

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.08

基于中国自主观测解算 EOP 的长期预报及精度评估

许雪晴^{1,2}, 郭 丽^{1,2,3}, 周伟莉^{1,3}, 张志斌^{1,2,4}, 宋淑丽^{1,2},
王广利^{1,2,3}, 齐朝祥^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049; 3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030; 4. 射电天文全国重点实验室, 北京 100101)

摘要: 地球自转运动可以用地球定向参数 (EOP) 来描述。EOP 作为连接天球与地球参考系的关键参数, 是重要的时空基准参数。因观测数据处理存在滞后性, EOP 的实时应用须通过预报序列来实现, 在空间飞行器定轨、制导及深空探测等领域具有重要应用价值。基于国际地球自转和参考系服务的综合解及中国自主观测的快速解组成 EOP 联合序列, 在拟合模型中引入气候变率并开展 365 d 长期预报。针对近两年时间段, 统计预报精度并与美国海军天文台 (USNO) 维护的预报产品进行对比。结果表明, 基于中国自主观测联合序列生成的 EOP 预报序列, 其短期跨度精度略低于 USNO 产品, 在中长期跨度中则具有优势。特别是世界时参数的中长期预报精度提高了 20%~30%, 体现了中国在 EOP 自主观测解算以及预报数据服务领域的技术进步。

关键词: 地球自转变化; 地球定向参数; 高精度预报; 快速世界时解; 快速极移解
中图分类号: P228 **文献标识码:** A

1 引 言

地球的自转运动表征了固体地球与大气、海洋、地幔和地核在各种时空尺度上的耦合过程, 可以直观地用地球定向参数 (Earth Orientation Parameters, EOP) 来描述。EOP 是天球参考框架 (International Celestial Reference Frame, ICRF) 与地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 之间的转换参数, 在深空探测和卫星精密定轨等领域都有重要

收稿日期: 2024-09-23; 修回日期: 2024-10-14

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0133700); 国家自然科学基金 (12473069, 12233010, 12203090); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA0350205)

通讯作者: 许雪晴, xqxu@shao.ac.cn

应用。地球自转运动极为复杂且时变性高,因此,其监测必须依靠多种空间大地测量技术的综合观测来实现。常规的空间大地测量手段主要有甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、人卫激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR)、全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 和多普勒卫星测轨与无线电定位组合 (Doppler Orthography and Radio Positioning Integrated by Satellite, DORIS) 等^[1-3]。

天球参考框架、地球参考框架以及他们之间的连接参数 EOP, 构建了空间基准的主要内涵,是一切地基和空基活动的参考基准,也是中国独立自主开展空间项目的关键技术。图 1 描述了 EOP 的内容及其与天球和地球参考框架的连接关系。如图所示, EOP 通常包含三部分: (1) 岁差和章动,描述了地球自转轴在空间的运动,是日月与行星引力作用在地球赤道隆起部分的结果; (2) 极移,是自转轴相对于地壳的运动; (3) 日长变化,反映了地球自转速率的变化。由于岁差章动可以用模型精确计算,日长变化则可以通过世界时转换得到,因此,以下本文所说的 EOP 均指极移 (包含 P_x 、 P_y 分量) 和世界时与协调世界时之差 (UT1-UTC),有时也用 UT1 简称。

