



## 基于北斗星间链路的卫星自主导航可行性分析

李子强, 辛洁, 郭睿, 李晓杰, 唐成盼, 田翌君

引用本文:

李子强, 辛洁, 郭睿, 等. 基于北斗星间链路的卫星自主导航可行性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(1): 55–60.

LI Ziqiang, XIN Jie, GUO Rui, et al. Feasibility Analysis of Autonomous Orbit Determination of BDS Satellites with Inter-Satellite Links[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(1): 55–60.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### [一种使用抗差估计的保护水平重构方法](#)

A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 96–102 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190043>

### [使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差](#)

Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS-3 Using Parabolic Directional Antenna

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1298–1308 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200182>

### [一种顾及IGS-RTS数据接收中断的厘米级星载GPS实时定轨方法](#)

A Centimeter-Level Real-Time Orbit Determination Method Using Space-Borne GPS Measurements Considering IGS-RTS Data Receiving Interruption

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1620–1626 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200432>

### [BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估](#)

Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 574–585, 611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180228>

### [空天网格化星间通视及路由路径规划算法](#)

Aerospace Grid-Based Algorithm of Inter-satellite Visibility and Route Path Planning for Satellite Constellation

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 50–57 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200234>



# 基于北斗星间链路的卫星自主导航可行性分析

李子强<sup>1</sup> 辛洁<sup>2</sup> 郭睿<sup>2</sup> 李晓杰<sup>2</sup> 唐成盼<sup>3</sup> 田翌君<sup>2</sup>

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

2 32021部队, 北京, 100094

3 中国科学院上海天文台, 上海, 200030

**摘要:**北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)在BDS-2基础上,设计实现了高速宽带星间链路网络,以期实现导航和通信的一体化建设,并为卫星自主定轨(autonomous orbit determination, AOD)技术的实现积累宝贵的实测数据。首先,利用星间链路数据建立分布式AOD模型;然后,利用实测的BDS-3星间链路数据,分析了18颗中圆轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星间的建链有效率、星座构型及星间测量噪声,并讨论了轨道初值、滤波处理间隔等因素对AOD精度的影响;最后,给出了基于北斗三号系统18颗MEO卫星星间测距数据的AOD结果,用事后精密轨道产品对其进行了评估分析。结果表明:(1)BDS-3星间链路运行稳定,每颗卫星基本可维持9条左右的星间双向测距链路,星间有效链路数和星座布局已能够支撑实现分布式导航星座的AOD;(2)轨道初始精度、滤波处理间隔等都会影响状态估计精度和收敛速度;(3)轨道初值位置精度为0.1 m、滤波处理间隔为60 s的条件下,AOD连续运行30天的用户测距误差(user ranging error, URE)精度约为0.48 m,有效验证了分布式AOD算法的有效性。

**关键词:**北斗三号卫星导航系统;星间链路;自主定轨

**中图分类号:** P228

**文献标志码:** A

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)历经北斗一号、北斗二号系统工程建设<sup>[1]</sup>,于2020年完成北斗三号系统建设,通过30颗卫星为“一带一路”区域用户提供导航服务。同时,所有卫星均搭载了Ka波段星间链路载荷,实现了星间测量和通信功能,可为卫星自主定轨(autonomous orbit determination, AOD)功能的实现奠定基础。

20世纪80年代,Ananda等<sup>[2]</sup>便提出导航星座AOD的概念,即在缺少地面运控系统支持情况下,基于星间交互电文和星间双向测距值获得先验信息及相关配置参数信息,再由星载处理器结合各种滤波器方式实现卫星AOD的技术。20世纪90年代,美国GPS的BLOCK IIR卫星基本实现AOD功能,并在后续进一步增强了该功能。Rajan等<sup>[3]</sup>利用BLOCK IIR卫星的测距数据进行AOD实验,得到了满足精度要求的AOD结果。随着北斗系统建设,国内不少学者也开展了相关研究,杨元喜等<sup>[4]</sup>、杜玉军等<sup>[5]</sup>利用星地/星间仿

