

引文格式:张益泽,陈俊平,周建华,等.北斗广播星历偏差分析及改正[J].测绘学报,2016,45(S2):64-71. DOI:10.11947/j.AGCS.2016.F027.
ZHANG Yize, CHEN Junping, Zhou Jianhua, et al. Analysis and Application of BDS Broadcast Ephemeris Bias[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(S2): 64-71. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.F027.

北斗广播星历偏差分析及改正

张益泽^{1,2}, 陈俊平^{2,3}, 周建华⁴, 杨赛男^{2,3}, 王彬², 陈倩^{2,3}, 巩秀强^{2,3}

1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200092; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京卫星导航中心, 北京 100094

Analysis and Application of BDS Broadcast Ephemeris Bias

ZHANG Yize^{1,2}, CHEN Junping^{2,3}, ZHOU Jianhua⁴, YANG Sainan^{2,3}, WANG Bin², CHEN Qian^{2,3}, GONG Xiuqiang^{2,3}

1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200092, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Abstract: We analyze the BeiDou broadcast ephemeris biases starting from February 2014 to October 2016 by using the IGS post-processed precise orbit and clock as references. Results show that the bias of BeiDou broadcast ephemeris can reach up to 2 meter. To further verify this finding, we perform precise point positioning for about 18 MGEX stations using BeiDou broadcast ephemeris and wide-area differential correction parameters. Data of 97 days are analyzed and pseudo-range residuals of each frequency for each station are derived. Systematic biases are found in the residuals using broadcast ephemeris. Comparing the BEB applying the differential correction parameters with the TGD difference between IGS and BeiDou broadcast ephemeris, we find that the correlation coefficient of TGD differences and BEB values could reach up to 0.89. This proves that the BEB applying the differential correction parameters is mainly due to the biases of the TGD parameters in broadcast ephemeris. By correcting the biases into TGD parameters, we performed point positioning at different stations. Results show that after applying the biases, the pseudo-range error reduces much, and the positioning precision can improve about 14.9%, 28.4%, 15.5% in N, E, U, direction for dual-frequency users, respectively.

Key words: MGEX; pseudo-range residual; broadcast ephemeris bias; TGD; point positioning

Foundation support: The National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2014AA123102); The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11673050; 11273046)

摘 要: 以后处理精密轨道钟差为参考, 分析了 2014 年 2 月至 2016 年 10 月北斗广播星历误差及空间信号精度, 分析结果表明, 北斗广播星历存在偏差, 最大超过 2 m。在此基础上, 基于广域差分改正数, 采用 18 个 MGEX 站不同频点及频点组合连续 97 d 的数据对以上广播星历偏差进行了进一步验证。验证结果表明, 不同卫星的伪距观测残差存在与广播星历偏差一致的系统性偏差。比较后处理给出的 TGD 和广播星历给出的 TGD 参数的偏差(dTGD), 发现 dTGD 与基于广域差分参数的 BEB 的相关系数达到 0.89, 这表明经广域差分参数改正后的星历偏差可能是由广播电文中的 TGD 偏差造成。将北斗广播星历偏差改正到 TGD 参数上, 分析对用户定位的影响。结果表明, 经改正后, 双频用户在 N、E、U 3 个方向单点定位精度分别提高 14.9%、28.4%、15.5%, 其定位残差也明显得到改善。

关键词: MGEX; 伪距残差; 广播星历偏差; 群延迟; 单点定位

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2016)S2-0064-08

基金项目: 国家 863 计划(2014AA123102); 国家自然科学基金(11673050; 11273046)

受混合星座区域网定轨和钟差预报精度的限制^[1], 北斗广播星历的精度还不如 GPS, 国内外

许多学者也对北斗广播星历精度进行了评估^[2-8]。文献[2]分析了 2013 年全年的北斗广播星历精度,认为北斗广播星历精度与 GPS Block IIA 卫星相当,均好于 GLONASS 和 Galileo 卫星。文献[3]对 2012 年的北斗广播星历轨道进行分析,表明 GEO 卫星径向精度优于 1.5 m,IGSO/MEO 卫星径向精度优于 1.0 m,但没有考虑钟差误差的影响。文献[4]的结果表明北斗广播星历所有卫星平均精度为 1.5 m,且主要受钟差误差的影响。文献[5]与文献[4]结论类似,但所采用数据的时间较短。文献[6]在此基础上研究了北斗广播星历的单点定位精度。文献[7]基于 2013 年至 2015 年的结果,得出所有卫星的广播星历精度平均为 1.85 m,认为广播星历轨道和钟差误差呈现出与其轨道周期一致的周期变化特性。文献[8]通过激光检核结果比较表明与事后精密定轨比较结果一致。文献[9]基于事后精密星历分析了北斗空间信号误差的预报和改正。我国也建立了 iGMAS (international GNSS monitoring and assessment) 分析中心,对包括北斗系统在内的多 GNSS 系统的空间信号参数进行监测和评估。

