0254-6124/2022/42(1)-0170-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHOU Zhonghua, WAN Xiang, CHENG Yan, LIU Zhizhong, WANG Wenjun, ZHANG Xueli. A Method for Estimating Differential Code Deviation of Ground-based GNSS Receiver (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 170–178. DOI:10.11728/cjss2022.01.201026096

一种地基 GNSS 接收机差分码偏差估算方法*

周中华 万 祥 程 艳 刘志忠
汪文君 张雪丽

(航天恒星科技有限公司 北京 100194)

摘 要 GNSS 不同频点间的码伪距作差会引入信号的差分码偏差（DCB），包括 GNSS 卫星及地面接收机的 DCB。本文提出一种地基 GNSS 接收机差分码偏差参数估算方法，首先由电离层文件参数作线性插值，计算出电离层延迟误差。之后对 IGS 站观测文件进行加权最小二乘法估计，得到 GPS 卫星和地面 GNSS 接收机的 L1C 频点和 L2P 频点间码偏差。该方法能同时获取卫星 DCBs 与地面 GNSS 接收机的 DCBr，有效解决地面 GNSS 接收机 DCBr 获取的问题。通过对估计的卫星 DCBs 与 CODE 公布的值进行对比和统计分析，结果表明，两者卫星 DCBs（C1P2）之差的 RMS 均值误差 < 0.3541 ns，地基 GNSS 接收机 DCBr（C1P2）估算精度优于 1.6105 ns。

关键词 差分码偏差，卫星 DCBs，接收机的 DCBr，参数估算

中图分类号 P352

A Method for Estimating Differential Code Deviation of Ground-based GNSS Receiver

ZHOU Zhonghua WAN Xiang CHENG Yan LIU Zhizhong
WANG Wenjun ZHANG Xueli

(*Space Star Technology Company Limited*, *Beijing* 100194)

Abstract The difference of code pseudo-range between different frequency points of GNSS will lead to the DCB of the signal. The DCB of GNSS satellite and ground receiver can cause an accuracy error of about 25 ns, which must be corrected. Against to this problem, this paper proposes a differential code deviation estimation method for ground-based GNSS receivers. This method can obtain the DCBr of ground GNSS receiver and satellite DCBs at the same time, and effectively solve the problem of ground GNSS receiver DCBr acquisition. Through the comparison and statistical analysis of the estimated satellite DCBs and the values published by code, the results show that the RMS mean error of the

* 国家民用空间基础设施“十二五”陆地观测卫星地面系统建设项目资助
2020-10-23 收到原稿，2021-11-04 收到修定稿
E-mail: chengyan_nuc@163.com

difference between the two satellites DCBs (C1P2) is less than 0.3541 ns, and the estimation accuracy of ground-based GNSS receiver DCBr (C1P2) is better than 1.6105 ns.

Key words Differential code bias, satellite DCBs, receiver DCBr, Parameter estimation

0 引言

GNSS 不同频点间的码伪距作差会引入信号的差分码偏差(DCB), GNSS 卫星及地面接收机的 DCB 可以引起 25 ns 左右的精度误差, 必须进行修正。差分码偏差修正在精密单点定位、星基电离层绝对 TEC 计算[1,2]、地基 VTEC 计算等领域应用广泛。差分码偏差(DCB, Differential Code Bias)是由硬件延迟造成的相同历元下发射或接收不同频率 GPS 无线信号产生的频率间码偏差[3]。在 GPS 无线信号传播路径上, 发射端的卫星和地面接收机端均会产生一定码偏差[4-6]。卫星码偏差(DCBs)可以通过欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)公布的结果得到; 地面接收机码偏差(DCBr)可直接由公布的结果(例如 IGS 测站接收机的 DCBr)或通过参数估计的方法得到。Lü等[7] 利用 CODE 中心下载的卫星 DCB 通过最小二乘法求解出了地面接收机的 DCB。接收机硬件延迟会随着运行环境的不同而发生变化, 其码偏差值可达±10.5 ns[8]。DCB 对于静态定位影响很小, 而对于动态定位有厘米级的影响[9], 故在电离层绝对 TEC 计算时必须要考虑 GPS 卫星和地面 GNSS 接收机 DCB 的影响。本文针对地面 GNSS 接收机在使用过程中无可用的接收机 DCB 参数公布问题, 采用加权最小二乘法对 DCB 估算, 并在试验数据上验证了估算方法的有效性。

1 DCB 算法实现

GNSS 卫星及测站接收机 DCB 的计算主要有以下三种方法。

(1)利用 CODE 中心下载的所有 GPS 卫星 DCB 估计接收机 DCB 值。CODE 数据中心会每月公布所有 GPS 卫星 DCB 值, 借助这些值采用最小二乘法估计出测站接收机的 DCB 值。该方法的缺点是依赖于外部数据。

(2)载波相位平滑伪距法[10]。载波相位非常平滑, 具有较高的精度, 用其平滑伪距能提高估计电离层电子总含量精度, 从而实现 DCB 参数估计。该方法需要扣除钟差、多路径、对流层等误差影响, 算法复杂性高。

