

**引文格式:**李昕,郭际明,周吕,等.一种精确估计区域北斗接收机硬件延迟的方法[J].测绘学报,2016,45(8):929-934. DOI:10.11947/j. AGCS.2016.20160044.  
LI Xin, GUO Jiming, ZHOU Lü, et al. An Accurate Method for the BDS Receiver DCB Estimation in a Regional Network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(8): 929-934. DOI: 10.11947/j. AGCS.2016.20160044.

# 一种精确估计区域北斗接收机硬件延迟的方法

李 昕<sup>1</sup>, 郭际明<sup>1</sup>, 周 吕<sup>1, 2</sup>, 覃发超<sup>1, 3</sup>

1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 桂林理工大学广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637000

## An Accurate Method for the BDS Receiver DCB Estimation in a Regional Network

LI Xin<sup>1</sup>, GUO Jiming<sup>1</sup>, ZHOU Lü<sup>1, 2</sup>, QIN Fachao<sup>1, 3</sup>

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Guangxi Key Laboratory for Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin 5410043, China; 3. Land and Resources College, China West Normal University, Nanchong 637000, China

**Abstract:** An accurate approach for receiver differential code biases (DCB) estimation is proposed with the BDS data obtained from a regional tracking network. In contrast to the conventional methods for BDS receiver DCB estimation, the proposed method does not require a complicated ionosphere model, as long as one reference station receiver DCB is known. The main idea for this method is that the ionosphere delay is highly dependent on the geometric ranges between the BDS satellite and the receiver normally. Therefore, the non-reference station receivers DCBs in this regional area can be estimated using single difference (SD) with reference stations. The numerical results show that the RMS of these estimated BDS receivers DCBs errors over 30 days are about 0.3 ns. Additionally, after deduction of these estimated receivers DCBs and knowing satellites DCBs, the extractive diurnal VTEC showed a good agreement with the diurnal VTEC gained from the GIM interpolation, indicating the reliability of the estimated receivers DCBs.

**Key words:** BDS; receiver DCB; regional area; SD; VTEC

**Foundation support:** The National Nature Science Foundation of China (No. 41474004); The Open Foundation of Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation (No. PF2013-10); Guangxi Space Information and Mapping Key Laboratory of Funding Issues (No. 15-140-07-32)

**摘 要:**提出了一种精确估计区域北斗接收机硬件延迟(DCB)的方法。该方法不需要传统复杂的电离层模型,在已知一个参考站接收机硬件延迟的条件下,利用正常情况下电离层延迟量和卫星-接收机几何距离强相关这一特点,采用站间单差法来精确估计区域内 BDS 接收机的硬件延迟。试验结果表明,该方法单站估计的单站北斗接收机连续 30 d 的硬件延迟 RMS 在 0.3 ns 左右。通过 GEO 卫星双频观测值扣除已知卫星 DCB 和本文方法估计的接收机 DCB,计算对应穿刺点一天的 VTEC 并和 GIM 格网内插结果并进行对比分析,二者大小和变化趋势均符合较好,进一步验证了本文提出的方法具有可靠性。

**关键词:**北斗;接收机硬件延迟;区域;站间单差;VTEC

**中图分类号:**P228      **文献标识码:**A      **文章编号:**1001-1595(2016)08-0929-06

**基金项目:**国家自然科学基金(41474004);精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(PF2013-10);广西空间信息与测绘重点实验室资助课题(15-140-07-32)

同 GPS 一样,目前中国的北斗系统(BDS)也发布了多个频率,卫星与接收机通过不同通道发射和接受这些不同频率的导航信号,而这些导航信号在通过不同通道所产生的时间延迟并不完全一致,由此产生的不同频率信号时延之间的差异成为频率偏差,又称为差分码偏差参数 DCB,包括卫星 DCB 和接收机 DCB<sup>[1-2]</sup>。对于 GPS 系统,二者之和数量级在几纳秒到几十纳秒<sup>[3-4]</sup>,是利用 GPS 观测数据计算电离层总电子含量的主要误差源<sup>[5]</sup>,同时也是影响单频用户导航定位主要误差源之一。BDS 目前已经初步实现了亚太地区 PNT 功能,获取准确的差分码偏差对于提高利用 BDS 观测值计算电离层总电子含量以及单频用户定位精度是至关重要的。

