

北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定

潘军洋^{1,2*}, 胡小工^{1,3}, 唐成盼^{1,2}, 周善石^{1,3}, 李冉^{1,2}, 朱陵凤⁴, 唐桂芬⁴, 胡光明⁴,
常志巧⁴, 吴杉⁴, 苏冉冉⁴

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. 上海市定位与导航重点实验室, 上海 200030;
4. 北京卫星导航中心, 北京 100094

* 联系人, E-mail: panjy@shao.ac.cn

2016-08-29 收稿, 2016-09-23 修回, 2016-09-23 接受, 2017-04-25 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFB0501900)、国家自然科学基金(41574029)和中国科学院青年创新促进会基金(2016242)资助

摘要 北斗导航卫星系统BDS已在新一代试验卫星星座上成功实现了星间链路(ISL)相互伪距测量. 对时分体制Ka频段星间钟差测量实测数据的分析表明, 虽然星间钟差测量的随机误差水平达到了10 cm (RMS)水平, 但其中仍包含显著的系统性测量误差. 该系统误差严重影响了星间链路测量在星间时间同步和提升轨道精度等方面的应用. 分析表明, 该系统误差来源于星间链路信号收发设备的时延. 该时延在地面环境难以标定, 且地面标定值在卫星入轨和在轨工作期间受空间环境影响可能发生变化. 本文利用BDS星地L双向时频传递设备采集的星地钟差数据, 以及星间链路测量数据, 对星间链路收发设备的组合时延进行最优估计. 估计的具体策略是对任意一个卫星对, 利用这两颗卫星的星地钟差数据以及星间链路数据, 解算这两颗卫星星间链路设备的组合时延. 对2IGSO/2MEO新一代试验卫星星座连续14 d的数据处理结果表明, 每天对每颗卫星解算一组星间链路组合时延值, 该时延值的时间序列具有较好的稳定性, 其在14 d内的标准偏差小于0.3 ns. 将获得的组合时延值应用于星间相对钟差的测量, 星间链路对地数据测定钟差与星地L双向钟差测量结果得到的钟差具有较好的一致性, 证明了组合时延的自治性. 结果表明, 星间链路数据对MEO卫星境外弧段钟差预报精度提升尤为明显: 钟差监测弧段提升达到全弧段的40%以上; 卫星入境后, M1S预报误差从3.59降低至0.86 ns, M2S从1.94降低至0.57 ns.

关键词 北斗导航卫星系统 BDS, 星间链路, 收发链路组合时延, 钟差测定, MEO 卫星

北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, 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 geosynchronous orbit, IGSO)和4颗中轨道卫星(medium orbit, MEO)构成的空间星座组网, 正式向亚太地区提供导航、定位和授时服务^[1]. 按照“三步走”的发展战略, BDS正由区域服务走向全球服务, 将于2020年前完成以MEO卫星为主的全球系统星座

组网(<http://www.beidou.gov.cn>).

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, 其目的是开展星载原子钟、星间链路和新型导航信号体制等方面的试验, 验证北斗全球系统体制规划与技术标准. 新一代导航试验卫星的发射记录见表1.

与区域系统主要依赖GEO卫星和IGSO卫星实现

引用格式: 潘军洋, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定. 科学通报, 2017, 62: 2671–2679

Pan J Y, Hu X G, Tang C P, et al. System error calibration for time division multiple access inter-satellite payload of new-generation Beidou satellites (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2671–2679, doi: 10.1360/N972016-00782

表1 北斗新一代导航试验卫星空间星座情况

Table 1 Status of next-generation BDS satellites constellation

卫星	发射时间(UTC)	运载火箭	轨道位置	运行状态
I1S	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

亚太地区覆盖不同^[2~4], BDS全球导航系统必须通过均匀分布的MEO卫星实现导航信号和服务的全球覆盖^[5]. 然而由于各种原因, BDS全球系统仍然主要通过区域的地面监测网完成卫星轨道确定和钟差测定^[6]. 计算表明, 中国境内区域监测网对MEO卫星的有效跟踪弧段不足全弧段的40%, 严重影响导航卫星的空间信号精度. 因此, BDS提出通过导航卫星的星间链路(inter-satellite link, ISL)相互测量来弥补区域监测网对MEO卫星跟踪覆盖不足, 并在试验卫星星座上成功实现了ISL.

对BDS试验卫星星座实测数据分析表明, 星间测量伪距中包含星间链路信号收发设备的时延导致的系统性测量误差. 该系统误差严重影响了星间链路测量在星间时间同步和提升轨道精度等方面的应用. 本文利用BDS星地L双向时频传递设备采集的星地钟差数据, 以及星间链路测量数据, 对星间链路设备收发时延差进行估计以实现在线的系统误差标定, 发展了时延在线标定技术. 并将该方法用实测数据检验, 得到了较好的结果. 将系统差修正后的星间链路相对钟差应用于卫星相对于BDT钟差的预报, 结果表明星间链路数据对于MEO卫星境外弧段钟差测定精度提升尤为明显.

