

引文格式: 李星星, 李捷, 袁勇强, 等. 北斗三号卫星经验型太阳光压模型分析与精化[J]. 测绘学报, 2022, 51(8): 1680-1689. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210532.
LI Xingxing, LI Jie, YUAN Yongqiang, et al. Assessment and improvement of the empirical solar radiation pressure models for BDS-3 satellites [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(8): 1680-1689. DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210532.



北斗三号卫星经验型太阳光压模型分析与精化

李星星, 李捷, 袁勇强, 郑鸿杰, 黄适, 刘城伯, 张柯柯

武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079

Assessment and improvement of the empirical solar radiation pressure models for BDS-3 satellites

LI Xingxing, LI Jie, YUAN Yongqiang, ZHENG Hongjie, HUANG Shi, LIU Chengbo, ZHANG Keke

School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Solar radiation pressure (SRP) is the largest non-gravitational perturbation for GNSS satellites, and is the main error source of GNSS precise orbit determination (POD). Currently, two empirical SRP models, namely the extended CODE orbit model (ECOM) and the updated ECOM (ECOM2) model, are widely used in GNSS POD. However, these two models are not suitable for BDS-3 satellites, as they are designed for GPS and GLONASS satellites. The five-parameter ECOM model exhibits large orbit discontinuities in low β periods. By introducing the first-order harmonic D_c parameter, the orbit overlapping RMS values of CAST satellites can be reduced by 60%, 52%, and 29% in the along-track, cross-track, and radial components, respectively. As for the ECOM2 model, strong correlations are observed between D_{2c} and D_0 parameters as well as that between D_{2s} and B_s parameters. Based on the strong correlations, the eight-parameter ECOM2 model and the seven-parameter ECOM2 model are proposed, where the parameters D_{2c} and D_{2c} / D_{2s} are not estimated, respectively. The results show that the radial overlapping RMS values can be reduced by about 18% and 27% for CAST and SECM satellites when using the eight-parameter ECOM2 model. In addition, a further reduction of 5.2%~8.5% in the radial overlapping RMS values can be achieved when applying seven-parameter ECOM2 model. By considering both the accuracy of overlapping orbit and SLR residuals, we conclude that the seven-parameter ECOM2 model without D_{2c} and D_{2s} is more applicable for BDS-3 POD. The orbit overlapping RMS values are (5.0, 3.4, 1.4) cm and (5.4, 3.5, 1.5) cm for CAST and SECM satellites in the along-track, cross-track, and radial components, respectively. The standard deviation values of SLR residuals are 3.1~3.2 cm and 4.4~4.7 cm for CAST and SECM satellites.

Key words: BDS-3; precise orbit determination; solar radiation pressure; empirical SRP models

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41974027; 42142037); The National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2501100); The Hubei Province Natural Science Foundation (No. 2020CFA002); The Sino-German Mobility Programme (No. M-0054)

摘要: 太阳光压摄动作为在轨导航卫星受到的最大的非保守力, 是卫星精密定轨的重要误差源。ECOM 模型、ECOM2 模型, 这两种经验型光压模型被广泛应用于导航卫星定轨。然而, ECOM 模型和 ECOM2 模型分别是针对 GPS 和 GLONASS 卫星设计的, 并不完全适用于我国北斗三号 (BDS-3) 卫星。针对五参数 ECOM 模型在 BDS-3 卫星低太阳高度角时期轨道不连续性增大的问题, 本文提出在 D 方向引入一阶周期项来吸收未被模型化光压加速度。结果表明, 引入一阶余弦周期项 D_c , 能将低太阳高度角时期 CAST 卫星的切向、法向、径向重叠轨道误差分别减小约 60%、52%、29%。针对 ECOM2 模型中

D_{2c} 和 D_0 、 D_{2s} 和 B_s 之间存在的强相关性,本文提出了不估计 D_{2c} 参数的八参数 ECOM2 模型和不估计 D_{2c} 与 D_{2s} 的七参数 ECOM2 模型。结果表明,相较九参数 ECOM2 模型,不估计 D_{2c} 参数的八参数 ECOM2 模型能够将 CAST 卫星和 SECM 卫星径向重叠轨道误差分别减少约 18% 和 27%。在此基础上,继续移除 D_{2s} 后(七参数 ECOM2),径向重叠轨道误差可进一步减小 5.2%~8.5%。综合考察重叠轨道精度和 SLR 检核精度,不顾及 D_{2c} 和 D_{2s} 的七参数 ECOM2 模型表现最佳。CAST 卫星和 SECM 卫星重叠轨道切向、法向、径向精度分别为 5.0、3.4、1.4 cm 和 5.4、3.5、1.5 cm;SLR 检核残差标准差分别为 3.1~3.2 cm、4.4~4.7 cm。

关键词:北斗三号卫星;精密定轨;太阳光压摄动;经验光压模型

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2022)08-1680-10

基金项目:国家自然科学基金(41974027;42142037);国家重点研发计划(2021YFB2501100);湖北省自然科学基金(2020CFA002);中德科学中心-中德国际合作项目(M-0054)

北斗卫星导航系统是由我国自主建设运行的卫星导航系统,是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时(PNT)服务的国家重要空间基础设施^[1]。北斗三号全球卫星导航系统(BDS-3)已于 2020 年 7 月正式开通^[2],目前 BDS-3 星座包括 3 颗地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星、3 颗倾斜轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星及 24 颗中地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星。其中,24 颗 MEO 卫星分别由中国空间技术研究院(China Academy of Space Technology, CAST)及上海微小卫星工程中心(Shanghai Engineering Center for Microsatellites, SECM)研制^[3-4]。

高精度卫星轨道产品是 BDS-3 精密服务的基础。太阳光压摄动作为导航卫星受到的最主要的非保守力,其精确建模是提升导航卫星轨道精度的关键。太阳光压加速度和卫星的几何构型、姿态、质量、卫星表面光学属性等参数密切相关,文献[5]建立了这些参数和光压加速度之间的物理模型。然而,由于卫星表面光学参数不准确、卫星姿态控制模型存在误差等原因,纯粹依据物理原理建立的分析型光压模型精度有限,难以取得厘米级精度的定轨结果^[6-7]。不同于分析型模型,经验型模型无须考虑太阳光压力对卫星的物理作用方式,而是使用实际卫星观测数据估计光压参数,模型精度较高,因此得到了广泛应用^[8]。其中,ECOM(extended code orbit model)模型^[9-10]和 ECOM2(the updated ECOM)模型^[11-12]作为两种常用的经验型光压模型,被大多数 IGS(International GNSS Service)分析中心用于 GPS 卫星和 GLONASS 卫星精密轨道产品生成^[13]。同时,这两种模型也同样被普遍应用于 BDS-3 卫