传统获取 GPS 或 BDS 接收机硬件延迟(DCB)一般通过全球或区域电离层建模来进行估计。这种方法是基于电离层集中在某一特定高度(如 350 km)薄壳上的假设,将卫星 DCB、接收机 DCB 和 VTEC 同时作为待估参数一起求解<sup>[6-14]</sup>。这种方法获取的 DCB 精度与选取的电离层模型有较强的相关性,特别是在局部小区域范围内,效果可能会受到电离层模型误差的影响,一些学者研究了不需要复杂电离层模型对卫星和接收机 DCB 进行估计校准的方法<sup>[15-16]</sup>。另外一方面由于卫星 DCB 和接收机 DCB 本身的强相关性,一般给定卫星 DCB 一个约束条件(如所有卫星 DCB 之和为零,也称为“零基准”)才能达到分离二者的目的<sup>[17]</sup>。“零基准”在分离 GPS 卫星和接收机 DCB 时效果较好,因为 GPS 信号相对较为稳定,而北斗在建设初期很难做到卫星频间偏差稳定性相同,不同轨道高度的卫星所处的外部环境也不尽相同,所以在分离 BDS 卫星 DCB 和接收机 DCB 时,如果采用类似 GPS 的“零基准”,在某些时刻,如卫星频间偏差出现突变,会影响整体估计的卫星 DCB 值<sup>[18-19]</sup>。

基于此,本文提出一种精确估计区域北斗接收机 DCB 的方法。该方法主要利用在正常情况下电离层延迟和卫星-接收机之间几何距离强相关原理,通过站间单差求取区域其他北斗站相对于参考站的相对 DCB 值,在已知一个参考站接收机 DCB 的前提下,便可获取区域内其他站接收机的绝对 DCB。该方法不需要复杂的电离层模型,只求取接收机 DCB,回避了利用传统电离层建模方法提取接收机 DCB 对选择的电离层模型依赖

的问题,另外也无需考虑在分离卫星和接收机 DCB 时所采取的基准问题。为了验证本文方法的可行性,选取 IGS 九峰站作为已知参考站,估计了 6 个武汉 CORS 站连续 30 d 的北斗接收机 DCB,并利用 GEO 实测双频数据扣除估计的接收机 DCB 和 IGS 获取的卫星 DCB,计算对应穿刺点一天的 VTEC 量并和 GIM 格网内插结果进行比对分析,验证了本文提出的方法的可行性。

1 方法介绍

1.1 站间单差电离层延迟与卫星-接收机几何距离关系

北斗目前发布了 3 个频率信号,主要对应载波和伪距观测值。双频无几何组合观测值常用于精确估计 TEC 和 DCB,该组合可以很好地消除一些 BDS 观测值常见误差,如对流层延迟误差、卫星和接收机钟差等。下面给出 BDS 双频无几何观测值具体数学表达式

$$P_{j,4}^i = P_{n,j}^i - P_{m,j}^i = AI_j^i + DCB^i + DCB_j \quad (1)$$

式中, $P_{n,j}^i$ 和 $P_{m,j}^i$ 分别表示频道 $n$ 和频道 $m$ 对应的伪距观测值,本次选取北斗 B2 和 B3 两个频点对应的观测数据进行讨论,即 $n=2$ 、 $m=3$ ,频率分别为 1 207.140 Hz 和 1 268.520 Hz; $I_j^i$ 表示 $P_{n,j}^i$ 对应的电离层延迟量; $A$ 是一个常数,大小为 $1-f_n^2/f_m^2$ ;  $DCB^i$ 和 $DCB_j$ 分别表示卫星 $i$ 和测站 $j$ 接收机频道 $n$ 和频道 $m$ 之间的 DCB。