北斗广播电文播发的信息包含了卫星基本轨道、钟差参数(基本导航电文)以及广域差分、完好性参数。其中,卫星轨道参数利用区域监测网的观测数据进行精密定轨(precise orbit determination, POD),经广播星历拟合后得到;卫星钟差参数则是基于星地双向时间比对(two-way satellite time transfer, TWTT),并进行参数拟合得到。POD 与 TWTT 是两种独立的体制,两者融合成基本广播电文的过程中存在复杂的系统差归算^[10],而系统差归算的误差则会造成基本导航电文的偏差。广域差分参数是在以上轨道、钟差参数的基础上,利用区域监测网的数据进一步进行空间信号的实时修正,理论上经过广域差分修正后,广播星历应该不存在偏差。本文利用北斗广播星历和 IGS 提供的精密星历,对北斗广播星历误差和空间信号参数进行深入分析。同时利用 MGEX 监测站数据和北斗广域差分信息,从伪距定位残差对北斗广播星历偏差进行研究。

1 北斗广播星历误差及空间信号精度计算

1.1 计算策略

IGS 于 2012 年提出 MGEX(Multi GNSS EXperiment)计划,致力于提供多 GNSS 系统服务。目前

共有 CODE、GFZ、WHU 3 个分析中心持续提供北斗事后精密产品,其中 GFZ 从 2014 年 1 月 28 日至今,提供包含 GPS + GLONASS + Galileo + BDS+QZSS 在内的精密轨道和钟差(<http://www.gfz-potsdam.de/en/section/space-geodetic-techniques/projects/mgex-beidou-analysis/>),其 GEO 轨道精度约为 50 cm,IGSO 和 MEO 轨道精度约为 10 cm 和 5 cm^[11]。本文以 gbm 精密轨道和钟差作为参考,通过比较北斗广播星历和 gbm 精密星历的差异来反映北斗广播星历误差。

在进行广播星历轨道和钟差比较时,需要考虑以下几点:

(1) 坐标系统:gbm 精密星历是基于 WGS-84 坐标系,而北斗广播星历则基于 CGCS2000 坐标系。许多文献都表明^[12],这两个坐标系之间的差异在厘米级,这样的量级在进行广播星历比较时可以忽略。

(2) 时间系统:gbm 精密星历是基于 GPST (GPS Time),北斗广播星历基于 BDT (BeiDou time),二者间存在 14 s 的差异,在比较时需要进行时间系统基准差异修正^[13]。

(3) 群延迟(time group delay, TGD)改正:gbm 精密钟差是基于 B1B2 无电离层组合,而北斗广播星历则基于 B3 频点^[14],因此在比较卫星钟差时需要进行 TGD 改正。将 B3 钟差改正到 B1B2 无电离层组合钟差的公式为

$$(\Delta t_{sv})_{B1B2} = \Delta t_{sv} - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \text{TGD}_1 + \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot \text{TGD}_2 \quad (1)$$

式中, $(\Delta t_{sv})_{B1B2}$ 为 B1B2 无电离层组合钟差; Δt_{sv} 为广播星历计算得到的 B3 频点的钟差; TGD_1 和 TGD_2 分别为广播星历中的 B1、B2 频点相对于 B3 频点的 TGD 延迟; f_1 、 f_2 为 B1、B2 频点的频率。

(4) 卫星钟差基准统一:广播星历与精密星历的时间基准并不一样,在进行钟差比较时,需要扣除卫星钟差基准差异的影响。部分文献在进行基准统一时,选择扣除该历元所有卫星广播星历与精密星历钟差差异的均值^[2-8]。这种方法的缺陷是当个别卫星存在粗差时,会使均值偏离真实的基准差异而无法反映真实的卫星钟差误差。本文选择所有卫星广播星历与精密星历钟差差异的中位数作为基准进行扣除,这样能有效避免卫星粗差的影响。

(5) 相位中心偏差(phase center offset, PCO):

北斗广播星历轨道名义上定义为基于相位中心,但激光检核(satellite laser ranging, SLR)表明其实际上是基于质量中心^[2]。由于精密星历轨道也基于质量中心,因此轨道比较时无需进行相位中心改正。而钟差比较时必须扣除二者相位中心的差异,对于 gbm 精密星历,其 2014 年年积日 197 之前使用的 PCO 改正为 IGS 默认值(0.6, 0.0, 1.1),其后使用的 PCO 改正值为欧空局(European Space Agency, ESA)给出的值^[15]。因此在处理 2014 年年积日 197 之前的数据时,北斗广播星历与 gbm 精密星历相位中心差异改正为 0,2014 年年积日 197 之后的相位中心差异改正为 $PCO_{ESA} - PCO_{IGS}$ 。

空间信号测距误差(signal-in-space user range error, SISURE)是卫星位置与钟差的实际值与卫星广播星历之间的差异,它反映了卫星轨道和钟差的整体误差,可用于评价广播星历综合精度,其计算公式为

$$SISURE = \sqrt{(\alpha \cdot R - Clk)^2 + \beta \cdot (A^2 + C^2)} \quad (2)$$

式中, R 、 C 、 A 、 Clk 分别指卫星径向(radial)、法向(cross-track)、切向(along-track)和钟差误差(clock); α 和 β 分别是各方向的投影系数,对于 GEO 和 IGSO,其值分别为 0.99 和 1/126;对于 MEO,其值分别为 0.98 和 1/154^[2]。同时定义 $R-Clk$ 为轨道径向与钟差误差的合成。由公式可以看出, $R-Clk$ 占了 SISURE 的大部分。

