

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.06.011

高分多模卫星星载 BDS/GPS 在轨数据分析与评估

陈高峰^{1,4}, 张颖², 刘立红¹, 王海月³, 李向宇¹, 王慧聪¹, 肖玲玉¹, 李卫洁³

- 航天恒星科技有限公司, 天津 300450;
- 火箭军驻北京地区军事代表室, 北京 102209;
- 航天恒星科技有限公司, 北京 102209;
- 天津航天中为数据系统科技有限公司, 天津 300450)

摘要: 高分多模卫星已在轨稳定运行, 并使用星载 BDS/GPS 双频双模导航接收机实现了自主定轨功能。根据导航接收机在轨实测数据, 开展了 BDS 模式和 GPS 模式下的载噪比、收星数等观测数据质量的对比分析, 基于下传的原始观测数据完成了精密定轨解算, 并采用内符合评估方法完成了实时定轨精度分析。经分析研究, 导航接收机最高载噪比 BDS 模式较 GPS 模式高 1 dB·Hz, 平均可用星数 BDS 模式较 GPS 模式多 0.6 颗, 精密定轨位置精度和速度精度 BDS 模式和 GPS 模式均在 1.63~5.34 cm、0.0017~0.0046 cm/s 之间, 实时定轨位置精度和速度精度 BDS 模式和 GPS 模式均在 3.10~4.23 m、0.00291~0.00394 m/s 之间。结果表明, BDS 信号与 GPS 信号的载噪比、可用星数和定轨精度均基本相当, 表明 BDS 已具备为航天器用户独立提供时间、位置及速度等信息服务的能力。

关键词: 北斗卫星导航系统; 导航接收机; BDS 模式; GPS 模式; 数据质量; 对比分析

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)06-0132-11

Analysis and evaluation of on-orbit data of high-resolution multi-mode spaceborne BDS/GPS

CHEN Gaofeng^{1,4}, ZHANG Ying², LIU Lihong¹, WANG Haiyue³, LI Xiangyu¹,
WANG Huicong¹, XIAO Lingyu¹, LI Weijie³

- Space Star Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China;
- Military Representative Office of Rocket Force in Beijing Area, Beijing 102209, China;
- Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China;
- Tianjin Aerospace Zhongwei Data System Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: The high-resolution multi-mode (GFDM) satellite has been operating steadily in orbit and has achieved autonomous orbit determination capability with the spaceborne dual-frequency, dual-mode BDS/GPS navigation receiver. Based on the on-orbit test data of the navigation receiver, a quality analysis of the observation data such as carrier-to-noise ratio and number of received satellites in both BDS and GPS modes is performed. The precise orbit determination calculation is completed based on the down-transmitted original observation data, and the real-time orbit determination accuracy analysis is completed by the internal coincidence evaluation method. After analysis and research, the maximum carrier-to-noise ratio of navigation receiver BDS mode is

收稿日期: 2023-08-31; 修订日期: 2024-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3906504)

作者简介: 陈高峰(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事星载导航产品应用方面的研究。

1 dB · Hz higher than that of GPS mode, the average number of available stars in BDS mode is 0.6 more than that of GPS mode, and the precision orbit position accuracy and velocity accuracy of BDS mode and GPS mode are between 1.63~5.34 cm and 0.001 7~0.004 6 cm/s. Both the BDS mode and GPS mode are between 3.10~4.23 m, 0.002 91~0.003 94 m/s. The position accuracy and velocity accuracy of real-time orbit determination of BDS mode and GPS mode are both between 3.10~4.23 m and 0.002 91~0.003 94 m/s. The results show that the carrier-to-noise ratio, the number of available stars and the orbit determination accuracy of the BDS signal are basically the same as those of the GPS signal, which indicates that the Beidou navigation satellite system is capable of independently providing time, position, velocity and other information services to spacecraft users.

Key words: Beidou navigation satellite system; Navigation receiver; Beidou model; GPS model; Data quality; Comparative analysis

0 引言

根据中国北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)官方网站介绍,截至北京时间 2021 年 9 月 15 日,中国 BDS 在轨运行的 46 颗导航卫星,包含地球静止轨道(geostationary orbit, GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星和中圆地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星 3 种轨道卫星,可全天时、全天候免费为用户提供三维坐标、速度和时间信息,单点定位精度优于 5 m,时间精度优于 50 ns^[1]。

根据全球定位系统(global positioning system, GPS)介绍,截至北京时间 2021 年 9 月 15 日,美国 GPS 在轨运行的导航卫星共计 32 颗,均为 MEO 卫星,分布在 6 个轨道面,可全天时、全天候为用户提供三维坐标、速度和时间信息,单点定位精度优于 5 m,时间精度优于 50 ns^[2]。

从以上两种卫星导航系统的介绍可知,二者时间精度均优于 50 ns;但在航天器应用领域,由于导航设备对 BDS 和 GPS 的适应性、解算算法和解算精度不同^[3-4],其最终解算的时间、位置速度精度及状态可靠性不完全相同^[5-6]。

随着中国 BDS 的高速发展,用户对其数据质量的要求也越来越高。国内外学者根据 iGMAS 测站观测数据,在 GPS 和 BDS 播发信号及系统的相关性能方面已进行大量研究。其中文献[7]选取对比分析了北斗三号导航卫星与 GPS 导航卫星的观测数据质量及定轨精度,发现两个导航系统的信噪比与定轨精度基本相当。文献[8-10]对数据完整率、

信噪比、多路径误差、伪距噪声和电离层延迟变化率等性能指标进行详细对比分析,结果表明, BDS 表现优异,数据完整率和信噪比弱于 GPS,多路径误差和伪距噪声与 GPS 相当,电离层延迟变化率优于 GPS,表明 BDS 与 GPS 处于同一水准。