由于伪距观测值噪声相对较高,需要对 $P_{n,j}^i$ 和 $P_{m,j}^i$ 进行载波相位平滑处理,通过上式可以发现平滑伪距精度直接影响着 DCB 估值精度<sup>[20]</sup>。经过平滑可以得到 $\bar{P}_{j,4}^i$ <sup>[21]</sup>。

$$\bar{P}_{j,4}^i = \bar{P}_{n,4}^i - \bar{P}_{m,4}^i \quad (2)$$

假设区域内测站 $j$ 和测站 $k$ 同时观测到了卫星 $i$ ,对这两个站平滑后的无几何组合观测值求差,卫星 $i$ 的 DCB 被消除,具体表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{jk,4}^i &= \bar{P}_{j,4}^i - \bar{P}_{k,4}^i = AI_{jk}^i + \Delta DCB_{jk} \\ I_{jk}^i &= I_k^i - I_j^i \\ \Delta DCB_{jk} &= \Delta DCB_k - \Delta DCB_j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $\bar{P}_{jk,4}^i$ 表示站间单差平滑无几何组合观测值(SDP<sub>4</sub>); $I_{jk}^i$ 表示站间单差电离层延迟(SDI); $\Delta DCB_{jk}$ 表示两个测站接收机相对 DCB。

从式(3)可以看出,SDP<sub>4</sub>和SDI是相关的(相关系数为常数 $A$ )。另外SDP<sub>4</sub>不可避免地受到单差卫星-接收机几何距离(SDG)的影响。同

时结合图 1 可以看出,SDG 是随时间不断变化的,经过电离层区域的信号路径也随时间在变化,即 SDI 也是随时间在变化。

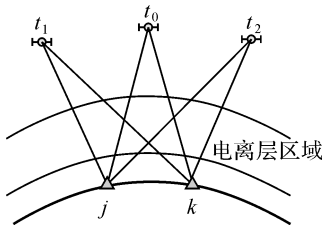


图 1 单差卫星-接收机几何距离随时间变化图

Fig. 1 SD satellite-receiver geometric ranges changes with respect to time

通过上面分析可知  $SDP_4$  同时受到 SDI 和 SDG 的影响。因此可以推论 SDI 和 SDG 也存在某种相关关系,即此时段内 SDG 随时间的变化量决定着大部分 SDI,剩余部分 SDI 可以称之为“单差电离层残余变化量”,因此可以用数学表达式表达如下

$$I_{jk}^i(t) = \alpha \Delta \rho_{jk}^i(t) + \beta \quad (4)$$

式(4)描述了 SDI 和 SDG 的线性关系, $\alpha$  表示 SDI 和 SDG 相关系数; $\beta$  是一个常量,表示“单差电离层残余变化量”。

### 1.2 区域 BDS 接收机 DCB 的估计

区域内必须已知至少一个 BDS 站接收机 DCB,称该站为参考站。该方法首先估计区域内其他北斗站和参考站之间的相对接收机 DCB,即单差接收机 DCB,然后根据已知参考站的 DCB 和已求取的单差 DCB 求取区域内 BDS 接收机的绝对 DCB。在估计单差 DCB 之前,首先选取满足以下 3 个条件的卫星和对应的连续观测时段:

- (1) 区域内参考站和其他北斗站站距离不能太远,一般说来,基线长度最好不超过 100 km。
- (2) 一般情况下电离层延迟在较短时间内保持不变,所以连续时段长一般不大于 2 h。
- (3) 在连续时段内 SDG 在某个具体时刻存在一个“零点”。

图 2 展示了符合以上 3 个条件的卫星和对应的连续时段的一个实例,实线反映了 WHCD 站在 2014 年 9 月 1 日一天的北斗卫星可视情况,虚线矩形内的加粗实线则表示满足以上条件的卫星和对应的连续时段。

以图 2 中的 12 号北斗卫星为例,IGS 的 JFNG 为参考站,图 3 展示了 12 号卫星在 10:31 至 11:31 时段内的 SDG 变化趋势。由图 2 可以

看出在  $t_0$  时刻满足 SDG 为零的条件。需要注意的是在计算 SDG 时,北斗卫星坐标利用 IGS 机构(如 GFZ)提供的精密轨道星历获取,地面 CORS 站坐标采用精密单点定位(PPP)获取。

