

引用格式：肖伟, 韩保民, 杨旭海, 等. 基于 IERS1972—2023 年间日长变化数据的中短周期分析[J]. 时间频率学报, 2023, 47(3): 210-218.

基于 IERS1972—2023 年间日长变化数据的中短周期分析

肖伟^{1,2,3}, 韩保民¹, 杨旭海^{2,3,4†}, 雷辉^{2,3,4}

1. 山东理工大学 建筑工程学院, 淄博 255049;
2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
3. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600;
4. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101408

摘要: 近年来地球自转加速现象引起时间保持领域的特别关注。利用国际地球自转和参考服务(IERS)提供的 1972—2023 年地球定向参数序列 EOP C04 数据, 定位到最近的一次日长变化 Δ LOD 的拐点发生时间在 2015—2016 年间。本文针对地球自转加速是否会导致 Δ LOD 序列的中短周期项发生改变这一问题开展研究, 采用了经验模态分解和快速傅里叶变换方法对拐点前后 Δ LOD 序列的中短周期项及其误差进行了细致的比较分析。数据分析表明, 在目前数据和周期分析工具的精度水平上, 未探测到由于地球自转加速导致的 Δ LOD 数据 9.131, 13.666, 27.566, 182.625 和 365.250 d 周期成分的周期改变。

关键词: 日长变化; 周期分析; 世界时; 闰秒

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-03-0210-09

Analysis of the medium-short periodic terms of Δ LOD based on IERS data from 1972 to 2023

XIAO Wei^{1,2,3}, HAN Bao-min¹, YANG Xu-hai^{2,3,4†}, LEI Hui^{2,3,4}

1. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;
2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
4. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract: The acceleration of the Earth's rotation has received special attention in recent years, especially in the time keeping community. With the 1972-2023 Earth orientation parameter sequence EOP C04 data provided by the International Earth Rotation and Reference Service (IERS), we noticed an inflection point of Δ LOD between 2015 and 2016. To answer the question of whether the speed up of the Earth rotation can influence the period of the Δ LOD series, we make comparisons of the periods to the Δ LOD data before and after

收稿日期: 2023-05-16; 接受日期: 2023-06-18; †: yyang@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12073034; 12273047)

the inflection point with the methods of ensemble empirical mode decomposition, and fast Fourier transforms. On the accuracy level of our methods, our analysis can not detect significant periodic changes for the 9.131, 13.666, 27.566, 182.625 and 365.250 days components of Δ LOD data.

Key words: variation of length of day; periodic analysis; universal time; leap second

地球是由固体地球、大气圈、水圈、陆圈等组成。地球并非刚体,地球自转会受到大气运动、洋流、地壳运动等地球物理因素的影响^[1-3]。另外,太阳、月球和行星的引力作用致使地球产生形变,改变地球的质量分布,从而影响地球自转。地球自转运动可以用地球定向参数(earth orientation parameters, EOP)来描述。EOP由世界时 UT1,极移 PMX、PMY 和章动修正项的 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。 Δ LOD 是由天文测定的平太阳日持续时间与国际原子时(International Atomic Time, TAI)定义的 86 400 s 之间的差,反映了地球自转角速度。若地球自转减慢,则 Δ LOD 变大。UT1 是以地球自转定义的时间系统,协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC)是以 1958 年 1 月 1 日 0 点 0 分 0 秒为起点,采用原子时秒长为时间尺度单位的时间系统。UT1-UTC 反映了地球自转累积变化,自 UTC 时间系统使用以来,UT1-UTC 一直持续变小,但随着地球自转的加速,2020 年后,首次出现 UT1-UTC 增大现象,若加速持续,则会在未来迎来首次负闰秒。

世界时 UT1 是构成国家标准时间的重要组成部分,对于天体测量和大地测量研究具有重要作用,是卫星导航、深空探测等领域的重要支撑数据^[4-9]。空间大地测量技术如甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、多普勒无线电定轨定位系统(Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite, DORIS)、月球激光测距(lunar laser ranging, LLR)和卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)等对地球自转测定有很高的灵敏度,深化了对地球物理的认知^[10]。卫星自主导航阶段,无法利用最新 EOP 数据完成天球参考系与地球参考系的转换,只能通过预报来满足现实需求^[11]。由

于地球自转角速度变化存在多种周期变化分量^[12-13],预报需要对其周期进行分析。Chao^[14]等人利用小波变换基于 1962—2012 年的 Δ LOD 序列分析地球潮汐引起的周期项,证实了稳定的 6 年周期的存在,发现约为 13 年的准周期信号;Shen 和 Peng^[15]利用集合经验模态分解方法从 1962—2015 年时间序列中分解出了 Δ LOD 主要周期项;Moul, Lopes 等人^[16]利用奇异谱分析方法分解出从 9 天到 18.6 年的振荡分量。

