



北斗系统长期空间信号测距精度评估 及精度提升分析

于超^{1,2} 陈俊平^{1,2} 陈倩^{1,2} 王阿昊^{1,3}

(¹ 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

(² 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(³ 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 基于后处理精密产品, 评估了 2015-06-01—2018-06-30 北斗广播星历的性能精度. 对北斗系统性能精度评估的基准问题进行了讨论, 统计分析了北斗系统不同星座卫星的轨道差值与星钟差值的长期变化趋势, 表明北斗系统空间信号测距精度有逐年提升的趋势. 还发现北斗广播星历在 2017-01-17 前后做出的调整具有较好的效果, 不同卫星轨道径向产生一个非零均值的偏差, 分析表明该径向偏差更好地实现了轨道径向与卫星星钟参数的自洽, 进而大大提高了北斗系统空间信号测距精度. 并且北斗系统在 2017-07-22 对广播星历 TGD 参数进行了更新, 提高了卫星钟差精度. 采用 4 个 MGEX 测站数据的伪距单点定位验证北斗空间信号精度提升对北斗系统基本导航定位服务的影响, 结果表明北斗系统在 2017 年 2 次更新后, 北斗基本导航定位精度在 NEU 三个方向分别提升 41%、49% 和 39%. 2018 年 1—6 月的统计结果表明, 目前北斗系统的 IGSO 卫星空间信号测距精度最高, 优于 0.8 m, GEO 与 MEO 卫星次之, 约为 1 m.

关键词: 空间信号测距精度; 北斗系统; 广播星历; 群延迟; 自洽性

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2019)06-1064-08

Assessment of long-term BDS signal-in-space range error and its improvement

Yu Chao^{1,2} Chen Junping^{1,2} Chen Qian^{1,2} Wang Ahao^{1,3}

(¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(³ College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The accuracies of Beidou broadcast ephemeris from June 1, 2015 to June 30, 2018 are evaluated by using post-processing precision orbit and clock products. The reference alignment problem of performance evaluation of the Beidou navigation satellite system(BDS) is discussed, and the long-term variation trend of orbit and clock difference is statistically analyzed. Statistical results show that the accuracy of signal-in-space range of BDS has been increasing year by year. The Beidou broadcast ephemeris made strategic adjustments around January 17, 2017, and the radial errors of different satellites have a non-zero mean deviation. The analysis shows that the radial deviation achieves the self-consistent relationship between radial errors and satellite clock errors parameters, which greatly improves the accuracy of signal-in-space range of BDS. In addition, BDS updated the broadcast ephemeris TGD(time group delay) parameters on July 22, 2017, which improved the accuracy of clock errors. To assess the effect of signal-in-space range error improvement, point positioning at four MGEX stations was performed. Results show that the positioning accuracies are improved by about 41%, 49% and 39% in N,E,U, respectively. The statistical results in the first half of 2018 show that the SISRE inclined geosynchronous orbit(IGSO) satellite of BDS is the highest, better than 0.8 m, followed by geostationary orbit(GEO) and medium earth orbit(MEO) satellites, about 1 m.

Key words: signal-in-space range error; Beidou broadcast(BDS); broadcast ephemeris; time group delay(TGD); self-consistent

全球卫星导航系统的导航定位与授时的精度受多种因素影响,而用户等效测距误差(UERE)是用于评估卫星导航系统精度性能的关键指标。UERE由空间信号测距误差(SISRE)和用户设备误差(UEE)2部分组成^[1]。其中空间信号测距误差反映了广播星历与钟差的预报精度,因此其精度直接影响了卫星导航系统的服务性能。2012年底北斗二号正式服务以来,国内外已有学者对北斗系统的空间信号测距精度进行了相关评估。文献[1]详细论述了空间信号测距误差理论基本概念与计算策略,并基于2017年的GNSS广播星历数据对空间信号测距精度进行评估,其中北斗系统的SISRE均方根误差在0.7~1.0 m之间。文献[2]统计分析了2013—2015年的结果,表明空间信号测距精度总体优于2 m,长期趋势看MEO精度最高且较为稳定,IGSO与GEO有一定的波动。文献[3]对北斗广播星历误差进行分析,证明北斗广播星历存在长期的系统性偏差,并通过解算广播星历偏差的改正值应用于定位,使定位效果得到明显改善。文献[4]重点讨论了北斗系统在地影期与机动恢复期间不同星座的广播星历误差的变化情况,发现2013—2016年间北斗的空间信号测距精度约为1.5 m。

本文评估了北斗系统2015年以来的空间信号精度,并着重分析了2017年之后广播星历中轨道钟差特性的变化。发现北斗广播星历在2017-01和2017-07做了2次重大更新。其中,2017-01更新之后,不同卫星轨道径向产生一个非零均值的偏差,更好地实现了轨道径向与星钟误差的自洽,提高了系统空间信号精度。2017-07对广播星历TGD参数进行了更新,提高了星钟精度,并使基本导航定位精度得到显著提升。

