

引用格式: 杨新宇, 吴元伟, 赵鑫, 等. 基于地球流体有效角动量函数的 UT1 分段预报[J]. 时间频率学报, 2023, 46(2): 94-104.

基于地球流体有效角动量函数的 UT1 分段预报

杨新宇^{1,2,3}, 吴元伟¹, 赵鑫^{1,2,3}, 杨旭海^{1,2}, 张首刚^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 世界时 UT1 的变化受到大气、海洋、陆地水圈等多种激发因素的影响, 这些激发因素可以由地球流体有效角动量函数 EAM (effective angular momentum) 描述。基于德国地学研究中心地球系统建模小组 ESMGFZ (Earth System Modeling at GeoForschungsZentrum) 的有效角动量函数和国际地球自转和参考系服务 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) 的 EOP (Earth orientation parameters) 数据, 使用最小二乘法 LS (least square) 和自回归模型 AR (auto regression) 方法, 通过一系列实验, 参数搜索, 最终, 针对不同的预报跨度, 采用不同的参数对世界时 UT1 进行预报。在 2019 年至 2021 年进行的 495 次预报实验中, 对比 IERS 的预报结果, 在未来第 6 天, 第 30 天, 第 90 天, 平均绝对误差 MAE (mean absolute error) 分别降低了 0.087 4 ms, 0.499 9 ms, 1.476 4 ms, 提升分别为 37.43%、14.72%、11.82%; 对比传统 LS+AR 的预报结果, 在未来第 6 天, 第 30 天, 第 90 天, MAE 分别降低了 0.631 5 ms, 1.134 7 ms, 2.376 1 ms, 提升分别为 81.21%、28.15%、17.74%。

关键词: 地球自转; UT1 预报; 地球流体有效角动量函数

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-02-0094-11

Piecewise UT1 prediction based on the Earth's fluid effective angular momentum function

YANG Xin-yu^{1,2,3}, WU Yuan-wei¹, ZHAO Xin^{1,2,3}, YANG Xu-hai^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Electronic Electrical and Communication Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The variation of UT1 is affected by the excitations of atmosphere, ocean and terrestrial hydrosphere. These excitations can be described by the effective angular momentum function EAM (effective angular momentum) of the Earth's fluid components. A series of UT1 prediction experiments are performed by combining the GFZ (GeoForschungsZentrum) EAM data and the IERS (International Earth Rotation and Reference Systems

收稿日期: 2022-03-25; 接受日期: 2022-05-15

基金项目: 中国科学院“一带一路”资助项目(XAB2018YDYL01); 国家自然科学基金面上资助项目(12073034)

Service) UT1 C04 series and using the LS (least square) and AR (auto regression) method. The UT1 was predicted in 90 days by adopting different parameters in different time spans. For the 495 prediction experiments with date ranging from 2019 to 2021, compared with the IERS Bulletin A prediction, the MAE (mean absolute error) is reduced by 0.087 4 ms, 0.499 9 ms and 1.476 4 ms respectively on the 6th, 30th and 90th day in the future, corresponding to an improvement of 37.43%, 14.72% and 11.82% respectively; Compared with the prediction results of traditional LS+AR method, the MAE is reduced by 0.631 5 ms, 1.134 7 ms and 2.376 1 ms respectively on the 6th, 30th and 90th day in the future, corresponding to an improvement of 81.21%, 28.15% and 17.74% respectively.

Key words: Earth rotation; UT1 prediction; the Earth's fluid effective angular momentum function

0 引言

地球的自转受到多种因素影响, 外部受到太阳、月球及行星的引力作用; 内部受到大气、海洋、地壳、地幔等圈层相互作用的影响, 导致了地球自转的不规则变化。地球自转运动可以用地球定向参数 EOP (Earth orientation parameters) 来描述, EOP 由 UT1-UTC (以下统称 UT1), 日长变化 ΔLOD , 极移 PMX、PMY 和章动修正项 dX 、 dY 组成, 是地球参考架和天球参考架之间相互转换的重要参数, 在深空探测、卫星轨道确定、卫星自主导航等领域有着重要的应用。当前, EOP 的测量与维持, 主要依靠月球和卫星激光测距、甚长基线干涉测量等空间大地测量技术^[1-2]。由于复杂的数据处理过程, EOP 的获取往往有几小时到几天的延迟, 在实时性高的应用场景中, 对于 EOP 预报的需求推动着 EOP 预报方法的研究, 尤其是中短期预报, 在卫星自主导航和深空探测等领域不可或缺。

