

DOI:10.13203/j.whugis20180135



文章编号:1671-8860(2018)12-2106-06

多频多模接收机差分码偏差的精密估计与特性分析

袁运斌¹ 张宝成¹ 李 敏¹

1 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

摘 要:全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)探测大气电离层需要精确处理由接收机差分码偏差(differential code bias,DCB)引起的系统误差。准确掌握接收机 DCB 的多时间尺度精细变化等特性是联合美国 GPS、中国北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system,BDS)和欧盟 Galileo 等多 GNSS 技术监测电离层所面临的主要科学问题之一。为此,提出了基于零基线精密估计站间单差接收机 DCB 的方法,并对站间单差接收机 DCB 的日加权平均值进行了分析。基于 4 台多模接收机采集于 2013 年的双频观测值,揭示了站间单差接收机 DCB 的变化可能受 3 种因素的影响,即接收机内置软件的版本升级(实验中引起了约 3 ns 的显著增加)、拆卸个别接收机所导致的观测条件改变(实验中引起了约 1.3 ns 的显著减少)和估计方法的误差(引起了与导航系统卫星几何结构重复性相一致的周期性变化)等。

关键词:GPS;BDS;Galileo;电离层;接收机差分码偏差;零基线

中图分类号:P228

文献标志码:A

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)反演大气电离层可用于探索空间大气活动的物理机制,解释地震等自然灾害的具体成因,改善卫星导航定位的精度等^[1-5]。近年来,随着美国 GPS 的稳定运行和不断现代化、中国北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system,BDS)与欧盟 Galileo 的逐步建成并投入使用,如何更有效地发挥多 GNSS 在地球空间电离层监测方面的作用,已成为国内外学者日益关注的重要研究方向^[6-11]。

GPS、BDS 和 Galileo 系统的星座特征如运行周期、轨道高度、星下点轨迹等均有各自的特色和优势。与仅采用单一导航系统相比,有效融合多 GNSS 系统将能显著地改善地球空间电离层反演的精度与时空分辨率。中国 BDS 卫星星座由中地球轨道(medium earth orbit,MEO)卫星、地球静止轨道(geostationary earth orbit,GEO)和倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit,IGSO)卫星组成^[12-14]。其中,IGSO 卫星能有效改善高纬区域的可视性及增加中国的电离层大气掩星事件密度;GEO 卫星则特别适用于电离层赤道异常监测、中尺度行扰反演等^[15]。另

一方面,多 GNSS 系统提供了更多可用的双频/多频率测距信号,这将能更有效地克服观测值中的偶然误差(如观测噪声)和系统误差(如多路径效应)对电离层研究的不利影响^[16]。

利用 GPS、BDS 及 Galileo 的观测信息精确计算电离层垂直总电子含量(vertical total electron content,VTEC)参数是多 GNSS 电离层研究的核心工作,而观测值中的卫星与接收机差分码偏差(differential code bias,DCB)的稳定性则是制约利用 GNSS 观测计算的电离层 VTEC 精度与可靠性的最关键因素^[17-18]。目前,各类 GNSS 卫星 DCB 均已具备良好的稳定性^[19-21],使得接收机 DCB 的相对不稳定性成为了影响 VTEC 计算效果的最严重误差源之一^[22-23]。具体地,GNSS 接收机 DCB 的短、中期变化通常会引起电离层延迟计算过程中的平滑误差^[24-25]以及电离层 VTEC 模拟过程的建模误差^[26-28]。

GNSS 电离层研究中,为有效地控制、处理由接收机 DCB 引发的误差影响,需要对其变化特性进行系统深入的分析 and 研究。国内外现有的接收机 DCB 分析方法可概括为单差法^[22,24]和拟合法^[29-32]。单差法主要对由两台相邻接收机所分别

收稿日期:2018-09-03

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501900);国家自然科学基金(41674022,41604031);王宽诚率先人才计划卢嘉锡国际团队项目。

