

DOI:10.13203/j.whugis20150107



文章编号:1671-8860(2017)08-1040-07

# 北斗卫星伪距码偏差特性及其影响分析

楼益栋<sup>1</sup> 龚晓鹏<sup>1</sup> 辜声峰<sup>1</sup> 郑 福<sup>1</sup> 易文婷<sup>1</sup>

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

**摘 要:**在北斗导航卫星伪距码偏差特性分析的基础上,建立了倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)和中轨卫星(MEO)的伪距码偏差多项式改正模型;并利用星间单差宽巷小数周一致性,分析建立北斗地球同步轨道卫星(GEO)卫星伪距码偏差改正模型。采用武汉大学北斗试验网、中国陆态网络和 MGEX 网不同位置、不同类型接收机观测数据进行分析验证,结果表明,北斗卫星伪距码偏差特性与观测值频率、卫星类型相关,所有 GEO 和 IGSO 卫星变化规律相同,所有 MEO 卫星变化规律相同,与接收机类型、测站位置和观测时间无关,偏差值大小随卫星高度角变化,其变化规律稳定,可以采用建立的两类改正模型(GEO/IGSO 和 MEO)进行修正。通过偏差修正后的伪距无电离层组合的残差、双频 SPP 以及单频 PPP 三个方面验证了伪距码偏差改正模型的正确性。

**关键词:**北斗;伪距码偏差;GEO;多项式改正;单频精密单点定位

**中图法分类号:**P228.41

**文献标志码:**A

2012 年底,具备全星座三频信号调制的北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)正式提供亚太地区定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务<sup>[1]</sup>。北斗卫星导航系统(BDS)目前由 16 颗卫星组成,包括 6 颗地球同步轨道卫星(geostationary earth orbit, GEO),5 颗倾斜地球同步轨道卫星(inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)和 5 颗中轨卫星(medium earth orbit, MEO)。

围绕北斗信号质量与伪距码偏差特性,文献[2]分析了北斗的信号特征,发现北斗伪距存在码偏差不稳定等特性;文献[3]分析了该偏差和卫星高度角、信号播发频率的相关性,并认为该码偏差可能是由飞行器的多路径引起的;文献[4]进一步分析认为,该码偏差与测站位置、观测时间无关,同时所有 IGSO 卫星具有一致的变化趋势,MEO 卫星具有一致的变化趋势,并给出 IGSO 和 MEO 卫星 3 个频率每隔 10°高度角的改正数,然后线性内插得到改正值。但上述研究采用 MGEX (multi-GNSS experiment campaign) 观测数据,所用的北斗系统覆盖重点区域(我国范围)的观测

数据有限,对卫星码偏差特性分析的准确性(特别是 IGSO 卫星)有待进一步验证。另一方面,由于 GEO 为地球静止卫星,难以采用上述方法建立以卫星高度角变化为参量的伪距码偏差改正模型,因此国内外都尚未对 GEO 卫星伪距偏差特性进行细致分析。

针对上述问题,本文首先利用分布良好的测站及不同类型接收机观测数据验证分析了 IGSO 和 MEO 卫星伪距码偏差特性,并建立一种多项式改正模型;其次,提出利用星间单差宽巷小数周一致性来分析伪距码偏差的新方法,并利用该方法建立北斗 GEO 卫星伪距码偏差模型;最后通过伪距无电离层组合残差、双频伪距单点定位(single point positioning, SPP)和单频精密单点定位(precise point positioning, PPP)来验证本文的模型。

## 1 北斗卫星伪距偏差分析

### 1.1 分析方法与策略

#### 1.1.1 IGSO 和 MEO 卫星

采用伪距和相位的组合<sup>[5]</sup>对 IGSO 和 MEO

收稿日期:2015-07-04

项目资助:国家重点研发计划(2016YFB0501802);国家自然科学基金(41374034,41504028);国家 863 计划(2014AA123101)。