星精密定轨^[14-17]。

然而,ECOM 模型和 ECOM2 模型均非针对 BDS-3 卫星提出,它们在 BDS-3 卫星定轨中仍有一定局限。本文首先对两种经验模型在 BDS-3 卫星定轨中的适用性进行了分析。在此基础上,针对五参数 ECOM 模型在低太阳高度角时期轨道不连续性增大、ECOM2 模型部分参数高度相关等问题,本文提出了不同的改进方法并通过重叠轨道比较和卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)检核两种方式进行模型验证。

1 BDS-3 卫星经验型光压模型适用性分析

ECOM 模型和 ECOM2 模型是导航卫星精密定轨中被广泛采用的两类经验型太阳光压模型。完整的 ECOM 模型包含 9 个参数,文献[10]指出仅采用其中的 D_0 、 Y_0 、 B_0 、 B_c 和 B_s 5 个参数也能得到良好的定轨结果,因此五参数 ECOM 模型被普遍应用。随着导航卫星系统的发展,针对 GPS 卫星提出的 ECOM 模型并不适用于其他导航卫星。为此,欧洲定轨中心提出了 ECOM2 模型,文献[12]指出相较 ECOM 模型,ECOM2 模型可以明显提升 GLONASS 卫星、Galileo 卫星和 QZSS(quasi zenith satellite system)卫星的定轨精度。本节主要围绕五参数 ECOM 模型和 ECOM2 模型这两种经验光压模型在 BDS-3 卫星精密定轨中的适用性进行分析。重点介绍了 BDS-3 卫星定轨采用的策略,分析了两种光压模型的光压参数。

1.1 定轨策略

本文利用全球分布的 138 个 IGS 多系统测站和 26 个 iGMAS(international GNSS monitoring

and assessment system)测站 2020 年的观测数据对 BDS-3 卫星进行精密定轨。图 1 展示了这 164 个测站的全球分布情况,三角形为 IGS 多系统测站,圆点为 iGMAS 测站。

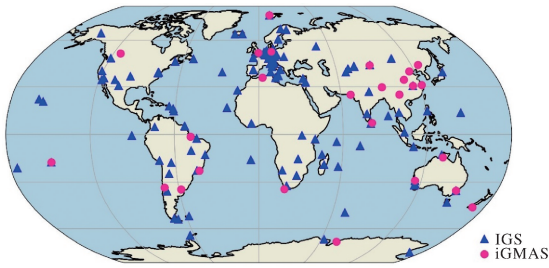


图 1 测站全球分布

Fig.1 Global distributed stations

本文使用 GREAT (GNSS+research, application and teaching)^[18] 软件完成 BDS-3 卫星轨道解算。在解算过程中,选用 B1I 和 B3I 频段的 BDS-3 卫星观测数据组成无电离层组合消除一阶电离层误差。定轨过程中所有测站坐标均固定,不参与参数估计。其中 IGS 测站固定为 IGS 周解坐标, iGMAS 测站坐标固定为单 GPS 精密单点定位获得的周解测站坐标。为了进一步提升轨道精度,联合 GPS 卫星观测数据进行 BDS-3/GPS 联合精密定轨解算,以增强对流层、地球自转参数等公共参数的解算可靠性。其中, GPS 卫星均采用五参数 ECOM 光压模型。精密定轨处理中所采用的观测模型、动力学模型和参数估计策略详见表 1,不同定轨策略中仅有 BDS-3 卫星采用的光压模型不同。

表 1 BDS-3 精密定轨处理策略

Tab.1 Processing strategies of BDS-3 POD

模型	处理策略
观测值	B1I+B3I 无电离层组合
定轨采样率/s	300
定轨弧长/h	72
截止高度角/(°)	7
天线相位中心改正	卫星端:采用官方提供的相位中心改正值 ^[19] 接收机端:按照 IGS14 天线文件中 GPS 卫星 L1/L2 值改正
对流层延迟	干延迟通过 Saastamoinen 模型+GMF 投影函数将改正 湿延迟采用分段常数估计
地球重力场	EGM2008 模型,12×12 阶 ^[20]
N 体引力	根据 JPL DE405 星历计算
地球潮汐改正	海潮潮汐:FES2004 模型 ^[21] 固体潮、极潮:根据 IERS 协议改正 ^[22]
钟差	接收机和卫星钟差均作为白噪声逐历元估计

1.2 光压模型适用性分析

图 2 和图 3 分别展示了 BDS-3 卫星五参数 ECOM 模型和九参数 ECOM2 模型光压参数随太阳高度角(β 角)的变化情况。由于 BDS-3 MEO 卫星均为“一箭双星”方式发射入轨,“双星”的结构、质量等都十分相近,故其光压参数估值差异小于 1 nm/s^2 。因此,图中仅绘制了“双星”中的一颗卫星的光压参数变化情况。

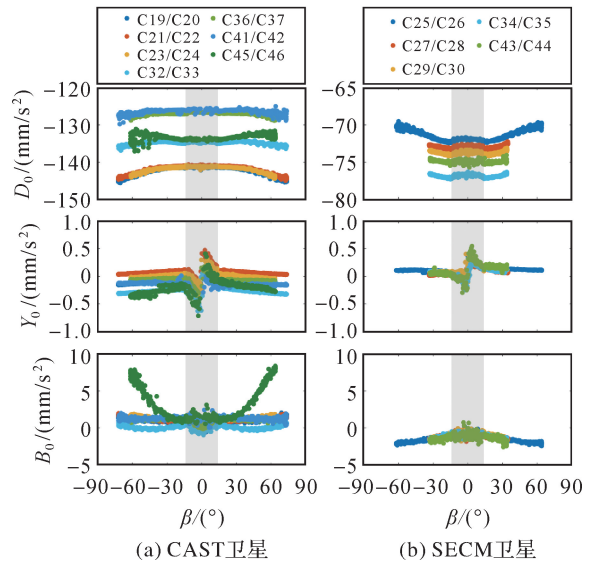


图 2 CAST 卫星及 SECM 卫星五参数 ECOM 模型光压参数 D_0 、 Y_0 、 B_0 随太阳高度角变化(阴影区域表示地影期)