1.2 北斗广播星历误差及空间信号精度分析

为了进行北斗广播星历误差长期分析,选择 2014 年 2 月 1 日至 2016 年 10 月 26 日共约 3 年的数据,按照 30 min 间隔的采样率计算北斗广播星历的误差,同时计算 SISURE 与 $R-Clk$ 。在计算中,粗差剔除策略按照式(3)进行处理^[2]

$$outlier = \begin{cases} SISURE > 10 \text{ m, IGSO/MEO} \\ SISURE > 10 \text{ m and } A > 50 \text{ m, GEO} \end{cases} \quad (3)$$

表 1 列出了 2014 年 2 月至 2016 年 10 月间北斗广播星历误差及空间信号精度 RMS 统计结果。需要注意的是, C15 (IGSO) 卫星从 2016 年 5 月开始工作至 2016 年 10 月 11 日,其后 C15 编号改为 C13 (IGSO),替代原来一直处于不健康状态的 C13 (MEO),因此 C13 和 C15 实际上是同一颗卫星,在计算时将两者合并,统一归为现在的 C13 (IGSO)。如未特别说明,后文中的 C13 既是

现在的 C13,也指原来的 C15。

表 1 北斗广播星历误差及空间信号精度统计(2014-02—2016-10)

Tab. 1 RMS of BDS broadcast ephemeris error and SISURE (2014-02—2016-10) m

PRN	C	A	R	Clk	R-Clk	SISURE
1	3.22	15.69	0.79	1.78	1.94	2.40
2	4.29	11.25	0.82	2.84	2.70	2.91
3	2.91	5.39	0.86	1.12	1.21	1.33
4	4.02	8.10	0.98	1.94	2.23	2.37
5	3.43	5.72	0.79	0.90	1.13	1.27
6	1.65	2.72	0.68	1.74	1.83	1.85
7	1.93	2.96	0.70	0.68	0.90	0.95
8	2.19	2.89	0.70	0.68	0.94	0.99
9	1.54	2.56	0.62	0.77	0.97	1.00
10	1.68	2.69	0.66	0.68	0.91	0.95
13	1.51	2.44	0.60	0.87	1.08	1.11
11	1.18	3.00	0.56	1.21	1.30	1.37
12	1.17	2.85	0.54	1.54	1.59	1.64
14	0.94	2.83	0.50	1.51	1.54	1.59
Avg(GEO)	3.57	9.23	0.85	1.71	1.84	2.05
Avg(IGSO)	1.75	2.71	0.66	0.90	1.11	1.14
Avg(MEO)	1.10	2.89	0.53	1.42	1.48	1.53
Avg(All)	2.26	5.08	0.70	1.30	1.45	1.55

为了观察不同类型卫星的轨道和钟差误差,按照卫星类型,将所有卫星近 3 年的轨道钟差误差及 SISURE 变化情况列于图 1。

结合表 1 和图 1 可以看出, GEO 卫星轨道误差最大, IGSO 和 MEO 误差相当。总体来说,各卫星切向误差最大, C01 卫星在 2014 年 2 月至 8 月的切向误差甚至超过 20 m,而径向误差最小,这符合北斗卫星区域定轨的特性。与文献[2]相比,轨道切向误差变小了,其他误差则比较接近,这可能是二者数据样本不一样的原因。不论何种类型卫星,钟差误差都明显大于径向误差,因而可以推断北斗钟差误差是影响用户定位精度的主要因素。同时,从图中可以看出,部分卫星钟差误差存在系统性偏差,后文将对这个偏差进行进一步分析。

GEO、IGSO、MEO 不同类型卫星空间信号精度 RMS 统计值分别为 2.05 m、1.14 m、1.53 m, GEO 卫星空间信号精度较差是由于其为静止卫星,几何构型不变,导致 GEO 卫星区域定轨精度较低。MEO 较 IGSO 差一些是因为目前北斗监测网仍然是区域监测网,监测站在中国境内一天对 MEO 卫星可见性仅为几个小时,不可见时段的星历依赖于轨道和钟差的预报,当时钟数据龄期(AODC)^[14]过长时,可能会导致卫星钟差预报误差增大。