第一作者:楼益栋,博士,教授,研究方向为卫星实时精密定轨与精密 GNSS 数据处理。ydlou@whu.edu.cn

通讯作者:龚晓鹏,博士生。xpgong@whu.edu.cn



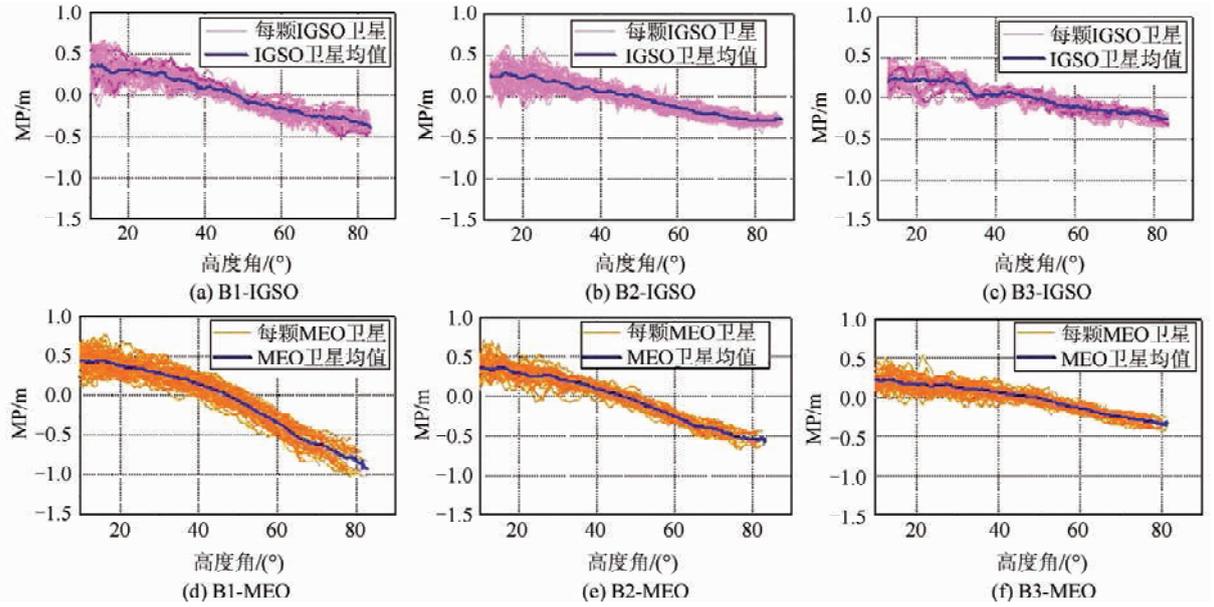


图3 MP值与高度角关系(DOY250~256/2013)

Fig. 3 Relationship of MP Value and Elevation(DOY250~256/2013)

由图3可知,所有测站的同一类型卫星MP值时间序列变化趋势接近,进一步验证了该系统性偏差主要不是多路径影响产生(多路径与测站环境相关,对不同测站的影响不一致),可以认为是北斗系统卫星端随高度角变化的系统性偏差。同时可以验证北斗IGSO/MEO卫星码偏差具有以下特性:①与卫星高度角相关,随高度角变化具有二次曲线类似特征;②与频率相关,不同频率伪距码偏差变化幅度各异,以MEO卫星为例,其B1/B2/B3码偏差变化幅度分别约为1.5/1.0/0.7m;③与卫星类型相关,所有IGSO卫星伪距码偏差变化趋势一致,所有MEO卫星伪距码偏差特性变化一致,且MEO卫星伪距码偏差变化幅度大于IGSO卫星;④与测站位置、接收机类型不相关。

进一步考虑伪距偏差的长期特性,采用式(4)分析不同年份、不同季节IGSO和MEO卫星的MP值随卫星高度角变化序列之间的相关性:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中, $\rho$ 为相关系数; $X$ 、 $Y$ 代表两个时间序列; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为两个时间序列的平均值, $n$ 为时间序列值的个数。

以时段1(2013年第250~256天)为参考,表2给出了其余4个时段的相关系数。由表2可知,北斗MP值时间序列不同时段之间的相关系数在0.99左右,说明IGSO、MEO卫星伪距码偏

差在长时间内保持与高度角相关的变化趋势,具有很好的 consistency。

表2 相关系数统计

Tab. 2 Statistic of Relative Coefficient

时段	IGSO			MEO		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
2	0.991	0.997	0.997	0.999	0.999	0.998
3	0.997	0.995	0.990	0.999	0.999	0.997
4	0.997	0.993	0.992	0.999	0.999	0.997
5	0.996	0.997	0.986	0.999	0.998	0.997

基于上述分析,本文采用三阶多项式(式(5))对两类卫星不同频率码偏差值进行以卫星高度角为自变量的拟合:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad (5)$$

