

引文格式: 巩秀强, 袁俊军, 胡小工, 等. 北斗广播电文钟差模型精度评估及改善策略[J]. 测绘学报, 2021, 50(2): 181-188. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20190411.
GONG Xiuqiang, YUAN Junjun, HU Xiaogong, et al. Accuracy evaluation and improvement strategies of BeiDou broadcast clock error model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(2): 181-188. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20190411.

北斗广播电文钟差模型精度评估及改善策略

巩秀强^{1,3}, 袁俊军^{1,2,3}, 胡小工^{1,3}, 王 彬¹, 陈俊平^{1,3}, 周善石^{1,3}

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; 3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030

Accuracy evaluation and improvement strategies of BeiDou broadcast clock error model

GONG Xiuqiang^{1,3}, YUAN Junjun^{1,2,3}, HU Xiaogong^{1,3}, WANG Bin¹, CHEN Junping^{1,3}, ZHOU Shanshi^{1,3}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: The spaceborne atomic clock is the core equipment of Beidou Satellite Navigation System (BDS). Clock error model is an important part of BDS broadcast messages, and its accuracy directly affects the service performance of BDS. In this paper, the accuracy of the BDS clock model is evaluated using the TWSTF clock error measurement as a reference. The results show that the accuracy of the BDS clock model is better than 2 ns (data age less than 12 h). Aiming at the problem of calculating the clock error parameters of BDS, combined with the clock error model solution strategy of the BDS ground segment, this paper proposes a variety of strategies to further improve the accuracy. For the short-term forecast of 1 h duration, this paper proposes a clock error forecast method of weighted linear model and mixed interval linear model. The accuracy of short-term forecast can be increased by more than 20%. For medium and long-term (> 6 h), clock error time series is analyzed by spectral method and prediction model is constructed according to the spectral analysis results. Compared with simple quadratic polynomial model, the prediction accuracy of the clock error model is improved by 13% in 6 h and 21% in 12 h on average. For IGSO/MEO satellite, this paper proposes a strategy of using TWSTF equipment delay as parameters to estimate, which improves the accuracy of clock error model by 18% after equipment switching. Finally, using the improvement strategy proposed in this paper, the clock error data from January to June 2017 is reprocessed to obtain a new broadcast clock error model time series. Using the new broadcast clock error model to locate the BDS monitoring receiver, the results show that, the direction accuracy of N, E and U is increased by 14.22%, 29.39% and 14.91% respectively, which significantly improves the service performance of BDS broadcast clock error model.

Key words: BDS; broadcast ephemeris clock error; TWSTF; accuracy assessment; spectral analysis; accuracy improvement

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 11573035; 11403077; 12003058)

摘 要: 星载原子钟是北斗卫星导航系统(BDS)的核心设备,其钟差模型是北斗广播电文的重要组成部分,模型精度直接影响 BDS 的服务性能。本文采用星地双向时频传递(TWSTF)钟差测量为参考,评估了 BDS 广播电文钟差模型精度,结果表明 BDS 广播电文钟差模型精度优于 2 ns(数据龄期小于 12 h)。

针对 BDS 广播电文钟差参数解算问题,结合 BDS 地面段的钟差模型解算策略,本文提出进一步提升精度的多种策略。对于 1 h 时长的短期预报,本文提出加权线性模型与混合区间线性模型的钟差拟合预报方法,短期预报精度可提高 20% 以上;对于预报时长大于 6 h 的中长期预报,本文采用谱分析钟差时间序列,并根据谱分析结果构造预报模型,与简单的二次多项式模型预报相比,预报 6 h 精度提高 13%,预报 12 h 平均提高了 21%;对于 IGSO/MEO 卫星,本文提出将 TWSTF 的设备时延值作为参数估算,使钟差模型在设备切换后精度提高 18%。最后,利用本文提出的改进策略对 2017 年 1 月—6 月的钟差数据重新处理,获得了新的广播电文钟差模型时间序列。利用新的广播电文钟差模型进行北斗监测接收机定位,结果表明,N、E、U 3 个方向精度分别提高 14.22%、29.39%、14.91%,显著提升了 BDS 广播电文钟差服务性能。

关键词:BDS;广播电文钟差;TWSTF;精度评估;谱分析;精度提升

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2021)02-0181-08

基金项目:国家自然科学基金(11573035;11403077;12003058)