(3)P_4 双频伪距组合法[11,12]。双频伪距组合能够消去与频率无关的钟差、多路径、对流层等误差影响, 剩下卫星和接收机 DCB 以及电离层延迟影响, 进而由参数估计能够得到 GPS 卫星和接收机 DCB 值。

本文在 P_4 双频伪距组合法[13,15] 基础上提出了一种地基 GNSS 接收机差分码偏差估算方法。算法中利用卫星的高度角进行加权, 即使用高度角余角余弦值的平方作为权矩阵, 同时通过加入 20 个 IGS 站的观测数据来实现观测卫星数据的覆盖性, 从而更好地满足卫星 DCB 的零和条件。为了保证更多的卫星和数据加入运算, 算法中设置高度角阈值为 15°。GPS 两个频率上的伪距观测量表达式分别为

$$P_1 = r + c(\delta t_r - \delta t^s) + I_1 + \psi^s_{r1} + T + N_{\varepsilon p_1}, \quad (1)$$

$$P_2 = r + c(\delta t_r - \delta t^s) + I_2 + \psi^s_{r2} + T + N_{\varepsilon p_2}. \quad (2)$$

式中: P_1 和 P_2 为双频伪距观测量, 其中数字作为下标表示频点; r 为站星之间的距离; c 为真空中的光速; δt_r 为接收机钟差; δt^s 为卫星钟差; I_1 和 I_2 分别为两个频率上的电离层延迟; T 为对流层延迟; $N_{\varepsilon p_1}$和 $N_{\varepsilon p_2}$为接收机噪声; 两个频率上差分码偏差表示为 ψ^s_{r1}和ψ^s_{r2}, 表达式为

$$\psi^s_{r1} = \psi_{r1} + \psi^s_1, \quad (3)$$

$$\psi^s_{r2} = \psi_{r2} + \psi^s_2, \quad (4)$$

这里 ψ_{r1} 和 ψ_{r2} 分别表示 GNSS 接收机 L1C 频点和 L2P 频点上的码偏差, ψ^s_1和ψ^s_2分别表示 GNSS 卫星 L1C 频点和 L2P 频点上的码偏差。

P_4 组合之后与频率无关的误差项被消去, 忽略接收机噪声影响, 只剩下电离层延迟和 GPS 卫星及接收机 DCB 延迟, 表达式为

$$P_4 = P_1 - P_2 = (I_1 - I_2) + (\tau_r + \tau^s) + \varepsilon. \quad (5)$$

式中, τ_r 和 τ^s 分别表示 GNSS 接收机和卫星差分码偏差, ε 表示组合后的噪声。

电离层延迟通常采用单层模型(Single layer model),将电离层电子看成集中分布在离地 400～450 km 左右高度的一个单层球面上,通过导航电文和分布的多个接收机观测文件可以分别计算出卫星和接收机的位置,同时计算得到站星间的观测矢量和卫星的高度角及方位角,从而计算出电离层穿刺点的(Ionosphere Pierce Point, IPP)[16,17] 纬度和经度。依据 IGS 站下载的 igsg 电离层文件用线性插值法得到电离层穿刺点处的垂直总电子含量 VTEC,求出投影函数即可计算出电离层延迟[18,20]

$$I_i = \frac{1}{\cos\ z'} \cdot \frac{40.3}{{f_i}^2} \int_s N_e \mathrm{d}s. \tag{6}$$

式中,i=1,2 表示频点,I_i 表示 i 频点上的电离层延迟,z'表示卫星天顶角度,f_i 表示 i 频点上频率大小,N_e 表示电离层电子密度。

GPS 导航定位中,卫星高度角在一定程度上反映数据质量的好坏,故选用卫星高度角信息来确定加权矩阵,使计算更接近实际情况,权阵表达式为

$$\boldsymbol{P} = \cos^2(\frac{\pi}{2} - \alpha). \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{P}$ 表示权矩阵,α 表示卫星高度角,π 为圆周率。

加权最小二乘法在解决重复观测问题上应用广泛[21,23],根据 P_4 组合组建系数矩阵 $\boldsymbol{A}$,常数矩阵 $\boldsymbol{y}$,以及权重矩阵 $\boldsymbol{P}$,常数矩阵 $\boldsymbol{y}$ 通过组建的 GNSS 观测方程中各矩阵系数组成,GPS 卫星和接收机的码偏差估计值为

$$\sigma_{\mathrm{DCB}} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{y}. \tag{8}$$

2 算法流程

DCB 的计算过程主要包括参数文件的读取、电离层延迟计算和加权最小二乘估计等步骤。为方便估计全球范围内的 GPS 卫星和接收机 DCB,选用 brdc 广播星历文件。为了能较准确地估计所有卫星的 DCB 值,选用除了待估计测站接收机外的尽可能多的 IGS 站观测数据,这样能够避免局部误差的影响。测试中随机选用 20 个全球分布的 IGS 站观测文件,使用本文研究成果同时估计 GPS 卫星和接收机 DCB 值,方便工程应用。