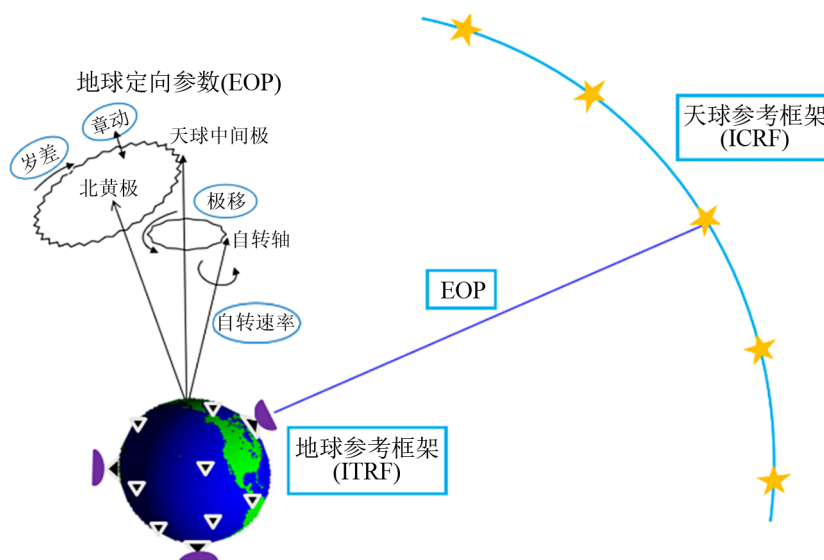


图 1 EOP 及其与天球和地球参考框架的连接关系

高精度 EOP 数据通常是基于地球参考框架定义,通过引入一定约束对多种空间大地测量数据进行加权综合确定,即为 EOP 综合解。由于复杂的数据处理过程,高精度 EOP 综合解存在 4 周左右的延迟。近一个月的 EOP 数据通常采用 GNSS 观测的极移,以及 VLBI 观测的世界时进行补充,即为 EOP 快速解。当前, EOP 综合解由国际地球自转和参考系服务 (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) 发布;提供 EOP 快速解的单位则有美国海军天文台 (US Naval Observatory, USNO) 和欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 等,中国国内则缺乏相关产品^[4-8]。当前,全球大多数卫星导航系统及空间探测任务均高度依赖 IERS 发布的 EOP 数据。随着中国综合实力的提升及国际形势的变化,亟

需建立一套独立自主的 EOP 观测、解算以及预报数据服务系统^[9]。

联合 EOP 综合解与快速解, 向后外推可以得到预报数据, 高精度 EOP 预报数据具有非常重要的现实应用需求。近年来, 许多学者针对 EOP 预报展开了研究。在众多预报方法中, 最小二乘外推和自回归 (least square and auto-regressive, LS+AR) 组成的模型, 因其简单且有效, 从提出以来就被公认为是最可靠的 EOP 预报模型^[10,11]。该联合方法已通过两次 EOP 预报比较活动 (EOP prediction comparison campaign, EOP PCC) 的检验^[12,13], 也是 IERS 公报预报数据获取的主要方法^[14]。与此同时, 大量研究表明, 由大气、海洋等流体组成的有效角动量 (effective angular momentum, EAM) 是地球自转变化的主要激发因素, 它的赤道和轴向分量分别对应于两个极移分量和自转速率参数的激发。德国地学研究中心 (GeoForschungsZentrum, GFZ) 每日发布延迟 1 d 的 EAM 基础数据集和 6 d 预报序列, 这为 EOP 超高精度的 1~10 d 预报提供了基础^[15~18]。近几年, 许多研究将 EAM 数据与数学模型相结合开展 EOP 预报, 结果均表明引入流体激发可以有效提高短期预报精度^[19~23]。

然而, 上述工作均基于国际 EOP 数据, 主要研究极移参数 30 d 以内的短期预报, 对 UT1-UTC 参数和 EOP 中长期预报的研究较少, 且缺乏基于自主观测解算 EOP 数据的预报分析。此外, EAM 只能提高 EOP 超短期预报精度, 对中长期预报没有作用。基于该现状, 本工作采用自主观测解算的近 30 d EOP 数据, 结合 IERS 综合解组成联合序列, 然后采用 LS+AR 模型进行 EOP 的 365 d 长期预报。鉴于 EAM 无法改进 EOP 中长期预报的情况, 结合气候变化在 EOP 中的相关研究^[24~30], 我们在拟合模型中引入与气候相关的年际变化周期并采用最新解算的地球物理参数, 以此来提高 EOP 中长期预报精度。

2 自主快速 EOP 精度评估

为满足中国重大项目对自主测定与预报 EOP (特别是世界时 UT1) 的迫切需求, 上海天文台于 2022 年 5 月初组建了地球定向参数和世界时快速测量团队。依托前期建设好的若干 VLBI 测站和 GNSS 监测站等设施, 该团队采用中国国内自主观测与国际联测并行的方式, 启动了快速 EOP 产品和服务。为了补齐 IERS 综合解的延迟, 近 30 d 的 EOP 实测序列是通过结合自主观测数据 (SESHAN 13-m、TIANMA 13-m、URUMQI-13-m VLBI 天线以及上海天文台 GNSS 中心) 与国际测站数据解算所获得。

