引文格式：孙燕, 杨鹏森. 不同光压模型在北斗三号 MEO 卫星中的定轨分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 99-101. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.05.024

不同光压模型在北斗三号MEO卫星中的定轨分析

孙　燕[1]，杨鹏森[1]
（1. 烟台市土地储备和利用中心，山东 烟台 264000）

摘　要：针对不同太阳光压模型在北斗三号MEO卫星定轨中适用性不同的问题，借助全球卫星导航系统数据对ECOM1-9模型、ECOM1-5模型、ECOM2模型、ECOMC模型在北斗三号MEO卫星中的适用性进行了分析，并分别采用国际激光测距服务中心提供的卫星激光测距数据、重叠弧段数据进行内外符合精度评估。结果表明，采用ECOMC模型定轨时，不同北斗三号MEO卫星内外符合精度均最佳，外符合精度最佳时，RMSE为3.3 cm，STD为3.0 cm。与ECOM1-9模型、ECOM1-5模型、ECOM2模型相比，ECOMC模型定轨内符合精度在径向分别提升了39.54%、16.84%、12.55%；在切向分别提升了51.33%、27.43%、10.46%；在法向分别提升了48.99%、21.42%、11.22%。

关键词：北斗三号；定轨；太阳光压；全球卫星导航系统；适用性
中图分类号：P228.1　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0099-03

Orbit Determination Analysis of Different Optical Pressure Models in BDS-3 MEO Satellites

SUN Yan[1], YANG Pengsen[1]
(1. Yantai Land Reserve and Utilization Center, Yantai 264000, China)

Abstract: In view of the different applicability of different optical pressure models in BDS-3 MEO satellite orbit determination, we analyzed the applicability of ECOM1-9 model, ECOM 1-5 model, ECOM 2 model and ECOMC model in BDS-3 MEO satellite with the help of global navigation satellite system data, and evaluated the internal and external coincidence accuracy with satellite laser ranging data and overlapping arc data provided by international laser ranging service center. The results show that when the ECOMC model is used for orbit determination, the internal and external coincidence accuracy of different BDS-3 MEO satellites are the best. When the external coincidence accuracy is the best, the RMSE value is 3.3 cm and the STD value is 3.0 cm. Compared with ECOM1-9 model, ECOM1-5 model and ECOM2 model, the internal coincidence accuracy of ECOMC model is improved by 39.54%, 16.84% and 12.55% respectively in radial direction. In the tangential direction, it is improved by 51.33%, 27.43% and 10.46% respectively. In the normal direction, it is improved by 48.99%, 21.42% and 11.22% respectively.

Key words: BDS-3, orbit determination, optical pressure, global navigation satellite system, applicability

北斗卫星导航系统（BDS）可为用户提供定位、导航和授时等服务，而BDS卫星轨道的确定是提供服务的前提条件[1-2]。卫星动力学模型误差是卫星精密定轨精度的主要因素之一，而太阳光压模型误差是卫星动力学模型误差的主要来源[3]。20世纪60年代国内外学者对太阳光压模型进行了研究，根据建立数学原理的类型可分为经验型光压模型（Colombo模型、Springer模型、ECOM模型等）、半经验型光压模型（JPL模型、Box-wing模型等）和分析型光压模型（ROCK模型、T10/20/30系列模型等）[4-6]，这些模型各具优缺点，且在不同卫星导航系统的适应性不同[7]。孙国健[8]等对比分析了不同经验光压模型对北斗三号（BDS-3）卫星定轨的适用性，结果表明在6种经验光压模型（ECOM1-5、ECOM1-7、ECOM1-9、ECOM2-D2B1、ECOM2-D4B1、ECOMC）定轨结果中，SECM和CAST卫星采用ECOMC模型的RMSE分别为12.9 cm和12.3 cm，因此轨道预测中推荐使用ECOMC模型；赵辉[9]等对不同姿态控制模式下的定轨性能进行了验证分析，结果表明卫星处于非地影期时，BDS-2卫星采用ECOM5模型时内外符合精度最优，而BDS-3卫星采用拓展版ECOM模型时精度最佳，卫星处于地影期时，BDS-2与BDS-3 MEO卫星采用拓展版ECOM模型的精度最高；慕仁海[10]等对ECOMC、ECOM1-9模型在GPS卫星定轨中的适用性进行了分析，结果表明ECOMC模型在GPS卫星定轨中具有较好的精度；薛建华[11]等对先验光压模型在

收稿日期：2022-04-10；修回日期：2022-05-25。
项目来源：山东省自然科学基金资助项目（ZR2017MD029）。
第一作者简介：孙燕（1974—），高级工程师，从事大地测量与数据处理、国土调查与监测工作，E-mail：sunyansy1974@126.com。

Galileo卫星中的应用进行适用性分析，结果表明先验光压模型能改善Galileo卫星的轨道精度，最佳改善率可达68.6%；计国锋[12]等研究了光压模型对GPS/BDS联合定轨的影响，结果表明ECOM1光压模型适用于IGSO卫星，而不适用于GPS卫星，借助ECOM1光压模型定轨可提高BDS卫星定轨的精度和可靠性。综上所述，不同太阳光压模型对不同卫星定轨的适用性不同，本文利用ECOM1–9模型、ECOM1–5模型、ECOM2模型和ECOMC模型对BDS–3 MEO卫星进行定轨分析，旨在为提高BDS–3 MEO卫星轨道精度提供参考。