地面测站的观测数据与高动态低轨卫星运行状态中导航接收机对导航信号的捕获跟踪及解算情况存在差异,即目前缺少低轨应用卫星对 GPS 和 BDS 的数据质量分析。故本文从星载导航接收机的研制出发,使用双频双模导航接收机在轨数据进行分析 and 验证。开展低轨应用卫星星载导航接收机 BDS 模式和 GPS 模式下解算的导航卫星最高载噪比、捕获星数、可用星数、精密定轨精度及实时定轨精度对比分析,为后续低轨航天器使用中国 BDS 应用提供一定的参考。

1 导航接收机介绍

高分多模卫星运行于轨道高度 643 km 的太阳同步轨道,配置 2 台冷备工作的双频双模导航接收机,该导航接收机根据在轨程序加载配置成 BDS 双频导航接收机和 GPS 双频导航接收机。导航接收机根据软件配置,具备分时接收和解算 12 通道 BDS 卫星 B1I、B3I 频段导航信号或者 12 通道 GPS 卫星 L1、L2 频段导航信号的能力,获取原始测量数据并进行定轨解算,为卫星提供时间、位置数据和轨道根数。其位置精度优于 5 m(三轴合成),速度精度优于 0.01 m/s(三轴合成),导航接收机的原理设计框图和设计参数分别如图 1 和表 1 所示。

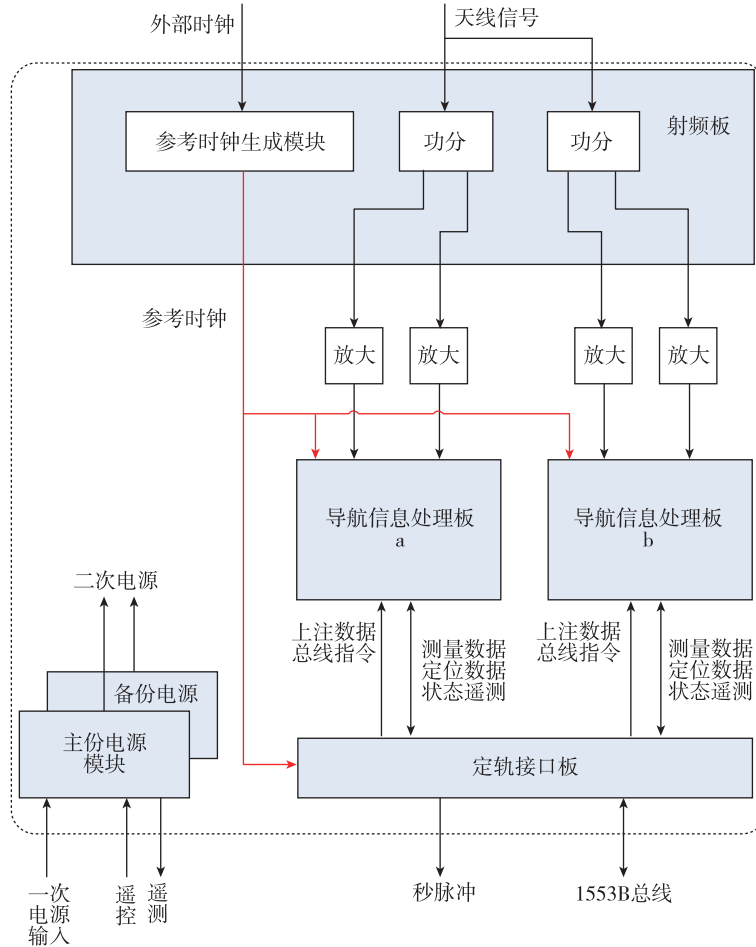


图 1 导航接收机设计原理图

Fig. 1 Design schematic of navigation receiver

表 1 导航接收机设计参数

Tab. 1 Design parameter of navigation receiver

参数项目	参数值
工作频点	GPS-L1/L2, BDS-B1I/B3I
天线增益	±60° 优于 -1 dBi, ±75° 优于 -6.5 dBi
灵敏度	优于 -162.5 dBW
接收功率动态范围	≥20 dB
通道数	每个导航信号 12 个
实时定轨精度	优于 5 m, 0.01 m/s (1σ, 三轴合成)
观测量精度	伪距 ≤40 cm, 载波相位 ≤2 mm

2 收星情况分析

导航接收机收星情况主要通过最高载噪比、捕获星数和可用星数量衡量。经分析,导航接收机最高载噪比 BDS 模式较 GPS 模式高 1 dB·Hz,平均可用星数 BDS 模式较 GPS 模式多 0.6 颗,表明 BDS 相较于 GPS 在发射信号功率和导航卫星服务数量方面存在优势。

2.1 BDS 模式导航卫星收星情况分析

2.1.1 载噪比分析

信号的质量通常用载噪比(C/N)衡量,其定义为已调制的平均功率与加性噪声功率之比,即 $C/N = 10\lg(P_c/P_n)$,其中 P_c 表示载波信号的功率, P_n 表示通带内的噪声功率,载噪比越高,信号质量越好。在轨航天器对 1 颗导航卫星信号的接收强度通常会呈现从弱到强再到弱的变化趋势,导致 1 颗导航卫星载噪比变化会呈现抛物线形态。导航接收机根据高分多模卫星型号软件需求,载噪比调整为原值减去 30 dB·Hz,输出范围为 0~25.5 dB·Hz,若超过 25.5 dB·Hz,则输出最大值。