1 时分星间链路体制测量实现的时间同步

通过星间链路(图1)可获得区域地面监测网无法监测到的境外卫星相对于BDT的钟差, 其原理如下: 假定有卫星A、B和地面站C, 其中地面站C维持了BDS的系统时间BDT. A和C可建立星地双向链路, A和B可建立星间双向链路, 通过星地双向链路AC, 得到某时刻A与地面站C的星地钟差 Δt_{CA} , 如果认为地面站钟差为0(即该站实现的是系统时间), 则可得到卫星A的钟差 Δt_A , 以及通过星间双向链路AB得到同一时刻卫星A与卫星B的星间相对钟差 Δt_{AB} , 则卫

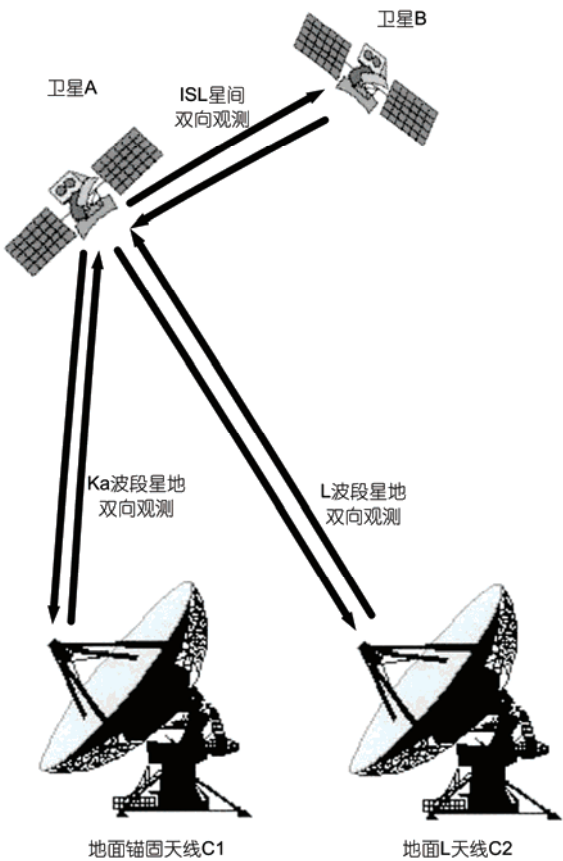


图1 星间链路测量示意图
Figure 1 Inter-satellite link and two-way satellite time and frequency transfer

星B的钟差 Δt_B 为

$$\Delta t_B = \Delta t_{AB} + \Delta t_A. \quad (1)$$

BDS采用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的偏差^[7,8]. 假定L波段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、下行伪距作钟面时归算, 比对归算后的伪距即可得到卫星相对于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,且不受对流层延迟的建模误差、卫星轨道误差和测站坐标的影响。文献[8]表明,星地双向时频传递获得的区域系统卫星钟差短期拟合残差优于0.3 ns。而试验卫星配置了性能更好的铷钟和被动型氢钟,其短期拟合残差达到了0.1 ns^[9]。在定轨使用星地双向钟差作为钟差固定值,可使BDS区域系统GEO卫星的UERE减小27.6%^[10]。2016年4月7日试验卫星的星地双向钟差扣除趋势项后残差如图2所示。

北斗新一代试验卫星通过星上搭载的ISL测距设备实时完成卫星间双向伪距测量。时分体制下两颗建链卫星依次发射测量信号,完成一次星间相互测量,之后再轮循与其他卫星进行星间相互测量^[11],由于信号在卫星间传播存在时延,需根据卫星预报星历和钟差信息,将不同时刻观测量归算至相同时刻^[6]:

$$\begin{aligned}\rho_{BA}(T_0) &= |\mathbf{r}_A(T_0) - \mathbf{r}_B(T_0)| + \Delta t_A(T_0) - \Delta t_B(T_0) + \delta_{BA}, \\ \rho_{AB}(T_0) &= |\mathbf{r}_B(T_0) - \mathbf{r}_A(T_0)| + \Delta t_B(T_0) - \Delta t_A(T_0) + \delta_{AB},\end{aligned}\quad (2)$$