图 1 所示为 GPS 卫星和测站接收机 DCB 参数加权最小二乘估计算法流程,选用的数据是 IGS 站

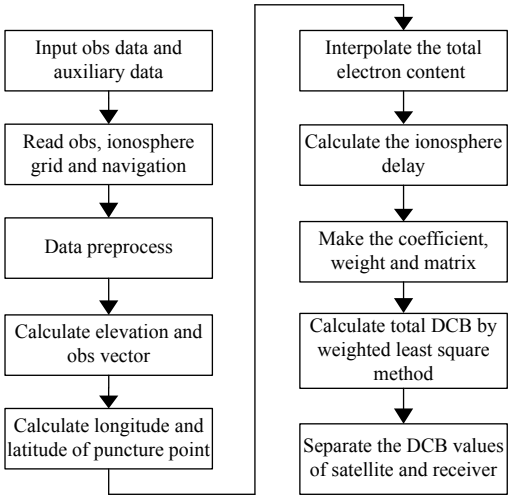


图 1 DCB 算法流程

Fig. 1 Flow chart of DCB algorithm

20 个测站观测文件,历元间隔 30 s 一个,2015 年 3—4 月连续两个月的数据。

采用加权最小二乘准则进行计算,经统计一般迭代 5～6 次便会收敛,精度要求高的选择迭代 10 次,本文选则迭代 10 次。计算的 DCB 值是 GPS 卫星和测站接收机码偏差(DCB)之和,借助所有 GPS 卫星 DCB 之和为零[24-29] 这一条件分离出 GPS 卫星和测站接收机的 DCB。

3 数据结果分析

试验数据输入:待估算的 2015 年 3 月 1 日至 4 月 30 日时间段内的 abpo、albh、alg3、baie、barh、bcov、bjco、cas1、eliz、escu、eur2、ganp、geno、gldr、glps、godz、guam、kiru、tid1、wes2 等 20 个 IGS 站的 GNSS 观测数据文件,广播星历文件,电离层 GIM 数据文件,CODE 中心 P1P2 和 C1P1DCB 文件。

利用 CODE 数据中心公布的 GPS 卫星的 DCB 与估算的 GPS 卫星的 DCB 进行对比分析本文方法的估计精度。从 CODE 数据中心下载了 2015 年 3—4 月的 C1P1 和 P1P2 码偏差值,通过对 C1P2 和 P1P2 进行作差可以得到 C1P2 码偏差值,结果分别如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可知,GPS 卫星的 C1P2 DCB 值差异性较大,在–10～10 ns 范围内变动。对 2015 年 3 月和 4 月 IGS 测站连续两个月的观测数据进行分析,用本文研究成果计算 GPS 卫星