1 评估参考基准

1.1 基准统一

北斗系统通过提供广播电文为所有用户服务,影响系统服务性能的因素包括轨道误差和钟差误差。本文采用2015-06-01—2018-06-30的数据,将德国地学研究中心(GFZ)发布的事后精密产品(GBM)作为参考值进行性能评估,其中GBM产品中IGSO/MEO卫星产品的精度都在厘米量级,而GEO卫星的径向精度在厘米级,其他2个方向的精度为米级^[5]。广播星历与GBM后处理产品在时空基准上存在差异。GBM事后精密产品是基于ITRF参考框架生成的^[6],而北斗广播星历计算的卫星坐标是CGCS2000坐标系^[7],两者之间差异

在厘米级^[8],与广播星历的轨道误差相比可忽略不计^[9-10]。GBM事后精密星历给出的卫星位置是相对于卫星质心的,而北斗广播星历轨道按照接口控制文件(ICD)的定义为基于卫星相位中心^[7]。早期SLR检验结果表明北斗广播星历的参考基准更接近于卫星质量中心^[11]。本文在评估时将广播星历的卫星天线相位中心作为卫星轨道的参考点。

此外,GBM精密钟差产品是基于B1B2无电离层组合的结果,而BDS广播星历的卫星钟差基于B3频点^[7],两者之间的比较需要考虑群延迟(TGD)的校正^[11-12]。

1.2 评估方法与数据控制

在轨道精度评估中,利用距计算时刻最近的广播星历轨道根数来计算卫星位置,并将轨道差值从空间地心三维坐标系转换到卫星轨道坐标系。

在钟差精度评估中,广播星历与精密星历在解算时选择的基准站或参考钟不同,因此在进行钟差比较时需要去除这种钟差基准带来的影响。卫星钟差误差可表示为

$$\Delta T_b^i(k) = \mu(k) + \delta T^i(k) + \Delta^i(k) \quad i=1,2,\dots,14 \quad (1)$$

式中, i 为卫星编号; $\Delta T_b^i(k)$ 为包含钟差基准的钟差误差; $\mu(k)$ 为钟差基准值; $\delta T^i(k)$ 为实际钟差误差; $\Delta^i(k)$ 为随机误差。

目前主要有3种算法计算钟差基准,包括采用平均值^[2]、中位数^[3]以及加权平均值^[4]。加权平均值算法中,钟差基准计算公式如下^[4]:

$$\hat{\mu}(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \Delta T_b^i(k)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{1}{e^{m|v_i(k)|}} \quad (3)$$

$$v_i(k) = \hat{\mu}(k) - \Delta T_b^i(k) \quad (4)$$

$$\delta T^i(k) = \Delta T_b^i(k) - \hat{\mu}(k) \quad (5)$$

式中, n 为参与计算的卫星数; $\hat{\mu}(k)$ 为钟差基准的平差值; ω_i 为加权重数; m 为定权参数; $v_i(k)$ 为 $\Delta T_b^i(k)$ 的残差。最终的钟差基准通过式(5)抗差迭代计算得到。

空间信号测距误差是评估广播星历精度的综合指标,反映了卫星轨道与钟差误差在视向方向的综合影响^[2]。采用下式计算空间信号测距误差 V_{SISRE} ^[13-15]:

$$V_{\text{SISRE}} = \sqrt{(\alpha R - T_{\text{clk}})^2 + \beta(A + C)^2} \quad (6)$$

式中, R 、 A 、 C 和 T_{clk} 分别为卫星径向、切向、法向和

钟差误差; α 和 β 为投影系数,对于不同导航系统与卫星高度而言,投影系数数值不同,BDS的GEO(C01~C05)和IGSO(C06~C10、C13)星座系数为0.99和1/126,ME0(C11、C12、C14)星座的系数为0.98和1/54^[11].为避免粗差影响数据统计的准确性,本文对 V_{SISRE} 设置了10 m的阈值,其中GEO卫星轨道切向误差阈值为50 m,对超过阈值的数据进行剔除^[3,11].

2 轨道、钟差差值时间序列分析

2.1 广播星历参考中心分析

早期的论证^[11]表明,北斗广播星历的参考基准更接近于卫星质量中心.因此通常北斗广播星历的评估都没有考虑相位中心改正.图1对北斗卫星C11广播星历与精密星历的轨道径向差值进行了计算.其中,图1(a)不考虑2种星历在相位中心上的差异,可看到从2017-01-17开始出现了均值约为-1.1 m的径向偏差,该径向偏差与已公布的北斗天线相位中心偏差(PCO)一致.将2017-01-17以后的GBM精密星历增加PCO改正,转换到卫星天线相位中心,再与广播星历比较.如图1(b)所示,进行PCO改正后,卫星轨道径向的偏差得到了消除.这表明,北斗广播星历从2017-01-17进行了基准的调整,实现了ICD定义的相位中心基准.因此,本文对空间信号精度的评估从2017-01-17之后对GBM轨道进行了相位中心的修正.

