

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.02.05

北斗星地双向时频传递与 广播钟差精度分析

巩秀强^{1,2}, 陈俊平¹, 周善石¹, 吴 斌¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 与其他卫星导航系统不同, 北斗卫星导航系统采用星地双向时间比对技术, 直接测量卫星钟相对于地面保持的系统时间的钟差, 并用于广播电文钟差参数的建模。讨论了电离层延迟误差、卫星相位中心误差等不同误差源对不同类型卫星双向时间同步卫星钟差精度的影响。实测数据分析结果表明, 星地双向卫星钟差内符合精度 (*RMS*) 优于 0.15 ns。利用双向卫星钟差序列, 对广播星历钟差参数预报精度进行了分析, 统计结果显示广播电文钟差参数预报 1 h, 精度在 2 ns 以内, 移动卫星刚入境时, 钟差参数预报 6 h 误差可达 10 ns。

关键词: 北斗卫星导航系统; 双向时频传递; 广播钟差参数

中图分类号: P228

文献标识码: A

1 引 言

中国北斗卫星导航系统 (Beidou navigation satellite system, BDS) 具备无线电星地双向时间比对测量技术^[1]。国内外已有较多双向时间比对技术的研究, 星地双向时间同步技术通过上下行伪距求差, 消除了共有误差影响, 也减小与信号频率有关的电离层延迟等误差^[2,3]。综合考虑目前时间比对技术各误差源的精度量级^[4], 星地无线电双向法的理论精度可达到约几百皮秒的量级^[5,6]。本文利用北斗双向实测数据^[7], 分析了电离层误差和卫星相位中心误差对双向时间比对精度的影响及其改正方法, 统计了双向钟差的随机噪声。

卫星钟差模型是广播电文的重要组成部分, 其精度直接影响导航系统的服务性能^[8-10]。BDS 利用双向钟差点, 采用短期、中期与长期相结合的多项式模型拟合生成偏差、钟速和加速度共 3 个参数, 并通过广播电文播发给用户^[11]。本文采用卫星双向时频传递 (two-way

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2019-03-18

资助项目: 上海市科委基金 (16511103003); 国家自然科学基金 (11573035)

通讯作者: 巩秀强, xqgong@shao.ac.cn

satellite-ground time transfer, TWSTT) 钟差测量作为参考, 统计了 BDS 广播电文钟差模型的精度, 并分析了模型存在的问题。

2 模型与误差

在星地双向时间同步技术中, 地面站与卫星在同一钟面时 T 接收对方发射的测距信号, 并测量相应的伪距, 得到下行时延观测值 P_{sg} 和上行时延观测值 P_{gs} 。下行和上行时延的观测方程如下:

$$P_{sg} = \Delta T_g - \Delta T_s + \rho_{sg} + I_{sg} + T_{sg} + D_g^T + D_s^R + R_{sg} + \Delta\tau_{sg} + E_s^T + \varepsilon_{sg} \quad , \quad (1)$$

$$P_{gs} = \Delta T_s - \Delta T_g + \rho_{gs} + I_{gs} + T_{gs} + D_s^T + D_g^R + R_{gs} + \Delta\tau_{gs} + E_s^R + \varepsilon_{gs} \quad , \quad (2)$$

式中, ΔT_g 和 ΔT_s 分别表示地面站和卫星的钟面时 T 相对于导航系统时间的钟差; D_g^T 和 D_g^R 分别为地面站发射通道时延和接收通道时延, D_s^R 和 D_s^T 分别表示卫星的发射通道时延和接收通道时延; ρ_{gs} , I_{gs} , T_{gs} , $\Delta\tau_{gs}$, R_{gs} 表示地面站到卫星的几何时延、电离层时延、对流层时延、地球自转效应和卫星相对论效应; ρ_{sg} , I_{sg} , T_{sg} , $\Delta\tau_{sg}$, R_{sg} 表示卫星到地面站的几何时延、电离层时延、对流层时延、地球自转和卫星相对论效应; E_s^T 和 E_s^R 表示卫星发射和接收相位中心; ε_{sg} 、 ε_{gs} 表示上行伪距和下行伪距的随机误差。