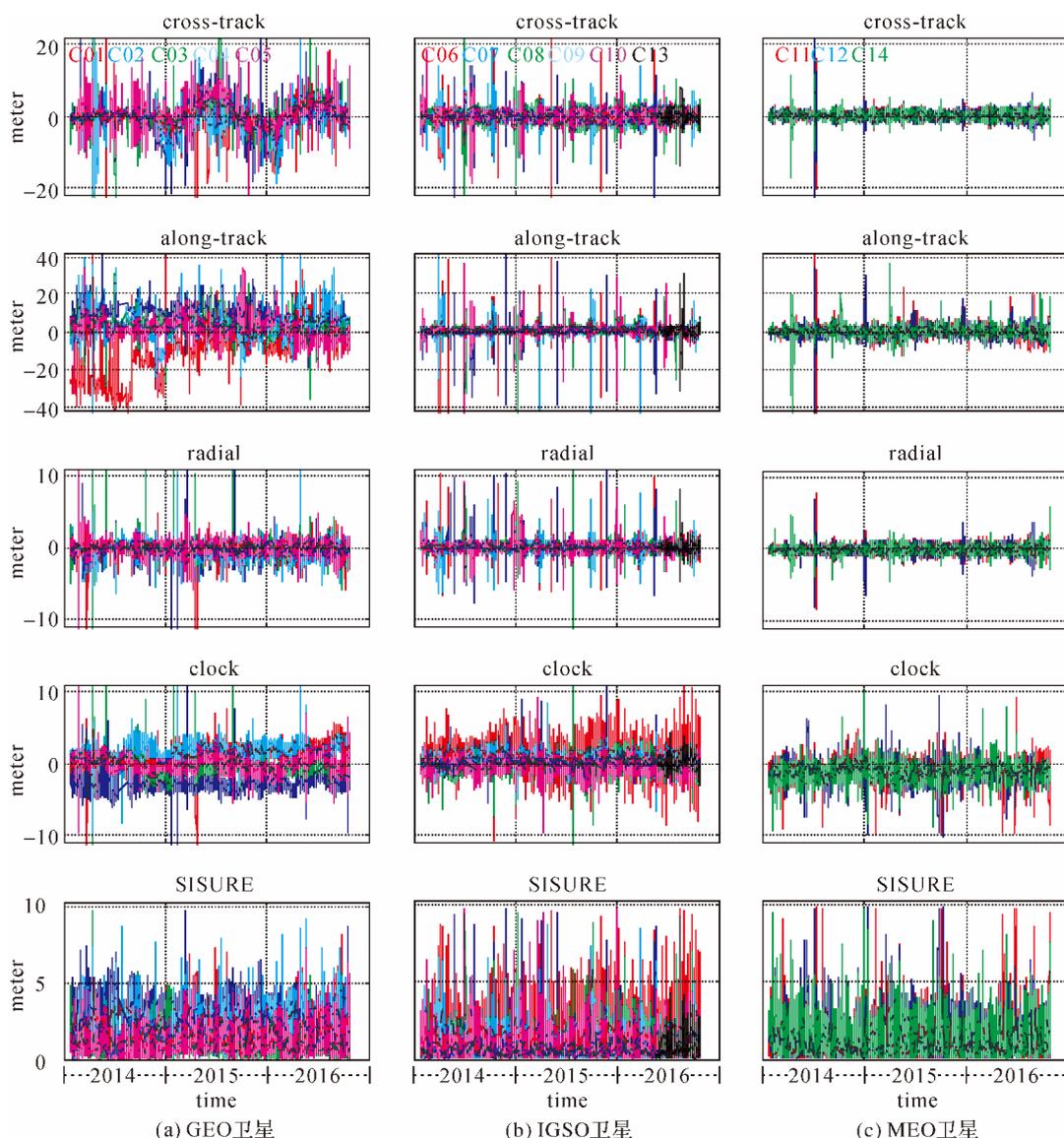


图 1 北斗广播星历误差及空间信号精度变化

Fig.1 BDS broadcast ephemeris error and SISURE

SISURE 反映了卫星空间测距误差的大小, 而卫星径向和钟差误差的合成 (R-Clk) 能反映卫星空间测距误差的方向。为了观察 R-Clk 的长期变化, 按照一个月进行划分, 统计每个月的 R-Clk 均值。表 2 给出了所有月份 R-Clk 的均值和标准差。图 2 是不同类型的卫星 R-Clk 的每个月均值及标准差变化趋势, 图中标准差用误差棒表示。

从表 2 和图 2 可以看出, C01、C02、C04、C06 卫星的 R-Clk 均值明显大于其他同类型卫星, 同时 C02 卫星的误差方向与 C04 相反, MEO 卫星中 C12、C14 的均值也较大。从图中变化趋势可以看出, 各卫星的 R-Clk 均值除了噪声, 还存在大小各异的系统性偏差。

表 2 北斗卫星 R-Clk 均值及标准差 (2014-02—2016-10)

Tab. 2 Mean value and STD of R-Clk statistics for different BeiDou satellites (2014-02—2016-10)

sat	mean ± STD/m	sat	mean ± STD/m	sat	mean ± STD/m
1	-1.31 ± 1.37	6	-1.25 ± 1.32	11	0.69 ± 1.11
2	2.52 ± 1.03	7	-0.19 ± 0.82	12	1.12 ± 1.15
3	0.19 ± 1.20	8	0.19 ± 0.92	13	-0.75 ± 0.85
4	-1.86 ± 1.17	9	-0.42 ± 0.83	14	1.13 ± 1.09
5	-0.14 ± 1.11	10	0.20 ± 0.88		

2 北斗广播星历偏差计算

从第 1 节结果可以看出, 北斗广播星历存在均值偏差。北斗广域增强系统在广播星历轨道和

钟差参数的基础上,利用区域监测网的数据计算等效钟差改正数,能够实时消除广播星历轨道和钟差所产生的系统性误差,经改正后的用户差分距离误差(user differential range error, UDRE)优于 0.5 m^[16]。理论上经过广域差分修正后,广播星历应该不存在大的偏差。