1 ECOM系列光压模型

ECOM1模型是由伯尔尼大学基于ROCK光压模型和欧洲定位中心（CODE）提供的卫星轨道运行数据建立的经验模型，利用9个先验参数分别表示卫星在D、Y、B三个方向上的变化规律。与ROCK模型相比，该模型精度可提升至厘米级。其中ECOM1–9参数模型可表示为：

$$\begin{cases} a_D = \mathrm{D}_0 + D_c \cos u + D_s \sin u \\ a_Y = \mathrm{Y}_0 + Y_c \cos u + Y_s \sin u \\ a_B = \mathrm{B}_0 + B_c \cos u + B_s \sin u \end{cases} \tag{1}$$

式中，D_0、Y_0、B_0为常数项；D_c、D_s、Y_c、Y_s、B_c、B_s为周期项；u为人造卫星相对于惯性系升交点的角度。

CODE研究人员发现ECOM1–9模型参数间的相关性较强，为进一步提升模型精度，提出了ECOM1–5参数模型，即忽略了D_c、D_s、Y_c、Y_s四个参数，表达式为：

$$\begin{cases} a_D = \mathrm{D}_0 \\ a_Y = \mathrm{Y}_0 \\ a_B = \mathrm{B}_0 + B_c \cos u + B_s \sin u \end{cases} \tag{2}$$

由于ECOM1模型在使用过程中未能有效吸收长方体构型太阳光压摄动会产生系统性误差，因此CODE进而提出了ECOM2光压模型。其数学表达式为：

$$\begin{cases} a_D = \mathrm{D}_0 + \sum_{i=1}^{n_D} \left\{ D_{2i,c} \cos(2i\Delta u) + D_{2i,s} \sin(2i\Delta u) \right\} \\ a_Y = \mathrm{Y}_0 \\ a_B = \mathrm{B}_0 + \sum_{i=1}^{n_B} \left\{ B_{2i-1,c} \left[\cos(2i-1)\Delta u \right] + B_{2i-1,s} \left[\sin(2i-1)\Delta u \right] \right\} \end{cases} \tag{3}$$

式中，n_D、n_B为D和B方向上的周期项数目；Δu为卫星相对于太阳的轨道角。

ECOMC模型是由MIT大学基于ECOM1模型和ECOM2模型数据的再收集处理提出的一种新光压模型，具有精度高、参数多、参数相关性强、同时计算效率低的特点。其数学表达式为：

$$\begin{cases} a_D = \mathrm{D}_0 + D_{1c} \cos(\Delta u) + D_{1s} \sin(\Delta u) + D_{2c} \cos(2\Delta u) + \\ \quad D_{2s} \sin(2\Delta u) + D_{4c} \cos(4\Delta u) + D_{4s} \sin(4\Delta u) \\ a_Y = \mathrm{Y}_0 + Y_{1c} \cos(\Delta u) + Y_{1s} \sin(\Delta u) \\ a_B = B_{1c} \cos(\Delta u) + B_{1s} \sin(\Delta u) \end{cases} \tag{4}$$

2 数据来源与定轨策略

本文借助全球卫星导航系统（MGEX）观测数据进行定轨实验，选取国际激光测距服务（ILRS）中心提供的卫星激光测距（SLR）数据和武汉大学IGS数据中心提供的事后精密星历作为评估依据。实验过程中借助Bernese5.2软件进行定轨处理，定轨策略如表1所示，可以看出，N体（太阳、月亮和其他近地行星）引力采用JPL实验室公布的JPL.DE45模型改正，太阳光压分别采用ECOM1–9/ ECOM1–5/ ECOM2模型旨在对比不同光压模型对定轨的影响。实验过程中不考虑地影期与非地影期对定轨结果的影响。

表1 定轨参数处理策略

参数	处理策略
截止高度角	10°
观测值	无电离层组合观测值
轨道弧长	72 h
固体潮、海潮、极移	IERS2010模型
模糊度	参数估计
对流层延迟	SAAS+GMF
重力场	EGM2008模型
N体引力	JPL.DE45模型
太阳光压	ECOM1–9模型/ECOM1–5模型/ECOM2模型/ECOMC模型

3 精度评估

3.1 外符合精度评估

本文对2020年年积日200—300的MGEX数据进行定轨实验测试，以ILRS中心提供的SLR数据作为评价不同光压模型定轨精度的外符合精度评价指标；并统计分析了不同光压模型在BDS–3 MEO卫星中的定轨结果以及与SLR测距的结果残差，如表2所示，可以看出，对于同一卫星，基于ECOMC模型的定轨精度最佳，ECOM2模型次之，ECOM1–9模型最差；模型精度最佳时，C20、C21、C29和C30定轨的RMSE分别为3.5 cm、3.3 cm、4.3 cm和4.2 cm，STD分别为3.0 cm、3.1 cm、3.7 cm和3.5 cm；对于同一模型，C21卫星的定轨残差RMSE小于其他3个卫星；与C20、C21卫星相比，C29、C30卫星的定轨精度较低，可能是由卫星结构本体存在偏差造成的，C20、C21卫星由中国空间技术研究院设计制造，C29、C30

