

DOI:10.13203/j.whugis20180499



文章编号:1671-8860(2020)10-1493-08

北斗三号卫星星地星间联合精密定轨初步结果

蔡洪亮¹ 孟轶男¹ 耿 涛² 谢 新²

1 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:截至2018年底中国已有19颗北斗三号卫星成功发射入轨,北斗三号卫星上都搭载了高精度星间链路载荷并成功实现了星间双向测距。介绍了北斗三号卫星星间链路观测模型,并利用L波段星地和Ka波段星间链路观测数据对8颗北斗三号卫星进行了星地星间联合精密定轨实验,L波段数据来自全球连续监测评估系统分布于中国境内的6个跟踪站。实验结果表明:星间链路观测值定轨残差RMS值优于6 cm,设备时延在±0.15 ns以内变化。在地面跟踪站限制在境内的情况下,增加星间链路能显著提高定轨精度。通过重叠弧段比较,联合定轨得到的卫星轨道在三维位置上的误差约为12 cm,径向误差约为3 cm,与仅国内6个站星地定轨相比提高85%。

关键词:北斗三号;星间链路;精密定轨;星地星间联合;设备时延

中图分类号:P228

文献标志码:A

中国北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)从2017—2018年底相继发射了18颗MEO(medium earth orbit)卫星和1颗GEO(geostationary orbit)卫星,并于2018年12月宣布北斗三号基本系统建成。此外,BDS-3将于2020年完成由24颗MEO卫星、3颗IGSO(inclined geostationary orbit)卫星、3颗GEO卫星构成的空间星座,进一步提高全球服务能力^[1-2]。BDS-3卫星搭载有Ka相控阵天线实现星间双向测距^[3-4]。利用星间链路(inter-satellite link, ISL)进行卫星之间测量和通信,不仅能够弥补监测站区域布设的缺陷,克服地面对卫星跟踪弧段短、观测几何差的问题,还能实现导航星座的自主运行,提高系统的生存能力。

目前,世界主要的全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)都将星间链路技术作为重点发展方向之一。美国最早于20世纪80年代初提出了基于星间链路的全球定位系统(global positioning system, GPS)自主定轨概念,至1990年基本完成了GPS卫星自主定轨的理论、设计和数据模拟等研究,并在1998年发射的GPS IIR卫星上搭载了UHF(ultrahigh frequency)频段星间链路载荷。对BLOCK IIR卫星的75 d在轨实测星间观测数据的后处理结果表明滤波收敛后轨道空间信号测距误差优于3 m^[5-9]。欧洲的伽利略系统(Galileo)在方案论证阶段非常注重星间链路技术的可行性研究。文献[10]研究了不同星间测距精度和测距频率对联合定轨精度的影响。欧空局还开展了GNSS+和ADVISE两个项目,评估了星地星间联合定轨对于卫星轨道和钟差精度的提升^[11]。俄罗斯的格洛纳斯系统(global navigation satellite system, GLONASS)面临与中国北斗类似的地面监测站区域布设问题,在GLONASS-M卫星上加装了S频段星间链路收发装置,验证星间链路功能,新一代GLONASS-K卫星增加了激光星间链路。

起初,国内学者基于仿真数据开展了导航卫星星间链路数据处理和星地星间联合定轨方面的大量研究^[12-13]。中国于2015-03—2016-02先后发射了由2颗IGSO卫星和3颗MEO卫星组成的北斗三号试验卫星星座,其目的是开展新型星载原子钟、星间链路、新型导航信号体制等方面的试验验证。基于试验卫星的实测星间链路观测数据,文献[14-19]给出了BDS-3试验卫星集中

收稿日期:2019-10-27

项目资助:国家自然科学基金(41674004,41974036);二代导航重大专项(GFZX030601);湖北省自然科学基金(2019CFA051)。

第一作者:蔡洪亮,博士,助理研究员,主要研究方向为北斗系统总体设计、试验与评估。caibanyu@126.com

通讯作者:耿涛,博士,教授。gt_gengtao@whu.edu.cn

式自主定轨、星地星间联合定轨的初步结果,对分析了星间链路对定轨精度的影响。

本文利用星地和星间观测数据对 BDS-3 前 8 颗卫星(见表 1)进行了星地星间联合精密定轨实验。首先介绍了 BDS-3 星间双向测距观测模型,然后对精密定轨中 L 波段星地和 Ka 波段星间链路观测数据进行了说明,并阐述了联合定轨的数据处理策略,最后分析了星地星间联合定轨结果,得出相关结论。

