

引文格式:陈倩,陈俊平,吴杉,等.基于预报钟差的轨道快速恢复[J].测绘学报,2020,49(1):24-33. DOI:10.11947/j. AGCS. 2020.20190078.

CHEN Qian, CHEN Junping, WU Shan, et al. Post-maneuver orbit determination based on the predicted clocks[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(1): 24-33. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20190078.

## 基于预报钟差的轨道快速恢复

陈倩<sup>1,2</sup>, 陈俊平<sup>1,2</sup>, 吴杉<sup>3</sup>, 张益泽<sup>1,4</sup>, 于超<sup>1,2</sup>

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. 北京卫星导航中心, 北京 100094; 4. 东京海洋大学, 日本 东京

## Post-maneuver orbit determination based on the predicted clocks

CHEN Qian<sup>1,2</sup>, CHEN Junping<sup>1,2</sup>, WU Shan<sup>3</sup>, ZHANG Yize<sup>1,4</sup>, YU Chao<sup>1,2</sup>

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China; 4. Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo, Japan

**Abstract:** The BDS system is designed as a GEO/IGSO/MEO mixed constellation. Satellite maintaining operation is performed every 7 to 10 days for GEO/IGSO satellites. With the maneuver satellite's status being unhealthy in the post-maneuver period, which lasts 5~6 hours, the BDS system usability is affected. In the long unhealthy periods, observation data together with satellite/station clocks are accumulated until the processed orbits meet precision requirement. To shorten the satellite's unhealthy time during post-maneuver, we propose an orbit determination method making use of the predicted satellite/station clocks. With the clocks being modeled with high precision, data of longer observation arc could be used, thus improve the orbit accuracy. In the modeling of satellite and station clocks, the reference inconsistency between the two-way satellite time frequency transfer(TWSTFT) and dynamic precise orbit determination (POD) techniques are considered. Three satellite maneuver events in November 2018 are analyzed. Results show that the satellite unavailability time could be shortened by at least 1 hour. And it improves the accuracy of orbit prediction with maximum of 84.82% for the first group of orbits in post-maneuver. For the POD from 3h to 8h after maneuver, the mean improvement of orbit prediction accuracy is of 26.06%(C01), 31.58%(C04) and 9.95%(C03) by using the proposed method.

**Key words:** BDS; two-way satellite time frequency transfer; satellite clock error; station clock error; precise orbit determination; rapid orbit recovery; satellite availability

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (No. 11673050); The National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0504300)

**摘要:**我国北斗卫星导航系统由GEO/IGSO/MEO混合星座构成,基本每7~10 d就会有一颗GEO卫星或IGSO卫星进行轨控操作。从卫星轨控开始,卫星存在5~6 h的不健康时期。造成机动卫星长期不健康的关键因素之一在于卫星和测站钟差数据的积累周期较长。本文提出了一种基于预报钟差的轨道快速恢复算法,通过结合星钟和站钟预报压缩机动卫星定轨观测数据积累的时间,从而缩短卫星恢复所需时间。6组机动试验结果表明:采用预报钟差策略在快速恢复初期的前几个小时对轨道预报的贡献尤为显著,对第1组定轨URE预报贡献最大可达84.82%。从3~8 h期间6组定轨平均情况来看,采用优化策略的预报URE, C01平均降低了26.06%, C04平均降低了31.58%, C03降低了9.95%。经测试该方法至少能将卫星不可用时间压缩1 h,对北斗系统建设具有重要工程应用价值。

**关键词:** BDS; 卫星双向时间频率传递; 卫星钟差; 测站钟差; 单星定轨; 轨道快速恢复; 卫星可用性

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2020)01-0024-10

基金项目:国家自然科学基金(11673050);国家重点研发计划(2018YFB0504300)

全球卫星导航系统是极其重要的时空信息基础设施,在国民生活中发挥着日益显著的作用。卫星的精密定轨和预报,是用户定位测速的重要基础,也是各大卫星导航系统研究的重要内容之一<sup>[1-2]</sup>。多星长弧定轨和长弧预报的模式(通常 3~7 d)由于其技术理论成熟,得到广泛应用,是常规精密定轨和预报的常用手段<sup>[3]</sup>。卫星在轨运行时受各种摄动力的影响,为维持星座构型需进行一定的轨道机动控制。轨道机动会增加额外的摄动力,改变了轨道原有的动力学特性,使得机动后定轨性能降低,制约了卫星的可用性和系统的服务性能<sup>[4-6]</sup>。

针对地球静止轨道(geosynchronous orbit, GEO)卫星机动,目前主要有包含机动期的长弧定轨和机动后快速轨道恢复两种处理模式。在卫星机动期间定轨,采用机动力建模条件下的 GEO 卫星变轨期间固定推力参数的定轨方法,需要知道准确的机动起止时间和推力信息,对遥测遥控数据的精度要求较高<sup>[7-9]</sup>,其效果优于目前几何法定轨。采用机动力建模时解算推力参数的定轨方法,仅需知道机动的起始时间,但是要求轨控后有较多数据约束才能达到较好的效果<sup>[8-9]</sup>,其效果优于固定推力参数的方法,对无线电定位业务(radio determination satellite service, RDSS)服务具有一定参考意义。文献[10]提出基于随机姿态控制模型的 GEO 卫星机动定轨,将卫星机动时段划分成若干小段,姿态力每个分量在每个小时段内为常量,对相邻时段间姿态力分量变化采用一阶马尔可夫过程模拟。在卫星机动后轨道恢复期间定轨,文献[11]使用高精度高频的转发式测轨数据,将机动前几天精密定轨估算的公共系统偏差和各站偏差作为已知量来减少定轨参数,使用统计定轨方法对鑫诺一号卫星进行轨道预报测试,可实现短弧星历快速恢复。文献[12]提出了采用时间同步约束的快速动力学定轨方法,可实现机动后 4 h 的轨道快速恢复。

星钟和站钟数据的重新积累时间是影响快速轨道恢复的关键因素之一。通常从轨控开始到第 1 组快速恢复轨道播发会有 5~6 h<sup>[13]</sup>,这种短弧定轨要求对钟差进行改正而非解算,即采用时间同步和多星定轨站钟约束的快速动力学定轨方法。目前,两种钟差均使用离散钟差点而非拟合