式中, $\rho_{BA}(T_0)$ 和 $\rho_{AB}(T_0)$ 为B星到A星、A星到B星的伪距, $\mathbf{r}_A(T_0)$ 和 $\mathbf{r}_B(T_0)$ 为 T_0 时刻A、B卫星位置, $\Delta t_A(T_0)$ 和 $\Delta t_B(T_0)$ 为 T_0 时刻A、B卫星钟差, δ_{BA} 和 δ_{AB} 分别为两次伪距测量中待修正误差项。式(2)仅包含 T_0 时刻的轨道和钟差信息,则定轨和时间同步观测量为

$$\begin{aligned}|\mathbf{r}_A(T_0) - \mathbf{r}_B(T_0)| &= |\mathbf{r}_B(T_0) - \mathbf{r}_A(T_0)| \\ &= (\rho_{BA}(T_0) + \rho_{AB}(T_0))/2 - (\Delta\delta_{AB} + \Delta\delta_{BA})/2,\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\Delta t_A(T_0) - \Delta t_B(T_0) &= -(\Delta t_B(T_0) - \Delta t_A(T_0)) \\ &= (\rho_{BA}(T_0) - \rho_{AB}(T_0))/2 + (\Delta\delta_{AB} - \Delta\delta_{BA})/2,\end{aligned}\quad (4)$$

其中,待修正的误差项主要来自与卫星有关的误差、

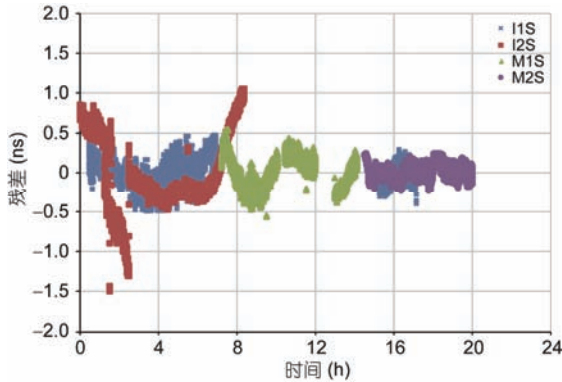


图2 (网络版彩色)星地双向钟差拟合残差

Figure 2 (Color online) Fitting residuals of clock offsets from TWSTFT

由信号传播引入的误差、其他误差^[11]。在基于星间测距星间自主定轨中,存在导航星座整体旋转问题^[12],其实质是观测方程秩亏的问题^[13],该问题可通过引入地面锚固站,增加星地链路观测值解决^[14],因此可以通过ISL获得卫星与锚固站的钟差。在ISL对地相互测量中,由于ISL测距频率高,残余电离层延迟仅为厘米级。在ISL的星间相互测量中,与测站相关的误差项不必考虑;导航卫星轨道较高,对流层延迟可以忽略;高层稀薄电离层引起的电离层延迟远小于星地测量中的电离层延迟,因此也可以忽略。2016年4月7日试验卫星ISL各链路扣除趋势项后的残差如图3所示。

图2和3拟合中误差见表2。从图2, 3及表2可以看出,星地双向钟差残差在0.5 ns (RMS)水平,残差有明显的趋势性;而ISL钟差残差达到0.25 ns (RMS)水平,等效距离误差10 cm左右,且主要表现为随机噪声。

图4和表3对比了2016年4月7日试验卫星星地双向钟差测量与卫星对北京锚固站ISL数据测定的卫星钟差,如果认为北京锚固站站钟差为0,则ISL对地钟差即卫星相对BDT的钟差。图4给出4颗试验卫星星地双向钟差测量与星间链路对地数据测定的卫星钟差之差,从中可以看出,ISL对地钟差与星地双向钟差仍存在较大偏差。表3分别给出了M1S由两种钟差测量值拟合的卫星钟差预报参数及拟合残差。参考时刻均为4月7日BDT的10:00。从表3可以看出,星间链路对地数据测定钟差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中A1差别为 $4.31 \times 10^{-14} \text{ s s}^{-1}$,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;而A0差别达到 $38815.476 \times 10^{-5} \text{ s}$,说明ISL钟差与L波段钟差之间的偏差为常数偏差。由误差分析,该常数偏差来源于星间链路信号收发设备的时延。该时延在地面环境难以标定,且地面标定值在卫星入轨和在轨工作期间受空间环境影响可能发生变化。下文将介绍一种在线测定星间链路设备时延值的方法,由于单独测定设备收、发时延较困难,考虑从每颗卫星组合时延的角度进行标定。

2 星间链路设备时延估计

假设A、B卫星同时对地有L波段双向观测,星地钟差为 Δt_A , Δt_B ,同一时刻AB间可建立星间链路,测得的星间相对钟差为 Δt_{BA} ,可得星间设备系统偏差:

$$\frac{\tau_A - \tau_B}{2} = \Delta t_A - \Delta t_B - \Delta t_{BA}, \quad (5)$$