第一作者:袁运斌,博士,研究员,主要从事大地测量卫星导航大气延迟改正、精密定位定轨与系统仿真测量等方面的研究。yybgps@whigg.ac.cn

提取的电离层延迟信息作差分运算,获取一组对应于全部共视 GNSS 卫星的站间单差接收机 DCB 估值时间序列,对于某特定时间段内,通过分析不同组时间序列之间的最大差异即可掌握接收机 DCB 在该期间的稳定性。拟合法主要通过建立合理的数学模型拟合电离层 VTEC 时空变化规律,利用一定时间内的 GNSS 电离层延迟信息同时估计 VTEC 模型参数与卫星和接收机两类 DCB,随后对接收机 DCB 估值进行分析。

单差法和拟合法通常需要累积数小时至 1 d 的 GNSS 观测值以实现接收机 DCB 估计,估值的准确性也易受平滑误差和建模误差的影响,因此仅适用于研究接收机 DCB 的中、长期显著变化。准实时、可靠地估计更高时间分辨率的接收机 DCB,将有利于发现和掌握接收机 DCB 短时间尺度的精细变化特征,进而能更准确地揭示导致其发生变化的主要因素。为此,本文提出将一组接收机布设成零基线观测设备,并探索一种与其相适应的 GNSS 数据处理方法,最终实现了站间单差接收机 DCB 的逐历元精密估计。与单差法和拟合法相比,利用本文方法计算站间单差接收机 DCB 既不需要提取电离层延迟信息,也不依赖 VTEC 建模技术,由此确保了估值的时间分辨率与观测数据的采样率一致(本文为 30 s),估值的精度也仅受伪距观测噪声的影响,估值的准确性则可通过约束双差模糊度为整数加以改善。

本文提出的站间单差接收机 DCB 估计方法与分析方案包括 3 个方面:①不仅顾及了已被广泛讨论的 GPS,还系统地研究了现已稳定运行的 BDS 系统,以及数据采集期间包含 4 颗在轨验证卫星的 Galileo 系统;②深入地分析了 Trimble/Javad/Septentrio 等 3 类测地型接收机的 DCB 特性;③初步探索了站间单差接收机 DCB 的日加权平均值在一年内的变化规律及其与若干因素之间的联系。

1 多 GNSS DCB 精密估计方法

本文提出了一种相对更为准确、可靠的站间单差接收机 DCB 估计方法。在不依赖任何外部信息和假设的条件下,该方法通过处理零基线站间单差观测值,充分地消除了大气延迟和多路径效应等系统误差,逐历元地估计了仅受观测噪声影响的站间单差接收机 DCB,并且约束了双差模糊度为整数以提高估计结果的可靠性,其数学模型和实施步骤可简述如下。

1)对于零基线观测设备中的两台接收机,假设其在当前历元时刻 i 共采集了 m 颗卫星的双频观测值,即 $s=1\cdots m$ 和 $j=1,2$,分别利用 GPS、BDS 和 Galileo 卫星的观测值估计站间单差接收机 DCB 的数学模型均可一致地表示为:

$$\begin{cases} E(\bar{p}_j^{s,i}) = \bar{d}t^i + \bar{b}_j^i \\ E(\bar{\varphi}_j^{s,i}) = \bar{d}t^i + \bar{\delta}_j^i + \lambda_j \bar{z}_j^s \end{cases} \quad (1)$$

$$D(\bar{y}_j^{s,i}) = \frac{2(\sigma_y^s)^2}{\sin^2\theta^{s,i}} \quad (2)$$

式(1)表示函数模型,用于表征观测值与未知参数之间的数学关系,其中, $E(\cdot)$ 为数学期望运算符; $\bar{p}_j^{s,i}$ 和 $\bar{\varphi}_j^{s,i}$ 分别表示站间单差的伪距和相位观测值,对应于卫星 s 、频率 j 和历元 i ; $\bar{d}t^i$ 为接收机相对钟差; \bar{b}_j^i 为接收机相对硬件延迟; $\bar{\delta}_j^i$ 为接收机相对相位偏差; \bar{z}_j^s 为站间单差模糊度(单位为周,其系数即为波长 λ_j)。式(2)表示随机模型,用于度量各类站间单差观测值的数据质量,其中, $D(\cdot)$ 为数学方差运算符; $\bar{y}_j^{s,i} \in \{\bar{p}_j^{s,i}, \bar{\varphi}_j^{s,i}\}$; σ_y^s 为天顶方向非差观测值的标准差; $\theta^{s,i}$ 是卫星 s 在时刻 i 的高度角。