Fig.2 D_0 , Y_0 , B_0 estimates from the five-parameter ECOM model for CAST and SECM satellites (The shaded areas are the eclipse periods)

对于 D_0 参数,CAST 卫星和 SECM 卫星之间有明显的区别。以五参数 ECOM 模型为例,CAST 卫星变化范围在 $-146 \sim -125 \text{ nm/s}^2$,而 SECM 卫星 D_0 参数值大小仅为 $-77 \sim -69 \text{ nm/s}^2$ 。这主要是由于 SECM 卫星的太阳能帆板面积 (10.8 m^2) 远小于 CAST 卫星 (20.44 m^2)。对于同属 CAST 或 SECM 的卫星, D_0 参数大小与其卫星质量(表 2)相关,卫星质量越大, D_0 参数值越小。然而,C34/C35 的 D_0 参数在 SECM-A 卫星中最大,但其质量也最大,这说明 C34/C35 卫星的实际质量小于官方发布的标称值。观察 ECOM2 模型 D_0 参数变化,也可得到相同的结论。此外,与五参数 ECOM 模型相比,ECOM2 模型每颗卫星的 D_0 分布更加离散,这可能是由于 ECOM2 模型在 D 方向存在过度参数化。

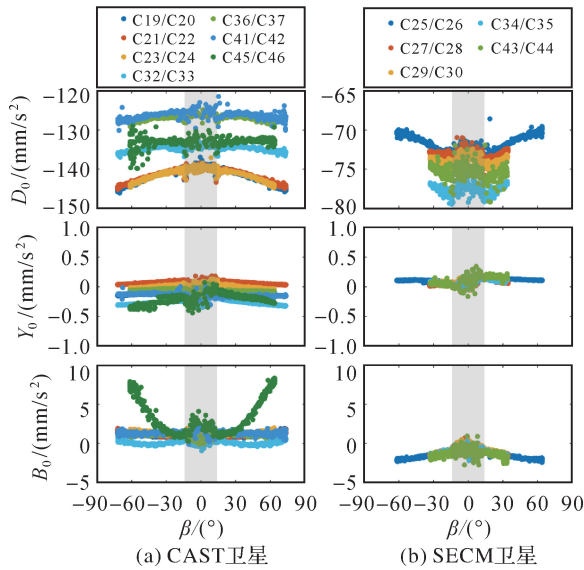


图 3 CAST 卫星及 SECM 卫星九参数 ECOM2 模型光压参数 D_0 、 Y_0 、 B_0 随太阳高度角变化(阴影区域表示地影期)

Fig. 3 D_0 、 Y_0 、 B_0 estimates from the nine-parameter ECOM2 model for CAST and SECM satellites (The shaded areas are the eclipse periods)

表 2 BDS-3 卫星质量信息

Tab.2 Mass of BDS-3 satellites

卫星类型	PRN	标称质量/kg
CAST MEO	C19, C20, C21	941~946
	C22, C23, C24	
	C32, C33	1007
	C36, C37, C41	1058~1061
C42, C45, C46		
SECM-A MEO	C25, C26,	1041~1044
	C27, C28, C29, C30	1008~1018
SECM-B MEO	C34, C35	1045~1046
	C43, C44	1075~1078

ECOM 模型 Y_0 参数在非地影期较为稳定,但在地影期内变化最大可达 1.0 nm/s^2 ,其原因可能是五参数 ECOM 模型不能补偿地影期内未模型化的力(如热辐射)^[23]。当采用 ECOM2 模型时,该差异明显减小,这是由于 ECOM2 模型 D 方向的高阶周期项可以吸收这部分未模型化的误差。此外,各 CAST 卫星非地影期的 Y_0 参数值差异明显,这可能是由于各卫星 Y 轴偏差不同引起的^[24]。

对于 B_0 参数,大部分 CAST 卫星的值在 $-1.0 \sim 2.0 \text{ nm/s}^2$ 。但 C45/C46 两颗卫星的 B_0 参数值最大可达到 8.0 nm/s^2 ,远大于其他 CAST 卫星,且与 β 角存在明显相关性。这说明 C45/C46 很可能存在和其他 CAST 卫星不同的卫星构型。

本文进一步对 BDS-3 卫星重叠轨道结果进行

了分析,示例性选取其中一颗卫星(C20)进行分析,其余 CAST 卫星与 C20 表现相近。图 4 和图 5 分别展示了采用五参数 ECOM 模型和九参数 ECOM2 模型的 C20 的重叠轨道误差随时间变化序列。可以发现,在低太阳高度角时期,采用 ECOM 模型,卫星轨道不连续性明显增大,切向误差最大可上升至 78 cm。SECM 卫星结果表明,在低太阳高度角时期卫星轨道不连续性同样增大,但幅度小于 CAST 卫星(切向误差上升 28%左右)。而采用 ECOM2 模型后,低太阳高度角时期的重叠轨道误差并没有明显上升。这进一步表明五参数 ECOM 模型在低太阳高度角时期不适用于 BDS-3 卫星精密定轨。

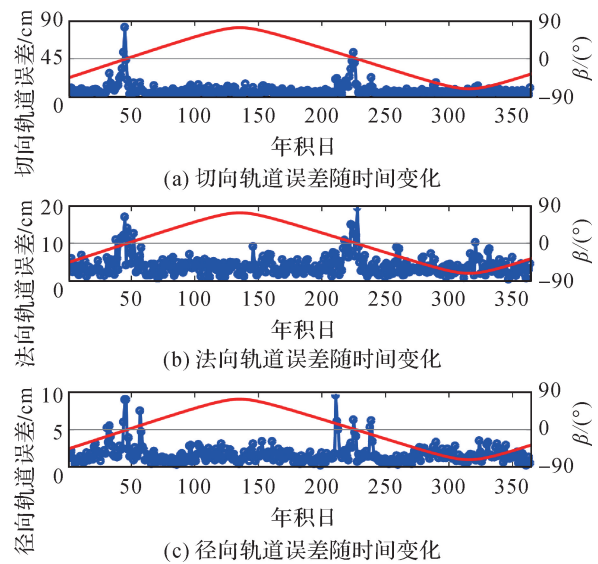


图 4 五参数 ECOM 模型 C20(CAST)重叠轨道误差随时间变化(红线表示 β 角)

