

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.03.07

BDS-2 导航电文的 TGD 参数精度及其 对用户导航定位精度的影响

吴 竞^{1,2}, 唐成盼¹, 周善石¹, 胡小工¹, 董文丽¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 北斗二号 (BeiDou Navigation Satellite System-2, BDS-2) 卫星播发以 $B3$ 频点为基准的卫星钟差参数, 并播发 $B1$ 和 $B2$ 频点相对于 $B3$ 频点的群延迟 (time group delay, TGD) 参数。以差分码偏差 (differential code bias, DCB) 参数为基准, 计算 BDS-2 群延迟参数的精度。在计算过程中, 发现在 2017 年年积日 202 d 以前, 各颗卫星 $TGD1$ 参数精度较差, 与 $DCB1$ 参数互差在 2 ~4 ns 之间, $TGD2$ 与 $DCB2$ 的互差约为 0.5 ns。在 2017 年年积日 202—203 d 处, 所有卫星群延迟参数均发生明显跳变, 该跳变主要是因参与群延迟解算的北斗系统的接收机不再采用抗多径算法所致。跳变后, 群延迟参数与 MGEX (Multi-GNSS Experiment) 公布的差分码偏差参数的差值小于 0.5 ns, 与 GPS 卫星播发的群延迟参数精度接近。进一步利用实测数据计算了群延迟参数改正精度对用户导航定位精度的影响。结果表明, 使用跳变前的群延迟参数, 单频定位精度为 2.078 m, 双频定位 N 方向精度为 1.451 m, E 方向精度为 1.648 m, U 方向精度为 3.467 m; 使用跳变后的群延迟参数, 单频定位精度为 1.968 m, 双频定位 N 方向精度为 1.361 m, E 方向精度为 0.998 m, U 方向精度为 2.789 m, 在双频定位的 N, E, U 方向, 双频定位精度分别提升 6.2%, 39.4%, 19.5%。

关键词: 伪距偏差; 硬件延迟; 群延迟; 差分码偏差

中图分类号: P122 **文献标识码:** A

1 引言

卫星从发出信号至信号到达天线相位中心, 所花时间称为硬件时间延迟。因为同一卫星不同频点或者不同信号分量的发射链路并不相同, 所以不同频点或者信号分量之间存在 DCB 。IGS/MGEX 分析中心和导航电文分别播发 DCB 和 TGD 以消除不同频点或者信

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2018-12-25

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (41574029)

通讯作者: 周善石, sszhou@shao.ac.cn

号分量的发射时延差。 DCB 的精确确定对电离层电子总含量的解算、授时和定位都有重要意义。

就GPS系统而言，GPS系统导航电文和IGS精密钟差基准是L1和L2频点的P码无电离层组合。GPS双频用户无需改正 TGD 和 DCB ，而单频用户需要改正 TGD 和 DCB 后才能进行定位解算^[1]。王宁波等人^[2]通过计算发现，GPS广播的 TGD 精度高于0.5 ns。BDS-2播发B1, B2, B3共3个频点的信号，导航电文的钟差参数以B3频点为基准，为正确使用钟差参数，北斗广播星历给出 TGD_1 ，供B1频点的单频用户对钟差参数进行修正；还给出 TGD_2 ，供B2频点的单频用户对钟差进行修正^[3]。因此，B1和B2单频用户和双频用户均需使用 TGD 对伪距进行修正。BDS-2 TGD 最初使用的是发射前的出场标定参数。为反映卫星的实时在轨状态， TGD 会进行实时解算更新，首先利用实测数据获取B1与B3的双频伪距差和B2与B3的双频伪距差；再根据已知的电离层信息，同时求解出卫星和接收机的组合硬件延迟^[4]。 DCB 一般由GNSS数据处理机构事后处理得到，是供用户进行硬件延迟改正的事后精密产品。随着MGEX试验的顺利进行，目前全球配备新型接收机的测站有200多个，在全球范围内监测北斗系统，这为精确确定北斗的 DCB 参数提供了有力的保证。利用IGG- DCB 方法得到的北斗 DCB 参数精度为0.36 ns，稳定性指标为0.17 ns^[5]。Guo等人^[6]提出 DCB 参数计算的提升算法，用该算法计算得到的 DCB 参数精度为0.21 ns。目前，MGEX综合了多个机构计算得到的北斗 DCB ，并对外发布，精度高于0.3 ns^[4-5]。

