论文

北斗新一代试验卫星星钟及轨道精度初步分析

陈金平^{①*}, 胡小工^{②③*}, 唐成盼^{②④}, 周善石^{②③}, 郭睿^①, 潘军洋^{②④}, 李冉^{②④}, 朱陵凤^①

① 北京卫星导航中心, 北京 100094;

② 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

③ 上海市定位与导航重点实验室, 上海 200030;

④ 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, 陈金平, E-mail: jinping_chen@sina.com; 胡小工, E-mail: hxg@shao.ac.cn

收稿日期: 2016-06-02; 接受日期: 2016-06-30; 网络出版日期: 2016-08-19

国家自然科学基金(编号: 41374038, 41574029)、上海市定位与导航重点实验室和中国科学院青年创新促进会(编号: 2016242)资助项目

摘要 北斗卫星导航系统新一代试验卫星星座由2颗高轨倾斜地球同步轨道卫星和3颗中轨地球轨道卫星组成, 2016年2月全部发射入轨, 其任务是验证北斗系统从目前区域导航定位授时服务走向全球服务的新技术体制设计及指标性能. 导航卫星星载原子钟是最重要载荷之一, 负责星上时间频率基准信号维持和产生, 本文利用星地双向时频传递设备观测的星地钟差数据, 评估了试验星配置的新型高精度铷钟和被动型氢钟的实际性能, 定量比较了相对于北斗区域系统卫星钟的性能提升. 结果表明新一代试验星与北斗区域系统卫星钟差预报精度相比较有较大提高, 地球倾斜静止卫星(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)短期预报误差从0.65 ns减小到0.30 ns, 中轨道卫星(Medium Orbit, MEO)短期预报误差从0.78 ns减小到0.32 ns, IGSO/MEO卫星中期预报误差均从2.50 ns减小到约1.50 ns. 星间链路(Inter-Satellite Link, ISL)是北斗全球系统最重要的技术体制设计之一, 本文评估了试验卫星实现的星间伪距测量对提升空间信号精度, 即轨道和钟差的贡献, 得到在地面监测网无法连续覆盖到的境外弧段, 高精度星间链路测量对轨道确定和钟差测定精度的提升尤为明显. 加入星间伪距测量, MEO卫星重新入境时钟差预报误差由3 ns减小至1 ns以内. 采用星地星间联合定轨方法估计的卫星轨道径向重叠弧段互差优于0.1 m, 三维位置重叠互差优于0.5 m, 预报24 h径向重叠弧段互差优于0.2 m, 三维位置重叠互差优于1 m, 均较区域监测网L波段定轨结果有较大提升. 为解决多星定轨处理时卫星钟差与轨道高度耦合问题, 本文提出了卫星钟差半约束模式定轨处理方法. 用户等效距离误差分析结果表明采用卫星钟差半约束的定轨模式, 卫星轨道预报4 h用户等效距离误差由1.04 m减小至0.82 m.

关键词 北斗卫星导航系统, 星载原子钟, 星间链路, 卫星钟差, 卫星定轨, 空间信号精度, 星地双向时频传递

PACS: 95.10.Eg, 06.30.Ft, 91.10.Fc, 96.25.Vt

1 引言

北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite Sys-

tem, BDS)于2012年完成了由5颗地球静止卫星(Geosynchronous Orbit, GEO)、5颗地球倾斜静止卫星(Inclined

引用格式: 陈金平, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代试验卫星星钟及轨道精度初步分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 119502
Chen J P, Hu X G, Tang C P, et al. Orbit determination and time synchronization for new-generation Beidou satellites: Preliminary results (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 119502, doi: 10.1360/SSPMA2016-00281

Geosynchronous Orbit, IGSO)和4颗中轨道卫星(Medium Orbit, MEO)构成的空间星座组网, 正式向亚太区域提供导航、定位和授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)服务¹⁾. BDS的建设遵循“三步走”的发展战略, 将于2020年建设成为全球卫星导航系统, 正式向全球用户提供服务. 按照系统建设规划, BDS于2015年3月至2016年2月先后发射了由2颗IGSO卫星和3颗MEO卫星共同组成的新一代试验卫星星座, 其目的是开展新型星载原子钟、星间链路、新型导航信号体制、卫星钟差与轨道测定方法等方面的技术试验, 验证北斗全球系统新技术体制设计与技术性能. 北斗新一代试验卫星发射情况如表1所示.

