



引文格式:王乐洋,苗威.顾及有效角动量信息的地球自转参数中长期预报方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(10):1846-1855.DOI:10.13203/j.whugis20220246

Citation: WANG Leyang, MIAO Wei. Medium-Long Term Forecasting Method for Earth Rotation Parameters Considering Effective Angular Momentum Information[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(10): 1846-1855. DOI:10.13203/j.whugis20220246

顾及有效角动量信息的地球自转参数中长期 预报方法

王乐洋^{1,2} 苗威^{1,2}

1 东华理工大学测绘与空间信息工程学院,江西 南昌,330013

2 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室,江西 南昌,330013

摘要:地球自转参数(Earth rotation parameters, ERP)的预报精度一直是卫星自主导航和深空探测等用户关注的焦点。为了进一步提升用户的满意度,首先将激发域的有效角动量(effective angular momentum, EAM)的拟合残差序列卷积到大地测量观测域,并添加经验调节因子,构造出新的EAM拟合残差序列;然后将ERP和新的EAM拟合残差序列做减法,获得差异序列;最后联合差异序列和新的EAM残差序列的预报值,推出目标ERP序列的预报值。使用由ERP数据驱动的最小二乘外推和自回归(the least square extrapolation and autoregressive, LS+AR)模型,从2012年初到2021年初的预报实验结果显示,在1~365 d的预报窗口上,X方向和Y方向的调节因子均为0.7时,分别较传统方法平均提高31.86%和21.00%;日长变化的调节因子为1时,较传统方法平均提升15%。这用数值预报的方式验证了极短时间尺度的约70%高频变化由EAM激发这一已有结论,并为ERP预报研究提供了参考。

关键词:地球自转参数;LS+AR;有效角动量;调节因子;中长期预报

中图分类号:P223

文献标识码:A

收稿日期:2022-05-05

DOI:10.13203/j.whugis20220246

文章编号:1671-8860(2024)10-1846-10

Medium-Long Term Forecasting Method for Earth Rotation Parameters Considering Effective Angular Momentum Information

WANG Leyang^{1,2} MIAO Wei^{1,2}

1 School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2 Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving Around Poyang Lake, Ministry of Natural Resources, Nanchang 330013, China

Abstract: Objectives: The prediction accuracy of Earth rotation parameters (ERP), as one of the hot spots in geodetic research, has been attracting attention from users such as autonomous satellite navigation and deep space exploration. In order to further satisfy the users' requirements, we combine the new effective angular momentum (EAM) data for the ERP prediction study. **Methods:** The EAM fitted residual series in the excitation domain is first transferred to the geodetic observation domain, and an empirical adjustment factor is added to construct a new EAM fitted residual series. Then the fitted residual series of ERP and the fitted residual series of the new EAM are subtracted to obtain the difference series. Using the least square extrapolation and autoregressive (LS+AR) models driven by ERP data, prediction experiments are performed for the difference series and the new EAM residual series, respectively, and finally predictions for the target ERP series are jointly introduced. **Results:** Based on experiments from the beginning of 2012 to the beginning of 2021, it is shown that an overall better result can be obtained for the adjustment factor of 0.7 in both the X-direction and Y-direction at a prediction horizons of 1-365 days, with an average im-

基金项目:国家自然科学基金(41874001, 42174011);江西省研究生创新基金(YC2021-S614)。

第一作者:王乐洋,博士,教授,主要研究方向为大地测量反演及大地测量数据处理。wleyang@163.com

provement of 31.86% and 21.00% over the traditional method, respectively. The average improvement over the traditional method is 15% when the adjustment factor of length of day is 1. **Conclusions:** This verifies the existing conclusion that about 70% of the high-frequency changes in the short time scale of polar motion are stimulated by EAM by means of numerical prediction, and provides a reference for ERP prediction research.