2018 年 12 月,北斗全球系统宣布提供基本系统服务,18 颗 BDS 全球系统卫星与 16 颗 BDS 区域系统卫星将为全球提供定位授时服务。星载原子钟是北斗卫星导航系统的核心设备,其钟差性能和预报精度直接决定了 BDS 的服务水平。北斗卫星导航系统采用星地双向时频传递(two-way satellite-ground time transfer, TWSTF)直接测量卫星钟相对于北京地面站的钟差^[1-3],并用短期与长期相结合的二次多项式拟合生成广播电文钟差参数,并未使用北斗区域跟踪网定轨解算的钟差^[4-5]。通过 TWSTF 测得卫星钟相对于地面系统时间(BeiDou time, BDT)钟差,并拟合成偏差、钟速和加速度 3 个参数,通过广播电文播发给用户。

针对 BDS 卫星钟差解算和精度评估,众多学者作了一系列的相关研究。在北斗钟差解算方面,文献[5]分析了北斗区别于其他导航系统解算钟差的星地双向对比技术,并利用 BDS 双向实测数据,对电离层延迟误差、卫星相位中心误差等误差源建模分析并解算钟差,评估了北斗广播钟差精度;文献[6]针对地面站分布不均匀的现状,利用独立时间处理系统解算北斗钟差,并针对仪器偏差等因素分析了对钟差解算的影响;文献[7]综述了北斗导航系统从北斗二号区域系统到北斗三号全球系统精密定轨与时间同步处理面临的困难和挑战,阐述了北斗系统解算钟差策略,并针对北斗运控系统需求提出了定轨和钟差解算的途径和评估指标。在北斗钟差精度评估、预报方面,文献[8]利用时间序列分析法评估北斗 RDSS 单向授时原理和双向授时服务性能,发现存在周期切换、单向授时数据分层现象;文献[9]基于 GNSS 卫

星钟差产品对钟差数据预处理、钟差产品质量评定、星载原子钟性能分析及卫星钟差建模与预报进行了系统的研究;文献[10—14]采用 WUM、GBM 等 IGS/MGEX 精密钟差产品来评估 BDS 广播钟差参数的精度;文献[15—16]利用 AR 模型、灰色模型、线性模型、二次多项式模型等方法研究了关于钟差预报问题,但并未考虑到 BDS 系统实际钟差解算策略的影响。

尽管关于 BDS 广播电文钟差模型已有相关研究,但多数为钟差确定和精度评估,结合北斗运控现状,对钟差解算存在的问题,以及如何进一步提升钟差预报精度做深入研究的较少。因此,本文首先简单介绍 TWSTF 确定钟差的过程,评估广播钟差模型精度,并分析解算参数时存在的问题。针对以上问题,本文提出了相应的精度提升策略,最后通过相关试验验证本文提出的提升精度策略。

1 北斗广播钟差模型精度评估及分析

1.1 评估方法

TWSTF 首先获取下行时延观测值 P_{sg} 和上行时延观测值 P_{gs} ,观测方程^[7]分别为

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

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

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; $\rho_{sg}、I_{sg}、T_{sg}、\Delta\tau_{sg}、R_{sg}$ 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; $\epsilon_{sg}、\epsilon_{gs}$ 表示上行伪距和下行伪距的随机误差。

取上行时延观测值 P_{gs} 与下行时延观测值 P_{sg} 差值的平均值,便可得到卫星钟相对于地面时间系统北斗时的钟差,即为

$$\Delta T_{sg} = \Delta T_s - \Delta T_g \quad (3)$$

目前北斗双向时频传递的精度为 $0.2 \text{ ns}^{[1]}$ 。GEO 卫星采用北京固定站跟踪,IGSO/MEO 移动卫星采用不同站实现连续跟踪,外站观测的卫星钟差通过站间双向时频传递进行归算^[11]。国内外学者通常采用 WUM、GBM 等 IGS/MGEX 精密钟差产品来评估 BDS 广播钟差模型的精度^[12-14]。但由于广播钟差参数和精密钟差产品

所采用的参考观测值及时间参考框架不同,两者的比较不能完全反映广播钟差参数的预报精度^[12]。在北斗运控端,广播钟差参数利用 TWSTF 钟差拟合而成,与 TWSTF 钟差比较,更能全面反映广播钟差参数的精度及其存在的问题。因此,本文将 TWSTF 钟差视为参考值,以此评估北斗广播电文钟差模型精度。