北斗卫星导航系统从区域服务走向全球服务将是空间信号精度不断提升的过程. 导航卫星钟差与轨道测定精度是空间信号精度的决定性因素, 也是影响导航系统精度指标的最重要因素之一. 北斗新一代试验卫星在导航卫星钟差与轨道测定方面进行了区别于北斗区域系统的新技术体制设计, 可以满足用户对更高精度导航信号的需求. 本文将从新型星载原子钟性能、基于星间链路观测的钟差及轨道测定、卫星钟差半约束模式轨道处理等3个方面开展相应的试验评估分析.

2 新型星载原子钟性能分析

星载原子钟用于星上时间频率基准信号产生, 是导航卫星发播高性能导航信号的重要基础, 其性能优劣将直接决定卫星钟差参数预报精度^[1]. 相比于北斗区域系统星载钟, 北斗新一代试验卫星配置了性能更好的铷钟和被动型氢钟. 为此, 本文基于试验卫星的实际运行观测数据, 进行了新型星载原子钟性能评估.

BDS采用L波段星地双向时频传递技术(Two-way Satellite Time and Frequency Transfer, TWSTFT)实时测量卫星钟相对于主控站建立保持的BDT(Beidou Time, BDT)的偏差^[2-4]. 假定上行伪距和下行伪距在同一钟面时分别到达卫星和地面测站, 将上行、下行伪距分别完成钟面时测量的归算, 并通过比对归算后的伪距实时计算卫星相对于BDT的钟差. 星地双向钟差测量可以减小单向伪距测量中的电离层延迟, 不受对流层延迟建模误差、卫星轨道误差、测站坐标误差的影响. 文献[2]表明星地双向时频传递获得的卫星钟差短期拟合残差优于0.3 ns, 可以用来分析比较星载原子钟性能的差异. 文献[4]表明星地双向共视还可以实现高精度站间时间同步, 该结果与传统站间双向时间比对结果一致性较好, 二者闭合差优于0.04 ns, 标准差约0.5 ns.

卫星钟差预报性能既是卫星钟差测定精度的反映, 更是星载原子钟性能的重要考核因素, 卫星钟差预报精度是直接影响导航卫星空间信号精度的重要因素. 本文采用星地双向时频传递测量的卫星钟差, 分析比较了新型星载原子钟和北斗区域系统星载原子钟的短期和中期预报性能. 对于短期预报, 使用2 h的星地钟差双向测量结果进行一阶多项式拟合, 得到后1 h的预报参数, 统计其预报精度. 对于中期预报, 使用24 h星地钟差数据进行二阶多项式拟合, 拟合得到的参数作为接下来10 h的预报参数, 统计其预报精度. 分别采用2016年3月10–20日星地双向钟差测量结果计算的卫星钟差预报精度如图1和2. 其中, 图1为IGSO卫星钟差拟合及预报精度, 图2为MEO卫星钟差拟合及预报精度, 图中红色为北斗区域系统星载钟的统计结果, 蓝色为试验卫星新型星载钟的统计结果, 子图(a)为短期拟合精度, 子图(b)为短期预报精度, 子图(c)

表1 北斗新一代试验卫星发射情况

Table 1 Status of the new generation BDS satellites

卫星	发射时间(Universal Time Coordinated, UTC)	运载火箭	轨道位置	运行状态
IIS	2015-03-30	长征 3C	55°倾角, IGSO 95°E	在轨试验
M1S	2015-07-25	长征 3C/YZ-1	MEO, ~21500 km	在轨试验
M2S	2015-07-25	长征 3B/YZ-1	MEO, ~21500 km	在轨试验
I2S	2015-09-29	长征 3B/YZ-1	55°倾角, IGSO 95°E	在轨试验
M3S	2016-02-01	长征 3B	MEO, ~21500 km	在轨试验

1) 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(2.0版), 2013

图 1 (网络版彩图)北斗区域系统与新一代试验星IGSO卫星钟差拟合与预报精度. (a) 短期拟合精度; (b) 短期预报精度; (c) 中期拟合精度; (d) 中期预报精度, 其中图中红色为北斗区域系统星载钟的统计结果, 蓝色为试验卫星新型星载钟的统计结果
Figure 1 (Color online) Fitting errors and prediction errors of the operational and new generation IGSO satellite clocks offsets. (a) Short-term fitting error; (b) short-term prediction error; (c) middle-term fitting error; (d) middle-term prediction error. The red in the figure are the regional operational satellites, the blue in the figure are the new-generation satellites.