MGEX提供的 DCB 精度较高，可作为计算 TGD 的基准。MGEX的 TGD 精度为2.6 ns，明显低于GPS卫星播发的 TGD 精度^[7]。DLR的 TGD 精度为1.2 ns，同样低于GPS卫星播发的 TGD 精度^[8]。BDS-2播发的导航电文存在偏差，该偏差是由广播电文中的 TGD 偏差造成的。将北斗广播星历偏差改正到 TGD 上，双频用户的单点定位精度将会提高，定位残差也将变小^[6]。

本文首先总结了北斗群延迟和差分码偏差参数的改正模型；随后计算了BDS-2卫星的 TGD 参数精度，并得到BDS-2卫星群延迟参数的跳变及精度提高情况；最后分析了群延迟参数跳变对定位精度的影响。

2 北斗 TGD/DCB 改正模型

2.1 伪距观测方程

在利用北斗卫星定位的过程中，北斗B1, B2, B3这3个频点简化的伪距表示如下：

$$P_1 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + I_1 - dt^s + D_{P1} \quad , \quad (1)$$

$$P_2 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \gamma I_1 - dt^s + D_{P2} \quad , \quad (2)$$

$$P_3 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \beta I_1 - dt^s + D_{P3} \quad . \quad (3)$$

其中， ρ 为星地之间的实际距离， dt_r 为由接收机钟差引起的伪距变化量， d_{trop} 为对流层

延迟引起的伪距变化量, I_1 为 $B1$ 频点由于电离层延迟引起的伪距变化量, $\gamma = f_1^2/f_2^2$, $\beta = f_1^2/f_3^2$ (f_1, f_2, f_3 分别表示 $B1, B2, B3$ 频点的频率), dt^s 为由卫星钟差引起的伪距变化量, D_{P1}, D_{P2}, D_{P3} 分别为 $B1, B2, B3$ 频点由于硬件延迟引起的伪距变化量。由于接收机的硬件延迟量被接收机钟差吸收, D_{P1}, D_{P2}, D_{P3} 实际表示由卫星硬件延迟造成的伪距变化量。

2.2 基于广播星历钟差的 TGD/DCB 改正模型

与 GPS 不同, 北斗广播星历的时空基准点为 $B3$ 频点^[8], 因此北斗广播星历的钟差包含 $B3$ 频点的硬件延迟, 即:

$$\overline{dt}_{\text{brd}}^s = dt^s - D_{P3} \quad . \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1)–(3) 中, 可得下式:

$$P_1 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + I_1 - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + DCB_{(P1-P3)} \quad , \quad (5)$$

$$P_2 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \gamma I_1 - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + DCB_{(P2-P3)} \quad , \quad (6)$$

$$P_3 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \beta I_1 - \overline{dt}_{\text{brd}}^s \quad , \quad (7)$$

其中, $DCB_{(P1-P3)}$ 表示 $B1$ 频点相对于 $B3$ 频点的硬件延迟, $DCB_{(P2-P3)}$ 表示 $B2$ 频点相对于 $B3$ 频点的硬件延迟。

根据北斗播发的接口控制文件, $B1, B2$ 频点的硬件延迟可用下式来改正:

$$P_1 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + I_1 - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + TGD_1 \quad , \quad (8)$$

$$P_2 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \gamma I_1 - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + TGD_2 \quad . \quad (9)$$