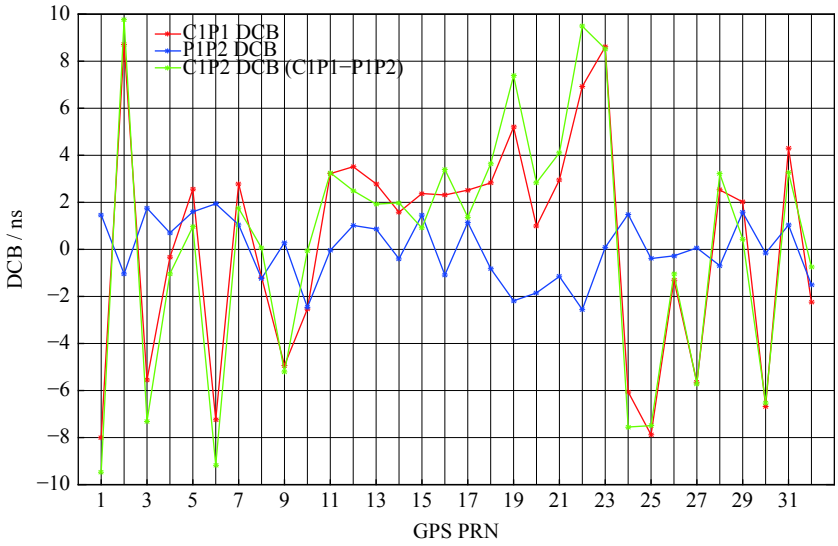


图 2　CODE 中心下载的 2015 年 3 月 DCB 数据

Fig. 2　DCB data for March 2015 downloaded from CODE Center

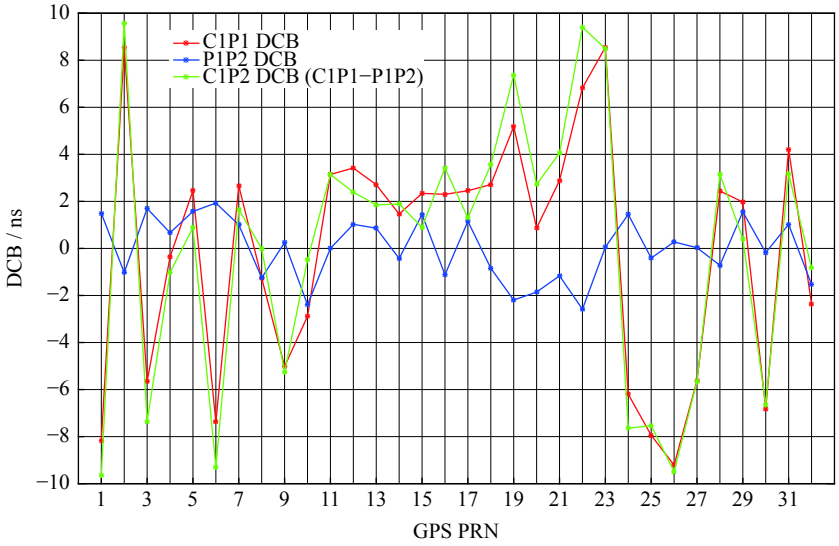


图 3　CODE 中心下载的 2015 年 4 月 DCB 数据

Fig. 3　DCB data for April 2015 downloaded from CODE Center

的 DCB 值分别如图 4 和图 5 所示, 横坐标 day 表示该月内的天数, 纵坐标表示估算的 C1P2 DCB 数值, 图中 32 种星线分别表示 GPS 1～32 卫星号 PRN。从图 4 和图 5 中可知, 一个月内 GPS 卫星的 C1P2 码偏差相对较稳定, 变动范围在±1 ns 以内。

与 GPS 卫星 C1P2 码偏差一同估算出来的还有测站接收机的 C1P2 码偏差值, 其中估算的 2015 年 3 月和 4 月的 abpo、albh、alg3、baie、barh、bcov、bjco、cas1、eliz、escu、eur2、ganp、geno、gldr、glps、godz、guam、kiru、tid1 和 wes2 共 20 个测站的 C1P2 码偏差值分别如表 1 和表 2 所示。鉴于工程项目实践中使用的测站接收机的 C1P2 码偏差是未知的, 使用测站接收机接收的观测数据代入进行估算, 即可得到 GPS 卫星和测站接收机的 C1P2 码偏差。

为了评估估算出的 GPS 卫星 C1P2 码偏差和测站接收机 C1P2 码偏差的精度, 利用 CODE 数据中心公布的 C1P1 和 P1P2 码偏差计算出的 C1P2 码偏差作为对比, 2015 年 3 月和 4 月的对比结果分别如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知, GPS 1～32 号卫星的蓝色直方图和黄色直方图都较为接近。统计蓝色