的参数。

本文提出基于预报钟差的快速轨道恢复策略。图 1 是机动后恢复期间数据积累关系示意图, $t_0$  是轨控结束时刻,也是重新积累定轨数据时刻; $t$  是机动后第一次定轨调度时刻, $t_a$  和  $t_b$  分别为星钟和站钟积累的末端时刻。显然,星钟和站钟信息都有缺失。这是因为,星钟和站钟都不实时计算钟差,其时延通常为 1 h。因此,若对时间同步的卫星钟差和多星定轨的测站钟差分别建模,利用预报钟差对观测数据进行钟差改正,则能够缩短机动卫星不可用时间。

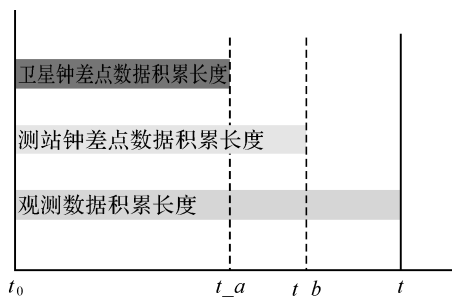


图 1 卫星机动后快速恢复数据积累关系图

Fig.1 Data accumulation diagram for the rapid orbit recovery after satellite maneuver

## 1 轨道快速恢复与钟差处理模型

常规动力学定轨采用较长弧段的观测数据进行多星定轨解算,但是当卫星发生机动等状况,会打破数据连续性。为使机动卫星尽快提供服务,通常采用固定卫星钟差和测站钟差的短弧单星定轨方法恢复卫星轨道<sup>[14]</sup>。

### 1.1 动力学模型

北斗系统采用了单星定轨方法进行卫星轨道的快速恢复。在 J2000.0 惯性系中,卫星在绕地运行过程中会受到多种作用力的影响。单星定轨动力学模型如下

$$F = f_{TB} + f_{NB} + f_{NS} + f_{TD} + f_{RL} + f_{SR} + f_{AL} \quad (1)$$

式中, $f_{TB}$ 为地球对卫星的中心引力; $f_{NB}$ 为  $N$  体摄动; $f_{NS}$ 为地球非球形引力摄动; $f_{TD}$ 为固体潮和海潮摄动; $f_{RL}$ 为相对论摄动; $f_{SR}$ 为太阳光压; $f_{AL}$ 为地球反照辐射压摄动。定轨各力学模型设置见表 1。

表 1 模型说明

Tab.1 Dynamic models of precise orbit determination

参数	采用模型
地球引力场中心引力	10×10 阶 JGM-3 模型
N 体摄动	日月引力摄动
行星历表	JPL DE403 参数
章动模型	IAU80 模型
固体潮	IERS96 模型
太阳光压和地球反照辐射压	Box-Wing 模型

## 1.2 观测模型

利用伪距观测量进行轨道快速恢复轨道确定,伪距观测方程如下<sup>[15-16]</sup>

$$\rho_j^i = \sqrt{(x^i - x_j)^2 + (y^i - y_j)^2 + (z^i - z_j)^2} + c \cdot dt_j - c \cdot dt^i + \delta_{\text{trop}} + \delta_{\text{ion}} + \delta_{\text{rel}} + \epsilon \quad (2)$$

式中, $\rho_j^i$ 为伪距观测量; $(x^i, y^i, z^i)$ 为卫星位置; $(x_j, y_j, z_j)$ 为测站位置; $dt_j$ 为测站钟差; $dt^i$ 为卫星钟差; $\delta_{\text{trop}}$ 为对流层延迟改正; $\delta_{\text{ion}}$ 为电离层延迟改正; $\delta_{\text{rel}}$ 为相对论效应; $\epsilon$ 为多路径效应及其他各种噪声。

其中,测站位置精确已知,对流层和电离层误差可以通过模型进行改正。利用载波相位平滑伪距可以在不解算模糊度参数的情况下获得较高精度的伪距观测量。对于钟差参数的处理,卫星钟差通过地面运控的时间同步进行计算;而测站钟差则采用上一小时多星定轨获取的精密测站钟差。

## 2 基于钟差预报的轨道快速恢复

以上北斗系统快速恢复处理中,测站钟差和卫星钟差均采用钟差点进行改正。测站钟差使用多星定轨解算的钟差,其精度优于 0.5 ns<sup>[17]</sup>。对于卫星钟差的处理,采用的是无线电双向时间同步获得的星地时间同步卫星钟差点,其精度优于 0.4 ns<sup>[18]</sup>。采用以上站钟和星钟进行修正,满足卫星机动后轨道恢复期间定轨的精度要求。

北斗系统时间同步卫星钟差以及多星定轨测站钟差的计算是基于定时调度的策略。快速恢复期间的单星定轨,最新一小时的钟差点缺失而无法进行钟差修正。为充分利用轨道恢复期间的可用观测数据,确保定轨的成功率和精度,可基于历史的钟差点数据对钟差进行建模并预报,对钟差进行实时改正。

北斗系统的钟差基准基于双向时间同步实现。星地双向时间同步能够获取所有可视卫星的

钟差,其短期预报可采用二次多项式模型

$$dt^i = a_0 + a_1(T_i - T_0) + a_2(T_i - T_0)^2 \quad (3)$$

式中, $dt^i$ 为预报卫星钟差; $T_0$ 为参考时刻; $T_i$ 为历元时刻; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 分别为钟差、钟速和钟漂。多项式系数 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 依据最小二乘法求取模型参数<sup>[19-20]</sup>。对以上参数的精确估计,采用混合区间拟合预报策略<sup>[21]</sup>。

对于测站钟差的改正,由于站间时间同步只能在时间同步站以及主控站之间进行,因此快速恢复期间单星定轨利用了多星定轨给出的测站钟差作为输入。

以上快速恢复期间定轨钟差的使用策略上,既有时间同步给的卫星钟差又有精密定轨给出的测站钟差。不同技术体制融合时需要考虑其差异。图 2 为北斗测站两种体制钟差点差值的时间序列,可以看到两者存在显著的系统性及以天为单位的周期性差异。

