

HUANG Jin, CHEN Yanling, LI Liang, ZHOU Shanshi, HUANG Yong, HU Xiaogong. New Method and Accuracy Analysis for Medium and Long-term Orbit Prediction of BDS-3 Satellites (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 198–210. CSTR:32142.14.cjss.2025-0020. DOI:10.11728/cjss.2026.01.2025-0020

北斗卫星轨道中长期预报新方法及精度分析*

黄 进^{1,2} 陈艳玲^{1,2,3} 李 亮¹
周善石¹ 黄 勇^{1,2,3} 胡小工¹

1(中国科学院上海天文台 上海 200030)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(上海市空间导航与定位技术重点实验室 上海 200030)

摘 要 利用光压系数与太阳高度角密切相关的特性, 提出对 ECOM-5 光压模型参数进行建模及预报更新的方法进行轨道长期预报, 并对该方法的轨道预报性能进行评估. 以北斗 MEO/IGSO 卫星为例, 对 2022 年 1 月 1 日至 2023 年 6 月 1 日内预报 18 组 90 天轨道, 以 CODE 北斗卫星精密星历作为参考轨道, 评估北斗卫星轨道长期预报的性能. 试验结果表明, 采用本文提出的轨道预报方法对导航卫星进行 90 天轨道预报: MEO 卫星第 30 天、60 天、90 天预报轨道三维位置误差 RMS 均值分别约为 180, 650, 1400 m, 轨道 URE RMS 的均值分别为 18.79, 61.43, 124.00 m; 与精密星历轨道的倾角误差 Δi 的 RMS 均值分别为 6.07, 9.76, 12.38 mas, 与精密星历轨道的升交点赤经误差 $\Delta \Omega$ RMS 均值分别为 6.47, 11.24, 14.88 mas; IGSO 卫星预报轨道三维位置误差第 30 天、60 天、90 天 RMS 均值分别约为 260, 1000, 2200 m, i 和 Ω 预报误差与 MEO 卫星相当. 因此, 可以得出结论, 该方法获得的中长期预报轨道三维位置以及轨道定向参数 i 和 Ω 具有较高的精度.

关键词 北斗三号导航卫星, ECOM-5 光压模型, 轨道长期预报, 轨道定向参数

中图分类号 V324.2+4

New Method and Accuracy Analysis for Medium and Long-term Orbit Prediction of BDS-3 Satellites

HUANG Jin^{1,2} CHEN Yanling^{1,2,3} LI Liang¹
ZHOU Shanshi¹ HUANG Yong^{1,2,3} HU Xiaogong¹

1(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030)

Abstract Long-term orbit prediction serves as an effective method to suppress the overall rotation of

* 中国科学院战略性先导科技专项项目 (XDA0350404) 和国家自然科学基金项目 (12173072) 共同资助

2025-02-14 收到原稿, 2025-05-29 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

the inertial frame in autonomous navigation of satellite navigation systems, and the main factor influencing the accuracy of long-term orbit prediction is the uncertainty associated with the solar radiation pressure perturbation model. This paper proposes a method of modeling and updating the ECOM-5 solar radiation pressure model parameters for long-term orbit prediction, and evaluates its performance by fully utilizing the correlation between the solar radiation pressure coefficient and the solar altitude angle. Taking 24 Medium Earth Orbit (MEO) satellites and 2 Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO) satellites of the Beidou-3 Global Navigation Satellite System (BDS-3) as examples, 18 groups of 90-day orbits were predicted from 1 January 2022 to 1 June 2023. Then the precise ephemeris of the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) was used as the reference orbit to evaluate the performance of long-term orbit prediction. The experimental results indicate that when adopting the new orbit prediction method proposed in this paper for 90-day orbit prediction of navigation satellites, for MEO satellites, the average Root Mean Square (RMS) of the three-dimensional position error on the 30th, 60th, and 90th day is approximately 180, 650, 1400 m, respectively, and that of the average URE RMS of the orbit is 18.79, 61.43, 124.00 m, respectively. The RMS mean values of the orbital inclination angle error Δi are 6.07, 9.76, 12.38 mas, respectively, and those of the right ascension of the ascending node error $\Delta \Omega$ are 6.47, 11.24, 14.88 mas, respectively. For IGSO satellites, the average RMS of the three-dimensional position error on the 30th, 60th, and 90th day is approximately 260, 1000, 2200 m, respectively, while the prediction errors of i and Ω are comparable to those of MEO satellites. Therefore, it can be concluded that the method in this paper exhibits high accuracy in long-term orbital predicting positions and orbital orientation parameters i and Ω , which is expected to provide essential support for mitigating the overall rotation of autonomous navigation of navigation satellite constellations.

Key words BDS-3, ECOM-5 solar radiation pressure model, Long-term orbit prediction, Orbit orientation parameter

0 引言

导航星座自主导航,是指导航卫星系统在基本无地面运控系统支撑的条件下,能够自主维持并提供规定服务的运行能力^[1].目前,导航星座自主导航主要依赖于星间链路观测,来保障特殊时期导航、定位及授时服务的连续性,避免服务性能显著降低.但仅依赖星间链路观测,由于缺乏空间基准,即使星座出现整体旋转,星间相对测量对此也不敏感,这在理论上已得到证实^[2].对此,通常采用长期预报轨道定向参数约束^[3]、锚固站^[4]、恒星定向^[5]等方法解决这一问题;其中长期预报轨道定向参数约束法因无需增加地面和星载设备而最为便捷,但这对导航卫星中长期轨道预报的精度提出了较高要求.

针对中高轨卫星轨道中长期预报,研究提出了半分析法、动力学模型精化、深度学习等方法^[6-9].Xu等^[6]利用半分析方法分离并消除导航卫星轨道长期预报中的短周期项,用Adams-Cowell积分器以积分步长1天对轨道根数进行外推,建立了中轨道卫星

长期预报模型,预报100年轨道倾角 i 的最大偏差小于 1° ,升交点赤经 Ω 最大偏差在 20° 以内,但短期演化精度较低.Mao等^[7]采用JGM3地球引力场模型和ECOM太阳光压模型,综合考虑日月引力、相对论效应、固体潮、海潮等摄动力进行轨道积分,非地影时期IGSO 06卫星预报74天 RTN 方向预报误差RMS (Root Mean Square) 分别为310, 189, 261 m,地影期采用光压参数修正法使MEO卫星预报76天精度由20 km提升至约2 km.Zhang等^[8]采用具有周期性特征的二阶傅里叶多项式对ECOM-5参数光压模型参数长期变化进行建模,并以GPS数据为例重点分析了轨道倾角 i 及升交点赤经 Ω 的长期预报误差,该方法预报180天 i 和 Ω 误差控制在 ± 40 mas范围内,但未对北斗卫星导航系统的轨道长期预报进行分析.Ji等^[9]采用深度学习长短期记忆神经网络,辅助噪声经验模态分解法进行轨道预报建模,并对轨道预报期间的动力学模型误差进行补偿,使用预报前28天轨道预报误差作为训练样本,对MEO卫星、IGSO卫星进行轨道预报,预报30天三维位置误差分

别为 300 m 和 150 m.