Key words: Earth rotation parameters; LS+AR; effective angular momentum; adjustment factor; medium-long term

地球自转参数 (Earth rotation parameters, ERP) 包括极移 (polar motion, PM) 的两个方向和日长变化 (length of day, LOD)。其中, 极移描述了地球自转轴的运动轨迹, LOD 描述了地球自转速度的变化情况。目前, ERP 的观测手段有甚长基线干涉测量、全球导航卫星系统、卫星激光测距、激光测月和多普勒无线电定轨定位系统等空间测地技术。这些技术的测量精确非常高, 但是在解算汇总成最终稳定产品的过程中, 会存在一个月到几天不等的时间延迟^[1-2], 这对于卫星自主定轨、航天器跟踪和深空探测等应用非常重要^[3-5]。由此可见, 开发预报精度高且稳定性强的 ERP 预报方法, 用于解决天地参考框架相互转换的问题, 具有重要意义。

根据极移的周期特性, 文献[6-9]逐步完善并建立了经典的最小二乘外推和自回归 (the least square extrapolation and autoregressive, LS+AR) 模型。LS+AR 模型在第一次国际地球定向参数预报竞赛结束后, 被认为是极移预报精度较高的模型之一^[3]。许多研究对该模型进行了改进, 获得了不同程度的改善。在解算 LS 模型参数时, 文献[10]根据距离预测值的远近设计权阵, 文献[11]分别采用国际地球自转服务组织 (International Earth Rotation Service, IERS) 的解算精度与国际全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 服务的解算精度设计权阵, 这都有效提高了中长期预报精度。不同的输入数据长度会产生不同的预报精度, 文献[12]得出了 10 a 的输入数据长度可以获得较优的极移预报精度的结论; 文献[13]对 AR 模型的输入数据长度添加调节因子, 改善了中长期的预报精度。在周期问题上, 文献[14]对钱德勒周期项进行了时变修正, 文献[15]考虑了时变的周期项, 有效改进了中长期的预报精度。通过频谱分析, 文献[15-16]发现极移序列中还存在微弱的逆向周年项。针对 LS 模型, 文献[17]比较了加入线性趋势项对预报精度的影响, 结果表明线性趋势项对改善中长期预报精度尤为重要。文献[18]

观察到相邻实验之间具有一定相关性, 于是使用上一期的预报误差对下一期的预报结果附加参数修正。文献[4]将卡尔曼滤波与 LS+AR 模型结合, 有效提高了短期的预报精度。文献[19]运用卡尔曼滤波对 AR 模型进行修正, 使用最小均方误差自适应滤波对 LS 模型进行修正, 这两种修正均提高了极移预报精度。

上述研究都是在大地测量观测域进行预报, 只有文献[20]首次构造了 3 个序列的作差等式关系, 通过结合两个序列获得第 3 个序列的预报值, 这种策略为 ERP 预报提供了新思路。文献[20]通过反卷积将 ERP 序列转移到激发域, 变成大地测量角动量 (geodetic angular momentum, GAM), 然后与地球物理激发的有效角动量 (effective angular momentum, EAM) 结合, 在激发域的 LS 外推模型之前, 获得同方向的 GAM 与 EAM 的差异。基于 LS+AR 模型, 分别对同方向的 EAM 序列和差异序列进行预报, 联合上述两个序列的预报获得 GAM 的预报。EAM 概括了由大气、海洋和陆地水圈对 ERP 的激发^[20], 赤道向分量 χ_1 、 χ_2 与极移有关, 轴向分量 χ_3 与日长变化有关。许多研究非常详细地分析、比较甚至组合了这样的 EAM 数据^[21-27]。由此可见, EAM 数据对于 ERP 预报研究非常重要。

由于 LS 模型解决的是已知项的拟合和外推问题, 预报精度的不确定性落在 AR 模型上。考虑到大多数 ERP 预报研究在大地测量域进行^[4, 10-19], 借鉴文献[20]的思路, 将这种差异运算转移到大地球测量域。文献[13]通过对 AR 模型的输入数据长度添加经验调节因子, 讨论了不同长度的输入数据对最终预报精度的改善情况。本文注意到这一思路的优越性, 与此不同的是, 聚焦的重点是在 AR 模型之前, 通过经验调节因子控制 EAM 的拟合残差序列数值大小。EAM 对极移 X 方向的贡献大于 Y 方向^[28], Y 方向的地理位置导致其受到的强迫力比较大。拟合残差序列中包含了大量短时间尺度的高频变化, EAM 序列可以解释大部分短时间尺度的高频激