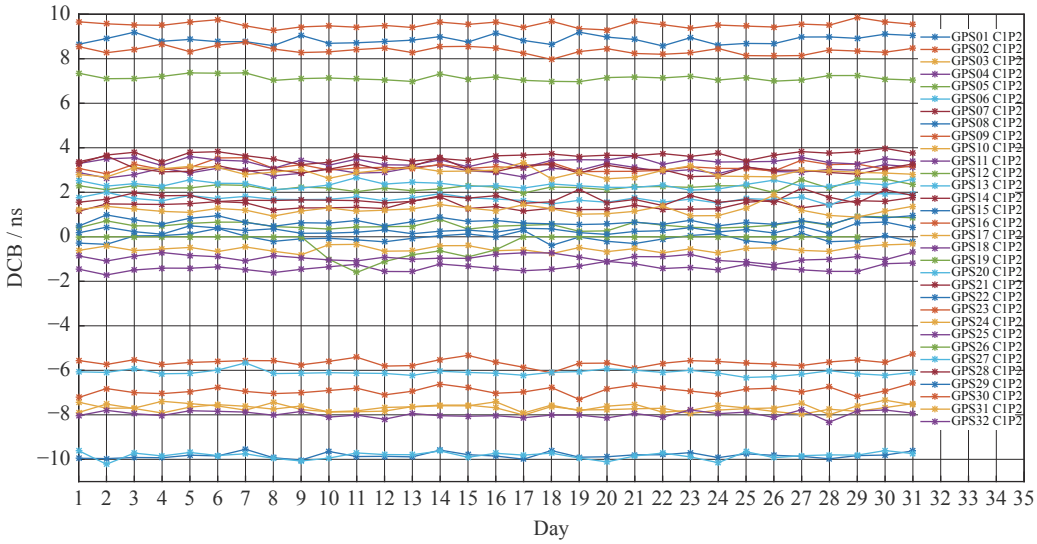


图 4 估算的 2015 年 3 月卫星 C1P2 DCB

Fig. 4 Estimated satellite C1P2 DCB in March 2015

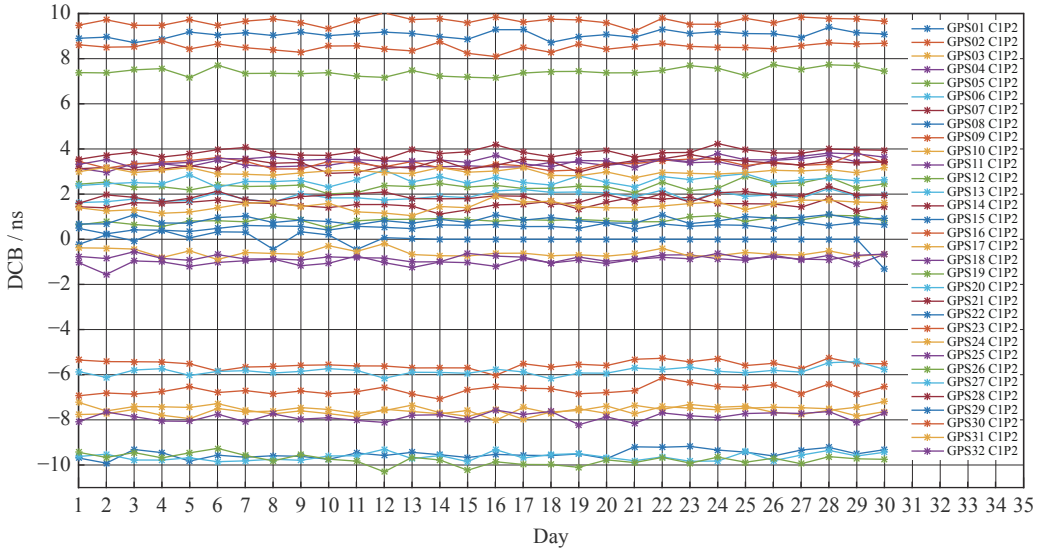


图 5 估算的 2015 年 4 月卫星 C1P2 DCB

Fig. 5 Estimated satellite C1P2 DCB in April 2015

表 1 估算的 2015 年 3 月 20 个 IGS 站接收机码偏差值（单位 ns）

Table 1 Calculated receiver DCB for 20 IGS stations in March 2015 (Unit ns)

IGS站名	abpo	albh	alg3	baie	barh	bcov	bjco	cas1	eliz	escu
DCBr	–4.2823	11.1878	13.2729	9.1391	6.4724	5.8010	–12.6882	–7.6900	2.7586	–14.9059
IGS站名	eur2	ganp	geno	gldr	glps	godz	guam	kiru	tid1	wes2
DCBr	11.4201	–8.6954	21.420	4.6395	–0.5536	0.2306	6.1477	7.1547	–21.4409	11.0222

和黄色直方图之间的 RMS 误差如图 8 所示, GPS 1～32 号卫星的 C1P2 码偏差的 RMS 误差为 0.3541 ns。从 CODE 下载部分 IGS 站接收机的 DCBr, 与上述估算的测站接收机 C1P2 码偏差进行对比分析, IGS 测站接收机 C1P2 码偏差通过公布的 C1P1 和 P1P2 码偏差计算得到（见表 3）, 六个测站接收机

表 2 估算的 2015 年 4 月 20 个 IGS 站接收机码偏差值（单位 ns）

Table 2 Calculated receiver DCB for 20 IGS stations in April 2015 (Unit ns)

IGS站名	abpo	albh	alg3	baie	barh	bcov	bjco	cas1	eliz	escu
DCBr	–5.0597	11.0122	13.0821	9.0508	6.2674	5.9221	–13.2754	–8.0336	2.7610	–15.0996
IGS站名	eur2	ganp	geno	gldr	glps	godz	guam	kiru	tid1	wes2
DCBr	11.4382	–8.9486	21.4702	4.9973	–0.6551	0.1525	7.0748	7.0906	–21.5858	11.1649

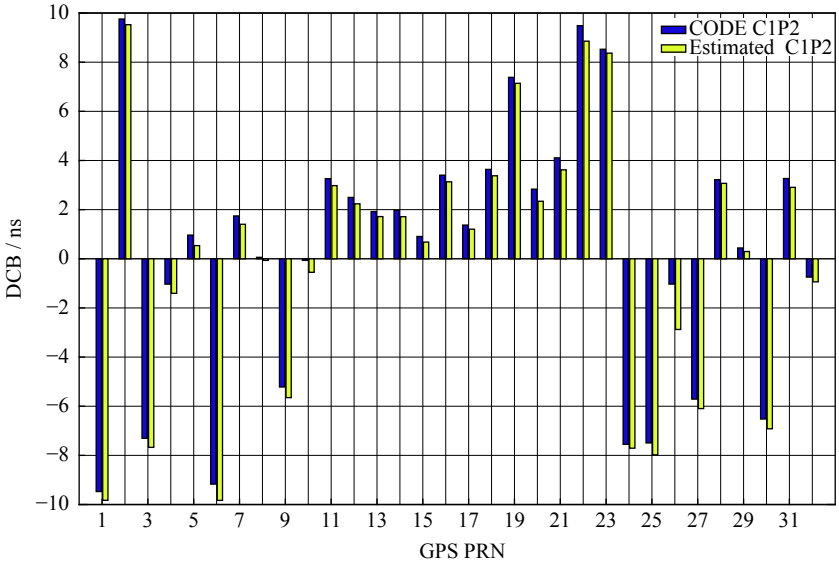


图 6 2015 年 3 月 CODE 公布与估算的 C1P2 码偏差对比

Fig. 6 Comparison of the deviation between the CODE published in March 2015 and the estimated C1P2 code