从以上针对中高轨卫星轨道预报的几类方法可以看出,已有的半分析法消除了卫星轨道长期预报中的短周期项,预报轨道具有长期稳定性,但精度相对略差;机器学习方法通过对动力学模型误差建模与补偿,提高了轨道预报精度,但是物理意义不够明确.总体上看,提高轨道预报精度的关键仍在于轨道外推中的高精度动力学模型,尤其是光压模型的精化.

本文从提高轨道预报期间动力学模型精度的角度出发,充分利用 ECOM-5 模型光压系数与太阳高度角密切相关的特性,通过对光压参数进行长期建模并开展中长期预报,以此提升导航卫星轨道的中长期预报精度.具体地,以 WUM (武汉大学 IGS 分析中心) 发布的 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日精密星历为观测值,每 7 天解算一组 ECOM 光压模型 5 参数,基于这三年光压参数随太阳高度角的变化特征进行建模,并预报轨道预报弧段的光压参数,再通过预报的光压参数进行轨道积分,得到预报轨道,最终对轨道精度进行评估,验证该方法的有效性.

1 基于太阳高度角的光压参数预报算法

在导航卫星受到的各类非保守力中,太阳光压力的不确定性最大.常用的半经验光压模型包括 ROCK 模型、ECOM 系列模型、Box-Wing 模型等^[10,11],其中,ECOM 模型表达方式简洁,应用范围最为广泛,BERNESE, GAMIT, PANDA 等多款定轨软件均采用了该模型,随着对模型的不断改进,如今已发展出 ECOM-2, ECOM-5, ECOM-7, ECOM-9 等多种模型形式^[12].

ECOM 模型中,由太阳辐射压力引起的卫星总加速度表达如下^[13]:

$$\begin{aligned} a &= a_0 + D(u) e_D + Y(u) e_Y + B(u) e_B, \\ D(u) &= D_0 + D_c \cos u + D_s \sin u, \\ Y(u) &= Y_0 + Y_c \cos u + Y_s \sin u, \\ B(u) &= B_0 + B_c \cos u + B_s \sin u. \end{aligned} \quad (1)$$

其中, a_0 是一个可选择的先验模型; u 是卫星的纬度参数; e_D , e_Y , e_B 分别为 D , Y , B 三个正交方向的单位向量; D 方向由卫星质心指向太阳; Y 方向为卫星质心沿一个太阳翼的轴向; B 方向与 D 和 Y 构成右

手系^[14]; $D(u)$, $Y(u)$ 和 $B(u)$ 被表示为在每旋转 1 次 (once-per-revolution) 之后截断的傅里叶级数.

D_0 , D_c , D_s , Y_0 , Y_c , Y_s , B_0 , B_c , B_s 为 ECOM 的 9 个待估参数. Springer 等^[15,16] 研究表明,仅使用 5 参数 ECOM 模型对由太阳辐射压力引起的卫星加速度变化进行建模,可以取得较好的定轨效果.

$$\begin{aligned} D(u) &= D_0, \\ Y(u) &= Y_0, \\ B(u) &= B_0 + B_c \cos u + B_s \sin u. \end{aligned} \quad (2)$$

其中, u 为卫星到轨道面升交点的角距; D_0 , Y_0 , B_0 为常数项待估参数; B_c , B_s 为周期项待估参数^[16].

由于太阳光压与卫星星体以及帆板的有效受照面积相关,受照情况受导航卫星的姿态控制模式影响,导航卫星姿态控制模式由太阳高度角决定.当太阳高度角较大时,北斗卫星采用动偏姿控模式;当太阳高度角较小时,采用零偏或连续动偏姿控模式.因此,太阳高度角与太阳光压具有高度相关性.2004 年,Bar-Sever 等^[17] 利用 4.5 年 (1998 年 1 月至 2002 年 6 月) JPL 的 GPS 卫星精密星历,建立了 10 参数 GSPM.04 (GPS Solar Pressure Model, GPS 太阳光压模型),发现其中 8 个参数不随时间变化,其中 C_{Y_1} 与 S_{X_2} 两个参数可表示为随太阳高度角 β 变化的显式函数.基于该研究思路,本文选择采用以下函数对 ECOM-5 光压参数进行建模:

$$\begin{aligned} F &= A + B \sin \beta + C / \sin \beta + D \cos \beta, \\ F &= [D_0 \ Y_0 \ B_0 \ B_c \ B_s]^T. \end{aligned} \quad (3)$$

其中, β 为太阳高度角,具体可根据下式计算:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{r} \times \mathbf{v}|} \cdot \frac{\mathbf{r}_s}{|\mathbf{r}_s|} \right). \quad (4)$$

其中, $\mathbf{r}$ 为卫星位置; $\mathbf{v}$ 为卫星速度; $\mathbf{r}_s$ 为太阳位置,由行星星历获取; F 为光压参数时间序列,可由精密星历解算得出.

2 轨道预报试验

采用基于太阳高度角预报光压参数方法,以北斗 MEO/IGSO 卫星为例,进行 90 天轨道长期预报试验.采用 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日共 3 年 WUM 发布的与其他分析中心 SISRE (Signal-In-Space Range Error) 互差小于 8 cm^[18] 的精密星历,解算北斗三号卫星导航系统在轨 24 颗 MEO 卫

星和 3 颗 IGSO 卫星的 3 年光压参数, 以 2022 年 1 月 1 日至 2023 年 6 月 1 日, 每个月 1 号为起始日期的 18 组 90 天轨道长期预报, 验证所提算法的轨道及其定向参数的预报精度. 涉及的数据包括 WUM 精密星历、CODE 精密星历、精密 EOP (Earth Orientation Parameter, 地球定向参数) 和预报的光压系数.

2.1 数据准备

2.1.1 WUM 精密星历

武汉大学 IGS 分析中心和数据中心提供 BDS-3 精密星历数据, 由 140 个观测站组成的跟踪网解算得到^[18], 数据的时间分辨率为 15 min, 光压参数建模选取的日期为 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日, 而 2019 年期间, 由于只有武汉大学发布了较完整的高精度 BDS-3 事后精密星历^[19], 因此这里选择 WUM 作为输入数据进行光压参数建模.