1.2 精度评估和问题分析

本文采用了 2017 年 1 月—6 月的北斗广播电文,从中提取钟差参数后与 TWSTF 钟差点做比较,统计结果见表 1。由表 1 分析可知,除 2 号星与 11 号星外,其余 BDS 卫星钟差与 TWSTF 值对比结果 RMS 均在 2 ns 以内。GEO 卫星钟差模型精度高于 IGSO 与 MEO 卫星,GEO-1、GEO-3、GEO-4 号星的精度在 1 ns 以内,GEO-2 由于临近设计寿命,星钟信号减弱导致卫星钟性能降低。

表 1 北斗卫星钟差预报精度统计

Tab.1 The predicting accuracy of BDS broadcast clock parameters

卫星	GEO 卫星(铷钟)					IGSO 卫星(铷钟)					MEO 卫星(铷钟)			ns
	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	

为进一步分析 BDS 广播电文钟差解算存在的问题,本文选择 2017 年 6 月 1 日至 2017 年 6 月 3 日 GEO-4、IGSO-1、MEO-1 作为范例,得到 3 颗卫星 TWSTF 钟差点与广播钟差参数对比结果,如图 1 所示。由图 1 分析可知,目前广播钟差参数解算中存在以下问题:

(1) 在参数更新的 1 h 内,预报误差逐渐增大,当参数更新时,误差回到 0 附近,呈“锯齿状”,说明广播钟差参数速率项 a_1 存在偏差。

(2) IGSO、MEO 卫星刚入境时,由于广播钟差参数未更新导致卫星钟差预报时间长,使得卫星钟差预报误差明显变大,IGSO-1 卫星可达 5 ns,MEO-1 卫星可达 8 ns。

(3) 当跟踪站发生变化时,卫星钟差会出现跳变,如图 1(b)的小窗所示。由于不同测站天线设备时延标校存在误差,混合使用不同跟踪天线设备观测的钟差数据,会影响广播钟差参数的拟合与预报精度。

当卫星位于境内时,可获得连续的双向钟差,使用双向钟差生成广播钟差参数,短期预报 1 h 播发给用户使用。受北斗区域跟踪网的约束,

IGSO 与 MEO 卫星存在出入境问题。IGSO 卫星的出境时长为 6 h,MEO 的出境时长为 12 h,IGSO/MEO 其广播钟差参数需要进行 6~12 h 的中长期预报。本文将针对以上问题,提出具体解决策略提高广播钟差模型精度。

2 BDS 广播电文钟差模型预报精度提升

2.1 精度提升策略

2.1.1 短期预报

在境内连续跟踪弧段,BDS 采用短弧钟差线性拟合广播钟差参数。在进行线性拟合时,通常认为各个钟差观测量精度相同,误差方程为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{X} - \mathbf{L}, \quad \mathbf{P} = \mathbf{I} \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_n]^T, \quad b_i = [1 \quad t_i - t_0 \quad (t_i - t_0)^2], \quad i = 1, 2, \dots, n$$

(5)

式中, \mathbf{X} 为线性拟合参数, $\mathbf{X} = [a_0 \quad a_1]^T$; t_0 为参考时刻; t_i 为钟差观测时刻;权阵 \mathbf{P} 为单位矩阵 \mathbf{I} 。由于卫星钟不仅受白噪声的影响,还受到其他有色噪声的影响^[15],在利用卫星钟差数据估计 $a_0、a_1$ 参数时,等权策略($\mathbf{P} = \mathbf{I}$)可能不是最优

择,本文尝试采用加权(距离反比加权)策略拟合 a_0 、 a_1 参数,此时权阵 P 不再为单位矩阵,对角线元素与时间有关,为 $1/(t_i - t_0)$ 。另外由于 a_0 、 a_1 参数的估值精度与所采用的钟差数据时间跨度有关^[16-17],因此 a_0 、 a_1 还可通过不同时间跨度的数据拟合得到,即将混合区间拟合预报策略用于广播钟差预报^[18]。综上,本文在针对短时预报时,将采用线性模型、不等权线性模型、混合区间线性模型分别对短时钟差进行预报,并分析比较预报精度。

2.1.2 中长期预报

受北斗区域跟踪网的约束,IGSO 与 MEO 卫星存在出入境问题,其广播钟差参数需要进行 6~12 h 的预报。BDS 采用二次多项式,利用 24 h 的钟差数据拟合 a_0 、 a_1 、 a_2 参数。本文采用 2017 年 6 月 1 日至 7 日 IGSO-1 卫星钟差数据,分析了二次多项式拟合精度,其残差序列如图 2 中红线所示。由图 2 可以看出,卫星钟差拟合残差具有明显的以天为单位的周期性,且振幅能够达到 3 ns。为了更清楚地分析此周期项^[16],本文将卫星轨道周期和二次多项式拟合残差一同分析,卫星轨道周期可以用轨道 X 方向速率变化周期来表示,如图 2 绿线所示,可以看到两者具有很强的耦合性。