图 2 (网络版彩图)北斗区域系统与新一代试验星MEO卫星钟差拟合与预报精度. (a) 短期拟合精度; (b) 短期预报精度; (c) 中期拟合精度; (d) 中期预报精度, 其中图中红色为北斗区域系统星载钟的统计结果, 蓝色为试验卫星新型星载钟的统计结果
Figure 2 (Color online) Fitting errors and prediction errors of the operational and new generation MEO satellite clocks. Offsets. (a) Short-term fitting error; (b) short-term prediction error; (c) middle-term fitting error; (d) middle-term prediction error. The red in the figure are the regional operational satellites, the blue in the figure are the new-generation satellites.

为中期拟合精度, 子图(d)为中期预报精度.

由上述统计结果可得: 新一代试验星与北斗区域系统卫星钟差拟合精度相比较有所提高, IGSO/MEO卫星短期拟合精度从0.3 ns提高到0.1 ns, IGSO卫星中期拟合精度从1.0 ns提高到0.5 ns, MEO卫星中期拟合精度从0.5 ns提高到0.2 ns; 新一代试验星与北斗区域系统卫星钟差预报精度相比较有较大提高, IGSO卫星短期预报精度从0.65 ns提高到0.30 ns, MEO卫星短期预报精度从0.78 ns提高到0.32 ns, IGSO/MEO卫星中期预报精度均从2.5 ns提高到约1.5 ns. 无论是短期预报还是中期预报, 均反映新一代试验星新型星载原子钟性能与北斗区域系统相比较有约一倍提升.

3 基于星间链路的钟差及轨道测定性能分析

3.1 星间链路测距数据特性分析

北斗新一代试验卫星均配置了星间链路测距设备, 实时完成卫星之间双向伪距测量. 由于星间链路信号在卫星间传播存在时延, 并且各卫星依次发射测量信号, 根据卫星预报星历和钟差信息, 可以将不同时刻卫星双向伪距观测归算至相同时刻, 得到相同时刻归算后的伪距观测量如下式:

$$\begin{aligned}\rho_{BA}(T_0) &= |r_A(T_0) - r_B(T_0)| + \Delta clk_A(T_0) - \Delta clk_B(T_0), \\ \rho_{AB}(T_0) &= |r_B(T_0) - r_A(T_0)| + \Delta clk_B(T_0) - \Delta clk_A(T_0),\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $\rho_{BA}(T_0)$ 和 $\rho_{AB}(T_0)$ 分别为B星到A星、A星到B星的伪距测量; $r_A(T_0)$ 、 $r_B(T_0)$ 分别为A星和B星在 T_0 刻的卫星位置; $\Delta clk_A(T_0)$ 和 $\Delta clk_B(T_0)$ 分别为A星和B星在 T_0 时刻的卫星钟差.

上式中归算后的观测量中卫星轨道和钟差是耦合的, 可以通过简单的处理将观测值中的卫星轨道信息和卫星钟差信息分离. 如式(2)仅包含两颗卫星间的相对距离, 可作为精密定轨处理的观测量; 如式(3)仅包含两颗卫星间的相对钟差, 可作为时间同步的观测量.

$$\frac{\rho_{BA}(T_0) + \rho_{AB}(T_0)}{2} = |r_A(T_0) - r_B(T_0)|, \quad (2)$$

$$\frac{\rho_{BA}(T_0) - \rho_{AB}(T_0)}{2} = \Delta clk_A(T_0) - \Delta clk_B(T_0). \quad (3)$$

为分析评估星间链路伪距数据的测量特性, 利用

2016年4月7日I2S卫星观测数据, 比较星地双向时频传递测量的钟差与星间链路对地观测测量的钟差, 扣除趋势项后的残差如图3, 图中红色部分为星地双向钟差拟合残差, 蓝色部分为星间链路对地钟差拟合残差.

