

引文格式:刘成,高为广,潘军洋,等.基于北斗星间链路闭环残差检测的星间钟差平差改正[J].测绘学报,2020,49(9):1149-1157. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200319.
LIU Cheng,GAO Weiguang,PAN Junyang,et al.Inter-satellite clock offsets adjustment based on closed-loop residual detection of BDS inter-satellite link[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49 (9) : 1149-1157. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20200319.

基于北斗星间链路闭环残差检测的星间钟差平差改正

刘 成¹,高为广¹,潘军洋²,唐成盼²,胡小工²,王 威¹,陈 颖¹,卢 鋈¹,宿晨庚¹

1. 北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094; 2. 中国科学院上海天文台,上海 200030

Inter-satellite clock offsets adjustment based on closed-loop residual detection of BDS inter-satellite link

LIU Cheng¹,GAO Weiguang¹,PAN Junyang²,TANG Chengpan²,HU Xiaogong²,WANG Wei¹,CHEN Ying¹,LU Jun¹,SU Chengeng¹

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: It is a common and effective method in engineering science to use the “closed-loop detection” idea to detect and correct the cumulative error of system measurement. This paper indicates the favorable closed-loop conditions in the global inter-satellite link (ISL) of BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3), and proposes to detect and analyze the closed residuals. On this basis, a network adjustment model of the closed residuals is constructed by which the correction of inter-satellite clock offsets is realized. Calculations based on the on-orbit measured data indicate that the obvious constant or periodic non-zero closed residuals really exist in the global ISL of BDS-3. Attributed to the correction of the closed-loop residuals of the ISL, the non-closed inter-satellite clock corrections are basically eliminated, the random noise of the inter-satellite clock corrections is reduced by 30% to 50% and the accuracy of the inter-satellite clock corrections are effectively improved. It is helpful for the service capability of BeiDou.

Key words: BDS; inter-satellite link (ISL); inter-satellite clock offset; closed residual; network adjustment

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61601009; 41974041); The Young Talent Supporting Program of the China Association for Science and Technology (No. 2019QNRC001)

摘 要:利用“闭环检测”思想检测和修正系统测量累积误差,是工程科学中的常用和有效手段。本文指出了北斗三号系统全球星间链路中所存在的有利闭环条件,并提出一种利用其进行闭合残差检测与分析的方法。在此基础上,构建了闭合残差整网平差模型,实现了对北斗三号卫星星间相对钟差的误差修正。基于在轨实测数据的计算表明,北斗三号系统全球星间链路中确实存在着明显的常数性或周期性非零闭合残差。通过对星间链路闭环残差的平差修正,基本消除了卫星星间钟差不闭合的现象,减少星间钟差随机噪声 30%~50%,有效提高了星间相对钟差测定的精度,有利于提升北斗系统服务能力。

关键词:北斗;星间链路;星间钟差;闭合残差;网络平差

中图分类号:P227

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1149-09

基金项目:国家自然科学基金(61601009;41974041);中国科协青年人才托举工程(2019QNRC001)

研究和计算表明,中国境内区域监测网对北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)中地球轨道(medium

earth orbits, MEO)卫星的有效跟踪弧段不足全弧段长度的 40%,严重影响卫星轨道和钟差测定精度以及系统服务性能^[1]。因此,星间链路

(inter-satellite link, ISL)成为 BDS-3 的必然技术选择,是弥补 BDS-3 海外监测站布设不足,实现境外卫星精确定轨与时间同步,提供全球化服务以及星基增强(satellite based augmentation system, SBAS)、精密单点定位(precise point positioning, PPP)^[2]等增强服务的重要基础和保障。基于北斗 ISL 实测数据,国内学者开展了很多相关研究。成果表明,目前北斗三号 ISL 测距精度已达到优于 10 cm 的水平^[3-5]。其中,文献[6]基于 4 颗北斗三号试验卫星进行星地星间联合定轨,相较于仅依赖于星地定轨,联合定轨精度提升明显,轨道径向重叠误差优于 0.1 m,三维位置优于 0.5 m。文献[7]研究了仅使用 ISL 数据的试验卫星定轨试验,并通过一个锚固站约束减弱星座整体旋转,IGSO 卫星径向重叠弧段精度优于 15 cm, MEO 卫星优于 10 cm。基于我国国际 GNSS 监测评估系统(international GNSS monitoring & assessment system, iGMAS)全球站星地伪距相位数据和北斗三号 ISL 数据,文献[8-9]比较了星地定轨和星地星间联合定轨,结果表明联合定轨的轨道三维位置精度优于 0.3 m。利用 ISL 数据和星地双向时频传递数据进行星地星间钟差联合测定,实现了钟差监测的全弧段覆盖^[10]。目前,星间链路已成功应用于北斗三号地面运控精密定轨和钟差测定。对北斗三号基本系统评估结果表明,在星间链路支持下,北斗三号广播星历用户距离误差(user range error, URE)优于 0.1 m,广播钟差参数预报精度优于 1.5 ns,空间信号(signal in space, SIS)精度整体优于 0.6 m^[11]。