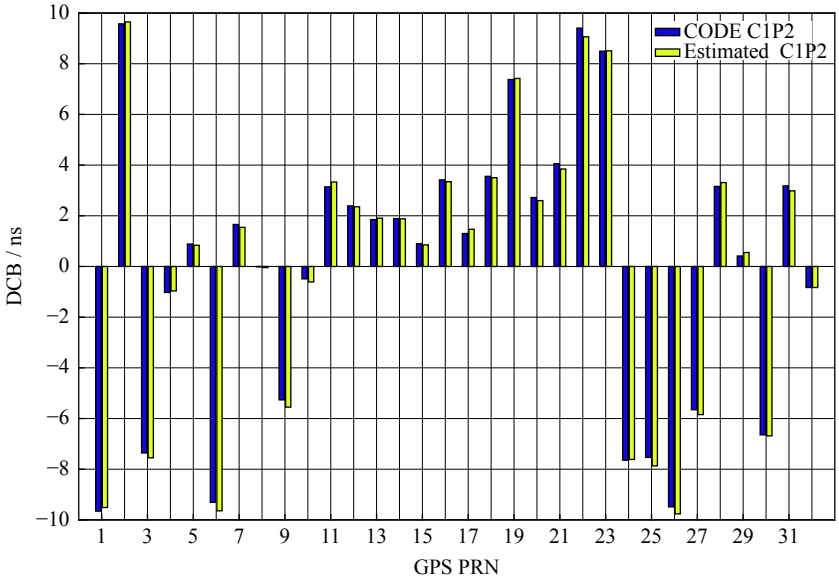


图 7 2015 年 4 月 CODE 公布与估算的 C1P2 码偏差对比

Fig. 7 Comparison of the deviation between the CODE published in April 2015 and the estimated C1P2 code

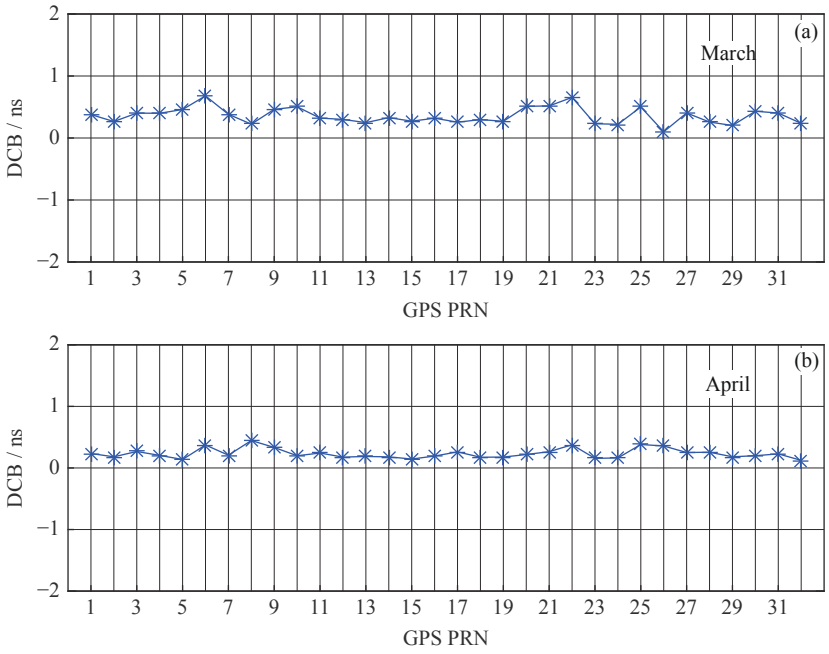


图 8 2015 年 3 月和 4 月估算的卫星 C1P2 DCB RMS 误差

Fig. 8 Estimated Star C1P2 DCB RMS error in March and April 2015

表 3 下载的 2015 年 3 和 4 月 6 个 IGS 站接收机码偏差值（单位 ns）

Table 3 Download receiver DCBr for 6 IGS stations in March and April 2015 (Unit ns)

IGS站名		abpo	bjco	ganp	glps	tid1	godz
3月	P1 P2	–5.628	–14.647	–10.175	–1.804	–22.974	–2.234
	P1 C1	–0.113	–3.289	–3.368	–0.385	–2.656	–1.175
	C1 P2	–5.515	–11.358	–6.807	–1.419	–20.318	–1.059
4月	P1 P2	–5.894	–14.681	–9.989	–1.871	–22.917	–2.042
	P1 C1	0.180	–3.363	–3.472	0.442	–2.660	–1.101
	C1 P2	–6.074	–11.318	–6.517	–2.313	–20.257	–0.941