近年来,地球自转加速已引起国内外研究者的关注^[17-18]。本文针对地球自转加速是否会导致 Δ LOD 中短周期成分发生变化这一问题,开展了对比分析研究。基于国际地球自转和参考系服务(International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS)发布的地球定向参数序列 EOP C04 1972—2023 年数据,针对近 50 年来 UT1-UTC 变化,分析地球自转累积变化及其与闰秒的关系,借助集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)、快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对最近一次地球自转加速是否导致 Δ LOD 中短周期变化进行分析。

1 数据与方法

1.1 数据

国际地球自转和参考系服务是由国际天文联合会和国际大地测量和地球物理联合会联合建立。IERS 发布的地球定向参数序列包括 EOP C04 和 Bulletin A、B、C、D 等数据。Bulletin A 包括快速测定和预测未来一年的地球定向参数;Bulletin B 发布每月的地球定向参数;Bulletin C 包含 UTC 闰秒的公告,每半年发布一次;Bulletin D 发布 UT1-UTC 值的公告;地球定向参数序列 EOP C04 包含自 1962 年以来的长期地球定向参数,该序列通常滞后 30 d,是联合多种测量技术结果解算得到的,

具有较高的测量精度。本文使用测量精度较高、采样间隔一天的地球定向参数序列 EOP C04 中 1972 年 1 月至 2023 年 3 月的 ΔLOD 和 UT1-UTC 数据, 研究地球自转速度在多时间尺度上的周期变化。

1.2 处理方法

为了准确识别和提取 ΔLOD 中短周期项, 本文借助集合经验模态分解方法、快速傅里叶变换对 ΔLOD 周期分解, 分解得到不同周期的时间序列分量。经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 将原始信号按其固有特征尺度分解为若干个本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量, IMF 分量具有瞬时频率和幅值, 包含了原始信号中不同时间尺度的特征信息, 但是在分解过程中会出现模态混叠问题和端点效应。Wu 等^[19]在 EMD 基础上提出 EEMD, EEMD 是一种自适应时频分析方法, 可以对非线性、非平稳信号进行分解, 克服了 EMD 模态混叠等问题, 广泛应用于地球科学研究中。通过 EEMD 实现信号分解的流程如下。

在日长变化序列数据 $x(t)$ 中加入不同的白噪声序列 $w(t)$, 得到新信号如式 (1) 所示:

$$y(t) = x(t) + w(t)。 \quad (1)$$

虽然加入白噪声可能会产生较小的信噪比, 但是白噪声将提供均匀的参考尺度分布, 促进 EMD 分解, 避免出现模态混叠问题。

将加入白噪声序列的数据进行 EMD 分解, 当趋势项 $r_n(t)$ 成为单调函数时, 分解过程停止。获得 n 项 IMF 分量 $c_i(t)$ 和趋势项 $r_n(t)$:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t)。 \quad (2)$$

反复重复步骤 1 和步骤 2, 但每次加入不同的白噪声序列; 得到分解的相应 IMF 集合的均值作为最终结果, 分解后的 IMF 均值分量 c_i 为日长序列数据 $x(t)$ 的周期分量:

$$c_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k c_{ij}(t)。 \quad (3)$$

2 地球自转变化趋势分析

UT1-TAI 是 ΔLOD 的积分, 反映地球自转累积变化。随着时间的积累, 以地球自转为依据的世界时 UT1 与原子时 TAI 之间的差异越来越大。为解决这一问题, 国际上建立了以原子时秒长为基础, 时刻与世界时相接近的协调世界时。1972 年国际计量大会决定, 通过插入闰秒对 UTC 实施一个整秒的阶跃, 以保证 UT1 与 UTC 的差值在 0.9 s 以内, 即 $|\text{UT1} - \text{UTC}| < 0.9 \text{ s}$ 。调整的时间优先考虑 6 月底和 12 月底, 其次是 3 月底和 9 月底。在其最后增加 1 s 称为正闰秒, 反之为负闰秒。闰秒频次的变化反映了地球自转速度变化的快慢^[20-21]。从 1972 年至今, UTC 已经进行了 27 次闰秒调整, 平均 1.8 年闰秒一次, 且全部都是正闰秒。当前, 最后一次闰秒出现在 2017 年 1 月 1 日, 北京时间出现了 07:59:60 的现象。