北京时间 2020 年 11 月 2 日至 2020 年 11 月 8 日期间,各导航卫星载噪比统计如图 2(随机选取北斗 PRN 号 9 导航卫星和北斗 PRN 号 24 导航卫星)和表 2 所示。经分析,各导航卫星载噪比在 8.6 dB·Hz 以上持续时间均超过 5 min,可保证导航接收机正常定位解算。

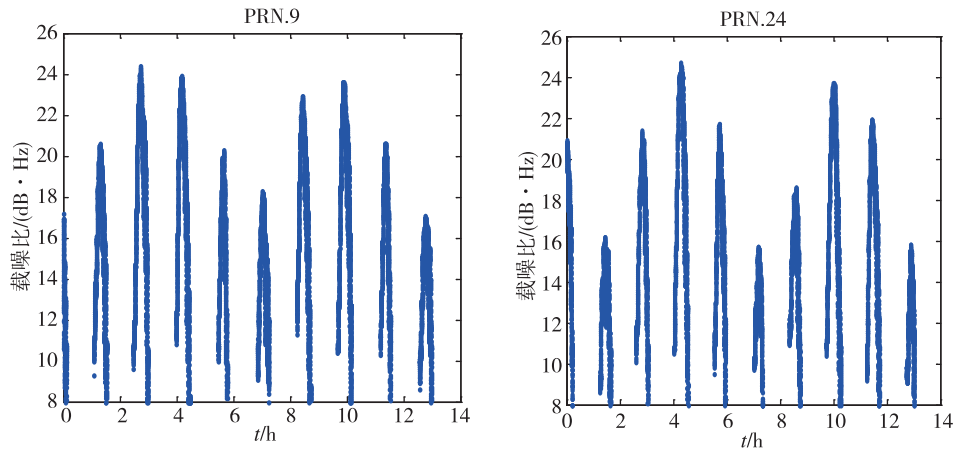


图 2 北斗导航卫星载噪比统计

Fig. 2 Statistics of signal carrier-to-noise ratio of BeiDou navigation satellites

表 2 北斗导航卫星载噪比统计

Tab. 2 Statistics of signal carrier-to-noise ratio of BeiDou navigation satellites

星号 (PRN)	最高载噪比/(dB·Hz)	星号 (PRN)	最高载噪比/(dB·Hz)	星号 (PRN)	最高载噪比/(dB·Hz)
1	22.1	12	24.0	26	25.5
2	22.7	13	22.1	27	25.5
3	20.3	14	24.7	28	25.5
4	22.9	16	22.1	29	25.5
5	20.7	19	25.5	30	25.5
6	20.5	20	25.5	32	25.5
7	21.0	21	25.5	33	25.5
8	21.2	22	25.5	34	25.5
9	21.7	23	25.5	35	25.5
10	20.7	24	25.5	36	25.5
11	24.7	25	25.5	37	25.5

2.1.2 收星数分析

高分多模卫星导航接收机在轨数据中,北京时间 2020 年 11 月 2 日至 2020 年 11 月 8 日期间,按小时统计的平均捕获星数和平均可用星数如表 3 所示,2020 年 11 月 2 日北斗捕获星数统计图如图 3 所示。经分析发现,北斗可用导航星平均数均在 8.0 颗以上,满足至少 4 颗导航卫星进行定位的要求。

表 3 捕获和可用北斗导航卫星星数

Tab. 3 Number of received and available BeiDou navigation satellites

日期	平均捕获星数/颗	平均可用星数/颗
20201102	10.2	8.1
20201103	10.2	8.2
20201104	10.2	8.3
20201105	10.3	8.5
20201106	10.3	8.5
20201107	10.2	8.4
20201108	10.2	8.4

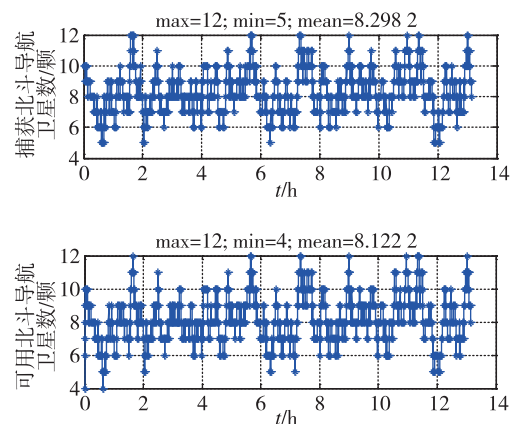


图 3 捕获和可用北斗导航卫星星数

Fig. 3 Number of received and available BeiDou navigation satellites

2.2 GPS 模式导航卫星收星情况分析

2.2.1 载噪比分析

高分多模卫星导航接收机在轨数据中,北京时

间 2020 年 11 月 21 日、24 日、25 日、27 日和 28 日 期间,各导航卫星载噪比统计如图 4(随机选取 GPS PRN 号 13 导航卫星和 GPS PRN 号 15 导航卫星) 和表 4 所示。在这些日期中,GPS 导航卫星最高载 噪比在 23.0 dB·Hz 以上,通过分析载噪比统计图 可知,导航接收机载噪比 8.6 dB·Hz 以上可用星 数持续时间可维持导航接收机在轨稳定运行。

2.2.2 收星数分析

高分多模卫星导航接收机在轨数据中,北京时间 2020 年 11 月 21 日、24 日、25 日、27 日和 28 日 期间,按小时统计的平均捕获和平均可用星数统计如表 5 所示,2020 年 11 月 21 日 GPS 捕获星数统计图如图 5 所示。经分析,GPS 捕获星平均数均在 8.0 颗以上, 满足至少 4 颗导航卫星进行定位的要求。