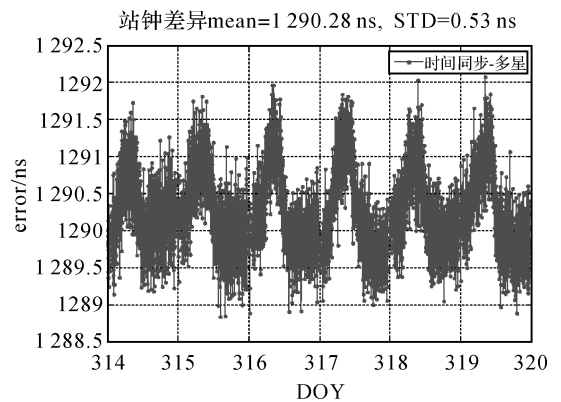


图 2 时间同步、动力学定轨两种体制钟差点的差异

Fig.2 Difference of the station clock between TWSTFT and POD techniques

图 2 中的系统偏差由时间同步设备时延造成,为稳定常数;地面运控会定期进行校正,确保精度满足要求。扣除该系统偏差后进行频谱分析<sup>[22-23]</sup>,如图 3 所示。发现存在两个与卫星轨道重复周期相近的明显周期,依次为 24 h 和 12 h,振幅分别为 0.49 ns 和 0.22 ns。

时间同步获取的测站钟差不受卫星轨道的影响,不存在周期特性<sup>[24-25]</sup>。因此,以上时间序列周期特性来源于多星定轨解算的站钟。其产生的原因在于 GEO/IGSO 定轨中卫星轨道与钟差参数的强相关性<sup>[26]</sup>。

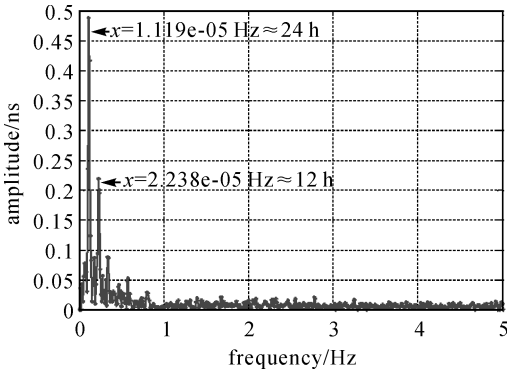


图 3 测站钟差频谱分析结果

Fig.3 The spectral analysis of station clocks

为实现测站钟差预报与卫星钟差预报基准的统一,对以上差异序列建模如下

$$\Delta t_j = a_j + \sum_{l=1}^2 A_l \cdot \sin(2\pi\omega_l \cdot \Delta T + \phi_l) \tag{4}$$

式中,  $\Delta t_j$  为两种体制测站钟差的差值,  $a_j$  为常数项系统差;  $A_l$ 、 $\omega_l$ 、 $\phi_l$  分别为对应单天及半天的振幅、主频项和初相位;  $\Delta T$  为每个历元距离初相位时刻的时间差。对于每个测站,采用上一组精密定轨以及时间同步得出的 3 d 钟差点差值序列,利用最小二乘可解算模型参数  $\phi_l$ 、 $A_l$  和  $a_j$ , 并进行预报。

考虑以上钟差基准及其周期性差异,快速恢复期间时间同步站钟差预报模型如下

$$dt_j = \text{QF}(T_i, T_0) + a_j + \sum_{l=1}^2 A_l \cdot \sin(2\pi\omega_l \cdot (\Delta T + \phi_l)) \tag{5}$$

式中,  $\text{QF}(T_i, T_0)$  为式(3)给出的二次项预报模型。

对于非时间同步并址站,也可以采用式(5)进行站钟预报。由于不存在两种体制钟差,该类测站模型中的  $a_j$  为 0,且周期项为多星定轨测站钟差本身的周期性。

### 3 轨道快速恢复策略测试

#### 3.1 定轨策略

由图 1 快速恢复数据积累关系图可知:在  $t$  时刻启动定轨时,星钟数据积累只到  $t_a$  时刻,站钟数据积累到  $t_b$  时刻。文献[27]对星钟进行了预报,将定轨数据补充至  $t_b$  时刻。进一步对站钟进行预报,则能将定轨数据补充至  $t$  时刻。基于以上思路,单星定轨的星钟和站钟数据均包含

两部分:实时的钟差点数据及预报的钟差值。为检验钟差预报对快速恢复单星定轨精度提升的贡献,采取以下 3 种策略进行验证。

策略 1(原策略):只使用实际钟差点对观测数据进行改正,没有改正的观测数据不参与定轨解算。即目前北斗地面运控采用的策略。

策略 2(新策略):采用本文模型,将多星定轨站钟钟差点、时间同步钟差点,以及钟差预报值都用于单星定轨。

策略 3(后处理):为检验前面两种策略的精度,采用  $t_0 \sim t$  时段的所有观测数据都用事后钟差点改正。该策略无法做到实时,只能为策略 1 和策略 2 作事后验证。

#### 3.2 数据使用说明

选择均匀分布于中国的 7 个测站(如图 4 所示)的观测数据,对 2018 年 11 月 3 颗机动卫星进行测试,机动信息见表 2。

表 2 卫星机动时刻

Tab.2 Satellite maneuvering time

SatID	开始时间	结束时间	恢复可用时间
C01	2018-11-30 8:55	2018-11-30 10:15	机动结束后 4 h
C03	2018-11-10 7:45	2018-11-10 9:15	机动结束后 4 h
C04	2018-11-27 8:45	2018-11-27 10:15	机动结束后 4 h

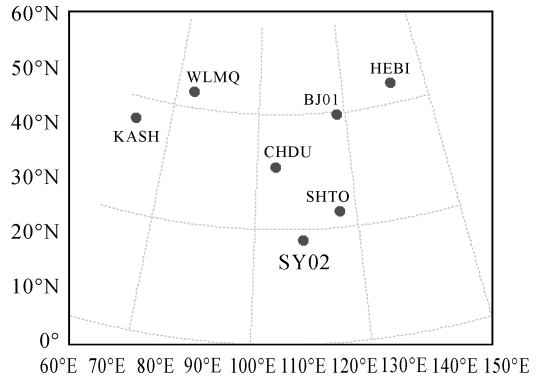


图 4 测站分布

Fig.4 Distribution of selected stations

#### 3.3 结果分析

##### 3.3.1 站钟和星钟预报精度

首先选取 2018 年 11 月数据,分析卫星钟及测站钟差,拟合和预报精度。其中拟合数据的弧长为 2 h;卫星钟差、测站钟差分别基于式(2)及式(5)模型进行预报,卫星钟差预报 2 h,测站钟差预报 1 h。如图 5 和表 3 列出了拟合及预报误差。结果表明,卫星钟差参数拟合误差都在 0.3 ns 以