表2　不同光压模型定轨结果与SLR数据残差统计/cm

卫星PRN	ECOM1–9模型		ECOM1–5模型		ECOM2模型		ECOMC模型	
	RMSE	STD	RMSE	STD	RMSE	STD	RMSE	STD
C20	9.9	7.5	8.9	6.5	5.5	4.5	3.5	3.0
C21	9.7	7.3	8.6	6.2	4.9	3.8	3.3	3.1
C29	10.5	8.5	10.3	6.8	6.2	4.7	4.3	3.7
C30	10.6	8.9	10.0	7.1	6.0	4.3	4.2	3.5

卫星由上海微小卫星工程中心设计制造。

3.2　内符合精度评估

本文选取重叠弧段精度作为评价不同光压模型定轨精度的内符合精度评价指标。为对不同太阳光压模型解算得到的弧段轨道结果进行重叠弧段精度分析，本文统计分析了100个48 h的重叠弧段互差，结果如表3所示，可以看出，对于同一光压模型、同一卫星，径向内符合精度最优，法向次之，切向最差，这可能与MEO卫星倾斜轨道的特性相关，使得卫星太阳帆板存在指向性偏差的影响；对于同一卫星，采用ECOMC模型定轨可得到精度较高的重叠弧段，其原因可能是ECOMC模型集成了ECOM1模型和ECOM2模型的优点，ECOMC模型与ECOM2模型的RMSE相当，而在切向上ECOMC模型的RMSE低于ECOM2模型，其原因可能是与ECOMC模型过度参数化有关，这与参考文献[9]的研究结果相吻合。内符合精度最佳时，重叠弧段径向、切向、法向的RMSE分别为5.1 cm、6.4 cm和5.7 cm。与ECOM1–9模型、ECOM1–5模型、ECOM2模型相比，采用ECOMC模型定轨内符合精度在径向分别提升了39.54%、16.84%、12.55%；在切向分别提升了51.33%、27.43%、10.46%；在法向分别提升了48.99%、21.42%、11.22%。

表3　不同光压模型重叠轨道各方向RMSE统计/cm

卫星类别	ECOM1–9模型			ECOM1–5模型			ECOM2模型			ECOMC模型		
	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向
C20	9.5	14.2	11.2	6.8	9.6	7.6	6.2	7.8	6.5	5.2	6.4	5.7
C21	9.2	13.8	10.5	6.5	9.5	6.8	6.2	7.9	6.8	5.1	6.8	6.0
C29	10.1	15.5	13.3	7.2	9.9	8.5	7.5	8.5	7.7	6.5	7.2	6.5
C30	10.4	16.3	14.6	8.0	11.1	9.3	7.2	8.3	7.5	6.9	8.7	7.1

4　结　语

本文基于MGEX观测数据对不同光压模型在BDS–3 MEO卫星中的适用性进行了分析。内外符合精度评估结果表明，不同BDS–3 MEO卫星的结构本体偏差可能会对定轨精度产生影响；对于同一卫星，采用ECOMC模型的定轨精度最优，ECOM2模型次之，ECOM1–9模型最差。与其他3种模型相比，ECOMC模型的内符合精度均有较好的提升。

参考文献

[1] 刘栋梁,康登榜,王维嘉,等. 国外卫星导航系统工程管理现状分析及启示[J]. 导航定位学报,2022,10(1):15-19

[2] 刘艳春. 北斗观测数据高精度定位分析[J]. 地理空间信息,2021,19(7):46-48

[3] 慕仁海. 太阳光压模型精化对BDS-2/3卫星精密定轨影响研究[D]. 北京:中国测绘科学研究院,2021

[4] 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

[5] 田坤俊. 光压模型精化方法及其对定轨精度影响研究[D]. 淄博:山东理工大学,2014

[6] 韩秀飞. 北斗卫星光压模型精化及其在自主导航支持系统中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2018

[7] 常春涛,慕仁海,程鹏飞,等. 新太阳光压模型在GNSS定轨中的应用[J]. 测绘科学,2021,46(2):78-84

[8] 孙国健,赵琳,李慧,等. 不同经验光压模型对北斗三号MEO卫星定轨适用性分析[C]//第十三届中国卫星导航年会论文集:S04星轨道与精密定位,2022:143-150

[9] 赵辉,金双根,罗鹏. 不同光压模型对北斗IGSO与MEO卫星定轨的适用性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(1):9-14

[10] 慕仁海,常春涛,党亚民,等. 利用CODE新光压模型的精密定轨研究[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(4):342-345

[11] 薛建华,刘超,赵瑞. 先验光压模型对Galileo卫星产品性能的影响分析[J]. 地球物理学进展,2019,34(3):969-973

[12] 计国锋,杨志强,贾小林,等. 姿态和光压模型对北斗导航卫星精密定轨的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(4):374-380