为了融合 EOP 综合解与自主快速解, 需要进行一些简单的数据预处理。首先, GNSS 快速极移数据时间点为每日 UTC 12 h, 需要内插到每日 UTC 24 h, 与 IERS C04 序列一致; 其次, VLBI 快速 UT1 序列时间点毫无规律, 本文采用加密内插方式, 输出每日 UTC 24 h 点值构成快速 UT1 序列。以 2023 年第一季度为例, 图 2 显示了自主观测解算 EOP 相对于 IERS C04 综合解的残差序列, 及其精度统计情况。这里, 选用平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 作为精度指标。

由图 2 可以看出, 相较于高精度的事后综合解序列, 自主观测解算的 EOP 残差序列总体上分布较为集中, 显示了较好的精度稳定性。为了进行对比, 本文针对同一时间段, 统

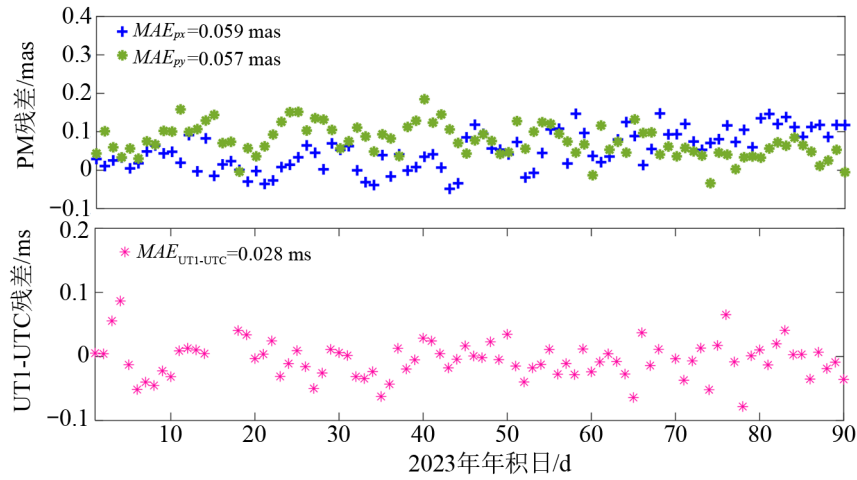


图2 自主观测解算 EOP 相对于 IERS C04 综合解的残差序列及其精度统计结果

计了 USNO 解算的快速 EOP 序列精度。其中, 极移两个分量的 MAE 分别为 0.033 mas 和 0.028 mas, UT1-UTC 参数的 MAE 为 0.019 ms。可以看出, 与 USNO 的快速 EOP 解相比, 自主快速 EOP 解的精度还存在一定差距。

这些差距可以简单总结为以下几个方面: (1) 3 个残差序列均显示了半月变化项的存在, 这可能与自主解算没有在潮汐模型中考虑更小的变化项有关^[3,5,9]; (2) 极移残差序列还表现出一定的线性偏差, 这主要与自主快速数据仅依赖单一 GNSS 技术有关; (3) 世界时残差序列存在局部观测点较为分散的情况, 这可能与参与观测的部分测站分布相关。鉴于此, 未来自主 EOP 快速解精度的提高可以从两个方面开展: (1) 增加全球布局的测站, 降低因基线长度不足而导致的解算误差; (2) 改进快速 EOP 综合处理方案, 消除系统偏差以及降低潮汐模型误差影响。

3 引入气候变率改进 EOP 中长期预报

本工作结合 IERS 提供的 1962 年 1 月 1 日至今的综合解 (EOP C04 序列) 与自主观测解算的快速解, 构建了 EOP 联合观测序列。基于该序列, 采用 LS+AR 方法进行预报。其中, EOP 序列中的规则项 (主要包括趋势项和周期项) 采用模型拟合外推方式预报, 剩余残差项则由自回归模型预报, 两者结合即可获得 EOP 1~365 d 预报序列。拟合模型与自回归模型分别表示如下:

$$EOP_{rg}(t) = a + bt + c_k \sum_{k=1}^m \sin\left(\frac{2\pi}{T_k}t + \phi_k\right), \quad (1)$$

$$EOP_{rs}(t) = \sum_{l=1}^p \alpha_l EOP_{rs}(t-l), \quad (2)$$

式中, EOP_{rg} 和 EOP_{rs} 分别代表规则项和残差项, a, b, c_k, T_k, ϕ_k 为拟合模型参数, p, α_l 则为自回归模型参数^[29]。