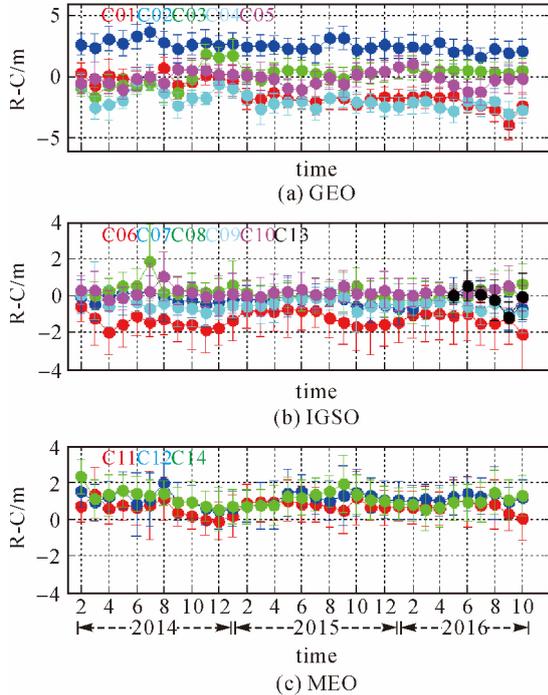


图2 北斗卫星 R-Clk 每月均值变化趋势
Fig.2 Mean value of monthly R-C statistics for different BeiDou satellites

为了研究北斗广播星历是否还存在一些固定偏差,本节利用北斗广域差分改正数进行进一步

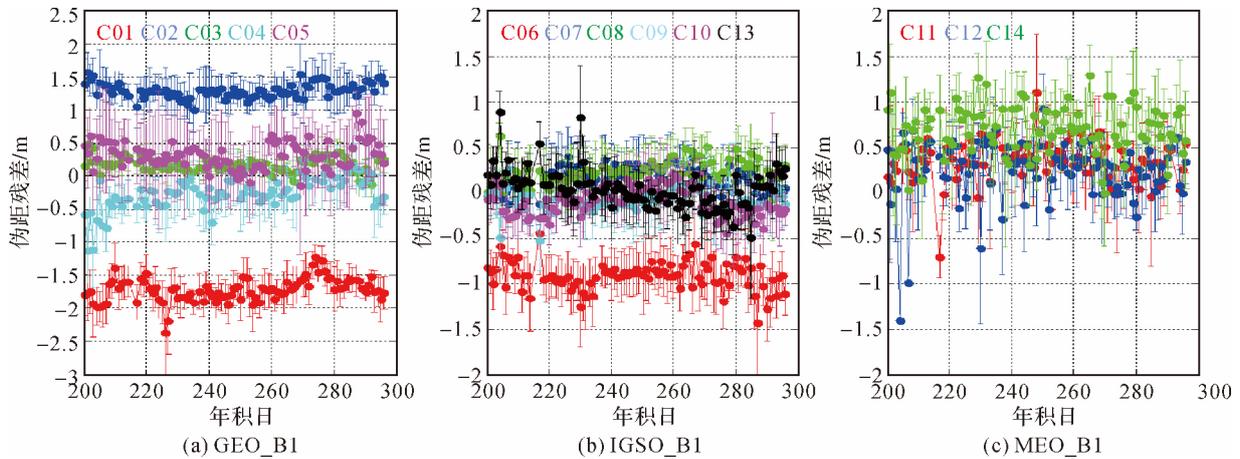


图4 B1 频点伪距残差变化单天均值及其标准差(2016年)
Fig.4 Mean value and STD of daily code residual variation at B1 frequency(2016年)

分析。选取了对北斗卫星可视性较好的一共 18 个 MGEX 监测站,对 2016 年年积日从 200 到 296 共 97 d 的数据进行单点定位,定位时固定站坐标,计算各个频点定位后的伪距观测值残差。计算时北斗轨道和钟差利用北斗广域差分改正数进行修正,由于北斗卫星轨道实际上是基于质心,因此未作 PCO 改正。不同频点的电离层误差用 IGS 电离层格网模型改正,对流层延迟采用模型改正,数据采样率为 150 s,卫星截止高度角为 10°,其余各项误差改正采用常规模型进行改正。监测站分布见图 3,图中红色圆形点位用于伪距残差计算,蓝色三角形点位用于后面的验证。

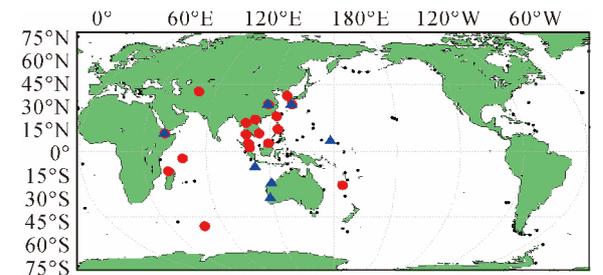


图3 MGEX 监测站(红色:估计广播星历偏差;蓝色:定位验证)
Fig.3 MGEX station used (red: for estimating, blue: for positioning validation)

对 2016 年年积日 200 至 296 的数据进行处理,获取定位后的伪距残差,将各站的伪距残差按照每天进行统计,计算每天各卫星对所有观测站的伪距残差的均值及标准差。图 4 是 B1 频点不同卫星的伪距残差随时间的变化趋势,其中误差棒表示每天的标准差。