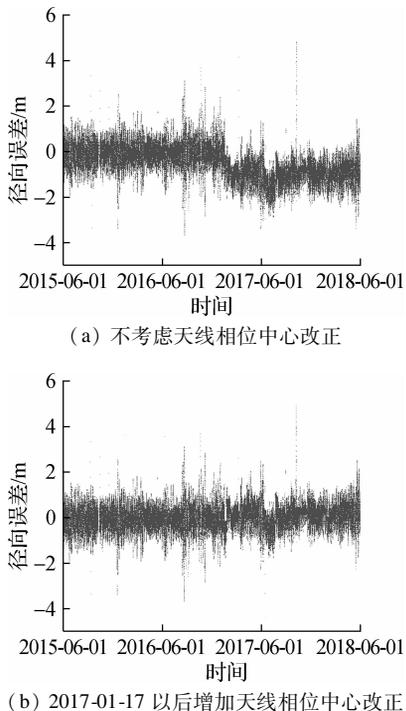


图1 C11卫星轨道径向差值的时间序列

2.2 钟差评估基准选择

分别利用平均值、中位数以及加权平均值3种算法对2016年全年的钟差基准值与原始钟差序列进行相关分析,如图2所示.其中,2016年C13有效数据量较少,故不对其进行分析.对比3种算法的结果可知,加权平均值算法求出的钟差基准与原始钟差相关性最高,中位数算法次之,而平均值算法获取的钟差基准差异会受到个别钟差粗差的污染,相关性最低.根据加权平均值算法对比不同星座差异,除C05、C06两颗卫星外,GEO与IGSO卫星钟差相关性略高于ME0星座,这主要是因为受北斗的时间同步观测与北斗监测站分布区域的限制,ME0卫星无法实现长期跟踪和钟差解算,使得预报的钟差精度降低^[3].根据以上分析,本文对卫星钟差评估均使用加权平均值算法来扣除钟差基准,考虑到不同权重参数相关性接近,权重参数取 $m=1/4$.

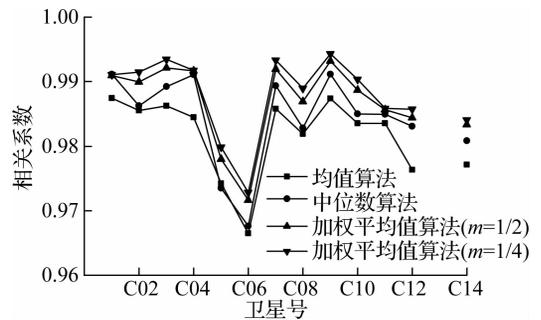


图2 不同钟差基准算法与原始钟差相关性对比

2.3 轨道差值时间序列分析

图3给出了C03、C06和C11三类不同轨道卫星的轨道径向误差的时间序列.可看出,C03轨道径向误差波动最大,这与GEO卫星轨道精度低有关^[5];C06与C11径向误差相对比较稳定,但C06出现了由轨道径向与卫星钟差相关引起的不稳定径向偏差.另外,对比C03与C06卫星的轨道径向误差发现,2颗卫星每年都有2次误差比较大的时间段,如图3灰框区域所示,均在太阳高度为 0° 附近.不同的是C03表现出明显的负向径向误差偏移,而C06在径向表现出噪声型的误差放大,这种现象对于所有的GEO与IGSO卫星都有出现.根据高度角的变化关系可知,径向误差变大是由于卫星进入地影期光压摄动的变化导致定轨精度降低造成的影响^[16],但是GEO和IGSO卫星都是高轨卫星且在地影期间卫星姿态都为零偏状态,2种星座卫星的径向误差却表现不一致,这可能与卫星的运动状态有关,但仍需进一步研究.