有研究表明, 地球流体角动量 (EAM) 对改进 EOP 超短期预报效果显著, 却对中长期预报几乎无影响^[20-24]。因此, 本工作没有引入 EAM 来进行 EOP 长期预报。此外, 近期多篇论著对地球自转变化中的气候变化表征展开研究, 证实近年来 EOP 序列发生了趋势改变^[24,26]。图 3 显示了 1962 年至今的 EOP 观测序列, 红色方框标记出各参数发生异常的时间段。

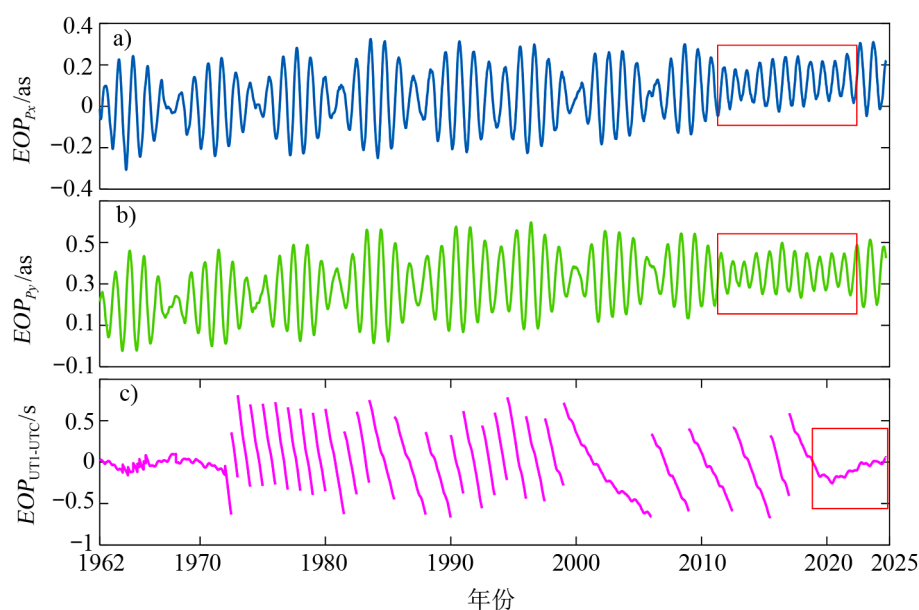


图 3 1962—2024 年 EOP 观测序列

图 3 中 a) 和 b) 展示了 P_x 和 P_y 观测序列, 可以看出, 2012—2021 年地球极移序列的振幅急剧减小。最新研究结果表明, 极移振幅衰减是由大气、海洋的反相位激发导致, 这反映了海气耦合模式的改变^[26]。图 3c) 为 UT1-UTC 序列, 断点表示由于地球自转长期减慢而产生的跳秒。可以看到, UT1-UTC 序列的减小趋势在 2020 年发生改变, 逆转为增加趋势。这种趋势逆转表明地球近期进入自转加速状态, 且 2020—2023 年发生的三重拉尼娜事件对此次自转加速存在约 9% 的贡献^[29]。EOP 序列的这些变化会影响其中长期预报, 因此我们需要予以考虑。

基于上述气候变化在 EOP 序列中的指征研究, 本工作在 EOP 预报模型中引入气候变率, 来改进中长期预报精度。具体改进方法如下: (1) 为了准确拟合世界时序列的复杂变化, 我们在模型中除了考虑常规的周年、半年、1/3 年周期项, 还引入若干年际变化周期 (约 2、3、6、7 年周期项), 从而提高了序列长期变化项的拟合准确性^[27-29]; (2) 为了适应极移序列近期的振幅变化, 引入流体激发数据来重新估计钱德勒摆动周期 (约为 432.4 d, 具体解算方法详见文献 [31])。这些数据的引入和更新均考虑了近年来气候变化对地球自转变化的影响, 本文统称为气候变率。