表 1 BDS-3 前 8 颗卫星基本信息

Tab.1 Information of Eight BDS-3 Satellites

| 卫星 | PRN 号 | 轨位 | 发射日期(UTC) |
|--------|-------|-----|------------|
| MEO-1 | C19 | P27 | 2017-11-05 |
| MEO-2 | C20 | P28 | 2017-11-05 |
| MEO-3 | C21 | P25 | 2018-02-12 |
| MEO-4 | C22 | P26 | 2018-02-12 |
| MEO-7 | C27 | P14 | 2018-01-12 |
| MEO-8 | C28 | P15 | 2018-01-12 |
| MEO-9 | C29 | P12 | 2018-03-30 |
| MEO-10 | C30 | P13 | 2018-03-30 |

1 BDS-3 星间链路观测模型

BDS-3 星间 Ka 观测采用时分多址体制,按照预先上注的路由规划表,每颗卫星与其他可见星或锚固站建链,完成一次星间双向测量,之后再轮循与其他卫星进行星间相互测量。假设卫星 B 和卫星 A 在一个时隙内(如 3 s)的不同时刻 t_1 和 t_2 分别收到来自对方的伪距观测,其观测方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{AB}(t_1) = \rho_{AB}(t_1 - \Delta t_1, t_1) + c \cdot [dt_B(t_1) - dt_A(t_1 - \Delta t_1)] + c(\delta_B^{\text{rec}} + \delta_A^{\text{send}}) + \epsilon_1 \\ P_{BA}(t_2) = \rho_{BA}(t_2 - \Delta t_2, t_2) + c \cdot [dt_A(t_2) - dt_B(t_2 - \Delta t_2)] + c(\delta_A^{\text{rec}} + \delta_B^{\text{send}}) + \epsilon_2 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, $P_{AB}(t_1)$ 和 $P_{BA}(t_2)$ 为星间伪距观测量; $\rho_{AB}(t_1 - \Delta t_1, t_1)$ 和 $\rho_{BA}(t_2 - \Delta t_2, t_2)$ 为卫星 B、A 相互收发时刻的星间测距; Δt_1 和 Δt_2 为信号传播时间; dt_A 和 dt_B 分别为卫星 A 和 B 的钟差; δ_A^{rec} 和 δ_A^{send} 为卫星 A 的接收和发射时延; δ_B^{rec} 和 δ_B^{send} 为卫星 B 的接收和发射时延; ϵ_1 和 ϵ_2 为测量噪声。时延在一个定轨弧段内被视为常数。此外,Ka 相控阵天线相位中心偏差和相对论效应也进行相应改正,尽管它们不被包含在式(1)中。对于卫星之间的星间观测,不存在对流层延迟的影响,受电离层的影响也可忽略不计。

根据预报的卫星轨道和钟差信息,可以将不

同时刻的星间双向观测值归算至相同时刻,得到相同时刻归算后的星间伪距观测量^[20]。将 t_1 和 t_2 的观测值归算至距离两者中间最近的整秒 t_0 时刻,则有:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{AB}(t_0) = P_{AB}(t_0) + \Delta P_{AB} = \rho_{AB}(t_0, t_0) + \\ \quad c \cdot [dt_B(t_0) - dt_A(t_0)] + c(\delta_B^{\text{rec}} + \delta_A^{\text{send}}) + \epsilon_1 \\ P_{BA}(t_0) = P_{BA}(t_0) + \Delta P_{BA} = \rho_{BA}(t_0, t_0) + \\ \quad c \cdot [dt_A(t_0) - dt_B(t_0)] + c(\delta_A^{\text{rec}} + \delta_B^{\text{send}}) + \epsilon_2 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, $P_{AB}(t_0)$ 和 $P_{BA}(t_0)$ 为归算后 t_0 时刻的瞬时星间伪距观测量; $\rho_{AB}(t_0, t_0)$ 为 t_0 时刻的瞬时星间距离; ΔP_{AB} 和 ΔP_{BA} 分别为双向伪距观测值的归算改正量,可通过下式计算:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{AB} = \rho_{AB}(t_0, t_0) - \rho_{AB}(t_1 - \Delta t_1, t_1) + \\ \quad c \cdot [dt_B(t_0) - dt_A(t_0)] - c \cdot [dt_B(t_1) - \\ \quad dt_A(t_1 - \Delta t_1)] \\ \Delta P_{BA} = \rho_{BA}(t_0, t_0) - \rho_{BA}(t_2 - \Delta t_2, t_2) + \\ \quad c \cdot [dt_A(t_0) - dt_B(t_0)] - c \cdot [dt_A(t_2) - \\ \quad dt_B(t_2 - \Delta t_2)] \end{array} \right. \quad (3)$$

式中, $dt_A(t_0)$ 和 $dt_B(t_0)$ 分别为 t_0 时刻两颗卫星的钟差。目前预报卫星速度误差小于 0.1 mm/s,预报钟速误差小于 1×10^{-12} ,而 t_0 与 t_1 和 t_2 间的时间间隔小于 3 s,由此可以估计出历元归算的误差优于毫米量级。