将式 (2) 减去式 (1) 再除以 2, 可得到卫星钟相对于地面时间系统北斗时 (Beidou time, BDT) 的钟差。即:

$$\Delta T_{sg} = \Delta T_s - \Delta T_g = [(P_{gs} - P_{sg}) + (\rho_{sg} - \rho_{gs}) + (I_{sg} - I_{gs}) + (T_{sg} - T_{gs}) + (D_g^T - D_s^T) + (D_s^R - D_g^R) + (R_{sg} - R_{gs}) + (\Delta\tau_{sg} - \Delta\tau_{gs}) + (E_s^T - E_s^R) + (\varepsilon_{sg} - \varepsilon_{gs})]/2 \quad . \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 星地双向时间同步误差由伪距观测误差、空间传播误差、测站与卫星发射接收通道时延、卫星发射与接收相位中心改正以及地球自转效应的不完全改正误差决定。其中地球自转效应和相对论效应可以采用模型精确计算, 其误差可以忽略^[1]。下行与上行对流层延迟误差 T_{sg} 和 T_{gs} 可以完全抵消^[5]。我们采用了每小时更新的广播星历来求取几何时延, 由于上下行轨道误差可以抵消, 几何时延不完全改正误差也可以忽略。综上所述, 北斗系统双向时间比精度取决于测量伪距随机误差、信号在空间双向传播的电离层误差、卫星相位中心修正误差、测站和卫星发射时延误差以及测站和卫星接收时延误差。北斗时间同步站的发射与接收相位中心一致, 可以相互抵消。

2.1 噪声分析

采用 2016 年 9 月 1 日北斗卫星星地双向实测钟差进行分析, 对双向钟差序列作 1 min 窗口的滑动线性阶拟合, 分析拟合的残差。为了增加卫星可视弧段, 除主控站外, 北斗区域卫星导航系统布设多个外场站, 并通过 C 波段双向时频传递技术保持与主控站的时间同步。通过外场站星地双向时频传递, 我们可测得卫星钟差与外场站相对于主控站的相对钟差之和, 并得到卫星相对于主控站 BDT 的钟差。如图 1 所示, 红点表示主控站直接测得卫星钟差噪

声, 绿点表示外场站经站间时间同步归算后的钟差噪声。统计得出主控站测得卫星钟差精度 RMS 为 0.08 ns 。外场站测得卫星钟差的误差明显放大, RMS 达到 0.15 ns ; 这说明外场站与主控站间的站间归算处理增大了观测误差。图 2 给出了拟合残差的统计直方图, 显示出双向钟差噪声呈正态分布的特征, 具有随机误差特性。

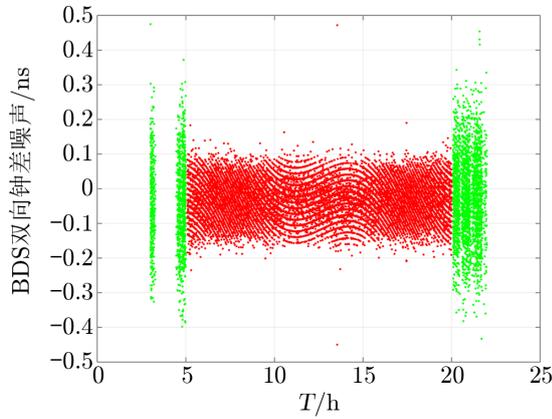


图 1 卫星钟差的误差序列

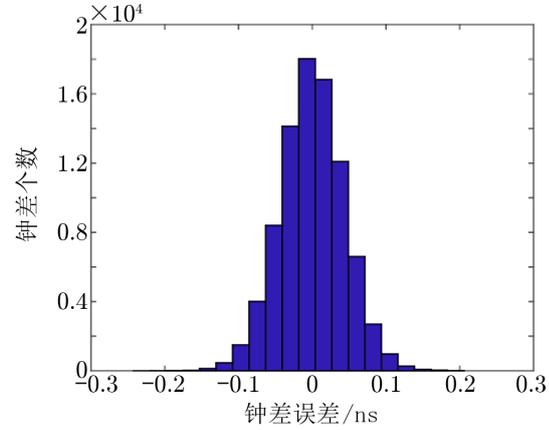


图 2 钟差误差的直方图

2.2 电离层延迟改正分析

在双向测量中, 与频率有关的电离层延迟误差虽然减小很多, 其值仍可达 $4\text{ ns}^{[7]}$, 是影响双向钟差精度的主要误差源。根据式 (3), 电离层延迟对双向钟差的影响 Δt_{iono} 表示为:

$$\Delta t_{\text{iono}} = (I_{\text{sg}} - I_{\text{gs}})/2 = 40.28 \times \text{TEC} \times (1/f_{\text{dn}}^2 - 1/f_{\text{up}}^2)/2, \quad (4)$$