内,预报 2 h 精度好于 1.5 ns;站钟拟合误差在

0.5 ns 以内,预报 1 h 精度好于 2.5 ns。

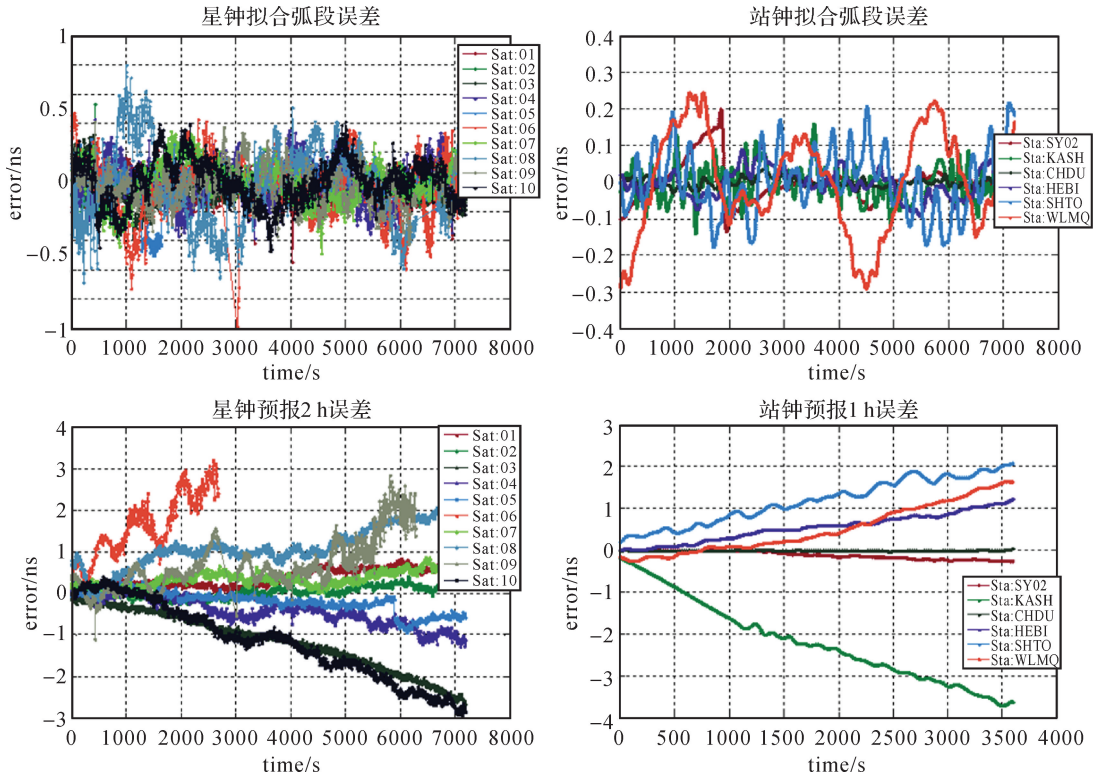


图 5 2018 年 11 月其中 1 组星钟及站钟拟合预报图

Fig.5 Accuracy of clock fitting and prediction for both satellites and stations

表 3 钟差拟合误差及预报精度

Tab.3 Accuracy of fitting and predicted clock errors

SatID	拟合误差	预报 2 h 误差	ns
C01	0.09	0.56	
C02	0.08	0.37	
C03	0.09	1.02	
C04	0.12	0.87	
C05	0.19	1.62	
C06	0.24	1.48	
C07	0.12	1.09	
C08	0.29	1.21	
C09	0.13	1.48	
C10	0.14	1.43	
StaID	拟合误差	预报 1 h 误差	
SY02	0.02	0.14	
KASH	0.04	2.39	
CHDU	0.01	0.01	
HEBI	0.19	0.64	
SHTO	0.10	1.31	
WLMQ	0.14	0.77	

### 3.3.2 定轨结果

根据定轨策略设置,原策略钟差修正方法造成缺失约 1 h 定轨数据;新策略使用预报钟差修正了缺失的数据;后处理则是采用事后的钟差点

数据对定轨时刻的所有观测数据进行了修正,其定轨使用数据长度等同于本文新策略。下面分别采用 3 种策略,对 3 颗卫星轨控结束后 3~8 h 各 6 组时段进行快速恢复轨道解算,按照与北斗运控相同的策略,每小时进行一次定轨处理。分别对每种情况下的定轨残差、定轨弧段用户距离误差(user range error,URE)和预报 2 h URE 进行评估。3 种策略定轨情况统计见表 4。

表 4 的统计结果表明,每组结果 3 种策略下的定轨残差水平相当,都在 0.6 m 左右。3 种策略的定轨 URE 精度水平也基本相当,差异在厘米量级。这表明定轨的内符合程度较好。

3 种模型预报 URE 差异较大,反映了用户实时应用性能的差异。原策略预报精度较差,新策略跟后处理结果较吻合,整体优于原策略。采用新策略,第 1 组定轨结果(轨控结束第 3 h 定轨)中 C01 预报 URE 由 0.621 m 降低到 0.575 m; C04 预报 URE 由 3.945 m 降低到 0.599 m; C03 预报 URE 由 2.735 m 降低到 2.067 m;改进幅度分别为 7.41%、84.82%及 24.42%。从 3~8 h 期间 6 组定轨平均情况来看,采用新策略相较于原

策略的预报 URE, C01 平均降低了 26.06%, C04 平均降低了 31.58%, C03 降低了 9.95%。

表 4 快速恢复不同策略下定轨及预报结果统计  
Tab.4 Observation residuals, URE of POD and its prediction