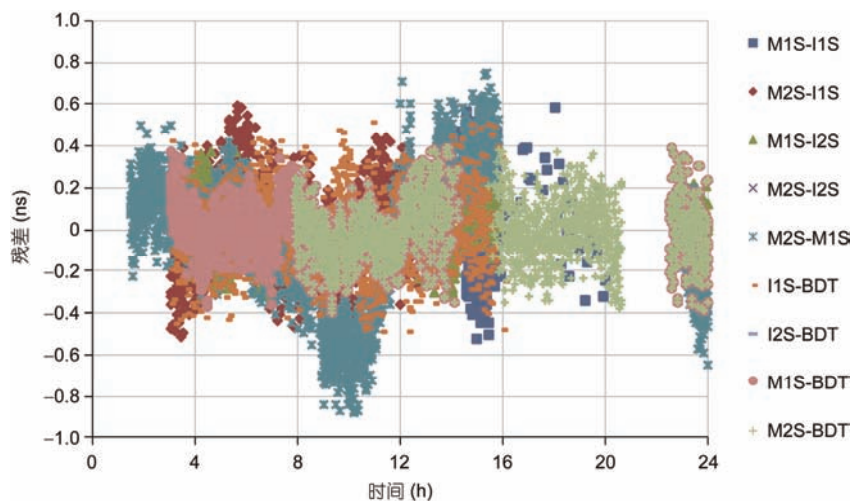


图3 (网络版彩色)ISL钟差拟合残差
Figure 3 (Color online) Fitting residuals of clock offsets from ISL

表2 2016年4月7日ISL钟差及星地双向钟差拟合中误差比较
Table 2 Fitting RMS of clock offsets from ISL and TWSTFT

链路	ISL钟差(ns)	星地双向钟差(ns)
I1S-BDT	0.176	0.237
I2S-BDT	0.133	0.498
M1S-BDT	0.155	0.198
M2S-BDT	0.139	0.093
M1S-I1S	0.212	—
M2S-I1S	0.208	—
M1S-I2S	0.138	—
M2S-I2S	0.146	—
M2S-M1S	0.329	—

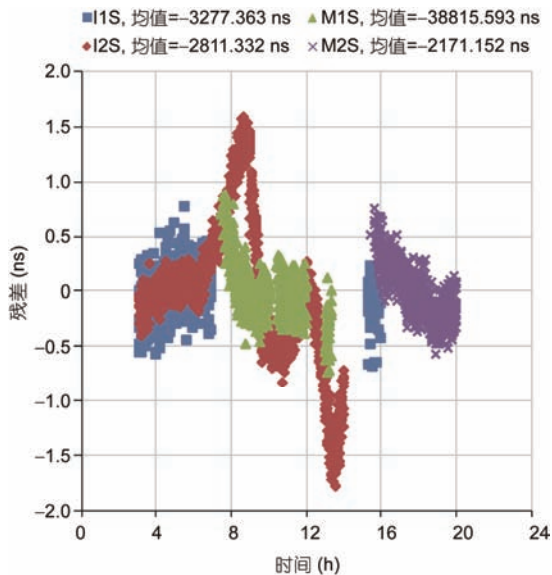


图4 (网络版彩色)卫星星地双向钟差与ISL对地钟差互差
Figure 4 (Color online) Difference of clock offsets from TWSTFT and ISL satellite-ground link

式中, $\tau_A = \tau_A^{\text{send}} - \tau_A^{\text{rcv}}$, $\tau_B = \tau_B^{\text{send}} - \tau_B^{\text{rcv}}$ 为卫星A和卫星B星间链路设备发射时延与接收时延之差. 在由式(4)计算 Δt_{BA} 时, 为提高解算精度, 采用事后精密轨道和钟差信息. 由式(5)可建立以每颗卫星的星间链路设备收发时延组合为待估参数的法方程, 该法方程秩亏为1, 需要固定其中一个参数. 由于I2S卫星自身可见弧段、与其他卫星建链弧段均较长, 因此固定I2S组合时延, 通过整网平差的方式求解其他参数.

由式(3), 定轨观测量中包含星间链路设备收发时延之和, 因此可在星地星间联合定轨中以每颗星间链路设备收发时延之和为待估参数进行解算, 最终得到星间链路设备的发射时延及接收时延.

采用2016年4月7日至4月20日L波段星地钟差数据及ISL钟差数据, 固定I2S的组合时延, 每天解算一组星间链路设备组合时延, 时延波动如图5所示, 其中“BJ”表示北京锚固站的组合时延. 从图5中可以看出, 对3颗待解算试验卫星, 该时延14 d的标准差达到0.3 ns以下, 说明该方法解算的时延具有较好的时间稳定性. 将解算的组合时延代入ISL钟差, 对ISL钟差与L波段钟差的一致性进行比较. 表4为表3中ISL数据进行时延修正后重新拟合计算的结果. 表4中A0差别为 2.86×10^{-10} s, 达到了与L波段钟差参数前后两相同时长弧段拟合参数之差相当, 证明了解算的组合时延的自恰性.