Fig. 4 Overlapping results of the five-parameter ECOM model for C20 (CAST) (the red lines are the β angles)

此外,针对 ECOM2 模型 D_0 参数分布离散的现象,本文进一步分析了 ECOM2 模型各个光压参数之间的相关性,分别选取了一颗 CAST (C19)、一颗 SECM(C25) 卫星作为代表进行分析,其余卫星表现类似。图 6 展示了 C19 和 C25 在 β 角为 25° 时各个 ECOM2 参数之间的相关系数。由图 6 可知, D_0 和 D_{2c} 之间, D_{2s} 和 B_s 之间存在明显的强相关性。图 7 进一步展示了 D_0 和 D 方向各周期项参数及 D_{2s} 和 B_s 之间的相关关系。可以发现, D_0 和 D_{2c} 之间的相关性明显和 β 角相关。当 β 角在 30° 以内时, D_0 和 D_{2c} 之间的相关系数约为 1,但随着 β 角增大,相关系数急速下降。 D_{2s} 和 B_s 的相关系数数值则均在 0.94 以上,

这表明 D_{2s} 和 B_s 参数一直具有强相关性。

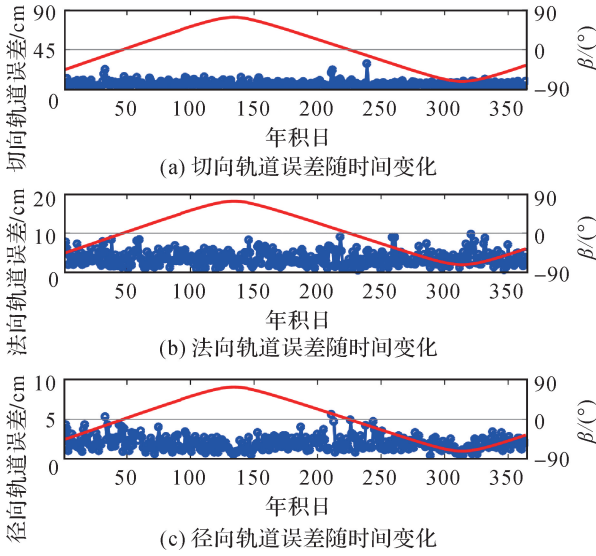


图 5 九参数 ECOM2 模型 C20(CAST)重叠轨道误差随时间变化(红线表示 β 角)

Fig. 5 Overlapping results of the nine-parameter ECOM2 model for C20 (CAST) (the red lines are the β angles)

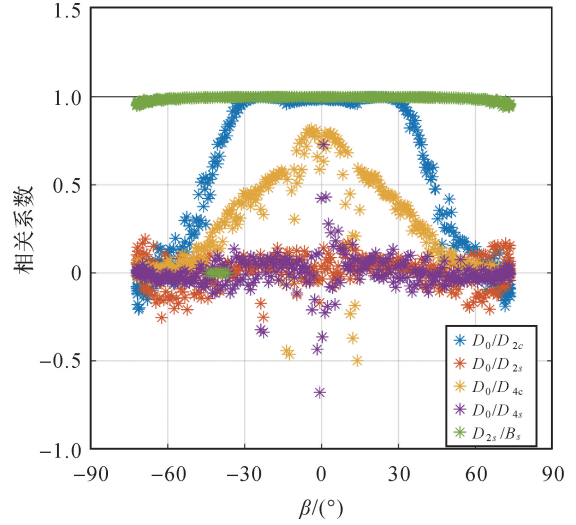


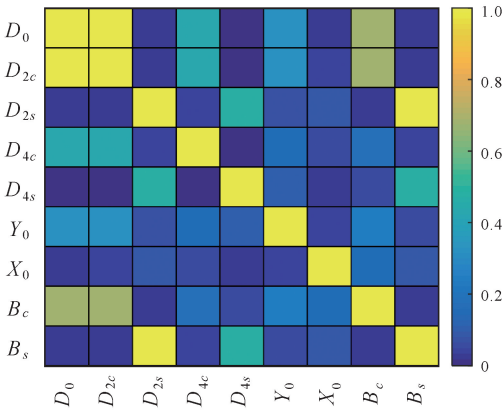
图 7 九参数 ECOM2 模型光压参数相关系数随太阳高度角变化

Fig. 7 Correlation coefficients of nine-parameter ECOM2 model as a function of β angle

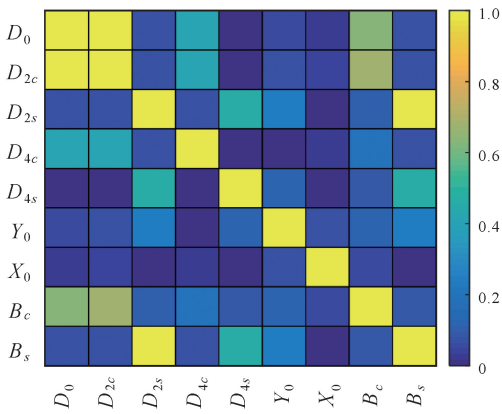
2 经验光压模型改进方法

如 1.2 节所述,五参数 ECOM 模型和 ECOM2 模型在 BDS-3 卫星定轨中均存在一定的问题,这两个模型并不完全适用于 BDS-3 卫星定轨。五参数 ECOM 模型在太阳高度角较低时,呈现出明显的轨道不连续性,这是由于 BDS-3 卫星的长方体构型导致的。当太阳高度角较大时,卫星 +X 面受照,光压摄动在轨道运行周期内变化较小;当太阳高度角较小时,卫星 +X、+Z 和 -Z 面轮流受照,由于 X 面于 Z 面面积不同,光压摄动随轨道运行周期呈现明显周期性变化, D_0 常量参数无法吸收该周期误差。基于此,本文提出了在五参数 ECOM 模型的 D 方向引入周期项以降低 BDS-3 卫星在太阳高度角较低时的轨道不连续性。同时为了探究不同周期项对 BDS-3 卫星定轨的影响并尽可能减少光压参数,对引入不同周期项的定轨结果进行分析。对于 ECOM2 模型,其 D_0 参数分布更为离散,这可能是由于 ECOM2 模型在 D 方向存在过度参数化。通过对 ECOM2 模型参数之间相关性的分析,发现 D_0 和 D_{2c} 之间、 D_{2s} 和 B_s 之间存在强相关性。考虑到该相关性,本文提出通过减少 ECOM2 模型二阶周期项以进一步提高轨道精度。综上所述,本文主要的改进方法如下:

- (1) 针对五参数 ECOM 模型低 β 角时期轨道



(a) C19 ECOM2 光压参数之间的相关系数



(b) C25 ECOM2 光压参数之间的相关系数

图 6 C19 和 C25 ECOM2 光压参数之间的相关系数
Fig.6 correlation coefficients between the ECOM2 SRP parameters for C19 and C25

不连续性增大的问题,在五参数 ECOM 模型的 D 方向引入了一阶周期项。分别对只引入 D_c 周期项 (ECOM_ D_c)、只引入 D_s 周期项 (ECOM_ D_s) 及同时引入 D_c 和 D_s 周期项 (ECOM_ D_cD_s) 的情况进行分析。

(2) 针对 ECOM2 模型中部分参数间存在的强相关性,分析了不估计 D_{2c} 的八参数 ECOM2 模型 (8ECOM2),以及不估计 D_{2c} 和 D_{2s} 的七参数 ECOM2 模型 (7ECOM2) 的定轨精度。

表 3 给出了上述改进模型的光压参数列表。作为对比,五参数 ECOM 模型与九参数 ECOM2 模型也同时给出。

表 3 BDS-3 精密定轨光压模型
Tab.3 SRP models of BDS-3 POD

模型	光压参数列表
ECOM	D_0, Y_0, B_0, B_c, B_s
ECOM_ D_c	$D_0, D_c, Y_0, B_0, B_c, B_s$
ECOM_ D_s	$D_0, D_s, Y_0, B_0, B_c, B_s$
ECOM_ D_cD_s	$D_0, D_c, D_s, Y_0, B_0, B_c, B_s$
ECOM2	$D_0, D_{2c}, D_{2s}, D_{4c}, D_{4s}, Y_0, B_0, B_c, B_s$
8ECOM2	$D_0, D_{2s}, D_{4c}, D_{4s}, Y_0, B_0, B_c, B_s$
7ECOM2	$D_0, D_{4c}, D_{4s}, Y_0, B_0, B_c, B_s$

3 结果分析

3.1 重叠轨道结果

重叠轨道比较是评估卫星轨道内符合精度的常用方法,本文选取了 24 h 弧长的重叠轨道用于计算重叠轨道精度。

图 8 展示了在 2020 年 DOY 211—DOY 238 期间 β 角小于 14° 的 C19、C20、C21、C22、C32 及 C33 卫星 (由于 C41/C42 卫星观测数据较少,定轨精度和其他卫星存在差距,因此 C41/C42 未计入统计) 重叠轨道误差统计结果。由图 8 可知,在 D 方向引入周期项可以明显减小重叠轨道误差值,其中轨道切向改善最为明显。与五参数 ECOM 模型相比,ECOM_ D_s 模型将切向、法向、径向重叠轨道误差分别从 13.6、6.6、2.4 cm 减小到 6.6、4.6、1.7 cm; ECOM_ D_c 模型在切向和法

向的改进更明显,其重叠轨道误差分别为 5.4、3.2、1.7 cm; ECOM_ D_cD_s 模型在切向和法向上有所提升,但径向精度却有所下降,重叠轨道误差值分别为 7.5、4.9、3.8 cm。总体而言,在 D 方向引入周期项可以减小约 36.4%~57.5% 的一维重叠误差。在 D 方向引入一阶周期项 D_c 的改善结果最明显,可以达到与非低 β 角期间的卫星重叠轨道精度相当的水平。对于 SECM 卫星,本文选择了 2020 年 DOY 270—DOY 305 期间的地影期卫星进行结果统计 (见表 4,由于观测数据较少,C43/C44 未计入统计)。相较 CAST 卫星,SECM 卫星在低 β 角时期重叠轨道精度降低不明显 (一维重叠精度下降约 26.7%),在 D 方向引入周期项 D_c 或同时引入 D_c 和 D_s 可将 SECM 卫星低 β 角时期重叠轨道精度提升至和非低 β 角时期精度相当的水平,但引入 D_s 周期项反而降低了重叠轨道精度 (一维重叠精度下降约 38.6%)。

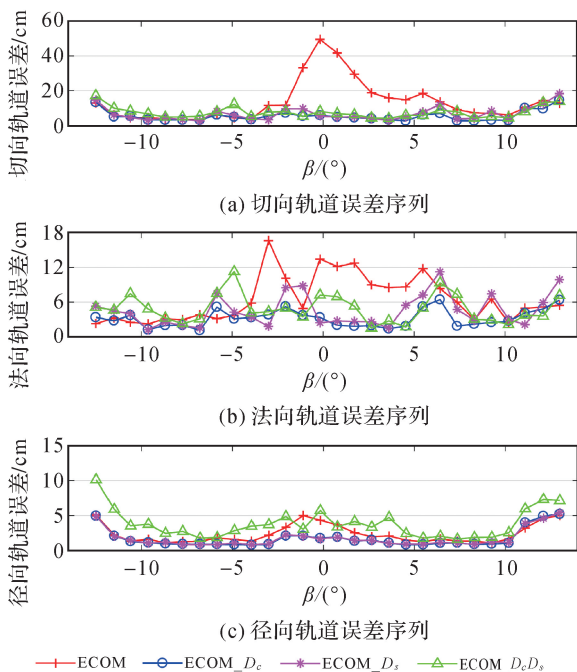


图 8 不同 ECOM 模型在低太阳高度角时期重叠轨道误差序列结果

Fig. 8 Overlapping results for different ECOM models during low β angle

表 4 地影期不同参数 ECOM 模型的 BDS-3 卫星 24 h 重叠轨道误差统计

Tab.4 Average 24 h overlapping results of the different models for BDS-3 satellites during low β angle cm