将归算后的双向伪距观测量相加可形成星间距离观测方程,相减可形成星间相对钟差观测方程,表达式分别为:

$$\frac{P_{AB}(t_0) + P_{BA}(t_0)}{2} = \rho_{AB}(t_0, t_0) + c \left(\frac{\delta_A^{\text{rec}} + \delta_A^{\text{send}}}{2} \right. \\ \left. + \frac{\delta_B^{\text{rec}} + \delta_B^{\text{send}}}{2} \right) + \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} \quad (4)$$

$$\frac{P_{AB}(t_0) - P_{BA}(t_0)}{2} = c \cdot [dt_B(t_0) - dt_A(t_0)] + \\ c \left(\frac{\delta_A^{\text{send}} - \delta_A^{\text{rec}}}{2} - \frac{\delta_B^{\text{send}} - \delta_B^{\text{rec}}}{2} \right) + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \quad (5)$$

本文利用式(4)来估计卫星位置,同时将每个定轨弧段的星间链路设备收发时延之和视作常数参数,与轨道等参数一起解算。

2 BDS-3 星地星间数据处理

2.1 数据源

为了验证 BDS-3 星地星间联合精密定轨,本文收集了 2018 年 6 月 1 日—7 日(DOY 152~158)

共一周的 L 波段星地观测数据和 Ka 波段星间链路数据进行实验验证。星地观测数据来源于 6 个分布于中国境内的 iGMAS (international GNSS monitoring and assessment system) 跟踪站(见图 1), 这些测站都能接收 BDS-3 卫星信号。

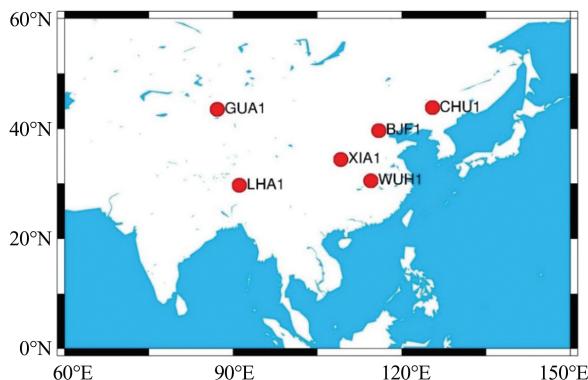


图 1 地面 6 个 iGMAS 测站分布

Fig.1 Distribution of Selected 6 iGMAS Stations

对于星间链路, 每颗卫星按照预先上注的路由规划表与其他可见星建链。根据卫星之间的可见性, 8 颗 BDS-3 卫星之间可形成 22 条链路, 如图 2 所示。其中实线表示两颗卫星持续可见, 虚线表示间断可见。

2.2 数据处理策略

本文利用武汉大学 PANDA 软件^[21]进行

BDS-3 卫星星地星间联合定轨, 定轨弧长为 3 d, L 波段星地观测使用 B1 和 B3 非差无电离层伪距和载波相位观测量, 参数估计方法为最小二乘批处理解算, 采用“一步法”进行定轨, 待估参数包括初始时刻卫星位置、速度、光压参数、卫星钟差、天顶对流层延迟、接收机钟差以及星间链路设备时延。为了更精确地估计对流层延迟、接收机钟差等共同参数, “一步法”定轨中也加入了 14 颗 BDS-2 卫星, 尽管它们没有星间链路观测值。联合定轨过程中采用的观测模型和力模型具体如表 2 所示。