发^[28-29],那么ERP序列再与加入调节因子后的EAM拟合残差序列结合,有助于减弱新的EAM拟合残差序列以及差异序列中高频变化的强度,减弱高频变化的强度势必会改善极移中长期的预报精度。本文也将这一思路运用到日长变化的预报,由于EAM序列对日长变化的贡献比较大,所以调节因子不会对EAM序列起到作用。

本文在大地测量域围绕不同大小的调节因子,探究调整后的EAM序列对极移短时间尺度的高频变化的改善情况,为ERP预报研究提供应用上的参考。

1 预报模型

1.1 LS外推模型

LS模型由线性项和周期项组成,能够很好地拟合历史序列的变化,并外推出未来的趋势。计算公式为:

$$h(t) = a + bt + \sum_{\mu=1}^{\kappa} (c_{\mu} \cos(2\pi t/T_{\mu}) + d_{\mu} \sin(2\pi t/T_{\mu})) + \Psi_{LS}(t) \quad (1)$$

式中, $h(t)$ 是 t 时刻ERP的观测值; a 为常数项; b 为线性项系数; c_{μ} 和 d_{μ} 是振幅; $\Psi_{LS}(t)$ 是拟合残差; κ 是参与建模的周期项个数^[15,30]; T_{μ} 是周期值。

1.2 AR模型

AR模型是一种经典的时间序列预测模型,描述了随机序列、历史序列的规律变化与白噪声间的关系。计算公式为:

$$Z_t = \sum_{i=1}^P \varphi_i Z_{t-i} + \xi_t \quad (2)$$

式中, Z_t 是 t 时刻的序列; P 是模型阶数; φ_i 是模型参数; ξ_t 是零均值的白噪声。

模型阶数 P 的大小是获得预测精度高低的关键,本文选用赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC),其计算公式为^[31]:

$$P_{AIC} = \ln(\sigma_p^2) + 2P/N \quad (3)$$

式中, σ_p^2 是残差序列的方差; N 是输入数据的长度; P_{AIC} 是最优模型阶数。

1.3 模型参数求解

在解算LS外推模型和AR模型的模型参数时,采用估计无偏且精度较高的最小二乘方法,其计算公式为:

$$X = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (4)$$

式中, B 是系数矩阵; X 是待求的模型参数; P 是权矩阵。当求解LS模型参数时, L 表示基础序列组

成的向量;当求解AR模型参数时, L 表示拟合残差序列组成的向量。

2 本文方法

德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)的EAM数据有效改善了ERP中短期的预报精度,文献[20]是其代表性的成果之一。其中,在LS建模之前,先求取了同方向的GAM与EAM之间的差异,然后通过结合差异序列和EAM序列的预报获得GAM的预报。与此不同的是,本文将所有的预报过程转移到大地测量观测域,这和绝大多数研究保持一致^[4,10-19]。然后,EAM和ERP序列在拟合时,均使用固定周期项,所有的不确定性落在AR模型上。于是,将文献[20]的策略转移到AR建模之前,这种结合策略相当于增加了一个约束条件,不仅使实验与EAM有关,而且也有助于改进拟合残差的1~365 d的预报精度。

在传统方法的基础上,文献[13]对输入数据的长度添加调节因子,讨论并找到了相对较优的AR模型输入数据长度。与此不同的是,本文聚焦的是通过调节因子控制EAM拟合残差序列的大小,从而控制地球物理激发对ERP高频项的贡献大小。很多已有的经典地球物理研究^[28-29]分析并讨论了大气和海洋对极移激发的贡献百分比,约占70%,没有具体定论。极移短时间尺度的高频变化大约70%由地球物理激发贡献, X 方向与EAM的相关性要强于 Y 方向,而且更为稳定^[28-29]。综合上述分析,将调节因子引入到EAM拟合残差序列中,通过控制高频项的强弱,从而达到改进预报精度的目的,这是有效可行的。

