

BDS 多路径效应特征及其对静态基线解精度的影响

石 强¹ 戴吾蛟¹ 曾凡河¹ 张 超¹

1 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙市麓山南路 932 号,410083

摘 要: 为研究 BDS 载波相位多路径效应的特征,在强多路径环境下进行连续多天短基线静态数据采集,并计算双差观测值残差序列,分 GEO、IGSO、MEO 3 类卫星分析 BDS 多路径重复性,在此基础上研究多路径效应对 BDS 静态基线解精度的影响。结果表明,BDS 多路径误差具有较强的重复性,其中 GEO 及 IGSO 卫星的多路径误差重复周期为 1 d,MEO 卫星的多路径误差重复周期为 7 d;GEO 卫星的多路径误差具有系统性偏移,但不是一个常数,而是随时间发生缓慢变化,因此长时间的静态观测并不能平滑该误差,从而导致在较强多路径环境下,BDS 多路径误差对其静态解的影响可达 cm 级。

关键词: BDS;载波相位;多路径;静态基线解
中图分类号: P228 **文献标识码:** A

与 GPS 类似,在高精度定位技术的各种误差源中,北斗卫星导航系统(BDS)的诸多误差如星历误差、卫星钟差、大气折射误差和接收机钟差等,都可以通过改正模型或差分技术得到消除或减弱。但是多路径效应在基线两端不具有相关性,无法通过上述方法消除或减弱,从而使多路径误差成为高精度 BDS 测量的主要问题^[1-2]。卫星导航定位系统的多路径效应主要取决于卫星、测站、反射面之间的几何结构,由于卫星的地面轨迹具有重复性,因此当接收机天线位置及周围环境保持不变时,多路径误差也具有重复性的特性^[3-4]。BDS 的星座设计与 GPS 差异较大,由静止轨道卫星(GEO)、中高轨道卫星(MEO)以及倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)组成,卫星星座变化更加复杂。因此,从卫星星座设计不同可以推断,BDS 多路径效应特征与 GPS 也将有所不同。Ye 等^[5]利用实测数据对 BDS 多路径效应进行详细分析,结果表明 BDS 与 GPS 多路径效应特征有较大差异。目前,我国有些测绘生产单位开始利用 BDS 进行高精度控制测量,但实际中发现很多基线的 BDS 静态解与 GPS 静态解存在 1~3 cm 的差异,初步推断这种差异可能是由 BDS 多路径效应所引起。为此,本文设计了一个强多路径环境进行的长时间短基线测量,在

深入分析其多路径效应特征的基础上,与另一开阔弱多路径环境的短基线静态解算结果作对比,分析 BDS 多路径效应对静态基线测量精度的影响。

1 载波相位多路径计算方法

对于短基线,双差消除了轨道误差、接收机钟差、卫星钟差,电离层以及对流层延迟可忽略不计,静态基线解的载波相位双差观测值残差主要为多路径误差。为分别研究 BDS 3 种类型卫星的多路径效应,需从观测值域内分离出各个卫星对的双差观测值残差^[6-7]。双差载波相位观测值的线性方程表示如下。

$$V = Ax + By - L \tag{1}$$

式中, A 、 B 分别为基线向量的系数及双差整周模糊度的系数, x 表示基线向量, y 表示双差整周模糊度, L 表示载波相位双差常数项, V 表示双差观测值残差。双差观测值残差的计算步骤如下:

- 1)按单天静态处理 7 d 的观测数据,然后将静态解算结果取平均作为基线的真值;
- 2)将静态解平均基线向量 x 代入式(1),反算并利用取整法求得双差整周模糊度 y ;
- 3)将前两步得到的 x 和 y 代入式(1),逐历元计算得到双差观测值残差。

2 实验及结果分析

2.1 数据采集

采用天宝接收机(Trimble Net R9)在中南大学本部采矿楼楼顶采集数据,时间为 2015-04-24~05-18,采样间隔为 1 s。为了比较强多路径与弱多路径观测环境的解算结果,本次实验采用 3 台天宝接收机进行同步观测,其中 1 台的北面有一墙体,为设计多路径环境,在墙体上粘贴了一面锡箔纸;另外 2 台位于无任何遮挡的开阔环境。由此组成了一条强多路径基线与弱多路径基线,其长度分别为 10.7 m 和 9.2 m。