轨控 结束后 时间	定轨残差 rms								
	C01			C04			C03		
	原策略	新策略	后处理	原策略	新策略	后处理	原策略	新策略	后处理
3 h	0.568	0.416	0.552	0.572	0.572	0.569	0.481	0.471	0.460
4 h	0.553	0.552	0.559	0.569	0.576	0.578	0.460	0.438	0.445
5 h	0.559	0.626	0.622	0.578	0.589	0.584	0.437	0.424	0.430
6 h	0.622	0.648	0.652	0.584	0.584	0.586	0.430	0.473	0.442
7 h	0.652	0.676	0.658	0.584	0.594	0.600	0.442	0.453	0.440
8 h	0.658	0.656	0.642	0.600	0.606	0.610	0.440	0.439	0.436
<b>mean</b>	<b>0.602</b>	<b>0.596</b>	<b>0.614</b>	<b>0.581</b>	<b>0.587</b>	<b>0.588</b>	<b>0.448</b>	<b>0.450</b>	<b>0.442</b>
定轨弧段 URE									
3 h	0.762	0.796	0.679	1.670	1.395	1.433	1.998	2.012	1.974
4 h	0.672	0.611	0.610	1.433	1.650	1.650	1.974	1.961	1.972
5 h	0.604	0.499	0.508	1.650	1.688	1.720	1.980	2.041	2.001
6 h	0.503	0.579	0.550	1.720	1.784	1.800	2.001	1.911	1.945
7 h	0.558	0.603	0.590	1.844	1.944	1.929	1.945	1.885	1.888
8 h	0.691	0.698	0.691	1.926	1.850	1.879	1.888	1.792	1.793
<b>mean</b>	<b>0.632</b>	<b>0.631</b>	<b>0.605</b>	<b>1.707</b>	<b>1.719</b>	<b>1.735</b>	<b>1.964</b>	<b>1.934</b>	<b>1.929</b>
预报弧段 URE									
3 h	0.621	0.575	0.839	3.945	0.599	0.693	2.735	2.067	1.900
4 h	1.921	0.641	0.807	4.04	2.384	2.781	1.972	2.211	2.456
5 h	1.643	0.565	0.797	3.144	2.214	2.575	2.291	1.588	1.111
6 h	1.245	1.330	1.176	3.221	2.583	2.771	1.096	0.900	1.283
7 h	1.385	1.969	1.745	3.985	3.209	3.041	1.155	0.810	0.935
8 h	2.487	1.795	1.747	3.559	1.502	1.623	0.697	1.384	1.343
<b>mean</b>	<b>1.550</b>	<b>1.146</b>	<b>1.185</b>	<b>3.043</b>	<b>2.082</b>	<b>2.247</b>	<b>1.658</b>	<b>1.493</b>	<b>1.505</b>

表 4 中存在个别反常值,如 C04 卫星轨控后 4 h 原策略的预报弧段 URE 比定轨弧段 URE 好。这是因为单星定轨中未完全修正的误差会造成定轨 URE 存在系统偏差。如图 6 所示,第 2 条竖线是启动定轨时刻,该时刻之前是定轨弧段,之后是预报弧段。可以看到 3 种策略下定轨弧段 URE 系统偏差一开始都为 -2 m 左右,随着时间的推移,原策略预报弧段的 URE 向正向偏离,因此其预报 URE 较小。

图 7—图 9 为 3 颗卫星轨控后第 1 组(轨控结束后第 3 h)和第 6 组(轨控结束后第 8 h)快速恢复的定轨 URE 时序图。图中第 1 条竖线是轨控后数据开始积累时刻,第 2 条竖线是定轨启动时刻,第 3 条竖线是本组结果上注卫星时刻,第 4 条竖线是下组结果上注时刻。其中,最后两条紫色竖线之间的 URE 精度反映对用户应用的影响。图中红线序列是原策略结果,蓝线是新策略结果,绿线是后处理结果。

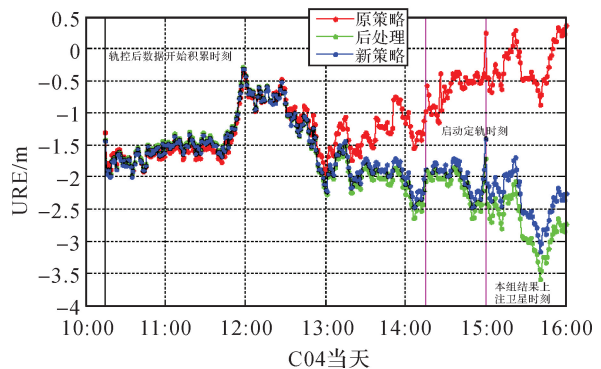


图 6 C04 卫星第 2 组快速恢复定轨精度 URE 时序图  
Fig.6 URE of C04 during the second hours of post-maneuver

图中结果也表明,定轨弧段 3 种策略几无差异,但是从预报开始,红色的线随时间越来越偏离蓝线和绿线。第 3 h 定轨结果失效前的最大偏离点 C01 为 0.265 m, C03 为 1.114 m, C04 为 5.481 m; 第 8 h 定轨结果失效前的最大偏离点 C01 为

0.923 m, C03 为 0.803 m, C04 为 2.492 m。蓝线和绿线在第 3 h 定轨随时间也呈现较小偏离(最大偏离量 C01 为 0.291 m, C03 为 0.201 m, C04 为

0.727 m),但是第 8 h 结果表明二者依然吻合较好(最大偏离量 C01 为 0.048 m, C03 为 0.051 m, C04 为 0.156 m)。

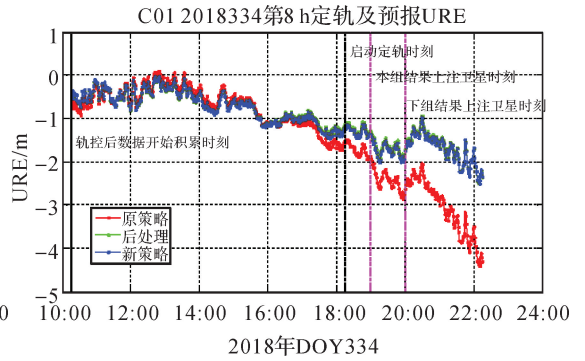
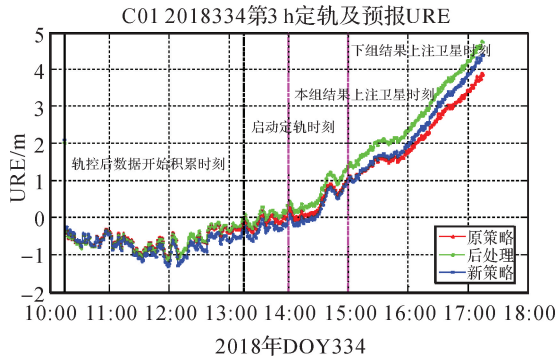