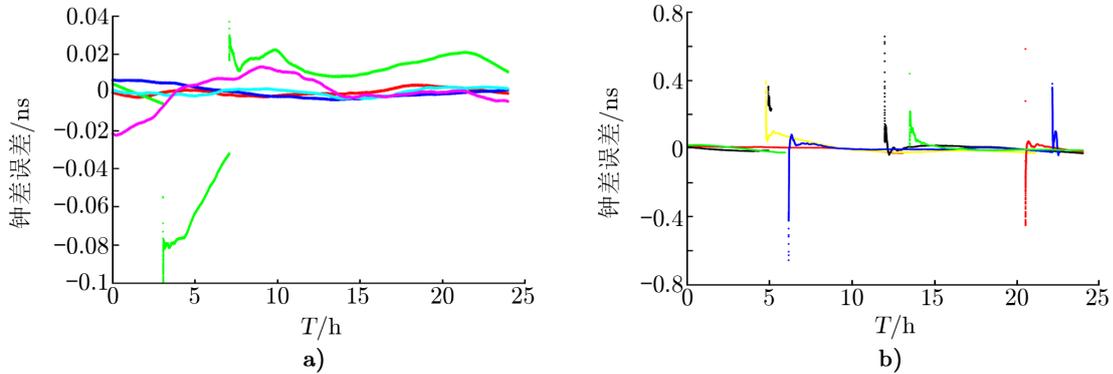
式中, f_{dn} 和 f_{up} 表示上行和下行的频率值, TEC 为地面站至卫星路径上电离层电子总含量。北斗卫星导航系统时间同步站布设有并置监测接收机^[8], 可利用接收机双频实测数据求取时间同步站至卫星的电离层延迟量^[9]。根据式 (1), 将 B1 与 B2 频点的伪距观测值 P_1 和 P_2 做差, 可求得同步站至卫星路径上电离层电子总含量 TEC , 为:

$$\text{TEC} = [(P_1 - P_2) - (tgd_{12} + ifb_{12})]/40.28(f_2^2 - f_1^2). \quad (5)$$

式中 f_1 和 f_2 表示 B1 和 B2 两频点的频率, tgd_{12} 、 ifb_{12} 分别表示卫星与接收机 B1 和 B2 频点的硬件时延之差。相位平滑伪距可以有效地降低伪距噪声, 消除伪距多路径效应^[10]。BDS 实时采用伪距噪声和多路径改正 (code noise and multipath correction, CNMC) 方法计算接收机的相位平滑伪距, 并供电离层延迟解算使用^[11,12]。

相位数据观测精度在毫米级, 我们利用双频相位观测数据计算电离层延迟, 其结果作为参考, 来评估利用双频相位平滑伪距计算电离层延迟的精度。采用 2016 年 9 月 1 日北斗监测接收机双频实测数据, 我们分别利用相位平滑伪距与相位观测数据计算电离层延迟对双向钟差的影响, 将两者之差画出。从图 3 a) 可以看出, 对于不同 GEO (Geostationary Earth Orbit) 卫星 (不同颜色的线条), 双频相位平滑伪距法求得电离层延迟对双向钟差影响在 0.05