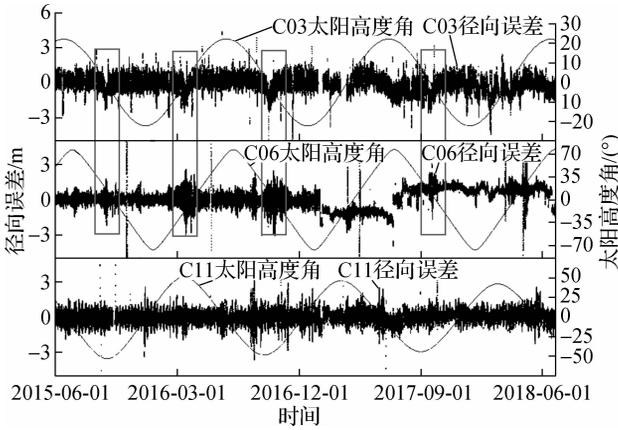


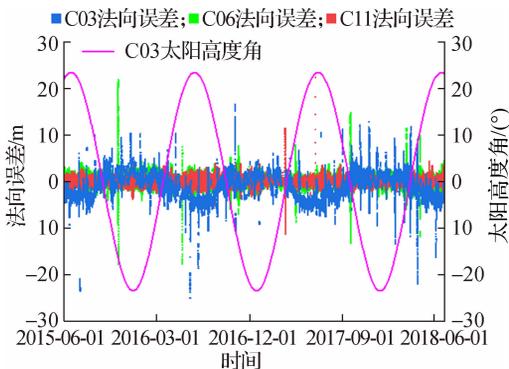
图 3 C03、C06 和 C11 轨道径向误差变化

到 7.0、2.8 m,考虑到 GBM 产品 GEO 卫星轨道切向和法向米级的精度,GEO 的切向和法向误差统计结果存在一定的不确定性.

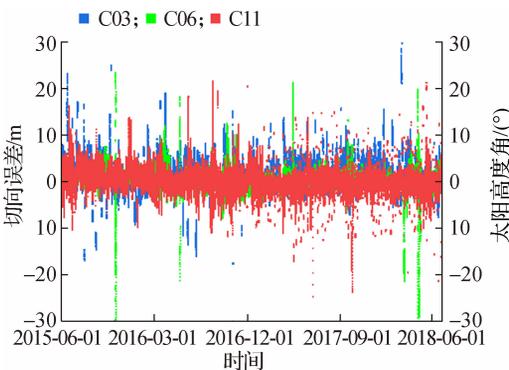
2.4 卫星钟差差值序列分析

图 5 给出了北斗所有卫星的星钟误差情况.观察到 C05 在 2017 年之前星钟误差波动变化与其他 GEO 卫星表现不一致,存在不稳定的波动现象,C06 的星钟误差波动更加明显;这 2 颗卫星的钟差频繁出现粗差,这解释了图 2 中 C05 与 C06 相关性明显低于其他卫星的原因.从图 5 可以看出卫星钟差呈现系统偏差,其中 GEO 与 MEO 卫星的星钟误差总体都表现为负向系统偏差,而 IGSO 卫星的星钟误差表现为正向的系统偏差;从 2017 年开始所有卫星的星钟钟差的波动均有所变小,星钟的系统偏差也有减小的趋势.图 6 给出了 2016 与 2017 年星钟误差年均值统计的对比结果,GEO 星

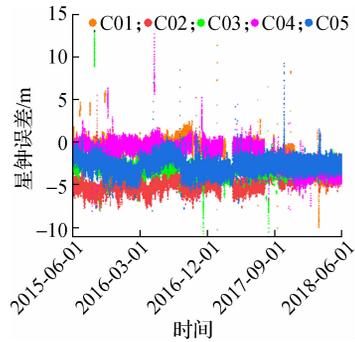
图 4(a) 给出了 C03、C06、C11 轨道的法向差值.可看出 MEO 与 IGSO 卫星精度相当,明显优于 GEO 卫星.此外,从长期趋势上来看,C03 及其他 GEO 卫星的法向误差与太阳高度角的变化呈负相关,特别在夏至日与冬至日前后,法向误差偏差最大,天均值最大可达 ± 2 m,这可能与 GEO 卫星精密定轨的动力学模型不精确以及仅在区域观测有关.图 4(b) 给出了这 3 颗卫星的切向误差,总体上北斗 IGSO 卫星广播星历轨道切向精度最高,均方根误差优于 2 m,MEO 次之,均方根误差优于 2.4 m.此外,GEO 卫星的切向和法向统计精度分别达