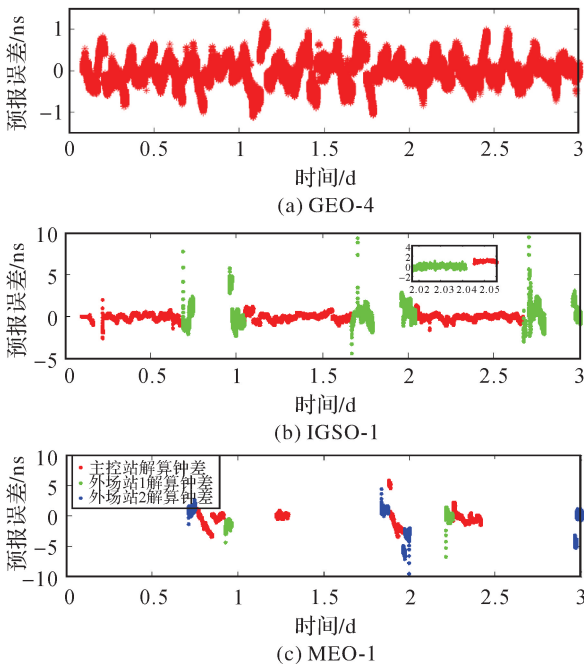


图 1 GEO/IGSO/MEO 双向钟差与广播钟差之差
Fig.1 GEO/IGSO/MEO difference between two-way clock and broadcast clock offset

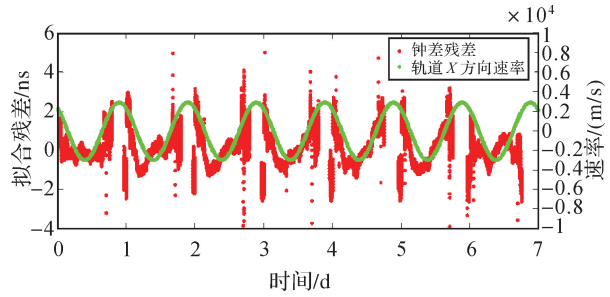


图 2 IGSO-1 号星钟单天拟合残差与轨道周期
Fig.2 IGSO-1 satellite single-day fitting residuals and orbital period

基于上述分析,本文采用谱分析模型对 IGSO、MEO 卫星钟差进行中长期预报,预报模型为

$$Y_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \sum_{k=1}^m (A_k \cos(\omega_k t) + B_k \sin(\omega_k t)) + \epsilon \tag{6}$$

$$Y_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + A_1 \cos(\omega_1 t) + B_1 \sin(\omega_1 t) + \epsilon \tag{7}$$

式中, m 可根据实际需要选取,本文只考虑一阶周期项,因此 $m = 1$ 。由于卫星钟差周期与卫星轨道周期近似一致^[17-18],因此本文用轨道周期近似代替 ω_k 。此时,式(6)可化简为式(7)。因此可采用线性回归方法求取 a_0 、 a_1 、 a_2 以及 A_1 、 B_1 等参数,求取拟合参数后,可对卫星钟差进行预报。由于广播星历只能播发 a_0 、 a_1 、 a_2 3 个参数,因此本文将预报后的钟差再进行二次多项式拟合,并将拟合的 a_0 、 a_1 、 a_2 参数发播给用户。

2.1.3 IGSO/MEO 切换测站

由于地面站时延标校存在误差,IGSO/MEO 在切换跟踪站时将外站的未标定时延值作为参数,与钟差参数一起拟合,可提升广播钟差模型精度。此时主站卫星钟差模型为

$$T_i = a_0 + a_1 t \tag{8}$$

外站的卫星钟差模型为

$$T_i = a'_0 + a_1 t \tag{9}$$

其中

$$a'_0 = a_0 + C \tag{10}$$

式中, T_i 为卫星钟差观测值; a'_0 为外站钟差模型常数项; C 为设备时延值。当拟合弧段中存在由不同跟踪天线所获取的卫星钟差数据时,需解算设备时延值 C 。