闭环检测是工程科学中一种常用的误差检测与修正方法。例如,在大地导线测量中,要求从已知控制点出发,最终仍回到起点或另一已知点,形成闭合或附合导线,从而构成严密的几何条件,起到检核作用^[12-13];在视觉即时定位与建图(visual simultaneous localization and mapping, V-SLAM)中,通过重复识别同一路标(landmark)完成地图回环检测(loop-closure detection),修正机器人两次到达该地点之间的历史轨迹及传感器误差^[14-15];在惯导或组合惯导中,则利用载体的静止运动状态开展零速修正(zero velocity update, ZUPT),从而计算和标定惯性器件的系统误差^[16-17]。以上种种,其本质都是找到或创造了一个能够准确识别系统累积误差的参考约束条件,

并据此开展误差修正。

闭环检测的思想也同样适用于北斗 ISL 系统。基于 Ka 双向时分测量体制的北斗 ISL 从境内卫星出发,并最终回到境内,因此北斗 ISL 测量链路理论上能够形成全球范围内的大闭环。然而,由于各类误差因素的影响,北斗 ISL 测量链路实际上并未严格闭环;相反,在轨数据分析表明,目前链路中仍存在着较大误差残余。本文指出了北斗 ISL 中的闭环参考约束条件,并对其开展闭环残差检测和分析;在此基础上,对 ISL 闭环残差进行整网平差处理,实现了对星间相对钟差的误差修正。利用北斗三号卫星在轨实测数据进行了计算与验证。结果表明:本文方法消除了当前链路中所存在的闭环残差现象,减少星间钟差随机噪声 30%~50%,有效提高了北斗 ISL 系统测量以及星间相对钟差测定精度。

1 基于星间链路测量的时间同步

北斗星间链路采用 Ka 星间体制,按照预定路由规划表,每颗卫星采用时分方式与可建链卫星或地面站构建星间、星地测量链路^[18]。每次建链,每对卫星分时产生双向星间测距观测量。因此, Ka 星间双向测量并非严格意义上的双向同步观测,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同一时刻^[19-20]

$$\rho_{AB}(t_0) = |\mathbf{R}_B(t_0) - \mathbf{R}_A(t_0)| + c\Delta t_A(t_0) - c\Delta t_B(t_0) + c\tau_A^R + c\tau_B^T + \delta\rho_{AB}^{cor} + \epsilon_{AB} \quad (1)$$

$$\rho_{BA}(t_0) = |\mathbf{R}_A(t_0) - \mathbf{R}_B(t_0)| + c\Delta t_B(t_0) - c\Delta t_A(t_0) + c\tau_B^R + c\tau_A^T + \delta\rho_{BA}^{cor} + \epsilon_{BA} \quad (2)$$

式中, $\rho_{AB}(t_0)$ 、 $\rho_{BA}(t_0)$ 分别为 t_0 时刻卫星 A 至卫星 B、卫星 B 至卫星 A 的星间伪距测量值; $\mathbf{R}_A(t_0)$ 、 $\mathbf{R}_B(t_0)$ 分别为 t_0 时刻卫星 A 和卫星 B 的轨道位置; $\Delta t_A(t_0)$ 、 $\Delta t_B(t_0)$ 分别为 t_0 时刻卫星 A 和卫星 B 的绝对钟差; τ_A^T 、 τ_A^R 为卫星 A 的发射(transmit)时延和接收(receive)时延; τ_B^S 、 τ_B^R 为卫星 B 的发射时延和接收时延; $\delta\rho_{AB}^{cor}$ 、 $\delta\rho_{BA}^{cor}$ 为单向测距值中可以精确建模的误差改正量,包括卫星天线相位中心偏差、相对论效应等; ϵ_{AB} 、 ϵ_{BA} 为测量噪声; c 为光速。

采用双向测距的主要原因是利用双向测量可以解耦得到星间测距观测量和星间时间同步观测量。将式(1)与式(2)分别相加及相减,可分别得到定轨观测方程与时间同步观测方程

$$\rho_{AB}^+ = \frac{\rho_{AB}(t_0) + \rho_{BA}(t_0)}{2} = |\mathbf{R}_A(t_0) - \mathbf{R}_B(t_0)| + c \frac{\tau_A^R + \tau_A^T}{2} + c \frac{\tau_B^R + \tau_B^T}{2} \quad (3)$$

$$\rho_{AB}^- = \frac{\rho_{AB}(t_0) - \rho_{BA}(t_0)}{2} = c(\Delta t_A(t_0) - \Delta t_B(t_0)) + c \frac{\tau_A^R - \tau_A^T}{2} - c \frac{\tau_B^R - \tau_B^T}{2} = c \Delta t_{AB}(t_0) + c \frac{\tau_A^R - \tau_A^T}{2} - c \frac{\tau_B^R - \tau_B^T}{2} \quad (4)$$

利用时间同步观测方程(4),可解算得到卫星 A、B 之间的星间相对钟差 Δt_{AB} ;进一步地,在卫星 A、B 同时有对地 L 波段双向测量时,可准确测定卫星 A、B 的绝对钟差 Δt_A 和 Δt_B ,并进而标定 ISL 设备收发时延^[1]。

目前,对于境内弧段卫星,使用星地双向钟差测量值确定其相对于地面北斗时(BeiDou navigation satellite system time, BDT)的绝对钟差,ISL 数据不参与境内卫星的钟差测定;对于境外弧段卫星,星地双向时频传递无法完成钟差测定时,通过 ISL 测定的星间相对钟差与境内卫星的星地双向钟差联立,得到境外卫星相对于 BDT 的绝对钟差。