通过对比式 (8) 和 (9), 可以得到北斗 TGD 和 DCB 的关系, 表示如下:

$$TGD_1 = DCB_{(P1-P3)} \quad , \quad (10)$$

$$TGD_2 = DCB_{(P2-P3)} \quad . \quad (11)$$

对于双频无电离层组合用户而言, 硬件延迟的改正公式如下:

$$PC_{12} = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + \frac{\gamma}{\gamma - 1} DCB_{(P1-P3)} - \frac{1}{\gamma - 1} DCB_{(P2-P3)} \quad , \quad (12)$$

$$PC_{13} = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + \frac{\beta}{\beta - 1} DCB_{(P1-P3)} \quad , \quad (13)$$

$$PC_{23} = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} - \overline{dt}_{\text{brd}}^s + \frac{\tau}{\tau - 1} DCB_{(P2-P3)} \quad , \quad (14)$$

其中, $\tau = f_2^2/f_3^2$ 。

2.3 基于北斗事后精密钟差 TGD/DCB 改正模型

目前, 北斗的精密轨道钟差产品都是基于 $B1, B2$ 无电离层组合计算得到的, 故精密星历提供的钟差包含 $B1, B2$ 频点的组合硬件延迟。使用精密星历时, 单频用户的硬件延迟改正为:

$$P_1 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + I_1 - \overline{dt}_{\text{pre}}^s - \frac{1}{\gamma - 1} DCB_{(P1-P2)} , \quad (15)$$

$$P_2 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \gamma I_1 - \overline{dt}_{\text{pre}}^s - \frac{\gamma}{\gamma - 1} DCB_{(P1-P2)} , \quad (16)$$

$$P_3 = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} + \beta I_1 - \overline{dt}_{\text{pre}}^s - \frac{\gamma}{\gamma - 1} DCB_{(P1-P3)} + \frac{1}{\gamma - 1} DCB_{(P2-P3)} . \quad (17)$$

对于双频无电离层组合用户，硬件延迟改正如下：

$$PC_{12} = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} - \overline{dt}_{\text{pre}}^s , \quad (18)$$

$$PC_{13} = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} - t_{\text{pre}}^s - \frac{1}{\beta - 1} DCB_{(P1-P3)} - \frac{1}{\gamma - 1} DCB_{(P1-P2)} , \quad (19)$$

$$PC_{23} = \rho + dt_r + d_{\text{trop}} - t_{\text{pre}}^s - \frac{1}{\tau - 1} DCB_{(P2-P3)} - \frac{\gamma}{\gamma - 1} DCB_{(P1-P2)} . \quad (20)$$