图 7 C01 卫星第 1 组及第 6 组快速恢复定轨精度 URE 时序图

Fig.7 URE of C01 during the first hours of post-maneuver

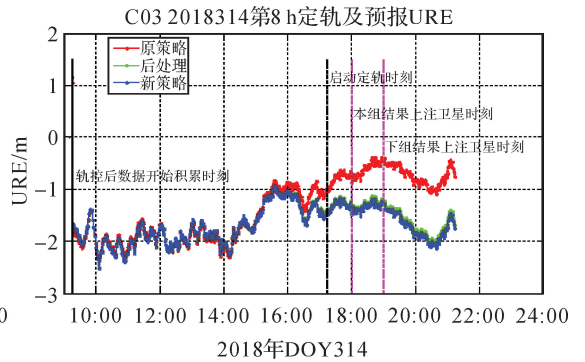
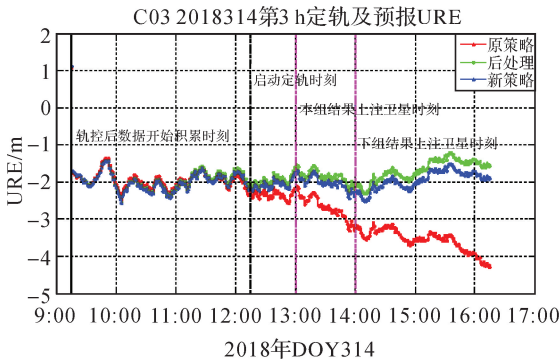


图 8 C03 卫星第 1 组及第 6 组快速恢复定轨精度 URE 时序图

Fig.8 URE of C03 during the first hours of post-maneuver

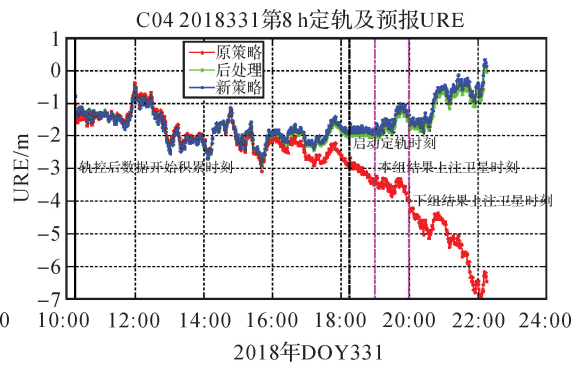
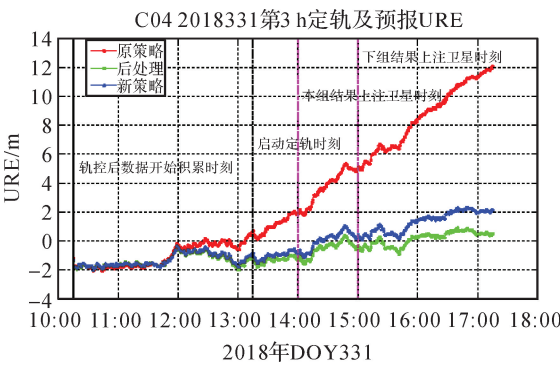


图 9 C04 卫星第 1 组及第 6 组快速恢复定轨精度 URE 时序图

Fig.9 URE of C04 during the first hours of post-maneuver

采用轨控结束 12 h 后的快速恢复定轨弧段结果作为真值,对各卫星第 1 组快速恢复定轨结果的定轨弧段和预报弧段进行精度评估。3 颗卫星轨道各方向的差值如图 10—图 12 所示,统计值见表 5。图中红线是原策略结果,蓝线是新策略结果,绿线为后处理结果;第 1 条竖线前是定轨弧段,第 1 和第 2 竖线间是评估的预报弧段。对

于定轨弧段,原策略的径向误差在 1.5 m 以内,最大位置误差在 15 m 以内;新策略和后处理的径向误差在 1 m 以内,最大位置误差在 10 m 以内。对于预报 2 h 弧段,原策略的径向误差在 3 m 以内,最大位置误差在 20 m 以内;新策略和后处理的径向误差在 1 m 以内,最大位置误差在 15 m 以内。结果表明新策略优于原策略效果。