2.2 试验数据分析

2.2.1 短期预报分析

以 GEO-4 号星为例,采用 2017 年 6 月 1 日至 2017 年 6 月 7 日的钟差数据,分别采用线性模型、不等权线性模型和混合区间线性模型进行钟差短期预报分析,结果如图 3 所示。进行预报钟差时,采用滑动拟合预报策略,拟合时长为 2 h,滑动间隔 1 h,预报 1 h,共生成 168 组预报结果,如图 3 中灰线所示。此外,统计各个历元的预报误差 RMS,如图 3 中红线所示。其中,混合区间模型利用先前 10 min 钟差数据估计 a_0 ,利用 12 h 钟差数据估计 a_1 。从图 3 中可以看出,不等权预报与混合区间模型的预报精度明显优于一般的线性模型,这两种模型预报 1 h 精度可分别提升 20% 和 25%。此外,从图 3(b)中可以看出不等权线性模型 a_0 项预报误差明显降低,具体表现为图 3(b)中灰色区域部分开口端变窄,预报 0.5 h 内 a_1 项预报误差也明显改善,但是约 0.5 h 以后,预报误差开始突然增大,具体表现为图中灰色区域边界线斜率的突然变化。与图 3(a)及图 3(b)相比,图 3(c)中混合区间线性模型的 a_0 、 a_1 项预报误差均有明显的减小。因此,在进行 BDS 广播电文钟差短时预报时,利用混合区间模型预报效果更为稳定,精度更高。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 3 幅图下部有条离群钟差序列,原因可能是钟差突变引起的预报误差增大。

2.2.2 中长期预报分析

采用 2017 年 6 月 1 日至 2017 年 6 月 10 日的双向钟差数据,分别使用二次多项式模型与谱分析模型,进行 6 h 以及 12 h 的预报,并统计其预报结果,其精度见表 2。从预报算法来看,无论是预报 6 h 还是 12 h,谱分析预报算法精度要高于二次多项式模型,因此本文也更推荐使用谱分析预报算法进行中长期预报;从预报时长来看,不论哪种卫星或者预报算法,6 h 预报精度都高于 12 h。这主要是由于预报时长增大,预报误差也逐步增大,进而影响预报精度。

2.2.3 切换测站时预报分析

采用 2017 年 6 月 1 至 2017 年 6 月 30 日的 IGSO/MEO 钟差数据,提取同时包含主站与外站的短弧钟差数据段,共 860 组,进行拟合预报试验。图 4(a)为改进前后的卫星钟差拟合 1 h RMS 统计结果,图 4(b)为改进前后的卫星钟差预报 1 h RMS 统计结果。通过分析,进行设备零值解算后,拟合精度与预报精度分别由 0.13 ns 和 0.43 ns,提升至 0.11 ns 和 0.35 ns,分别提升 15.4% 与 18.6%。这说明地面站时延标校误差会明显影响结算结果,本文提出的将 IGSO/MEO 在切换跟踪站时将外站的未标定时延值作为参数与钟差参数一起拟合的算法,可有效提升广播钟差模型精度。

表 2 二次多项式与谱分析模型预报对比

Tab.2 The comparison of forecast between quadratic polynomial and spectral analysis model

ns

星号	6 h 预报误差		提升效果 /(%)	12 h 预报误差		提升效果 /(%)
	二次多项式	谱分析		二次多项式	谱分析	
IGSO-1	5.121	4.422	13.65	6.671	5.232	21.57
IGSO-2	4.763	4.038	15.22	7.952	6.618	16.78
IGSO-3	5.121	4.422	13.65	6.531	5.632	13.77
IGSO-4	3.763	3.238	13.95	5.693	4.238	25.56
IGSO-5	5.763	5.038	12.58	5.834	5.138	11.93
MEO-1	4.992	4.231	15.24	6.996	4.421	36.81
MEO-2	6.054	5.321	12.11	8.175	6.611	19.13
MEO-4	6.076	5.321	12.43	7.079	5.941	16.08
MEAN	5.207	4.504	13.60	6.866	5.479	20.20

2.3 定位结果分析

为了验证本文提出的 BDS 广播电文钟差参数预报多种策略对实际定位的效果,采用不同时间、不同测站数据进行单点定位试验验证本文采用 2017 年 1 月至 2017 年 6 月的钟差数据重新处

理,获得了新的广播电文钟差模型时间序列。同时选用 7 个中国周边的 MGEX 站数据^[19-20],定位时一组采用广播星历与钟差参数,另一组采用广播星历与提升后的卫星钟差参数。观测值采用 B1B2 无电离层组合,对流层延迟采用模型改正