式中, $y$ 为码偏差; $x$ 为卫星高度角,单位为弧度; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 为待求系数,其中 $a_0$ 与每颗卫星的硬件延迟相关,为伪距偏差的常数部分, $a_1$ 、 $a_2$ 以及 $a_3$ 描述了每颗卫星伪距偏差随高度角的变化。 $a_0$ 的取值会影响卫星DCB(Differential Code Bias)产品,此外 $a_0$ 可以被卫星钟差基准吸收,本文在改正伪距偏差随高度角的变化趋势时令其为0。根据图2和表1所表示的多跟踪站多期观测数据,采用最小二乘平差,获得不同频率码偏差改正系数,见表3。

利用表3的改正系数,根据高度角计算出改正数后加到相应伪距上的改正伪距偏差。图4给出了C07(IGSO)以及C12(MEO)偏差改正前后的MP值时序图(为便于比较,对MP值进行整体平移)。由图4可知,利用表3中的改正系数可消

除 IGSO 和 MEO 卫星不同频率伪距码偏差随高度角的变化。

表 3 IGSO、MEO 卫星伪距偏差改正系数

Tab. 3 Correction Coefficients of IGSO and MEO

系数	IGSO			MEO		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
$a_1$	-0.59	-0.26	-0.10	-0.95	-0.60	-0.20
$a_2$	1.62	1.00	0.75	2.16	1.64	0.65
$a_3$	-0.64	-0.38	-0.31	-0.64	-0.57	-0.18