从图 4 可以看出,基于北斗广播星历和广域差分改正数精密定位的伪距残差均值存在系统偏差,且该偏差变化较为平稳,将这种偏差称为广播星历偏差(broadcast ephemeris bias,BEB)。

基于以上结果,统计了所有卫星不同频点的广播星历偏差及其标准差,见表 3。结合图 4 可以看到,C01、C02、C06 的 BEB 值较大,其他卫星都在 0.5 m 内。

表 3 各卫星不同频点广播星历偏差值

Tab.3 Estimated BDS BEB value of different frequency

sat	bias±STD		
	B1	B2	B3
1	-1.72±0.31	-1.19±0.42	-1.19±0.22
2	1.30±0.28	0.56±0.38	0.77±0.34
3	0.18±0.19	-0.02±0.29	0.19±0.28
4	-0.25±0.43	0.11±0.62	0.10±0.34
5	0.31±0.59	0.40±0.75	0.16±0.80
6	-0.92±0.31	-0.59±0.42	-0.80±0.32
7	0.17±0.30	0.09±0.40	-0.15±0.43
8	0.22±0.29	0.16±0.40	-0.08±0.32
9	-0.08±0.29	0.24±0.36	-0.02±0.31
10	-0.10±0.32	-0.20±0.43	0.01±0.42
11	0.36±0.41	0.42±0.55	0.01±0.49
12	0.29±0.43	0.26±0.54	0.02±0.52
13	0.04±0.36	0.17±0.45	0.36±0.28
14	0.71±0.47	0.42±0.61	0.23±0.62

另外,从表 3 中可以看到不同频点的 BEB 值并不一样,推测其可能与卫星 TGD 有关。IGS 基于全球 MGEX 观测网数据,计算了北斗广播星历不同频点的 TGD 改正^[17-18]。该值与广播星历中的 TGD 并不一致,可将二者进行相减得到的 dTGD(differential TGD)与本文中获取的 BEB 进行比较,为了统一基准,将二者所有卫星的均值扣除。图 5 显示了 B1B2 无电离层组合的差异 BEB 和 dTGD 的比较结果。从图中可以看出,大部分卫星的差异较为接近。采用线性回归分析,计算其相关系数^[19],二者达到 0.89,这说明 BEB 和 dTGD 之间相关性很大,推测可能是由于北斗监测站接收机与 IGS 监测站接收机对相同卫星的通道时延标定不一致,导致北斗广播星历 TGD 用于 IGS 监测站接收机时存在偏差,但仍需进一步深入研究。

3 北斗广播星历偏差在定位中的应用

为了验证本文给出的 BEB 的定位效果,采用不同时间、不同站的数据进行单点定位验证。选取 2015-12-27—2016-01-09 共 14 d 的 7 个 MGEX 站数据,测站分布见图 3 蓝色点位。其中

KARR、NNOR、POHN、XMIS 4 个站在计算伪距偏差时并没有用到。NNOR 接收机类型为 SEPT POLARX4,其他均为 Trimble NETR9。定位时采用北斗广播星历,将各频点的 BEB 改正到广播星历 TGD 参数上,对这些站进行伪距单点定位,观测值采用 B1B2 无电离层组合,对流层延迟采用模型改正,数据采样率为 30 s,卫星截止高度角为 10°,将 IGS 给出的精密坐标作为真实坐标,比较 BEB 改正前后的定位结果差异。

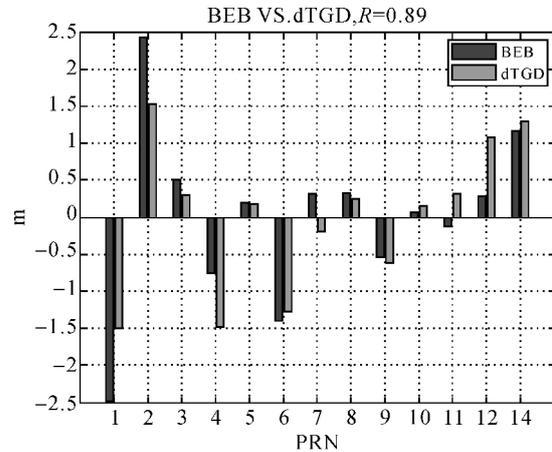


图 5 BEB 与 dTGD 比较

Fig.5 Comparison of BEB and dTGD

图 6 是 GMSD 测站在 2016 年 1 月 1 日这一天的单点定位结果比较。其中图 6(a)为常规定位的结果,图 6(b)为增加 BEB 改正后的定位结果。表 4 给出了各个站 14 d 的动态定位 RMS 比较。

从以上定位结果可以看出,北斗广播星历偏差能改善定位精度,在南北(N)、东西(E)、高程(U)方向定位提高程度分别为 14.9%、28.4%和 15.5%,东西方向改善最明显,这可能是由于 GEO 卫星 BEB 改正值比其他卫星大,且 GEO 卫星纬度相同,因而对东西方向改善最大。同时,北斗广播星历偏差对于不同时间,不同观测站,不同接收机,都能改进其定位效果,这说明 BEB 与时间、接收机无关,更有可能是北斗广播星历不同卫星的系统性偏差造成的(如卫星 TGD 或者系统监测站的通道时延误差)。