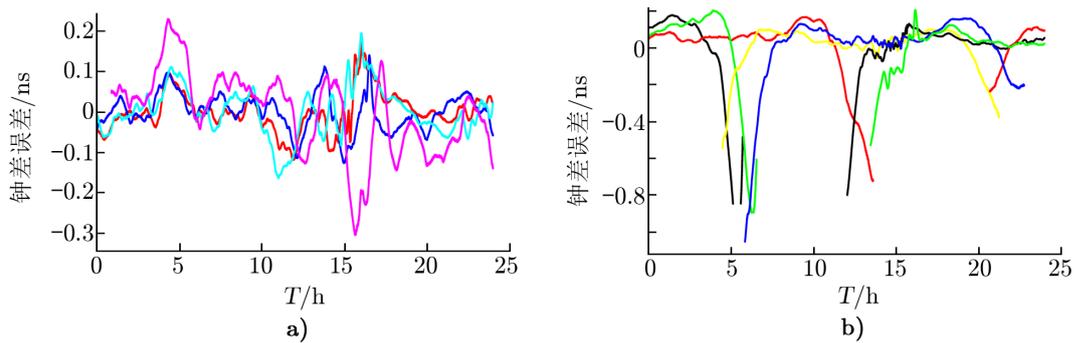
ns 以内。当相位平滑重新收敛时, 电离层延迟的解算精度会受影响, 误差达到 0.1 ns。从图 3 b) 可以看出, IGSO (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit) 卫星在刚入境时, 由于观测高度角低、伪距质量差^[13], 电离层延迟的解算精度较低, 因此双向钟差的误差可以达 0.5 ns 以上。入境一段时间后, 误差逐渐缩小到 0.05 ns 以内。当移动卫星刚入境时, 双向钟差精度较低, 在利用双向钟差进行广播钟差参数拟合时, 要将此段数据剔除。



注: a) GEO 卫星; b) IGSO 卫星。

图 3 双频相位平滑伪距计算的电离层延迟对双向钟差的影响

另外一种电离层延迟改正方法为采用电离层模型进行计算, 其不存在以上的收敛问题。进一步分析采用实时电离层模型进行电离层误差的改正。采用的模型为欧洲定轨中心 (Center Orbit Determination Europe, CODE) 提供的全球电离层模型 (Global Ionosphere Map, GIM), 其在中国范围内精度可以达到 10 TECU ($\text{TECU}=10^{16} \text{ m}^{-2}$) 以内^[9]。以双频相位观测数据计算电离层延迟参考来评估模型计算电离层延迟的精度。从图 4 a) 可以看出, 不同 GEO 卫星 (不同颜色线条) 的电离层误差趋势基本一致, 说明 GIM 模型在 1 h 内精度波动明显, 无法表达电离层变化的高频部分。对双向钟差影响波动幅度达到 0.6 ns, 不能满足双向钟差的精度要求。从图 4 b) 可以看出, IGSO 卫星出入境时, 由于高度角低, GIM 模型投影函数误差较大, 这也会造成电离层改正精度大幅降低。



注: a) GEO 卫星; b) IGSO 卫星。

图 4 GIM 求得电离层延迟对双向钟差的影响

2.3 卫星发射与接收相位中心改正分析

由于北斗卫星下行发射信号与上行接收信号的相位中心不一致, 在进行双向时间比对时, 卫星相位中心引起的误差不能抵消, 因此需要对卫星发射和接收相位中心进行改正。从式 (3) 中可以看到, 卫星相位中心改正对双向钟差的影响 Δt_{ecc} 等于卫星下行发射相位中心改正值减去卫星接收相位中心改正值, 表示如下:

$$\Delta t_{ecc} = E_s^T - E_s^R, \quad (6)$$

其中, E_s^T 和 E_s^R 表示卫星发射和接收相位中心。卫星相位中心改正取决于两个方面: 卫星瞬时姿态以及卫星相位中心在星固系中的坐标。GPS 卫星只有动偏模式, 而北斗区域导航系统卫星采用了动偏与零偏两种姿态模式^[14,15]。若在计算北斗卫星相位中心时不考虑此差异, 会影响双向时间比对精度。

采用 2016 年 9 月 1 日数据, 在动偏与零偏两种姿态模式下, 我们把卫星相位中心改正对双向钟差的影响进行了比较。由图 5 可知, 在不同姿态控制模式下, 北斗卫星相位中心改正对钟差影响可达 0.9 ns, 绿线代表 IGSO 卫星, 蓝线代表 MEO 卫星。