经过LS模型处理后,剩余的拟合残差序列包含了丰富信息,其中高频项的强弱是影响中长期预报精度的关键。运用文献[20]的预报策略,并对EAM残差序列施加调节因子,有助于减弱高频项对中长期预报精度的影响。于是本文方法的构建方式可以写作:

$$\begin{cases} Y_{ERP} - \alpha Y_{EAM} = \Delta_Y \\ X_{ERP} - \alpha X_{EAM} = \Delta_X \\ L_{ERP} - \alpha L_{EAM} = \Delta_{LODR} \end{cases} \quad (5)$$

式中, Y_{ERP} 、 X_{ERP} 和 L_{ERP} 代表ERP序列的拟合残差序列, L_{ERP} 代表扣除潮汐项之后的日长变化衍生序列^[32]; Y_{EAM} 、 X_{EAM} 和 L_{EAM} 代表EAM的拟合残差序列; Δ_Y 、 Δ_X 和 Δ_{LODR} 表示两个序列间的差异; α 代表调节因子。其中, Y_{EAM} 、 X_{EAM} 和 L_{EAM} 表

示大地测量观测域的新序列^[32-33]。

LS+AR 组合模型被认为是 ERP 预报精度较高的模型之一,因此,基于该组合模型分别对后两者预报是有效可行的。新的极移 X、Y 和 LODR 序列的预报计算公式为:

$$\begin{cases} X_i^{push} = \alpha X_{EAM} + \Delta_X \\ Y_i^{push} = \alpha Y_{EAM} + \Delta_Y \\ L_i^{push} = \alpha L_{EAM} + \Delta_{LODR} \end{cases} \quad (6)$$

式中, X_i^{push} 表示 X 序列的新预报值; Y_i^{push} 表示 Y 序列的新预报值; L_i^{push} 表示 LODR 序列的新预报值。

为了更加清楚地描述本文方法,将上述过程组织成一张流程图再次叙述,如图 1 所示。

3 真实算例

3.1 实验数据

在这个研究中,ERP 基础数据从 IERS 官网

$$\omega_{AOM} = \frac{1 \times m_0 + 2 \times m_3 + 2 \times m_6 + 4 \times m_9 + 4 \times m_{12} + 4 \times m_{15} + 3 \times m_{18} + 2 \times m_{21}}{22} \quad (7)$$

式中,AOM 表示 AAM 和 OAM 处理到 24 h 分辨率的结果; ω 表示第 ω 天; m_0 表示当天第 0 时刻的观测值,其余标识类似。

在 HAM 和 SLAM 的预处理中,直接将 12 h 分辨率转为 24 h 分辨率,计算公式为:

$$\omega_{HSM} = ((\omega - 1)_{HSM} + \omega'_{HSM})/2 \quad (8)$$

式中,HSM 表示 HAM 和 SLAM 预处理到 24 h 分辨率的结果; $(\omega - 1)_{HSM}$ 表示前一天的原始数据; ω'_{HSM} 代表当天的原始数据。

在实验中,极移的输入数据长度分别尝试了 3~10 a,LOD 的输入数据长度尝试了 18 a。第一次预报实验开始于 2012 年 1 月 6 日,最后一次预报实验结束于 2021 年 1 月 1 日,每次实验预报 1 a,起止时间与 IERS 公报 A 保持一致。

3.2 方案设计

在极移预报研究中,存在 10 a 尺度波动的结论^[34]。文献[12]讨论了不同输入数据长度对极移预报精度的影响,当输入数据长度为 10 a 时,可以获得较优的结果。很多研究将输入数据长度为 10 a 的 LS+AR 方法作为传统方法,并与传统方法对比^[12-13,19]。在日长变化预报中,18 a 的输入数据长度一直被当作传统方法的基础数据量^[15]。

由于要预报的位置没有参考值,所以无法通过启发式搜索算法建立目标函数找出最佳 α ,于

上获取,EAM 数据从 GFZ 官网上获取^[20],其中,ERP 基础数据的分辨率是 24 h,EAM 中大气角动量(atmospheric angular momentum, AAM)和海洋角动量(oceanic angular momentum, OAM)的分辨率是 3 h,陆地水角动量(hydrological angular momentum, HAM)和海平面角动量(sea level angular momentum, SLAM)的分辨率是 12 h。在统一分辨率时,采用的经验计算公式为:

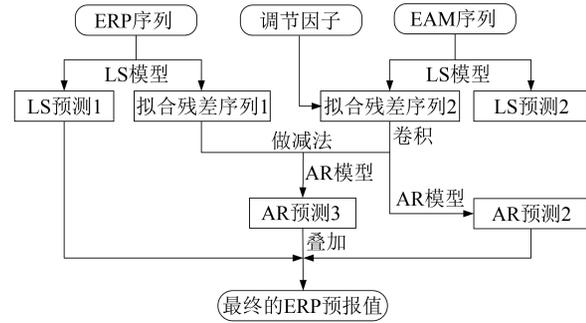


图 1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flowchart of the Proposed Method

是根据经验对 α 分别取值为 1、0.2、0.4、0.6、0.7、0.8、0.9,依次设置成方案 1 到方案 7,IERS 公报 A 作为地球自转服务组织 IERS 发布的预报产品,也加入了对比。综上所述,本文设计了 9 种方案,如表 1 所示。

表 1 本文的预报方案

Tab. 1 Prediction Schemes of This Paper

预报方案	调节因子	输入数据的长度
方案 1	1	
方案 2	0.2	
方案 3	0.4	
方案 4	0.6	极移是 3~10 a
方案 5	0.7	LOD 是 18 a
方案 6	0.8	
方案 7	0.9	
传统方法	0	
IERS 公报 A		

3.3 预报精度的评定

和已有研究一样,本文选用绝对误差(absolute error, AE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)作为预报精度的评定指标^[3,15]。计算公式为:

$$i_{AE} = |P_{i,j} - Q_{i,j}| \tag{9}$$

$$i_{MAE} = \frac{\sum_{j=1}^n |P_{i,j} - Q_{i,j}|}{n} \tag{10}$$

$$i_{MAE}^{F,E} = \frac{i_{MAE}^F - i_{MAE}^E}{i_{MAE}^F} \times 100\% \tag{11}$$

式中, n 是预报实验次数; i 是预报窗口; $P_{i,j}$ 为预报值; $Q_{i,j}$ 为参考真值; i_{MAE}^E 与 i_{MAE}^F 分别对应方法 E

与方法 F 在第 i 天的 MAE, 单位是 $m(^{\circ})$; $i_{MAE}^{F,E}$ 是方法 E 相对于方法 F 的提升百分比。

3.4 结果与分析

由于极移预报的每种方案需要在 3~10 a 的输入数据上测试, 所以涉及到大量实验结果。对比后, 选择输入数据长度为 5 a 的结果作为本文方法的基础数据量。相应的结果如表 2 和图 2 所示。