2.1.2 CODE 精密星历

CODE (Center for Orbit Determination in Europe) 是国际公认的提供导航卫星精密数据的机构之一, 其精密星历是利用 MGEX 所有可用的 GNSS 星座 (GPS、GLONASS、北斗、Galileo、QZSS), 通过全球 270 个观测站组成的跟踪网数据解算得到的, 星历时间分辨率为 5 min. 自 2021 年 3 月 7 日起, CODE 开始提供 BDS-3 卫星的精密轨道, 本文将星历作为轨道精度评估的参考轨道.

2.1.3 精密 EOP

轨道预报期间采用的 EOP 为 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service, 国际地球自转和参考系统服务地球定向中心) C04 数据, 其综合了 VLBI, GNSS, SLR 和 DORIS 4 种类型观测数据^[20], 是目前国际公认精度相对最高的 EOP 数据*. 在本文中, 该数据主要用于地心地固坐标系与地心惯性坐标系之间的相互转换. 需要说明的是, 为了区分 EOP 与动力学模型对轨道预报精度的影响, 本文不考虑 EOP 预报误差引入的轨道预报误差, 仅考虑动力学模型引起的轨道预报误差, 因此在轨道预报期间, 采用该精密 EOP 数据.

2.2 光压参数建模及预报

采用 2.1 节的 WUM 星历作为输入, 解算得到 ECOM-5 参数的 3 年变化, 并对其进行建模, 根据轨

道预报期间太阳高度角计算预报弧段的 ECOM-5 参数, 通过轨道积分进行轨道预报, 并采用 CODE 精密星历进行预报轨道精度评估, 主要包含光压参数解算、光压参数建模与预报以及轨道预报等过程.

2.2.1 光压参数解算

以 2019 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日精密星历为观测值, 滑动 1 天生成 7 天弧长的观测, 采用动力学统计法进行精密定轨, 主要考虑地球引力场、日月及行星引力、太阳光压、固体潮、海潮等摄动. 其中, 光压模型采用 2.1 节所述 ECOM-5 模型, 每颗卫星解算 5 参数 D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s , 最终得到 ECOM 模型 5 参数的 3 年序列.

2.2.2 光压参数建模及预报

利用 3 年的精密星历和 DE430 星历得到的太阳位置, 利用式 (4) 计算出每颗卫星的太阳高度角 β , 以每天 0 点的 β 角为变量, 得到 5 个光压参数与 β 的关系; β 角在 $-12.9^\circ \sim 12.9^\circ$ 之间时, 视为卫星地影期, 由于地影期内的光压参数无法补偿该阶段未被模型化的力的剧烈变化, 因此将该阶段的数据视为无效数据予以剔除.

从图 1 可以看出, D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s 参数与 Bar-Sever 等^[17]提出的 GSPM.04 光压模型中的 C_{Y_1} 和 S_{X_2} 参数一样, 均与 β 角有强相关性, 故将 D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s 分别表示为随 β 变化的显式函数, 如式 (3) 所示. 对 D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s 这 5 个参数拟合式 (3) 中的系数 A , B , C 和 D , 在轨道预报弧段, 只需代入该时间段每颗卫星的太阳高度角, 即可得到每颗卫星每天的光压参数. 以 MEO 卫星 C19 为例, D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s 的拟合系数列于表 1.

2.3 轨道预报试验及精度评估

2.3.1 轨道预报流程

轨道预报的具体流程如图 2 所示, 包括光压参数解算、光压参数建模、轨道预报及精度评估等过程.

轨道预报流程的具体步骤如下.

步骤 1 利用预报时刻前 3 天弧长轨道拟合, 计算得到各卫星轨道初始状态及预报起始时刻各卫星太阳高度角, 各卫星光压参数模型系数采用 2.2 节建模结果.

步骤 2 读取卫星轨道初始状态, 利用各卫星的

* https://datacenter.iers.org/data/latestVersion/EOP_14_C04_IAU2000_A_one_file_1962-now.txt

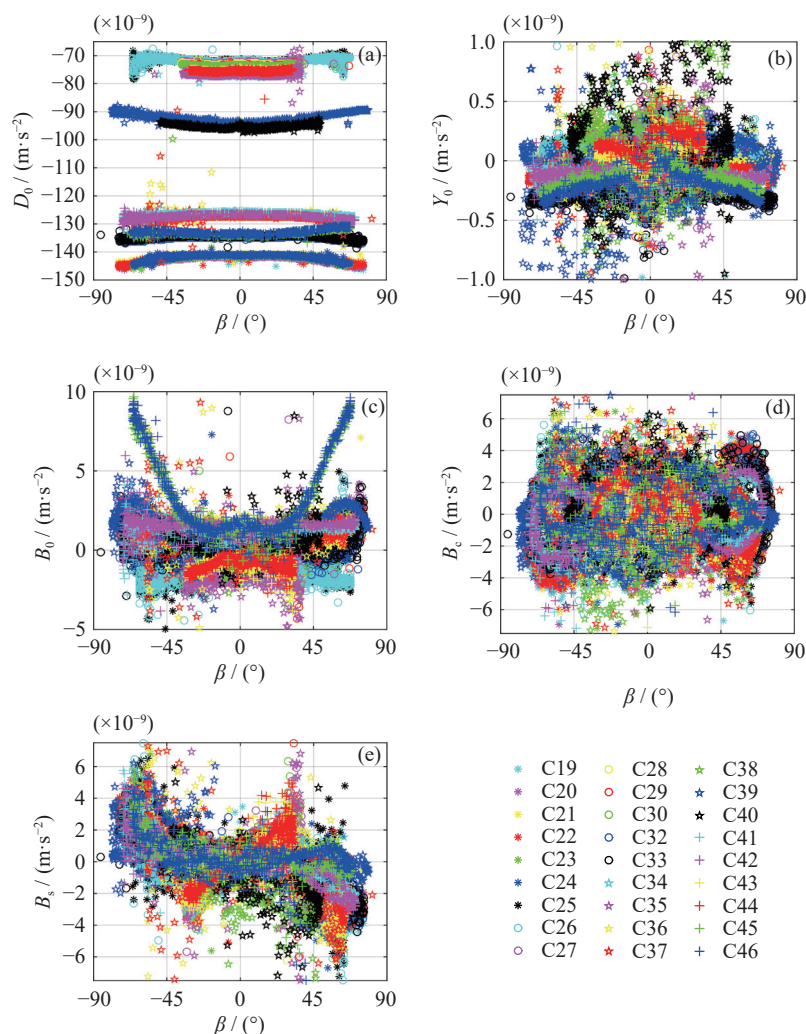
图 1 BDS-3 卫星 ECOM-5 模型光压参数 D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s 随太阳高度角的变化Fig. 1 Variation of ECOM-5 parameters D_0 , Y_0 , B_0 , B_c , B_s with the solar altitude angle for BDS-3 satellites