由图3可以看出, 星间链路对地钟差残差与星地双向钟差残差量级大致相当, 均方根误差(Root Mean Square, RMS)约为0.13 ns. 但是星间链路对地钟差残差序列为“随机变化”的噪声序列, 而星地双向钟差残差序列有明显的趋势性变化, 为“有色噪声”. 这是因为星地双向时频传递的L波段上行、下行测量伪距的频率稍有差别, 导致星地双向钟差受残余的电离层延迟影响. 再者, 由卫星引起的、与入射高度角相关的L波段下行伪距测距偏差也将影响钟差测量结果^[5]. 而星间链路测距频率高, 残余电离层延迟仅为厘米级, 并且几乎不受系统误差的影响, 是一种高精度的伪距测量.

3.2 星间链路的钟差测定

北斗区域系统卫星导航电文中播发的钟差参数, 其测定是由L波段星地双向时频传递完成的. 本文以星地双向钟差测量结果为依据, 分析星间链路数据的卫星钟差测定性能. 将星间链路的波束指向地面站建立对地链路, 通过与地面站的双向伪距测量也可以获得类似于L星地双向的星地相对钟差. 表2对比了2016年4月7日M1S卫星星地双向钟差测量与星间链路对地

图3 (网络版彩图) I2S卫星星地双向钟差与星间链路对地钟差比较

Figure 3 (Color online) Fitting residuals of I2S clock residuals from TWSTFT and ISL.

表2 M1S星地双向钟差与星间链路对地测定钟差拟合结果

Table 2 Clock parameters of M1S from ISL and TWSTFT

数据源	A_0 (ns)	A_1 (s/s)	RMS (ns)
L1 (BDT 8:00–10:00)	83571.236	2.77796×10^{-11}	0.116
L2 (BDT 10:00–12:00)	83571.598	2.77357×10^{-11}	0.061
ISL (BDT 8:00–10:00)	83571.523	2.78227×10^{-11}	0.129
L1-L2	0.361	4.39×10^{-14}	—
L1-ISL	0.286	4.31×10^{-14}	—

数据测定的卫星钟差的线性模型.

星间链路支持下的新一代北斗试验卫星的实时钟差测定策略为: 对于境内卫星, 使用星地双向钟差测量值; 对于境外卫星, 扣除星间链路设备的系统时延后, 将依据式(3)测量的星间相对钟差和境内卫星的星地双向钟差一起计算, 得到该卫星相对于BDT的钟差.

表2分别给出了由两种钟差测量值拟合的卫星钟差预报模型参数及拟合残差. 数据参考时刻均为4月7日BDT的10:00. 从表中可以看出, 星间链路对地测量得到的钟差参数与星地双向钟差测量结果得到的钟差参数具有较强的一致性. 其中, A_0 差别为0.286 ns, A_1 差别为 4.31×10^{-14} , 这些差别与L波段钟差参数前后两相同时长弧段拟合参数之差相当. 但是注意到星间

链路对地测定的钟差拟合残差与星地双向钟差测量结果拟合残差相当. 星间链路不参与境内弧段的卫星钟差测定, 但当卫星在境外弧段, 星地L双向时频传递无法完成其钟差测定时, 通过星间链路观测的星间相对钟差与境内卫星的星地L双向钟差同时估计, 得到卫星境外时段相对于BDT的绝对钟差.

对于北斗地面系统的3个时间维持站, 由于IGSO卫星大部分时间是可视的, 在本文主要考虑了星间链路测量对于MEO卫星钟差的提升. 按照上述方法处理了2016年3月15–17日星间相对钟差和星地双向钟差. 根据前面的分析, 星间链路对于钟差测定的贡献并不在于增加境内弧段卫星钟差的测量精度, 而是增加境外卫星的钟差测量弧段. 图4为M1S和M2S的钟差测量

图4 (网络版彩图)M1S/M2S卫星基于星地双向和星间链路的钟差测定结果. (a) M1S的钟差结果; (b) M2S的钟差结果

Figure 4 (Color online) Clock offsets of M1S/M2S from ISL and TWSTFT. (a) The M1S clock offsets; (b) the M2S clock offsets.