作为地球定向参数的组成部分, UT1 和 ΔLOD 描述了地球自转角与角速度的变化, 由于地球内部物理动力学过程和理论的不确定性, 因此很难对其进行准确预测。近些年来, 许多学者对 UT1 和 ΔLOD 预报进行了深入的研究, 总结了多种预报的方法。在这些预报方法中, 大部分是基于大地测量观测数据建立预报模型, 通过拟合外推得到预报结果。在 2005 年至 2008 年期间, 维也纳理工大学举办的地球定向参数预报比赛, 对于多种 UT1 预报方法进行了评估总结^[3], 包括最小二乘和自回归组合的预报方法^[4-5], LS+AR 的原理是通过最小二乘法对历史 UT1 观测数据进行拟合, 使用自回归方法处理拟合残差, 将二者外推的结果进行组合, 得到 UT1 的预报结果。此外, 还有卡尔曼滤波和离散小波变换^[6], 灰色系统模型^[7]以及神经网络等近年来比较热门的技术在 UT1 和 ΔLOD 预报中的应用^[8]。经过近半个多世纪的发展, 大气与海洋等地球流体动力学数值模型得到了极大的完善, 其预报水平也有了极大的提高, 在地球定向参数的融合与预报中所起的作用日益提升。例如: T. J. Johnson 等^[9]通过使用大气角动量 AAM (atmospheric angular momentum) 来进行 UT1 的预报。R. Dill 和 H. Dobslaw^[10]不仅考虑了 AAM, 还联合了海洋角动量 OAM (oceanic angular momentum), 陆地水圈角动量 HAM (hydrological angular momentum) 来预报 UT1, 显著地降低了短期预报误差。最近, R. Dill 等^[10]在 UT1 和 ΔLOD 预报中, 融合了 AAM、OAM、HAM 和海平面角动量 SLAM (sea-level angular momentum), 结合最小二乘与自回归方法, 进一步改善了 UT1 和 ΔLOD 的短期预报及 90 d 的长期预报。

本文 UT1 的预报借鉴了 R. Dill 等^[11]的预报方法, 引入了地球流体有效角动量函数, 使用最小二乘法 LS (least square) 和自回归模型 AR (auto regression) 结合的方法。改进之处在于, 通过一系列预报实验, 参数搜索, 将预报跨度 90 d 分为未来 1~6 d、7~40 d、41~90 d 3 个阶段, 对每个阶段的 UT1 采用不同的参数进行预报, 并在评估方法上做了探索。在 2019 年 8 月至 2021 年 3 月期间, 进行了 495 次实验。通过比对和评估, 寻找出不同阶段的最优参数, 有效提升了 UT1 中短期预报精度。在本文第 1 节中, 介绍使用到的数据集及预报方法, 第 2 节对预报结果进行了评估, 第 3 节为总结。

1 方法与数据

本节主要介绍预报方法所使用的数据集和预报的整体流程。

1.1 输入数据集

UT1 预报需要使用 EOP 数据和地球流体（大气、海洋和陆地水圈和海平面）有效角动量函数 EAM（effective angular momentum）两种输入数据集。其中 EOP 数据来自国际地球自转和参考系服务 IERS 提供的 EOP C04，以及快速产品和预报产品 Bulletin A，详情见 <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>；地球流体有效角动量函数包括以下几个部分：大气有效角动量函数 AAM、海洋有效角动量函数 OAM、陆地水圈有效角动量函数 HAM、以及海平面有效角动量函数 SLAM。这些有效角动量函数基于欧洲中期天气预报中心的运行分析数据，和海洋模型 MPIOM 提供的海底压力、垂直积分洋流数据，以及地表蓄水量、地表外河流流速和流量模型^[12]，由德国地学研究中心地球系统模型组维护，详情见 <http://rz-vm115.gfz-potsdam.de:8080/repository>。表 1 给出了地球流体有效角动量函数的数据信息。可以看到 AAM 对于总的有效角动量贡献占比最大，占据 97.6%，OAM，HAM 和 SLAM 的占比则为 0.8%，0.5%和 1.1%。

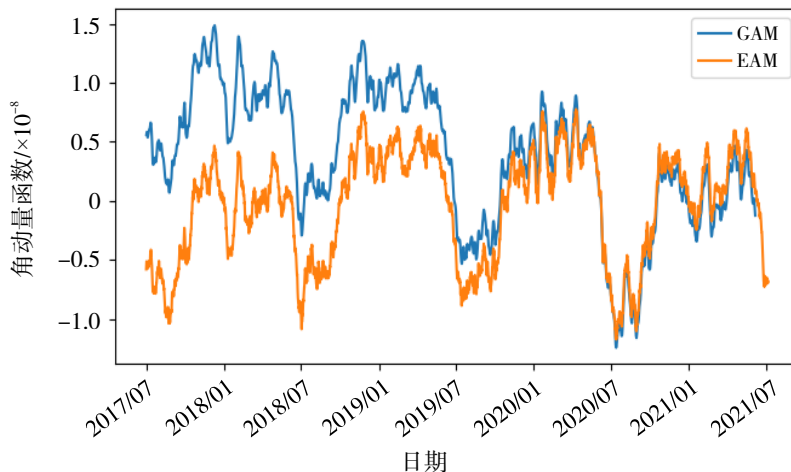
表 1 地球流体有效角动量函数信息

角动量	时间分辨率/h	观测值更新频率	预报值更新频率	相对占比
AAM	3	日	日	97.6%
OAM	3	日	日	0.8%
HAM	24	日	日	0.5%
SLAM	24	日	日	1.1%

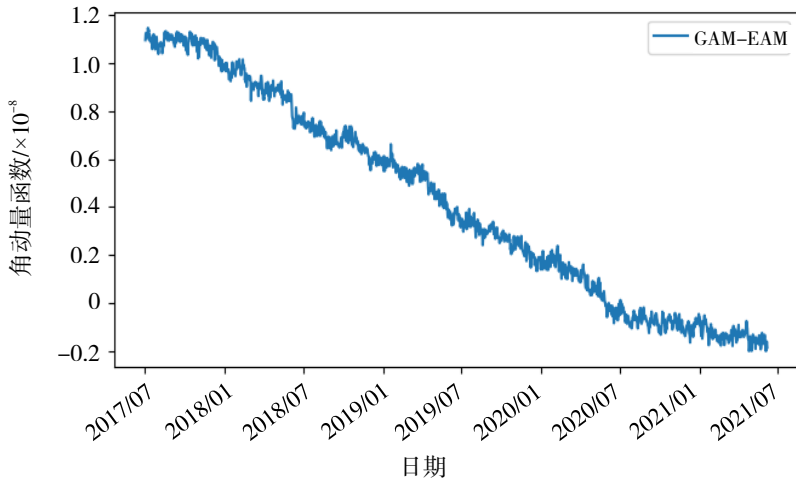
为了将地球流体角动量函数融入到预报流程中，需要使用刘维尔方程。刘维尔方程描述了 EOP 数据中日长变化 ΔLOD 序列和大地测量角动量函数 GAM (geodetic angular momentum) 之间的关系，见式(1)：