图 1 展示了 1972—2023 年 UT1-UTC 变化情况, 图 1(a) 为未补偿闰秒的情况, 图 1(b) 为补偿闰秒的情况。由图 1(a) 底部峰值得知, 根据 UT1-UTC 的演变, 若超过一定数值时进行闰秒调整, 使 UTC 与 UT1 保持在 0.9 s 以内。截至当前, 闰秒调整实施时 UT1-UTC 的值在 -0.7~-0.2 s 之间。由图 1(b) 可知, 若无闰秒调整, UT1-UTC 的差距越来越大且为负值。

1972—1999 年平均 1.3 年闰秒一次, 而 1999 年至今平均 4.8 年闰秒一次。1999 年之后闰秒调整的频率较之前明显的下降, 即地球自转的长期变慢有所变缓。1999—2005 年两次闰秒调整之间, 曲线出现明显的波动情况, 在下降过程中出现上升趋势, 且上升幅度越来越大。此情况到 2020 年持续出现, 说明在此期间地球自转不断加速。2020 年至今, 曲线首次出现上升趋势, 地球自转不断加速, 且出现一天持续时间不到 24 h 的情况。若地球自转加速趋势一直持续, 则在未来迎来首次负闰秒事件。

图 2 整理了 1972—2023 年 ΔLOD 随时间的变化情况, 反映了地球自转角速度的变化。在图 2 中可以看出, 1972—2023 年 ΔLOD 存在多种时间尺度的周期变化。1972—2016 年期间虽然存在 ΔLOD

不断减小的情况，但大部分 ΔLOD 大于 0。在 2016 年后， ΔLOD 不断减小，地球自转角速度加快，且 2020 年 6 月后，大部分 ΔLOD 小于 0，根据 ΔLOD