时间序列, 图中蓝色为星地双向钟差; 红色部分为MEO卫星在境外弧段, 通过星间链路补充得到的钟差测量. 如图所示, 星间链路测量可以大大增加MEO卫星钟差测量弧段. 但是注意到目前具有星间测距能力在轨卫星数目有限(少于4颗), 星间链路还不能完成MEO卫星的全弧段钟差测量.

图5为M1S卫星广播钟差参数的预报误差分析结果, 红色曲线为使用全部钟差测量值拟合的钟差参数, 蓝色曲线为仅使用星地双向钟差拟合的钟差参数.

如图所示, 星间链路相对钟差对于钟差预报性能的提升在于MEO境外弧段及其重新入境后, 这与星间链路相对钟差的使用策略是一致的. 若仅使用星地双向钟差测量, MEO卫星在境外弧段无法更新导航电文的钟差参数, 钟差参数的数据龄期不断增加. 在MEO卫星重新入境后, 预报误差增大至最大值. 而加入星间链路相对钟差后, 境外弧段卫星钟差的数据龄期变小. 如图中标出的部分, 卫星重新入境后, 卫星钟差预报误差由3 ns下降至1 ns附近.

3.3 星间链路的轨道支持

影响轨道测定性能的重要因素之一是区域跟踪网的分布. 仿真结果表明, 增加星间链路数据可以减少卫星轨道测定对地面设备的影响, 提升轨道测定精

图 5 (网络版彩图)M1S基于星地双向和星间链路的钟差预报误差

Figure 5 (Color online) Prediction error of broadcast clock parameters of M1S.

度^[6-8]. 北斗新一代导航试验卫星也搭载了星间链路设备. 为验证星间链路数据对于轨道测定的贡献, 利用2015年11月16日-12月20日采集的区域跟踪网伪距相位数据和星间链路数据, 分别进行仅星地链路定轨试验和星地星间联合定轨试验. 联合定轨的处理策略如表3. 联合定轨采用方程叠加的方式, 利用加权最小

表 3 联合定轨处理策略

Table 3 Strategies of orbit determination

定轨模式	定轨弧段	数据	动力学模型	截止高度角	太阳辐射压参数	对流层参数	卫星天线相位偏差	钟差处理	伪距相位权重
仅星地链路定轨		中国范围区域网6个监测站非差无电离层组合伪距相位数据							伪距:相位=1:10000
星地星间联合定轨	3 d	中国范围区域网6个监测站非差无电离层组合伪距相位数据+星间双向测距数据	二体运动、地球非球形引力、日月引力、太阳辐射压、固体潮和海洋摄动	星地链路截止高度角为7°, 星间数据截止波束角45°	伯尔尼模型5参数(D, Y, B方向常数加速度及B方向正、余弦加速度)	4 h解一组	仅考虑PCO和名义姿态	钟差约化解算	伪距:相位:星间=1:100 00:100
卫星钟差半约束定轨处理		中国范围区域网6个监测站非差无电离层组合伪距相位数据						固定卫星钟差的变化部分, 解算常数部分	伪距:相位=1:100

二乘估计方法完成轨道解算. 考虑的摄动力有二体运动、地球非球形引力、日月引力、太阳辐射压、地球固体潮和海潮摄动, 解算的动力学参数为卫星初轨和伯尔尼5参数(D, Y, B方向常数加速度及B方向正、余弦加速度), 待估测量参数除大气参数和相位模糊度参数外, 还有星间设备时延.

钟差解算误差可以用于评估可视弧段内卫星轨道径向估计误差. 表4为仅星地链路定轨和星地星间联合定轨估计的卫星钟差拟合残差. 从中可以看出, 加入星间测距数据后, 可视弧段内IGSO卫星径向误差有一定提升, IGSO卫星径向误差约0.3 m, MEO卫星可视弧段径向误差约0.2 m.

图6为卫星轨道测定精度重叠弧段比较, 图6(a)–(c)为定轨弧段内3 d重叠2 d轨道结果在径向、切向和法向的互差, 图6(d)–(f)为卫星轨道预报1 d与事后轨道结果在径向、切向和法向的互差, 蓝色为仅星地链路定轨结果, 红色为加入星间链路后联合定轨结果. 从图中看出, 加入星间测距数据后, 无论定轨弧段还是预报弧段, 重叠弧段均得到明显提升. 采用联合定轨的方式, 定轨弧段轨道径向重叠互差优于0.1 m, 三维位置重叠弧段优于0.5 m; 预报24 h重叠弧段径向优于0.2 m, 三维位置优于1 m.