真数据提出了多种星间链路数据处理、自主导航算法模型,并对卫星导航服务精度及可用性提升等方面进行了评估;陈艳玲等<sup>[6]</sup>利用仿真的北斗全球导航系统星间链路,论证了星间测量噪声对导航星座自主运行性能的影响;宋小勇<sup>[7]</sup>利用星间测距仿真数据开展了分布式AOD试验;唐成盼等<sup>[8]</sup>利用少量北斗试验星间测距数据开展了集中式AOD的初步分析。

上述研究为BDS自主导航服务的工程实现奠定了丰厚的理论基础,但导航卫星在轨空间环境错综复杂,常面临不确定的环境噪声及干扰的影响,使得基于星间测距的仿真结果与实际在轨运行结果有着较大差异,具体体现在两个方面:(1)对于空间段。北斗在轨卫星性能受太空环境、研制厂家差异等因素影响,无法通过仿真全面验证星间链路实际运行场景。同时,卫星之间又存在多种可视关系,星座建链几何构型、星间电文交互链路有效率、自主滤波处理间隔等都成为卫星AOD滤波过程中误差抑制的制约因素。

收稿日期: 2020-09-04

项目资助:国家自然科学基金(41874043, 41704037, 41804030, 41874039)。

第一作者:李子强,博士,主要从事卫星自主导航技术研究工作。504394999@qq.com

通讯作者:辛洁,硕士,工程师。15810539683@139.com

(2)对于地面控制段。星载自主运行单元的算法开启需依托于地面控制段,初始轨道参数精度、星上收发通道时延标校等将影响整网星座自主运行结果,能否依托多站多星的观测数据获得高精度的通道时延,对于卫星AOD精度提升有着重要意义。

本文通过推导分布式星座AOD模型,结合北斗三号卫星导航系统(BDS-3)组网卫星间实测的星间测距值,给出了北斗基本导航星座几何构型、星间测量噪声等统计数据,评估分析了不同滤波处理间隔及轨道初始参数精度下的AOD结果,验证了本文算法的有效性。

## 1 分布式卫星AOD算法实现

### 1.1 分布式AOD算法

扩展卡尔曼滤波作为一种递推贝叶斯状态估计方法,是当前分布式自主轨道实现的主要滤波方法。仅就滤波算法而言,模型参数精度、初始条件等会影响状态估计精度和收敛速度<sup>[9]</sup>。通过构建基于星间测距的观测方程和描述滤波过程的状态方程,将预处理后的观测数据、卫星状态及其协方差信息等经过卡尔曼滤波数据处理,可实现卫星AOD。通过有效构建星间观测方程和状态方程,可对参考历元 $t_k$ 时刻构建适用于卫星AOD的卡尔曼滤波算法。若系统噪声方差阵 $Q_k$ 非负定,测量噪声方差阵 $R_k$ 正定,则被估计状态 $X_k$ 的估计 $\hat{X}_k$ 表述为:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k Z_k - H_k \hat{X}_{k/k-1} \quad (1)$$

更新的协方差阵 $P_k$ 可表述为<sup>[10]</sup>:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k/k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} Z_k = H_k X_k + V_k \\ X_k = f_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \\ \hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $H_k$ 为观测矩阵; $V_k$ 为测量噪声序列; $W_k$ 为系统噪声序列; $\Phi_{k,k-1}$ 表示 $t_k$ 时刻至 $t_{k-1}$ 时刻的一步转移阵。

### 1.2 软件初始化

在精密定轨算法中,待估参数包括卫星的位置、速度、光压、钟差及其他附加参数。表1给出了AOD所采用的具体模型及相关策略,其中,不估计光压参数,采用ECOM(extended code orbit

model)光压模型<sup>[11]</sup>,且使用较长弧段的事后精密轨道对光压参数进行较为精细的建模,不考虑剩余的模型误差。这样既可以削弱AOD过程中定向参数的预报误差和提高定轨精度,又可以减少待估参数和提高运算效率。