定义可知，出现了一天持续时间不到 24 h 情况，与图 1 (b) 补偿闰秒后的 UT1-UTC 得到的结论相印证。

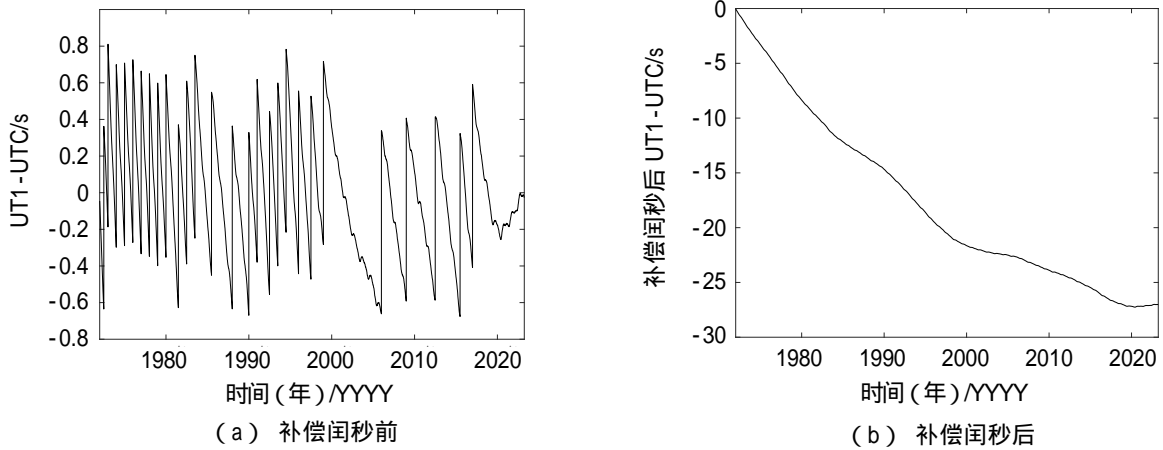


图 1 1972—2023 年补偿闰秒前后 UT1-UTC 曲线图

对 1972—2022 年 ΔLOD 数据以年为单位进行分段线性拟合，得到每年 ΔLOD 变化趋势如图 2 折线所示，最近一次地球自转速度变化的拐点发生

在 2015 年和 2016 年之间，由 2015 年地球自转变慢的趋势变为 2016 年地球自转速度快速加快。由此得知，在 2016 年之后地球自转速度加快。

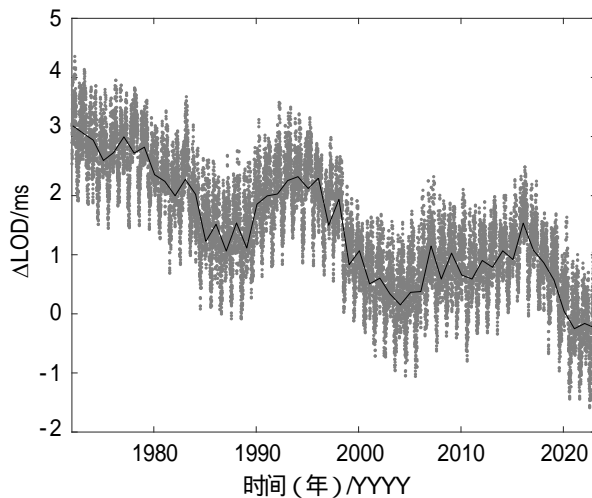


图 2 1972—2023 年 ΔLOD 变化曲线图

3 ΔLOD 周期分析

对于地球自转加速后，是否会导致 ΔLOD 中短周期成分变化。为此分别使用 FFT、EEMD 对 1972—2015 年和 2016—2023 年 3 月 ΔLOD 数据进行频谱分析，验证周期成分是否发生变化。

首先利用 FFT 进行频谱分析，结果如图 3 所示，两者都存在明显的 5 个谱峰。表 1 整理了各

周期成分及其对应振幅，2016 年地球自转加速前后，FFT 分析得到的周期的数值存在不一致。

利用 EEMD 分别对 2016 年前后的 ΔLOD 序列进行多尺度分解，得到 5 个 IMF 分量 IMF1-5，分解后如图 4 和 5 所示：图 (a) 中的 IMF1-3 分量对应的频率较高，信号中大部分的高频信号被分解出去，以至于后续 IMF4-5 分量的频率低。图 (b) 分别对应各 IMF 分量的振幅信息。

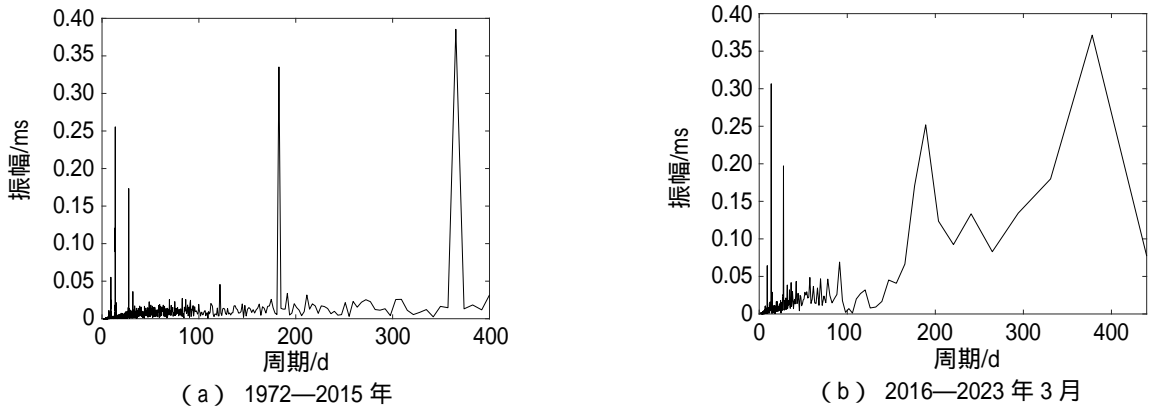


图 3 1972—2015 年、2016—2023 年 3 月 Δ LOD 序列 FFT 结果

表 1 1972—2015 年、2016—2023 年 3 月 Δ LOD 序列 FFT 周期与振幅

1972—2015 年		2016—2023 年 3 月	
周期/d	振幅/ms	周期/d	振幅/ms
9.131 25	0.055	9.127 59	0.064
13.665 80	0.256	13.644 30	0.307
27.566 00	0.173	27.573 00	0.197
182.625 00	0.335	189.071 00	0.252
365.250 00	0.385	378.143 00	0.371