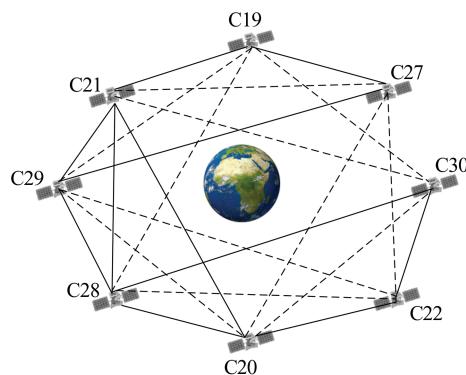


图 2 8 颗 BDS-3 卫星间的可见性

Fig.2 Visibility Between 8 BDS-3 Satellites

表 2 星地星间联合精密定轨观测模型和动力学模型

Tab.2 Observational Models and Dynamical Models for BDS-3 Combined POD

| 选项 | 模 型 |
|----------|---|
| 观测量 | L 波段 B1 和 B3 双频无电离层伪距和载波相位; Ka 星间链路观测量 |
| 先验约束 | 伪距: 1 m; 载波相位: 1 cm; Ka 星间链路: 10 cm |
| 截止高度角 | L 波段星地观测量为 10° |
| 卫星天线相位中心 | BDS-2 卫星: 武汉大学估计值 ^[22] ; BDS-3 卫星: 出厂参考值 |
| 相位缠绕 | 根据 Wu 等 ^[23] 的模型改正 |
| 对流层延迟 | 仅星地观测量改正; Saastamoinen 模型 + GMF 投影函数 + 湿分量随机游走估计 |
| 接收机/卫星钟差 | 白噪声估计 |
| 星间链路设备时延 | 每个弧段每颗卫星的星间链路收发时延和作为一个参数估计 |
| 姿态模型 | BDS-2 为动零偏切换模型 ^[24] , BDS-3 为持续动偏 |
| 相对论效应 | 根据 IERS 2010 协议改正 |
| 地球自转参数 | 固定为 IERS EOPC04 公布值 |
| 潮汐摄动 | 固体潮、极潮和海潮 (IERS 2010) |
| 重力场 | EGM2008 (12 × 12 阶) |
| N 体引力 | 太阳、月亮和其他行星 (DE405) |
| 太阳光压 | ECOM 5 参数模型 ^[25] |

3 结果分析

3.1 星间链路定轨残差及时延

精密定轨中的观测量残差不仅包含观测量噪

声和多路径, 还包含有轨道误差, 能在一定程度上反映轨道的内符合精度。图 3 为一个 3 d 定轨弧段 4 对星间链路观测量的定轨残差结果, 从图 3 中可以看出, 星间链路定轨残差都在 ±20 cm 范

围以内波动。实验期间所有22条链路定轨残差的RMS(root mean square)值见图4,可以看出,所有链路的RMS值都小于6 cm,C20-C21链路RMS最小,为2.45 cm;C27-C29 RMS最大,为5.31 cm。

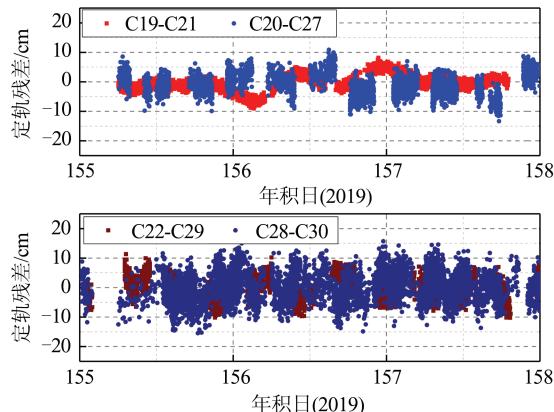


图3 选择的4对BDS-3星间链路观测值的定轨残差
Fig.3 BDS-3 POD Residuals for Selected Four ISL Measurements

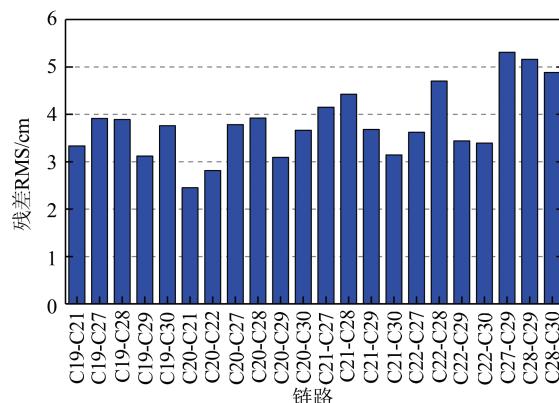


图4 所有22条链路定轨残差的RMS值
Fig.4 RMS Values of POD Residuals for All 22 Links

星间设备通道时延是星间链路观测值的系统误差,在星地星间联合定轨时,星间链路收发时延和作为待估参数与卫星轨道、钟差等参数一起解算,每个定轨弧段每颗卫星估计一个收发时延和,实验期间定轨解算得到的星间链路设备收发时延和的结果见图5。从图5中可以看出,8颗BDS-3卫星星间链路收发时延和在±0.15 ns之间波动。通过分析观测数据发现,年积日第153天定轨弧段参与定轨的星间链路观测值数量明显少于其他天,可能导致该天时延和解算结果精度差于其他天。此外,8颗卫星时延标准差(stan-dard deviation, STD)的平均值约为0.05 ns,这表明本文精密定轨估计的星间链路设备时延具备很好的稳定性。