2.2 数据处理

利用自主研发的 GNSS 数据处理软件,按照 § 1 的模型与方法对采集的数据进行数据处理,以此研究 BDS 多路径效应。为了研究多路径效应对 BDS 静态解的影响,本文对两条基线分别采用 BDS 与 GPS 观测数据进行单天静态解,其中截止高度角设置为 10°。

2.3 BDS 不同星座卫星的多路径效应分析

分别对 GEO、IGSO 及 MEO 卫星的双差观测值残差进行分析,其双差残差如图 1 所示。

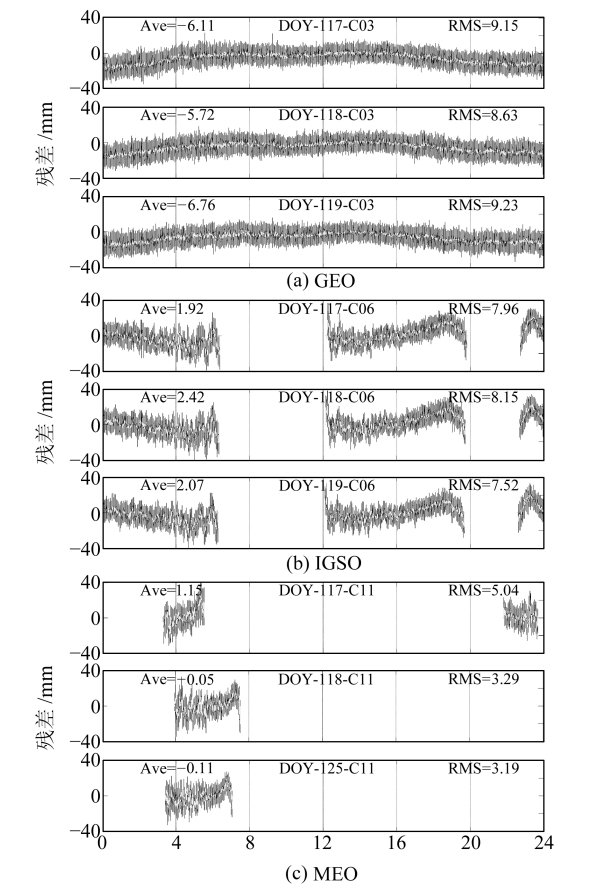


图 1 BDS 双差观测值残差

Fig. 1 Double differenced residuals for BDS

图 1(a)表示 C03 号卫星连续 3 d(DOY117~119)的双差观测值残差。从图中可以看出,GEO 卫星多路径误差具有整体性偏移,但并不是一个常数,而是随时间缓慢变化。实际上,GEO 卫星并非完全静止不动,而是在很小的范围内运动,根据多路径效应原理,可推断 GEO 卫星的多路径误差也将具有很强的系统偏移(均值偏移 6 mm 左右),且该偏移将随轨道的变化而发生缓慢变化。因此,实测数据处理结果与原理推断结果是一致的。由表 1 可知,连续 3 d 的 GEO 卫星双差残差的相关系数大于 0.93,说明其多路径效应具有周日重复性,其重复周期与 GEO 卫星轨道重复周期一致。

表 1 BDS 卫星双差残差的相关系数统计

Tab. 1 Statistics of double residuals for BDS

DOY	C03 相关系数	C06 相关系数	DOY	C11 相关系数
117-116	0.948	0.949	118-117	0.120
118-117	0.952	0.949	124-117	0.909
118-116	0.934	0.910	125-118	0.911

图 1(b)表示 C06 卫星连续 3 d(DOY117~119)的双差观测值残差序列。从图中可以看出,IGSO 卫星的多路径误差与 GEO 卫星的多路径误差不同,IGSO 卫星多路径误差在 0 附近上下波动(均值在 2 mm 左右),且其变化幅度比 GEO 卫星多路径变化幅度大。由表 1 可知,与 GEO 卫星类似,相邻 2 d 的 IGSO 卫星多路径具有很强的相关性,其重复周期与其轨道重复周期一致。