$$\psi = \frac{\Omega}{2\pi} \Delta LOD r。 \quad (1)$$

式(1)中： ψ 为大地测量角动量函数， Ω 为平均地球自转角速度， $\Delta LOD r$ 为进行潮汐修正后的日长变化 ΔLOD 数据。通过式(1)，可以实现 ΔLOD 数据与大地测量角动量函数 GAM 的相互转换。图 1 展示了 2017 年 7 月至 2021 年 7 月，由 ΔLOD 数据转换得到的大地测量角动量函数 GAM 与 ESMGFZ 提供的地球流体有效角动量函数 EAM 对比结果。



(a) GAM 与 EAM



(b) GAM 与 EAM 残差

注：EAM=AAM+OAM+HAM+SLAM，有效角动量无量纲

图 1 大地测量角动量函数 GAM 与地球流体有效角动量函数 EAM 及其残差

图 1 (a) 中，蓝色曲线为 GAM，橙色曲线为 EAM，从中可以观察到，二者并不完全相同，GAM 与 EAM 的残差如图 1 (b) 所示。

1.2 预报方法

本文 UT1 的预报借鉴了 R. Dill 等^[12]的预报方法，通过最小二乘法 LS 和自回归模型 AR，并经过一系列实验，进行参数搜索。最终，针对不同预报跨度的 UT1，使用不同的参数进行预报。图 2 展示了整体预报流程，红色部分是与 R. Dill 等^[12]预报方法的不同之处。

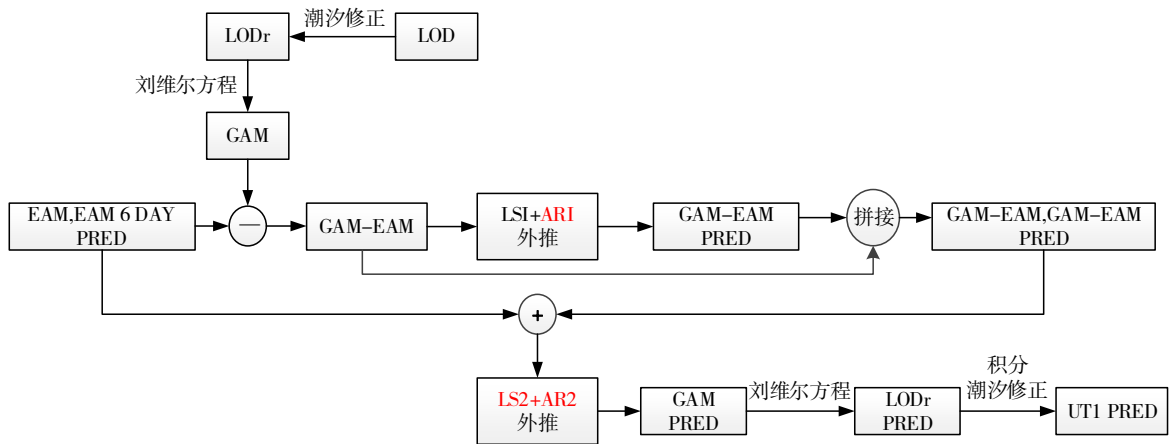


图 2 基于地球流体有效角动量的 UT1 预报流程

如图 2 所示，预报的流程主要分为两个阶段。

其中第一阶段，使用最小二乘 LS 与自回归模型 AR，外推大地测量角动量函数 GAM 与地球流体有效角动量函数 EAM 的残差 (GAM-EAM) 至未来 6 d。通过图 1 可知，大地测量角动量函数 GAM 与地球流体有效角动量函数 EAM 并不是完全相同，二者之间存在着差异。因此，在使用地球流体有效角动量函数 EAM 前，应先对其进行残差补偿。此阶段与 R. Dill 等^[12]预报流程第一阶段基本相同，此外，本文进一步在自回归模型 AR 的阶数选择上，进行了最优参数搜索，以获得更好的残差外推效果。

预报流程的第二阶段,在未来 6 d 之后,使用最小二乘 (LS) 与自回归模型 (AR),外推地球流体有效角动量函数 EAM 与残差 GAM-EAM 的和,得到外推预测的 GAM。再通过公式 (1),将外推 GAM 转换为外推 ΔLOD_r ,再进行潮汐修正,积分,即可得到预报的 UT1 结果。在 R. Dill 等^[12]的第二阶段中,使用分段最小二乘 LS 和固定阶数 (25 阶) 的自回归模型 AR 外推大地测量角动量函数 GAM 至未来 90 d。本文通过 495 次的 UT1 预报实验发现,在预报跨度 7~40 d 时,使用分段连续最小二乘 LS 和自动定阶的自回归模型 AR;对预报跨度在 41~90 d 时,使用分段连续最小二乘 LS 和固定阶数 (40 阶) 的自回归模型 AR 外推大地测量角动量函数 GAM,可以获得更低的预报平均绝对误差 MAE (mean absolute error)。表 2 给出整体预报流程参数设置。