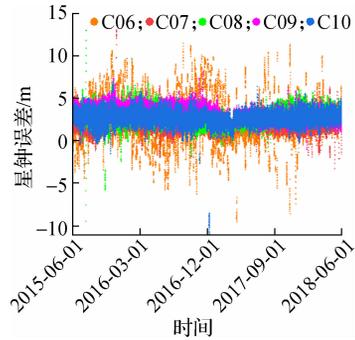
(a) 轨道法向误差



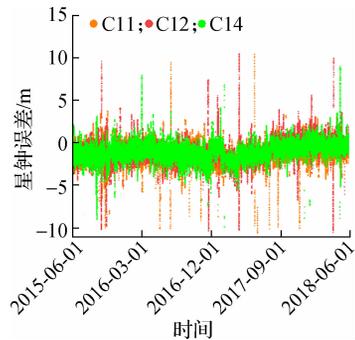
(b) 轨道切向误差



(a) GEO 卫星



(b) IGSO 卫星



(c) MEO 卫星

图 4 C03、C06 和 C11 轨道法向和切向误差变化

图 5 北斗所有卫星长期卫星星钟误差

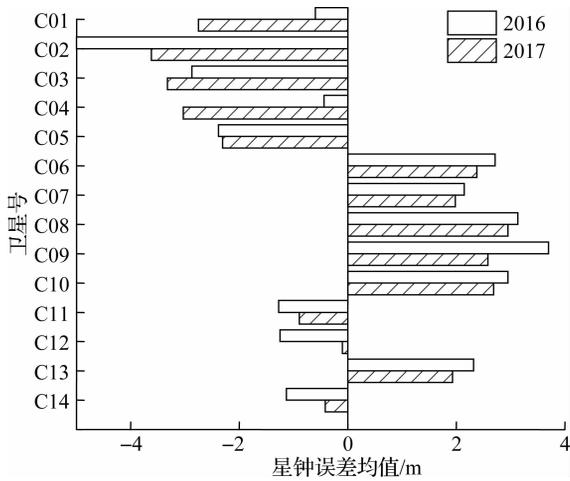


图 6 2016 与 2017 年星钟误差均值统计对比

钟的系统偏差改变趋势并不一致,其中 C01、C03 和 C04 这 3 颗卫星星钟误差 2017 年的系统偏差相比于 2016 年变大,而 C02 与 C05 则变小;对于 IGSO 与 MEO 来说,星钟误差的系统偏差则显著变小.

2.5 广播星历 TGD 参数时间序列分析

以上卫星钟差差值序列分析是基于 B1B2 无电离层组合频点给出的结果,使用了北斗广播星历中 TGD 参数进行改正,因此北斗广播星历播发的 TGD 参数也是影响钟差精度的关键指标. 图 7 给出了评估期间北斗广播星历 B1B3 星上设备时延差参数(TGD1)^[7]与中国科学院测量与地球物理研究所(IGG)发布的 IGGDCB^[17]产品的差异,考虑到 IGGDCB 产品与北斗系统的 TGD 存在基准问题,在比较时以 C01 卫星的 TGD 作为基准进行扣除. 北斗广播星历不同卫星的 TGD1 参数在 2017 年 7 月之前的一致性较差,与 IGGDCB 产品的差异也较为明显;而自 2017-07-22 开始,北斗系统对 TGD 参数进行了更新,不同卫星的 TGD1 参数

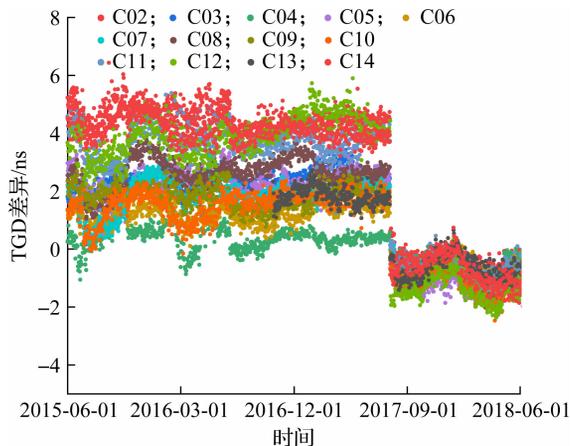


图 7 TGD1 与 IGGDCB 产品差异

表现出较高的一致性,与 IGGDCB 产品的差异明显减小. 由此可见,北斗系统 2017 年以后卫星钟差精度的提升与广播星历的 TGD 更新有关.

3 空间信号测距误差分析

3.1 空间信号精度统计

表 1 给出了 2015—2018 年期间每半年的空间信号测距均方根误差统计结果. 由表可知,北斗空间信号测距精度在 2016 年下半年时相比于其他时段有所降低,而从 2017 年开始有一个大幅度的精度提升. 图 8 对比了 2016 年 7—12 月与 2018 年 1—6 月的统计结果,其中 GEO、IGSO 和 MEO 精度分别提升了 50%、40% 和 32%,并且根据 2018 年 1—6 月的统计结果来看,北斗系统空间信号测距精度 IGSO 卫星精度最高,均方根误差优于 0.8 m, GEO 与 MEO 精度相当,在 1.0 m 左右. GEO 卫星的空间信号精度提升最为明显,统计结果也佐证

表 1 每半年的空间信号测距均方根误差统计 m

卫星号	2015 年	2016 年	2016 年	2017 年	2017 年	2018 年
	7—12 月	1—6 月	7—12 月	1—6 月	7—12 月	1—6 月
C01	2.20	2.18	2.81	2.59	1.50	0.95
C02	2.97	2.62	2.15	2.02	1.21	1.02
C03	1.03	1.07	0.98	0.71	0.75	0.73
C04	2.38	2.64	2.77	2.77	1.50	1.25
C05	1.27	1.27	1.23	0.90	0.82	1.10
C06	1.77	1.71	2.18	1.69	1.19	1.03
C07	0.77	0.88	0.96	0.64	0.63	0.71
C08	0.92	0.94	0.98	0.71	0.73	0.90
C09	0.86	0.83	1.11	0.64	0.56	0.52
C10	0.86	0.70	0.84	0.66	0.60	0.67
C11	1.29	1.28	1.30	1.28	0.97	0.91
C12	1.65	1.46	1.63	1.71	1.03	1.13
C13			1.46	0.91	0.73	0.72
C14	1.65	1.27	1.63	1.68	1.01	1.06
GEO	2.09	2.07	2.10	1.93	1.20	1.03
IGSO	1.09	1.07	1.31	0.95	0.78	0.79
MEO	1.54	1.34	1.53	1.57	1.00	1.04