在利用式 (15)–(20) 进行硬件延迟改正时，如果无法获得北斗的 DCB ，可以用 TGD 进行代替，即：

$$DCB_{(P1-P3)} = TGD1 , \quad (21)$$

$$DCB_{(P2-P3)} = TGD2 , \quad (22)$$

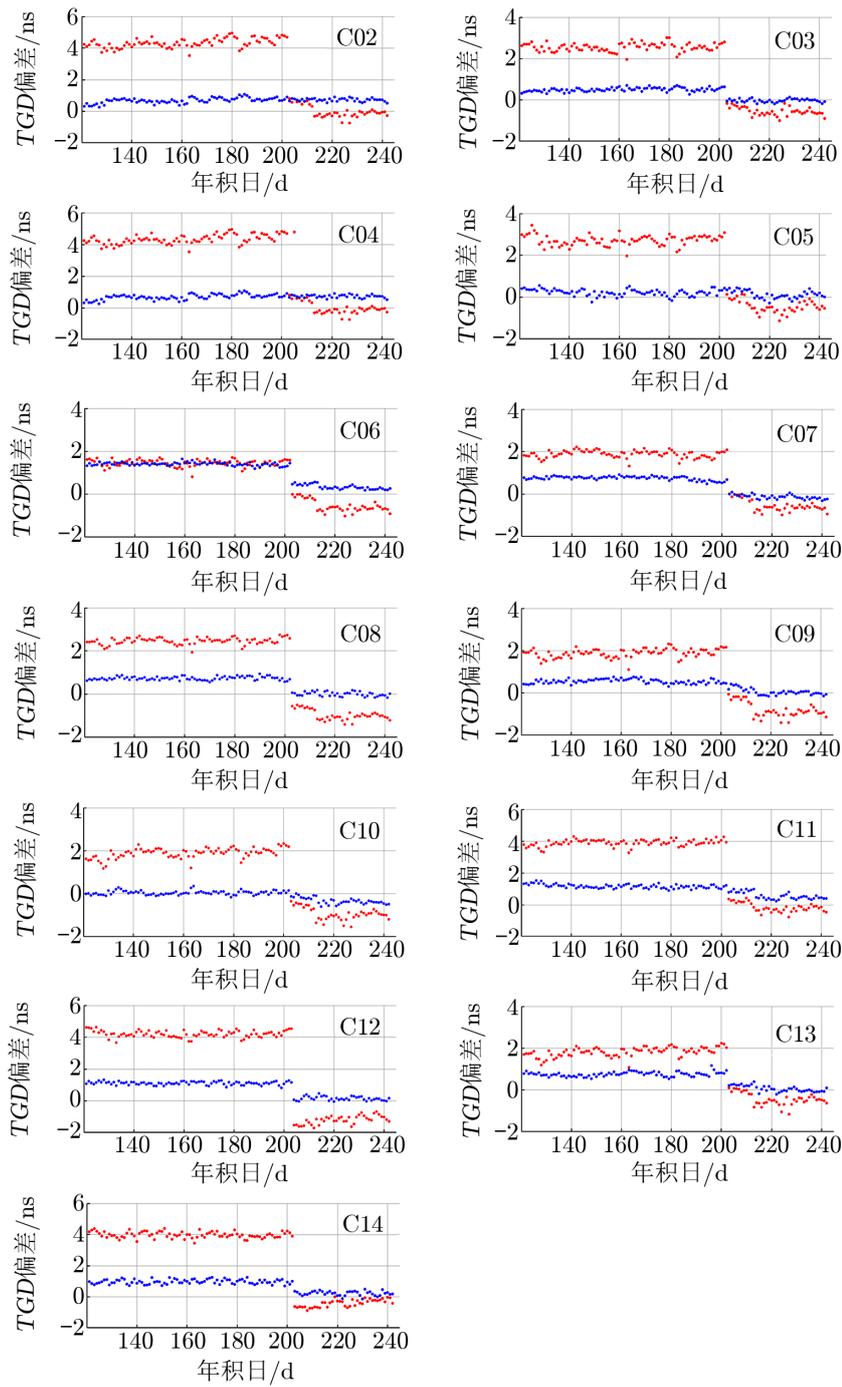
$$DCB_{(P1-P2)} = DCB_{(P1-P3)} - DCB_{(P2-P3)} = TGD1 - TGD2 . \quad (23)$$

3 BDS-2 的 TGD 参数精度分析

MGEX 提供的北斗 DCB 参数是对全球 200 个测站的观测结果进行计算所得，而北斗广播星历中 TGD 参数的计算仅考虑了国内测站的观测结果，因此 DCB 参数的精度一般高于 TGD 参数，故用 DCB 参数作为硬件延迟的标准来计算 TGD 参数的精度。

为了解决 DCB 解算过程中的秩亏问题，我们假设所有卫星硬件延迟之和为 0。 TGD 参数解算以约束 C01 卫星 TGD 参数的出厂值为约束条件。因此， DCB 与 TGD 的参考基准不同，不能将 TGD 与 DCB 直接做差进行比较。为解决这一问题，我们以 C01 卫星为基准，将其他卫星的 TGD 与 C01 卫星的 TGD 做差得相对 TGD 值，再将 DCB 与 C01 的 DCB 参数做差得相对 DCB 值，接着将相对 TGD 值与相对 DCB 值进行比较，两者差值可反映 TGD 的精度。