2)由于式(1)所示的函数模型不可解,为此,定义了 3 个未知参数为基准,具体包括第一个频率上的接收机相对硬件延迟 \bar{b}_1^i 和第一颗卫星的双频模糊度 \bar{z}_1^s ,使得剩余参数的数学解释发生了以下变化: \bar{b}_2^i 吸收了 \bar{b}_1^i ,变成了可估的站间单差接收机 DCB,即 $b_p^i = \bar{b}_2^i - \bar{b}_1^i$;对于卫星 $s=2\cdots m$,其可估的双频模糊度 $z_j^s = \bar{z}_j^s - \bar{z}_1^s$,从而具备了双差形式和整数特性。

3)联合由式(1)和(2)所组成的单历元满秩函数模型,并将双差模糊度正确地约束为整数,即可逐历元地同步估计站间单差接收机 DCB 和各类相对钟差参数。

本文将对由上述方法所获取的站间单差接收机 DCB 展开 3 个层面的分析,即:①在一段时间内(如 1 d),分析由不同导航系统的观测值所估计的站间单差接收机 DCB 在不同历元之间是否存在显著变化;②分析由不同类 BDS 卫星的观测值所估计的站间单差接收机 DCB 的日加权平均值之间是否存在显著差异;③站间单差接收机 DCB 的日加权平均值在长时间内(如 1 a)的变化影响因素。

2 实验与分析

将 4 台接收机(依次命名为 CUT0/CUT1/CUT2/CUT3)布设成零基线观测设备,采集和处

理了2013年一整年的GPS/BDS/Galileo双频观测数据,采样间隔为30 s。CUT0和CUT2为Trimble NETR9接收机,CUT1和CUT3分别为Septentrio POLARX4和Javad TRE-G3TH_8接收机。2013年内CUT0和CUT3接收机升级了内置软件的版本,CUT3也在某些天内被拆卸。

在估计站间单差接收机DCB时,GPS/BDS/Galileo天顶方向非差观测值的标准差选用了文献[33-34]中推荐的经验值,其中,伪距和相位标准差分别约为30 cm和0.3 cm。实验中选用广播星历计算卫星位置,BDS和Galileo的广播星历在2013年内不完整,它们的起始年积日(day of year,DOY)分别为049和017。卫星截止高度角选取为 15° 。采用最小二乘模糊度降相关(least-squares ambiguity decorrelation adjustment,LAMBDA)方法逐历元地将双差模糊度固定为整数。

实验共考察了3对接收机(CUT0-CUT1、CUT0-CUT2、CUT0-CUT3)之间的相对DCB。对于每一对接收机,分别利用GPS、GEO(BDS)、IGSO(BDS)、MEO(BDS)和Galileo卫星的观测值估计了5类站间单差接收机DCB,并在后文中将其依次命名为GPS/GEO/IGSO/MEO/Galileo站间单差接收机DCB。同时,为了简化论述,后文将仅对若干最具代表性的站间单差接收机DCB估计结果进行分析和讨论。

图1列出了若干组对前两类影响因素存在显著响应的站间单差接收机DCB日加权平均值时间序列,红色线分别对应DOY 174和DOY 261;在随后的一天,CUT0和CUT3接收机的内置软件版本分别被升级至4.80和3.5.2;两组黑色框标示了CUT3接收机被拆卸的两个时期(DOY 242-246和DOY 254-261)。可见,所展示的几组站间单差接收机DCB时间序列对前述两类事件的响应特征完全相反。一方面,在内置软件升级后,站间单差接收机DCB估值出现了整体的向上跃迁特征;图1(a)和图1(b)中的变化幅度分别约为0.4 ns和3 ns。另一方面,在CUT3被移除期间,图1(a)中的两类站间单差接收机DCB则减少了约1.3 ns。分析发现,在CUT3被移除后,其余接收机所采集的GNSS观测值的信噪比明显变大,这可能会降低GNSS测距信号在接收机内部通道的时延,进而成为前述站间单差接收机DCB减少的原因。