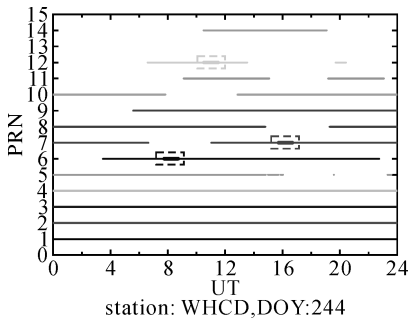


图 2 满足条件的卫星和连续时段实例

Fig.2 An example of selected PRNs and continuous periods satisfied the conditions

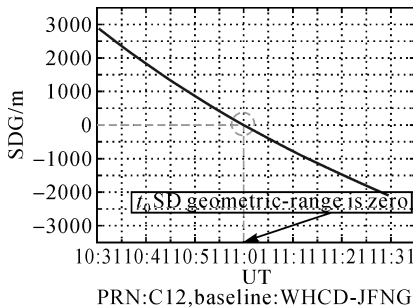


图 3 SDG 变化曲线

Fig. 3 Variation curve of the SD satellite-receiver geometric ranges

图 4 展示了 12 号卫星对应的  $SDP_4$  一小时的变化趋势。对比图 3 中 SDG 变化曲线,可以发现它们的变化趋势整体比较相近,经计算二者相关系数为 0.862。

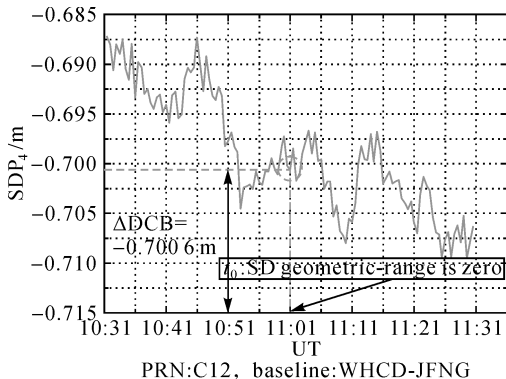


图 4  $SDP_4$  变化曲线

Fig.4 Variation curve of smoothed SD geometry-free linear observation

图 3 和图 4 对应的连续时段满足式(4)的关系。从图 1 可以发现在  $t_0$  时刻(即图 3 和图 4 对应的  $t_0$  时刻)SDG 为零。因为本文介绍的接收机 DCB 估计方法是针对小区域,即参考站和其他北斗站距离较近,所以在  $t_0$  时刻对应的 SDI 也近似为零。在实际数据处理中,该时段满足

$$\Delta\rho_{jk}^i(t_0)=0, \quad I_{jk}^i(t_0)=0,\Rightarrow\beta=0 \quad (5)$$

将式(4)和式(5)代入式(3)得到

$$\bar{P}_{jk,4}^i(t)=[A\Delta\rho_{jk}^i(t) \quad 1]\begin{bmatrix} \alpha \\ \Delta\text{DCB}_{jk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\alpha$  和  $\Delta\text{DCB}_{jk}$  为待估参数。

将  $t_0$  时刻的观测值带入上式,可以发现待估计的单差 DCB 即是此时刻对应的单差无几何组合观测值( $\text{SDP}_4$ ),这一特性在图 4 中可以反映出来。

在估计完单差 DCB 之后,根据参考站接收机已知 DCB 即可求取最终区域内其他北斗站接收机的绝对 DCB 值,如式(7)

$$\text{DCB}_k=\text{DCB}_j+\Delta\text{DCB}_{jk} \quad (7)$$

式中,下标  $j$  表示参考站;下标  $k$  表示区域内其他站。

2 试验及分析

为了验证本文方法的可行性,选取了 IGS 九峰站(JFNG)作为已知参考站(通过 IGS 网站“ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/mgex/dcb”即可直接获取该参考站 BDS 接收机 DCB 值)。本文估计了武汉市内分布较好的 6 个 CORS 站 BDS 接收机 DCB,JFNG 站和 6 个 CORS 站均采用 TRIMBLE NETR9 接收机。图 5 展示了 JFNG 站和 6 个 CORS 站的位置以及它们之间形成基线情况,表 1 给出了选取基线的长度。

