm,高程方向优于 7 cm。

参考文献 (References)

[1] 杨宇飞,杨元喜,胡小工,等.北斗三号卫星两种定轨模式精度比较分析[J].测绘学报,2019,48(7):831-839.
YANG Y F, YANG Y X, HU X G, et al. Comparison and analysis of two orbit determination methods for BDS-3 satellites [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 831-839. (in Chinese)

[2] SHI J B, OUYANG C H, HUANG Y S, et al. Assessment of BDS-3 global positioning service: ephemeris, SPP, PPP, RTK, and new signal [J]. GPS Solutions, 2020, 24(3): 81.

[3] 许扬胤,杨元喜,曾安敏,等.北斗三号全球系统空间信号精度评估分析[J].大地测量与地球动力学,2020,40(10):1000-1006.
XU Y Y, YANG Y X, ZENG A M, et al. Accuracy assessment of signal in space of BDS-3 global system [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(10): 1000-1006. (in Chinese)

[4] 陶清瑞,贾小林,王利军,等. GNSS 空间信号精度的研究分析[J].测绘工程,2021,30(1):24-29.
TAO Q R, JIA X L, WANG L J, et al. Analysis of GNSS spatial-signal accuracy [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(1): 24-29. (in Chinese)

[5] LI J L, YANG Y X, HE H B, et al. Benefits of BDS-3 B1C/B1I/B2a triple-frequency signals on precise positioning and ambiguity resolution [J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 100.

- [6] 刘九龙, 曹月玲, 胡小工. 北斗三号系统中轨道地球卫星伪距多路径误差分析和改正[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(4): 1-8.
LIU J L, CAO Y L, HU X G. Analysis and correction of BDS-3 MEO satellites pseudorange multipath error [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(4): 1-8. (in Chinese)
- [7] 赵东旭, 遼鹏, 谭诗腾, 等. 一种北斗卫星差分码偏差估计方法[J]. 测绘通报, 2016(5): 14-17.
ZHAO D X, TI P, TAN S T, et al. An estimating method of differential code biases for BeiDou satellites[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(5): 14-17. (in Chinese)
- [8] 赵庆, 高成发, 潘树国, 等. 基于 DCB 改正的 BDS/GPS/Galileo 多频单点定位精度分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 944-948.
ZHAO Q, GAO C F, PAN S G, et al. Accuracy analysis on BDS/GPS/Galileo multi-frequency SPP based on DCB correction [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(5): 944-948. (in Chinese)
- [9] 刘生锋, 杨文龙, 谷涛. BDS-3 双频组合精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报, 2021(3): 7-11, 17.
LIU S F, YANG W L, GU T. Accuracy analysis of BDS-3 dual frequency combination precision point positioning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(3): 7-11, 17. (in Chinese)
- [10] 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.
ZENG T, SUI L F, BAO Y D, 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. (in Chinese)
- [11] 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 S M, DANG Y M, WANG H, et al. The effect of BeiDou DCB correction on single point positioning [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(10): 10-15. (in Chinese)
- [12] 李坤, 王潜心, 龚佑兴, 等. 基于 TGD/DCB 改正的 BDS 多频单点定位精度分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(5): 685-690.
LI K, WANG Q X, GONG Y X, et al. Accuracy analysis on BDS multi-frequency point positioning based on TGD/DCB corrections [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(5): 685-690. (in Chinese)
- [13] 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(4): 357-361.
WANG L J, JIAO W H, JIA X L, et al. Comparative analysis of BDS-3 precise point positioning performance [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(4): 357-361. (in Chinese)
- [14] 张辉. BDS/GPS 组合精密单点定位关键技术研究[D]. 战略支援部队信息工程大学, 2019.
ZHANG H. Research on the key technologies of BDS/GPS precise point positioning [D]. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [15] TEGEDOR J, ØVSTEDAL O. Triple carrier precise point positioning (PPP) using GPS L5 [J]. Survey Review, 2014, 46(337): 288-297.

(编辑: 梁慧, 杨琴)