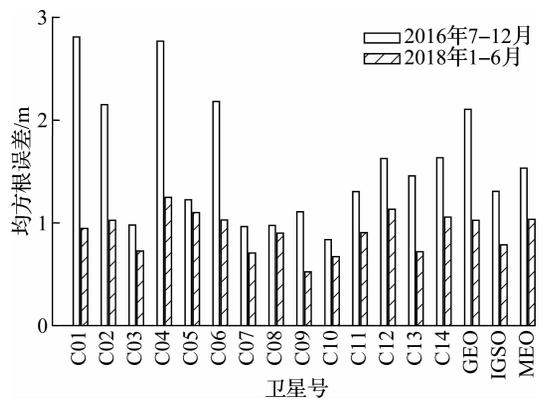


图 8 2016 年 7—12 月与 2018 年 1—6 月空间信号测距均方根误差统计对比

了北斗广播星历自 2017-01-17 开始进行了参考基准的调整.

3.2 轨道径向与钟差相关性分析

北斗系统从 2017-01-17 (BDS 576 周) 开始对广播星历做了基准的调整,参考中心吻合于相位中心,方便用户使用.该改进提高了空间测距精度,但是这也造成卫星轨道径向误差存在波动现象(见

图 3).进一步分析卫星轨道径向误差,按周对不同卫星的径向误差均值进行统计.图 9 给出了部分卫星评估期间按 BDS 周统计的径向误差均值变化情况.可看出,轨道径向偏差变化在短期内波动;不同卫星径向误差变化趋势不同,且无明显规律;GEO 与 IGSO 卫星径向误差变化比较明显,MEO 卫星径向变化相对较小且稳定.

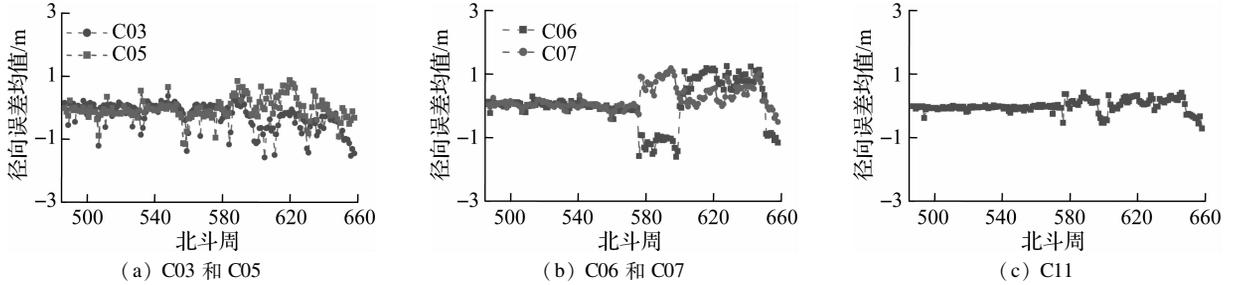


图 9 不同卫星径向误差周均值变化情况(周统计)

由式(6)可看出,空间信号测距精度主要受轨道径向误差与星钟误差的影响,考虑到两者相关性,文献[4]指出北斗星地双向时间同步观测获取的星钟误差与轨道径向误差在天均值统计上呈弱相关.图 10 给出了按周统计 C05、C06 和 C11 三种不同星座卫星的轨道径向误差与星钟误差的相关性变化,可以发现从 BDS 576 周开始,C05 卫星由弱负相关变为强正相关,相关系数达 0.6 左右,而 C06 与 C11 卫星径向与钟差误差的周相关性基本保持不变,呈现不高于 0.3 的弱相关性.表 2 中列出了 2016 年与 2017 年周相关系数的均值统计情况,表明北斗卫星轨道径向误差与钟差误差相关性对于 GEO 卫星由弱相关性转为强相关性,相关系数基本处于 0.5 ~ 0.6 之间,对于 IGSO 卫星来说相关性略有增加,相关系数在 0.1 ~ 0.2 之间;MEO 星座的相关性基本不变,且 IGSO 与 MEO 卫星的轨道径向误差与星钟误差仍旧表现为弱相关.