我们选取 2017 年年积日 120–242 天 MGEX 采集的 BDS-2 卫星导航电文的 TGD ，并与 MGEX 的 DCB 进行对比，对比结果如图 1 所示。从图中可以看出，202 天以前， $TGD1 - DCB1$ 的值在 0~4 ns 之间波动，202 至 203 天， $TGD1 - DCB1$ 的值发生了一次跳变；203 天以后，各卫星 $TGD1$ 至 $DCB1$ 的值接近于 0。根据图 2 可知，MGEX 提供的 $DCB1$ 并没有发生跳变，所以图 1 中的跳变主要是 $TGD1$ 跳变所致。表 1 列出各颗卫星 $TGD1$ 的跳变前互差序列均值、跳变前标准差、跳变后互差序列均值、跳变后标准差以



注: 红色点表示 TGD1 与 DCB1 的相对差值; 蓝色点表示 TGD2 与 DCB2 的相对差值。

图 1 BDS-2 各卫星 TGD 与 DCB 相对差值

及各颗卫星 $TGD1$ 的跳变大小。从表中可以看出, $TGD1$ 跳变前, 互差均值约为 2.569 ns, 跳变后互差均值约为 0.419 ns, 跳变大小约为 2.15 ns。跳变后, $TGD1$ 精度与 GPS 硬件延迟精度接近。北斗系统的 TGD 会经常更新, 但本次 $TGD1$ 的跳变值明显大于跳变前后的标准差, 该跳变主要是由北斗系统值与 TGD 解算的接收机不再采用抗多径算法所致。调整后, TGD 与 MGEX 提供的 DCB 更接近。

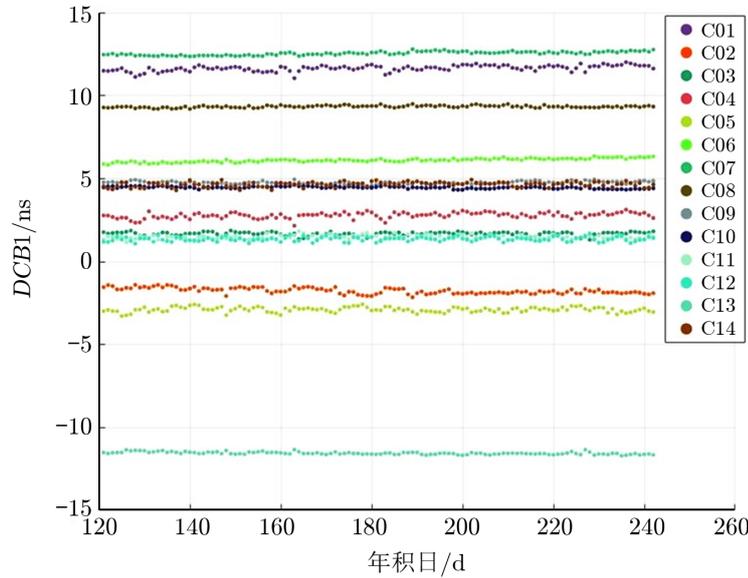


图 2 BDS-2 各卫星 $DCB1$ 值

表 1 各卫星 $TGD1 - DCB1$ 跳变量

卫星号	跳变前互差序列均值	跳变前标准差	跳变后互差序列均值	跳变后标准差	跳变值
C01	—	—	—	—	—
C02	4.325	0.294	0.822	0.096	3.504
C03	2.554	0.196	-0.531	0.199	3.085
C04	0.351	0.109	-0.167	0.099	0.518
C05	2.719	0.244	-0.422	0.297	3.141
C06	1.455	0.160	-0.528	1.091	1.983
C07	1.887	0.169	-0.522	1.080	2.409
C08	2.459	0.151	-0.936	0.234	3.395
C09	1.877	0.212	-0.775	0.354	2.652
C10	1.889	0.238	-0.913	0.288	2.801
C11	3.892	0.205	-0.163	0.277	4.055
C12	4.199	0.208	-1.034	0.921	5.233
C13	1.820	0.222	-0.423	0.290	2.243
C14	3.973	0.197	-0.404	0.232	4.378