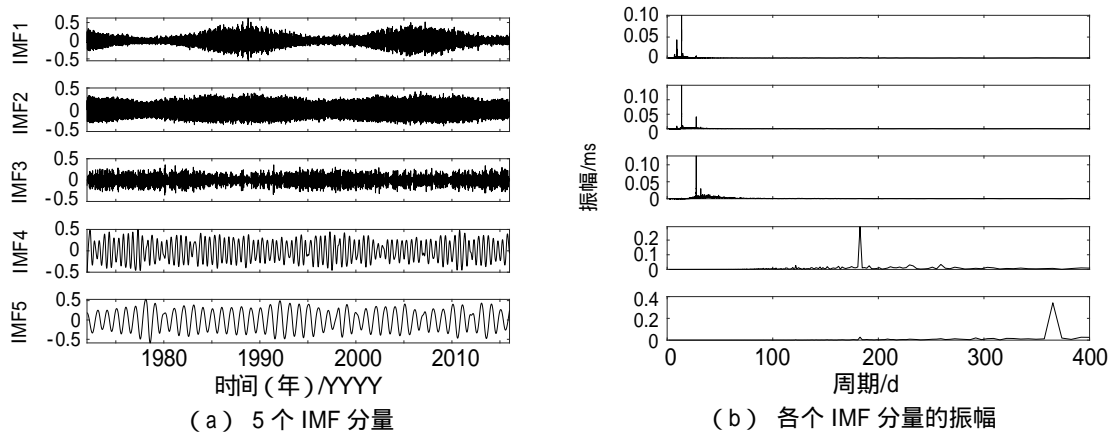


图 4 1972—2015 年 Δ LOD 序列 EEMD 分解结果

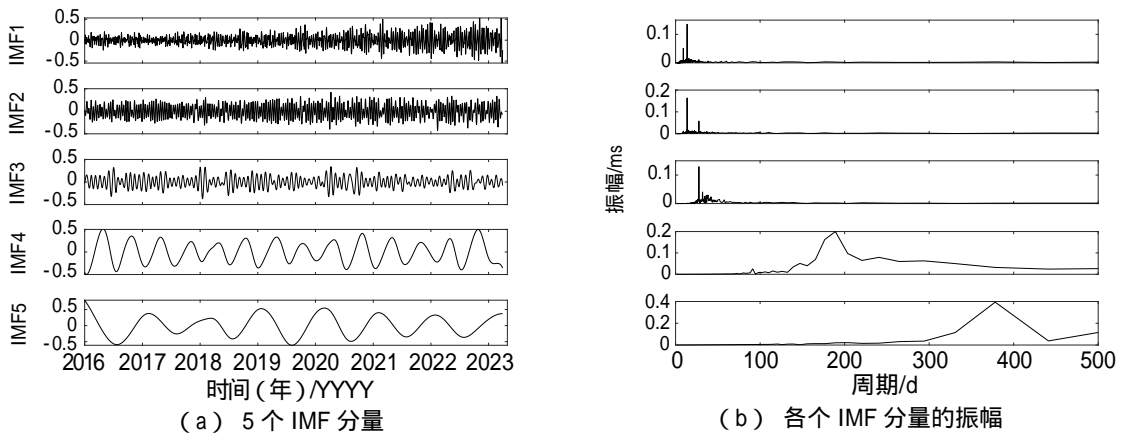


图 5 2016—2023 年 3 月 Δ LOD 序列 EEMD 分解结果

表 2 整理了各周期成分及其对应振幅，对比表 1 可以发现，利用 FFT 与 EEMD 分解得到的周

期项结果相同。EEMD 分解得到的各周期项振幅与 FFT 方法得到的振幅相比较小。

表 2 1972—2015 年、2016—2023 年 3 月 Δ LOD 序列 EEMD 分解的周期与振幅

1972—2015 年		2016—2023 年 3 月	
周期/d	振幅/ms	周期/d	振幅/ms
9.131 25	0.043	9.127 59	0.051
13.665 80	0.150	13.644 30	0.164
27.566 00	0.126	27.573 00	0.129
182.625 00	0.291	189.071 00	0.200
365.250 00	0.343	378.143 00	0.394

综合 FFT、EEMD 两种方法的实验结果，对于不同时间段的数据，周期分析得到的中短周期存在不一致。针对这一结果差异，进一步做仿真实验分析，验证是否是分析方法的误差导致的。

4 仿真实验分析

在开展基于 FFT、EEMD 方法对周期成分分析对比过程中，受制于 FFT、EEMD 分析方法和数据的误差、有限性，得到的周期分析结果必然存在误差。所以为了研究方法的误差，引入蒙特卡洛仿真分析方法，仿照 Δ LOD 信号构造仿真信号。首先对 1972—2023 年 3 月的 Δ LOD 进行快速傅里叶变换，结果如图 6 所示，图中有 5 个明显的谱峰，分别为 9.13、13.66、27.57、183.51 和 367.02 d 的中短周期成分。