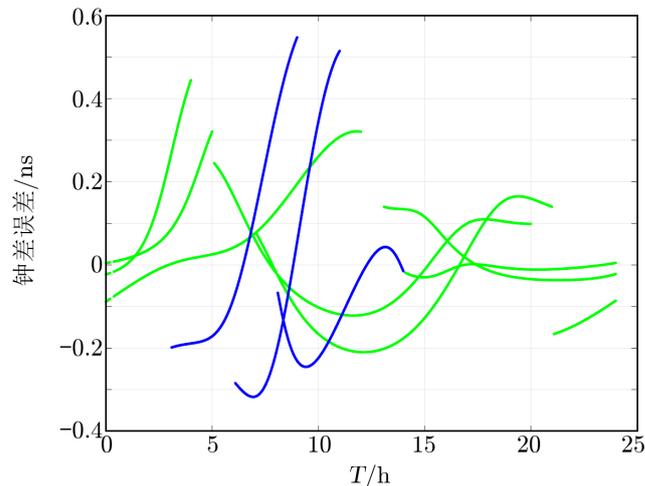


图 5 不同姿态下相位中心误差对钟差的影响

此外, 相位中心的标定值也是影响时间同步结果的一个因素。目前, 北斗卫星天线相位中心有三种来源, 分别是卫星出厂标定值、国际多模 GNSS (global navigation satellite system) 实验工程 (Multi-GNSS Experiment and Pilot Project, MGEX)^[16]、ESA (European Space Agency) 解算值^[17]。出厂标定值与 MGEX 给出的值基本一致。ESA 解算的卫星天线相位中心与出厂标定值存在较大差异, X 方向误差可达 0.5 m, Z 方向达到 2 m。

针对以上情况, 我们对相位中心 X 和 Z 方向存在的误差进行了仿真, 计算了不同量级的相位中心误差对双向钟差的影响。由图 6 可知, 当 Z 方向存在 1 m 误差时, 对钟差影响在 0.02 ns 以内; 存在 2 m 误差时, 对钟差影响在 0.04 ns 以内。因此 Z 方向误差对钟差的影响较小。当 X 方向存在 0.1 m 的误差时, 对钟差影响为 0.02 ns; 当 X 方向存在 0.5 m 误差时

X 方向误差可以达到 0.08 ns, 说明相位中心 X 方向的误差对双向钟差精度影响较显著。

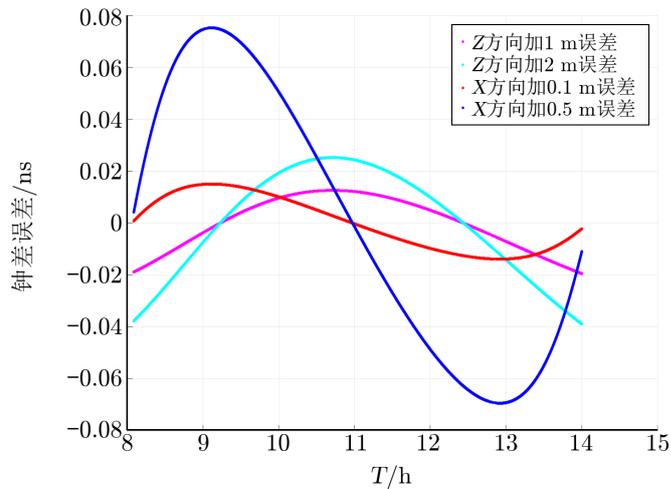


图 6 不同来源卫星相位中心对双向钟差影响

3 广播钟差参数精度分析

BDS 直接利用双向钟差序列建模生成广播钟差参数, 然后上注到卫星。我们在钟差参数的拟合中, 直接利用了短时间双向钟差点进行 a_0 和 a_1 两个钟差参数的线性拟合, 把 a_2 项设为 0。卫星位于境内时, 广播钟差参数每小时更新一次; 出境后广播钟差参数不更新; 重新入境后, 由于预报时间长, 预报误差会比较大。我们采用双向实时观测的钟差对广播钟差参数的预报精度进行评估。表 1 统计了 2016 年 1 月至 6 月广播钟差参数预报精度 (RMS, 包括境内与重新入境时段)。从表中可以看出, 除 2 号星和 11 号星外, 其余卫星的钟差预报精度均在 2 ns 以内。其中 GEO 卫星 1, 3, 4 号星的精度在 1 ns 以内。GEO2 由于星钟信号减弱造成卫星钟性能较低, 因此参数精度较低。整体来看, GEO 卫星广播钟差预报精度高于 IGSO 和 MEO 卫星。