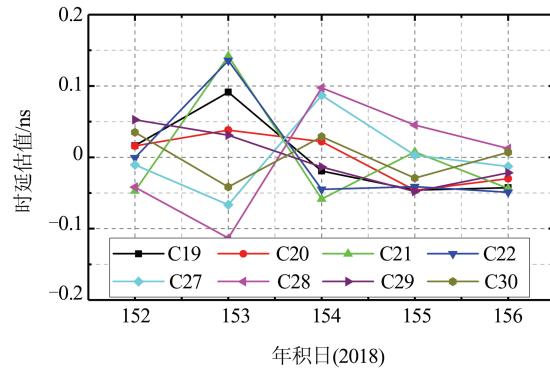


图5 精密定轨解算得到的8颗BDS-3卫星星间链路收发时延和

Fig.5 Estimated ISL Hardware Delays in POD for Eight BDS-3 Satellites

3.2 定轨结果

由于实验期间没有BDS-3卫星的激光测量数据,所以本文仅用重叠弧段比较的方法来评估BDS-3精密定轨精度。图6为8颗BDS-3卫星3 d定轨弧段重叠2 d的结果在切向、法向、径向的RMS值。可以看出,对于仅国内6个站的星地定轨,重叠弧段切向误差为0.5~1.0 m,法向误差为0.2~0.5 m,径向误差约为0.1~0.3 m。加入星间链路观测数据后,定轨重叠误差大幅度减小,切向误差小于0.2 m,法向误差小于0.1 m,径向误差小于0.05 m。图7为BDS-3卫星3 d事后解预报24 h的轨道与事后轨道比较的RMS值。同样地,星地星间联合定轨的轨道预报精度也得到了明显的提升,切向预报误差小于0.3 m,法向和径向预报误差小于0.1 m。

表3给出了所有8颗BDS-3卫星事后轨道重叠弧段比较误差和预报24 h误差RMS平均值。可以看出,仅国内6个站的星地定轨,径向误差为18.0 cm,三维误差为85.1 cm;预报24 h的径向误差为31.3 cm,三维误差为169.2 cm。这个结果与文献[4, 15]中仅仅使用国内监测站的轨道测定和预报精度基本一致。当仅国内6个站星地定轨时,由于测站分布不均匀,地面对卫星跟踪弧段短、观测几何差,导致轨道确定和预报误差偏大。一旦加入星间链路,既增加了卫星观测量,又有效地改善了空间几何,使得卫星轨道精度在各个方面都有了明显提高,重叠比较误差径向达到2.5 cm,三维12.4 cm,预报24 h误差径向为5.3 cm,三维22.3 cm。