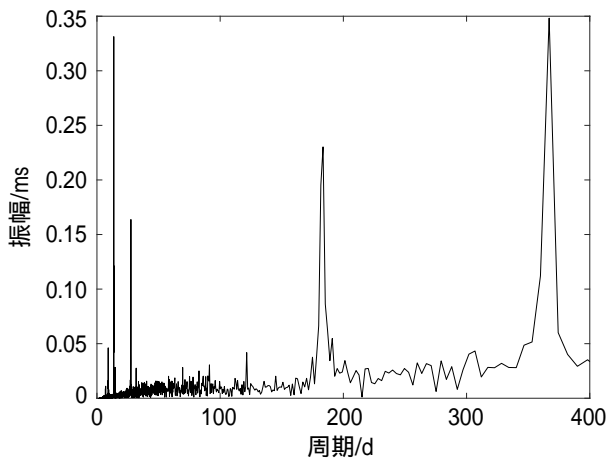


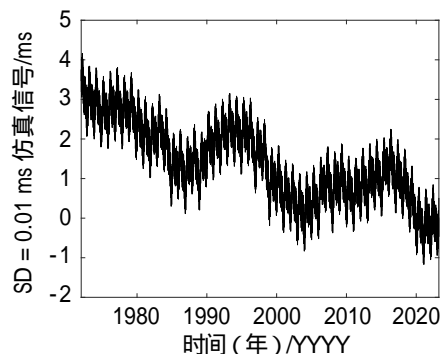
图 6 1972—2023 年 3 月 Δ LOD 快速傅里叶变换结果

各周期成分和振幅详见表 3。其中，9.13 d 周期振幅为 0.046 ms，振幅最小，该周期项是由月球纬向潮汐产生^[16]；半月周期 13.66 d、月周期 27.57 d

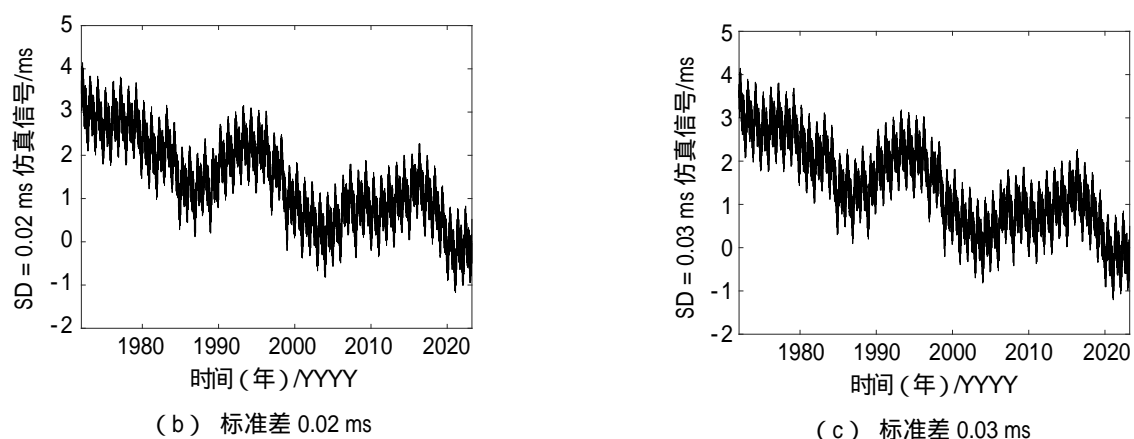
的振幅分别为 0.331 ms、0.164 ms，半月周期与月周期项的主要激发源是月球对地球的潮汐作用^[22]。月球轨道面与地球的赤道面存在一定的夹角，月球绕地球公转使地球产生潮汐形变，地球扁率发生变化，改变了地球的转动惯量，进而改变地球自转速度^[23]。半年周期 183.51 d、年周期 367.02 d 的振幅分别为 0.230 ms、0.348 ms，年周期在周期分量中的振幅最大，半年周期和年周期的主要激发源为大气运动，由纬向风角动量的年和半年变化造成的^[24]。研究发现，大气对日长变化的季节变化的影响达到 85% 以上。仿照表 3 给出的 LOD 的主要中短周期项的周期和振幅，加入均值为 0、标准差分别为 0.01、0.02、0.03 ms 的噪声序列构造复合信号，如图 7 所示。

表 3 1972—2023 年 3 月 Δ LOD 序列 FFT 周期与振幅

周期/d	振幅/ms
9.13	0.046
13.66	0.331
27.57	0.164
183.51	0.230
367.02	0.348



(a) 标准差 0.01 ms

图 7 仿真 Δ LOD 序列的复合函数图像

分别对 2016 年前后的仿真信号进行 FFT 分析, 表 4 整理了各周期成分和仿真数据周期的差异。在该表中可以得到加入 0.01、0.02、0.03 ms 的