3 星地星间联合钟差建模

由表4可以看出, 星间链路对地测定的钟差拟合

表 3 M1S星地双向钟差与时延未修正的ISL星地钟差拟合参数比较^{a)}

Table 3 Clock offsets parameter of M1S from TWSTFT and uncorrected ISL satellite-ground link

弧段	A0 (10^{-5} s)	A1 (10^{-11} s s $^{-1}$)	RMS (10^{-11} s)
L波段弧段1 (X1)	8.3571236	2.77796	11.6
L波段弧段2 (X2)	8.3571598	2.77357	6.1
ISL弧段(Y1)	12.2386712	2.78227	12.9
X1, X2钟差参数差	3.61×10^{-5}	4.39×10^{-3}	—
X1, Y1钟差参数差	3.8815476	4.31×10^{-3}	—

a) L波段弧段1时间段为BDT 8:00~10:00, L波段弧段2时间段为BDT 10:00~12:00, ISL弧段时间段为BDT 8:00~10:00

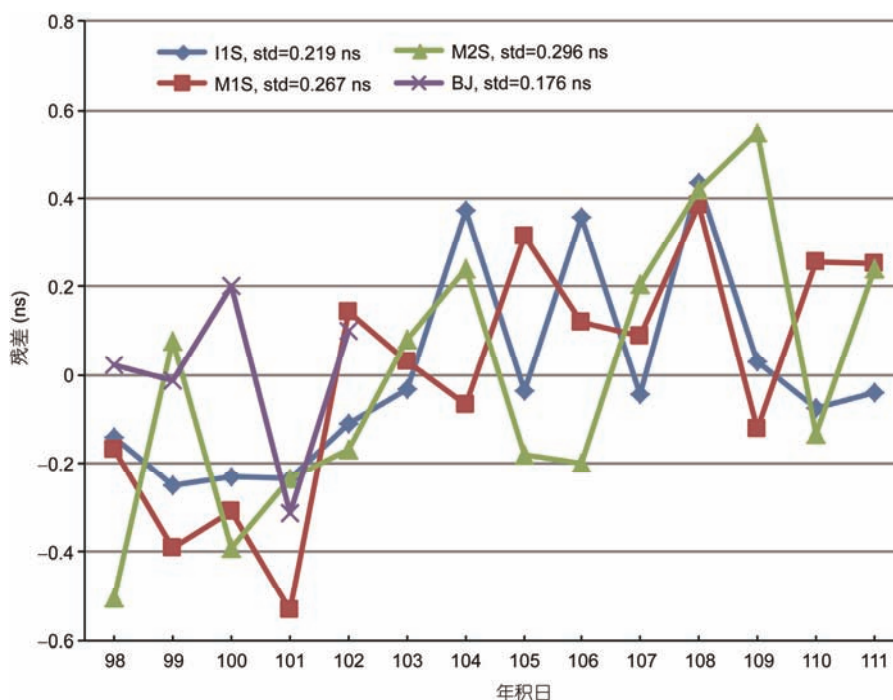


图 5 (网络版彩色)解算组合时延序列稳定性

Figure 5 (Color online) Stability of ISL delay estimates

表 4 2016 年 4 月 7 日M1S星L与时延修正后的ISL星地钟差拟合参数比较^{a)}

Table 4 Clock offsets parameter of M1S from TWSTFT corrected and ISL satellite-ground link

弧段	A0 (10^{-5} s)	A1 (10^{-11} s s $^{-1}$)	RMS (10^{-11} s)
L波段弧段1 (X1)	8.3571236	2.77796	11.6
L波段弧段2 (X2)	8.3571598	2.77357	6.1
ISL弧段(Y1)	8.3571522	2.78227	12.9
X1, X2钟差参数差	3.61×10^{-5}	4.39×10^{-3}	—
X1, Y1钟差参数差	2.86×10^{-5}	4.31×10^{-3}	—

a) L波段弧段1时间段为BDT 8:00~10:00, L波段弧段2时间段为BDT 10:00~12:00, ISL弧段时间段为BDT 8:00~10:00

残差与星地双向钟差测量结果拟合残差相当. 由于星间链路对地观测数据较少, 星间链路不参与境内弧段的卫星钟差测定. 当卫星在境外弧段, 星地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双向钟差测量一起平差, 得到境外卫星相对于BDT的绝对钟差.

因此本文确定的卫星钟差实时测定的策略为: 境内卫星使用星地双向钟差测定值; 境外卫星, 将星

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BDT的绝对钟差.