3.3 星间链路构型对定轨的影响

本文分析的8颗BDS-3卫星分别位于两个轨道面,C19-C22位于第二轨道面,C27-C30位于第一轨道面,这些卫星形成的22条双向链路中,有6

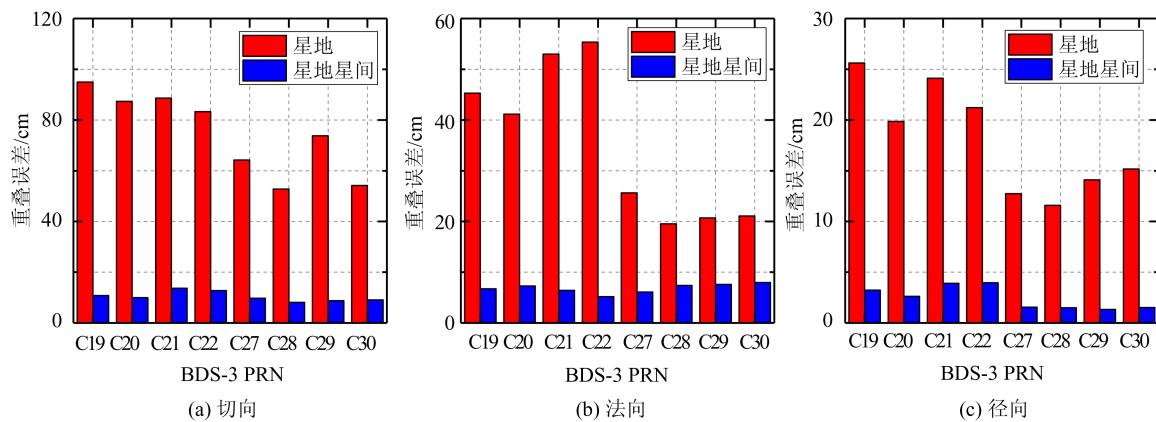


图 6 BDS-3 卫星轨道重叠弧段互差的 RMS 值

Fig. 6 RMS Values of the Orbit Overlap Comparison for Eight BDS-3 Satellites

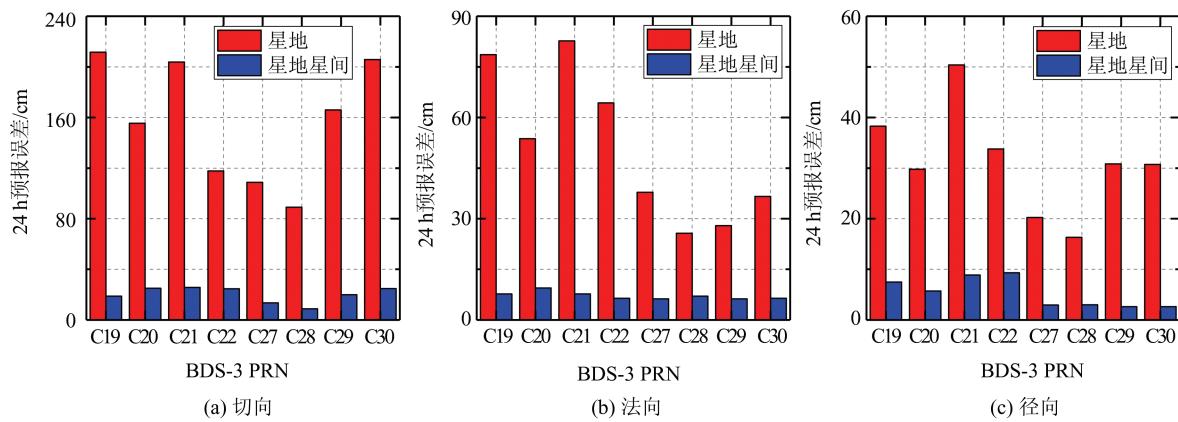


图 7 BDS-3 卫星轨道预报 24 h 误差的 RMS 值

Fig. 7 RMS Values of 24 h Predicted Errors for Eight BDS-3 Satellites

表 3 BDS-3 卫星星地/星地星间联合轨道测定及预报 24 h 误差统计结果/cm

Tab.3 Statistical Results of Orbit Determination and Prediction 24 h Errors for BDS-3 Satellites

| 定轨模式 | 事后轨道重叠误差 | | | | 预报 24 h 轨道误差 | | | |
|--------------|----------|------|------|------|--------------|------|------|-------|
| | 切向 | 法向 | 径向 | 三维 | 切向 | 法向 | 径向 | 三维 |
| 仅国内 6 个站星地定轨 | 74.9 | 35.2 | 18.0 | 85.1 | 157.3 | 50.9 | 31.3 | 169.2 |
| 星地星间联合精密定轨 | 10.1 | 6.7 | 2.5 | 12.4 | 20.2 | 7.2 | 5.3 | 22.3 |

条同轨链路,16 条异轨链路。为了分析星间链路构型对定轨的影响,本文从所有链路中选择 4 组不同构型的链路进行星地星间联合定轨实验,具体如下:

实验 1:选择 11 条持续可见链路(如图 2 中实线所示),其中 6 条链路同轨,5 条链路异轨。

实验 2:选择 11 条间断可见链路(如图 2 中虚线所示),且 11 条链路都是异轨。

实验 3:选择 6 条同轨链路,即 C19-C21、C20-C21、C20-C22、C27-C29、C28-C29、C28-C30。

实验 4:选择 6 条异轨链路,即 C19-C28、C20-C27、C20-C28、C21-C29、C21-C30、C22-C29。

星地数据采用同上 6 个 iGMAS 地面站,与每颗卫星有关的链路数如表 4 所示,其中实验 3 和实验 4 卫星链路数均相同。

表 4 4 组实验中与每颗卫星有关的链路数

Tab.4 Number of ISLs in Designed Four Experiments

| 卫星 | 实验 1 | 实验 2 | 实验 3 | 实验 4 |
|-----|------|------|------|------|
| C19 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| C20 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| C21 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| C22 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| C27 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| C28 | 5 | 2 | 2 | 2 |
| C29 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| C30 | 2 | 3 | 1 | 1 |

图 8 给出了上述 4 组实验得到的 BDS-3 卫星轨道重叠精度结果。为了对比分析,本文使用所有 22 条链路的联合定轨结果也展示在图 4 中,记

为实验0。表5统计了4组实验8颗BDS-3卫星的平均轨道精度。从表5可以看出,减少链路数后,BDS-3定轨精度变差,当减少一半链路时(实验1和实验2),轨道精度降低了约10%~20%;仅使用6条链路时(实验3和实验4),轨道精度进一步降低。实验1和实验2分别使用11条持续可见和11条间断可见链路,虽然持续可见链路产生更多的星间链路观测值,而实验2的结果优于实验1,这可能是由于异轨链路(间断可见为异轨)能形成更优的空间构型,更有利于精密定轨。实验3和实验4分别使用6条同轨和6条异轨链路,且每颗卫星的链路数均相同。结果显示,实验4的定轨精度相比于实验3在切向、法向、径向分别提高了约19%、17%、16%,进一步说明了异轨链路更能提高BDS-3卫星定轨精度。