图2显示了CUT0-CUT2 GEO站间单差接收机DCB日加权平均值的变化与2013年日平均

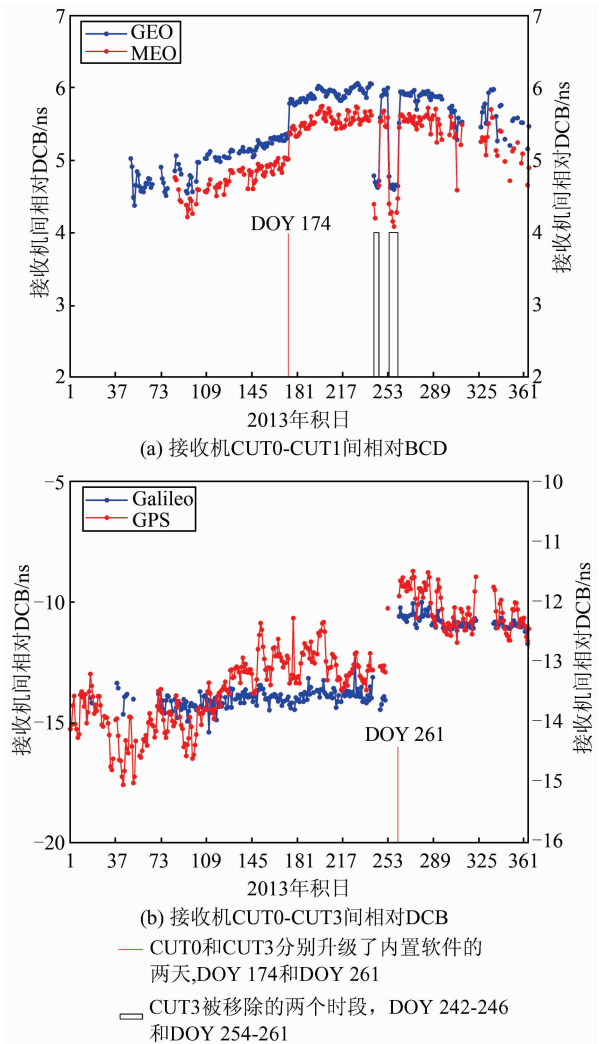


图1 若干类站间单差接收机DCB对内置软件版本升级和观测条件改变等两类事件的响应

Fig. 1 Changes of Daily Time Series of Between-Receiver DCB Estimates Along with the Version Update of the Receiver's Firmware and the Observation Conditions

气温之间的关系。其中,各天的日平均气温是由内插 $1^\circ \times 1^\circ$ 的ERA-Interim气象数据得到,其精度相对较高^[35]。图2中显示,该组站间单差接收机DCB日加权平均值与日平均气温的变化趋势呈现典型的负相关性,这是因为,随着日平均气温的逐渐降低,站间单差接收机DCB日加权平均值则缓慢增加,并稳定于2013年中的最低温时期。由气温变化所引起的站间单差接收机DCB日加权平均值的改变约为0.5 ns。

图3给出了CUT0-CUT2 MEO站间单差接收机DCB日加权平均值及其后验标准差(standard deviation, STD)时间序列。为掌握站间单差接收机DCB的精细变化特征,图3仅展示了DOY 49-151期间的结果:站间单差接收机DCB估值的后验标准差呈现了周期为7 d的规律性变