由于对于BDS的地面监测网, IGSO卫星大部分时间是可视的, 本文在以下仅讨论星间链路对于MEO卫星的监测弧段以及预报性能的提升. 按照上述方法处理了2016年4月7日至4月9日星间相对钟差和星地双向钟差. 对星间链路补充得到的全部钟差和仅星地双向钟差测量分别拟合, 拟合残差如图6所示. 从图6中看出, 星间链路数据可以大幅增加MEO卫星钟差测量弧段, 增加弧段时长达到全弧段40%以上. 但是注意到目前具有星间测距能力在轨卫星数目非常有限, 星间链路还不能完成MEO卫星的全弧段钟差测量.

从图6可以看出, 通过星间链路补充的钟差数据离散度较大, 导致全部钟差的精度较星地双向钟差略有降低. 这主要是由于境外卫星钟差测定中使用了星间链路钟差和星地双向钟差两类数据, 根据误差传播, 境外卫星相对于BDT钟差中同时包含这两类误差. 由前面的分析可以发现: (1) 星间链路钟差随机噪声较大, 约0.25 ns (RMS)水平; (2) 星地双向钟差拟合残差中还存在异常波动, 波动峰值最大可达2 ns; (3) 由于时分体制的原理, 对于同一颗卫星的某一境外弧段, 卫星钟差可能通过不同的“境内卫星钟差+星间链路钟差”组合交替获得. 这些因素共同影响导致了星间链路补充的钟差数据离散度增大.

当仅使用星地双向钟差测量时, 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. 图7为监测的M1S广播星历中钟差参数的预报误差.

如图7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. 统计2016年4月7日至4月14日多个弧段卫星重新入境后预报误差的变化, 平均中误差结果如图8所示. 从图8中可以看出, 加入星间链路钟差使卫星重新入境后预报误差有明显减小, 其中M1S从3.59降低至0.86 ns, M2S从1.94降低至0.57 ns.

综上, 加入星间链路后, MEO卫星钟差的可测定弧段大大延长, 平均提升了40%以上; 对于刚入境的MEO卫星, 由于加入了星间链路的观测数据, 使钟差预报结果能够快速收敛, 精度从2~4 ns提高到1 ns以内, 平均提升了70%, 说明星间链路观测数据的加入对钟差预报性能有明显提升. 但在入境弧段以后, 两种方法获得的钟差预报精度是相当的, 星间观测数据并没有提供更大贡献.

4 结论

本文对BDS新一代试验卫星星座的实测星间链路数据进行分析, 发现星间钟差测量的随机误差水平达到10 cm (RMS)水平, 是一种高精度的钟差测量; 但与L波段星地钟差比发现, 星间链路钟差中还存在来源于星间链路设备收发时延的系统误差. 本文利

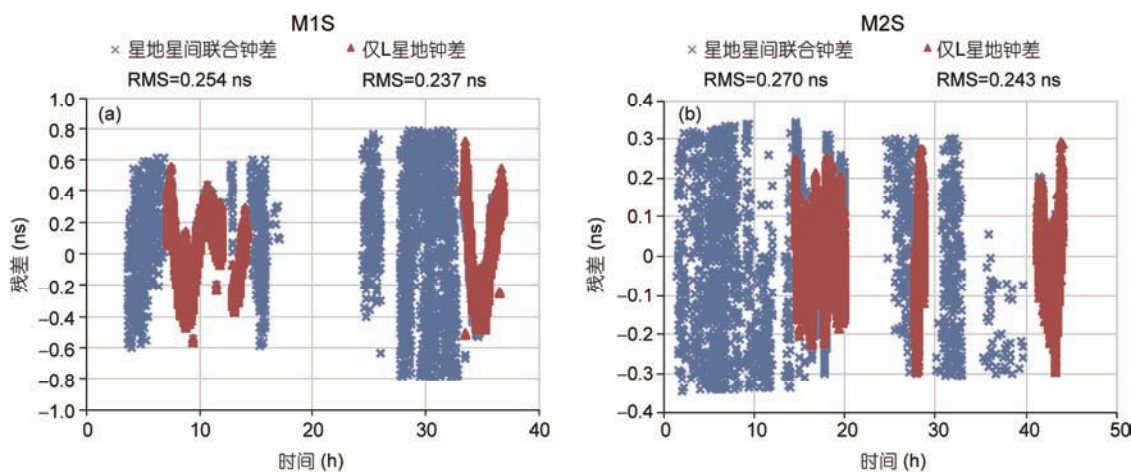


图6 (网络版彩色)MEO卫星联合钟差及星地双向钟差拟合残差. (a) M1S; (b) M2S

Figure 6 (Color online) Fitting residuals MEOs from combined clock offsets and TWSTFT. (a) M1S; (b) M2S