2 星间钟差闭环残差检测

2.1 星间链路闭环条件

当某条北斗星间测量链路从境内弧段某颗卫星出发,经过与境外弧段卫星之间的测量传递并最终回到境内弧段卫星,此时即构成了全球范围内的 ISL 大闭环,如图 1 所示。

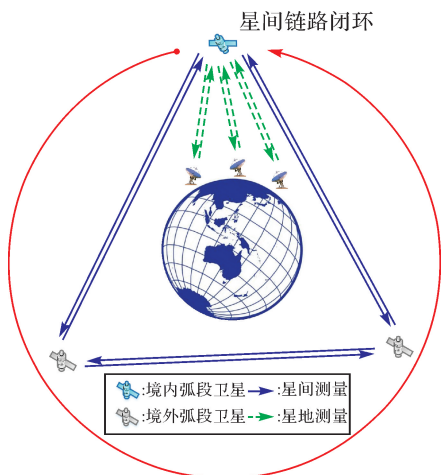
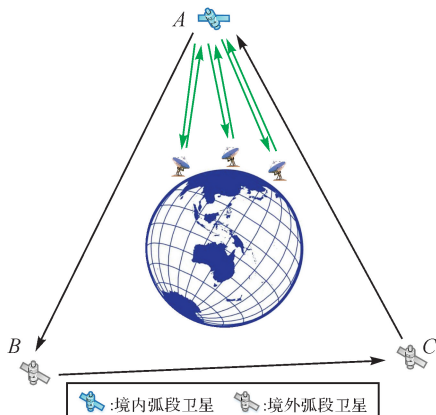


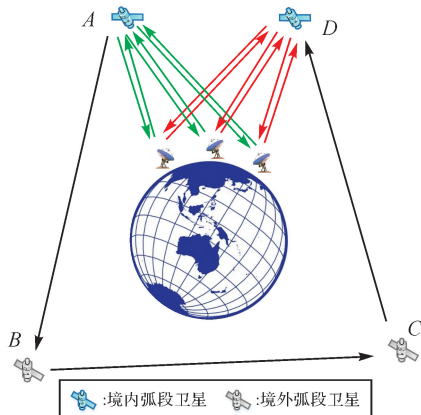
图 1 北斗星间链路全球闭环

Fig.1 Global closed-loop of BDS ISL

北斗 ISL 测量一般经过两颗境外卫星的两次“跳转”后即可回到境内。实际上,北斗全球 ISL 闭环还具体包括两类不同的情况:一是从境内卫星 A 出发,并最终回到 A,如图 2(a)所示;二是从境内卫星 A 出发,但最终回到另外一个境内卫星 D,如图 2(b)所示。



(a) 回到同一境内卫星



(b) 回到不同境内卫星

图 2 两类全球 ISL 闭环条件

Fig.2 Two different global closed-loop conditions of BDS ISL

第 1 种情况类似于大地测量“闭合导线”条件,境内卫星 A 经星间 Ka 波段相对钟差测量和传递回来后所重新得到的钟差 $\Delta t'_A$,理论上应该严格等于卫星 A 通过 L 波段星地双向时间比对(two-way satellite-ground time comparison, TSTC)体制所测定得到的绝对钟差 Δt_A ,从而满足闭合检核条件。第 2 种情况则类似于大地测量“附和导线”条件,境内卫星 A 经星间 Ka 波段相对钟差测量和传递后得到另一境内卫星 D 的钟差 $\Delta t'_D$ 。理论上, $\Delta t'_D$ 应该严格等于卫星 D 通过星地 L 波段 TWSTFT 体制所测定得到的绝对钟

差 Δt_D , 从而满足附和检核条件。

两类情况不同均可用闭环残差检测, 作为约束基准, 但其中作为附和条件的第 2 种情况中不仅包含了星间设备时延标定误差引起的闭合差, 还包含了地面天线的时延标定误差(有时甚至能达到 1 ns 以上), 因此其约束作用要弱于闭合条件, 在使用时应当引起注意。

2.2 星间钟差闭环残差计算

如上所述, 北斗 ISL 采用双向时分测量体制, 同一历元一颗卫星仅与另一颗卫星有归算后的星间相对钟差。因此, 为计算星间钟差闭环残差, 需要通过插值方法(如三次样条法等)对不同历元所得到的星间钟差数据进行内插计算, 以进行时间对齐。

在此基础上, 对于某一闭合链路“境内卫星 A → 境外卫星 B → 境外卫星 C → 境内卫星 A”, 假设两两卫星之间的相对钟差分别为 Δt_{AB} 、 Δt_{BC} 和 Δt_{CA} , 那么它们理论上应该满足

$$\Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CA} = 0 \quad (5)$$

但由于实际系统及测量误差的存在, 上述闭合链路并未严格闭环。因此, 其相对钟差闭合残差 $\delta\Delta t_{ABCA}$ 为

$$\delta\Delta t_{ABCA} = \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CA} \quad (6)$$

对于某一附和链路“境内卫星 A → 境外卫星 B → 境外卫星 C → 境内卫星 D”, 假设两两卫星之间的相对钟差分别为 Δt_{AB} 、 Δt_{BC} 和 Δt_{CD} , 卫星 A、D 的绝对钟差分别为 Δt_A 和 Δt_D , 那么它们理论上应该满足

$$\Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CD} + (\Delta t_A - \Delta t_D) = 0 \quad (7)$$