表 1 C19 卫星 ECOM-5 模型与太阳高度角函数模型拟合系数

Table 1 Fitting coefficients of Satellite C19 ECOM-5 model with solar altitude angle function model

Coefficient	A	B	C	D
D_0	-0.144906×10^{-6}	$-0.525711 \times 10^{-11}$	$-0.722279 \times 10^{-11}$	0.380356×10^{-8}
Y_0	-0.197577×10^{-9}	$-0.888765 \times 10^{-11}$	0.353819×10^{-11}	0.122991×10^{-9}
B_0	0.164566×10^{-8}	$-0.147844 \times 10^{-10}$	0.460865×10^{-11}	-0.907190×10^{-9}
B_c	-0.816728×10^{-9}	0.101913×10^{-8}	-0.343274×10^{-9}	0.132983×10^{-8}
B_s	-0.333089×10^{-9}	-0.200095×10^{-8}	0.347368×10^{-9}	0.398325×10^{-9}

光压参数模型系数和太阳高度角计算第一天的光压参数预报值, 对 MEO/IGSO 采用数值积分方法进行轨道积分, 完成第一天的轨道预报。

步骤 3 将前一天的轨道预报结果作为初轨, 计算太阳高度角, 忽略卫星位置带来的 β 角误差, 更新

光压参数预报值, 对预报弧段的卫星状态参数进行轨道积分, 得到预报轨道。轨道外推采用的动力学模型包括 140×140 阶 EGM 地球重力场、日月及行星引力 (DE430)、固体潮、海潮等摄动, EOP 参数采用 2.1 节提及的 IERS C04 数据。需要说明的是, 在轨道

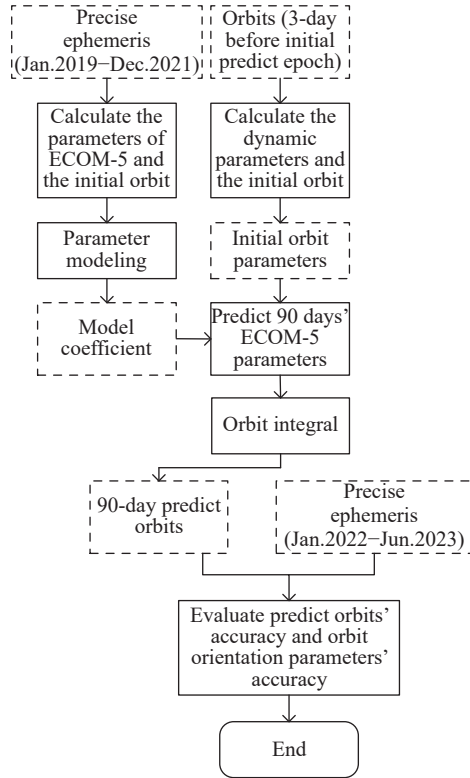


图 2 轨道预报流程

Fig. 2 Processing workflow of orbit prediction

预报时, 非地影时期 β 角采用式 (4) 进行计算, 地影期间 β 角采用 12.9° 或 -12.9° 来计算光压参数.

步骤 4 重复步骤 3, 直至完成所有轨道预报.

2.3.2 轨道预报精度评估

轨道预报精度评估通过将预报轨道与 CODE 事后精密星历的标准轨道信息比对, 得到每颗卫星预报轨道的三维位置偏差, 同时统计轨道倾角 i 及升交点赤经 Ω 数据的预报误差.

除了统计预报轨道的三维位置误差, 还采用用户距离误差 URE (定义符号 E) 评估轨道预报误差对用户测距精度的影响, MEO 卫星和 IGSO 卫星的 URE 计算采用如下公式^[21,22]:

$$E_{\text{MEO}} = \sqrt{(\Delta R)^2 + (0.09\Delta T)^2 + (0.09\Delta N)^2}, \quad (5)$$

$$E_{\text{IGSO}} = \sqrt{(0.99\Delta R)^2 + (0.14\Delta T)^2 + (0.14\Delta N)^2}. \quad (6)$$

图 3 给出了 26 颗卫星 (起始日期为 2022 年 8 月 1 日) 在 90 天预报周期内的 URE 与轨道三维位置误差.

需要说明的是, 如果广播星历卫星健康标识显示不可用, 或者 CODE 星历头文件中轨道精度指数

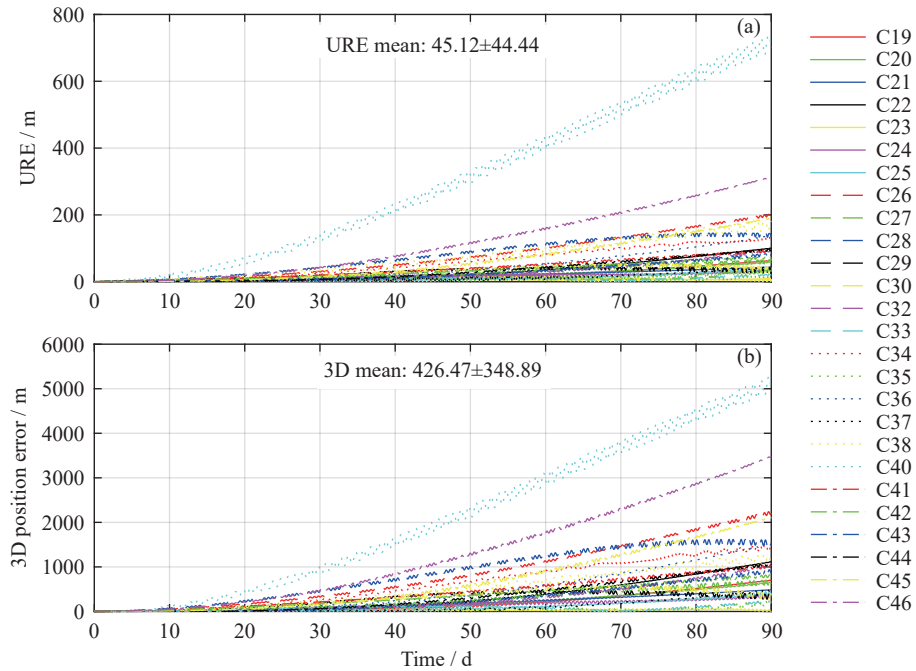


图 3 26 颗卫星 90 天预报周期内 URE 与三维位置误差的时间序列变化 (预报起始日期: 2022 年 8 月 1 日)

Fig. 3 Time series variation of URE and 3D position error for 26 satellites in 90-day prediction period (Prediction start date: 1 August 2022)

(Orbit Accuracy Exponent) 异常时, 该段预报轨道不参与精度评估. 以 MEO 卫星 C19 和 IGSO 卫星 C38 为例, 分别给出这两颗卫星 RTN 与 URE 误差的细节, 如图 4 和图 5 所示.