表 2 UT1 预报流程参数设置

方法	阶段
最小二乘序列长度	第一阶段: 4 年
	第二阶段: 线性项: 1 年, 周期项: 4 年
最小二乘周期	第一阶段: 9.13, 13.7, 27.4 天,
	1/3, 1/2, 1, 3, 9.3 年
自回归模型序列长度	第一阶段: 9.13, 13.7, 27.4 天, 1/3, 1/2, 1 年
	第二阶段: 9.13, 13.7, 27.4 天, 1/3, 1/2, 1 年
自回归模型阶数	第一阶段: 4 年
	第二阶段: 2 年
自回归模型阶数	第一阶段: 最优搜索
	第二阶段: 未来 7~40 d: 自动定阶, 未来 41~90 d: 最优搜索

2 结果

采用表 2 的 UT1 预报流程参数设置,本文于 2019 年 8 月至 2021 年 3 月进行了 495 次 UT1 预报实验,对自回归模型 AR 进行了最优阶数搜索,将预报结果分别与 IERS EOP C04 观测 UT1 序列和 IERS Bulletin A 90 d 预报 UT1 序列以及不使用地球流体角动量的 LS+AR 预报序列进行了比较。

2.1 最优自回归模型阶数

自回归模型 AR 的阶数描述了当前值与过去若干个时刻值的线性关系,是影响模型外推结果的重要参数。第一阶段处理大地测量角动量 GAM 与有效角动量 EAM 的残差 (GAM-EAM) 的拟合残差,第二阶段处理大地测量角动量函数 GAM 的拟合残差,本文对这两个阶段的 AR 阶数进行了搜索,通过评估每个 AR 阶数预报结果的平均绝对误差 MAE,来确定最优值。MAE 计算公式为

$$MAE_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |P_j^i - O_j^i| \quad i=1, \dots, m. \quad (2)$$

式 (2) 中: O 为 UT1 观测值, P 为 UT1 预报值, i 为预报跨度, n 为预报点数。

图 3 和图 4 分别展示了预报流程的两个阶段,不同阶数自回归模型的平均绝对误差 MAE。

在第一阶段处理大地测量角动量 GAM 与有效角动量 EAM 的残差 (GAM-EAM) 的拟合残差时,本文以 5 d 为间隔,搜索了 5~100 范围内的数值,以及模型根据贝叶斯信息准则来自动确定的阶数 auto (多为 2 或 4),来获得第一阶段最优自回归模型阶数。从图 3 中可以看出,在整个预报第一阶段,预报的平

均绝对误差 MAE 并没有随着阶数增大而降低, 10 阶的平均绝对误差 MAE 最低。为了方便展示, 图 3 仅选取部分阶数作图。

在第二阶段处理大地测量角动量 GAM 的拟合残差时, 本文以 5 d 为间隔, 搜索了 25~45 范围内的数值, 以及自动确定的阶数 auto (多为 34 或 37), 来获得第二阶段最优自回归模型阶数。从图 4 中可以看出, 预报的平均绝对误差 MAE 以未来 40 d 左右为时间点, 分成两个部分。第一部分未来 7~40 d, 相比固定的阶数, 由模型自动确定的阶数会有更优的预报结果, 第二部分未来 41~90 d, 阶数设置为 40, 会有最低的平均绝对误差 MAE。

此外, 本文还对两个阶段的参数搜索范围外进行了实验, 但并没有获得更好的预报结果。考虑每次参数搜索实验所需要的计算资源与运行时间因素, 最终, 选择了以上两个范围作为阶数搜索的参数空间。

从图 3 和图 4 的平均绝对误差 MAE 变化趋势可以看出, 没有一套固定的参数可以适用于所有跨度的 UT1 预报, 在不同的预报跨度上应使用不同的参数来获得最优的结果。

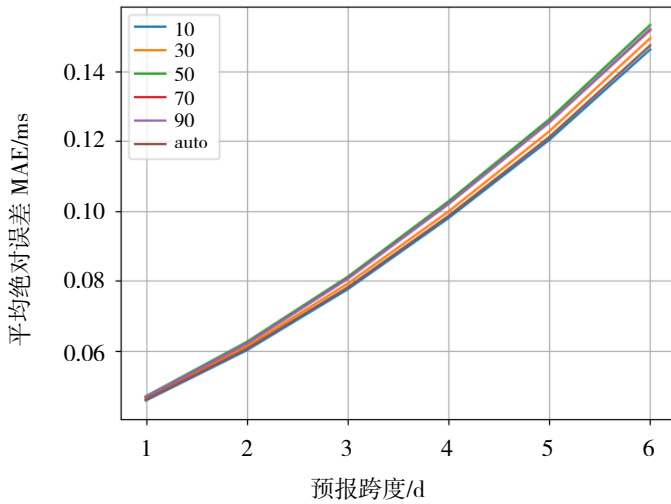


图 3 第一阶段自回归模型不同阶数的预报平均绝对误差 MAE (不同颜色曲线代表不同阶数)