由图 1(c)可以看出,与 IGSO 卫星类似,MEO 卫星的多路径误差波动幅度较 GEO 卫星多路径波动幅度大。与 GEO、IGSO 的不同之处是相邻 2 d(DOY117~118)MEO 卫星的双差观测值残差不具有相关性(相关系数仅为 0.12),但是间隔 7 d(DOY118~125)后的 MEO 卫星双差观测值残差具有很强的相关性(相关系数超过 0.90),这与 MEO 卫星轨道重复周期(7 d)具有一致性。

综上所述,3 类卫星多路径误差既具有系统性也具有随机性,但其中 GEO 卫星多路径误差以系统误差为主,且长时间存在系统性整体偏移;IGSO 与 MEO 卫星短时间内也以系统误差为主,但长时间内总体仍然表现为随机性。

3 BDS 多路径对静态解的影响分析

由于 GPS 多路径效应误差长时间内主要表现为随机特性,因此实际高精度静态测量中可以通过延长观测时间来达到平滑多路径误差的目的。

的。但由以上 BDS 多路径效应特征分析可知,由于 BDS 的 GEO 卫星基本静止不动,其更容易受到多路径的影响,且多路径效应误差长时间存在系统偏移,其对静态测量的影响也将有所不同。为了探讨 BDS 多路径误差对其静态解的影响,本文利用 15 d 的 GPS 和 BDS 观测数据对实验中强多路径环境和弱多路径环境基线进行单天静态解处理,并分别计算两种不同环境中 BDS 与 GPS 静态解的较差。其中强多路径环境中 GPS 与 BDS 基线解 E 、 N 、 U 3 个方向之差如表 2(单位 mm)所示,弱多路径环境中 GPS 与 BDS 基线解 E 、 N 、 U 3 个方向之差如表 3(单位 mm)所示。

表 2 强多路径测站 BDS 与 GPS 静态解之差
Tab. 2 The differences between BDS and GPS static solution for strong multipath station

DOY	dE	dN	dU	DOY	dE	dN	dU
116	-2.8	3.9	-9.6	124	-2.1	5.6	-5.8
117	-2.8	4.2	-10.5	125	-1.9	6.2	-10.4
118	-2.3	5.6	-11.5	126	-2.3	6.1	-8.1
119	-2.4	5.4	-11.6	127	-3.0	7.0	-10.1
120	-2.0	6.2	-14.4	128	-4.0	6.5	-4.6
121	-1.9	4.7	-7.0	129	-4.5	8.6	-9.1
122	-1.1	3.8	-2.9	130	-2.5	7.5	-4.4
123	-1.4	3.8	-5.6				

表 3 弱多路径测站 BDS 与 GPS 静态解比较
Tab. 3 The differences between BDS and GPS static solution for weak multipath station

DOY	dE	dN	dU	DOY	dE	dN	dU
116	-0.3	-0.1	1.6	124	0.1	0.2	1.2
117	-0.3	0.4	0.7	125	0.2	0.4	0.4
118	-0.2	0.7	0.1	126	0.1	0.9	-0.2
119	-0.2	0.7	0.1	127	0.0	0.5	0.9
120	-0.3	0.4	0.6	128	0.2	0.4	0.9
121	-0.2	0.2	1.1	129	-0.4	-0.1	1.5
122	-0.3	-0.1	1.6	130	0.0	-0.1	1.5
123	-0.2	-0.1	1.4				

由表 2 可见,BDS 与 GPS 静态解 N 、 U 方向的差别很大, E 方向差别较小。而由表 3 可知,弱多路径环境下,BDS 与 GPS 静态解结果基本相同。这两条基线除观测环境不同外,所观测到的卫星也有所差异,即造成这两条基线 BDS 与 GPS 静态解差异较大有可能是卫星几何结构和多路径误差两方面的原因。为分析两测站的卫星几何结构,现将两测站的卫星天空视图绘制(卫星截止高度角为 10°)如图 2、图 3 所示。

从图中可以看出,强多路径测站的卫星几何结构与弱多路径测站的卫星几何结构基本一致,只是在个别时段强多路径测站旁的墙体遮挡了少量的卫星,而且静态解算时设置的截止高度角为 10° ,两个测站环境中实际卫星分布几何结构差异非常小。为进一步分析两测站的卫星几何结构状况,分别比较 DOY116~130 期间两种环境下