表 1 北斗卫星钟差预报精度 (RMS) 统计表

类型	GEO 卫星					IGSO 卫星					MEO 卫星			ns
星号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	
RMS	0.52	4.42	0.54	0.66	1.98	1.67	0.96	1.33	1.20	1.73	2.34	1.47	1.48	

为了更加细致分析 GEO 卫星的广播钟差预报精度, 将 1 号星的广播钟差预报误差画出。图 7 a) 表示 GEO 1 号星钟差的预报误差。可以看出在参数更新的 1 h 内, 预报误差逐渐增大; 当参数更新时, 预报误差回到 0 附近。预报误差成“锯齿状”, 说明广播钟差参数 a_1 项存在偏差。同时发现一天中存在两处预报误差明显偏大的地方。为了进一步发现这两处预报误差较大的原因, 对该天的双向钟差数据进行二次拟合, 残差如图 7 b) 所示。钟差存在类似轨道周期的波动^[10,18], 预报误差较大的地方正是钟差斜率发生变化的拐点处。

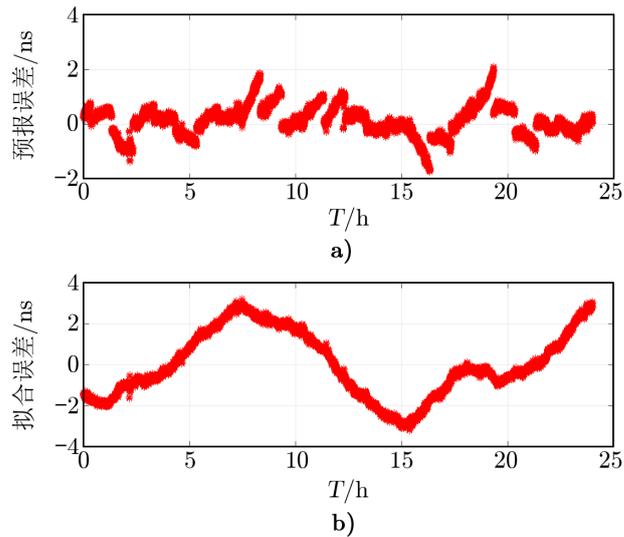
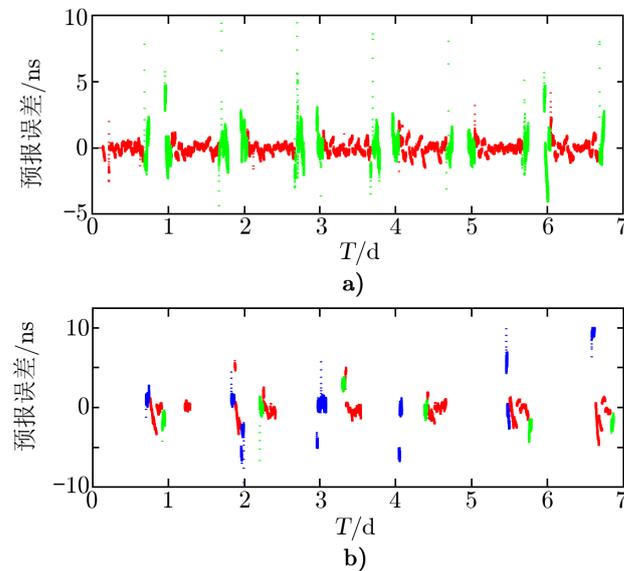


图 7 广播钟差预报误差和 GEO 单天拟合残差

北斗 IGSO/MEO 存在出入境的情况, IGSO 出境时间约 6 h, MEO 出境时间约 12 h, 因此还需采用长期数据二次拟合参数, 给出 a_0 , a_1 , a_2 。由于每颗卫星星钟性能不同, 拟合采用的数据长度也会不同。图 8 给出 IGSO 和 MEO 卫星的预报误差, 其中, 红色表示主控站观测的卫星钟差, 绿色和蓝色分别表示另外两个外场站观测的卫星钟差。卫星刚入境时, 误差明显变大。IGSO 的预报误差达到 10 ns, MEO 预报误差达到 8 ns。卫星出境时, 由于站间归算的原因, 钟差噪声会放大, 预报误差也会变大。