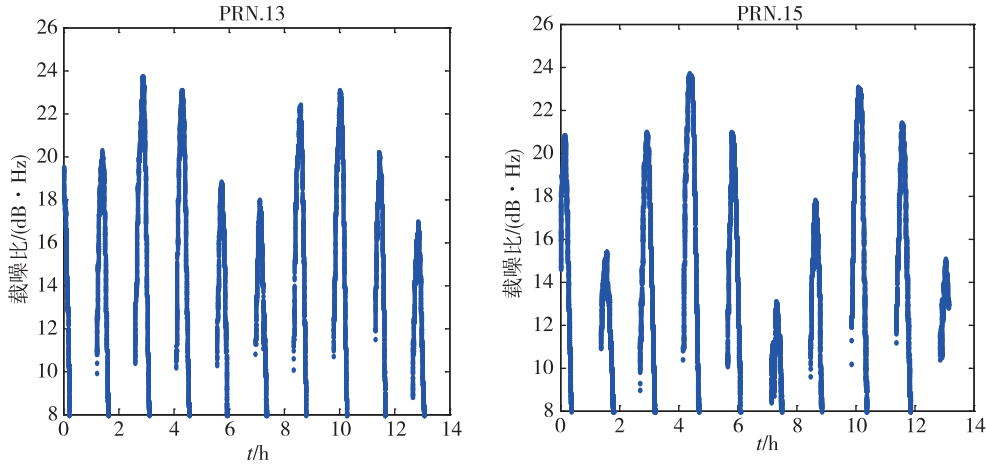


图 4 GPS 导航卫星载噪比统计

Fig. 4 Statistics of signal carrier-to-noise ratio of GPS navigation satellites

表 4 GPS 导航卫星载噪比统计

Tab. 4 Statistics of signal carrier-to-noise ratio of GPS navigation satellites

星号(PRN)	最高载噪比/(dB·Hz)	星号(PRN)	最高载噪比/(dB·Hz)	星号(PRN)	最高载噪比/(dB·Hz)
1	24.9	12	24.6	23	23.0
2	25.0	13	24.7	24	24.5
3	24.2	14	23.0	25	24.3
4	23.0	15	24.6	26	24.1
5	25.1	16	23.2	27	24.7
6	24.5	17	23.9	28	23.0
7	23.7	18	23.1	29	23.6
8	23.9	19	23.4	30	24.1
9	25.0	20	23.0	31	24.0
10	25.1	21	24.0	32	25.4
11	23.6	22	25.5		

表 5 捕获和可用 GPS 导航卫星数统计

Tab. 5 Number of received and available GPS navigation satellites

日期	平均捕获星数/颗	平均可用星数/颗
20201121	8.5	7.6
20201124	8.5	7.5
20201125	8.4	7.5
20201127	8.4	7.5
20201128	8.4	7.5

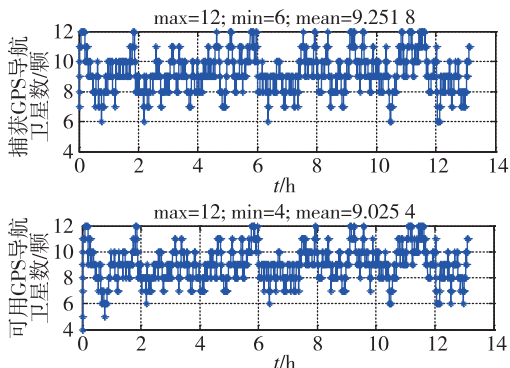


图 5 捕获和可用 GPS 导航卫星数

Fig. 5 Number of received and available GPS navigation satellites

3 精密定轨分析

分析精密定轨精度和实时定轨精度可发现, BDS 模式精密定轨位置精度和速度精度分别在 2.11~5.34 cm 和 0.002 3~0.004 6 cm/s 之间, GPS 模式精密定轨位置精度和速度精度分别在 1.63~4.86 cm 和 0.001 7~0.004 2 cm/s 之间。BDS 模式与 GPS 模式精密定轨结果相当, 表明 BDS 与 GPS 位置速度服务能力相当。

3.1 分析方法概述

采用导航接收机双频 BDS 及 GPS 观测值数据和国际 GNSS 服务 (international GNSS service, IGS) 机构提供的地面测算的 5 min 间隔 BDS 精密星历、15 min 间隔 GPS 精密星历、30 s 间隔 BDS 及 GPS 精密钟差等数据。

首先, 进行周跳探测与修复^[11], 以获得“干净”的非差观测值。然后, 利用导航系统双频电离层组合的观测数据值作为基本观测值。在此基础上, 考虑导航天线相位中心修正参数、地球自转修正参

数以及相对论效应等因素, 简化动力学定轨方法, 并利用最小二乘法进行参数估计。整个过程涉及数据预处理和精密定轨技术, 导航天线相位中心修正参数如表 6 所示。

表 6 导航天线相位中心及卫星质心在整星位置

Tab. 6 Positions of the phase center of navigation antenna and the center of mass of the satellite in the entire satellite

项目	频率	x/mm	y/mm	z/mm
	BDS-B1I	953.89	2.11	-140.88
导航天线	GPS-L1	950.81	0.49	-133.01
相位中心	GPS-L2	959.17	2.76	-150.74
	BDS-B3I	958.60	1.48	-150.60
卫星质心	—	9.1	0.7	1 628.9

数据预处理的输入数据为导航接收机双频原始观测数据, 对观测数据进行周跳探测、相位观测值初始模糊度计算等预处理工作, 可为后续的数据处理提供干净的双频观测数据^[11]。逻辑流程如图 6 所示。