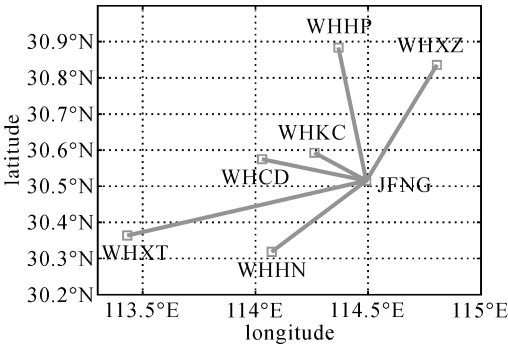


图 5 选取的基线情况  
Fig.5 Selected baselines for the estimation of BDS receivers DCBs in Wuhan

表 1 基线长度

	Tab.1 Baseline length						km
	WHCD-JFNG	WHHN-JFNG	WHHP-JFNG	WHKC-JFNG	WHXT-JFNG	WHXZ-JFNG	
base line length	44.8	45.8	42.4	23.6	103.1	46.4	

按照第 1 节介绍的方法,连续估计了图 5 中 6 个 CORS 站 2014 年 9 月份 30 d(DOY: 244—273)的北斗接收机 DCB。图 6 展示了 2014 年 9 月 1 日 JGNF 站北斗接收机 DCB(从 IGS 机构 GFZ 获取)以及该方法估计的 6 个 CORS 站北斗接收机最终 DCB 值。表 2 为 JFNG 站以及估计的 6 个 CORS 站连续 30 d 的 DCB 均方根误差(RMS)。

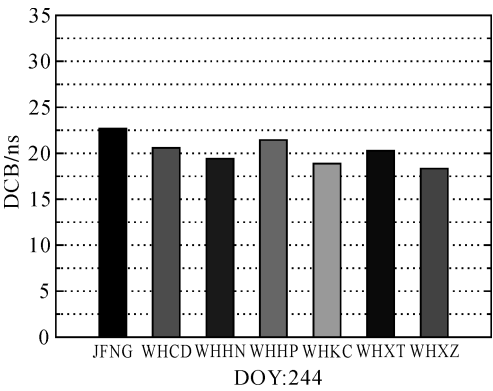


图 6 JFNG 站及估计的 6 个 CORS 站北斗接收机 DCB  
Fig.6 JFNG station and other estimated CORS stations BDS receivers DCBs

从图 6 可以看出该方法估计的单元北斗接收机 DCB 主要分布在 18~22 ns 之间,差距较小,这是因为 6 个 CORS 站均采用同一类型接收机。对于 GPS 系统,一般情况下接收机 DCB 具有长期的稳定性,均方根误差(RMS)在 0.2 ns 左右<sup>[22]</sup>。从表 2 可以看出该方法估计的 6 个 CORS 站连续 30 d 北斗接收机 DCB 均方根误差均在 0.3 ns 左右,与 GPS 接收机 DCB 稳定性相当。

由于北斗 GEO 卫星在中国区域能够全天可视,并且具有静地性,测站与 GEO 卫星信号形成的穿刺点位置基本不变,所以观测到的天顶方向电离层总电子含量 VTEC(vertical total election content)只随时间变化<sup>[23]</sup>。利用这一特性,选取 2014 年 9 月 1 日 WHCD 站观测到 1 号 GEO 卫星的双频数据扣除卫星 DCB(GFZ 获取)和本文估计的接收机 DCB,可以得到该 GEO 卫星穿刺点位置的全天 24 h VTEC,并与 CODE 公布的全球电离层格网内



插计算得到的该穿刺点全天 24 h 的 VTEC 进行对比分析,结果如图 7 所示。

表 2 连续 30 d 估计 BDS 接收机硬件延迟 RMS 值(DOY: 244—273)

Tab.2 RMS of the BDS receivers DCBs errors for consecutive 30 days(DOY: 244—273)

station	JFNG	WHCD	WHHN	WHHP	WHKC	WHXT	WHXZ
RMS	0.238 9	0.268 0	0.309 8	0.356 6	0.288 9	0.321 9	0.316 6

ns

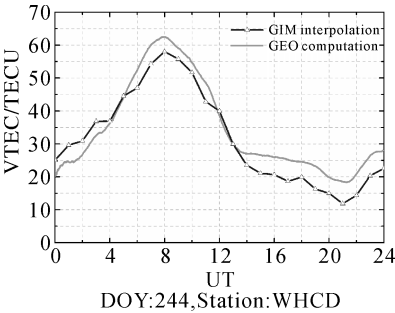


图 7 GEO 双频观测值计算电离层延迟和 GIM 内插计算电离层延迟量对比

Fig.7 A comparison of ionosphere delay between GEO computation and GIM interpolation