表 2 本文方法、传统方法和 IERS 公报 A 的 MAE

Tab. 2 MAE Values of the Proposed Method, Traditional Method and Bulletin A

ERP	方案	不同时间窗口的 MAE									
		1 d	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d	240 d	300 d	365 d
X/m(")	方案 1 (5 a)	0.183	7.118	12.317	15.692	17.583	18.237	18.016	19.516	22.094	22.531
	方案 5 (5 a)	0.181	7.033	12.060	15.295	16.680	17.019	16.848	18.876	20.834	20.947
	方案 6 (5 a)	0.181	7.005	12.055	15.359	16.906	17.339	17.159	18.954	21.217	21.306
	方案 7 (5 a)	0.182	7.042	12.117	15.452	17.139	17.737	17.699	19.391	21.733	21.891
	传统方法	0.178	8.224	16.606	23.498	28.133	30.050	29.719	27.919	28.965	31.222
	IERS 公报 A	0.270	6.811	11.472	14.405	16.388	17.833	18.726	21.060	22.449	23.050
	$i_{MAE}^{\text{传统方法, 方案5}}/\%$	-1.69	14.48	27.38	34.91	40.71	43.36	43.31	32.39	28.07	32.91
Y/m(")	方案 1 (4 a)	0.165	7.320	16.447	24.218	28.963	30.733	30.630	29.936	30.128	31.023
	方案 2 (4 a)	0.150	5.811	11.393	15.326	17.470	18.345	18.835	19.043	19.299	21.387
	方案 1 (5 a)	0.165	7.230	16.404	24.999	30.772	33.449	33.807	33.275	34.495	35.031
	方案 5 (5 a)	0.144	5.301	10.296	14.216	16.713	18.778	20.067	21.263	21.362	24.049
	方案 6 (5 a)	0.144	5.360	10.500	14.546	16.883	18.979	20.298	21.462	21.813	24.769
	方案 7 (5 a)	0.146	5.407	10.713	14.906	17.051	18.853	20.229	21.580	22.464	25.337
	传统方法	0.148	5.926	12.560	19.313	24.405	27.214	27.725	24.789	25.874	28.685
	IERS 公报 A	0.198	4.306	7.719	11.871	16.645	20.769	23.676	25.825	25.613	25.041
	$i_{MAE}^{\text{传统方法, 方案5}}/\%$	2.70	10.55	18.03	26.39	31.52	31.00	27.62	14.22	17.44	16.16
LOD/ms	方案 1 (18 a)	0.019	0.154	0.168	0.178	0.183	0.196	0.212	0.231	0.260	0.277
	传统方法	0.029	0.166	0.192	0.213	0.224	0.242	0.256	0.268	0.285	0.293
	$i_{MAE}^{\text{传统方法, 方案1}}/\%$	32.14	7.23	12.50	16.43	18.30	19.01	17.19	13.43	8.42	5.46

在 X 方向上, 当调节因子分别为 1、0.7、0.8 和 0.9 时, 预报精度之间的整体差距不大。其中, 调节因子为 0.7 的方案 5 (5 a) 表现稍好, 这可能与 EAM 数据对 X 方向的贡献大于 Y 方向有关^[28], 使得 EAM 的激发对 X 方向的高频变化影响较小。还可以看出, 在 2~365 d 较传统方法有明显提升, 最大提升达到 43.36%, 平均提升为 31.86%。此外, 在 120 d 之后, 方案 5 (5 a) 优于 IERS 公报 A, 这表明新的 EAM 数据的加入有效减弱了短时间尺度的高频变化。

在 Y 方向上, 在 1~120 d, 调节因子为 0.7 的

方案 5 (5 a) 的表现最好; 在 120 d 之后, 以调节因子为 0.2 的方案 2 (4 a) 表现稍好, 但是方案 5 (5 a) 在 120 d 之后仍较传统方法和 IERS 公报 A 有一定优势, 所以方案 5 (5 a) 的整体预报效果更好。由表 2 可知, 调节因子的使用极大提升了预报精度。其中, 方案 5 (5 a) 较传统方法在 1~365 d 均有改善, 其最大改善百分比达到 31.52%, 平均提升百分比为 21.00%。当输入数据长度为 4 a 时, 在 120 d 之后的预报精度差距较大。这可能与 Y 轴方向的地理位置有关, Y 轴受到地球物理激发的强迫力比 X 轴的更大^[28], 这导致 Y 方向