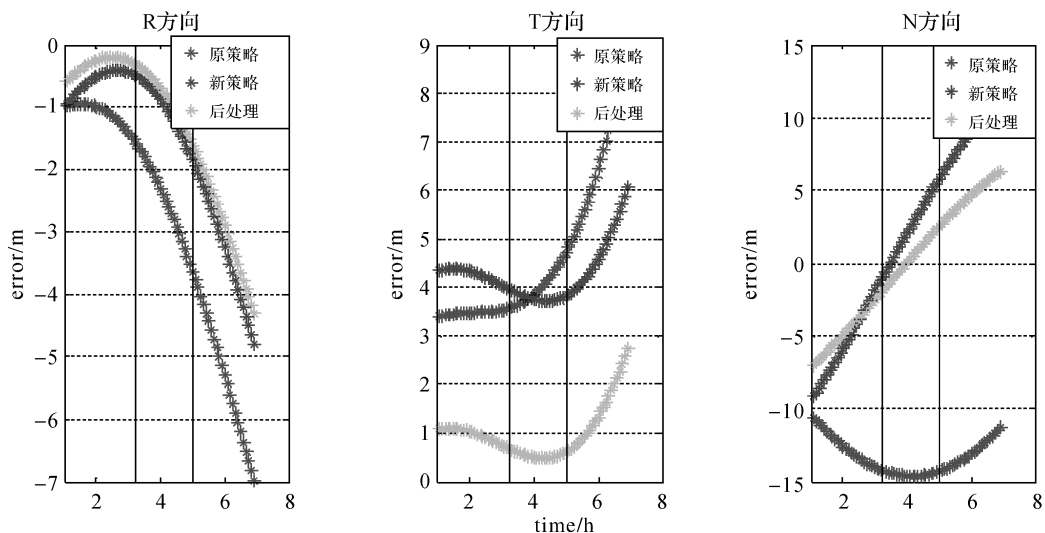


图 10 C01 第 1 组快速恢复轨道 RTN 偏差

Fig.10 RTN errors of C01 during the first hours of post-maneuver

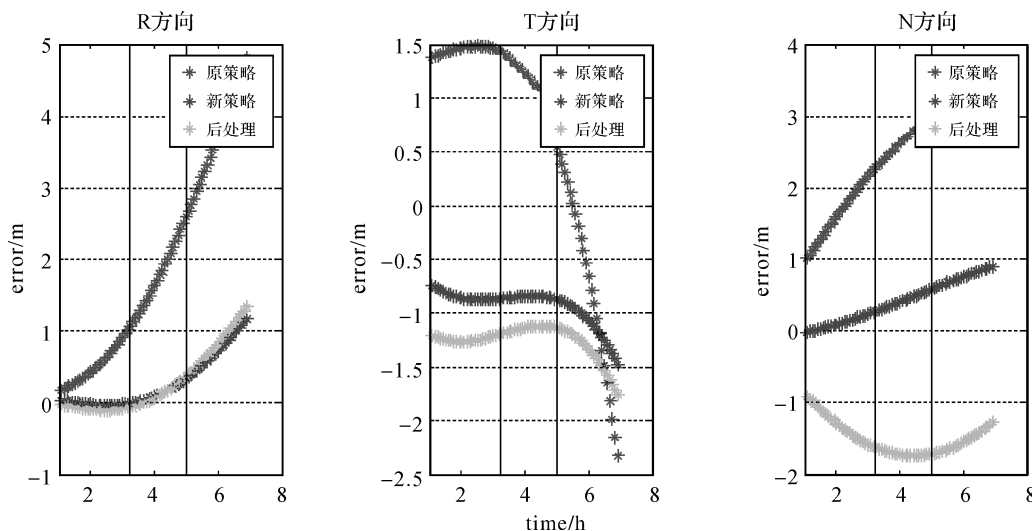


图 11 C03 RTN 第 1 组快速恢复轨道 RTN 偏差

Fig.11 RTN errors of C03 during the first hours of post-maneuver

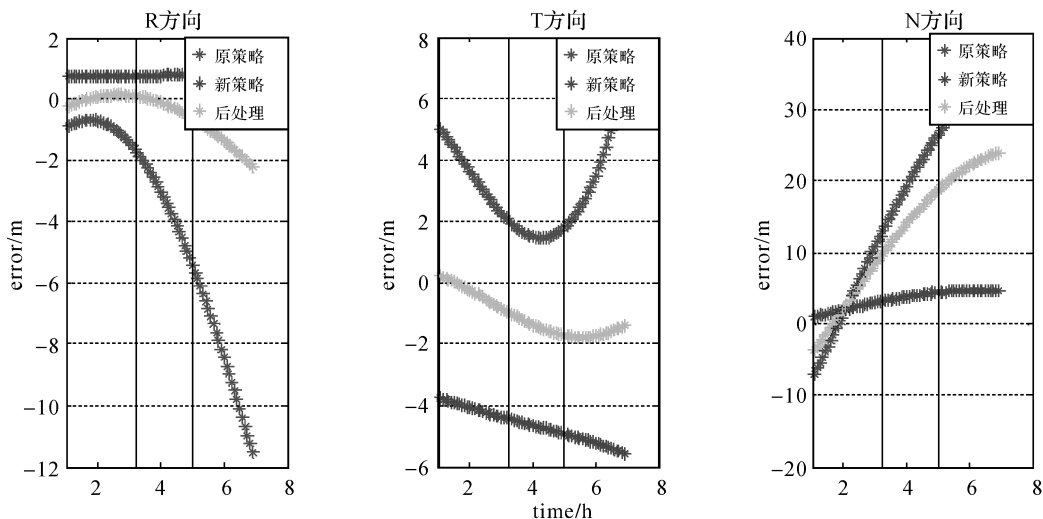


图 12 C04 RTN 第 1 组快速恢复轨道 RTN 偏差

Fig.12 RTN errors of C04 during the first hours of post-maneuver



表 5 重叠弧段 RTN 比对

Tab.5 Orbit repeatability of the RTN components

m

评估弧段	C01			C04			C03		
	R	T	N	R	T	N	R	T	N
原策略定轨	1.082	3.383	11.371	1.152	4.579	8.670	0.411	1.407	1.355
新策略定轨	0.961	4.233	8.276	0.743	3.898	1.655	0.034	0.766	0.105
后处理定轨	0.608	0.968	6.338	0.355	0.401	5.573	0.059	1.195	1.094
原策略预报	2.241	3.834	14.457	2.966	1.714	18.261	1.584	1.242	2.539
新策略预报	0.898	3.829	2.402	0.765	4.609	3.676	0.112	0.848	0.390
后处理预报	0.730	0.576	1.319	0.192	1.292	13.297	0.113	1.152	1.690

综上所述,预报钟差对快速恢复初期几个小时的轨道确定及预报贡献显著。使用预报钟差有效补偿了观测数据,提高了短弧轨道精度,缩短了卫星不可用时间。

## 4 总 结

本文针对卫星快速恢复期间由于星钟数据和站钟数据积累不足造成的定轨数据损失,提出采用预报钟差修正观测数据,从而增加定轨数据的使用量的处理方式;提出了一种基准相容一致的高精度钟差预报模型,实现了轨道快速恢复期间钟差数据的基准统一。试验分析表明,采用预报钟差策略对快速恢复初期几个小时的轨道确定及预报性能提升贡献显著,其中定轨 URE 预报性能最大提升达 84.82%。采用预报钟差策略可将第 1 组定轨预报弧段的径向偏差由 3 m 左右降到 1 m 以内,位置误差由 20 m 降到 15 m 以内。从 3~8 h 期间 6 组定轨平均情况来看,采用新策略相较于原策略的预报 URE, C01 平均降低了 26.06%, C04 平均降低了 31.58%, C03 降低了 9.95%。采用优化策略至少可以将卫星机动后不可用时间缩短至 1 h,对北斗系统的工程应用具有参考价值。