从图 7 可以看出,由 GEO 卫星双频实测数据扣除卫星及接收机 DCB 之后得到的该穿刺点全天 VTEC 和根据全球电离层格网模型内插得到的 VTEC 值大小以及变化趋势基本是一致的,间接证明了本文估计的北斗接收机 DCB 具有可靠性。另外由于全球电离层格网模型经过空间和时间内插,精度会有所损失,无法很好地表现该穿刺点 VTEC 大小以及随时间细致的变化特征,而由 GEO 双频实测数据计算 VTEC 相对随时间变化更平滑,能更细致地表现 VTEC 随时间的变化趋势。

3 结 论

本文提出了一种不需要通过传统电离层建模来估计区域北斗接收机 DCB 的方法。该方法首先构造出单差无几何组合观测值和单差电离层延迟量的线性关系,然后将单差电离层延迟量用单差卫星-接收机几何距离进行线性拟合,常数项即单差电离层变化残余量,在小区域内,当卫星运行至基线中天顶方向附近连续时段内,忽略该常数项,利用单差卫星-接收机几何距离和单差无几何组合观测值便可估计出单差接收机 DCB。该方法只估计区域北斗接收机 DCB,无需考虑在分离卫星和接收机 DCB 时所采取的基准问题,并且在一定程度上避免了利用传统电离层建模方法提取接收机 DCB 对采用电离层模型依赖的问题。

为了验证本文方法的可行性,选取了 IGS 的九

峰站为参考站,利用本文的方法估计了武汉市 6 个 CORS 站连续 30 d 的北斗接收机硬件延迟,单站估值 RMS 在 0.3 ns 左右,具有较好的稳定性。考虑到目前还没有很好的外部检核方法来验证 BDS 接收机 DCB 估计精度,本文通过 GEO 卫星双频实测数据扣除已知卫星 DCB 和该方法估计的接收机 DCB 得到该卫星穿刺点全天的 VTEC,并与全球电离层格网模型 GIM 内插得到的穿刺点全天 VTEC 进行了比较分析,二者无论大小还是变化趋势均有较好的一致性,证明本文方法估计的区域北斗接收机 DCB 的可靠性。

本文方法针对小区域范围内效果较好。随着区域范围增大,基线长度递增,该方法估计的 BDS 接收机 DCB 精度会受到单差电离层变化残余量的影响,因此下一步的工作是通过试验来进一步验证该方法估计 BDS 接收机 DCB 的精度和站分布区域大小的具体关系。

参考文献:

[1] SARDÓN E, RIUS A, ZARRAOA N. Estimation of the Transmitter and Receiver Differential Biases and the Ionospheric Total Electron Content from Global Positioning System Observations[J]. Radio Science, 1994, 29(3): 577-586.

[2] ARIKAN F, NAYIR H, SEZEN U, et al. Estimation of Single Station Interfrequency Receiver Bias Using GPS-TEC[J]. Radio Science, 2008, 43(4): RS4004. DOI: 10.1029/2007RS003785.

[3] CHOI K R, LIGHTSEY E G. Estimation of Total Electron Content (TEC) Using Spaceborne GPS Measurements[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2008, 56(3): 375-399.

[4] 范国清, 王威, 郗晓宁. 基于广义回归神经网络的电离层 VTEC 建模[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 16-21.  
FAN Guoqing, WANG Wei, XI Xiaoning. Modeling of Ionosphere VTEC Using Generalized Regression Neural Network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 16-21.

[5] 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.  
ZHANG Xiaohong, TANG Long. Estimation of COSMIC LEO Satellite GPS Receiver Differential Code Bias[J].

Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 377-383.

[6] COCO D S, COKER C, DAHLKE S R, et al. Variability of GPS Satellite Differential Group Delay Biases[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(6): 931-938. DOI: 10.1109/7.104264.