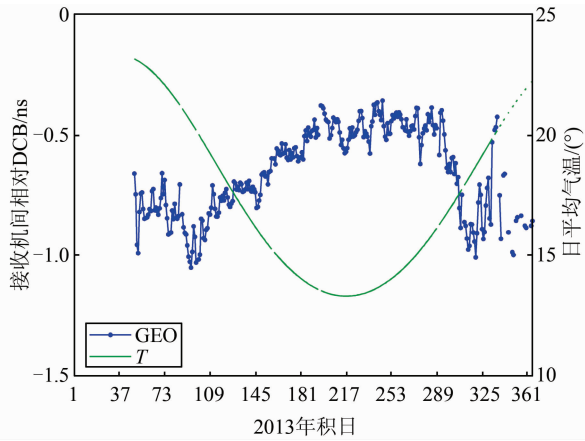


图 2 CUT0-CUT2 GEO 站间单差接收机 DCB 对测站处全年日平均气温变化的响应

Fig. 2 Changes of Daily Time Series of Between-Receiver DCB Estimates for Receiver-Pair CUT0-CUT2 Along with the Daily Receiver Temperature

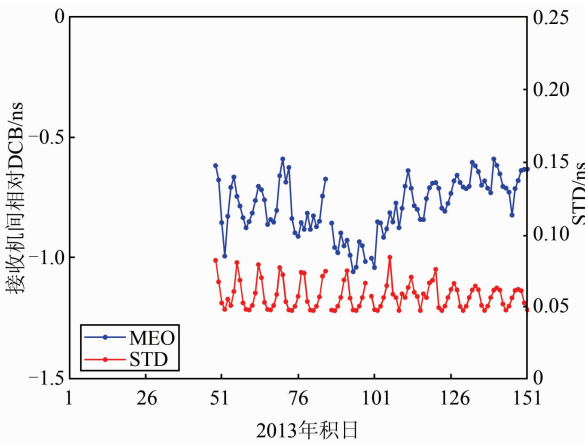


图 3 DOY 49-151 期间 CUT0-CUT2 MEO 站间单差接收机 DCB 和其后验标准差时间序列

Fig. 3 Daily Time Series of the Estimates and Standard Deviations for Between-Receiver DCB of Receiver-Pair CUT0-CUT2 During the Period of DOY 49-151, 2013

化,这是由于 BDS MEO 卫星几何结构每 7 d 重复一次^[36]。站间单差接收机 DCB 日加权平均值及其后验标准差的变化趋势具备一定程度的相似性,表明站间单差接收机 DCB 日加权平均值在这一期间的变化特征主要受其估计误差所支配。

3 结 语

接收机 DCB 是综合应用 GPS/BDS/Galileo 等多 GNSS 技术快速准实时监测地球空间电离层活动与变化时必须克服的主要误差源之一。本文有效地改善了目前的接收机 DCB 估计和分析方法性能,探索了一套能准实时精密估计站间单差接收机 DCB 的方法,深入细致地研究了 GPS/

BDS/Galileo 站间单差接收机 DCB 的多尺度时间特性,初步揭示了影响其变化的主要因素。

利用布设成零基线的 4 台测地型接收机采集于 2013 年的 GPS/BDS/Galileo 双频数据,本文逐历元地估计了时间分辨率为 30 s 且仅受观测噪声影响的 15 类站间单差接收机 DCB,并对其进行系统的验证和分析。研究发现,站间单差接收机 DCB 在一年内的变化特性包括:由内置软件升级和观测条件改变所引起的短期突变性,由全年日平均气温改变所造成的长期渐变性和由站间单差接收机 DCB 估计方法的误差所导致的周期性。