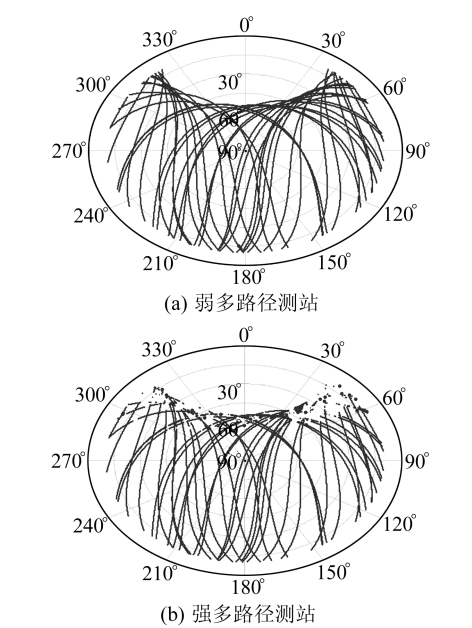


图 2 强、弱多路径测站的 GPS 卫星天空视图
Fig. 2 GPS sky plot of strong and weak multipath station

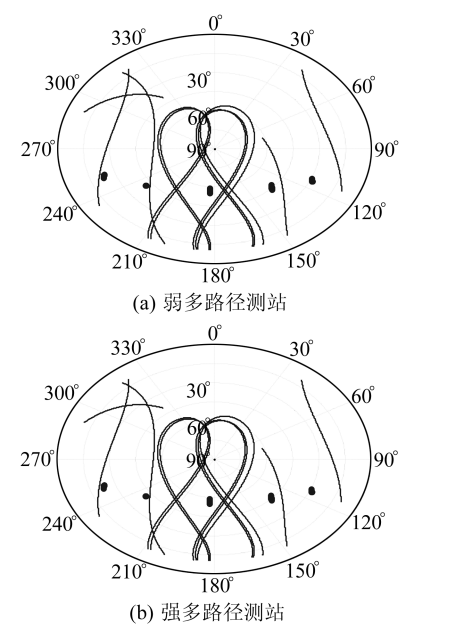


图 3 强、弱多路径测站的 BDS 卫星天空视图
Fig. 3 BDS sky plot of strong and weak multipath station

BDS 单天的 HDOP、VDOP 值以及 GPS 单天的 PDOP 值(严格意义上应该是 RPDOP^[8]),如图 4、图 5 所示。

为进一步说明该原因,采用相同的方法计算弱多路径环境基线的双差观测值残差,3 类不同卫星分别选择一对卫星的双差观测值残差序列,如图 6 所示。对比图 6 与图 1 可知,弱多路径测站受多路径影响非常小。由此我们推断,BDS 与 GPS 静态解差别较大主要是由具有系统性偏移的 GEO 卫星多路径效应误差引起。

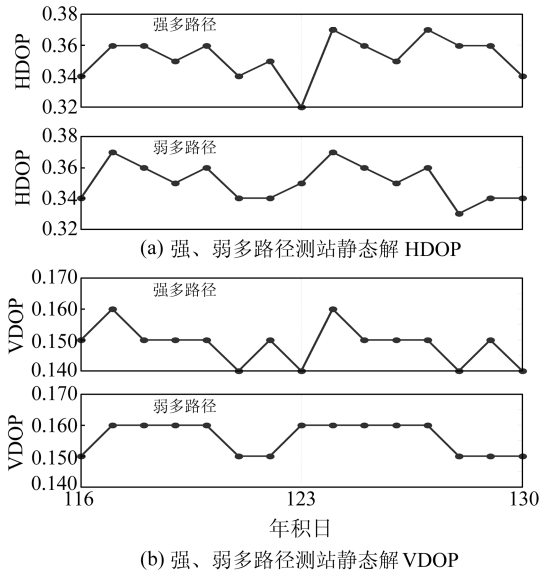


图 4 BDS 强、弱多路径测站的 HDOP 和 VDOP
Fig. 4 The HDOP and VDOP of BDS static solution for strong multipath station and weak multipath station