但由于实际系统及测量误差的存在, 上述附和链路也并未严格闭环。因此, 其星间相对钟差闭合残差 $\delta\Delta t_{ABCD}$ 为

$$\delta\Delta t_{ABCD} = \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CD} + (\Delta t_A - \Delta t_D) \quad (8)$$

2.3 残差限差确定

以上给出了北斗 ISL 的两种闭环条件及其残差计算方法。与此同时, 类似大地导线和高程水准测量内业, 在进行残差改正之前, 也可以根据北斗 ISL 实际测量误差水平推导给出上述闭环残差的容许范围(限差)。

目前, 北斗 Ka 波段 ISL 双向测距误差 σ_{ISL} 为 0.3 ns 左右(RMS)^[1,19]。卫星星间钟差实际上是经过历元归化处理后的星间双向观测值之差, 归化精度取决于卫星预报速度和预报钟速的精度。由于观测历元与目标归化历元的时间差小于

3 s, 卫星预报速度误差约为 0.1 mm/s, 预报钟速误差约为 1×10^{-13} s/s, 因此归一化处理的误差小于 1.0 cm, 在当前残差限差的计算中可忽略不计。以三星闭合链路为 A → B → C → A 的星间钟差闭合残差中误差 $\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}}$ 满足

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}} = \sqrt{\sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2} = \sqrt{3}\sigma_{ISL} \approx 0.52 \text{ ns} \quad (9)$$

参考大地导线测量, 取 2 倍中误差作为闭合残差限差 $\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA限}}$, 则有

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA限}} = 2\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}} \approx 1.04 \text{ ns} \quad (10)$$

对于全球附和链路(A → B → C → D), 由于 ISL 测量值最终回到另外一颗境内卫星 D, 因此在计算 ISL 闭合残差时需要考虑卫星 A 和 D 的地面绝对钟差 Δt_A 、 Δt_D 的误差 $\sigma_{\Delta t_A}$ 、 $\sigma_{\Delta t_D}$ 。目前, 北斗星地双向绝对钟差测定精度约 0.2 ns(RMS)^[21], 可认为 $\sigma_{\Delta t_A} = \sigma_{\Delta t_D} = 0.2 \text{ ns}$ 。因此, 全球附和链路的星间钟差闭合残差中误差 $\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}}$ 满足

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}} = \sqrt{\sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2 + \sigma_{\Delta t_A}^2 + \sigma_{\Delta t_D}^2} \approx 0.59 \text{ ns} \quad (11)$$

同样取两倍中误差作为闭合残差限差, 则有

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD限}} = 2\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}} \approx 1.18 \text{ ns} \quad (12)$$

当某条 ISL 链路闭合残差在限差范围以内时, 符合平差处理条件; 否则, 应予以重点检测和分析。

3 闭环残差整网平差改正

在计算得到各条 ISL 链路星间钟差闭合残差的基础上, 可对其开展整网间接平差处理。假设某一对齐时刻, n 颗卫星之间共存在 m 条不同组合的闭环星间链路。那么, 以各条星间闭环链路的闭合残差为观测量, 以其中 $n-1$ 颗卫星相对于剩余卫星的星间相对钟差作为待估参数, 可建立间接平差误差方程^[13]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \\ \mathbf{l} &= \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X}^0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, \mathbf{L} 为各条星间闭环链路的闭合残差所组成的观测量向量; \mathbf{V} 为误差观测量向量; \mathbf{l} 为误差方程自由项, 维数均为 $m \times 1$; \mathbf{X}^0 为待估参数向量 \mathbf{X} 的近似值向量; $\hat{\mathbf{x}}$ 为待估参数的改正值向量, 维数均为 $(n-1) \times 1$; \mathbf{A} 为系数矩阵, 维数为 $m \times (n-1)$ 。

若对各闭合残差观测量取等权, 则待估参数改正值向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 有

$$\left. \begin{aligned} \hat{x} &= N_A^{-1} U \\ N_A &= A^T A \\ U &= A^T l \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(14)代入误差方程(13)可求得误差观测量向量 V ,并分别修正得到星间闭环链路闭合残差观测量向量 L 的平差值 \hat{L} ,以及待估参数向量 X 的 \hat{X}

$$\left. \begin{aligned} \hat{L} &= L + V \\ \hat{X} &= X^0 + \hat{x} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

计算过程中,待估参数向量 X 的近似值 X^0 的初值可取零,并迭代计算得到 \hat{L} 和 \hat{X} 。

4 计算与验证

4.1 星间钟差闭合差计算

根据式(4),通过将双向伪距测量值进行历元归算后得到同一时刻的星间测距值,可进而获得星间相对钟差,一般将该“同一时刻”选为双向测距值所在整 3 s 的起始时刻。此外,与精密定轨不同,由于星间钟差同步是一种相对时间基准传递,且卫星轨道与钟差之间相互独立,因此无法使用精密星历作为参考来分析星间钟差的精度。在研究和实际工程当中,目前通常采用残差拟合与分析的方法来评估星间钟差测定精度。

采用北斗三号在轨卫星 2020 年 1 月某日的星间钟差数据进行计算和分析。首先,在完成各卫星星间相对钟差解算后,从全天星间观测数据中挑选出所有星间闭环链路(附和链路暂未参与计算)。然后,采用三次样条法将不同历元星间钟差数据内插至整分钟时刻,以完成时间对齐。