表1 分布式自主定轨解算策略

Tab.1 Decoding Strategy of the Distributed AOD

参数	模型
星间测距采样间隔/s	3
相对论改正	考虑广义相对论误差
潮汐改正	仅考虑固体潮
重力场模型	12阶次的EGM2008模型
光压模型	ECOM模型,不估计参数
地球定向参数	预报地球定向参数
积分器步长/s	60
多体引力	考虑日月引力
轨道参数	广播星历轨道

### 1.3 AOD性能评估

将卫星AOD预报结果与事后精密轨道结果求差比较,将两种轨道在径向( $R$ )、切向( $A$ )和法向( $C$ )方向上进行求差,并统计仅含轨道广播星历、钟差和群延迟修正参数等信息的用户测距误差(user ranging error,URE)。若仅考虑空间段的误差,则中圆轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星的AOD的URE及均方根(root mean square, RMS)的计算方法可表述为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \text{URE}_{\text{MEO}} = \sqrt{0.96 \times \delta_R^2 + 0.04 \times (\delta_A^2 + \delta_C^2)} \\ \text{URE}_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \text{URE}_i^2 / n} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\delta_R$ 、 $\delta_A$ 和 $\delta_C$ 分别为 $R$ 、 $A$ 和 $C$ 方向的定轨残差; $\text{URE}_{\text{RMS}}$ 为URE的均方根统计值。

## 2 星间链路实现情况分析

北斗星间链路主要采用了基于相控阵天线的并发空时分双工技术。该技术通过单条链路半双工方式工作实现了卫星之间的双向通信,为分布式自主导航技术实现提供了一种可行途径,但也使星间建链受网络传输协议、业务数据传输性能所限。因此,如何基于星间链路资源,合理构建星间链路拓扑关系,也成为制约星上自主导航性能的制约因素。

### 2.1 星间链路有效数分析

每个星间测距帧包含信号发射和信号接收1两个过程,即前1.5 s进行正向测距,后1.5 s进行反向测距。在一个测距帧的信号发射、信号接收

过程结束后,通过星间链路数据传输,将当前测距帧产生的星间双向伪距测量值分发至各相关卫星<sup>[13]</sup>。随着星间链路建链条数的增加,卫星分布式 AOD 精度也将有所提升。

MEO 卫星之间存在着持续可见、非持续可见、不可见 3 种可视关系,星间建链有效数与卫星所在轨位、时隙路由规划等因素有关。通过对分布于 3 个轨道面的在轨 18 颗组网星间的测距值进行分析可知,所有卫星的星间建链持续稳定,基本可维持 9 条左右的星间双向测距链路<sup>[14]</sup>,能够满足分布式 AOD 的解算需求。

## 2.2 AOD 星座构型分析

对于分布式自主运行卫星而言,每个计算周期内建链卫星形成的星座构型都是影响卫星 AOD 精度的一个重要因素,即进行分布式星座自主导航时需考虑星座中卫星间的可见性及建链几何关系,将待评估卫星类比为定位系统中的用户,星座中其他卫星提供用户位置信息,计算相应的定位精度衰减因子 (position dilution of position, PDOP)。

以 C24 卫星为例,从图 1 可以看出,星间建链构型结构较好,PDOP 值基本维持在 1.5,能够满足分布式 AOD 对星间建链规划的基本要求,但在星上时隙表切换时,链路的中断与恢复会导致星座 PDOP 值出现明显的跳跃变化。

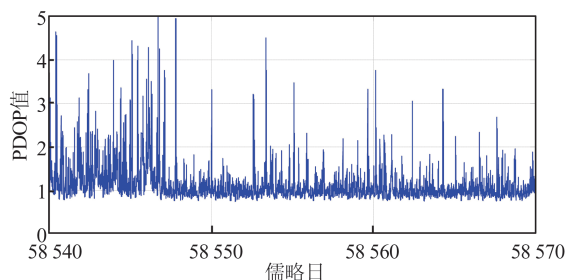


图 1 以 C24 卫星为定位对象的 PDOP 值

Fig.1 PDOP Value with the C24 Satellite as Positioning Object

## 2.3 星间链路测量噪声分析

星间测距精度主要受观测噪声及未知系统误差常数项和慢变项的影响。对于观测噪声,通过为 1 h 弧段的星间测量差值进行二次多项式拟合得到的残差,可以较为直观地反映测距值的异常变化,削弱了卫星相对钟差、星间链路设备收发时延,以及其他未模型化的系统误差和测量噪声,可用于分析星间链路的观测噪声水平。