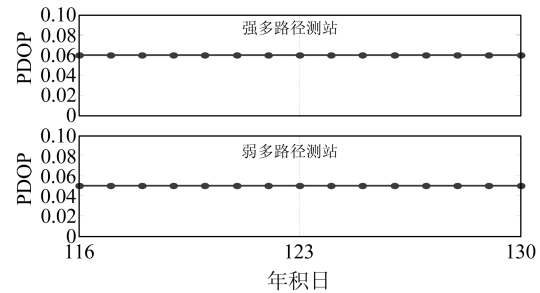


图 5 GPS 强、弱多路径测站静态解 PDOP
Fig. 5 The PDOP of GPS static solution for strong multipath station and weak multipath station

4 结 语

通过两条强弱多路径环境短基线观测数据,对比分析 BDS 多路径效应及其对静态基线解精度的影响,得出以下结论:

- 1) 相邻 2 d 的 GEO、IGSO 卫星多路径效应具有很强的相关性,而 MEO 卫星的多路径效应相隔 7 d 后具有很强的相关性。GEO 卫星的多路径误差具有系统性偏移,但并非一个常数,而是随时间发生缓慢的变化;IGSO、MEO 卫星多路径误差波动较大,长时间内表现为随机特性。
- 2) 由于 GEO 卫星多路径误差不会随观测时间的延长而被平滑削弱,所以 GEO 卫星的多路径误差对 BDS 静态解产生较大影响,在强多路径环境下,这种影响可达 cm 级。如何消除 BDS 多路径误差对静态解算结果的影响,还需进一步研究。

参考文献

[1] 黄声享,李沛鸿,杨保岑,等. GPS 动态监测中多路径效应的规律性研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2005,30 (10): 877-880 (Huang Shengxiang, Li Peihong, Yang Baocen,

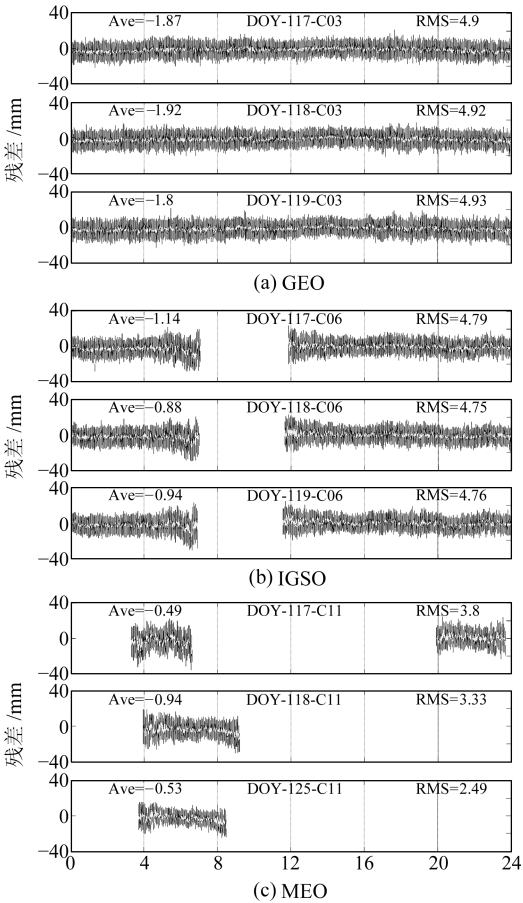


图 6 弱多路径测站 BDS 双差观测值残差
Fig. 6 Double differenced residuals of BDS for weak multipath station

et al. Study on the Characteristics of Multipath Effects in GPS Dynamic Deformation Monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(10): 447-480)

[2] 戴吾蛟,丁晓利,朱建军. GPS 动态变形测量中的多路径效应特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(1): 65-70 (Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jianjun. Study on Multipath Effect in Structure Health Monitoring Using GPS[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(1): 65-70)

[3] Georgiadou Y, Kleusbera A. On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning[J]. Manuscripta Geodaetica, 1998, (13): 172-179

[4] Hoffmman-wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. GPS Theory and Practice[M]. New York: Springer, 2001

[5] Ye S R, Chen D Z, Liu Y Y, et al. Carrier Phase Multipath Mitigation for BeiDou Navigation Satellite System [J]. GPS Solut, 2015, 19(4): 545-557