为了进一步分析 BEB 对定位的影响,图 7 给出了 2016 年 1 月 1 日 GMSD 站 BEB 改正前后不同卫星的伪距单点定位残差的 RMS 及 STD 比较。可以看到个别卫星(C01, C02, C04, C08, C14)原始伪距残差较大,这主要就是广播星历偏差造成的。而改正后的各颗卫星定位残差 RMS 相

近,约为 1 m 左右。从 STD 来看,二者没有太大区

别,这也验证了改正的广播星历偏差是系统性的。

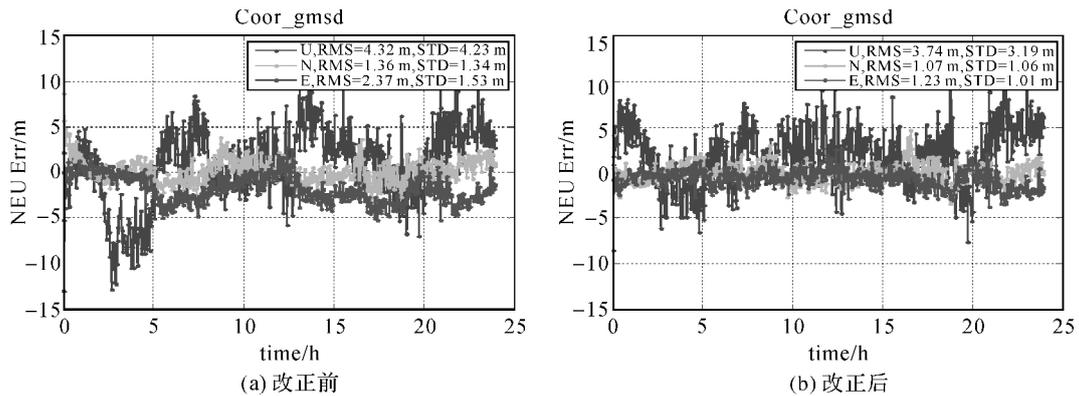


图 6 广播星历偏差改正前后定位精度比较(GMSD)

Fig.6 Positioning error comparison before (a) and after (b) BEB correction (GMSD)

表 4 各站改正广播星历偏差前后定位结果比较

Tab.4 Positioning error comparison after using BEB

sta	without BEB correction/m			with BEB correction/m			improvement/(%)		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
DJIG	3.37	8.46	9.65	2.65	5.65	6.44	21.3	33.2	33.3
GMSD	1.76	2.44	4.23	1.23	1.48	3.71	30.2	39.4	12.4
JFNG	1.73	2.33	4.03	1.24	1.36	3.38	28.1	41.7	16.1
KARR	2.01	2.39	3.50	2.01	1.82	3.17	0.0	23.9	9.3
NNOR	2.24	2.41	3.54	2.01	1.52	3.28	10.3	37.1	7.4
POHN	2.65	5.45	6.13	2.42	4.85	6.07	8.5	10.9	1.0
XMIS	1.70	2.32	3.49	1.59	1.78	3.16	6.6	23.3	9.5
mean	2.21	3.68	4.94	1.88	2.64	4.17	14.9	28.4	15.5

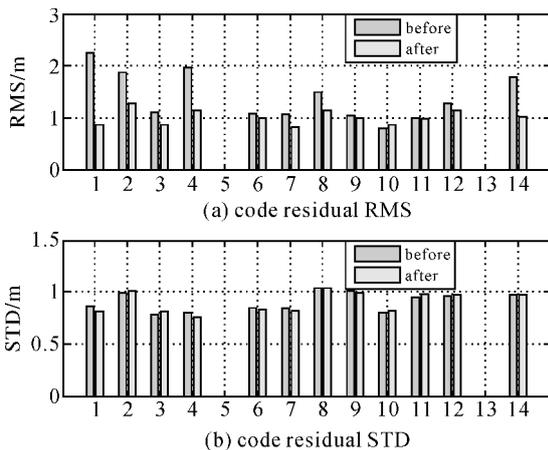


图 7 BEB 改正前后各卫星定位残差 RMS 和 STD 统计
Fig.7 RMS and STD of code residual comparison after BEB correction

4 结论

本文对近三年的北斗广播星历误差进行分析,证明了北斗广播星历存在偏差。从精密定位中发现了伪距定位残差具有系统性偏差,从中发现广播星历具有长期系统性的偏差。根据多天多

站的解算给出了广播星历偏差的改正值,并对其定位效果进行了验证,得出以下结论:

(1) 北斗广播星历 GEO 卫星轨道误差最大,IGSO 和 MEO 误差相当,各卫星切向误差最大,钟差误差大于径向误差。GEO、IGSO、MEO 卫星空间信号精度统计结果分别约 2.05 m、1.14 m、1.53 m。各卫星的 R-Clk 均值除了噪声,还存在大小各异的系统性偏差。