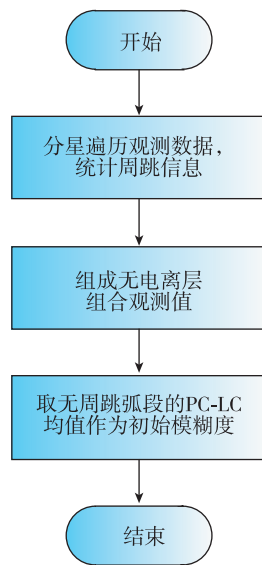


图 6 数据预处理逻辑流程图

Fig. 6 Logic flow chart of data preprocessing

精密定轨使用经过预处理的导航接收机双频观测数据, 在固定导航卫星星历和钟差的条件下, 利用动力学定轨方法解算高分多模卫星的轨道^[12-14], 精密定轨逻辑流程如图 7 所示。表 7 给出了精密定轨所用的动力学模型和解算参数^[15-16]。

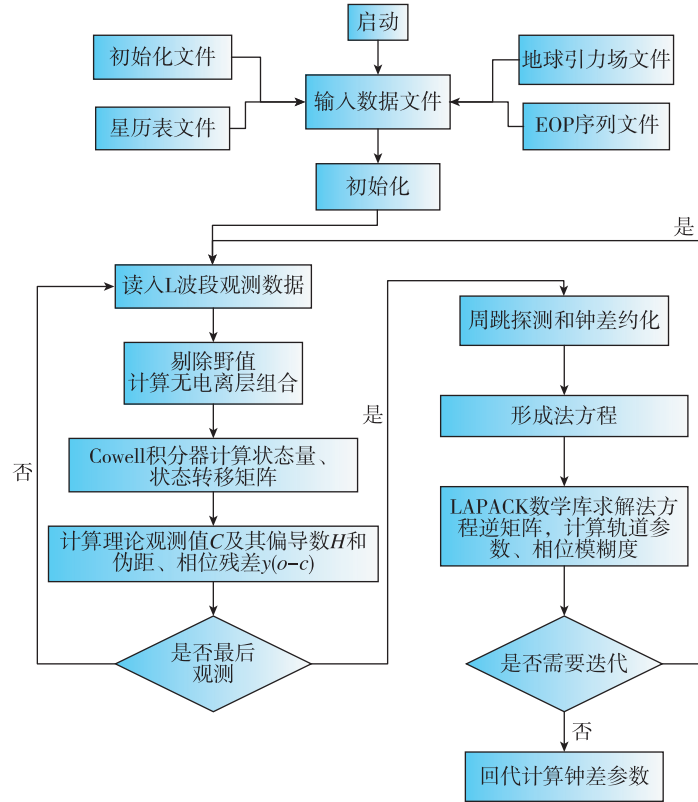


图 7 精密定轨流程图

Fig. 7 Logic flow chart of precise orbit determination

表 7 精密定轨所用的动力学模型和解算参数
Tab. 7 Dynamic model and calculation parameters for precise orbit determination

内容	描述	备注
地球重力场	CGM03c 模型	150×150 阶
大气阻力摄动	DTM2013 模型	分段解算大气阻力参数
太阳光压	Box-Wing 模型	Rim1992
固体潮摄动	IERS96 规范	McCarthy 1996
海潮摄动	CSR4.0	Eanes 1994
广义相对论摄动	IERS2010 规范	—
经验力摄动	周期性 RTN 摄动	分段估算 T、N 方向参数
N 体摄动	太阳、月球等引力摄动	JPL DE/LE 405 大行星历表
初始轨道	3-D 位置和速度	24 h 估算 1 组初轨
大气阻力参数	分段解算	12 h 估算 1 组参数
T、N 方向经验力	分段解算	6 h 估算 1 组参数
LEO 钟差	非差参数	每个历元解算 1 组钟差
LC 组合模糊度	实数解算	分段解算

在精密定轨所用的测量模型中需对高分多模卫星天线相位中心、天线相位缠绕、导航接收机天线相位中心以及广义相对论等误差项进行修正。

由于卫星动力学方程和观测方程均为非线性方程，为采用最小二乘法进行参数估计，需对这两类方程进行线性化处理^[17]。

3.2 精密轨道精度评估

精密定轨精度评估方法分为内符合与外符合精度评估两大类^[18]。外符合精度评估通过与国际权威机构发布的轨道进行对比分析，本文采用内符合精度评估，即重叠轨道偏差统计。

采用短弧定轨的卫星精密定轨方法，弧段 1 从 Day1 的 0 点到 18 点，弧段 2 从 Day1 的 6 点到 24 点，2 个弧段有 12 h 的数据重叠。尽管这 12 h 的观测数据是相同的，但这 2 段轨道是通过 2 次独立解算得到的，可以认为这 2 段 12 h 的重叠轨道是不相关的。因此，轨道重叠部分的符合程度可以反映出轨道精度。

3.3 精密定轨结果分析

采用内符合精度评估方法，对高分多模卫星导航接收机在轨数据进行精密定轨评估，北京时间 2020 年 11 月 2 日至 2020 年 11 月 8 日、2020 年 11 月 21 日、24 日、25 日、27 日和 28 日卫星数据进行分析，BDS 模式精度结果如图 8(随机选取 2020 年