IIS, M1S和M2S的重叠弧段比较细节详见图7, 图

中蓝色为仅星地链路定轨重叠弧段用户距离误差(User Ranging Error, URE)结果, 绿色为联合定轨重叠弧段URE结果, 前2 d为定轨弧段比较结果, 后1 d为预报弧段比较结果, 图中高度角是卫星相对于区域监测网的高度角. 从中可以看出, 在仅星地链路条件下, MEO卫星重叠弧段波动较大, 且预报弧度精度衰减也较快. 加入星间测距数据, MEO卫星境外弧段的轨道互差与可视弧段无明显差异, 预报精度也得到明显改善, 表明通过星间链路增加对MEO卫星的覆盖, 可以有效弥补区域监测网导致的MEO卫星轨道境外弧段轨道误差增大的问题, 也明显提升了轨道预报精度.

4 卫星钟差半约束模式轨道处理性能分析

导航卫星定轨解算的卫星钟差序列中包含轨道周期变化特性, 是定轨估计时卫星轨道与钟差耦合导

表4 卫星钟差估计值拟合残差

Table 4 Satellite clock offsets estimation error

卫星	星地星间联合定轨模式的卫星钟差 (m)	仅星地链路定轨模式的卫星钟差 (m)
IIS	0.26	0.32
I2S	0.34	0.51
M1S	0.19	0.18
M2S	0.22	0.24

图6 (网络版彩图)卫星轨道测定精度重叠弧段统计. (a)–(c) 定轨弧段内3 d重叠2 d轨道结果在径向、切向和法向的互差; (d)–(f) 卫星轨道预报1 d与事后轨道结果在径向、切向和法向的互差

Figure 6 (Color online) Overlap of satellite orbits. (a)–(c) Two-day orbit overlap in the radial, along and cross directions; (d)–(f) differences of 1 d predicted orbits with respect to the precise orbits in the radial, along and cross directions.

图7 (网络版彩图) IIS/M1S/M2S重叠弧段URE比较. (a) IIS卫星重叠弧段比较结果; (b) M1S卫星重叠弧段比较结果; (c) M2S卫星重叠弧段比较结果

Figure 7 (Color online) URE Comparisons of IIS, M1S and M2S. (a) The overlap difference for IIS; (b) the overlap difference for M1S; (c) the overlap difference for M2S.

致的^[9-13]. 文献[14]提出利用星地双向钟差测量值修正导航电文轨道误差, 进而提高导航电文空间信号精度. 文献[15]针对GEO卫星轨道和钟差估计值相关性高的问题, 提出约束星地双向钟差测量值只估计卫星轨道参数的方法, 提高GEO卫星轨道测定与预报精度的方法.

北斗新一代试验卫星可以通过星地双向测距和星间双向测距完成卫星钟差测定, 这样就不受卫星轨道误差、测站坐标误差等影响, 可以直接高精度测定卫星钟变化参数. 若在定轨处理时约束钟差变化参数, 即采用卫星钟差半约束模式轨道测定处理, 就可实现卫星轨道与钟差的分离, 进而提升卫星轨道测定精度. 由于钟差测量值包含设备通道时延引起的常数系统偏差, 因此, 在约束卫星钟差时, 要解算钟差测量序列中的常数偏差, 定轨处理策略见表4.

本文处理了2016年3月15–20日区域监测网采集的试验卫星伪距相位与星地双向钟差测量数据, 分别进行仅星地链路定轨处理和卫星钟差半约束的定轨处理. 利用用户等效距离误差(User Equalvent Ranging Error, UERE)比较仅星地链路定轨和卫星钟差半约束定轨获取的卫星预报轨道精度. UERE计算时观测值采用伪距双频无电离层组合观测值, 卫星钟差采用星地双向钟差, 接收机钟差精确已知, 对流层采用实测气象参数加Hopfield模型, 相对论效应、潮汐改正、卫星天线相位中心改正和接收机天线相位中心改正等均可准确建模. 表5比较了卫星钟差半约束模式定轨与不约束定轨相应的卫星轨道预报4 h UERE结果.