表 2~4 给出了 24 MEO+2 IGSO 北斗三号导航

卫星 18 组长期轨道预报第 30 天、60 天、90 天的 RTN 、URE、三维误差统计值.

由表 2~4 可以看出, 对于 R 方向预报误差, MEO 卫星预报第 30 天、60 天、90 天的 RMS 值分别约为 7.659, 12.802, 17.216 m; IGSO 卫星分别约

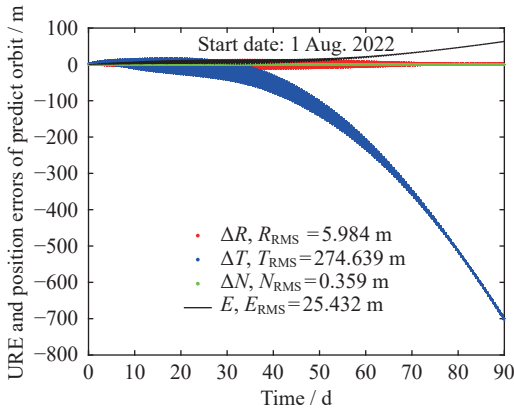


图 4 C19 卫星 90 天预报轨道位置误差和 URE 误差变化趋势

Fig. 4 URE and position errors variation of C19 satellite's 90-day predicted orbit

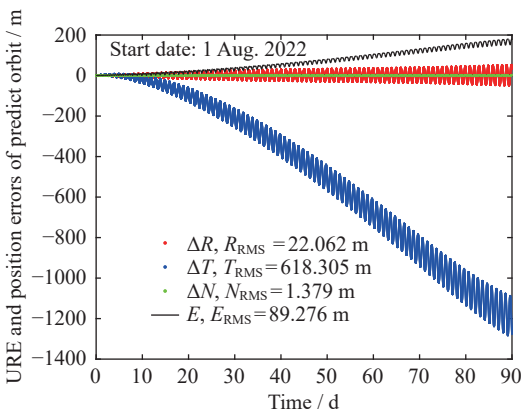


图 5 C38 卫星 90 天预报轨道位置误差和 URE 误差变化趋势

Fig. 5 URE and position errors variation of C38 satellite's 90-day predicted orbit

表 2 北斗导航卫星长期预报第 30 天位置误差 RMS 值统计 (单位: m)
Table 2 Position error RMS statistics on the 30th day of Beidou navigation satellites' long-term orbit prediction (Unit: m)

卫星类型	PRN	ΔR	ΔT	ΔN	3D	URE
MEO	C19	7.221	125.141	0.506	125.637	14.462
	C20	6.697	113.495	0.534	114.007	13.337
	C21	6.512	88.317	0.452	88.820	11.270
	C22	6.907	176.129	0.578	176.362	17.933
	C23	9.002	126.184	0.474	126.740	15.180
	C24	8.659	99.984	0.613	100.610	13.392
	C25	8.121	112.313	1.121	112.938	13.881
	C26	8.882	225.326	1.788	225.854	23.715
	C27	9.680	87.416	0.878	88.141	12.866
	C28	10.054	440.936	1.407	441.099	41.312
	C29	8.726	169.195	1.023	169.614	18.494
	C30	9.665	341.254	1.438	341.553	32.786
	C32	6.091	141.961	1.159	142.164	14.600
	C33	5.988	266.652	0.946	266.874	25.760
	C34	10.084	161.141	0.736	161.868	18.969
	C35	10.267	272.558	0.845	272.859	27.235
	C36	7.636	280.586	1.105	280.784	27.076
	C37	7.544	114.962	0.401	115.594	13.996

续表 2

卫星类型	PRN	ΔR	ΔT	ΔN	3D	URE
MEO	C41	5.181	169.843	0.475	170.019	16.847
	C42	5.009	151.484	0.441	151.755	15.483
	C43	6.026	67.942	0.782	68.393	9.174
	C44	4.936	93.586	0.862	93.896	10.568
	C45	8.000	180.254	0.871	180.683	19.258
	C46	7.370	215.090	0.879	215.442	21.756
	均值	7.659	176.844	0.857	177.258	18.793
IGSO	C38	12.057	192.091	0.878	192.846	30.785
	C40	23.006	325.491	1.085	326.832	52.814
	均值	17.532	258.791	0.981	259.839	41.799

表 3 北斗导航卫星长期预报第 60 天位置误差 RMS 值统计 (单位: m)
Table 3 Position error RMS statistics on the 60th day of Beidou navigation
satellites' long-term orbit prediction (Unit: m)

卫星类型	PRN	ΔR	ΔT	ΔN	3D	URE
MEO	C19	10.558	539.251	0.980	539.440	50.420
	C20	9.817	429.150	0.992	429.411	40.718
	C21	9.720	317.703	0.825	318.274	31.725
	C22	9.783	621.583	1.098	621.850	57.573
	C23	12.882	461.512	0.806	461.892	44.309
	C24	11.532	307.503	1.191	308.034	31.434
	C25	14.264	394.126	1.847	394.785	40.146
	C26	15.182	881.259	3.000	881.824	83.382
	C27	18.504	289.352	1.497	290.328	33.195
	C28	19.363	1723.910	2.566	1724.206	157.273
	C29	16.822	652.385	1.821	652.746	62.290
	C30	18.813	1395.105	2.553	1395.270	127.309
	C32	9.988	536.658	1.738	536.846	50.015
	C33	9.478	730.198	1.307	730.376	67.442
	C34	19.638	612.447	1.262	613.217	61.315
	C35	19.704	1060.362	1.437	1060.868	98.816
	C36	10.984	1053.330	1.851	1053.455	96.053
	C37	9.747	418.462	0.735	418.670	39.664
	C41	8.274	625.139	0.893	625.284	57.301
	C42	8.115	547.748	0.840	547.864	50.460
	C43	11.113	237.917	1.205	238.510	25.565
	C44	8.739	340.791	1.395	341.224	33.294
	C45	12.700	584.656	1.052	585.045	55.507
	C46	11.773	771.800	1.042	772.098	71.669
	均值	12.802	650.656	1.428	651.036	61.427

续表 3

卫星类型	PRN	ΔR	ΔT	ΔN	3D	URE
IGSO	C38	25.337	937.171	1.709	937.753	135.005
	C40	42.832	918.530	1.752	921.830	142.093
	均值	34.084	927.850	1.731	929.791	138.549

表 4 北斗导航卫星长期预报第 90 天位置误差 RMS 值统计 (单位: m)
Table 4 Position error RMS statistics on the 90th day of Beidou navigation
satellites' long-term orbit prediction (Unit: m)