[6] Zhong P, Ding X L, Yuan L G, et al. Sidereal Filtering Based on Single Differences for Mitigating GPS Multipath Effects on Short Baselines[J]. J Geod, 2010, 84: 145-158

[7] Ma X Y, Shen Y Z. Multipath Error Analysis of COM-PASS Triple Frequency Observations [J]. Positioning, 2014, 5(1): 12-21

[8] Nielsen R O. Relationship between Dilution of Precision for Point Positioning and for Relative Positioning with GPS[J]. IEEE Transactions Aerospace and Electronics Systems, 1997, 33(1): 333-338

The Characteristics of BDS Carrier Phase Multipath and Its Effects on Static Baseline Solution

SHI Qiang¹ DAI Wujiao¹ ZENG Fanhe¹ ZHANG Chao¹

1 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, 932 South-Lushan Road, Changsha 410083, China

Abstract: In order to study the characteristics of BDS carrier phase multipath, the BDS/GPS observation data of a short baseline is collected in a strong multipath environment and the repeatability of GEO, IGSO and MEO satellites are analyzed respectively using the double differenced observation residual series. Furthermore, the effects of BDS multipath on static baseline solutions are studied. The results show that BDS multipath errors have a strong repeatability, but the multipath repeat periods differ for distinctive types of satellite. The multipath repeat periods of GEO and IGSO satellites are approximately a sidereal day, while it is around seven sidereal days for the MEO satellites. The multipath errors of GEO satellites present a nearly systematic shift; not a constant, but slow, change. They cannot be mitigated by smoothing using long observation time, because the effects of BDS multipath errors on static baseline solutions could reach the centimeter level in a strong multipath environment.

Key words: BDS; carrier phase; multipath; static baseline solution

Foundation support: Postgraduate Self-Exploration Innovation Foundation of Central South University, No. 2016zzts431.

About the first author: SHI Qiang, postgraduate, majors in GNSS deformation monitoring data processing and software development, E-mail: promise_shi@163.com.

(上接第 873 页)

[4] Deng Z, Ge M, Uhlemann M, et al. Precise Orbit Determination of Beidou Satellites at GFZ[C]. IGS Workshop, Pasadena, 2014

[5] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 1-5 (Wei Ziqing. China Geodetic Coordinate System 2000 and Its Comparison with WGS84 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(5): 1-5)

[6] Warren D L M, Raquet J F. Broadcast V, Precise GPS Ephemerides; A Historical Perspective[J]. GPS Solutions, 2003, 7(3): 151-156

[7] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013 (Hu Zhigang. Beidou Navigation Satellite System Performance Assessment Theory and Experimental Verification [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013)

Precision Analysis of Beidou Satellites' Broadcast Ephemeris

MENG Xiangguang^{1,2} SUN Yueqiang^{1,2} BAI Weihua^{1,2} DU Qifei^{1,2}

1 National Space Science Center, CAS, 1 Nanertiao, Beijing 100190, China

2 Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, 1 Nanertiao, Beijing 100190, China

Abstract: This paper discusses the scheme for analyzing the error of BDS broadcast ephemeris. By contrasting with IGS MGEX's precise ephemeris and clock products, this paper presents statistics of orbit and clock error of broadcast ephemeris of all in-orbit BDS satellites for a period of 31 d. The results show that: 1) The RMS of radial orbit error of current BDS broadcast ephemeris is less than 1 m, tangential and normal RMS is less than 8 m for GEO satellites, and tangential and normal RMS is less than 4 m for IGSO and MEO satellites. 2) The RMS of BDS clock bias error has no relationship with orbit types and is less than 15 ns. 3) From the perspective of signal-in-space range error, the relationship of the overall accuracy of BDS satellites broadcast ephemeris and orbit type is not clear and the overall accuracy is less than 2 m.

Key words: Beidou satellites; broadcast ephemeris; orbit type; precision analysis

Foundation support: National Natural Science Foundation of China, No. 41505030, 41405039, 41405040; Instrument Developing Project of CAS, No. YZ201129.

About the first author: MENG Xiangguang, associate researcher, majors in GNSS precise positioning and orbit determination and radio occultation data processing, E-mail: xgmeng@nssc.ac.cn.