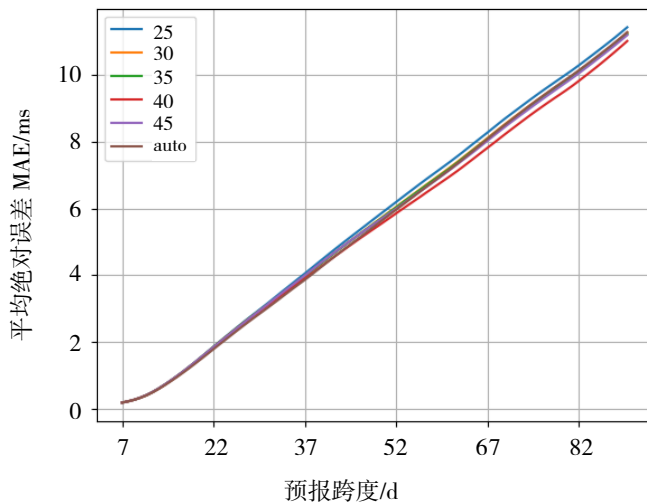


图 4 第二阶段自回归模型不同阶数的预报平均绝对误差 MAE (不同颜色曲线代表不同阶数)

2.2 不同 UT1 预报间的对比

本节对比单次 UT1 90 d 的预报结果, 如图 5 和图 6 所示。图 5 展示了 IERS、传统 LS+AR 和使用地

球流体有效角动量函数预报的 UT1 与 C04 UT1 结果。图 5 和图 6 中红色曲线为 2020 年 8 月 1 日传统 LS+AR 90 d UT1 预报结果, 蓝色曲线为本文 90 d UT1 预报结果, 绿色曲线为 IERS Bulletin A 90 d UT1 预报结果, 黑色曲线为 C04 UT1 序列。传统 LS+AR 预报结果在整个预报跨度上高于 C04 UT1, 二者相距较远。IERS Bulletin A 和本文预报结果, 在预报跨度 40 d 前较为接近, 且与 C04 UT1 相距较近。在预报跨度 40 d 后, IERS Bulletin A 预报结果迅速下降, 远离 C04 UT1, 论文预报结果与 C04 UT1 相距逐渐变大, 但整体趋势一致。

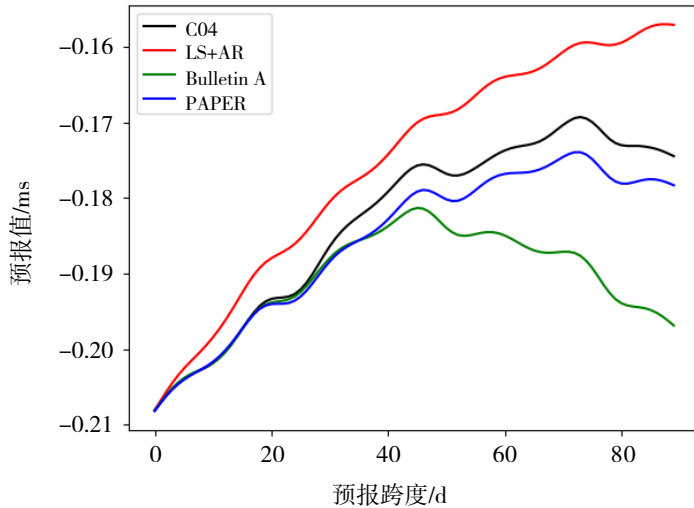


图 5 2020 年 8 月 1 日不同 UT1 预报对比

图 6 展示了单次 UT1 90 d 的预报误差绝对值。图 6 中, 红色曲线为传统 LS+AR 预报误差绝对值, 绿色为 IERS 预报误差绝对值, 蓝色为论文预报误差绝对值。从中可以观察到, 传统 LS+AR 预报误差绝对值整体上大于本文预报误差绝对值。在预报跨度 40 d 前, 论文预报误差绝对值与 IERS 预报误差绝对值相近, 在预报跨度 40 d 后, IERS 预报误差绝对值迅速增大, 而论文预报误差绝对值相对稳定, 低于 0.005 ms。

由于单次预报存在随机性, 为了更好地评估预报结果, 一般采用 MAE, 对多次预报结果进行评估, 以更好地评估预报算法性能, 对比不同预报结果。

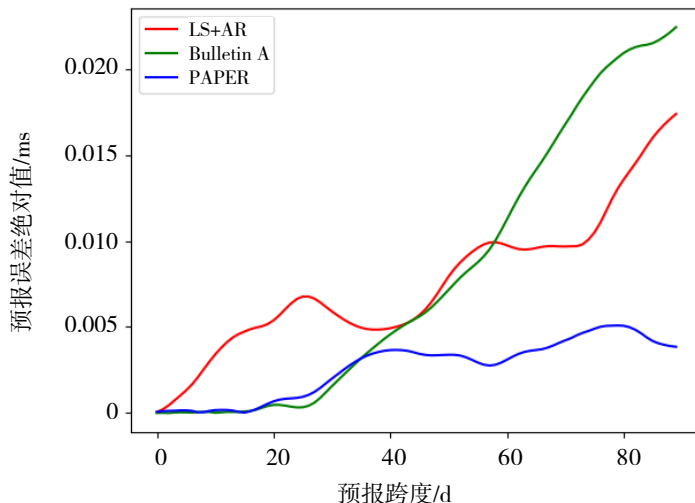


图 6 2020 年 8 月 1 日不同 UT1 预报误差绝对值对比

2.3 与 IERS EOP C04 UT1 的对比

本节对比基于地球流体有效角动量的 UT1 预报值和 IERS EOP C04 中的观测 UT1 序列进行对比, 比较时间段为 2019 年 8 月至 2021 年 3 月, 共计 495 次有效对比。对比结果 (本文 UT1 预报值与 C04 UT1 之差) 如图 7 所示。