(2) 经广域差分改正数修正的北斗广播星历存在系统性偏差,且这个偏差变化较为平稳。相同卫星不同频点不一致,且与 IGS 和北斗广播星历 TGD 差异的相关性很大。

(3) 广播星历偏差改正能改善用户基本导航定位精度,且对不同时间和用户接收机类型都有提高,总体来说,在 N、E、U 3 个方向分别提高 14.9%、28.4%、15.5%。伪距定位残差 RMS 也有改善。但由于本文中计算偏差所采用的数据只有 96 d,且验证数据与计算结果相距只有 200 d 左右。从长期来看,这个偏差是否仍是固定的,有待基于长期大量数据的进一步研究。

致谢:感谢 IGS 提供的观测数据和 gbm 提供的 MGEX 精密星历。

参考文献:

- [1] ZHOU Shanshi, CAO Yueling, ZHOU Jianhua, et al. Positioning Accuracy Assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO Constellation of COMPASS[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(12): 2290-2299.
- [2] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast Versus Precise Ephemerides: A Multi-GNSS Perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- [3] CHEN Liang, JIAO Wenhai, HUANG Xiaorui, et al. Study on Signal-in-space Errors Calculation Method and Statistical Characterization of BeiDou Navigation Satellite System [C]// SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin: Springer, 2013: 423-434.
- [4] HU Zhigang, CHEN Guo, ZHANG Qiang, et al. An Initial Evaluation about BDS Navigation Message Accuracy[C]// SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin: Springer, 2013: 479-491.
- [5] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 北斗卫星导航系统空间信号误差统计分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(3): 271-274.
- ZHANG Qinghua, SUI Lifan, JIA Xiaolin, et al. SIS Error Statistical Analysis of BeiDou Satellite Navigation System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(3): 271-274.
- [6] CHEN Gucang, HU Zhicang, WANG Guangxing, et al. Assessment of BDS Signal-in-space Accuracy and Standard Positioning Performance during 2013 and 2014[C]//SUN Jiadong, LIU Jingnan, FAN Shiwei, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings. Berlin: Springer, 2015: 437-453.
- [7] 刘万科, 任杰, 曾琪, 等. 2013—2015 年 BDS 空间信号测距误差的精度评估[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 1-6.
- LIU Wanke, REN Jie, ZENG Qi, et al. Accuracy Assessment of BDS Signal-in-space Range Errors in 2013—2015[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(3): 1-6.
- [8] 耿涛, 苏醒, 许小龙, 等. 北斗卫星导航系统精密定轨和广播星历轨道精度分析[J]. 中国科技论文, 2015, 10(9): 1023-1026.
- GENG Tao, SU Xing, XU Xiaolong, et al. Research on Precise and Broadcast Ephemeris Orbit of BeiDou Navigation Satellite System[J]. China Science paper, 2015, 10(9): 1023-1026.
- [9] ZHANG Yize, CHEN Junping, GONG Xiuqiang, et al. Modeling and Application of Compass Satellite Orbits and Clocks Predicted Correction [C]// SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings. Berlin: Springer, 2014: 181-191.
- [10] HE Feng, ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, et al. Satellite Station Time Synchronization Information Based Real-time Orbit Error Monitoring and Correction of Navigation Satellite in BeiDou System [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57(7): 1395-1403.
- [11] DENG Zhiguo, GE Maorong, UHLEMANN M, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites at GFZ [R]. Pasadena: IGS Workshop, 2014.
- [12] 高星伟, 过静璐, 程鹏飞, 等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 743-748, 755.
- GAO Xingwei, GUO Jinglu, CHENG Pengfei, et al. Fusion Positioning of Compass/GPS Based on Spatio Temporal System Unification[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(5): 743-748, 755.
- [13] 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.
- YANG Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.
- [14] 中国卫星导航管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.0 版)[Z]. 2013.
- China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal (Version 2.0)[Z]. 2013.
- [15] DILSSNER F, SPRINGER T, SCHÖNEMANN E, et al. Estimation of Satellite Antenna Phase Center Corrections for BeiDou[R]. Pasadena: IGS Workshop, 2014.
- [16] CAO Yueling, HU Xiaogong, WU Bin, et al. The Wide-area Difference System for the Regional Satellite Navigation System of Compass[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 55(7): 1307-1315.
- [17] WANG Ningbo, YUAN Yunbin, LI Zishen, et al. Determination of Differential Code Biases with Multi-GNSS Observations[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(3): 209-228.
- [18] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps[J]. Journal of the Institute of Navigation, 2014, 61(3): 191-201.
- [19] 曹俊忠. 一元线性回归显著性检验方法分析[J]. 西北纺织工学院学报, 1988(3-4): 78-82.
- CAO Junzhong. The Analysis on the Significant Testing Ways of the Simple Linear Regression [J]. Journal of Northwest Institute of Textile Science and Technology, 1988(3-4): 78-82.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2016-11-25

修回日期: 2016-12-20

第一作者简介: 张益泽(1990—),男,博士生,研究方向为 GNSS 精密定位。

First author: ZHANG Yize(1990—), male, PhD candidate, majors in GNSS precise positioning.

E-mail: zhyize@163.com

通信作者: 周建华

Corresponding author: ZHOU Jianhua

E-mail: yishu-zhou@263.net