参与计算的北斗卫星见表 1。

表 1 卫星信息列表
Tab.1 Satellite information

卫星 PRN 号	轨道类型	卫星 PRN 号	轨道类型
38	IGSO	22	MEO
39	IGSO	23	MEO
40	IGSO	24	MEO
25	MEO	32	MEO
26	MEO	33	MEO
27	MEO	34	MEO
28	MEO	35	MEO
29	MEO	36	MEO
30	MEO	37	MEO
19	MEO	45	MEO
20	MEO	46	MEO
21	MEO	59	GEO

在当天所有闭环链路中,共获得 1208 组三星闭环链路,其中闭合残差最大达 1.143 ns(RMS)、

平均为 0.275 ns(RMS),说明北斗全球 ISL 链路中确实存在着明显的非零闭合残差。此外,很多链路的闭合残差还呈现明显的常数偏差或周期性波动变化,反映出系统性有色误差的存在。其中,部分代表性闭环链路的闭合残差结果见图 3 所示。

4.2 星间钟差闭合差修正

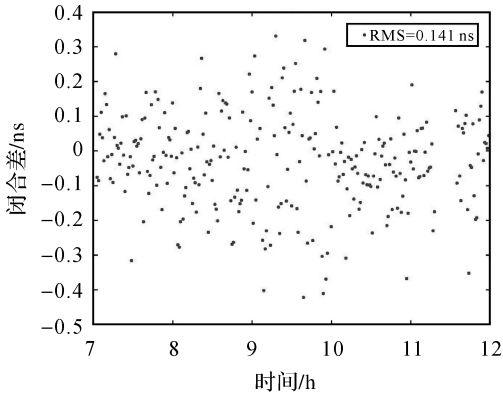
按照上文整网平差修正方法,对时间对齐后(对齐至整分钟时刻)的星间链路数据逐历元进行闭合残差的平差修正,并重新统计各历元各条星间闭环链路的闭合残差。可知,修正后的 ISL 闭合残差 RMS 均在 $4 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ ns 量级、平均为 4.99×10^{-5} ns,已达到北斗系统 ISL 星间链路数据的计算截断误差水平,说明该方法已彻底消除了星间钟差不闭合的现象。其中,部分代表性 ISL 闭合残差的平差修正结果见图 4 所示(部分非严格为零的闭合差结果为计算截断误差)。

短时间内(一般约 24 h 内)的卫星星间相对钟差变化曲线很好地符合多项式模型,利用多项式进行拟合处理,拟合残差可认为是 ISL 双向测距的噪声水平,是评价 ISL 测量噪声和星间钟差误差的常用手段。对平差前后的星间相对钟差分别进行二次多项式拟合和统计,部分代表性星间钟差拟合残差结果见图 5 所示。

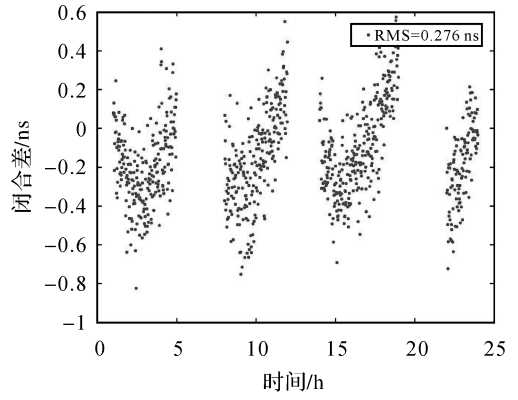
由上述计算结果可知,平差后的各组星间钟差拟合残差下降了 30%~50%,显著减少了现有星间测量噪声与星间钟差误差。

5 总 结

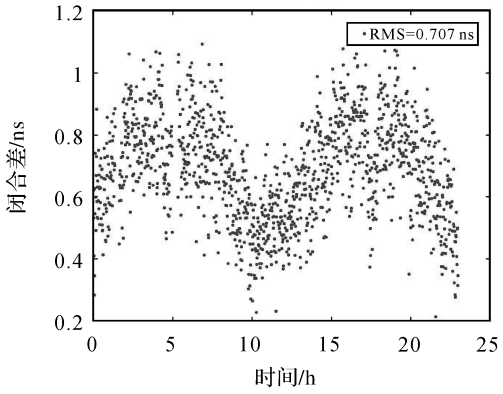
ISL 是 BDS-3 弥补海外监测站布设不足,实现境外卫星精密定轨与时间同步的重要技术手段,完善和提高 ISL 性能对于 BDS-3 而言具有重要意义。本文基于工程科学中的“闭环检测”思想,指出了北斗系统 ISL 全球链路中所存在的有利闭环约束条件。对北斗 ISL 全球链路闭合差进行了检测和分析,结果表明当前系统链路中确实存在着显著的常数性或周期性非零闭合残差,反映了系统中有色误差的存在。在此基础上,构建了针对 ISL 闭合残差的整网平差模型,实现了对北斗卫星星间相对钟差的修正。基于 BDS-3 的在轨实测数据计算表明:本文方法基本消除了 BDS-3 星间钟差不闭合的现象,经整网平差修正处理后的星间钟差随机噪声减少了 30%~50%,有效提高了北斗 ISL 测量及星间相对钟差测定的精度,对提升北斗 ISL 性能与系统服务能力具有重要意义。