C1P2 估算精度如图 9 所示。由图 9 可知 IGS 六个测站接收机 C1P2 码偏差估算偏差基本在±2 ns 以内。3 月误差均值为–0.159 ns, RMS 误差为 1.4406 ns; 4 月误差均值为–0.3253 ns, RMS 误差为 1.7803 ns, RMS 误差为 1.6105 ns。本文使用的样本为 2015 年 3—4 月共 61 天的 IGS 观测数据，说明 2015 年的 3—4 月这段时间内 GPS 卫星 DCB 和地面接收机 DCB 精度在 0.5 ns 以内。需要说明的是，本文样本量略不足，使用该试验评价的结果可能具有片面性，其他时间段内 DCB 的估计精度可能需要进一步分析。另外，对于 2015 年 3 月 17 日出现的第 24 太阳活动周最强磁暴期间，从图 8 结果可以看出，卫星 C1P2 码偏差估算结果并没有出现太大偏差，分析其原因可能是因为采用的算法相近导致结果相差不大，还有可能是因为磁暴发生区域离选择的 20 个 IGS 站点距离较远从而没有受到影响。此外，由于 CODE 数据中心公布的 DCBr 也存在误差，本文评价的精度也存在一定的误差。

4 结语

由电离层文件参数作线性插值，计算出电离层延迟误差。对 20 个 IGS 站观测文件进行加权最小二乘法进行估计，得到 GPS 卫星和地面 GNSS 接收机的 C1P2 码偏差。估算的 GPS 卫星 C1P2 码偏差与 CODE 中心下载 DCB 之差的 RMS 误差为 0.3541 ns,

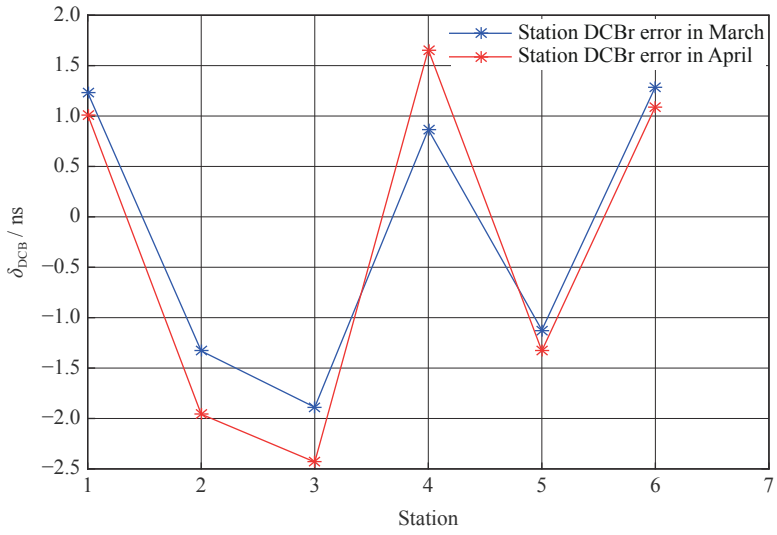


图 9　2015 年 3 和 4 月估算的测站 C1P2 DCBr 误差

Fig. 9　Estimated Station C1P2 DCBr error in March and April 2015

IGS 测站接收机的 DCBr 的 RMS 误差为 1.6105 ns。在动态精密单点定位和绝对 TEC 计算过程中，本文研究成果能同时对 GPS 卫星和接收机 C1P2 码偏差进行估计。在获取多个 IGS 站和待测站接收机观测文件情况下，能估计出地面 GNSS 接收机的 DCBr，提高电离层绝对 TEC 的计算精度。本文研究成果可以解决 GNSS 接收机出厂后 DCBr 无法更新或不准确的问题。在 PPP 定位和电离层绝对 TEC 计算等需要用到码间作差的工程应用中，具有重要的实用价值。另外，对于地震和磁暴期间地面 GNSS 接收机 DCBr 估算精度的研究还需要在大量样本基础上作进一步精细化研究。

致 谢　本文实验使用了 CODE 数据中心公布的 GPS 卫星 DCB 作为对比，同时使用了 IGS 网址的测站观测数据 O 文件、广播星历 N 文件和电离层格网 igsg 文件。

参考文献

[1] LIN J, YUE X A, ZHAO S F. Estimation and analysis of GPS satellite DCB based on LEO observations[J]. *GPS Solutions*. 2014. DOI 10.1007/s10291-014-0433-1

[2] YUAN L, JIN S, HOQUE M. Estimation of GPS differential code biases based on independent reference station and recursive filter[J]. *Remote Sense*. 2020, 12, 951. DOI.org/10.3390/rs12060951

[3] SONG Xiaoyong, YANG Zhiqiang, JIAO Wenhai, *et al*. Determination of GPS receiver code bias (DCB)[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2009, **29**(1): 127-131 (宋小勇, 杨志强, 焦文海, 等. GPS接收机码间偏差(DCB)的确定[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, **29**(1): 127-131)

[4] XU Longwei, LIU Hui, SHU Bao, *et al*. Characteristics of GLONASS inter-frequency code bias and its application on wide-lane ambiguity resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(4): 465-472 (徐龙威, 刘晖, 舒宝, 等. GLONASS频间码偏差特性分析及其在宽巷模糊度固定中的应用[J]. 测绘学报, 2018, **47**(4): 465-472)

[5] WEI C, ZHANG Q, FAN L, *et al*. Estimate DCB of BDS satellites based on the observations of GPS/BDS[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings. Berlin: Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014: 351-362