卫星类型	PRN	ΔR	ΔT	ΔN	3D	URE
MEO	C19	13.774	1130.630	1.419	1130.760	103.159
	C20	12.360	868.655	1.384	868.910	79.848
	C21	12.813	658.330	1.178	658.804	62.193
	C22	12.113	1227.798	1.585	1227.956	111.967
	C23	16.362	945.159	1.133	945.396	87.274
	C24	14.361	599.986	1.782	600.476	57.334
	C25	20.457	842.590	2.223	843.037	80.217
	C26	21.152	1987.638	3.560	1988.325	182.968
	C27	26.139	560.860	1.872	561.901	59.152
	C28	27.326	3723.320	3.372	3723.472	336.733
	C29	23.719	1317.467	2.401	1318.364	124.208
	C30	26.832	3035.307	3.374	3035.498	275.189
	C32	12.985	1072.854	2.121	1073.049	98.388
	C33	11.810	1285.367	1.759	1285.750	118.126
	C34	27.967	1270.683	1.658	1271.980	122.956
	C35	27.894	2332.357	1.891	2333.081	214.182
	C36	13.828	2202.922	2.181	2203.150	199.878
	C37	12.384	772.700	1.061	772.841	71.043
	C41	11.548	1303.858	1.247	1303.997	118.571
	C42	11.026	1125.251	1.235	1125.413	102.692
	C43	14.787	466.879	1.366	467.291	45.833
	C44	11.463	651.211	1.730	651.505	60.921
	C45	15.468	1044.361	1.314	1044.792	97.090
	C46	14.946	1675.416	1.345	1675.527	151.995
	均值	17.216	1344.116	1.857	1344.518	124.003
IGSO	C38	35.366	2639.648	1.975	2640.235	373.378
	C40	64.105	1703.226	2.120	1706.001	253.532
	均值	49.736	2171.437	2.047	2173.118	313.455

17.532, 34.084, 49.736 m; 对于 T 方向预报误差, MEO 卫星预报第 30 天、60 天、90 天差异的 RMS 均值分别为 176.844, 650.656, 1344.116 m; IGSO 卫星 分别为 258.791, 927.850, 2171.437 m; 对于 N 方向预报误差, MEO 卫星预报第 30 天、60 天、90 天轨道误差的 RMS 均值分别为 0.857, 1.428, 1.857 m; IGSO

卫星分别为 0.981, 1.731, 2.047 m. 该结果表明, RTN 三个方向的预报误差随预报时长的增加呈显著增加的趋势. 其中 MEO 和 IGSO 卫星 N 方向的预报精度最高, 其次为 R 方向和 T 方向, 例如预报第 90 天 RTN 方向 RMS 分别优于 18, 1350 和 3 m; IGSO 卫星 RTN 方向 RMS 分别优于 50, 2200 和 3 m.

对于预报轨道的三维位置误差, MEO 卫星预报第 30 天、60 天、90 天该误差的 RMS 均值分别优于 177, 651, 1345 m; IGSO 卫星分别优于 260, 930, 2173 m. 这一结果表明, 第 90 天 MEO 卫星轨道三维位置误差优于 1400 m, IGSO 卫星优于 2200 m.

对于预报轨道 URE 与 MEO 卫星第 30 天、60 天、90 天的 RMS 均值分别为 18.793, 61.427, 124.003 m; IGSO 卫星的 RMS 均值分别为 41.799, 138.549, 313.455 m. 可以得出 MEO 卫星和 IGSO 卫星预报 90 天的 URE 分别优于 130 m 和 320 m 的结论.

利用本文提出的方法, MEO 卫星第 30 天预报轨道三维位置误差平均值为 177 m, 比 Ji 等^[9]对 MEO 卫星预报 30 天三维位置误差 300 m 的精度高. 另外, 本文 MEO 卫星预报第 90 天 RTN 方向 RMS 均值分别为 17.216, 1344.116, 1.857 m, 相比

Mao 等^[7]预报的 MEO 11 卫星第 76 天 RTN 三个方向误差 (均为 2000 m), 说明本文所用方法的预报精度较高.

2.3.3 轨道倾角及升交点赤经精度评估

轨道定向参数是导航星座自主导航约束整体旋转的有效方式之一, 其精度决定了导航星座整体旋转的抑制效果. 这里统计了 18 组预报 90 天轨道倾角 i 和升交点赤经 Ω 的误差. 以 2022 年 8 月 1 日为起始预报日期为例, 给出 24 颗 MEO 及 2 颗 IGSO 北斗三号导航卫星的 90 天时间序列变化, 如图 6 所示.

26 颗导航卫星的轨道倾角误差 Δi 及升交点赤经误差 $\Delta \Omega$ 最大值如图 7 所示.

从图 7 中可以看出, 与参考轨道数据相比, 第 90 天各星轨道倾角 i 和升交点赤经 Ω 预报最大偏差小于 80 mas, 大部分小于 60 mas. 统计了 24 颗 MEO 卫星及 2 颗 IGSO 卫星 18 组长期轨道预报第 30 天、60 天、90 天的轨道倾角误差 Δi 及升交点赤经误差 $\Delta \Omega$ 的 RMS 误差统计值, 如表 5 所示.

由表 5 可以看出, 第 30 天轨道倾角误差 Δi MEO 卫星平均 RMS 为 6.070 mas; IGSO 卫星平均 RMS 为 5.050 mas; 升交点赤经误差 $\Delta \Omega$ MEO 卫星平均 RMS 为 6.467 mas; IGSO 卫星平均 RMS 为 4.608 mas; 第 60 天轨道倾角误差 Δi MEO 卫星平

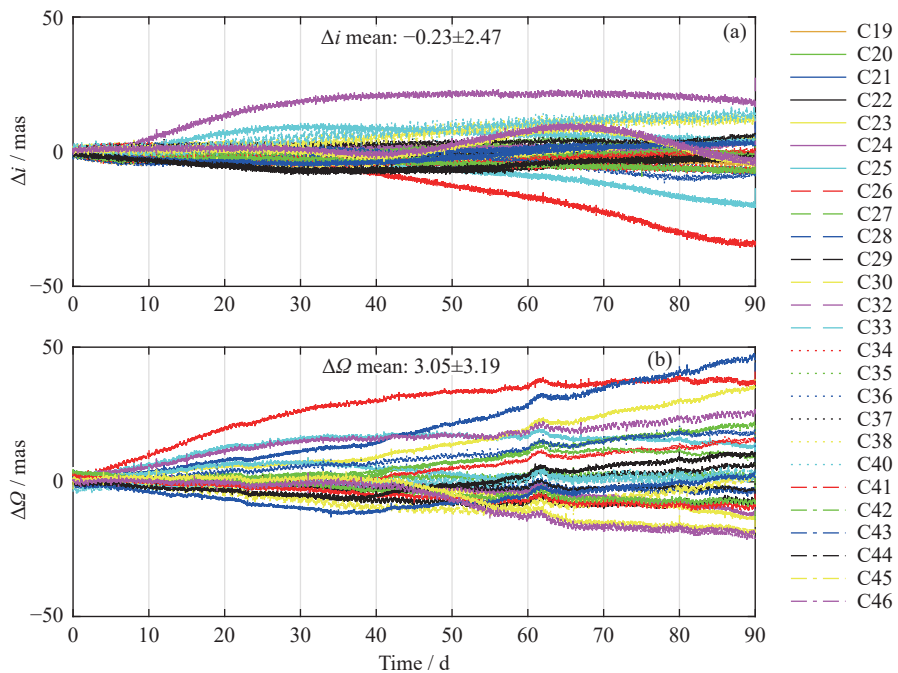


图 6 Δi 和 $\Delta \Omega$ 的 90 天时间序列变化 (预报起始日期: 2022 年 8 月 1 日)