SAAS,数据采样率 30 s,卫星截止高度角 10°。同时,将 IGS 给出的精密坐标作为真实坐标,比较改正前后的定位结果差异。图 5 给出了 gmsd 测站在 2017 年 7 月 1 日的定位结果,改正前 gmsd 测站定位结果在 U、N、E 3 方向的 RMS 值分别是 4.32、1.36、2.37 m,改正后则分别是 3.74、1.07、1.23 m,提升精度显著。

此外,表 3 则给出了各个站 6 个月的动态定位 RMS 统计比较。从表 3 定位结果可以看出,北斗广播钟差提升对定位精度改善明显,在南北(N)、东西(E)、高程(U)方向定位提高程度分别为 14.22%、29.39%和 14.91%,尤其是东西方向改善明显。

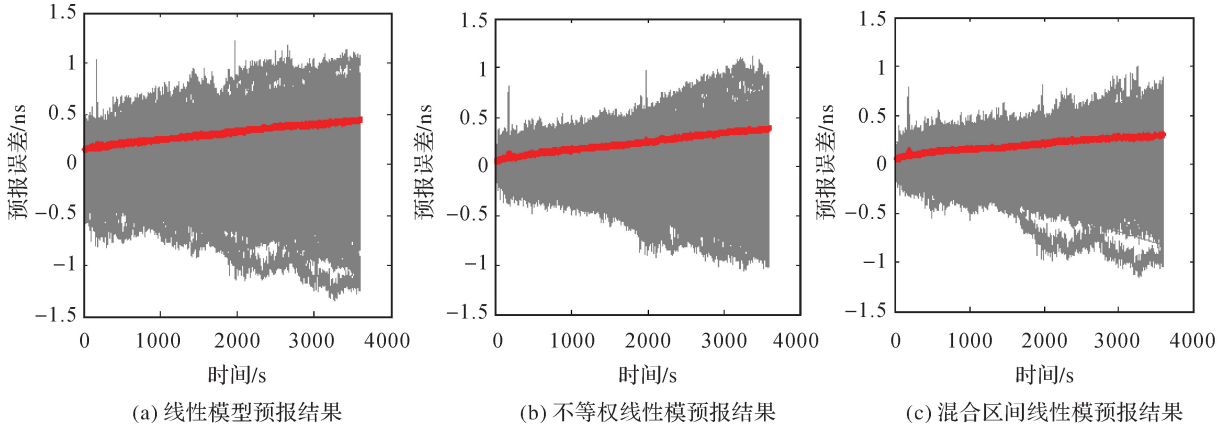


图 3 线性模型、不等权线性模型和混合区间线性模型预报结果

Fig.3 Linear model,unequal linear model and mixed interval linear model forecast results