表 2 2016 与 2017 年径向与星钟误差周相关性的均值统计

卫星号	2016 年	2017 年
C01	-0.18	0.57
C02	-0.16	0.61
C03	-0.14	0.58
C04	0.22	0.39
C05	-0.03	0.56
C06	0.05	0.12
C07	0.08	0.10
C08	0.06	0.15
C09	0.11	0.19
C10	0.07	0.11
C11	0.01	-0.05
C12	0.01	-0.06
C13	0.12	0.11
C14	0.01	-0.03

由于定轨估计的卫星钟差包含轨道径向周期项误差^[18],此时卫星钟差与轨道径向误差关系是自洽的;而北斗广播星里的钟差参数是根据星地双

向时间同步测量估计得到,从而广播星历里的轨道参数与广播星历钟差并不自洽.空间测距误差的统计表明,2017 年 1 月以后,广播星历轨道和钟差的自洽性得到了大大提升,综合 GEO 卫星轨道径向与星钟误差的相关性变化情况,可以推断 BDS 576 周后北斗广播星历更好地处理了轨道径向与星地双向时间同步的星钟误差的自洽性关系.该处理大幅度提升了 GEO 卫星的空间信号测距精度,均方根误差从 2.1 m 提升到 1.0 m;而 IGSO 与 MEO 卫星的轨道径向与星钟误差的相关性虽然变化不大,但由于其钟差精度的提升,空间信号测距精度也有所提升.

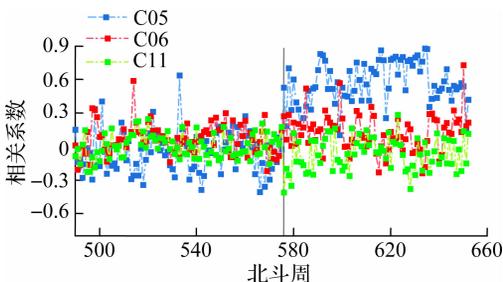


图 10 卫星轨道径向与钟差的相关性(周统计)

4 伪距单点定位精度分析

采用 4 个 MGEX 站进行伪距单点定位来评估北斗系统的服务性能.为了避免伪距噪声对定位统

计结果带来的影响,采用双频 hatch 滤波算法对伪距观测值做平滑处理.对流层采用 Saastamoinen 模型改正,利用 B1B2 双频组合消电离层,卫星截止高度角设置为 10° .

图 11 给出 KARR 站长期的伪距单点定位在南北(N)、东西(E)、高程(U)3个方向的均方根误差.由图可见,2016年下半年定位精度有所变差,2017年开始各个方向精度提升明显,这与 SISRE 的变化情况相符合;且在 2017-07-22 广播星历 TGD 参数更新后,NEU 三个方向精度均有明显提升.表 3 给出了 4 个测站的广播星历调整前后的统计结果,综合来看北斗空间信号测距精度提升,北斗系统的基本导航定位服务在 NEU 方向分别提升了 41%、49% 和 39%.

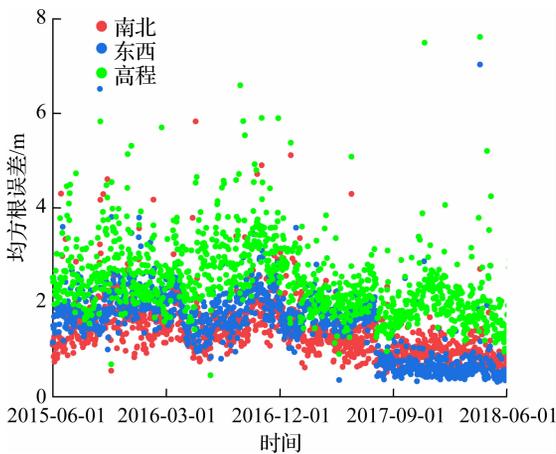


图 11 KARR 测站伪距单点定位在 3 个方向的均方根误差

表 3 4 个 MGEX 站伪距单点定位均方根误差统计 m

站名	2016 年 7—12 月			2018 年 1—6 月		
	N	E	U	N	E	U
GMSD	1.64	1.74	3.89	1.13	0.93	2.29
JFNG	1.48	1.33	3.23	0.98	0.93	2.33
KARR	1.84	1.99	3.26	0.94	0.84	2.07
XMIS	1.62	1.90	3.53	0.79	0.75	1.81

5 结论

1) 从长期趋势上看,GEO 与 IGSO 卫星轨道径向误差在地影期表现出不一致的误差状态,GEO 卫星表现为负向的系统偏差,IGSO 卫星轨道径向表现为误差的放大.此外,GEO 卫星轨道法向误差与太阳高度角的变化呈负相关的年周期波动.