从表中统计可以看出, 卫星钟差半约束模式定轨处理通过约束卫星钟差变化, 所有试验卫星的UERE均有所减小, 如IIS卫星UERE减小了约10%, 从1.15 m

表 5 卫星钟差半约束模式定轨与不约束定轨预报轨道 UERE 结果**Table 5** UERE of clock fixed orbit determination and standard orbit determination

卫星	卫星钟差半约束模式定轨处理 (m)	卫星钟差不约束模式定轨处理 (m)
IIS	1.05	1.15
I2S	0.56	0.65
M1S	0.91	1.32
M2S	0.74	1.05
平均	0.82	1.04

减小为1.05 m, M1S和M2S卫星UERE减小超过30%.

5 结果与讨论

本文介绍了北斗新一代试验卫星在卫星钟和轨道测定方面的新技术体制, 评估了其所实现的实际性能和相对于北斗区域系统的性能提升. 结果表明: 新一代试验星新型星载原子钟预报性能与北斗区域系统相比较有约一倍提升, IGSO卫星短期预报误差从0.65 ns

减小到0.30 ns, MEO卫星短期预报误差从0.78 ns减小到0.32 ns, IGSO/MEO卫星中期预报误差均从2.50 ns减小到约1.50 ns; 采用星间链路双向测距可以增加MEO卫星钟差的测量弧段, 有效降低MEO卫星境外弧段的卫星钟差预报误差, MEO卫星重新入境时钟差预报误差由3 ns减小至1 ns以内. 星地星间联合定轨试验表明, 卫星轨道径向重叠弧段互差优于0.1 m, 三维位置重叠互差优于0.5 m, 预报24 h径向重叠弧段互差优于0.2 m, 三维位置重叠互差优于1 m, 较区域监测网L波段定轨结果有较大提升; 本文提出的卫星钟差半约束模式轨道处理方法可以解决卫星轨道与钟差耦合问题, 提高卫星轨道测定与预报精度, 卫星轨道预报4 h用户等效距离误差由1.04 m减小至0.82 m.

上述试验分析仅是在5颗试验卫星条件下有限观测数据量得到的初步结果, 后续随着试验卫星的长期运行观测, 还需基于更加充分的观测数据给予更加丰富的实验分析, 特别是卫星钟性能需要有更长期的运行考核, 星间链路需要结合后续组网发射卫星进行更加充分的钟差与轨道测定性能分析.

致谢 感谢北京卫星导航中心为本文提供的重要数据来源, 感谢上海天文台廖新浩研究员对本文提出的意见和建议.

参考文献

- Guo H R. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellites (in Chinese). Dissertation For Doctoral Degree. Zhengzhou: The Information Engineering University, 2006 [郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究. 博士学位论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006]
- Liu L, Zhu L F, Han C H, et al. The model of radio two-way time comparison between satellite and station and experimental analysis. *Chin Astron Astrophys*, 2009, 33: 431–439
- Han C H, Cai Z W, Lin Y T, et al. Time synchronization and performance of Beidou satellite clocks in orbit. *Int J Navigation Observation*, 2013, 2013: 1–5
- Liu L, Tang G F, Han C H, et al. The method and experiment analysis of two-way common-view satellite time transfer for compass system. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 089502
- Wanninger L, Beer S. Beidou satellite-induced code pseudorange variations: Diagnosis and therapy. *GPS Solut*, 2015, 19: 639–648
- Fernández F A. Inter-satellite ranging and inter-satellite communication links for enhancing GNSS satellite broadcast navigation data. *Adv Space Res*, 2011, 47: 786–801
- Kristine P, Paul A, John L. Crosslinks for the next-generation GPS. *IEEE*, 2003, 4: 1589–1595
- Wolf R. Satellite Orbit and Ephemeris Determination Using Inter Satellite Links. Dissertation for Doctoral Degree. Munehen: University of Munehen, 2000
- Zhou S S, Cao Y L, Zhou J H, et al. Positioning accuracy assessment for the 4GEO/5IGSO/2MEO constellation of COMPASS. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55: 2290–2299
- Mao Y, Du Y, Song X Y, et al. GEO and IGSO joint precise orbit determination. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 1009–1013
- Svehla D, Schnemann E, Escobar D, et al. Complete relativistic modelling of the GIOVE-B clock parameters and its impact on POD, track-to-track ambiguity resolution and precise timing applications. In: *Proceedings of IGS Analysis Center Workshop*. Newcastle: IGS, 2010