标准差噪声对 FFT 分析没有影响。FFT 方法对短周期分析的误差较小, 在小数点后 3 位。半年项和周年项相差较大。

表 4 1972—2015 年、2016—2023 年 3 月仿真数据 FFT 周期

标准差/ms	1972—2015 年		2016—2023 年 3 月	
	周期/d	与仿真数据周期差异/d	周期/d	与仿真数据周期差异/d
0.01	9.131 3	0.001 3	9.127 6	-0.002 4
	13.665 8	0.005 8	13.644 0	-0.016
	27.566 0	0.004 0	27.572 9	0.002 9
	182.630 0	-0.89	189.100 0	5.6
	365.300 0	-1.8	378.000 0	11
0.02	9.131 3	0.001 3	9.127 6	-0.002 4
	13.665 8	0.005 8	13.644 0	-0.016
	27.566 0	0.004 0	27.572 9	0.002 9
	182.630 0	-0.89	189.100 0	5.6
	365.300 0	-1.8	378.000 0	11
0.03	9.131 3	0.001 3	9.127 6	-0.002 4
	13.665 8	0.005 8	13.644 0	-0.016
	27.566 0	0.004 0	27.572 9	0.002 9
	182.630 0	-0.89	189.100 0	5.6
	365.300 0	-1.8	378.000 0	11

利用 EEMD 分别对 2016 年前后的仿真信号进行多尺度分解, 表 5 整理了各周期成分和仿真数据周期的差异。在该表中可以得到加入 0.01、0.02、0.03 ms 的标准差噪声对 EEMD 周期分解产

生了影响, 主要集中在半月周期上。与 FFT 分析仿真信号的周期差异类似, EEMD 方法对短周期分解的误差较小, 在小数点后 3 位。半年项和周年项相差较大。

表 5 1972—2015 年、2016—2023 年 3 月仿真数据 EEMD 分解的周期

标准差/ms	1972—2015 年		2016—2023 年 3 月	
	周期/d	与仿真数据周期差异/d	周期/d	与仿真数据周期差异/d
0.01	9.131 3	0.001 3	9.127 6	-0.002 4
	13.665 8	0.005 8	13.644 0	-0.016
	27.566 0	0.004 0	27.572 9	0.002 9
	182.630 0	-0.89	189.100 0	5.6
	365.300 0	-1.8	378.000 0	11
0.02	9.131 3	0.001 3	9.127 6	-0.002 4
	13.654 2	-0.005 8	13.644 0	-0.016
	27.566 0	0.004 0	27.572 9	0.0029
	182.630 0	-0.89	189.100 0	5.6
	365.300 0	-1.8	378.000 0	11
0.03	9.131 3	0.001 3	9.127 6	-0.002 4
	13.654 2	-0.005 8	13.644 0	-0.016
	27.566 0	0.004 0	27.572 9	0.002 9
	182.630 0	-0.89	189.100 0	5.6
	365.300 0	-1.8	378.000 0	11

根据表 4 和表 5 得到的周期差异 统计 FFT、EEMD 分析仿真 Δ LOD 信号周期项的误差，如表 6

所示，可以看到，同一时间段内 FFT 分析和 EEMD 分解周期项的误差相同。

表 6 FFT、EEMD 分析 Δ LOD 仿真数据误差

周期/d	FFT		EEMD	
	1972—2015 年	2016—2023 年 3 月	1972—2015 年	2016—2023 年 3 月
9.13	$\pm 0.001 3$	$\pm 0.002 4$	$\pm 0.001 3$	$\pm 0.002 4$
13.66	$\pm 0.005 8$	± 0.016	$\pm 0.005 8$	± 0.016
27.57	$\pm 0.004 0$	$\pm 0.002 9$	$\pm 0.004 0$	$\pm 0.002 9$
183.51	± 0.89	± 5.6	± 0.89	± 5.6
367.02	± 1.8	± 11	± 1.8	± 11

通过表 6 可以得到，第 3 节周期分析的结果中表 1、表 2 得到地球自转加速后 Δ LOD 中短周期发生变化是由于分析方法 FFT、EEMD 本身的误差导致的。因此，地球自转加速后 Δ LOD 中短周期成分并未发生变化。

5 结论

地球自转加速引起广泛关注，本文基于 IERS 发布的地球定向参数序列 EOP C04 1972—2023 年

的数据，定位最近一次 Δ LOD 拐点，利用 EEMD、FFT 等方法对拐点前后 Δ LOD 进行中短周期比较以及近 50 年来的 UT1-UTC 变化 分析结果如下。

对 1972—2023 年 UT1-UTC 数据进行分析，由于地球自转长期减慢，以往的闰秒均为正闰秒。分析表明闰秒调整时 UT1 与 UTC 的差值在 -0.7~-0.2s 之间，根据 UT1-UTC 的演变，加入闰秒调整，使其保持在 $\pm 0.9s$ 以内。2000 年之后闰秒调整的频次较之前有明显的下降。2020 年 6 月之后，地球自转不断加速，且多次出现一天持续时