表 2 列出各颗卫星 $TGD2$ 参数跳变前互差序列均值、跳变前标准差、跳变后互差序列均值、跳变后标准差以及各颗卫星 $TGD2$ 参数的跳变大小。对各颗卫星而言, 其

$TGD2 - DCB2$ 的值基本没有发生跳变, 其值稳定在 $0 \sim 1.5$ ns 之间, 其中 $TGD2 - DCB2$ 最大值为 1.409 ns, 最小值为 0.046 ns, 平均值为 0.565 ns。 $TGD2$ 参数精度与 GPS 硬件延迟精度比较接近。

表 2 各卫星 $TGD2 - DCB2$ 跳变量

卫星号	跳变前互差序列均值	跳变前标准差	跳变后互差序列均值	跳变后标准差	跳变值
C01	—	—	—	—	—
C02	0.690	0.029	0.707	0.009	-0.017
C03	0.502	0.009	-0.028	0.006	0.530
C04	0.185	0.013	-0.235	0.006	0.420
C05	0.227	0.024	0.125	0.033	0.103
C06	1.409	0.006	0.334	0.012	1.076
C07	0.752	0.008	-0.126	0.010	0.878
C08	0.735	0.735	0.289	0.007	0.446
C09	0.547	0.011	0.049	0.021	0.498
C10	0.046	0.009	-0.323	0.021	0.369
C11	1.162	0.015	0.547	0.049	0.615
C12	1.111	0.011	0.170	0.039	0.941
C13	0.757	0.012	0.061	0.021	0.696
C14	0.971	0.021	0.217	0.020	0.755

4 BDS-2 TGD 参数对定位结果的影响

表 3 利用 2017 年年积日 202 天的数据和 4 个测站的观测数据, 列出了不改正 TGD 、跳变前改正 TGD 、跳变后改正 TGD 以及改正 DCB 的单点定位结果。

表 3 TGD 参数调整前后定位精度的比较

	不改 TGD	跳变前改 TGD	跳变后改 TGD	改 DCB
B1	N	1.748	1.173	1.150
	E	2.130	0.969	0.502
	U	3.633	3.207	2.918
B2	N	2.770	1.261	1.065
	E	0.843	0.794	0.375
	U	5.487	5.064	5.122
B1 - B2	N	4.495	1.414	1.376
	E	4.656	1.527	0.884
	U	4.979	3.072	2.879
B1 - B3	N	3.669	1.488	1.346
	E	5.265	1.771	0.812
	U	6.331	3.862	3.137

图3列出了JFNG测站不改正TGD, 跳变前改TGD, 跳变后改TGD, 以及改正DCB的B1-B2双频组合的N, E, U方向定位结果。从图3和表3可以看出, 在不利用TGD或DCB参数进行硬件延迟改正的情况下, 双频定位精度明显差于单频定位精度, 这主要是由于利用双频组合消除电离层影响时, 由硬件延迟所引起的伪距变化量被放大所致。经过TGD和DCB参数改正的单点定位精度明显优于没有经过改正的单点定位精度。利用跳变后的TGD参数进行改正, 定位精度也优于利用跳变前的TGD参数改正。