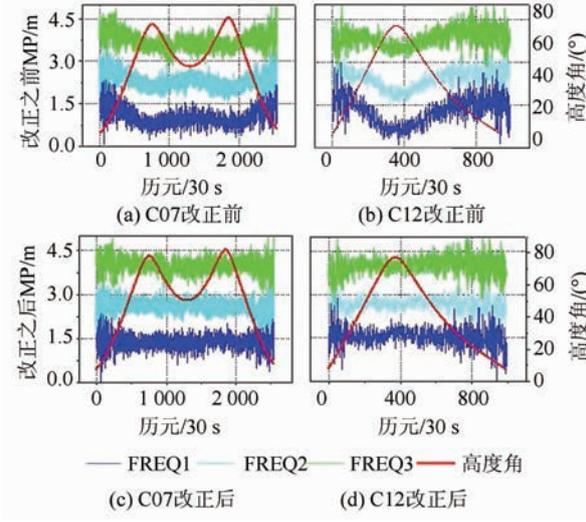


图 4 北斗卫星 MP 值与高度角时间序列图

Fig. 4 MP and Elevation Time Series of BDS Satellite

### 1.3 GEO 卫星码偏差分析及改正方法

依据 § 1.1.2 中 GEO 卫星码偏差分析策略

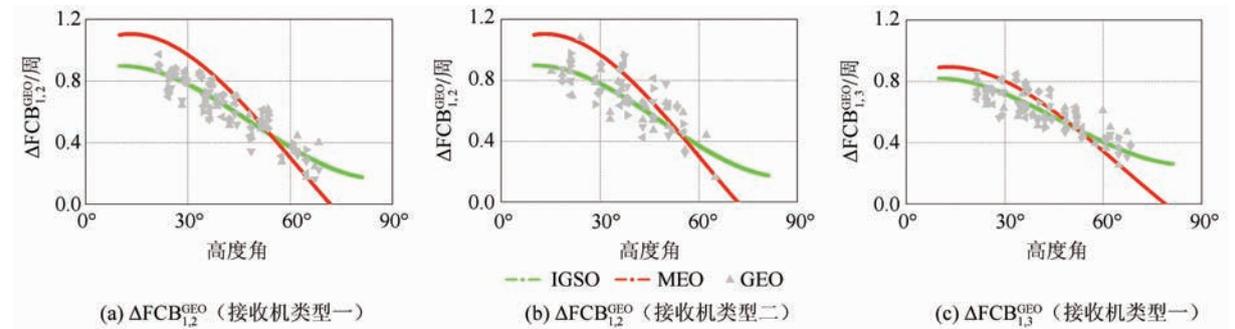


图 5 GEO 卫星 FCB 与卫星高度角关系

Fig. 5 Fractional of Wide-Lane Ambiguity of GEO Satellite

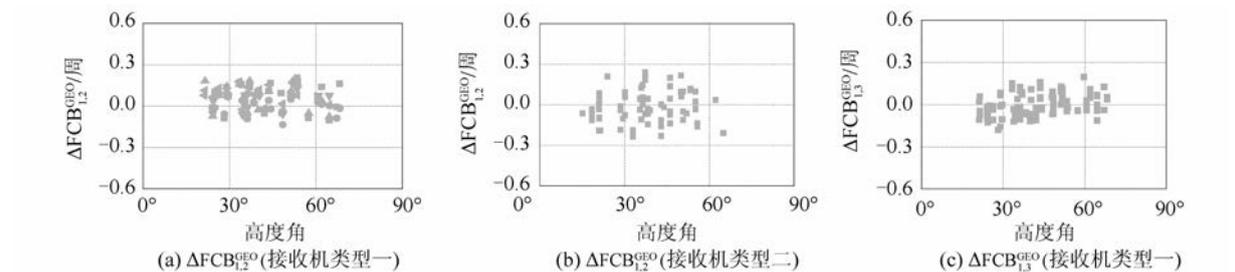


图 6 GEO 改正码偏差后的 FCB

Fig. 6 Fractional of Wide-Lane Ambiguity of GEO Satellite with Correction

与方法,以 C10 号 IGSO 卫星为参考星,采用表 3 中的改正系数对 C10 卫星伪距码偏差进行改正;在此基础上,计算各测站北斗 GEO 卫星相对于 C10 号卫星的星间单差宽巷模糊度小数周  $\Delta FCB_{1,2}^{GEO}$  和  $\Delta FCB_{1,3}^{GEO}$ ,图 5 为  $\Delta FCB_{1,2}^{GEO}$  和  $\Delta FCB_{1,3}^{GEO}$  随卫星高度角的变化图。

由于参考星 C10 偏差改正后的宽巷小数周不随高度角变化,图 5 中 FCB 序列的变化反映了 GEO 卫星存在随高度角变化的系统性误差(GEO 卫星伪距码偏差)。由于上述 GEO 卫星随高度角变化的偏差值采样样本不够,直接采用图 5 离散点拟合参数,精度有限,且无法获得每个频率的改正数。为此,本文在图 5 中同时比较了由表 3 中伪距偏差改正值计算得到的 IGSO(绿色)和 MEO(红色)卫星宽巷小数周随高度角变化。

可以看出,在 GEO 卫星和 IGSO 卫星都不进行伪距偏差改正的情况下,两者随高度角的变化趋势基本一致,因此认为 GEO 卫星与 IGSO 卫星的伪距码偏差变化特性相同,即 GEO 卫星伪距码偏差可以使用 IGSO 卫星的改正模型改正。本文试验采用 IGSO 卫星的偏差改正模型对 GEO 卫星进行改正后计算  $\Delta FCB_{1,2}^{GEO}$  和  $\Delta FCB_{1,3}^{GEO}$ ,其不存在与高度角相关的变化趋势(图 6),进一步验证了 IGSO 改正模型可以适用于 GEO 卫星改正。

## 2 模型验证

北斗伪距码偏差随卫星高度角变化,会影响卫星钟差基准、卫星硬件延迟产品。§1中已经验证利用本文的模型改正后,IGSO/MEO卫星MP值在时序上的变化趋势和GEO卫星宽巷小数周在不同测站间的不一致均得到消除。限于篇幅,下面通过对比偏差改正前后的伪距残差、双频伪距单点定位以及单频PPP来进一步验证本文的模型(数据详细信息见表1)。

### 2.1 伪距残差验证分析

固定测站坐标,分析伪距无电离层组合残差的特性<sup>[8]</sup>。需要指出的是,GEO卫星高度角几乎不变,其伪距残差并没有系统性变化,因此本节仅分析IGSO和MEO卫星残差。