基于上述改进措施,通过 EOP 联合观测序列可以获得 1~365 d 的 EOP 预报数据,本数据文件每月生成一次,并上传至数据平台供相关用户下载使用。该预报数据文件自 2022 年 5 月至今已累积 2 a,可以进行精度评估。本文选取 2022 年 5 月—2024 年 7 月的预报数据,与对应时期的 EOP 观测数据进行对比,统计 MAE 作为精度指标。MAE 表示为:

$$MAE = \sum_{i=1}^n |O_i^j - P_i^j|/n, \quad (3)$$

式中, O 为 EOP 观测值, P 为预报值, j 为预报跨度, n 为参与预报精度统计的点数。

4 EOP 中长期预报结果与分析

为了更好地计算本工作的长期 EOP 预报序列精度,选取同一时期 IRES 公布的 Bulletin A 预报数据进行对比。图 4 显示了 2022 年 5 月—2024 年 7 月间,本工作结果与 Bulletin A 公布的 1~365 d 的 EOP 预报精度对比情况。其中, Bulletin A 文件由美国海军天文台提供,其结果以下标记为 USNO,本文结果则标记为 SHAO (Shanghai Astronomical Observatory)。

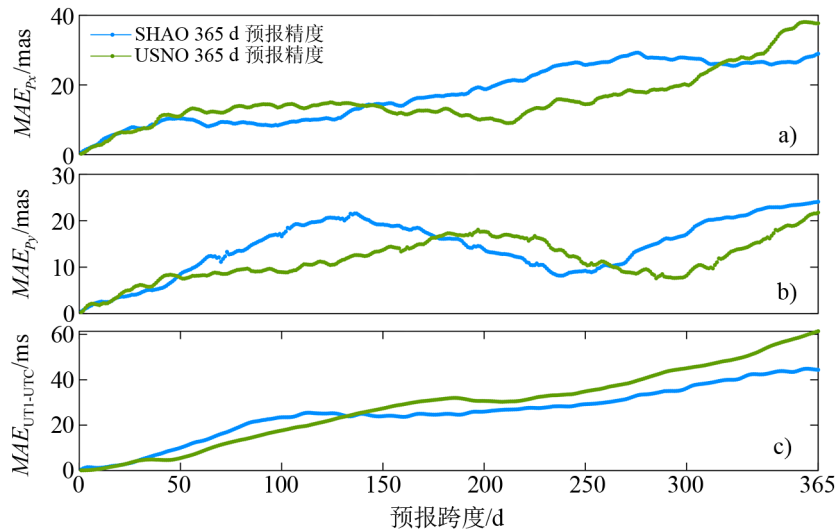


图 4 SHAO 与 USNO 365 d EOP 预报精度对比

从图 4 可以看出,在 EOP 不同参数、不同跨度预报精度上,两家表现各有不同。首先,对于 P_x 参数,大致上可以认为 SHAO 在 50~150 d 之间和 320 d 之后的预报精度占优,而 USNO 在 50 d 以内和 150~320 d 之间的预报精度更高;其次,对于 P_y 参数,SHAO 在 180~260 d 之间的预报精度占优,其余跨度 USNO 的预报精度更高;最后,对于 UT1-UTC 参数,1~140 d 之间 USNO 领先,而在 140 d 之后则 SHAO 具有明显优势。按照应用需求不同,通常可以将 EOP 预报分为以下几类:(1) 超短期预报 (10 d 以内);(2) 短期预报 (90 d 以内);(3) 中期预报 (180 d 以内);(4) 长期预报 (365 d 以内)。为了直观对照,图 5 显示了两家