11 月 2 日精密定轨结果)和表 8 所示,GPS 模式精度结果如图 9(随机选取 2020 年 11 月 21 日精密定轨结果)和表 8 所示。

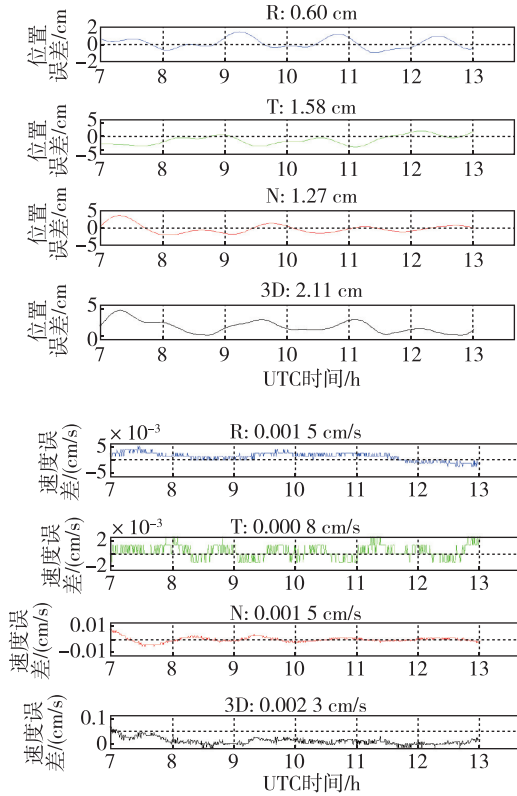


图 8 BDS 模式精密定轨结果

(北京时间 2020 年 11 月 2 日数据)

Fig. 8 Result of precise orbit determination in BDS model

(Data on November 2, 2020, Beijing time)

表 8 精密定轨结果统计

Tab. 8 Result number of precise orbit determination

日期	工作模式	实时定轨 位置结果/m	实时定轨 速度结果/(m/s)
20201102	BDS	3.21	0.003 02
20201103	BDS	3.18	0.003 57
20201104	BDS	3.43	0.003 71
20201105	BDS	3.64	0.003 86
20201106	BDS	3.93	0.003 78
20201107	BDS	4.23	0.003 94
20201108	BDS	3.23	0.003 46
20201121	GPS	3.10	0.002 91
20201124	GPS	3.62	0.003 83
20201125	GPS	3.77	0.003 81
20201127	GPS	3.75	0.003 81
20201128	GPS	3.85	0.003 92

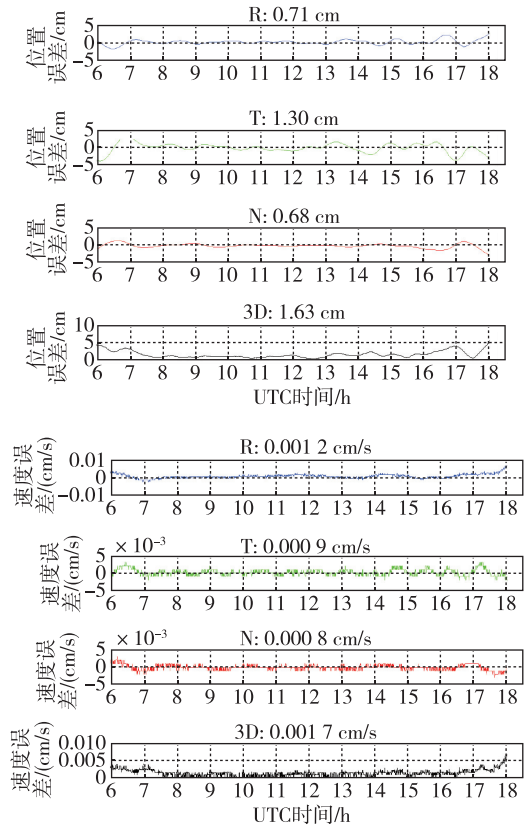


图 9 GPS 模式精密定轨结果

(北京时间 2020 年 11 月 21 日数据)

Fig. 9 Result of precise orbit determination in GPS model

(Data on November 21, 2020, Beijing time)

4 实时定轨精度分析

导航接收机以 1 Hz 速率输出 x, y, z 三轴的位置和速度信息,以精密定轨推算出的卫星位置速度为理论值,通过解算三轴位置速度的均方根,得出三轴位置速度精度^[19]。

以 x 轴精度解算方式为例,其解算公式为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_i^t)^2}{n}} \quad (1)$$

式中, x_i 为导航接收机输出的 x 轴位置; x_i^t 为精密定轨推算出的 x 轴理论值;从第 1 s 到数据结束,每秒记 1 个点, n 即为 1 500。通过解算长时间的导航接收机输出值与理论值均方根,得出 x 轴位置精度。 y 轴位置精度 σ_y 和 z 轴位置精度 σ_z ,以及 x, y, z 轴速度精度 $\sigma_{vx}, \sigma_{vy}, \sigma_{vz}$ 的计算方法相同。

位置精度 σ_p 的计算公式为

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}{3}} \quad (2)$$

表 9 给出了实时定轨解算的模型参数。

表9 实时定轨解算的模型参数
Tab.9 Model parameters of real-time orbit determination solution

内容	描述
观测模型	—
观测值	双频频率载波和伪距
接收机天线相位中心改正	地面校正
GPS卫星天线相位中心改正	广播星历提供相位中心值
GPS卫星星历钟差	广播星历
采样间隔	30 s
力学模型	—
地球重力场	EIGEN-GL04C(50×50)
N体引力	JPL DE405 行星星历
固体潮	IERS Conventions 2010
相对论效应	IERS Conventions 2010
大气阻力	DTM94 大气密度模型
太阳光压	Box-wing 模型
经验力模型	ACR 周期性经验力
待估模型	—
卫星参考时刻位置矢量	3个
卫星参考时刻速度矢量	3个
接收机钟差	每历元1个
模糊度	每颗卫星、每个模糊度弧段1个
大气阻力系数	1个
ACR周期性经验力	4个