[6] ZHANG Hui, HAO Jinming, LIU Weiping, *et al*. GPS/BDS precise point positioning model with receiver DCB parameters for raw observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, **44**(4): 495-500,592 (张辉, 郝金明, 刘伟平, 等. 估计接收机差分码偏差的GPS/BDS非组合精密单点定位模型[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, **44**(4): 495-500,592)

[7] LÜ Zhiwei, HAO Jinming, ZENG Zhilin, *et al*. An algorithm for determining receiver differential code error using GPS observation[J]. *Global Positioning System*, 2010, **35**(2): 14-17 (吕志伟, 郝金明, 曾志林, 等. 利用GPS观测资料确定接收机差分码偏差的算法[J]. 全球定位系统, 2010, **35**(2): 14-17)

[8] YUAN Yunbin. Research on the theory and method of GPS-based ionospheric monitoring and delay correction[D]. Wuhan: Doctoral Dissertation of Chinese Institute of Scientific Surveying and Geophysics, 2002 (袁云斌. 基于GPS的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉: 中国科学测量与地球物理研究所, 2002)

[9] HUANG Jian, WANG Ping, RUAN Rengui, *et al*. Re-

search on the Theory and Method of GPS-based Ionospheric Monitoring and Delay Correction[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2010, **30**(3): 110-117 (黄健, 汪平, 阮仁贵, 等. 基于GPS的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, **30**(3): 110-117)

[10] ZHANG Xiaohong, TANG Long. COSMIC low-orbit satellite GPS receiver differential code bias estimation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, **57**(2): 377-383 (张小红, 唐龙. COSMIC低轨卫星GPS接收机差分码偏差估计[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(2): 377-383)

[11] SCHARE S, GURTNER W, FELRENS J. 1998. IONEX: The ionosphere map exchange format version 1[OL]. [2015-09-17]. https://gssc.esa.int/wp-content/uploads/2018/07/ionex11.pdf

[12] ZHOU P Y, NIE Z X, YAN X, *et al*. Differential code bias estimation based on uncombined PPP with LEO onboard GPS observations[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **65**(1): 541-551

[13] ZHU Y, JIA X, LIANG Y. Analysis of positioning accuracy for COMPASS based on single/multi frequency pseudo-range[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin: Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013: 391-401

[14] 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)

[15] YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng, LI Min. Precise estimation and characteristic analysis of Multi-GNSS receiver differential code biases[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, **43**(12): 2106-2111 (袁运斌, 张宝成, 李敏. 多频多模接收机差分码偏差的精密估计与特性分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, **43**(12): 2106-2111)

[16] LI Zhenghang, HUANG Jinsong. GPS measurement and data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 92-105 (李征航, 黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社. 2010: 92-105)

[17] XIE Gang. GPS Principle and Receiver Design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 80-84 (谢钢. GPS原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.7: 80-84)

[18] CHOI B, MIN R. Comparison of GPS receiver DCB estimation methods using a GPS network[J]. *Earth Planet Space*, 2013. DOI.org/10.5047/eps.2012.10.003

[19] LINKFILED T G, TIEDJE J M. Characterization of the requirements and substrates for reductive dehalogenation by strain DCB-1[J]. *Journal of Industrial Microbiology*, 1990(5): 9-15

[20] TANG Weiming, LIU Qian, GAO Kefu, *et al*, SHEN Mingxing. 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)

[21] Tabatabaei A, Mosavi M R, Khavari A, *et al*. Reliable urban canyon navigation solution in GPS and GLONASS integrated receiver using improved fuzzy weighted least-square method[J]. *Wireless Personal Communications*, 2017: 3181-3196

[22] Gu S, Dang Y, Wang H, *et al*. The effect of DCB correction on multi-system combination precise point positioning[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2019 Proceedings. Berlin: Lecture Notes in Electrical Engineering, Singapore2019: 305-313

[23] 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)

[24] ZHONG J H, LEI J H, YUE X, *et al*. Determination of differential code bias of GNSS receiver onboard low Earth orbit ssatellite[J]. *Remote Sensing*. 2016: 4896-4905. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2552542

[25] JIAO W H, GENG C J, MA Y H , *et al*. A method to estimate DCB of COMPASS satellites based on global ionosphere map[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2012 Proceedings. Berlin: Lecture Notes in Electrical Engineering , 2012: 347-353

[26] LOU Y D, GONG X P, 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, 辜声峰, 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)

[27] MEI Dengkui, WEN Debao. Comparative Analysis of Two Precise Processing Methods for MGEX BDS Differential Code Biases[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(5): 662-669 (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**(5): 662-669)

[28] JIN R, JIN S, FENG G P, *et al*. Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases[J]. *GPS Solution*, 2012. DOI.org/10.1007/s10291-012-0279-3

[29] WANG Ningbo. Study on GNSS differential code biases and global broadcast ionospheric models of GPS, Galileo and BDS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(8): 1069-1069 (王宁波. GNSS差分码偏差处理方法及全球广播电离层模型研究[J]. 测绘学报, 2017, **46**(8): 1069-1069)

(责任编辑: 孙伟英)