图7统计了对应时段所有测站IGSO和MEO卫星残差分布直方图。其中,为了消除低高度角伪距噪声影响,仅统计高度角大于15°的卫星。

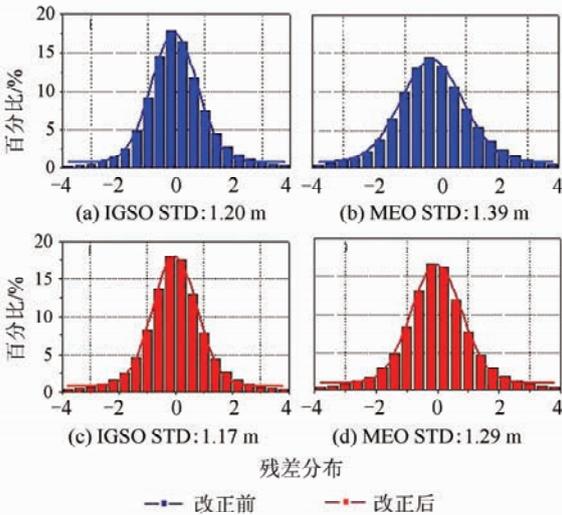


图7 残差分布直方图

Fig. 7 Residual Distribution Histogram

由图7可知,改正伪距码偏差之后,残差的标准差(STD)更小,其中MEO卫星残差STD降低了7.2%。

### 2.2 双频SPP定位验证分析

本节通过B1/B2双频SPP来验证码偏差对伪距单点定位的影响。统计分析所有测站SPP定位误差的平均值和STD,具体分析见表4、表5。结果表明,改正伪距码偏差后,显著改善了高程方向的系统性误差,但对平面改进很小,另外对高程与平面的STD影响很小。

表4 SPP定位误差平均值/m

Tab. 4 Average Value of SPP Error/m

接收机	高程		平面	
	未改正	改正	未改正	改正
类型一	1.21	0.16	0.39	0.38
类型二	0.82	0.09	0.42	0.41

表5 SPP定位误差STD/m

Tab. 5 STD of SPP Error/m

接收机	高程		平面	
	未改正	改正	未改正	改正
类型一	2.23	2.21	1.40	1.40
类型二	4.07	4.07	2.77	2.75

### 2.3 单频PPP定位验证分析

采用动态单频精密单点定位(PPP)方法<sup>[9]</sup>,分别对B1/B2/B3三个频率观测值进行解算。

图8给出了MMNS站第260天B1动态单频PPP定位结果与坐标真值比较时间序列图。由图8可知,改正伪距码偏差之后,主要提高了高程方向的定位精度,消除了高程方向的系统性误差,对南北和东西方向影响则不明显。我们分接收机类型统计B1、B2、B3三个频率的动态单频PPP定位结果(表6)。由于未改正伪距偏差之前高程方向存在系统性误差,本文暂不分析伪距偏差对于收敛的影响,只统计2h后的定位精度。

由表6可知,改正伪距码偏差之后,对于类型

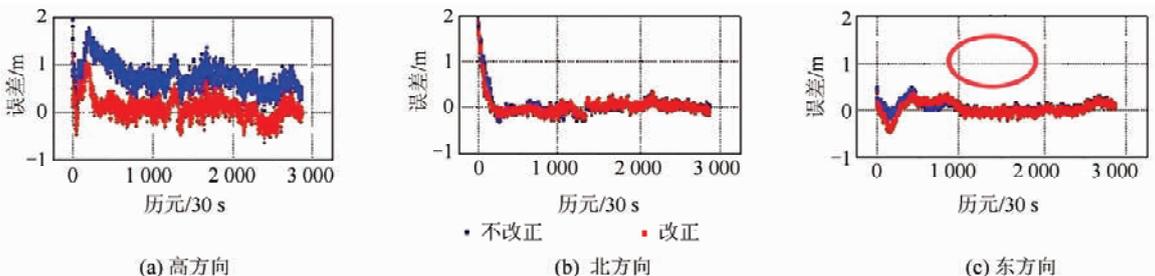


图8 MMNS动态单频PPP定位结果时间序列

Fig. 8 Single-Frequency PPP Result of MMNS

一的接收机, B1/B2/B3 单频 PPP 高程方向定位精度分别提高 35.4%、31.8% 和 16.2%; 对于类型二接收机, B1/B2 单频 PPP 高程方向的定位精

度提高分别为 8.7% 和 8.9%。而是否改正伪距码偏差对两类接收机的平面方向定位精度影响可以忽略。

表 6 动态单频 PPP 误差 RMS/m

Tab. 6 RMS of Single-Frequency PPP Error/m

接收机	B1				B2				B3			
	高程		平面		高程		平面		高程		平面	
	未改	改正										
类型一	0.79	0.51	0.44	0.44	0.69	0.47	0.54	0.55	0.68	0.57	0.54	0.54
类型二	1.26	1.15	0.95	0.91	1.23	1.12	0.91	0.90	—	—	—	—