间不到 24 h 的情况。

定位最近一次地球加速的拐点在 2015—2016 年间,对 1972—2015 年、2016—2023 年 3 月的 Δ LOD 数据进行周期分析比较,各主要中短周期项基本一致,在目前数据和周期分析工具的精度水平上,没有探测到最近一次地球自转加速后 Δ LOD 中短周期成分发生变化。

参考文献:

- [1] 郑大伟, 虞南华. 地球自转及其和地球物理现象的联系: 日长变化[J]. 地球物理学进展, 1996(2): 81-104.
- [2] 马利华, 韩延本, 尹志强. 地球自转速率变化及其与地球物理现象关系研究的进展[J]. 地球物理学进展, 2004(4): 968-974.
- [3] DING H, AN Y, SHEN W. New Evidence for the fluctuation characteristics of interdecadal periodic signals in length-of-day variation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(2): 14.
- [4] KOSEK W. Geophysical causes of pole coordinates data prediction errors[C]// EGU General Assembly Conference Abstracts, 2012: 3921.
- [5] KOSEK W. Future improvements in EOP prediction[C]// Geodesy for Planet Earth. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 513-520.
- [6] ZOTOV L, BIZOUARD C, SHUM C K, et al. Analysis of Earth's polar motion and length of day trends in comparison with estimates using second degree stokes coefficients from satellite gravimetry[J]. Advances in Space Research, 2022, 69(1): 308-318.
- [7] 全伟, 刘百奇, 宫晓琳, 等. 惯性/天文/卫星组合导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [9] 张志斌, 王广利, 刘祥, 等. 中国 VLBI 网观测地球定向参数能力分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(8): 911-915.
- [10] CHAO B F, RAY R D. Oceanic tidal angular momentum and Earth's rotation variations[J]. Progress in Oceanography, 1997, 40(1-4): 399-421.
- [11] 雷雨, 赵丹宁, 蔡宏兵, 等. 集成奇异谱分析与 ARIMA 模型预测日长变化[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), (2023-03-31)[2023-05-06]. <https://kns.cnki.net/nzkhtml/xmlRead/trialRead.html?dbCode=CJFD&tableName=CJFDTO>
- TAL&fileName=WHCH202312015&fileSourceType=1&invoice=YH4XAF1gGQNJ%2f51IZORQsleqWcJd3ThRnsm27u62YkKNI37kLWtKybjxEI5SJ6qeNn0Xix6V8k1WVnuQXjgs4yCjK00UVBzUO8FK30awcNzsOPB3znNVNPDtwTfPYEv8aMSQwlodjIbiriHgWiEs9fmEFFVxvu85duEmqAutXUs%3d&appId=KNS_BASIC_PSMC.
- [12] LAMBECK K. The Earth's Variable Rotation[M]. London: Cambridge University Press, 1980.
- [13] MUNK W H, Macdonald G J F. The Rotation of the Earth[M]. London: Cambridge University Press, 1960.
- [14] CHAO B F, CHUNG W Y, SHIH Z R, et al. Earth's rotation variations: a wavelet analysis[J]. Terra Nova, 2014, 26(4): 260-264.
- [15] SHEN W, PENG C. Detection of different-time-scale signals in the length of day variation based on EEMD analysis technique[J]. 大地测量与地球动力学(英文版), 2016(3): 7.
- [16] MOUL JLL, LOPES F, COURTILLOT V, et al. On forcings of length of day changes: from 9-day to 18.6-year oscillations-science direct[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2019, 292(C): 1-11.
- [17] AGNEW D C. A global timekeeping problem postponed by global warming[J]. Nature, 2024, 628(8007): 333-336.
- [18] 许雪晴, 周永宏, 胥灿灿. 1972—2022 年地球自转速率的变化特性及其中的气候事件表征研究[J]. 地球与行星物理论评, 2023, 54(5): 572-580.
- [19] WU Z, HUANG NE. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2011(1): 1-41.
- [20] STEPHENSON F R, MORRISON L V, SMITH F T. Long-term fluctuations in the Earth's rotation: 700 BC to AD 1990[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences, 1995, 351(1695): 165-202.
- [21] BEARD R L. The future of the UTC time scale[J]. Navigation, 2009, 56(1): 1-8.
- [22] 魏二虎, 田晓静, 刘经南, 等. 利用 2008 ~ 2009 年 VLBI 数据进行日长变化的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(9): 1009-1012.
- [23] 李国庆, 宗海锋. 27.3 及 13.6 d 周期的大气潮[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007(6): 835-850.
- [24] ZOTOV L, BIZOUARD C, SHUM C K, et al. Analysis of Earth's polar motion and length of day trends in comparison with estimates using second degree stokes coefficients from satellite gravimetry[J]. Advances in Space Research, 2022, 69(1): 308-318.