在上述主要跨度上的 MAE 比较结果。此外, 图 5 还显示了 3 个参数在 30 d 和 60 d 的短期预报精度情况。

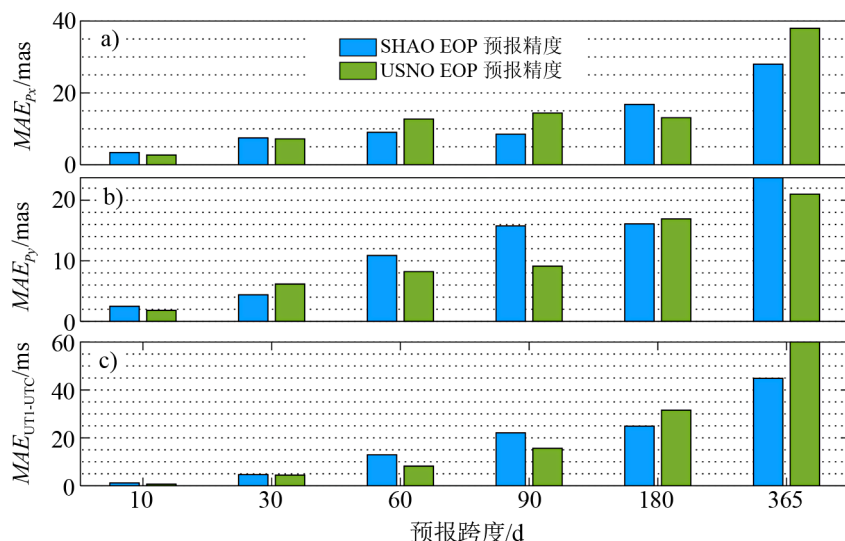


图 5 SHAO 与 USNO 主要跨度 EOP 预报精度对比

依据图 5 定点跨度的 MAE 对比情况, 可以总结如下: (1) 在 10 d 跨度上, USNO 的 EOP 预报精度比 SHAO 的稍高; (2) 对于 30 d、60 d、90 d 短期预报精度, SHAO 和 USNO 分别在 P_x 和 P_y 分量上各有优势, USNO 在 UT1-UTC 分量上占优; (3) 对于 180 d 中期预报精度, SHAO 在 P_x 和 UT1-UTC 分量上均有优势, USNO 则在 P_y 分量上稍微领先; (4) 对于 365 d 长期预报精度, SHAO 在 P_y 和 UT1-UTC 分量上大幅领先, USNO 则在 P_x 分量上占有优势。

总之, 在超短以及短期预报上 USNO 小幅领先, 这主要由于其近 30 d 的快速 EOP 解精度比较高; 在中长期预报中 SHAO 则具有精度优势, 表明近一月的快速解精度仅能影响 90 d 以内短期预报, 中长期预报精度则主要依赖预报模型。SHAO 在中期预报中的优势同时表明, 在预报模型中引入气候变率可以提高精度。特别是世界时参数, 其中长期预报精度改进约为 20%~30%。此外, 本文结果显示, 引入气候率对极移的改进效果不如 UT1-UTC 显著。在本文选取的评估时间段 (2022—2024 年), 极移的振幅衰减调整已经完成并恢复到常规振幅阶段, 因此, 钱德勒周期的更新对该阶段的预报影响不大; 在此期间, UT1-UTC 的复杂变化趋势仍在持续, 因此, 引入相关年际周期可以有效改善其中长期预报。

5 总结与展望

本工作针对自主观测解算的快速 EOP 解, 进行数据预处理后再与 EOP C04 综合解组成联合观测序列。基于该联合序列, 首次在模型中引入气候变率向后外推获得 1~365 d 实时

EOP 预报数据, 然后以文件形式上传至数据平台以便服务相关用户。对 SHAO 和 USNO 生成的 EOP 预报数据进行精度评估, 对比结果表明, SHAO 与 USNO 在不同跨度预报上各有优势; 分析表明, SHAO 与 USNO 在快速 EOP 解算以及 1~365 d 的 EOP 预报精度水平相当。上述结果表明, 经过多年的技术积累, 中国已经具备 EOP 的多技术体系建设、观测解算、数据处理以及产品服务综合能力。

为了更好地保障中国重大项目的应用需求并满足科学研究需要, 自主 EOP 数据服务可以从以下几个方面进行改进: (1) 采用多技术并置策略消除测站坐标误差等的影响, 增强 VLBI、GNSS 等测站的稳定性; (2) 结合高分辨率数据精确分析 EOP 各频段激发机制, 降低固体潮以及海潮模型误差的影响; (3) 制定新的快速 EOP 数据处理策略, 消除框架不一致带来的系统偏差; (4) 改进现有地球自转理论, 引入全要素地球物理激发因素, 进一步提高 EOP 预报精度; (5) 广泛调研用户需求, 提供个性化 EOP 数据服务。

参考文献:

- [1] Lambeck K. The Earth's Variable Rotation. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 28
- [2] Bizouard C, Gambis D. International Association of Geodesy Symposia, 2009, 134: 265
- [3] Petit G, Luzum B. IERS Technical Note, No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010: 36
- [4] 项宇, 蒋孝卿, 杨建华, 等. 天文学进展, 2023, 42(2): 269
- [5] 黄逸丹, 舒逢春, 何旋, 等. 武汉大学学报·信息科学版, 2023, 48(1): 75
- [6] 范昊鹏, 孙中苗. 测绘科学技术学报, 2018, 35(2): 141
- [7] Schartner M, Plotz C, Soja B. Journal of Geodesy, 2022, 96 (4): 1
- [8] Kern L, Schartner M, Bohm J, et al. IVS 2022 General Meeting Proceedings, 2022, 33: 167
- [9] 徐天河, 王潜心, 于素梅, 等. 导航定位学报, 2015, 3(03): 13
- [10] Xu X, Zhou Y. Adv Space Res, 2015, 56(10): 2248
- [11] 许雪晴, 周永宏. 飞行器测控学报, 2010, 29(2): 70
- [12] Kalarus M, Schuh H, Kossek W, et al. Journal of Geodesy, 2010, 84(10): 587
- [13] Sliwinski J, Kur T, Winska M, et al. Artificial Satellites, 2022, 57(s1): 237
- [14] Kiani M, Schartner M, Soja B. J Geophys Res: Solid Earth, 2022, 127: 24775
- [15] Dobslaw H, Dill R. Adv Space Res, 2018, 61(4): 1047
- [16] Dill R, Dobslaw H, Thomas M. Journal of Geodesy, 2019, 93(3): 287
- [17] Dill R, Saynisch J, Irrgang C, et al. Earth and Space Science, 2021, 8(12): 1
- [18] Dill R, Dobslaw H, Thomas M. Artificial Satellites, 2023, 58(4): 330
- [19] Wu Y, Zhao X, Yang X. Artificial Satellites, 2022, 57(s1): 290
- [20] Kong Q, Han J, Wu Y, et al. Geophys J Int, 2023, 235(2): 1658
- [21] Luo J, Chen W, Ray J. Surv Geophys, 2022, 43: 1929
- [22] Kehm A, Hellmers H, Blobfeld M, et al. Journal of Geodesy, 2023, 97(1): 1
- [23] 魏娜, 周雨欣, 许雪晴, 等. 地球物理学报, 2024, 67(4): 1356
- [24] Duncan A. Nature, 2024, 628: 333
- [25] Mostaf S, Surendra A, Mathieu D, et al. Nature Geoscience, 2024, 17: 705
- [26] Xu X, Fang M, Zhou Y, et al. Journal of Geodesy, 2024, 98: 59
- [27] Xu X, Zhou Y, Xu C. Atmosphere, 2023, 14: 982
- [28] Xu X, Zhou Y, Duan P, et al. Journal of Geodesy, 2022, 96: 43
- [29] 许雪晴, 周永宏, 胥灿灿. 地球与行星物理论评 (中英文), 2023, 54(5): 541
- [30] Xu X, Zhou Y, Xu C. Journal of Planetary Geodesy, 2023, 57: 262

[31] 胥灿灿, 方明, 许雪晴, 等. 天文学进展, 2021, 39(4): 544

The Long-term Forecast and Accuracy Evaluation of EOP Based on China's Autonomous Observations

XU Xueqing^{1,2}, GUO Li^{1,2,3}, ZHOU Weili^{1,3}, ZHANG Zhibin^{1,2,4}, SONG Suli^{1,2},
WANG Guangli^{1,2,3}, QI Zhaoxiang^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030 China; 4. State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Beijing 100101, China)

Abstract: Earth's rotation can be intuitively described using Earth Orientation Parameters (EOP), which are important spatiotemporal information indicators and provide essential linkage between the celestial and the terrestrial reference frame. Due to the latency in processing observational data, real-time applications of EOP necessitate forecast sequences, which are vital for spacecraft orbit determination and navigation, as well as deep space exploration projects. This study is based on the hybrid EOP sequence using the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) solution and China's autonomously observed rapid solutions, incorporating climatic variations to perform a 365-day long-term forecast. For the period from 2022 to 2024, the accuracy of EOP forecasts was statistically analyzed and compared with forecast products maintained by the United States Naval Observatory (USNO). The results indicate that while the short-term forecast accuracy of EOP based on the hybrid observations slightly falls short of USNO products, it demonstrates a significant advantage in medium to long-term forecasts. Especially for the parameters of universal time, the improvement of medium- to long-term forecast is about 20%~30%, this reflects the level of China's independent EOP observation solutions and forecast data services.

Key words: Earth rotation change; Earth orientation parameters; high accuracy prediction; rapid UT1; rapid polar motion