2) 北斗的空间信号测距精度有逐年改进的趋势,主要得益于北斗系统在 2017 年的 2 次广播星历的更新调整.自 2017-01-17 开始,北斗系统对广播星历做了基准的调整,参考中心吻合于相位中心;卫星轨道径向误差产生非零均值的偏差,并且

轨道径向与钟差的相关关系发生变化,GEO 卫星由弱负相关转变为强正相关.分析发现其主要原因是更好地实现了轨道径向与钟差的自治性,从而大幅度提升了北斗系统空间信号测距精度.此外,在 2017-07-22 北斗系统对广播星历的 TGD 参数进行了更新,更新后的 TGD 参数与 IGG 发布的产品更为接近,不同程度上提高了卫星钟差精度.

3) 利用伪距单点定位验证空间信号精度的提升对北斗系统基本导航定位性能的影响,结果表明北斗 2017 年的 2 次更新都显著提高了北斗系统的基本导航定位精度.根据最新的空间信号测距精度统计结果,IGSO 星座精度最高,均方根误差优于 0.8 m,GEO 与 MEO 卫星精度相当,均方根误差在 1 m.

参考文献 (References)

- [1] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment—methodology and results [J]. *Advances in Space Research*, 2018, **61**(12): 3020–3038. DOI: 10.1016/j.asr.2018.03.041.
- [2] 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. DOI:10.11887/j.cn.201603001. Liu W K, Ren J, Zeng Q, 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. DOI:10.11887/j.cn.201603001. (in Chinese)
- [3] 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**(z2): 64–71. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. F027. Zhang Y Z, Chen J P, Zhou J H, et al. Analysis and application of BDS broadcast ephemeris bias [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, **45**(z2): 64–71. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2016. F027. (in Chinese)
- [4] Wu Y, Liu X L, Liu W K, et al. Long-term behavior and statistical characterization of BeiDou signal-in-space errors [J]. *GPS Solutions*, 2017, **21**(4): 1907–1922. DOI:10.1007/s10291-017-0663-0.
- [5] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, et al. The multi-GNSS experiment (MGEX) of the international GNSS service (IGS)—achievements, prospects and challenges [J]. *Advances in Space Research*, 2017, **59**(7): 1671–1697. DOI:10.1016/j.asr.2017.01.011.
- [6] Fritsche M, Deng Z, Ge M, et al. GFZ analysis center technical report 2015: IGS technical report 2015 [R]. Bern: IGS Central Bureau and University of Bern, 2015.

- [7] 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)[EB/OL]. (2014-11-24)[2018-05-10]. <http://www.chinabeidou.gov.cn/tongzhi/371.html>.
- [8] Lu Z P, Qu Y Y, Qiao S B. Geodetic datum and geodetic control networks[M]// *Geodesy*. Berlin: Springer-Verlag, 2014: 71 - 130.
- [9] Malys S, O'Neill C. Coincidence level among terrestrial reference frames available through GNSS broadcast messages[R]. Kyoto, Japan: International Committee on GNSS, 2017.
- [10] 高星伟,过静琚,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 X W, Guo J J, Cheng P F, et al. Fusion positioning of BeiDou/GPS based on spatio temporal system unification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, **41**(5): 743 - 748, 755. (in Chinese)
- [11] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective[J]. *GPS Solutions*, 2015, **19**(2): 321 - 333. DOI:10.1007/s10291-014-0390-8.
- [12] 张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究[D]. 上海:同济大学,2017.
Zhang Y Z. Research on real-time high precision Beidou positioning service system[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)
- [13] 张清华,王源,孙阳阳,等. BDS 区域卫星导航系统空间信号精度评估[J]. 大地测量与地球动力学,2015, 35(5):764 - 767.
- [14] Chen L, Jiao W H, Huang X R, et al. Study on signal-in-space errors calculation method and statistical characterization of Beidou navigation satellite system [C]// *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Berlin: Springer, 2013: 423 - 434. DOI:10.1007/978-3-642-37398-5_39.
- [15] 董立尧. 北斗空间信号精度性能评估[D]. 天津: 中国民航大学,2017.
Dong L Y. Performance assessment of Beidou signal-in-space accuracy[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)
- [16] 毛悦,宋小勇,贾小林,等. 北斗导航卫星地影状态分析[J]. 测绘学报,2014,43(4):353 - 359. DOI:10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0053.
Mao Y, Song X Y, Jia X L, et al. Earth eclipse status analysis of Beidou navigation satellites[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, **43**(4): 353 - 359. DOI:10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0053. (in Chinese)
- [17] Wang N B, Yuan Y B, Li Z S, et al. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, **90**(3): 209 - 228. DOI:10.1007/s00190-015-0867-4.
- [18] 陈俊平,周建华,严宇,等. GNSS 数据处理时空参数的相关性[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11): 1649 - 1657. DOI: 10.13203/j.whugis20170278.
Chen J P, Zhou J H, Yan Y, et al. Correlation of spatial and temporal parameters in GNSS data analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, **42**(11): 1649 - 1657. DOI:10.13203/j.whugis20170278. (in Chinese)