### 3 结 语

北斗 GEO/IGSO/MEO 卫星均存在与卫星高度角、信号播发频率、卫星类型相关的伪距码偏差, 该偏差与观测时间、测站位置、接收机类型无关。本文利用大量数据, 拟合了 IGSO 和 MEO 卫星两类伪距偏差 3 个频率的改正系数, 并利用星间单差宽巷模糊度小数周的一致性, 分析建立了 GEO 卫星的伪距码偏差改正模型。通过伪距无电离层组合残差、双频 SPP 以及单频 PPP 验证了模型的正确性。结果表明, 本文给出的改正模型与系数能有效改正 GEO/IGSO/MEO 卫星伪距偏差, 能有效消除双频 SPP、动态单频 PPP 定位中高程方向的系统性偏差。

### 参 考 文 献

[1] China Satellite Navigation Office (CSNO). BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document, Open Service Signal (Version 2.0)[OL]. <http://www.chinabeidou.gov.cn/tongzhi/371.html>, 2013(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(2.0版)[OL]. <http://www.chinabeidou.gov.cn/tongzhi/371.html>, 2013)

[2] Hauschild A, Montenbruck O, Sleewaegen J M, et al. Characterization of Compass M-1 Signals[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16:117-126

[3] Montenbruck O, Rizos C, Weber R, et al. Getting a Grip on Multi-GNSS—The International GNSS

Service MGEX Campaign[J]. *GPS World*, 2013, 24(7):44-49

[4] Wanninger L, Beer S. BeiDou Satellite-Induced Code Pseudorange Variations: Diagnosis and Therapy[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4):639-648

[5] Zhang Xiaohong, Ding Lele. Quality Analysis of the Second Generation Compass Observables and Stochastic Model Refining[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7):832-836(张小红, 丁乐乐. 北斗二代观测值质量分析及随机模型精化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(7):832-836)

[6] Forssell B, Martin-Neira M, Harrisz R A. Carrier Phase Ambiguity Resolution in GNSS-2[C]. The ION GPS-97, Kansas City, USA, 1997

[7] Zhang Xiaohong, Li Pan, Li Xingxing, et al. An Analysis of Time-Varying Property of Wideline Carrier Phase Ambiguity Fractional Bias[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(6):798-803(张小红, 李盼, 李星星, 等. 宽巷载波相位模糊度小数偏差时变特性分析[J]. *测绘学报*, 2013, 42(6):798-803)

[8] Yang Y X, Li J L, Wang A B, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014(57):144-152

[9] Shi C, Gu S, Lou Y, et al. An Improved Approach to Model Ionospheric Delays for Single-Frequency Precise Point Positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(12):1698-1708

# The Characteristic and Effect of Code Bias Variations of BeiDou

LOU Yidong<sup>1</sup> GONG Xiaopeng<sup>1</sup> GU Shengfeng<sup>1</sup> ZHENG Fu<sup>1</sup> YI Wenting<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** Different from other navigation system, there is a divergence between code and phase observables of BeiDou Navigation Satellite System (BDS). In this paper, we analyze the characteristic of code bias variations and propose a polynomial correction model of GEO, IGSO and MEO satellites. Firstly, different stations and different receiver types observables of BeiDou Experiment Tracking Stations (BETS) of Wuhan University, Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) and Multi-GNSS Experiment campaign (MGEX) of IGS are used for analysis and verification. The results show that the code bias variations, which are dependent with satellite types and frequency and independent with receiver type, station position and observation time, vary with satellite elevations. Besides, the code bias variations of satellites may reach up to 1.5 m and can be divided into two groups (GEO/IGSO and MEO). Secondly, based on the analysis of code bias variations of BDS, we established a polynomial correction model of IGSO/MEO code bias variations. Besides, since the elevation of a GEO satellite remains unchanged, we propose to model the single-difference fractional cycle bias with wide-spread ground stations. Then, a correction model for code bias variations of GEO satellites is established by using the consistency of the fractional of wide-lane ambiguity of single-difference between satellites. Finally, the improvement brought by applying our correction model is validated by various strategies, e. g. residual distribution of pseudo-range is more close to normal distribution, and the positioning accuracy of dual-frequency single point positioning as well as single-frequency precise point positioning is improved.

**Key words:** BDS; code bias variations; GEO; polynomial correction; single-frequency PPP

**First author:** LOU Yidong, PhD, professor, specializes in the real time orbit determining and GNSS precise data processing. E-mail: ydlou@whu.edu.cn

**Corresponding author:** GONG Xiaopeng, PhD candidate. E-mail: xpgong@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Plan, No. 2016YFB0501802; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374034, 41504028; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2014AA123101.