- 12 Zhou S S, Hu X G, Wu B, et al. Orbit determination and time synchronization for a GEO/IGSO satellite navigation constellation with regional tracking network. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 1089–1097
- 13 Zhou S S. Studies on Precise Orbit Determination Theory and Application for Satellite Navigation System with Regional Tracking Network (in Chinese). Dissertation For Doctoral Degree. Shanghai: Shanghai Astronomy Observatory, 2011 [周善石. 基于区域监测网的卫星导航系统精密定轨方法研究. 博士学位论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2011]
- 14 He F, Zhou S S, Hu X G, et al. Satellite-station time synchronization information based real-time orbit error monitoring and correction of navigation satellite in Beidou System. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57: 1395–1403
- 15 Li X J, Zhou J H, Hu X G, et al. Orbit determination and prediction for Beidou GEO satellites at the time of the spring/autumn equinox. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 089501

Orbit determination and time synchronization for new-generation Beidou satellites: Preliminary results

CHEN JinPing^{1*}, HU XiaoGong^{2,3*}, TANG ChengPan^{2,4}, ZHOU ShanShi^{2,3},
GUO Rui¹, PAN JunYang^{2,4}, LI Ran^{2,4} & ZHU LinFeng¹

¹ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;

² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

³ Shanghai Key Laboratory for Space Positioning and Navigation, Shanghai 200030, China;

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Five new-generation Beidou Satellite Navigation System (BDS) satellites, including two satellites in the Inclined Geostationary Orbit (IGSO) and three satellites in the Medium Orbit (MEO), have completed deployment on 1st February 2016. The mission of the five new-generation satellites is to validate the new system designs and the new technologies that will successfully expand BDS's Positioning, Navigation and Timing (PNT) services from regional to global. Responsible to keep time and frequency standards that are used to generate navigation signals, atomic clocks are important payloads onboard BDS satellites. Using data from BDS' two-way satellite time and frequency transfer system, this paper evaluates performance of those new generation atomic clocks (Hydrogen Maser and Rubidium). Compared to the regional operational satellites onboard atomic clocks, the prediction accuracy of the new-generation onboard atomic clocks is improved. The short-term prediction error of IGSO satellites drops from 0.65 to 0.30 ns, the short-term prediction error of MEO satellites drops from 0.78 to 0.32 ns, and the media-term prediction error of IGSO and MEO satellites drops from 2.50 to 1.50 ns. Inter-Satellite Links (ISL) with measurement and data communication capabilities is one of the most important ingredient for global BDS system design. With ISL data collected for the five new-generation satellites, this paper compares differences in space signal accuracy, or orbits and clocks in broadcast navigation messages, with or without ISL contribution. Our finding confirms ISL contributes a great deal to the space signal accuracy, in particular when the satellites are not tracked by a regional network. With ISL measurements, the prediction error of MEO broadcast satellite clock parameters drops from 3 ns to within 1 ns when the MEO satellites go into the visual field once more. When ISL measurements join orbit determination as additional observation to L Band code and phase measurements, the orbit determination and prediction accuracy is greatly improved: the radial orbit overlap difference is better than 0.1 m, three-dimensional overlap difference better than 0.5 m and 24 h prediction radial orbit overlap difference is better than 0.2 m, three-dimensional overlap difference better than 1.0 m. Furthermore, with clock measurements obtained with ISL, clock estimates may be decoupled from orbital estimates during orbit determination process for better solutions. A new strategy is proposed in this paper, in which the variation of the satellite clock offsets is constrained and kept as known in orbit determination. With the new strategy, the 4 h prediction UERE drops from 1.04 to 0.82 m.

Beidou satellite navigation system, space-borne atomic clocks, inter-satellite links, satellite clock offsets, orbit determination, space signal accuracy, two-way satellite time and frequency transfer

PACS: 95.10.Eg, 06.30.Ft, 91.10.Fc, 96.25.Vt

doi: 10.1360/SSPMA2016-00281