## 参考文献:

- [1] 张俊丽,董开封,秋宏兴,等.基于伪距信息的 COMPASS-MEO 导航卫星单星定轨分析[J].飞行器测控学报, 2008, 27(6): 60-64.  
ZHANG Junli, DONG Kaifeng, QIU Hongxing, et al. Analysis of orbit determination of COMPASS-MEO navigation satellite with pseudorange[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(6): 60-64.
- [2] 雷辉.基于转发式的导航卫星精密定轨研究[D].西安:中国科学院研究生院(国家授时中心), 2011.  
LEI Hui. Research on precise orbit determination of navigation satellites based on transponder ranging[D]. Xi'an: National Time Service Center Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [3] 刘伟平.导航卫星快速定轨和预报方法研究[D].郑州:信息工程大学, 2011.  
LIU Weiping. Study on fast orbit determination and prediction for navigation satellite[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011.
- [4] O'KEEFE K, RYAN S, LACHAPPELLE G. Global availability and reliability assessment of the GPS and Galileo global navigation satellite systems [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 2002, 48(2): 123-132.
- [5] 李国重,李建文,焦文海,等.顾及卫星故障修复的导航星座 PDOP 可用性分析方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(7): 841-845.  
LI Guozhong, LI Jianwen, JIAO Wenhai, et al. Analysis of PDOP availability of navigation constellation based on satellite service intermittence[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(7): 841-845.
- [6] Department of Defense USA. Global Positioning System standard positioning service performance standard[M]. 4th ed. [S.l.]: GPS, 2008: 197-216.
- [7] 郭睿,李晓杰,周建华,等.机动力建模条件下的 GEO 卫星机动期间定轨[J].测绘科学技术学报, 2013, 30(5): 465-470.  
GUO Rui, LI Xiaojie, ZHOU Jianhua, et al. Precise orbit determination for the GEO satellite maneuver based on the thrust force model[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(5): 465-470.
- [8] 黄勇,胡小工,黄斌,等.利用 CAPS 测距数据确定 GEO 卫星变轨期间的轨道[J].中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1750-1758.  
HUANG Yong, HU Xiaogong, HUANG Cheng, et al. Precise orbit determination of a maneuvered GEO satellite using CAPS ranging data[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2008, 38(12): 1750-1758.
- [9] 李晓杰,黄勇,郭睿,等.基于机动力模型的 GEO 卫星恢复期间定轨[J].空间科学学报, 2015, 35(6): 730-737.  
LI Xiaojie, HUANG Yong, GUO Rui, et al. Orbit determination method based on thrust force model for GEO satellite in the period of orbit recovery[J]. Chinese Journal of Space Science, 2015, 35(6): 730-737.
- [10] 宋小勇,贾小林,焦文海,等.基于随机姿态力模型的 GEO 卫星机动定轨[J].武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(5): 573-576.  
SONG Xiaoyong, JIA Xiaolin, JIAO Wenhai, et al. Determining maneuver orbit of GEO using stochastic thrust model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(5): 573-576.

- [11] 杨旭海, 李志刚, 冯初刚, 等. GEO 卫星机动后的星历快速恢复方法[J]. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38(12): 1759-1765.  
YANG Xuhai, LI Zhigang, FENG Chugang, et al. Methods of rapid orbit forecasting after maneuvers for geostationary [J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2008, 38(12): 1759-1765.
- [12] GUO Rui, ZHOU Jianhua, HU Xiaogong, et al. Precise orbit determination and rapid orbit recovery supported by time synchronization [J]. Advances in Space Research, 2015, 55(12): 2889-2898.
- [13] 李晓杰, 郭睿, 胡光明, 等. 轨位偏置的 GEO 卫星轨道快速恢复技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(7): 079507.  
LI Xiaojie, GUO Rui, HU Guangming, et al. Research on technique of orbit rapid recovery for GEO satellite of partial subsatellite point [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2015, 45(7): 079507.
- [14] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.  
DU Lan. A study on the precise orbit determination of geostationary satellites[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006.
- [15] 刘大杰. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996.  
LIU Dajie. The principle and data processing of the global positioning system (GPS)[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.
- [16] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.  
LI Jisheng. Artificial satellite orbit determination [M]. Beijing: PLA press, 1995.
- [17] 李晓杰. 区域导航卫星高精度轨道确定及预报技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2012.  
LI Xiaojie. Research on high precision orbit determination and prediction technology for regional navigation satellite[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012.
- [18] 刘利, 朱陵凤, 韩春好, 等. 星地无线电双向时间比对模型及试验分析[J]. 天文学报, 2009, 50(2): 189-196.  
LIU Li, ZHU Lingfeng, HAN Chunhao, et al. The model of two-way radio time transfer between the earth and satellites and analysis of its experiment[J]. Acta Astronomica Sinica, 2009, 50(2): 189-196.
- [19] 刘晓刚, 吴晓平, 田颜锋, 等. 利用切比雪夫多项式模型进行时间预报的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1): 77-82, 87.  
LIU Xiaogang, WU Xiaoping, TIAN Yanfeng, et al. Study on automic prediction of time based on interpolation model with Chebyshev polynomiais[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(1): 77-82, 87.
- [20] 王宇谱, 吕志平, 孙大双, 等. 一种改进钟差二次多项式模型的导航卫星钟差预报方法[J]. 天文学报, 2016, 57(1): 78-90.  
WANG Yupu, LÜ Zhiping, SUN Dashuang, et al. A new navigation satellite clock bias prediction method based on modified clock-bias quadratic polynomial model[J]. Acta Astronomica Sinica, 2016, 57(1): 78-90.
- [21] 王彬. BDS 在轨卫星钟特征分析、建模及预报研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.  
WANG Bin. Analysis of BDS satellite clock in orbit, modelling and its prediction research[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [22] 王宇谱, 吕志平, 王宁. BDS 星载原子钟长期性能分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(2): 157-169. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20160369.  
WANG Yupu, LÜ Zhiping, WANG Ning. The long-term performance analysis for on-board atomic clocks of BDS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(2): 157-169. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20160369.
- [23] 周佩元, 杜兰, 路余, 等. 多星定轨条件下北斗卫星钟差的周期性变化[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1299-1306. DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.20150183.  
ZHOU Peiyuan, DU Lan, LU Yu, et al. Periodic variations of BeiDou satellite clock offsets derived from multi-satellite orbit determination[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(12): 1299-1306. DOI: 10.11947/j. AGCS.2015.20150183.
- [24] 杨伟锋, 唐桂芬, 苏冉冉, 等. 多站联合星地时间同步及预报性能分析[J]. 时间频率学报, 2018, 41(2): 95-102.  
YANG Weifeng, TANG Guifen, SU Ranran, et al. Performance analysis of multi-station combined satellites and ground time synchronization and prediction[J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(2): 95-102.
- [25] 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.
- [26] CHEN Junping, CHEN Qian, WANG Bin, et al. Analysis of inner-consistency of BDS broadcast ephemeris parameters and their performance improvement[C]//Proceedings of the ION Pacific PNT 2017 Conference. Honolulu, Hawaii: ION, 2017: 300-306.
- [27] CHEN Qian, CHEN Junping, ZHANG Yize, et al. Analysis of BDS satellite clock prediction contribution to rapid orbit recovery[C]//Proceedings of 2018 China Satellite Navigation Conference (CSNC). Singapore: Springer, 2018: 399-407.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2019-03-13

修回日期: 2019-06-12

第一作者简介: 陈倩(1989—),女,博士生,研究方向为卫星定轨。

First author: CHEN Qian (1989—), female, PhD candidate, majors in POD.

E-mail: qianchen@shao.ac.cn

通信作者: 陈俊平

Corresponding author: CHEN Junping

E-mail: junping@shao.ac.cn