为了保证星间链路测距值的归算精度,只有 3 s 以内完成双向测距,才能进行正反向测距值配对,进而得到卫星之间的相对距离和相对钟差。

以 C24 卫星为例,图 2 给出了以 1 h 为步长进行多项式拟合后得到的 C24 与 C37 卫星的卫星测量噪声时间序列,星间测量噪声基本维持在 0.2 m 以内,其相对拟合残差的 RMS 优于 0.1 m<sup>[15]</sup>。

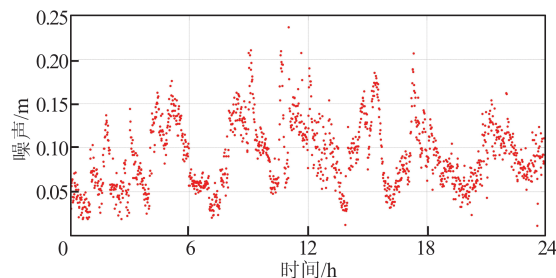


图 2 C24 卫星与 C37 卫星星间测量噪声时间序列

Fig.2 Time Series of the Inter-Satellite Ranging Errors for C24-C37

## 3 卫星 AOD 结果及分析

结合北斗实际星间链路观测数据,起算时刻为 2019-02-26,连续 30 天对 18 颗 MEO 卫星在不同轨道初值精度、不同滤波处理间隔下的 AOD 结果进行了分析,并与精密轨道产品进行了比较。

### 3.1 轨道初值精度对 AOD 影响分析

轨道初始精度是影响状态估计精度和收敛速度的重要因素。通过配置滤波初始时刻的不同误差协方差阵,可实现对滤波初始位置的精度标识。本文设计了 3 种精度的轨道初值,方案 1、方案 2、方案 3 的三维位置误差依次为 0.1 m、0.5 m、1 m。以每 60 s 一次的滤波处理间隔,进行连续 30 天的 AOD。不同轨道初值下自主定轨精度如表 2 所示。

表 2 不同轨道初值下自主定轨精度

Tab.2 Accuracy of the AOD in Different Initial Orbits

方案	R/m	A/m	C/m	URE <sub>RMS</sub> /m
1	0.237	1.477	1.431	0.472
2	0.248	1.479	1.430	0.478
3	0.344	1.882	2.123	0.660

从表 2 的统计结果可以看出:(1)轨道初始精度虽影响状态估计精度,但随着滤波过程不断演变,其影响越来越小;(2)即使各方向误差在 1 m 的情况下,AOD 连续运行 30 天条件下的 URE 差异与方案 1 差异也仅为 0.1 m 左右;(3)不同轨道初值对法方向的误差影响较大,对径向和切向的误差没有明显影响。

### 3.2 滤波处理间隔对 AOD 影响分析

为了考察滤波处理间隔对自主轨道预报的敏感程度,本文也设计了 3 种方案,方案 4、方案 5、



方案6自主轨道滤波处理间隔依次为60 s、300 s、600 s,同时,设置轨道初始三维位置误差方差为0.1 m,进行连续30天的AOD。在不同滤波处理间隔下,18颗卫星的自主定轨精度均值如表3所示,其中C24号卫星在R、A、C方向的自主定轨精度见图3。

表3 不同滤波处理间隔下18颗卫星的自主定轨精度均值

Tab.3 Accuracy of the AOD in Different Filtering Frequencies for 18 Satellites

方案	R/m	A/m	C/m	URE <sub>RMS</sub> /m
4	0.27	1.50	1.52	0.50
5	0.39	1.52	1.54	0.58
6	0.60	2.04	2.16	0.80

从表3和图3的统计结果可以看出,当滤波处理间隔小于等于300 s时,AOD精度对滤波处理间隔的敏感较低;当滤波处理间隔超过300 s时,AOD精度对滤波处理间隔的敏感逐渐增大。