通过对北京时间2020年11月2日至2020年11月8日、2020年11月21日、24日、25日、27日和28日卫星数据进行分析,BDS模式精度结果如图10(随机选取2020年11月2日精密定轨结果)和表10所示,GPS模式精度结果如图11(随机选取2020年11月21日精密定轨结果)和表10所示。

对比两种模式下的实时定轨精度可知,BDS模式实时定轨位置精度和速度精度分别在3.18~4.23 m和0.003 02~0.003 94 m/s之间,GPS模式实时定轨位置精度和速度精度分别在3.10~3.85 m和0.002 91~0.003 92 m/s之间,BDS模式与GPS模式实时定轨结果相当,表明在航天器应用领域,BDS与GPS位置速度服务能力相当。

5 结论

本文使用高分多模卫星星载BDS/GPS在轨数据,进行了低轨卫星应用中BDS和GPS两个系统的最高载噪比、可用星数及飞行器的实时定轨精度对比分析,结果表明BDS的最高载噪比高于GPS 1 dB·Hz、可用星数高于GPS 0.6颗,且两者实时定轨精度相当,表明BDS已具备独立为低轨航天器用户提供时间、位置及速度等信息服务的能力。

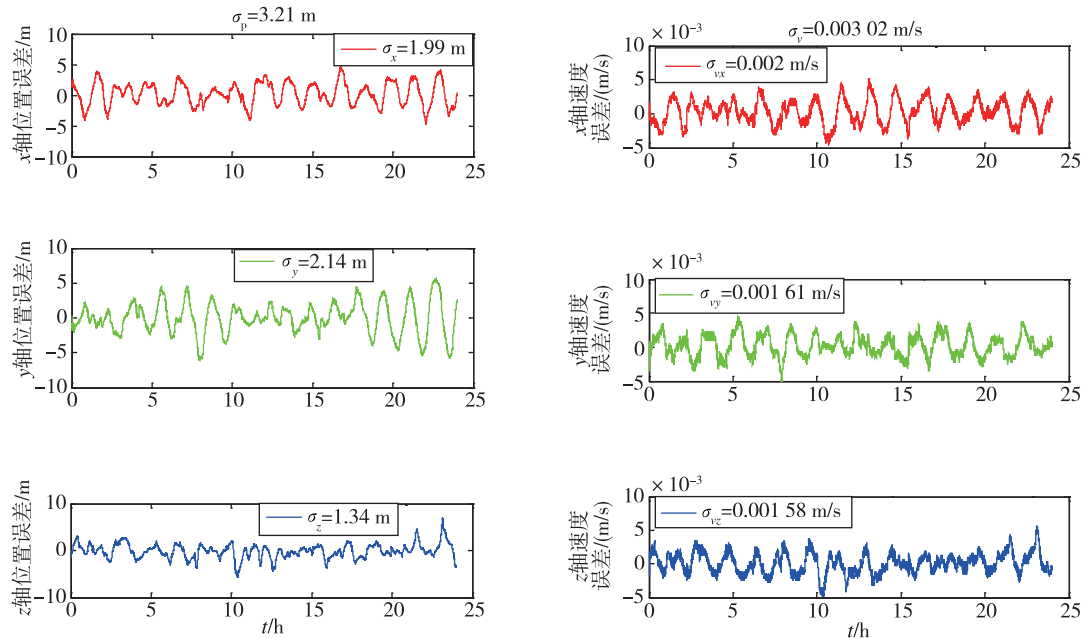


图10 BDS模式实时定位结果(北京时间2020年11月2日数据)

Fig.10 Result of real-time positioning result in BDS model(Data on November 2, 2020, Beijing time)

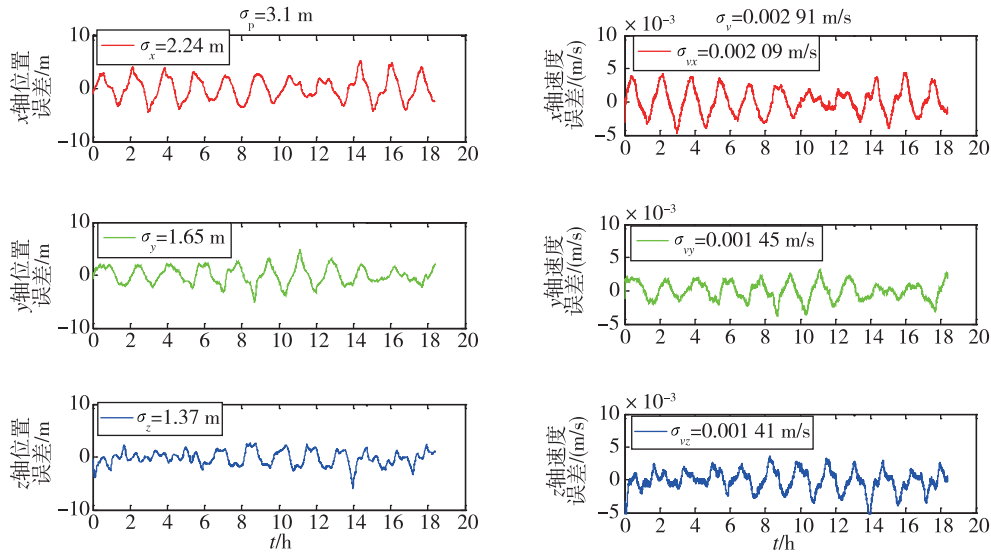


图 11 GPS 模式实时定位结果(北京时间 2020 年 11 月 21 日数据)

Fig. 11 Result of real-time positioning result in GPS model(Data on November 21, 2020, Beijing time)