本文的分析和研究结论还有待选用地理分布更广泛、接收机硬件类型更多、观测时段更长的多类型 GNSS 观测数据加以进一步验证和完善。由于俄罗斯 GLONASS 采用频分多址技术播发测距信号^[37],导致其接收机 DCB 估值中还包含了与卫星有关的频率间偏差。如何将本文所发展的站间单差接收机 DCB 估计与分析方法扩展至 GLONASS,也是下一步将要开展的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Zhang Hongping, Han Wenhui, Huang Ling, et al. Modelling Ionospheric Delay with IGS Global Ground-Based GNSS Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37 (10): 1 186-1 189 (章红平, 韩文慧, 黄玲, 等. 地基 GNSS 全球电离层延迟建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37 (10): 1 186-1 189)
- [2] Yuan Y B, Ou J K. Differential Areas for Differential Stations (DADS): A New Method of Establishing Grid Ionospheric Model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(12): 1 033-1 036
- [3] Shi C, Zhao Q, Hu Z, et al. Precise Relative Positioning Using Real Tracking Data from COMPASS GEO and IGSO Satellites [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 103-119
- [4] Yuan Y B, Ou J K. A Generalized Trigonometric Series Function Model for Determining Ionospheric Delay[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14 (11): 1 010-1 014
- [5] Yuan Y B, Ou J K. An Improvement on Ionospheric Delay Correction for Single Frequency GPS User—the APR-I Scheme[J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(5-6): 331-336
- [6] Zhang B, Teunissen P J G, Yuan Y, et al. Joint Estimation of Vertical Total Electron Content (VTEC) and Satellite Differential Code Biases (SD-

- CBs) Using Low-Cost Receivers[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 401-413
- [7] Zhang B C, Ou J K, Yuan Y B, et al. Extraction of Line-of-Sight Ionospheric Observables from GPS Data Using Precise Point Positioning[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1 919-1 928
- [8] Wan Weixing, Xu Jiayao. Recent Investigation on the Coupling Between the Ionosphere and Upper Atmosphere[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(9): 1 863-1 883(万卫星, 徐寄遥. 中国高层大气与电离层耦合研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(09): 1 863-1 883)
- [9] Yuan Y, Li Z, Wang N, et al. Monitoring the Ionosphere Based on the Crustal Movement Observation Network of China[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 6(2): 73-80
- [10] Komjathy A, Galvan D A, Stephens P, et al. Detecting Ionospheric TEC Perturbations Caused by Natural Hazards Using a Global Network of GPS Receivers: The Tohoku Case Study[J]. *Earth Planets Space*, 2012, 64(12): 1 287-1 294
- [11] Hernaández-Pajares M, Roma-Dollase D, Krankowski A, et al. Methodology and Consistency of Slant and Vertical Assessments for Ionospheric Electron Content Models[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(12): 1 405-1 414
- [12] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P, et al. Initial Assessment of the COMPASS/BeiDou-2 Regional Navigation Satellite System[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 211-222
- [13] Yang Yuanxi, Li Jinlong, Wang Aibing, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(1): 72-81(杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(1): 72-81)
- [14] Tan B, Yuan Y, Zhang B, et al. A New Analytical Solar Radiation Pressure Model for Current BeiDou Satellites: IGGBSPM[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 32 967
- [15] Tang Long, Zhang Xiaohong. Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Detection Using Observations of COMPASS GEO Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1 409-1 412, 1 429(唐龙, 张小红. 利用北斗 GEO 卫星观测数据探测中尺度电离层行波扰动[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(12): 1 409-1 412, 1 429)
- [16] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of COMPASS/BeiDou Satellite Navigation System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6(杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1-6)
- [17] Zhou Dongxu, Yuan Yunbin, Li Zishen, et al. Analysis of Long-Term Variations of GPS Receivers' Differential Code Bias[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(5): 114-118(周东旭, 袁运斌, 李子申, 等. GPS 接收机仪器偏差的长期变化特性分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(5): 114-118)
- [18] Yuan Y, Tscherning C C, Knudsen P, et al. The Ionospheric Eclipse Factor Method (IEFM) and Its Application to Determining the Ionospheric Delay for GPS[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(1): 1-8
- [19] Li M, Yuan Y, Wang N, et al. Estimation and Analysis of Galileo Differential Code Biases[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3): 279-293
- [20] 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
- [21] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps[J]. *Navigation*, 2014, 61(3): 191-201
- [22] Ciralo L, Azpilicueta F, Brunini C, et al. Calibration Errors on Experimental Slant Total Electron Content (TEC) Determined with GPS[J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(2): 111-120
- [23] Coster A, Williams J, Weatherwax A, et al. Accuracy of GPS Total Electron Content: GPS Receiver Bias Temperature Dependence[J]. *Radio Science*, 2013, 48(2): 190-196
- [24] Brunini C, Azpilicueta F. Accuracy Assessment of the GPS-Based Slant Total Electron Content[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(8): 773-785
- [25] Zhang B C, Teunissen P J G. Characterization of Multi-GNSS Between-Receiver Differential Code Biases Using Zero and Short Baselines[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(21): 1 840-1 849
- [26] Zhang B, Teunissen P J G. Zero-Baseline Analysis of GPS/BeiDou/Galileo Between-Receiver Differential Code Biases (BR-DCBs): Time-Wise Retrieval and Preliminary Characterization[J]. *Navigation*, 2016, 63(2): 181-191
- [27] Brunini C, Azpilicueta F. GPS Slant Total Electron Content Accuracy Using the Single Layer Model Under Different Geomagnetic Regions and Ionospheric Conditions[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(5): 293-304
- [28] Conte J F, Azpilicueta F, Brunini C. Accuracy Assessment of the GPS-TEC Calibration Constants by