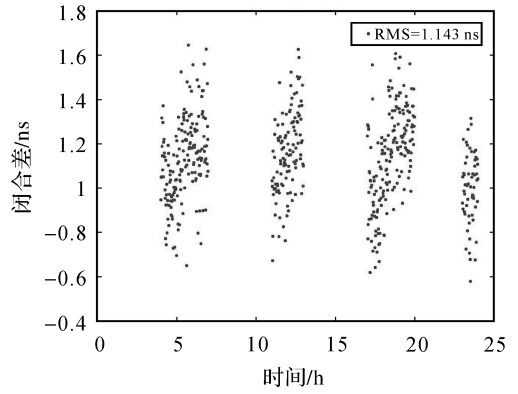
(a) C38→C34→C35→C38



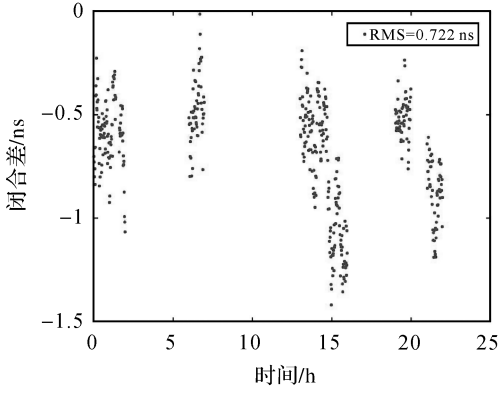
(b) C25→C29→C21→C25



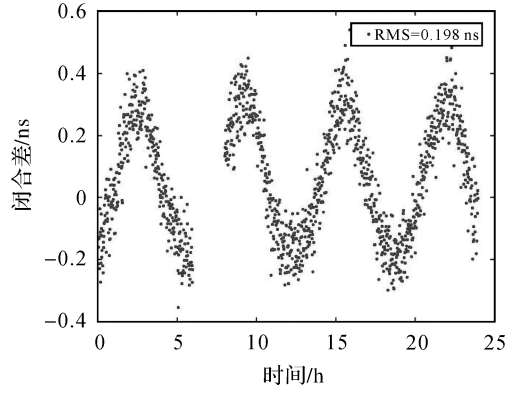
(c) C25→C45→C46→C25



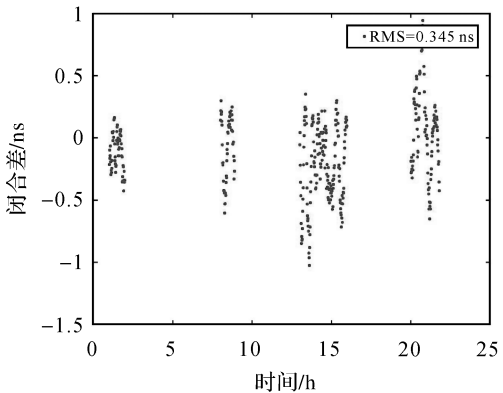
(d) C26→C28→C29→C26



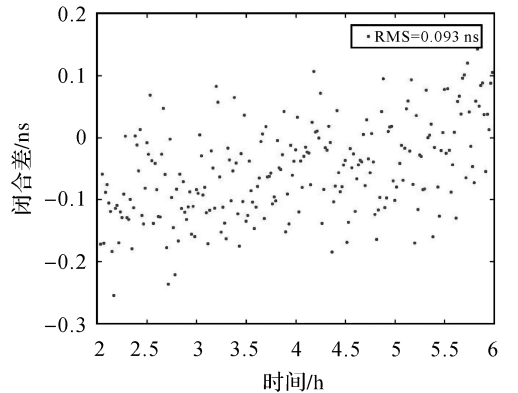
(e) C26→C22→C23→C26



(f) C28→C20→C21→C28



(g) C19→C23→C32→C19



(h) C22→C37→C59→C22

图 3 平差修正后的闭环链路残差

Fig.3 Closed-loop link residuals after adjustment

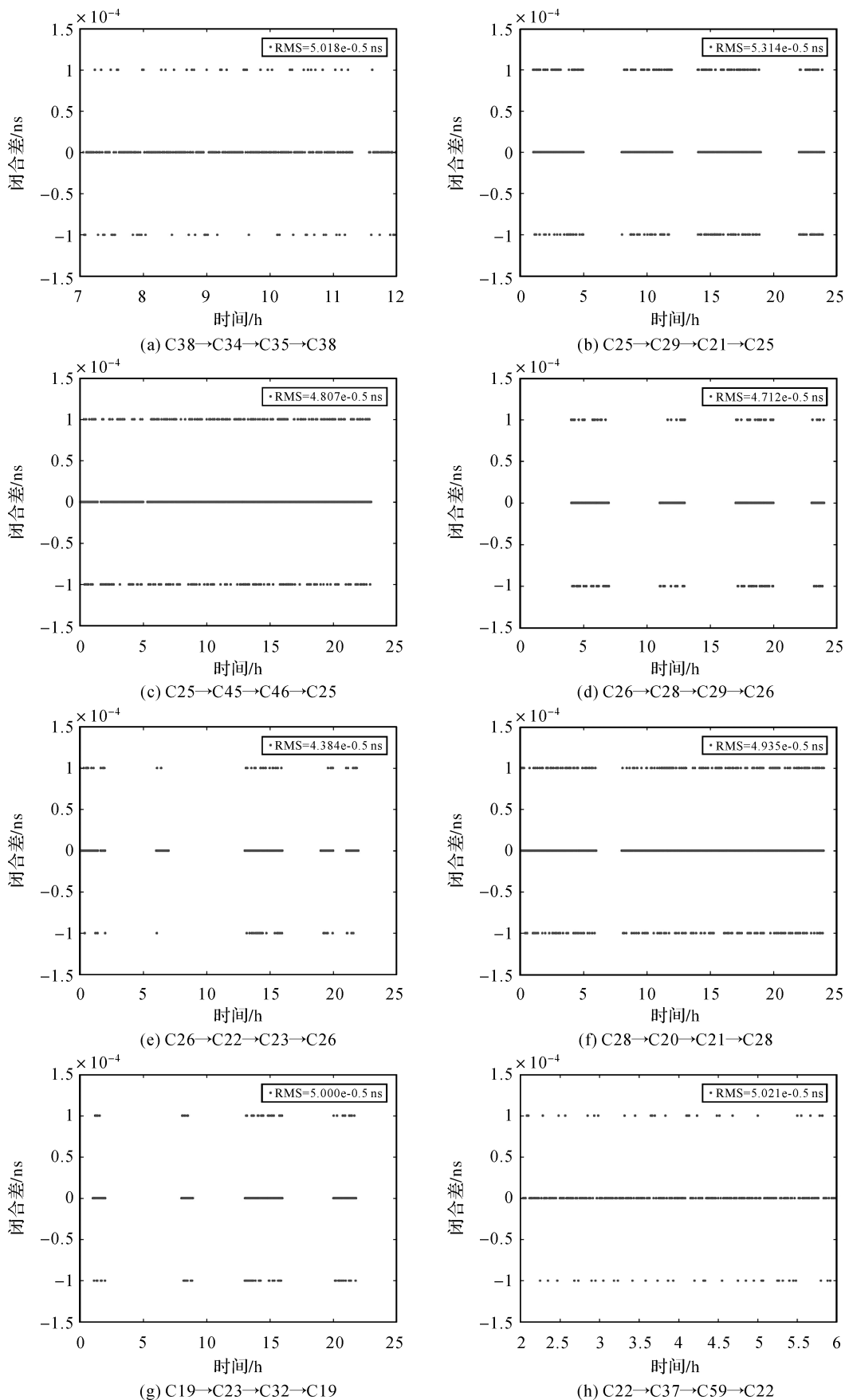


图 4 全球闭环链路星间钟差闭合残差

Fig.4 Inter-satellite clock offset closed residual of global closed-loop link

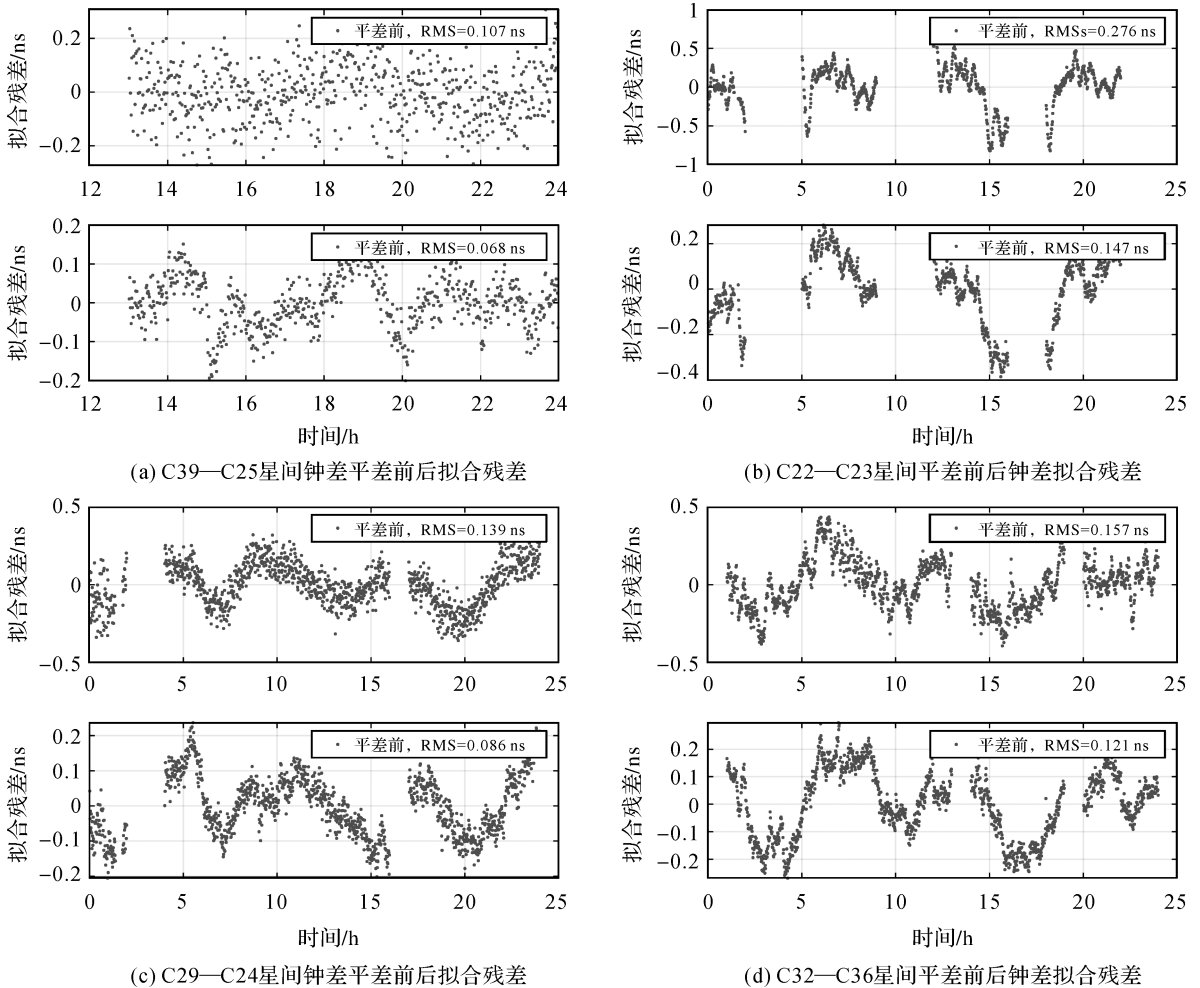


图5 平差前后的星间钟差拟合残差结果对比

Fig.5 Comparison of inter-satellite clock offset fitting residuals before and after adjustment

参考文献:

- [1] 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[J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2671-2679.
PAN Junyang, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. System error calibration for time division multiple access inter-satellite payload of new-generation Beidou satellites [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(23): 2671-2679.
- [2] LIU C, GAO W G, LIU T X, et al. Design and implementation of a BDS precise point positioning service[J]. Navigation, acceptance.
- [3] CHANG Jiachao, SHANG Lin, LI Guotong. The research on system error of inter-satellite-link (ISL) measurements for autonomous navigation of BeiDou system[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(1): 65-81.
- [4] WANG Haihong, XIE Jun, ZHUANG Jianlou, et al. Performance analysis and progress of inter-satellite-link of Beidou system[C]// Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon: [s.n.], 2017: 1178-1185.
- [5] 杨宇飞, 杨元喜, 胡小工, 等. 北斗三号卫星两种定轨模式精度比较分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 831-839. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180560.