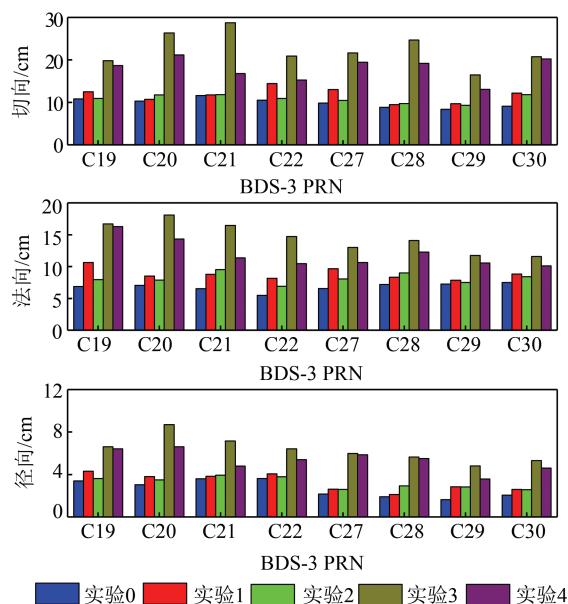


图8 各组实验BDS-3卫星轨道重叠精度

Fig.8 Overlap Accuracy of Orbits for BDS-3 Satellites in All Experiments

表5 4组实验BDS-3卫星定轨误差统计结果/cm
Tab.5 Statistical Results of Orbit Errors of BDS-3 Satellites in Designed Four Experiments /cm

| 实验 | 切向 | 法向 | 径向 | 三维 |
|-----|------|------|-----|------|
| 实验1 | 11.7 | 8.8 | 3.3 | 15.0 |
| 实验2 | 10.8 | 8.1 | 3.2 | 13.9 |
| 实验3 | 22.4 | 14.5 | 6.3 | 27.4 |
| 实验4 | 18.1 | 12.0 | 5.3 | 22.3 |

4 结语

星间链路技术是中国北斗三号卫星导航系统的关键技术体制设计之一,高精度星间链路数

据处理及其对卫星轨道精度的影响是值得研究的重要问题。本文详细介绍了星地星间联合精密定轨中星间链路观测模型和数据处理策略,并利用国内6个iGMAS站的L波段星地观测数据和Ka星间链路观测数据,对前8颗BDS-3卫星进行了星地星间联合精密定轨实验,分析了星间链路观测值定轨残差和设备时延,比较了BDS-3星地/星地星间精密轨道测定和预报精度。得出以下结论:

1)8颗BDS-3卫星形成的22条链路定轨残差RMS值都小于6 cm,表明BDS-3星间链路观测值精度较高。

2)8颗BDS-3卫星星间链路收发时延都在±0.15 ns之间波动,表明BDS-3星间链路设备时延具备很好的稳定性。

3)对于仅国内地面站定轨,加入星间链路观测数据后可以有效改善观测几何,极大提高定轨精度,重叠弧段比较径向误差从18 cm减小到2.5 cm,三维误差从85.1 cm提高到12.4 cm。

4)相比于同轨链路,异轨星间链路能形成更好的卫星空间构型,有利于卫星精密定轨。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6(杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6)
- [2] Guo Shuren, Cai Hongliang, Meng Yinan, et al. BDS-3 RNSS Technical Characteristics and Service performance [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7):810-821(郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7):810-821)
- [3] Chen Jinping, Hu Xiaogong, Tang Chengpan, et al. Orbit Determination and Time Synchronization for New-Generation Beidou Satellites: Preliminary Results [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46(11): 85-95(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): 85-95)
- [4] Tang Chengpan, Hu Xiaogong, Zhou Shanshi, et al. Centralized Autonomous Orbit Determination of BeiDou Navigation Satellites with Inter-Satellite Link Measurements: Preliminary Results [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47(2): 95-105(唐成盼,胡小工,周善石,等. 利用星间双向测距数据进行北斗卫星集中式自主定轨的初步结果分析[J]. 中