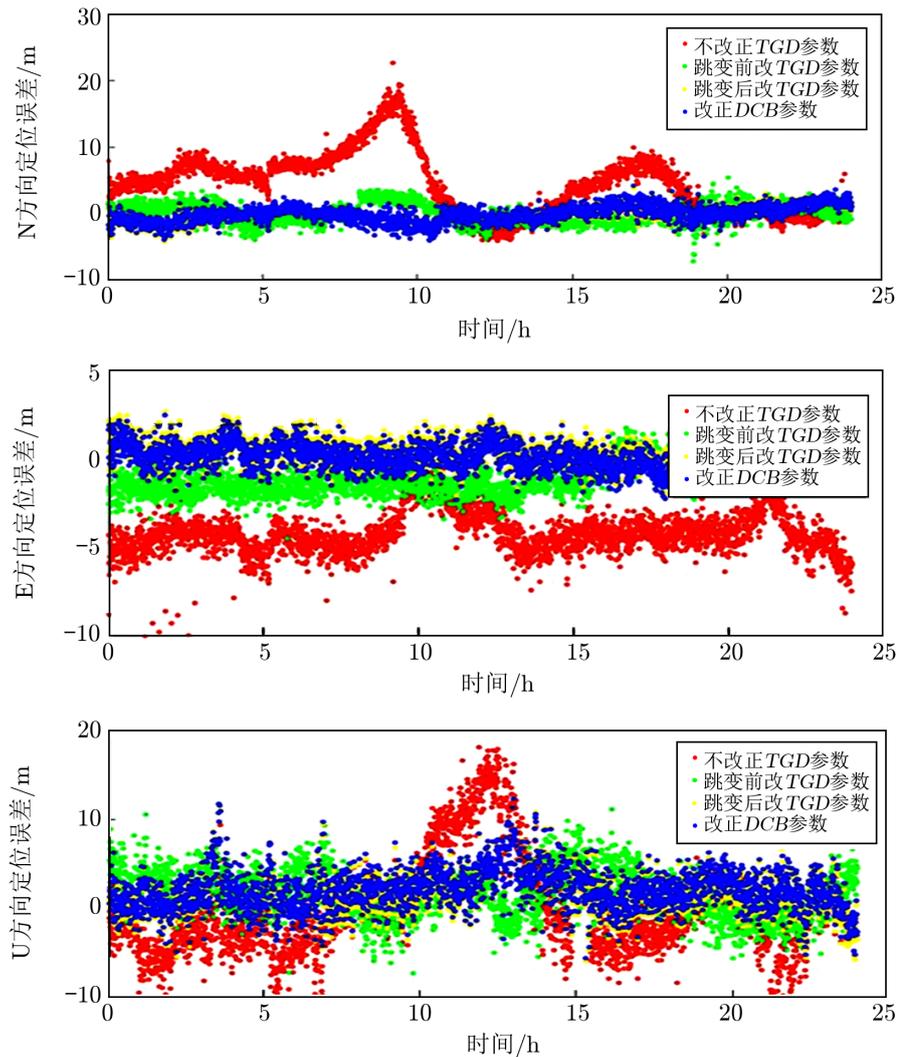


图3 JFNG测站B1-B2双频组合的N, E, U方向的定位结果

5 结论

本文总结了基于广播星历钟差的 *TGD/DCB* 改正模型和基于北斗事后精密钟差的 *TGD/DCB* 改正模型。我们利用 MGEX 提供的北斗 *DCB* 参数计算了广播星历 *TGD* 参数的精度, 并研究使用 *TGD* 和 *DCB* 参数对单点定位结果的影响, 主要结果如下。

(1) 北斗广播星历钟差参数是基于 *B3* 频点计算所得, 故使用其他频点单频信号或使用双频无电离层组合时, 需要引入 *TGD* 或 *DCB* 参数进行校正; 北斗精密钟差参数是基于 *B1 - B2* 频点的无电离层组合计算所得, 故使用单频信号或使用其他无电离层组合时, 同样需要引入 *TGD* 或 *DCB* 参数进行校正。