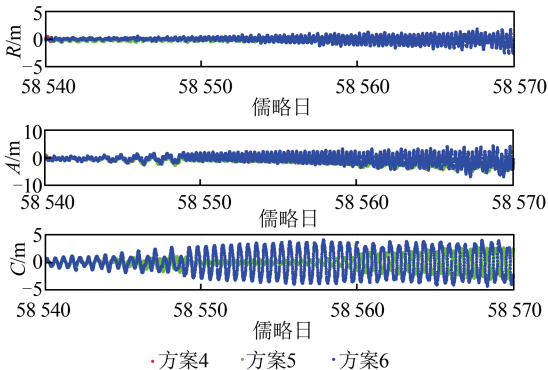


图3 C24号卫星在不同滤波处理间隔下自主定轨精度比较

Fig.3 Accuracy of the AOD in Different Filtering Frequencies for C24 Satellite

3.3 长期AOD结果分析

以2019-02-26为起算时刻,在初始三维位置误差方差为0.1 m、滤波间隔为60 s时,利用BDS-3星间测距数据进行连续30天的AOD处理。18颗MEO卫星长期自主定轨精度见表4和图4,C24卫星的自主定轨结果与精密轨道互差结果见图5。

从表4、图4和图5的评估结果可知:

1)在18星条件下的星间建链情况基本满足卫星自主轨道滤波条件,基于实际星间测距结果解算的所有卫星AOD各方向误差变化趋势基本一致。AOD结果能够处于收敛后的稳定状态,且径向能够保持很好的精度,但切向和法向呈现出慢慢变大的趋势;整网卫星自主轨道滤波30天的URE优于0.48 m。

2)C23卫星的AOD残差明显高于其他卫星。结合杨宇飞等<sup>[13]</sup>对BDS-3星间测距数据的分析

表4 18颗MEO卫星长期自主定轨精度

Tab.4 Long-Term Accuracy of the AOD of 18 Satellites

卫星号	R/m	A/m	C/m	URE <sub>RMS</sub> /m
C25	0.14	2.11	0.89	0.48
C26	0.14	2.04	1.24	0.50
C27	0.12	0.71	1.60	0.37
C28	0.16	0.95	1.80	0.44
C29	0.12	0.83	1.90	0.43
C30	0.11	0.72	1.64	0.38
C19	0.14	1.03	1.15	0.34
C20	0.15	0.93	1.37	0.36
C21	0.17	0.95	1.48	0.39
C22	0.15	1.02	1.57	0.40
C23	0.52	2.64	1.27	0.78
C24	0.14	2.06	1.19	0.50
C32	0.65	1.52	1.36	0.75
C33	0.22	1.22	1.23	0.41
C34	0.11	0.78	1.81	0.41
C35	0.10	0.64	1.36	0.32
C36	0.13	2.05	1.03	0.48
C37	0.15	1.98	1.41	0.51
均值	0.24	1.5	1.4	0.48