[7] MANNUCCI A J, IJIMA B, SPARKS L, et al. Assessment of Global Tec Mapping Using a Three-dimensional Electron Density Model[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1999, 61(16): 1227-1236.

[8] SCHAEER S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [J]. Geodätisch-geophys, Arbeiten in der Schweiz, 1999, 59: 32-38.

[9] OTSUKA Y, OGAWA T, SAITO A, et al. A New Technique for Mapping of Total Electron Content Using GPS Network in Japan[J]. Earth, Planets and Space, 2002, 54(1): 63-70.

[10] KAO S P, CHEN Y C, NING F S. A MARS-based Method for Estimating Regional 2-D Ionospheric VTEC and Receiver Differential Code Bias [J]. Advances in Space Research, 2014, 53(2): 190-200.

[11] MA Guanyi, GAO Wei, LI Jinghua, et al. Estimation of GPS Instrumental Biases from Small Scale Network[J]. Advances in Space Research, 2014, 54(5): 871-882.

[12] 张东和, 萧佐. 利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 451-458.

ZHANG Donghe, XIAO Zuo. A Method of Calculating TEC with GPS Data and Its Application to the Ionospheric Disturbances[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(4): 451-458.

[13] 张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(2): 140-143, 159.

ZHANG Xiaohong, LI Zhenghang, CAI Changsheng. Study on Regional Ionospheric Model Using Dual-frequency GPS Measurements [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(2): 140-143, 159.

[14] 聂文锋, 胡伍生, 潘树国, 等. 利用 GPS 双频数据进行区域电离层 TEC 提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1022-1027.

NIE Wenfeng, HU Wusheng, PAN Shuguo, et al. Extraction of Regional Ionospheric TEC from GPS Dual Observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(9): 1022-1027.

[15] HONG C K, GREJNER-BRZEZINSKA D A, KWON J H. Efficient GPS Receiver DCB Estimation for Ionosphere Modeling Using Satellite-receiver Geometry Changes[J]. Earth, Planets and Space, 2008, 60(11): e25-e28.

[16] ZHANG Baocheng, TEUNISSEN P J G. Characterization of Multi-GNSS Between-receiver Differential Code Biases Using Zero and Short Baselines [J]. Science Bulletin, 2015, 60(21): 1840-1849.

[17] JIN Rui, JIN Shuanggen, FENG Guiping. M\_DCB: Matlab Code for Estimating GNSS Satellite and Receiver Differential Code Biases[J]. GPS Solutions, 2012, 16(4): 541-548.

[18] LI Zishen, YUAN Yunbin, LI Hui, 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.

[19] LI Zishen, YUAN Yunbin, FAN Lei, et al. Determination of the Differential Code Bias for Current BDS Satellites[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 3968-3979.

[20] 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 447-453.

ZHANG Baocheng, OU Jikun, YUAN Yunbin, et al. Calibration of Slant Total Electron Content and Satellite-receiver's Differential Code Biases with Uncombined Precise Point Positioning Technique[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(4): 447-453.

[21] 张成军, 杨力, 陈军. 提高 GPS 载波相位平滑伪距定位精度的算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 106-110.

ZHANG Chengjun, YANG Li, CHEN Jun. Improving Point Positioning Accuracy Using GPS Carrier Smoothed Pseudorange[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(4): 106-110.

[22] SARDÓN E, ZARRAOA N. Estimation of Total Electron Content Using GPS Data: How Stable are the Differential Satellite and Receiver Instrumental Biases? [J]. Radio Science, 1997, 32(5): 1899-1910.

[23] 吴晓莉, 韩春好, 平劲松. GEO 卫星区域电离层监测分析[J]. 测绘学报, 2013, 42(1): 13-18.

WU Xiaoli, HAN Chunhao, PING Jinsong. Monitoring and Analysis of Regional Ionosphere with GEO Satellite Observations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(1): 13-18.

(责任编辑:丛树平)

**收稿日期:** 2016-01-28  
**修回日期:** 2016-04-25  
**第一作者简介:** 李昕(1989—),男,博士生,研究方向为 GNSS 精密数据处理。  
**First author:** LI Xin (1989—), male, PhD candidate, majors in GNSS precise data processing.  
**E-mail:** whuxin@hotmail.com