YANG Yufei, YANG Yuanxi, HU Xiaogong, et al. Comparison and analysis of two orbit determination methods for BDS-3 satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 831-839. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180560.
- [6] 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[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(11): 119502.
CHEN Jinping, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. Orbit determination and time synchronization for new-generation BeiDou satellites: Preliminary results[J]. Scientia Sinica-Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(11): 119502.
- [7] TANG Chengpan, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. Initial results of centralized autonomous orbit determination of the new-generation BDS satellites with inter-satellite link

- measurements[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(10): 1155-1169.
- [8] XIE Xin, GENG Tao, ZHAO Qile, et al. Precise orbit determination for BDS-3 satellites using satellite-ground and inter-satellite link observations[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 40.
- [9] YANG Yufei, YANG Yuanxi, HU Xiaogong, et al. Inter-satellite link enhanced orbit determination for Beidou-3[J]. *Journal of Navigation*, 2020, 73(1): 115-130.
- [10] PAN Junyang, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(1): 145-153.
- [11] CHEN Jinping, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63: 269511.
- [12] BOSSLER J D, GOAD C C, BENDER P L. Using the global positioning system (GPS) for geodetic positioning[J]. *Bulletin Geodesique*, 1980, 54(4): 553-563.
- [13] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 3版. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
Department of Surveying and Adjustment, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University. *Error theory and foundation of surveying adjustment*[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2014.
- [14] ANGELI A, DONCIEUX S, MEYER J A, et al. Real-time visual loop-closure detection[C] // *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA: IEEE, 2008: 1842-1847.