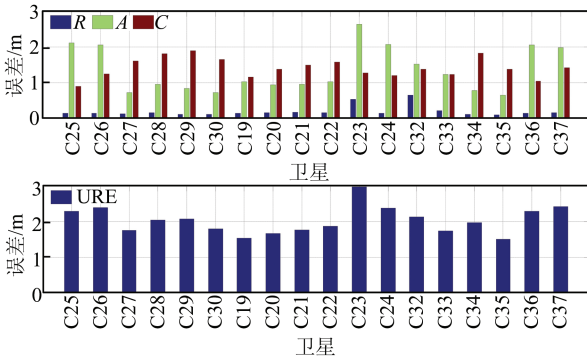


图4 18颗MEO卫星长期自主定轨精度

Fig.4 Long-Term Accuracy of the AOD of 18 Satellites

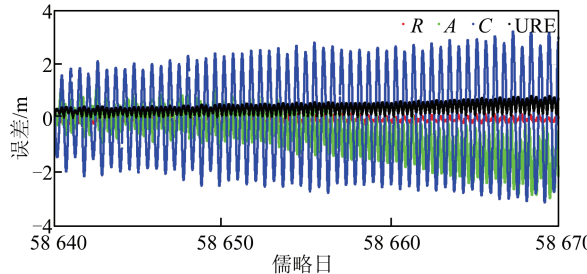


图5 C24卫星的自主定轨结果与精密轨道互差结果

Fig.5 Difference of the AOD Results and Precise Orbit for C24 Satellite

结果可知,C23卫星的测量噪声及测距精度RMS约为其他卫星的2倍,这是C23卫星AOD结果较其他卫星偏大的原因。

3)从单颗卫星的AOD结果来看,卫星法向方向残差的波动范围明显大于其他两个方向,且会在精密定轨软件每周更换地球定向参数后,出

现更大的波动,即 AOD 结果与精密定轨结果的残差变大,这是因为在 AOD 中,利用轨道面法向对定轨结果进行约束,但光压参数不准会导致轨道面法向预报精度不高,从而导致轨道的法向和切向误差较差,同时,也体现了 AOD 星座旋转的不可观问题。

## 4 结 语

本文通过对在轨 18 颗 MEO 卫星间建链有效率及星座构型的分析,验证了 BDS-3 星间建链的稳定性和建链星座构型的合理性;基于此,初步分析了轨道初值和预报时长对 AOD 结果的影响,给出了基于 BDS-3 星间实际测距值的连续 30 天的 AOD 结果,既验证了 BDS-3 星间测距的稳定性,又验证了本文方法实现的正确性。18 星连续 30 天的 AOD 为 0.48 m,足以满足卫星自主运行 30 天模式下的精度要求,可为后续自主导航算法的工程应用提供一定的参考借鉴。

## 参 考 文 献

- [1] Tan Shusen. Development and Thought of Compass Navigation Satellite System [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(2): 391-396 (谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396)
- [2] Ananda M P, Bernstein H, Cunningham K E, et al. Global Positioning System (GPS) Autonomous Navigation[C]//IEEE Symposium on Position Location and Navigation, Las Vegas, NV, USA, 1990
- [3] Rajan J A. Highlights of GPS II-R Autonomous Navigation[C]// The 58th Annual Meeting of the Institute of Navigation, Albuquerque, NM, USA, 2002
- [4] Yang Yuanxi, Ren Xia. Maintenance of Space Datum for Autonomous Satellite Navigation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1780-1787 (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): 1780-1787)
- [5] Du Yujun, Wang Fuhong, Wang Zemin, et al. A Correction Algorithm of Constellation Rotation Error in Autonomous Navigation Using Ground Stations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 534-539 (杜玉军, 王甫红, 王泽民, 等. 导航卫星自主定轨星座旋转误差的地面校正算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(4): 534-539)
- [6] Chen Yanling, Hu Xiaogong, Zhou Shanshi, et al. A New Autonomous Orbit Determination Algorithm Based on Inter-Satellite Ranging Measurements [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica and Astronomica)*, 2015, 45(7): 75-82 (陈艳玲, 胡小工, 周善石, 等. 基于星间测距的导航卫星自主定轨新算法[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2015, 45(7): 75-82)
- [7] Song Xiaoyong. Study on the Orbit Determination of COMPASS Navigation Satellites [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009 (宋小勇. COMPASS 导航卫星定轨研究[D]. 西安: 长安大学, 2009)
- [8] Tang Chengpan, Hu Xiaogong, Zhou Shanshi, et al. Centralized Autonomous Orbit Determination of BeiDou Navigation Satellites with Inter-Satellite Link Measurements: Preliminary Results [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica and Astronomica)*, 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)
- [9] Suzdaleva E. Initial Conditions for Kalman Filtering: Prior Knowledge Specification [C]//The 7th WSWAS International Conference on Systems theory and Scientific Computation, Vouliagmeni Athens Greece, 2007
- [10] Snyder R D, Saligari G R. Initialization of the Kalman Filter with Partially Diffuse Initial Conditions [J]. *Journal of Time Series Analysis*, 1996, 17(4): 409-424
- [11] Wang Yan, Guo Rui, Zhang Chuanding, et al. The Application of Bernese ECOM Solar Radiation Pressure Model in BDS Precise Orbit Determination [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(2): 194-200 (王琰, 郭睿, 张传定, 等. Bernese ECOM 光压模型在 BDS 卫星精密定轨中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(2): 194-200)
- [12] Liu Shuai. Research on Theory and Algorithm of Satellite Navigation System Signal-in-Space Accuracy Evaluation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2016 (刘帅. 卫星导航系统空间信号精度评估理论与算法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2016)
- [13] Yang Yufei, Yang Yuanxi, Hu Xiaogong, et al. Comparison and Analysis of Two Orbit Determination Methods for BDS-3 Satellites [J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 831-839 (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)
- [14] Yang Yufei, Yang Yuanxi, Guo Rui, et al. The Influence of Station Distribution on the BeiDou-3