- 国科学:物理学 力学 天文学, 2017, 47(2): 95-105)
- [5] Menn M D, Bernstein H. Ephemeris Observability Issues in the Global Positioning System (GPS) Autonomous Navigation (AUTONAV)[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, USA, 1994
- [6] Ananda M P, Bernstein H, Cunningham K E, et al. Global Positioning System (GPS) Autonomous Navigation[C]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, USA, 2002
- [7] Rajan J, Brodie P, Rawicz H. Modernizing GPS Autonomous Navigation with Anchor Capability [C]. The International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, USA, 2003
- [8] Rajan J. Highlights of GPS II-R Autonomous Navigation[C]. The ION 58th Annual Meeting and the CIGTF 21st Guidance Test Symposium, Albuquerque, USA, 2002
- [9] Rajan J, Orr M, Wang P. On-orbit Validation of GPS IIR Autonomous Navigation [C]. The ION 59th Annual Meeting and the CIGTF 22nd Guidance Test Symposium, Albuquerque, USA, 2003
- [10] Hammesfahr J, Hornbostel A, Hahn J, et al. Usage of Two-Directional Link Techniques for Determination of the Satellite State for GNSS-2 [C]. ION GPS 1999, San Diego, CA, 1999
- [11] Fernandez F A. Inter-Satellite Ranging and Inter-Satellite Communication Links for Enhancing GNSS Satellite Broadcast Navigation Data [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47: 786-801
- [12] Geng Tao, Liu Jingnan, Zhao Qile, et al. Compass Precise Orbit Determination Based on Space-Ground Monitoring Network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(S1): 46-51(耿涛, 刘经南, 赵齐乐, 等. 星地监测网下的北斗导航卫星轨道确定[J]. 测绘学报, 2011, 40(S1): 46-51)
- [13] Song Xiaoyong. Study on the Orbit Determination of COMPASS Navigation Satellites [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008(宋小勇. COMPASS 导航卫星定轨研究[D]. 西安: 长安大学, 2008)
- [14] 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(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)
- [15] Tang C, Hu X, Zhou S, 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): 1 155-1 169
- [16] Yang D, Yang J, Li G, et al. Globalization Highlight: Orbit Determination Using BeiDou Inter-Satellite Ranging Measurements [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1 395-1 404
- [17] Ren X, Yang Y, Zhu J, et al. Orbit Determination of the Next-Generation BeiDou Satellites with Inter-Satellite Link Measurements and a Priori Orbit Constraints[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(10): 2 155-2 165
- [18] Ren X, Yang Y, Zhu J, et al. Comparing Satellite Orbit Determination by Batch Processing and Extended Kalman Filtering Using Inter-Satellite Link Measurements of the Next-Generation BeiDou Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1): 25
- [19] Yang Yuanxi, Ren Xia. Maintenance of Space Datum for Autonomous Satellite Navigation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1 780-1 787(杨元喜, 任夏. 自主卫星导航的空间基准维持[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 1 780-1 787)
- [20] 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(29): 1 201-1 206(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(29): 1 201-1 206)
- [21] Geng Tao, Zhao Qile, Liu Jingnan, et al. Real-Time Precise Point Positioning Based on PANDA Software[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(4): 312-315(耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 等. 基于PAND软件的实时精密定位[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 312-315)
- [22] Guo Jing. The Impacts of Attitude, Solar Radiation and Function Model on Precise Orbit Determination for GNSS Satellites [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014(郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014)
- [23] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. *Manuscr Geod*, 1993, 18(2): 91-98
- [24] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS Satellite Geometry and Attitude Models[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1 015-1 029
- [25] Springer TA, Beutler G, Rothacher M. A New Solar Radiation Pressure Model for GPS[J]. *GPS Solutions*, 1999, 2(3): 50-62

Initial Results of Precise Orbit Determination Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations for BDS-3 Satellites

CAI Hongliang¹ MENG Yinan¹ GENG Tao² XIE Xin²

1 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: By the end of 2018, China has successfully launched 19 BDS-3 satellites into orbit. These BDS-3 satellites are equipped with high-precision inter-satellite link (ISL) payloads and have successfully realized inter-satellite two-way pseudorange measurements. We introduce the ISL observation model and carry out precise orbit determination (POD) for eight BDS-3 satellites using L-band satellite-ground and Ka-band ISL observations. The L-band satellite-ground data is collected from six international GNSS monitoring and assessment system (iGMAS) stations located in China's territory. The results show that the root mean square (RMS) value of POD residual for the ISL observations is better than 6 cm, and the estimations of ISL equipment time delays vary within ± 0.15 ns for these BDS-3 satellites. When the ground L-band tracking station is confined to the territory, the addition of ISL observations can significantly improve the orbit determination accuracy. By the orbit overlap comparison, the errors of satellite orbits obtained by combined POD are about 13 cm in 3D and about 3 cm in radial direction, yielding an improvement of 85% compared to ground-only POD using 6 stations in China.

Key words: BDS-3; inter-satellite link(ISL); precise orbit determination; satellite-ground and inter-satellite link; ISL equipment time delay

First author: CAI Hongliang, PhD, assistant research, specializes in the overall design, testing and evaluation of BeiDou system. E-mail: caibanyu@126.com

Corresponding author: GENG Tao, PhD, professor. E-mail: gt_gengtao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41674004, 41974036); the Grand Project of BeiDou-2 System (GFZX030601); the Natural Science Foundation of Hubei Province (2019CFA051).

引文格式: CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Tao, et al. Initial Results of Precise Orbit Determination Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations for BDS-3 Satellites[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(10):1493-1500.DOI: 10.13203/j.whugis20180499(蔡洪亮, 孟轶男, 耿涛, 等. 北斗三号卫星星地星间联合精密定轨初步结果[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(10):1493-1500.DOI:10.13203/j.whugis20180499)