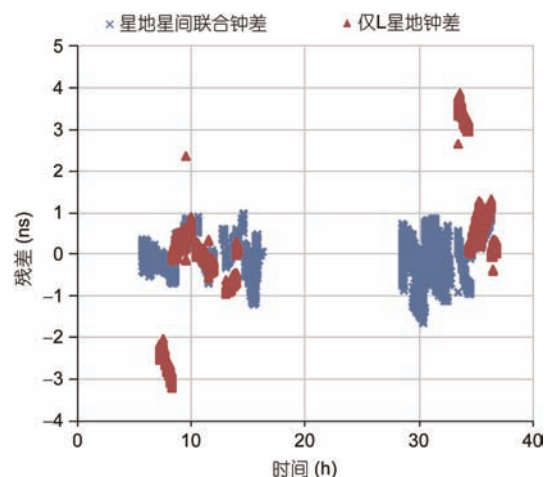


图7 (网络版彩色)M1S卫星联合钟差及星地双向钟差预报误差比较
Figure 7 (Color online) Predicting error of M1S from combined clock offsets and TWSTFT

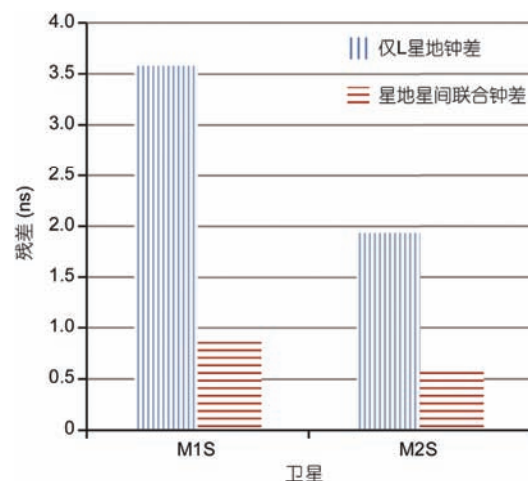


图8 (网络版彩色)MEO卫星入境弧段预报误差比较
Figure 8 (Color online) Predicting error reductions at the beginning of MEOs' regional station net section

用BDS星地L双向时频传递设备采集的星地钟差数据,以及星间链路测量数据,通过钟差比对的方法解算星间设备收发时延之差:对任意一个卫星对,利用这两颗卫星的星地钟差数据以及星间链路数据,解算这两颗卫星星间链路设备的组合时延。每天解算一组结果,时延14 d标准差小于0.3 ns,具有较好的时间稳定性;对星间钟差测量作时延修正后,ISL钟差与星地双向钟差具有较高的一致性,证明了该方法的正确性。更长时间序列的时延特性有待数据进一步积累后分析。该方法只能获得星间链路设备的收发时延之差,需与定轨解算的星间链路收发时延之和联合才能得到单独的发射时延及接收时延。

按照“境内卫星使用星地双向钟差测定值;境外卫星,将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BDT的绝对钟差”的策略使用星间钟差,发现加入星间链路钟差后MEO卫星钟差精度稍有降低,但在卫星监测弧段和境外弧段预报精度方面提升明显。其中M1S, M2S监测弧段提升均在全弧段的40%以上;重新入境后M1S预报误差从3.59减小至0.86 ns, M2S预报误差从1.94减小至0.57 ns。但目前尚不能实现MEO卫星的全弧段覆盖,未来更多具备星间相互测量的卫星加入后可解决该问题。

按照目前的星间钟差使用策略,可能由于轮循通过不同链路归算境外卫星钟差,而导致境外卫星钟差离散度较大,未来有更多卫星和锚固站时,归算链路数量将进一步增多,境外卫星钟差离散度也将随之增大。如何对不同链路归算的同一境外卫星钟差进行处理,从而降低境外卫星钟差离散度,有待进一步研究分析。