- [15] 高翔, 张涛, 刘毅, 等. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
GAO Xiang, ZHANG Tao, LIU Yi, et al. *14 lectures of visual SLAM: from theory to practice*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [16] 高钟毓, 王进, 董景新, 等. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. *中国惯性技术学报*, 1995, 3(2): 24-29, 39.
GAO Zhongyu, WANG Jin, DONG Jingxin, et al. A comparison of ZUPT estimation methods for inertial survey systems[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1995, 3(2): 24-29, 39.
- [17] 常乐, 章红平, 高周正, 等. 零速修正在 GNSS/INS 紧组合导航中的应用研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(10): 879-883.
CHANG Le, ZHANG Hongping, GAO Zhouzheng, et al. The application of zero velocity update in GNSS/INS tightly coupled integration[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(10): 879-883.
- [18] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.
- [19] 毛悦, 宋小勇, 贾小林, 等. 星间链路观测数据归化方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(10): 1201-1206.
MAO Yue, SONG Xiaoyong, JIA Xiaolin, et al. Naturalisation method research on inter-satellite link observation data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1201-1206.
- [20] 宋小勇, 毛悦, 冯来平, 等. BD 卫星星间链路定轨结果及分析[J]. *测绘学报*, 2017, 46(5): 547-553. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160203.
SONG Xiaoyong, MAO Yue, FENG Laiping, et al. The preliminary result and analysis for BD orbit determination with inter-satellite link data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 547-553. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160203.
- [21] 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: 109511.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-07-17

修回日期: 2020-08-11

第一作者简介: 刘成(1987—),男,博士,研究方向为卫星导航增强、多源融合导航。

First author: LIU Cheng (1987—), male, PhD, majors in satellite navigation augmentation and multi-sensor fusion navigation technology.

E-mail: liucheng@beidou.gov.cn