卫星	ECOM			ECOM_ D_c			ECOM_ D_s			ECOM_ D_cD_s		
	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向
CAST	13.6	6.6	2.4	5.4	3.2	1.7	6.6	4.6	1.7	7.5	4.9	3.8
SECM	6.9	4.5	1.5	5.0	3.2	1.2	8.9	7.3	1.5	5.1	2.5	2.1

图 9 展示了 ECOM2 模型、8ECOM2 模型及 7ECOM2 模型的非地影期重叠轨道误差统计结果。需要指出的是,由于 2 颗 SECM 卫星(C43/C44, SECM-B)及 4 颗 CAST 卫星(C41/C42/C45/C46)发射于 2019 年下半年,其观测数据仍然较少,此外 C45/C46 卫星构型有别于其他 CAST 卫星。因此,本文单独统计了这些卫星的重叠轨道误差。结果表明,8ECOM2 模型可以明显降低卫星重叠轨道误差。与 ECOM2 模型相比,8ECOM2 模型能够将 CAST 卫星和 SECM 卫星一维重叠轨道误差从 3.8 cm 和 4.2 cm 减小到 3.6 cm 和 3.9 cm(对于 C41/C42、C45/C46 和 C43/C44 则分别从 6.1、8.2 和 7.2 cm 减小为 5.9、7.6 和 6.7 cm)。且在切向、法向、径向 3 个方向中,8ECOM2 模型对轨道径向精度的提升最为明显,可达到 17.4%~28.6%。7ECOM2 模型可在 8ECOM2 模型基础上进一步提升卫星重叠轨道精度,径向误差进一步减小了 5.2%~8.5%。此外,对低太阳高度角时期的 ECOM2 模型、8ECOM2 模型及 7ECOM2 模型重叠轨道结果进行统计。结果显示相较 ECOM2 模型,8ECOM2 模型及 7ECOM2 模型均对径向重叠轨道提升明显,其中 8ECOM2 模型可将 CAST 及 SECM 卫星径向误差分别从 2.7 cm 和 2.5 cm 减小为 2.3 cm 和 1.8 cm;7ECOM2 模型则分别减小到 2.0 cm 和 1.6 cm。

表 5 统计了非地影时期的五参数 ECOM 模型、九参数 ECOM2 模型、8ECOM2 模型及 7ECOM2 模型在卫星切向、法向、径向的重叠轨道误差统计结果。整体而言,五参数 ECOM 模型

的重叠轨道误差小于 ECOM2 模型。但通过对 ECOM2 模型光压参数的重新选取,对于不估计 D_{2c} 和 D_{2s} 的七参数 ECOM2 模型,其 SECM 卫星定轨精度和五参数 ECOM 模型相当,CAST 卫星精度则更优。

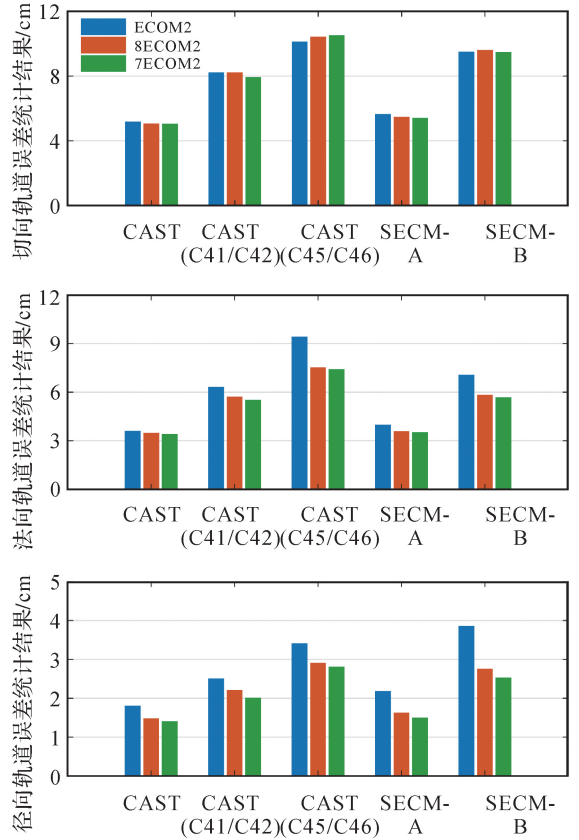


图 9 不同 ECOM2 模型重叠轨道误差统计
Fig.9 Overlapping results of different ECOM2 models

表 5 不同模型的 BDS-3 卫星 24 h 重叠轨道误差统计

Tab.5 Average 24 h overlapping results of different models for BDS-3 satellites

cm

卫星	ECOM			ECOM2			8ECOM2			7ECOM2		
	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向
CAST MEO	5.8	3.4	1.8	5.2	3.6	1.8	5.0	3.5	1.5	5.0	3.4	1.4
CAST MEO (C41/C42)	8.1	5.3	2.2	8.2	6.3	2.5	8.2	5.7	2.2	7.9	5.5	2.0
CAST MEO (C45/C46)	10.4	7.2	2.9	10.1	9.4	3.4	10.4	7.5	2.9	10.5	7.4	2.8
SECM-A	5.4	3.5	1.5	5.6	4.0	2.2	5.5	3.6	1.6	5.4	3.5	1.5
SECM-B	9.5	5.7	2.4	9.5	7.0	3.9	9.5	5.7	2.8	9.5	5.7	2.5

3.2 SLR 检核

除重叠轨道误差外,本文还采用 SLR 检核的

方法对 BDS-3 卫星轨道精度进行评价。SLR 作为独立的轨道径向精度评价方式被广泛应用于卫

星轨道外符合精度评定。目前所有 BDS-3 卫星均搭载了激光反射棱镜,其中 4 颗卫星(C20/C21/C29/C30)被国际激光测距服务组织(international laser ranging service,ILRS)持续观测^[25]。需要指出的是,本文选取了 3 d 定轨弧段的中间 24 h 用于 SLR 检核,并将绝对值大于 50 cm 的残差作为粗差剔除。