参考文献

- China Satellite Navigation Office. Beidou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal (Version 2.0) (in Chinese), 2013 [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]
- 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
- 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
- Hao X G, Chen X F, Zhang C J, et al. On designed coverage of 2nd generation of china satellite navigation system (in Chinese). J Geodesy Geodyn, 2007, 27: 119–122 [郝晓光, 陈晓峰, 张赤军, 等. 中国二代卫星导航系统设计覆盖范围的探讨. 大地测量与地球动力学, 2007, 27: 119–122]
- Yang Y X, Li J L, Xu J Y, et al. Contribution of the compass satellite navigation system to global PNT users. Chin Sci Bull, 2011, 56: 2813–2819
- 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 Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 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]
- 7 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 Astr*, 2009, 33: 431–439
- 8 Han C H, Cai Z W, Lin Y T, et al. Time synchronization and performance of Beidou satellite clocks in orbit. *Inter J Nav Observ*, 2013, doi: 10.1155/2013/371450
- 9 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 [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]
- 10 Tang C P, Hu X G, Zhou S S, et al. Improvement of orbit determination accuracy for Beidou Navigation satellite system with two-way satellite time frequency transfer. *Adv Space Res*, 2016, 58: 1390–1400
- 11 Zhu J. Research on orbit determination and time synchronizing of navigation satellite based on crosslinks (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2011 [朱俊. 基于星间链路的导航卫星轨道确定及时间同步方法研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科技大学, 2011]
- 12 Menn M D, Bernstein H. Ephemeris observability issues in the Global Positioning System (GPS) autonomous navigation (AUTONAV). In: *Proceedings of Position Location and Navigation Symposium*. Las Vegas, Nevada, New York: IEEE, 1994. 677–680
- 13 Liu L, Liu Y C. The rank lack problem in autonomous orbit determination using inter-satellite measurement. *J Spacecr Tt & C Tech*, 2000, 29: 80–83
- 14 Wang F F, Guo F X, Wen Y L. Influence of the quantity and distribution of anchor stations on autonomous orbit determination of navigation constellations. *J Spacecr Tt & C Tech*, 2015, 34: 254–259

Summary for “北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定”

System error calibration for time division multiple access inter-satellite payload of new-generation Beidou satellites

PAN JunYang^{1,2*}, HU XiaoGong^{1,3}, TANG ChengPan^{1,2}, ZHOU ShanShi^{1,3}, LI Ran^{1,2}, ZHU LingFeng⁴, TANG GuiFeng⁴, HU GuangMing⁴, CHANG ZhiQiao⁴, WU Shan⁴ & SU RanRan⁴

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 for Space Positioning and Navigation, Shanghai 200030, China;

⁴ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

* Corresponding author, E-mail: panjy@shao.ac.cn

The new-generation Beidou satellites constellation consists of 2 inclined geosynchronous orbit (IGSO) satellites and 3 medium orbit (MEO) satellites. The inter-satellite ranging payloads onboard provide the constellation with autonomous navigation capability. Each satellite navigates using the rest of the satellites in the constellation. The satellites perform two-way time division multiple access (TDMA) inter-satellite link (ISL) ranging using pseudo random codes. For some reasons, the global system of Beidou navigation satellite system (BDS) will still depend on its regional station net, which is not able to observe medium orbit satellites for the whole section. The ISL ranges also make it possible for BDS to obtain clock and orbit observables when the satellites cannot be seen by its limited regional stations. While ranging, the system errors of TDMA payloads on new-generation Beidou satellites must be considered, which are hard to calibrate on the ground and will affect the accuracy of inter-satellite time synchronization and orbit determination. In this paper, a calibration method of inter-satellite system error is proposed, and the application of ISL ranges on satellite-ground time synchronization is discussed. Firstly, the using strategy of ISL clock offset is discussed. The satellite-ground part obtained by L-band two-way satellite time frequency transfer (TWSTFT) is introduced and the satellite-satellite part obtained by inter-satellite link is modeled to obtain the clock and orbit observables. Broadcast ephemeris is used to decouple the inter-satellite clock offset and inter-satellite range, and the observation equations are provided. Secondly, the L-Band clock offset is used to calibrate the combined system error of each inter-satellite payload. By comparing inter-satellite clock offsets of a pair of satellites obtained by ISL with satellite-ground clock offsets of the same two satellites obtained by TWSTFT, a combination of signal transmitting delay and signal receiving delay is calibrated using least-squares estimation. The combined system error of one inter-satellite payload is fixed to solve the rank lack problem. The corrected clock offsets of ISL are then combined with clock offsets of TWSTFT to determine the satellite-ground clock offsets and calculate the predicting clock offset parameters while the satellites are out of the regional station net. The result shows that the accuracy of ISL clock offsets can reach 0.25 ns while the accuracy of TWSTFT clock offsets is 0.5 ns. The proposed method can calibrate the combined system errors and improve the accuracy of inter-satellite time synchronization. The standard deviations of a 14-day time series of combined inter-satellite system errors are less than 0.3 ns. And the calibrated ISL clock parameters are consistent with that of the L-band TWSTFT. The results of medium orbit satellite are quite remarkable: the monitoring section length increase more than 40% of the whole section length. At the beginning of the regional station net section, predicting error of satellite M1S is improved from 3.59 to 0.86 ns (RMS), predicting error of satellite M2S is improved from 1.94 to 0.57 ns (RMS). Taking into account all these results, we may reasonably come to the conclusion that inter-satellite link is a high accuracy measurement and it can improve the accuracy of clock offset prediction.

Beidou navigation satellite system (BDS), inter-satellite link (ISL), combination of signal transmitting delay and signal receiving delay, clock offset determination, medium orbit (MEO)

doi: 10.1360/N972016-00782