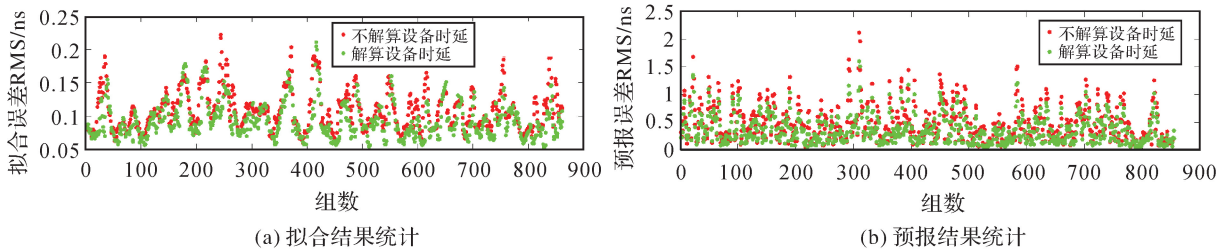


图 4 切换测站时预报结果分析

Fig.4 Forecast analysis when switching stations

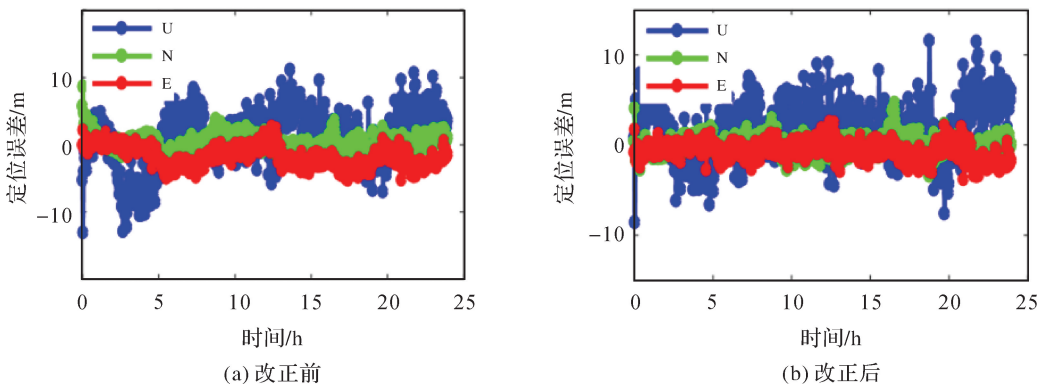


图 5 广播钟差改正前后定位精度比较

Fig.5 The comparison of positioning accuracy before and after broadcast clock error correction

表 3 各站改进广播钟差参数前后定位结果比较

Tab.3 The comparison of the positioning results before and after broadcast clock error

测站	改进前			改进后			提升幅度		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
DJIG(Djibouti)	3.32	8.41	9.61	2.64	5.62	6.41	20.48	33.17	33.30
GMSD(Japan)	1.73	2.43	4.2	1.25	1.49	3.68	27.75	38.68	12.38
JFNG(China)	1.75	2.36	4.11	1.21	1.33	3.36	30.86	43.64	18.25
KARR(Australia)	2.11	2.43	3.26	2.02	1.81	3.21	4.27	25.51	1.53
NNOR(Australia)	2.14	2.51	3.51	2.11	1.55	3.29	1.40	38.25	6.27
POHN(Micronesia)	2.68	5.43	6.16	2.43	4.81	6.08	9.33	11.42	1.30
XMIS(Australia)	1.74	2.39	3.42	1.61	1.72	3.13	7.47	28.03	8.48
mean	2.21	3.71	4.90	1.90	2.62	4.17	14.22	29.39	14.91

3 结 论

星载原子钟的钟差参数预报精度直接影响导航卫星系统的服务性能^[20-22],我国 BDS 导航系统采用 TWSTF 方法直接测量卫星钟相对于地面主钟(BDT)的偏差值,并用于导航电文钟差参数的预报建模。不同于定轨算法,TWSTF 方法能够得到频率为 1 Hz 高频实测钟差点,且钟差与轨道没有耦合。本文利用北斗二号 TWSTF 卫星钟差数据进行了钟差解算、精度评估、问题分析、提升算法设计及试验验证等一系列工作,得出以下结论:

(1) BDS 广播电文钟差模型精度优于 2 ns, GEO 卫星广播钟差预报精度高于 IGSO 与 MEO 卫星。特别地,在 IGSO/MEO 卫星出入境时,预报误差较大,可达 10 ns。

(2) 在短期预报时,使用不等权线性模型与混合区间线性模型的精度优于一般的线性模型,提升幅度分别可达 20% 和 25%,混合区间线性模型预报精度最高,也更为稳定。

(3) 在中长期预报时,北斗钟差 24 h 拟合残差具有明显的周期性,采用谱分析钟差预报模型,与简单的二次多项式模型相比,6 h 预报精度可提高 15%,12 h 预报精度提高 20%。

(4) 对于 IGSO/MEO 等移动卫星,在跟踪站切换时,将外站设备时延值作为参数解算,此时,广播钟差的拟合及预报精度分别提高 20%。

(5) 综合采用本文提出的钟差参数提升方法,采用定位结果分析,在南北(N)、东西(E)、高程(U)方向定位提高程度分别为 14.22%、29.39%和 14.91%,显著提升了 BDS 广播电文钟差的服务性能。

参考文献:

- [1] ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, LIU Li, et al. Applications of two-way satellite time and frequency transfer in the BeiDou navigation satellite system[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, 59(10): 109511.
- [2] 刘利,韩春好. 卫星双向时间比对及其误差分析[J]. 天文学进展, 2004, 22(3): 219-226.
LIU Li, HAN Chunhao. Two way satellite time transfer and its error analysis[J]. Progress in Astronomy, 2004, 22(3): 219-226.
- [3] 刘晓刚,张丽萍,陈军,等. 星地无线电双向时间比对法误差源分析[J]. 测绘科学, 2011, 36(4): 24-26, 91.
LIU Xiaogang, ZHANG Liping, CHEN Jun, et al. Error sources analysis of the method of two-way satellite-ground time comparison by wireless radio [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(4): 24-26, 91.
- [4] ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, WU Bin. Orbit determination and prediction accuracy analysis for a regional tracking network[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 53(6): 1130-1138.
- [5] 巩秀强,陈俊平,周善石,等. 北斗星地双向时频传递与广播钟差精度分析[J]. 天文学进展, 2019, 37(2): 178-186.
GONG Xiuqiang, CHEN Junping, ZHOU Shanshi, et al. The two way satellite-ground time transfer of BDS and accuracy analysis of broadcast clock[J]. Progress in Astronomy, 2019, 37(2): 178-186.
- [6] 周善石,胡小工,刘利,等. 导航卫星精密定轨与时间同步技术进展[J]. 天文学报, 2019, 60(4): 59-68.
ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, LIU Li, et al. Status of satellite orbit determination and time synchronization technology for global navigation satellites system[J]. Acta Astronomica Sinica, 2019, 60(4): 59-68.
- [7] ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, WU Bin, et al. Orbit determination and time synchronization for a GEO/IGSO satellite navigation constellation with regional tracking

- network [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(6): 1089-1097.
- [8] 王冬霞, 郭睿, 辛洁, 等. 北斗 RDSS 授时服务性能评估 [J]. *测绘科学*, 2019, 44(8): 132-141, 148.
WANG Dongxia, GUO Rui, XIN Jie, et al. Performance evaluation of RDSS timing service for BeiDou system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(8): 132-141, 148.
- [9] 王宇谱. GNSS 星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究 [J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 1026. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170467.
WANG Yupu. Research on modeling and prediction of the satellite clock bias and performance evaluation of GNSS satellite clocks [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 1026. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170467.
- [10] 王冬霞, 郭睿, 谢金石, 等. 北斗新一代导航卫星的组合钟差预报模型及精度评估 [J]. *测绘学报*, 2018, 47(S0): 61-70. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180283.
WANG Dongxia, GUO Rui, XIE Jinshi, et al. Combined clock error prediction model and accuracy evaluation of BeiDou new generation navigation satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(S0): 61-70. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180283.
- [11] LIU Li, TANG Guifen, HAN Chunhao, et al. The method and experiment analysis of two-way common-view satellite time transfer for compass system [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(8): 89502.
- [12] WANG Bin, LOU Yidong, LIU Jingnan, et al. Analysis of BDS satellite clocks in orbit [J]. *GPS Solution*, 2016, 20(4): 783-794.
- [13] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333.
- [14] WANG Ahao, CHEN Junping, ZHANG Yize, et al. Performance evaluation of the CNAV broadcast ephemeris [J]. *The Journal of Navigation*, 2019, 72(5): 1331-1344.
- [15] TANG Guifen, XU Xueqing, CAO Jidong, et al. Precision analysis for Compass satellite clock prediction based on a universal clock offset model [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(7): 079502.
- [16] 郑作亚, 党亚民, 卢秀山, 等. 附有周期项的预报模型及其在 GPS 卫星钟差预报中的应用研究 [J]. *天文学报*, 2010, 51(1): 95-102.
- ZHENG Zuoya, DANG Yamin, LU Xiushan, et al. Prediction model with periodic item and its application to the prediction of GPS satellite clock bias [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2010, 51(1): 95-102.
- [17] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.
GUO Hairong. Study on the analysis theories and algorithms of the time and frequency characterization for atomic clocks of navigation satellites [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006.
- [18] 郑作亚, 卢秀山. 几种 GPS 卫星钟差预报方法比较及精度分析 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 27(4): 6-11, 15.
ZHENG Zuoya, LU Xiushan. Comparison and precision analysis of several GPS satellite clock bias prediction methods [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2008, 27(4): 6-11, 15.
- [19] YANG Yuanxi, LI Jinlong, WANG Aibing, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of BeiDou regional navigation satellite system [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 144-152.
- [20] LOU Yidong, LIU Yang, SHI Chuang, et al. Precise orbit determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX network [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4692.
- [21] ZENG Tian, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. Results and Analyses of BDS Precise Orbit Determination with the Enhancement of Fengyun-3C [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(3): 68-78.
- [22] YANG Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(3): 1-7. DOI: 10.11947/j.JGGS.2019.0301.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2019-09-27

修回日期: 2020-08-18

第一作者简介: 巩秀强(1987—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为高精度 GNSS 数据处理。

First author: GONG Xiuqiang (1987—), male, PhD, assistant researcher, majors in precise GNSS data process.

E-mail: xqgong@shao.ac.cn