(2) 对各颗卫星而言, 其 *TGD2* 与 *DCB2* 的差值稳定在 $0\sim 1$ ns 之间。在 2017 年年积日 202 天以前, *TGD1* 与 *DCB1* 的差值在 $0\sim 4$ ns 间波动; 在 2017 年年积日 203 天处, *TGD1* 参数发生跳变。跳变后, *TGD1* 与 *DCB1* 之差接近 0, 故认为跳变后 *TGD1* 参数精度与 GPS 硬件延迟精度接近。北斗系统的 *TGD* 参数会经常更新, 但本次 *TGD1* 参数的跳变大小明显大于跳变前后的标准差, 该跳变主要是因参与 *TGD* 解算的北斗系统的接收机不再采用抗多径算法所致。调整后, *TGD* 参数与 MGEX 提供的 *DCB* 参数更接近。

(3) 在不使用 *DCB* 或 *TGD* 改正的情况下, 单点定位误差较大; 在使用 *TGD* 或 *DCB* 参数后, 单点定位的精度得到了显著提高。利用跳变后的 *TGD* 参数进行改正, 定位精度也优于利用跳变前 *TGD* 参数的改正结果。使用 *TGD* 参数定位的结果与使用 *DCB* 参数定位的结果比较接近。

参考文献:

- [1] 吴晓莉, 平劲松, 刘利, 等. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36: 1218
- [2] 王宁波, 袁运斌, 张宝成, 等. 测绘学报, 2016, 45: 919
- [3] Shi C, Fan L, Li M, et al. J Geod 90: 161
- [4] Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. 2016, 90: 1
- [5] 戴伟, 焦文海, 贾小林. 测绘科学技术学报, 2009, 26: 367
- [6] Guo F, Zhang X, Wang J, et al. J Geod, 2015, 89: 427
- [7] 张益泽, 陈俊平, 周建华, 等. 测绘学报, 2016, 45: 64

TGD Parameter Accuracy of BDS-2 Navigation Message and Its Influence on User Navigation and Positioning Accuracy

WU Jing^{1,2}, TANG Cheng-pan¹, ZHOU Shan-shi¹, HU Xiao-gong¹, DONG Wen-li¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Parameters of the satellite clock errors, whose foundational frequency are under $B3$, and the group delay parameters (TGD) whose frequency are under $B1$ and $B2$, are all broadcasted by BD-2 satellite. According to references, the largest deviation between the TGD parameter of BD-2 satellite and the DCB parameter published by MGEX is 5 billi-seconds, which is the main factor that will affect the allocation of the timing accuracy for BD-2 customers. This paper firstly evaluates the accuracy of the TGD parameters of the BD-2 by taking the DCB parameter as the reference, whose results show that before the day 202 of the year 2017, the $TGD1$ parameters of each satellite show a poor accuracy, whose mutual deviation between the $DCB1$ parameter is between 2ns and 4ns, and the mutual deviation between $TGD2$ parameters and $DCB2$ parameters is around 0.5 ns. Between the days 202 and 203 of the year 2017, TGD parameters of all satellites show a sudden and obvious jumping change, which is resulted from the adjustment of solution strategy of TGD parameters. After the jump, the parameter deviation between the TGD parameters and the DCB parameters published by MGEX will be lower than 0.5 ns, which is comparable to the accuracy of the TGD parameters broadcasted by GPS satellite. Then, this paper further evaluates the effect of the revised accuracy of the TGD parameters on the accuracy of the GPS of customers. According to the result, before the DOY 202, the accuracy for sonic frequency positioning is 2.078 m, and for dual band positioning of direction N is 1.451 m, for direction E is 1.648 m, and for direction U is 3.467 m; while after the DOY 203, the accuracy for sonic frequency positioning is 1.968 m, and for dual band positioning of direction N is 1.361 m, of direction E is 0.998 m, and of direction U is 2.789 m, in which the accuracy of the dual band positioning of direction N, E and U are respectively enhanced up to 6.2%, 39.4% and 19.5%.

Key words: range measurement bias; instrumental bias; TGD ; DCB