表 10 实时定位结果统计

Tab. 10 Number of real-time positioning results

日期	工作模式	实时定轨位置结果/m	实时定轨速度结果/(m/s)
20201102	BDS	3.21	0.003 02
20201103	BDS	3.18	0.003 57
20201104	BDS	3.43	0.003 71
20201105	BDS	3.64	0.003 86
20201106	BDS	3.93	0.003 78
20201107	BDS	4.23	0.003 94
20201108	BDS	3.23	0.003 46
20201121	GPS	3.10	0.002 91
20201124	GPS	3.62	0.003 83
20201125	GPS	3.77	0.003 81
20201127	GPS	3.75	0.003 81
20201128	GPS	3.85	0.003 92

但是在高轨领域和深空探测领域中,仍缺少 BDS 的成功使用经历。在后续工作中,仍需继续开展高轨卫星领域及深空探测领域中 BDS 的应用数据分析,为 BDS 在高轨卫星领域及深空探测领域中的应用前景和应用方式提供有效参考。

参考文献

[1] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
 NING Jinsheng, YAO Yibin, ZHANG Xiaohong. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 3-8(in

Chinese).

[2] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 3-6.
 XIE Gang. Principles of GPS and receiver design[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry, 2017: 3-6(in Chinese).
 [3] 章大勇, 郑海. 基于模糊数学的 GPS 定位精度优化[J]. 全球定位系统, 2005(1): 35-38.
 ZHANG Dayong, ZHENG Hai. GPS positioning solution optimize based on fuzzy mathematics [J]. GNSS World of China, 2005(1): 35-38(in Chinese).
 [4] 肖焯辉, 戴缘生, 吴欣焯, 等. 基于北斗导航系统的定位算法的研究与应用[J]. 电子设计工程, 2020, 28(2): 69-72+77.
 XIAO Yehui, DAI Yuansheng, WU Xinye, et al. Research and application of location algorithms based on Beidou navigation system[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(2): 69-72+77(in Chinese).
 [5] 师一帅, 郝金明, 焦文海. 低轨卫星实时运动学精密定轨实现方法与精度分析[C]// 第十届中国卫星导航年会论文集——S04 卫星轨道与系统误差处理. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2019: 38-45.
 SHI Yishuai, HAO Jinming, JIAO Wenhai. Real-time kinematic precise orbit determination of low-Earth-orbit satellites: implementation methods and accuracy analyses [C]// Proceedings of 10th China Satellite Navigation Conference, S04 Satellite Orbit and System Error Handling. Beijing: China Satellite Navigation Office Academic Exchange Center, 2019:

- 38-45(in Chinese).
- [6] 郭金运. 低轨卫星精密定轨理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2014: 19-25.
GUO Jinyun. Precise orbit determination of low-Earth-orbit satellite [M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House Co., Ltd., 2014: 19-25 (in Chinese).
- [7] 曾添, 贾小林, 隋立芬, 等. 北斗三号组网卫星数据质量分析及单系统定轨精度初步评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(11): 1165-1170.
ZENG Tian, JIA Xiaolin, SUI Lifeng, et al. Initial evaluation of Beidou-3 satellite data quality and single system precise orbit determination[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(11): 1165-1170 (in Chinese).
- [8] 刘赞, 张鑫. 北斗三号在轨测试卫星观测数据分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(7): 741-745.
LIU Zan, ZHANG Xin. Analysis of observation data of BDS-3 in-orbit test satellites [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(7): 741-745(in Chinese).
- [9] 尹志毫, 王光兴, 胡志刚, 等. 北斗三号观测数据质量分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(6): 37-45.
YIN Zhihao, WANG Guangxing, HU Zhigang, et al. Data quality analysis of BDS-3 observables[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(6): 37-45(in Chinese).
- [10] 李涌涛, 李建文, 潘林, 等. 北斗三号新信号 B1c 和 B2a 观测数据质量分析评估[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1161-1168.
LI Yongtao, LI Jianwen, PAN Lin, et al. Quality assessment of the Beidou-3 new signal B1c and B2a observation data [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(11): 1161-1168(in Chinese).
- [11] 夏磊, 赖祖龙, 梅长松, 等. 实时周跳探测与修复的 TurboEdit 历元差优化算法[J]. 武汉大学学报-信息科学版, 2021, 46(6): 920-927.
XIA Lei, LAI Zulong, MEI Changsong, et al. An improved algorithm for real time cycle slip detection and repair based on TurboEdit epoch difference model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6): 920-927(in Chinese).
- [12] CHEN J P, ZHANG Y Z, ZHOU X H, et al. GNSS clock corrections densification at SHAO: from 5 min to 30 s[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57: 166-175.
- [13] YANG Y X, GAO W G, GUO S R, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Navigation, 2019, 66(1): 7-18.
- [14] YE F, YUAN Y B, OU J K. Initial orbit determination of BDS-3 satellites based on new code signals[J]. Geodesy and Geodynamics, 2018, 9(4): 342-346.
- [15] YANG Y X, HUANG G W, ZHANG Q, et al. Early analysis of precise orbit and clock offset determination for the satellites of the global BeiDou-3 system[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(3): 1270-1279.
- [16] KAPLAN D E, HEGARTY C J. Understanding GPS: principles and applications[M]. 2nd Edition. Norwood: Artech House, 2006.
- [17] ZHAO G, ZHOU X H, WU B. Precise orbit determination of Haiyang-2 using satellite laser ranging [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(6): 589-597.
- [18] DAI X, LOU Y, DAI Z, et al. Real-time precise orbit determination for BDS satellites using the square root information filter [J]. GPS Solution, 2019, 23: 45.
- [19] 匡开发. GNSS 卫星实时精密定轨技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019: 57-62.
KUANG Kaifa. Real-time precise orbit determination of GNSS[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019: 57-62(in Chinese).

(编辑: 黄利华)