- Inter-Satellite Link Enhanced Orbit Determination [C]//China Satellite Navigation Conference, Chengdu, China, 2020
- [15] 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), DOI: 10.1007/s10291-019-0823-5

## Feasibility Analysis of Autonomous Orbit Determination of BDS Satellites with Inter-Satellite Links

LI Ziqiang<sup>1</sup> XIN Jie<sup>2</sup> GUO Rui<sup>2</sup> LI Xiaojie<sup>2</sup> TANG Chengpan<sup>3</sup> TIAN Yijun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Troops 32021, Beijing 100094, China

<sup>3</sup> Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

**Abstract: Objectives:** The BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3) has designed and implemented a high-speed broadband inter-satellite link (ISL) network on the basis of the BDS-2 to carry out integrated navigation and communication and accumulate valuable measured data for the autonomous orbit determination (AOD) of the satellites. With ISL data, navigation satellite systems can achieve AOD that enables satellites to update their ephemeris on-orbit without the support of the operational control segment. However, the key technologies of the AOD system of global positioning system have not been disclosed. In the last few years, some domestic scholars have carried out some useful research and exploration into AOD with simulation data. But the results of applying the ISL to AOD are still relatively few. **Methods:** The AOD processing model was briefly reviewed on the basis of inter-satellite ranging observations, and a distributed AOD model was built with ISL data. Then, the link building efficiency, constellation geometry, and inter-satellite measurement noise of the 18 medium Earth orbit (MEO) satellites in the BDS-3 constellation were analyzed, and the influences of the initial orbit accuracy and filtering processing interval on the AOD process were also analyzed. Finally, the AOD results obtained via the measured inter-satellite ranging data on the 18 MEO satellites were given and compared with the results of the precision orbit for evaluation and analysis. **Results:** AOD processing and performance analysis are conducted. The analysis results are as follows: (1) The BDS-3 ISLs are rather stable, with about 9 inter-satellite two-way ranging links for each satellite, and the effective ISLs and the constellation geometry could support the AOD of the distributed navigation constellation. (2) The initial orbit accuracy and the filtering interval affect the state evaluation accuracy and convergence velocity. (3) When the initial orbit accuracy is 0.1 m and the filtering interval is 60 s, the user ranging error accuracy of AOD for 30 days is 0.48 m. **Conclusions:** The results confirm the validity of the proposed distributed AOD algorithm.

**Key words:** BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3); inter-satellite link (ISL); autonomous orbit determination

**First author:** LI Ziqiang, PhD, specializes in autonomous navigation. E-mail: 504394999@qq.com

**Corresponding author:** XIN Jie, master, engineer. E-mail: 15810539683@139.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41874043, 41704037, 41804030, 41874039).

**引文格式:** LI Ziqiang, XIN Jie, GUO Rui, et al. Feasibility Analysis of Autonomous Orbit Determination of BDS Satellites with Inter-Satellite Links[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1):55-60. DOI:10.13203/j.whugis20190338(李志强, 辛洁, 郭睿, 等. 基于北斗星间链路的卫星自主导航可行性分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(1):55-60. DOI:10.13203/j.whugis20190338)