Fig. 6 Variation of Δi and $\Delta \Omega$ in 90 days (Prediction start date: 1 August 2022)

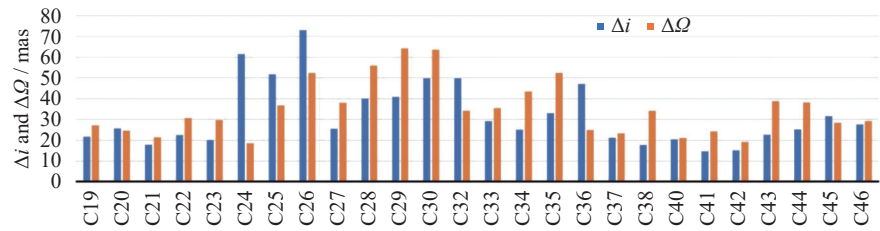


图 7 各星轨道倾角、升交点赤经预报误差第 90 天最大值分布

Fig. 7 Distribution of maximum prediction errors of Δi and $\Delta \Omega$ for each satellite on the 90th day

表 5 北斗导航卫星长期预报轨道倾角误差及升交点赤经误差统计 (单位: mas)
Table 5 RMS error statistics of Δi and $\Delta \Omega$ of Beidou navigation satellites' long-term orbit prediction (Unit: mas)

卫星类型	卫星PRN	第30天		第60天		第90天	
		Δi	$\Delta \Omega$	Δi	$\Delta \Omega$	Δi	$\Delta \Omega$
MEO	C19	4.015	3.500	7.800	6.361	11.127	9.406
	C20	4.180	3.816	7.816	6.648	10.997	8.918
	C21	3.378	3.298	6.643	5.768	9.702	8.102
	C22	4.075	4.316	7.878	7.634	11.190	11.189
	C23	3.246	3.828	6.000	5.777	8.862	7.542
	C24	5.768	2.485	11.657	4.070	16.933	6.731
	C25	9.702	5.329	15.660	10.339	18.084	13.890
	C26	15.738	8.500	24.628	17.046	28.039	24.269
	C27	4.637	8.386	7.406	14.897	9.037	19.067
	C28	7.701	13.155	12.823	25.217	16.765	34.095
	C29	5.825	9.492	10.067	17.414	11.930	24.471
	C30	8.263	12.913	14.239	24.085	16.808	32.909
	C32	9.791	7.585	14.600	10.627	17.829	11.424
	C33	6.811	7.707	9.123	10.453	11.404	14.507
	C34	3.475	7.636	6.430	12.758	7.649	17.432
	C35	4.036	8.515	5.524	16.232	5.483	22.789
	C36	9.593	6.066	16.071	10.211	18.738	11.750
	C37	2.484	3.785	5.240	6.559	8.096	8.847
	C41	3.013	4.461	5.347	8.529	7.642	11.939
	C42	2.904	3.948	5.517	7.726	7.963	11.358
IGSO	C43	4.696	6.940	7.353	11.079	8.832	11.568
	C44	5.183	7.778	8.706	12.147	10.628	14.210
	C45	7.313	5.425	7.160	8.610	9.951	9.635
	C46	7.565	5.080	7.544	7.626	10.144	9.027
	均值	6.070	6.467	9.761	11.236	12.384	14.878
	C38	4.164	4.401	7.227	8.640	8.125	10.240
	C40	5.937	4.815	8.117	9.307	9.655	12.165
	均值	5.050	4.608	7.672	8.974	8.890	11.202

均 RMS 为 9.761 mas; IGSO 卫星平均 RMS 为 7.672 mas; 升交点赤经误差 $\Delta\Omega$ MEO 卫星平均 RMS 为 11.236 mas; IGSO 卫星平均 RMS 为 8.974 mas; 第 90 天轨道倾角误差 Δi MEO 卫星平均 RMS 为 12.384 mas; IGSO 卫星平均 RMS 为 8.890 mas; 升交点赤经误差 $\Delta\Omega$ MEO 卫星平均 RMS 为 14.878 mas; IGSO 卫星平均 RMS 为 11.202 mas. 这说明采用本文方法进行轨道预报, 可以得到精度更优的轨道倾角 i 与升交点赤经 Ω 预报值, 相比 Zhang 等^[8]的方法, 其第 90 天升交点赤经 Ω 的预报值误差约为 ± 40 mas, 轨道倾角 i 的预报值误差约为 ± 30 mas, 显然本文提出的轨道预报方法精度更高.

3 结论与讨论

针对 ECOM 5 参数模型, 即对 D_0 , Y_0 , B_0 三个常数项以及 B_e 和 B_s 两个 B 方向周期项的系数项进行建模和预报, 提出了一种光压参数建模和预报更新的新方法进行轨道中长期预报, 实现了为期 90 天的北斗三号导航卫星 24 MEO/2 IGSO 轨道长期预报, 并对每颗星的 18 组轨道预报结果进行统计分析和精度评估, 从现有试验中可得到如下结论.

(1) 与精密星历相比, 对于 MEO 卫星, 第 30 天、60 天、90 天预报轨道三维位置误差 RMS 均值分别约为 177, 651, 1340 m; URE 差异的 RMS 均值分别约为 19, 61, 124 m; 对于 IGSO 卫星, 第 30 天、60 天、90 天预报轨道三维位置误差 RMS 均值分别约为 260, 930, 2170 m; URE RMS 平均约为 42, 139, 313 m.

(2) 对于预报轨道与精密星历轨道的倾角误差 Δi , MEO 卫星在第 30 天、60 天、90 天与精密星历轨道的倾角误差 Δi 的 RMS 均值分别约为 6.07, 9.76, 12.38 mas; IGSO 卫星在第 30 天、60 天、90 天与精密星历轨道的倾角误差 Δi 的 RMS 均值分别为 5.05, 7.67, 8.89 mas.