同样选取了 2020 年 DOY 211—DOY 238 和 DOY 270—DOY 305 之间的观测数据,对改进后的五参数 ECOM 模型进行 SLR 检核验证。表 6

表 6 五参数 ECOM、ECOM_{D_c}、ECOM_{D_s} 和 ECOM_{D_cD_s} 模型 SLR 检核结果

Tab.6 SLR results for ECOM、ECOM_{D_c}、ECOM_{D_s} and ECOM_{D_cD_s} models

cm

PRN	# NP	ECOM		ECOM _{D_c}		ECOM _{D_s}		ECOM _{D_cD_s}	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
CAST C20	265	3.4	3.5	3.2	3.5	2.8	3.5	7.4	4.4
CAST C21	221	3.6	4.4	3.4	4.9	3.0	4.9	7.0	5.3
SECM C29	169	-4.8	3.3	-4.6	3.1	-4.8	3.3	-4.8	3.8
SECM C30	184	-5.0	3.5	-5.1	3.3	-5.5	3.4	-5.2	3.6

表 7 统计了非地影期的五参数 ECOM 模型、ECOM2 模型、8ECOM2 模型以及 7ECOM2 模型 SLR 残差统计结果。可以看到,所有模型 SLR 残差的平均偏差与标准差都在 5.0 cm 以内。相较五参数 ECOM 模型,九参数 ECOM2 模型平均偏差减小了 0.5~1.0 cm,标准差减小了 0.1~0.4 cm。相较九参数 ECOM2 模型,不估计 D_{2c} 和 D_{2s} 参数后,SECM 卫星的 SLR 残差的平均偏差及标准差均增大,其精度和五参数 ECOM 模型相

展示了低太阳高度角时期的 4 颗卫星 C20、C21、C29、C30 采用五参数 ECOM 模型,ECOM_{D_c} 模型、ECOM_{D_s} 模型及 ECOM_{D_cD_s} 模型的 SLR 残差统计结果。与五参数 ECOM 模型相比,在 D 方向只引入一项周期项,CAST 卫星的 SLR 残差的平均偏差减小了 0.2~0.6 cm,标准差略有增大,SECM 卫星 SLR 残差的标准差减小约 0.2 cm;在 D 方向同时引入周期项 D_c 和 D_s,SLR 残差平均偏差和标准差均有不同程度增大。

当;CAST 卫星平均偏差增大,但其标准差有所下降。这可能是由于未被吸收的地球反照辐射、天线推力等动力学误差导致的。表 8 统计了地影期不同参数 ECOM2 模型的 SLR 检核结果。结果显示采用 7ECOM2 模型可以一定程度上降低地影期的 SLR 残差的标准差,对于 SECM 卫星标准差降幅可达 1.1~1.2 cm。这主要是因为低太阳高度角时期光压参数均高度相关,减少估计参数更有利于轨道解算。

表 7 不同光压模型 SLR 检核结果

Tab.7 SLR residuals for different SRP models

cm

PRN	# NP	ECOM		ECOM2		8ECOM2		7ECOM2	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
CAST C20	3245	4.8	3.3	4.3	3.2	4.8	3.3	4.8	3.1
CAST C21	3407	4.8	3.5	4.3	3.3	4.9	3.3	4.9	3.2
SECM C29	2216	-4.6	4.7	-3.7	4.3	-4.5	4.9	-4.6	4.7
SECM C30	2117	-4.9	4.4	-3.9	4.0	-4.9	4.6	-5.0	4.4

表 8 地影期九参数 ECOM2、8ECOM2、7ECOM2 模型 SLR 检核结果

Tab.8 SLR results for ECOM2、8ECOM2 and 7ECOM2 models

cm

PRN	# NP	ECOM2		8ECOM2		7ECOM2	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
CAST C20	265	2.2	3.4	0.7	3.7	2.5	3.2
CAST C21	221	2.8	3.4	2.1	4.4	3.3	3.7
SECM C29	169	-2.5	4.3	-2.6	4.2	-3.7	3.2
SECM C30	184	-3.6	4.5	-3.5	4.0	-4.7	3.3

4 总结

本文利用 2020 年观测数据,对 ECOM、ECOM2 这两类常用的经验型太阳光压模型在 BDS-3 精密定轨中的适用性进行分析。针对两种模型在 BDS-3 定轨中存在的缺陷,分别提出了相应改进策略,并通过重叠轨道比较和 SLR 检核两种方式进行模型验证。主要结论有:

(1) C45 和 C46 两颗卫星的 B_0 参数远大于其他卫星,且和 β 角呈现出明显相关性,这可能是由于 C45 和 C46 存在不同于其他 CAST 卫星的卫星构型;C34 和 C35 两颗卫星的 D_0 值大于其他 SECM-A 卫星,而其质量也为最大,说明这两颗卫星实际质量小于其标称值。

(2) 针对五参数 ECOM 模型在低 β 角时轨道不连续性明显增大的问题,采用在 D 方向增加周期项参数的方式进行改进。结果表明,在 D 方向增加周期项 D_c 参数对重叠轨道误差改善最为明显。相较五参数 ECOM 模型,加入 D_c 周期项后,CAST 卫星重叠轨道径向、法向、切向误差分别减少了 60.3%、51.5%、29.2%。因此,当地影期采用 ECOM 模型时,应在五参数 ECOM 模型的基础上额外引入一阶周期项 D_c 。

(3) ECOM2 模型参数之间的相关系数表明 D_0 和 D_{2c} 之间、 D_{2s} 和 B_s 之间存在强相关性。将 D_{2c} 参数移除后,和 ECOM2 模型相比,重叠轨道径向精度可提升 0.3~1.1 cm;在此基础上将 D_{2s} 移除后,径向精度可进一步提升 0.1~0.3 cm。CAST 卫星 SLR 残差标准差减小,SECM 卫星增大;两类卫星的 SLR 平均偏差均有所增大。

(4) 对于 CAST 卫星,不估计 D_{2c} 和 D_{2s} 的七参数 ECOM2 模型可以得到最小的重叠轨道误差和 SLR 残差标准差;对于 SECM 卫星,七参数 ECOM2 模型的精度和五参数 ECOM 模型相当。综合考虑重叠轨道精度和 SLR 检核精度,七参数 ECOM2 模型更适于 BDS-3 卫星精密定轨。

致谢: 本文的数值计算得到了武汉大学超级计算中心的支持和帮助。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国务院办公厅.中国北斗卫星导航系统白皮书[M].北京:人民出版社,2016.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China BeiDou satellite navigation system [M]. Beijing: People's Publishing House, 2016.