- Means of a Simulation Technique[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(10): 707-714
- [29] Zhang B, Yuan Y, Ou J. Short-Term Temporal Variability of GPS Receiver's Differential Code Biases (DCB): Retrieving and Modeling[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2016, 59(1): 101-115
- [30] Zhang D H, Zhang W, Li Q, et al. Accuracy Analysis of the GPS Instrumental Bias Estimated from Observations in Middle and Low Latitudes[J]. *Ann Geophys*, 2010, 28(8): 1 571-1 580
- [31] Li Z, Yuan Y, Li H, et al. Two-Step Method for the Determination of the Differential Code Biases of COMPASS Satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86 (11): 1 059-1 076
- [32] Li Z, Yuan Y, Fan L, et al. Determination of the Differential Code Bias for Current BDS Satellites [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52 (7): 3 968-3 979
- [33] Teunissen P J G, Odolinski R, Odijk D. Instantaneous BeiDou + GPS RTK Positioning with High Cut-Off Elevation Angles[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4): 335-350
- [34] Odolinski R, Teunissen P J G, Odijk D. Combined BDS, Galileo, QZSS and GPS Single-Frequency RTK[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 151-163
- [35] Böhm J, Möller G, Schindelegger M, et al. Development of An Improved Empirical Model for Slant Delays in the Troposphere (GPT2w)[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 433-441
- [36] Li M, Qu L, Zhao Q, et al. Precise Point Positioning with the BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 927-943
- [37] Shi C, Yi W, Song W, et al. GLONASS Pseudorange Inter-Channel Biases and Their Effects on Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 439-451

Precise Estimation and Characteristic Analysis of Multi-GNSS Receiver Differential Code Biases

YUAN Yunbin¹ ZHANG Baocheng¹ LI Min¹

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: Pseudorange observations of Global Navigation Satellite System (GNSS) are well known to be affected by receiver differential code biases (DCBs), which need to be precisely calibrated for pseudo-range-based ionospheric sensing. It is therefore of importance to ascertain the intrinsic characteristics of receiver DCBs in the context of new-generation GNSS based on Global Positioning System (GPS), BeiDou satellite navigation system (BDS) and Galileo. In this contribution, we present a method that enables time-wise retrieval of between-receiver DCBs (BR-DCBs) from code measurements collected by a zero-baseline setup. Based on dual frequency measurements collected in 2013 by four receivers, we conclude that the variation of BR-DCBs may be affected by three factors, namely, the version update of the receiver's firmware, the observation conditions caused by the disassembly of individual receivers, and errors in the estimation method.

Key words: GPS; BDS; Galileo; ionosphere; receiver differential code biases (DCBs); zero-baseline

First author: YUAN Yunbin, PhD, professor, specializes in GNSS satellite navigation, atmospheric delay correction, precise positioning, orbit determination and system imitation test. E-mail: yybgps@whigg.ac.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0501900; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41674022, 41604031; LU Jiayi International Team Program Supported by the Wang Kuancheng Education Foundation and CAS.