注: a) IGSO 卫星; b) MEO 卫星。

图 8 广播钟差预报误差

4 结 论

中国北斗卫星导航采用星地双向时频传递的方法直接测量卫星钟相对于地面主钟 BDT 的差, 并用于导航电文钟差参数的预报建模。与定轨法不同, 双向法能够得到频率为 1 Hz 高频实测钟差点, 且钟差与轨道没有相关性。本文得到的主要结论如下。

(1) 电离层延迟误差是影响北斗双向时间同步精度的主要误差源。双频相位平滑伪距法求得电离层延迟对双向钟差影响在 0.1 ns 以内, 当卫星刚入境时双向钟差精度较低, 在利用双向钟差进行广播钟差参数拟合时, 要将此段数据剔除。

(2) 电离层模型无法表达电离层变化的高频部分, 其精度无法满足双向钟差的精度要求。

(3) 北斗卫星存在动偏与零偏两种姿态模式, 不同姿态下相位中心对造成钟差误差达到 0.9 ns。不同来源的相位中心值, 对双向钟差误差较小。

(4) 实测数据分析结果表明, 星地双向卫星钟差内符合精度 (RMS) 优于 0.15 ns。

(5) 北斗广播钟差参数预报精度在 2 ns 以内, GEO 卫星广播钟差预报精度高于 IGSO 与 MEO 卫星。IGSO/MEO 卫星出入境时, 预报误差较大, 可达 10 ns。

参考文献:

- [1] 李瑞峰, 王元明. 武汉大学学报 (信息科学版), 2010, 35(1): 13
- [2] 刘利. 博士论文. 郑州: 解放军测绘学院, 2004
- [3] 刘利, 韩春好. 宇航技术, 2004, 24(1): 34
- [4] 刘利, 韩春好. 天文学进展, 2004, 22(3): 219
- [5] 刘晓刚. 博士论文. 郑州: 解放军测绘学院, 2008
- [6] 刘晓刚, 吴晓平, 张传定. 测绘学报, 2009, 38(5): 415
- [7] 刘利, 朱陵凤, 韩春好, 等. 天文学报, 2009, 50(2): 189
- [8] Zhou S S, Hu X G, Li L, et al. Sci China Phy Mech Astron, 2016, 59(10): 109511
- [9] Gong X Q, Nan X, Zhou S S, et al. China Satellite Navigation Conference(CSNC), 2013, 245: 253
- [10] 张小红, 李征航, 蔡昌盛. 武汉大学学报 (信息科学版), 2001, 26(2): 140
- [11] Cao Y Y, Hu X G, Wu B, et al. Sci China phys Mech Astron, 2012, 55: 1307
- [12] Wu X L, Zhou J H, Wang G, et al. Sci China Phys Mech Astron, 2012, 55: 2
- [13] 常志巧, 胡小工, 郭睿, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2015, 45: 79508
- [14] Zhou S S, HU X G. Sci China phys Mech Astron, 2011, 54: 1089
- [15] Zhou S S, Hu X G, Li L, et al. Sci China phys Mech Astron, 2016, 59(10): 109511
- [16] 王斌. 博士论文. 武汉: 武汉大学, 2016
- [17] Wang B, Lou Y, Liu J, et al. GPS Solut, 2016, 20 (4): 783
- [18] 唐桂芬, 许雪晴, 曹纪东, 等. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 79502

The Two Way Satellite-Ground Time Transfer of BDS and Accuracy Analysis of Broadcast Clock

GONG Xiu-qiang^{1,2}, CHEN Jun-ping¹, ZHOU Shan-shi¹, WU Bin¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The satellite clock parameters in broadcast ephemeris of Beidou navigation satellite system (BDS) is derived through the two-way satellite-ground time transfer (TWSTT) technique, where the satellite clock is directly measured using the ground antennas of monitoring stations. The mathematical model of BDS TWSTT is presented in this paper, and the random noise of observed data is analyzed, showing the *RMS* better than 0.15 ns. Modeling errors of the ionospheric delay and satellite phase centers affecting the measuring accuracy of TWSTT is analyzed. The time series of the TWSTT clocks are used to fit and predict the clock parameters. Statistical results show that accuracy of the navigation message clock parameters is up to 2 ns within 1 h, and the satellite clock error of IGSO/MEO could be 10 ns within 6 h due to the absence of TWSTT ground tracking.

Key words: BDS; TWSTT; parameters of broadcast clock