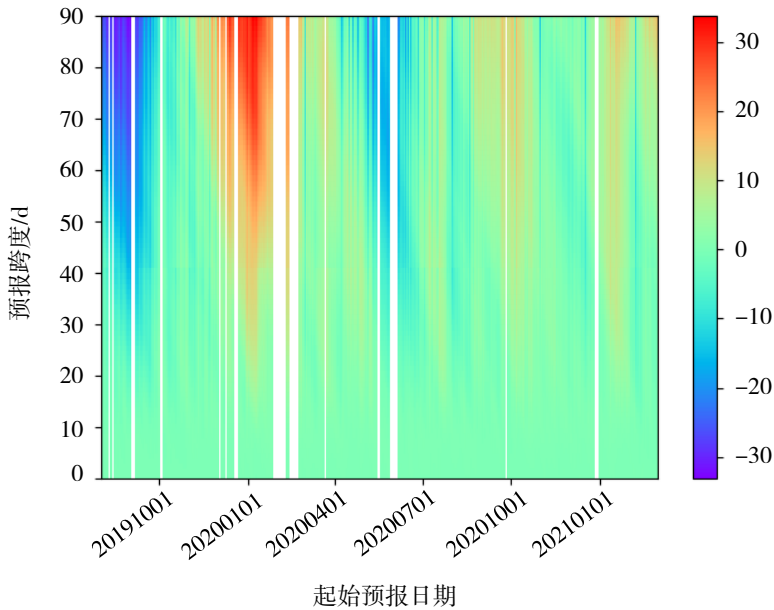


图 7 2019 年 8 月至 2021 年 3 月本文 UT1 预报值与 C04 UT1 之差 (单位 ms)

如图 7 所示, 在未来 1~30 d, 本文 UT1 预报和观测 UT1 之差在 $-8.97 \sim 11.12$ ms 范围内, 预报结果稳定且在实验时间段范围内预报精度一致。其中, 在未来第 6 天, 第 30 天 UT1 预报值和观测 UT1 二者 MAE 分别为 0.146 2 ms, 2.896 5 ms; 在未来 31 d 后, 本文 UT1 预报值在实验时间段范围内, 预报精度开始不一致, 相同的现象也可在 IERS 的预报上观察到^[1], 在 2019 年 8 月、2020 年 1 月左右, 本文 UT1 预报值和观测 UT1 之差最大约 30 ms。图 7 中白色区域由于数据缺失, 未作预报。

2.4 与 IERS Bulletin A 预报 UT1 的对比

IERS 采用联合 AAM 的多变量差分滑动自回归模型对 UT1 进行预报^[13]。本节对比基于地球流体有效角动量的 UT1 预报和 IERS Bulletin A 中的预报 UT1 序列。首先, 分别计算论文预报 UT1 与 IERS Bulletin A 预报 UT1 和 C04 UT1 的 MAE, 通过平均绝对误差 MAE 来对比本文与 IERS 的 UT1 预报。为了详细地对比二者 UT1 预报的结果, 对 2019 年 8 月至 2021 年 3 月期间, 本文预报 UT1 和 IERS 预报 UT1 误差绝对值的差值进行统计, 画出差值的分布直方图, 并通过计算 UT1 预报平均绝对误差 MAE 降低率, 来比较二者预报的差异。

图 8 展示了论文和 IERS 的 UT1 预报在 2019 年月 8 月至 2021 年 3 月的平均绝对误差 MAE。如图 8 所示, 基于地球流体角动量的预报, 论文 UT1 预报结果在不同的预报跨度上, 均优于 IERS 预报。

图 9 展示了 IERS 与本文 MAE 的差随预报跨度的变化曲线。在未来第 6 天, 第 30 天和第 90 天, 本文 MAE 分别低于 IERS 的 MAE 0.087 4, 0.499 9 和 1.476 4 ms, 提升分别为 37.43%、14.72% 和 11.82%。

从 MAE 上可以观察到, 基于地球流体角动量的 UT1 预报结果, 在全部的预报跨度上均优于 IERS 的预报结果。为了能详细地对比二者预报的结果, 论文采用式 (3) 的指标, 对本文和 IERS 的预报结果进行了误差绝对值的差值统计, 来进一步对比不同预报跨度上的结果。

$$\left| \text{UT1}_{\text{Pr}} - \text{UT1}_{\text{C04}} \right| - \left| \text{UT1}_{\text{P}_1} - \text{UT1}_{\text{C04}} \right| \circ \quad (3)$$

式(3)中： UT1_{Pr} 为本文UT1预报结果， UT1_{C04} 为IERS IERS_{C04}的UT1预报， UT1_{P_1} 为Bulletin A的UT1预报。式(3)首先将本文和IERS Bulletin A的UT1预报与C04中观测UT1进行做差，得到二者的预报误差，接着将二者的预报误差取绝对值后相减。若式(3)的值小于0，则表明本文预报UT1更加接近于C04中的观测UT1，即本文预报优于IERS预报；若大于0，则表明IERS的预报UT1更加接近于C04中的观测UT1，即IERS预报优于本文预报。