(3) 对于预报轨道与精密星历轨道的升交点赤经误差 $\Delta\Omega$, MEO 卫星在第 30 天、60 天、90 天与精密星历轨道的升交点赤经误差 $\Delta\Omega$ 的 RMS 均值分别约为 6.47, 11.24, 14.88 mas; IGSO 卫星在第 30 天、60 天、90 天与精密星历轨道的升交点赤经误差 $\Delta\Omega$ 的 RMS 均值分别约 4.61, 8.97, 11.20 mas.

(4) 针对 i 和 Ω 约 10 mas 的 90 天预报精度, 以距地心 28000 km 的 MEO 卫星为例, 1 as 的误差引起的轨道位置误差约为 136 m, 将预报轨道的 i 和 Ω 作为先验约束进行自主定轨, 可将轨道定向参数误差控制在 1.36 m 以内, 这说明现有方法可有效抑制星座整体旋转.

本文建模并预报的光压模型为 ECOM 5 参数模型, 下一步计划对其他光压模型、光压参数预报方法以及地影期间的光压参数建模方法进行轨道长期预报研究.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] 全国北斗卫星导航标准化技术委员会. 北斗卫星导航术语: GB/T 39267—2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 11
- [2] LIU Lin, LIU Yingchun. Deficient rank problem in autonomous orbit determination with inter-satellite link measurements[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2000, **19**(3): 13-16 (刘林, 刘迎春. 关于星-星相对测量自主定轨中的亏秩问题 [J]. 飞行器测控学报, 2000, **19**(3): 13-16)
- [3] SHANG Lin. Research on the Autonomous Orbit Determination and Time Synchronization Algorithm of Navigation Satellites[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 (尚琳. 导航卫星自主定轨与时间同步算法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013)
- [4] YANG Li, GUO Feixiao, WEN Yuanlan, et al. Analysis of autonomous orbit determination for navigation constellation with one anchor station[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2013, **32**(5): 444-448 (杨力, 郭飞霄, 文援兰, 等. 单锚固站辅助导航星座自主定轨分析 [J]. 飞行器测控学报, 2013, **32**(5): 444-448)
- [5] LI Bo. Research on Long-term Autonomous Orbit Determination for Navigation Constellation Based on inter-satellite Orientation Observation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010 (李博. 基于星间定向观测的导航星座长期自主定轨技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010)
- [6] XU Jiahui, HU Min, WANG Xuyu, et al. Security analysis for long-term evolution of medium earth orbit navigation satellite constellation[J]. *Aerospace Control*, 2020, **38**(6): 67-73 (徐家辉, 胡敏, 王许煜, 等. 中轨道导航星座长期演化安全性分析 [J]. 航天控制, 2020, **38**(6): 67-73)
- [7] MAO Yue, SONG Xiaoyong, HU Xiaogong, et al. Orbit prediction accuracy analysis and improvement method for BeiDou satellites[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, **34**(2): 124-129, 134 (毛悦, 宋小勇, 胡小工, 等. 北斗卫星轨道预报精度分析及改进 [J]. 测绘科学技术学报, 2017, **34**(2): 124-129, 134)
- [8] ZHANG Weixing, LIU Wanke, GONG Xiaoying, et al. In-

- fluence of solar radiation perturbation model refinement on autonomous orbit determination of navigation satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, **38**(6): 700-704 (张卫星, 刘万科, 龚晓颖, 等. 导航卫星自主定轨中光压模型精化方法及其影响研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, **38**(6): 700-704)
- [9] JI Changdong, ZHANG Meng, WANG Qiang. Research on the method of high precision orbit prediction for BDS satellite[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, **45**(7): 18-25,32 (吉长东, 张萌, 王强. 北斗卫星轨道预报方法分析 [J]. 测绘科学, 2020, **45**(7): 18-25,32)
- [10] SPRINGER T A, ROTHACHER M, BEUTLER G. Using the Extended CODE Orbit Model: First Experiences[M]// NEILAN R E. IGS 1996 Analysis Center Workshop. Pasadena, CA: IGS Central Bureau, 1996: 13-25
- [11] RODRIGUEZ-SOLANO C J, HUGENTOBLE U, STEIGENBERGER P. Adjustable box-wing model for solar radiation pressure impacting GPS satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2012, **49**(7): 1113-1128
- [12] DACH R, BOCKMANN E. International GNSS Service Technical Report 2023(IGS Annual Report)[R/OL]. (2024-06-11)[2025-01-15]. <https://igs.org/news/igs-technical-report-2023>
- [13] SPRINGER T A, BEUTLER G, ROTHACHER M. A new solar radiation pressure model for GPS satellites[J]. *GPS Solutions*, 1999, **2**(3): 50-62
- [14] CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Modeling and analysis of solar radiation pressure for GPS satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, **22**(2): 98-103 (陈秋丽, 杨慧, 陈忠贵, 等. GPS 卫星光压摄动建模发展与启示 [J]. 航天器工程, 2013, **22**(2): 98-103)
- [15] SPRINGER T A, BEUTLER G, ROTHACHER M. Improving the orbit estimates of GPS satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 1999, **73**(3): 147-157
- [16] LI Jie. Solar Radiation Pressure Modeling for Beidou-3 Satellites[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022 (李婕. 北斗三号卫星太阳光压模型精化研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2022)
- [17] BAR-SEVER Y, KUANG D D. New Empirically Derived Solar Radiation Pressure Model for Global Positioning System Satellites during Eclipse Seasons[R]. IPN Progress Report 42-159, 2004: 1-11
- [18] STEIGENBERGER P, DENG Z G, GUO J, et al. Beidou-3 orbit and clock quality of the IGS Multi-GNSS pilot project[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **71**(1): 355-368
- [19] CHEN G, GUO J, GENG T, et al. Multi-GNSS orbit combination at Wuhan University: strategy and preliminary products[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, **97**(5): 41
- [20] BIZOUARD C, LAMBERT S, GATTANO C, et al. The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, **93**(5): 621-633
- [21] 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 & Astronomica*, 2015, **45**(7): 079511 (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): 079511)
- [22] GRIMES J G. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard[EB/OL]. (2008-09-01). <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16930>

作者简介



黄进 男, 2000 年 7 月出生, 中国科学院大学硕士研究生, 研究方向为天体测量与天体力学。

E-mail: huangjin@shao.ac.cn



陈艳玲 (通信作者) 女, 1980 年 12 月生, 中国科学院上海天文台正高级工程师、中国科学院大学博士生导师。主要研究方向为空间飞行器精密定轨及其应用, 近年来重点研究近地及地月空间卫星自主导航及应用。

E-mail: ylchen@shao.ac.cn