[2] 蔡洪亮,孟轶男,耿长江,等.北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J].测绘学报,2021,50(4):427-435. DOI: 10.11947/j. AGCS.2021.20200549.
CAI Hongliang, MENG Yinan, GENG Changjiang, et al. BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50 (4): 427-435. DOI: 10. 11947/j. AGCS. 2021.20200549.

[3] 中国卫星导航系统管理办公室.北斗卫星参数文件[EB/OL]. [2021-10-16]. http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020200323534413073762.zip.
China Satellite Navigation Office. Satellite information of BDS [EB/OL]. [2021-10-16]. http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020200323534413073762.zip.

[4] LI Xingxing, YUAN Yongqiang, ZHU Yiting, et al. Improving BDS-3 precise orbit determination for medium earth orbit satellites [J]. GPS Solutions, 2020, 24 (2) DOI: 10.1007/s10291-020-0967-3.

[5] MILANI A, NOBILI AM, FARINELLA P. Non-gravitational perturbations and satellite geodesy [M]. Bristol, UK: Adam Hilger, 1987.

[6] GUO Jing, CHEN Guo, ZHAO Qile, et al. Comparison of solar radiation pressure models for BDS IGSO and MEO satellites with emphasis on improving orbit quality [J]. GPS Solutions, 2017, 21 (2): 511-522. DOI: 10.1007/s10291-016-0540-2.

[7] RODRIGUEZ-SOLANO C, HUGENTOBLE U, STEIGENBERGER P. Adjustable box-wing model for solar radiation pressure impacting GPS satellites [J]. Advances in Space Research, 2012, 49:1113-1128. DOI: 10.1016/j.asr.2012.01.016.

[8] 王晨.北斗导航卫星光压模型构建与精化研究[D].武汉:武汉大学,2019.
WANG Chen. Solar radiation pressure modelling for BeiDou navigation satellites [D]. Wuhan :Wuhan University, 2019.

[9] BEUTLER G, BROCKMANN E, GURTNER W, et al. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results [J]. Manuscripta Geodaetica, 1994, 19(6):367-386. DOI: 10.1183/09031936.94.07071350.

[10] SPRINGER TA, BEUTLER G, ROTHACHER M. Improving the orbit estimates of GPS satellites [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(3):147-157. DOI: 10.1007/s001900050230.

[11] ARNOLD D, MEINDL M, BEUTLER G, et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(8):775-791. DOI: 10.1007/s00190-015-0814-4.

[12] PRANGE L, ORLIAC E, DACH R, et al. CODE's five-system orbit and clock solution—the challenges of multi-

- GNSS data analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(4): 345-360. DOI: 10.1007/s00190-016-0968-8.
- [13] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HUGENTOBLER U. Enhanced solar radiation pressure modeling for Galileo satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3):283-297. DOI: 10.1007/s00190-014-0774-0.
- [14] LI Ran, WANG Ningbo, LI Zishen, et al. Precise orbit determination of BDS-3 satellites using B1C and B2a dual-frequency measurements[J]. *GPS solutions*, 2021, 25(3):95. DOI: 10.1007/s10291-021-01126-x.
- [15] XU Xiaolong, WANG Xilong, LIU Jingnan, et al. Characteristics of BD3 global service satellites: POD, open service signal and atomic clock performance[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13):1559. DOI: 10.3390/rs11131559.
- [16] YAN Xingyuan, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, 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*, 2018, 63(3):1270-1279. DOI: 10.1016/j.asr.2018.10.038.
- [17] ZHANG Bo, JIA Xiaolin, SUN Fuping, et al. Performance of BeiDou-3 satellites: signal quality analysis and precise orbit determination[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(3):687-695. DOI: 10.1016/j.asr.2019.05.016.
- [18] LI Xingxing, HAN Xinjuan, LI Xin, et al. GREAT-UPD: An open-source software for uncalibrated phase delay estimation based on multi-GNSS and multi-frequency observations[J]. *GPS Solution*, 2021, 25(2):66. DOI: 10.1007/s10291-020-01070-2.
- [19] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星天线相位中心文件[EB/OL]. [2021-05-04]. 2019. <http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020200323534413069510.atx>. China Satellite Navigation Office. Satellite antenna phase center of BDS[EB/OL]. [2021-05-04]. <http://www.beidou.gov.cn/yw/gfgg/201912/W020200323534413069510.atx>.
- [20] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. The development and evaluation of the earth gravitational model 2008 (EGM2008)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4). DOI: 10.1029/2011JB008916.
- [21] LYARD F, LEFEVRE F, LETELLIER T, et al. Modeling the global ocean tides: modern insights from FES2004[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56(5-6):394-415. DOI: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- [22] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions 2010[R]. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.
- [23] DUAN Bingbing, HUGENTOBLER U, HOFACKER M, et al. Improving solar radiation pressure modeling for GLONASS satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(8). DOI: 10.1007/s00190-020-01400-9.
- [24] KUANG D, RIM HJ, SCHUTZ BE, et al. Modeling GPS satellite attitude variation for precise orbit determination[J]. *Journal of Geodesy*, 1996, 70(9):572-580. DOI: 10.1007/BF00867865.
- [25] PEARLMAN M, DEGNAN J, BOSWORTH J. The international laser ranging service[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 30(2):135-143.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期:2021-09-16

修回日期:2022-03-15

第一作者简介:李星星(1985—),男,教授,研究方向为GNSS精密数据处理。

First author: LI Xingxing (1985—), male, professor, majors in GNSS precision data processing.

E-mail: xxli@sgg.whu.edu.cn

通信作者:袁勇强

Corresponding author: YUAN Yongqiang

E-mail: yqyuan@whu.edu.cn