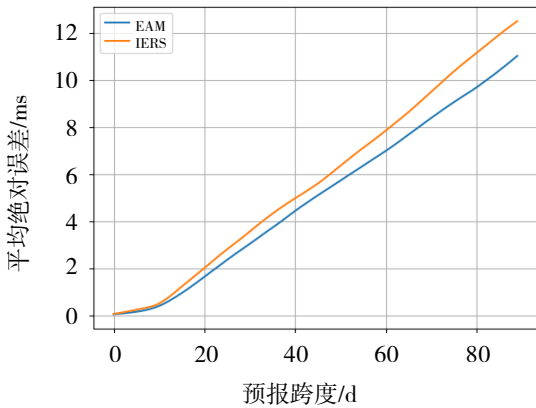


图8 本文和IERS UT1预报的平均绝对误差MAE

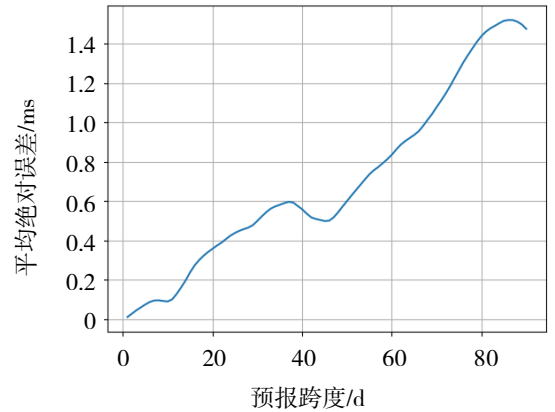


图9 IERS MAE与本文MAE的差值变化

图10展示了在3个预报跨度上本文预报UT1和IERS预报UT1误差绝对值的差值分布情况，小于0的区间表明本文预报结果优于IERS预报，反之亦反。在未来1~6d，7~30d，31~90d，本文UT1预报优于IERS预报的百分比分别为64.2%，59.4%，55.5%。由此可得，基于地球流体有效角动量的UT1预报方法，在不同预报跨度上均有提升。为了更加细致地比较本文与IERS预报，表3列出了在2019年8月至2021年3月期间，本文和IERS预报与观测UT1序列的平均绝对误差MAE。在未来第5天时，本文平均绝对误差MAE为0.1203ms，IERS为0.1950ms，降低率为38.31%，预报误差降低程度最为明显；在中长期预报跨度上，平均绝对误差MAE约降低11%。

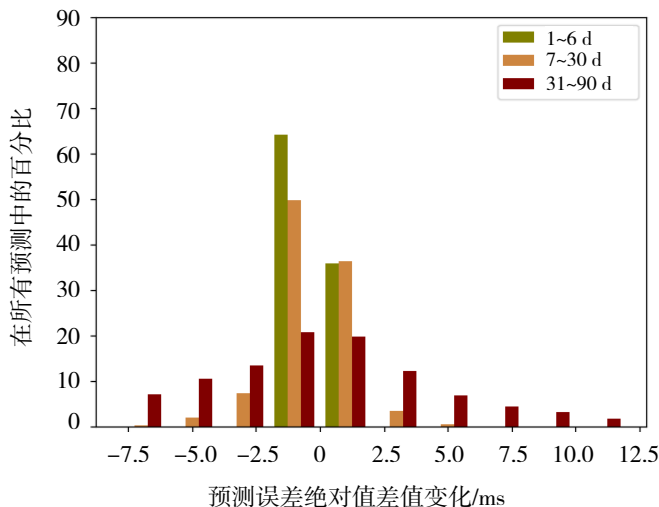


图10 不同预报跨度UT1预报差值(本文UT1预报误差绝对值-IERS预报误差绝对值)直方图

表3 未来 90 d UT1 平均绝对误差 MAE 及降低率

	本文/ms	IERS/ms	降低率/%
未来第 1 天	0.045 7	0.056 4	19.01
未来第 5 天	0.120 3	0.195 0	38.31
未来第 10 天	0.321 0	0.410 8	21.86
未来第 20 天	1.487 2	1.845 3	19.41
未来第 40 天	4.285 9	4.844 1	11.52
未来第 60 天	6.855 1	7.691 1	10.87
未来第 90 天	11.018 6	12.495 0	11.82

2.5 与传统 LS+AR 预报方法的对比

论文通过刘维尔方程，将地球流体有效角动量数据融入到世界时 UT1 的预报流程中，通过最小二乘法和自回归模型结合的方法对世界时 UT1 进行了预报。传统的世界时 UT1 预报，也使用了最小二乘和自回归模型结合的方法，但并未考虑地球自转运动的激发因素，只是对历史的 UT1 观测值进行建模。为定量评估地球流体有效角动量数据对 UT1 预报的贡献度，我们在本小节同时对比了未使用 EAM 数据时传统 LS+AR 预报的 90 d MAE。

图 11 展示了使用地球流体有效角动量前后的 UT1 预报对比，虚线为 IERS 预报 MAE，作为参照。图 12 展示了 LS+AR 与本文 MAE 的差随预报跨度的变化曲线。在未来第 6 天，第 30 天和第 90 天，本文 MAE 分别低于 LS+AR 的 MAE 0.631 5 ms, 1.134 7 ms 和 2.376 1 ms，提升分别为 81.21%、28.15%、17.74%。从图 11 和图 12 可以看出，由于使用了地球流体有效角动量，考虑了地球自转变化的激发因素，UT1 的预报精度得到了有效的提升，特别是在短期预报跨度上，对于中长期的预报也有一定程度的改善。

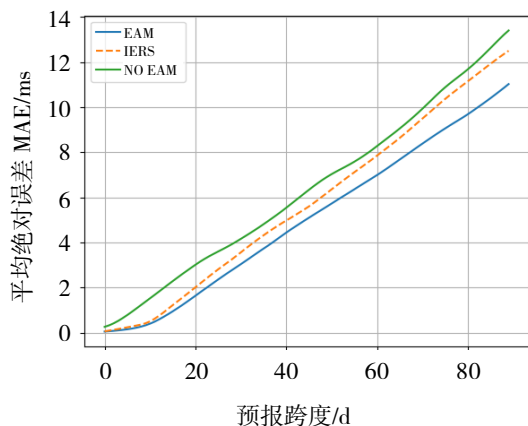


图 11 基于地球流体角动量预报的 UT1 和未使用地球流体角动量预报的 UT1 对比

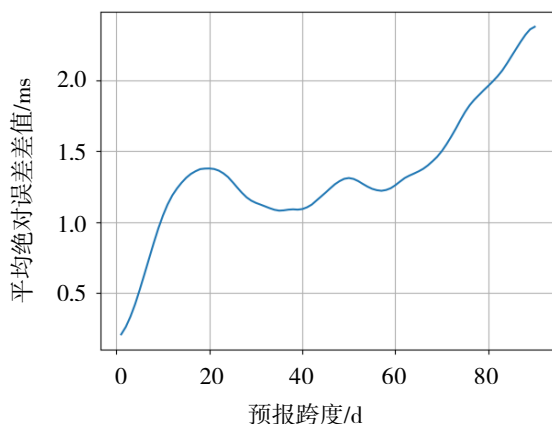


图 12 LS+AR MAE 与本文 MAE 的差值变化

3 结语

基于地球流体有效角动量的 UT1 预报，通过刘维尔方程，将地球流体有效角动量数据引入到世界时 UT1 的预报中。预报流程分为两个阶段，第一阶段通过引入地球流体有效角动量的预报值，并结合了

大地测量角动量与地球流体有效角动量 GAM-EAM 的残差;在预报的第二阶段,则针对不同的预报跨度,搜索最优的自回归模型阶数。该方法有效地提升了短期 UT1 预报精度,改善了中长期预报。在 2019 年 8 月至 2021 年 3 月期间,进行了 495 次预报实验。与 IERS Bulletin A 对比,在未来 1~6 d, 7~30 d 和 31~90 d 本文的预报结果优于 IERS 的百分比分别为 64.2%, 59.4%和 55.5%。在未来第 6 天,第 30 天和第 90 天,平均绝对误差 MAE 分别降低了 0.087 4 ms, 0.499 9 ms 和 1.476 4 ms,提升分别为 37.43%、14.72%、11.82%;对比传统 LS+AR 的预报结果,在未来第 6 天,第 30 天和第 90 天,MAE 分别降低了 0.631 5 ms, 1.134 7 ms 和 2.376 1 ms,提升分别为 81.21%、28.15%和 17.74%。结果表明,使用地球流体有效角动量数据,并针对不同预报跨度、选择不同的预报参数,是实现高精度 UT1 预报的有效策略。

参考文献:

- [1] SCHUH H, JOHANNES B, HEINKELMANN R, et al. International VLBI service for geodesy and astrometry 2006 annual report[R]. Springfield: NASA Center for Aerospace Information, 2007.
- [2] RATCLIFF J T, GROSS R S. Combinations of Earth orientation measurements: SPACE2008, COMB2008, and POLE 2008[Z]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2010: 1-27.
- [3] KALARUS M, SCHUH H, KOSEK W, et al. Achievements of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign[J]. Journal of Geodesy, 2010(84): 587-596.
- [4] 陈略,唐歌实,胡松杰,等.高精度 UT1-UTC 差分预报方法研究[J].深空探测学报,2014,1(3): 6.
- [5] 雷雨,蔡宏兵.利用 LS+AR 模型对 UT1-UTC 进行中长期预报[J].时间频率学报,2016,39(2): 65-72.
- [6] GROSS R S, EUBANKS T M, STEPPE J A, et al. A Kalman filter-based approach to combining independent Earth-orientation series[J]. Journal of Geodesy, 1998(72): 215-235.
- [7] 雷雨,赵丹宁,蔡宏兵.灰色系统模型在 UT1-UTC 超短期预报中的应用[J].天文学报,2016,57(3): 310-319
- [8] YU L, GUO M, HU D D, et al. Short-term prediction of UT1-UTC by combination of the grey model and neural networks[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(2): 524-531.
- [9] JOHNSON T J, LUZUM B J, RAY J R. Improved near-term Earth rotation predictions using atmospheric angular momentum analysis and forecasts[J]. Journal of Geodynamics, 2005, 39(3): 209-221.
- [10] DILL R, DOBSLAW H. Short-term polar motion forecasts from Earth system modeling data[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(9): 529-536.
- [11] DILL R, DOBSLAW H, THOMAS M. Improved 90-day Earth orientation predictions from angular momentum forecasts of atmosphere, ocean, and terrestrial hydrosphere[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(3): 287-295.
- [12] DOBSLAW H, DILL R. Predicting Earth orientation changes from global forecasts of atmosphere hydrosphere dynamics[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(4): 1047-1054.
- [13] WOODEN W H, JOHNSON T J, KAMMEYER P C, et al. Determination and prediction of UT1 at the IERS rapid service/prediction center[M]. CAPITAINE N. Systèmes de référence spation-temporels. Paris: Observatoire de Paris, 2005: 260-264.