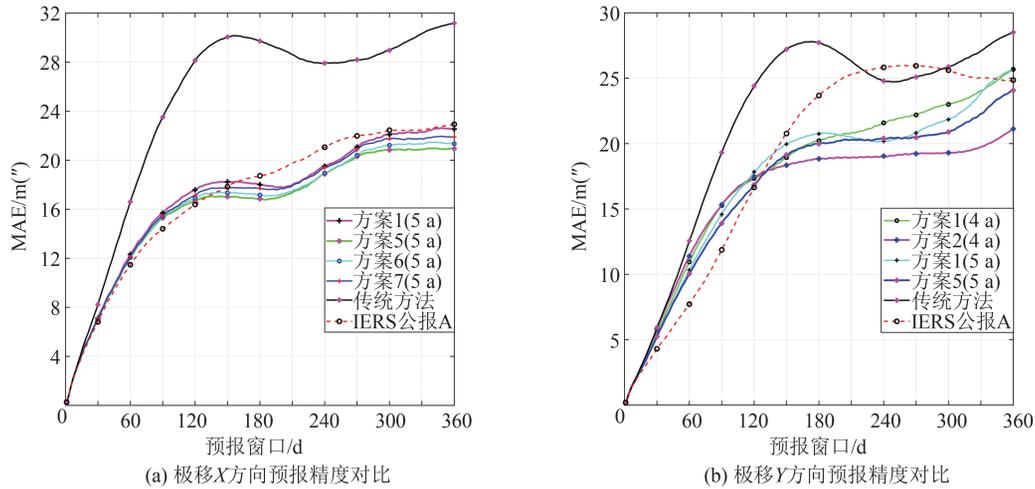


图2 本文方法、传统方法和 IERS 公报 A 的 MAE 对比

Fig. 2 MAE Comparison of the Proposed Method, Traditional Method and IERS Bulletin A

受 EAM 数据对短时间尺度的高频变化激发影响更大。

综合可知,调节因子为 0.7 的方案 5 (5 a) 更适合极移 X 和 Y 方向的预报。这可能验证了 EAM 数据对极移短时间尺度的高频激发贡献在 70% 左右的已有结论^[28-29],并不是全部的 EAM 数值对极移的预报精度有用。另外,当调节因子为 0.2 时,方案 2 (4 a) 在 120 d 之后的 Y 方向表现更好,这可能是由于 EAM 数据对极移 Y 方向的贡献较小有关。此外,式(6)的叠加结合策略可能也减弱了高频项,从而有助于中长期预报精度。另外,将本文方法运用到日长变化预报中,由于 EAM 数据对 LOD 的贡献较大,所以调节因子为 1。结果显示,较传统方法在 1~365 d 的预报窗口上平均提升 15.01%。

AR 模型预报精度高低的关键在于是否使用了最优阶数,过大的搜索区间会严重影响实验效率,过小的搜索区间会出现找不到最优情况。本文按照经验设置了 [1, 300] 的搜索区间。由于涉及多种方案,这里以极移和日长变化相对较优的方案为例,给出确定的每次实验的最佳阶数,如图 3 所示。

由图 3 中可知,设置的 [1, 300] 的搜索区间能够满足最优阶数的确定;在日长变化实验的阶数确定时,出现了少部分阶数达到 300 的情况。针对该情况,又尝试了搜索区间上限为 200 和 400,获得的预报精度差别微小,在小数点第 4 位,可以忽略不计。因此,所有阶数搜索区间统一为 [1, 300]。

图 2 和表 2 展示的都是 MAE,只能反映总体

的稳定性和预报水平,不能够反映每次实验预报的具体细节特征。于是根据式(9)分别计算了传统方法、方案 5 (5 a) 和方案 1 (18 a) 的 AE 矩阵,如图 4 所示。

由图 4 中可知,本文提出的方法较传统方法在总体上有较大优势。在 X 方向,相比传统方法的改进效果明显。在 Y 方向上,提出的方法在 2017 年前后的结果不理想。这可能与本文使用的钱德勒周期值是固定的有关,而事实上,钱德勒的周期值是时变的^[15]。此外,在这期间钱德勒摆动处于由衰减到重新变大的阶段^[15],背后真实的地球物理原因有待进一步研究。然而,在 2018 年之后,提出的方法获得了较小的预报误差,这再次表明提出的方法对于未来的极移预报仍有一定的参考价值。

4 结 语

为了进一步提高用户对 ERP 预报精度的满意度,本文联合 ERP 和添加调节因子的 EAM 残差序列在大地测量观测域进行了长达 8 a 的预报实验,结果显示,本文方法在极移的两个方向和 LOD 的 1~365 d 较传统方法有明显提升,在 120 d 之后,极移的预报精度较 IERS 公报 A 有一定优势。通过分析结果,得出以下结论:

1) 对 EAM 添加调节因子,有助于提升 ERP 的预报精度。当对 X、Y 和 LOD 的 EAM 分别施加调节因子为 0.7、0.7 和 1 时,可以获得全局较优的 ERP 预报精度。这可能验证了极移短时间尺度的约 70% 的高频变化由地球物理激发这一已有结论。

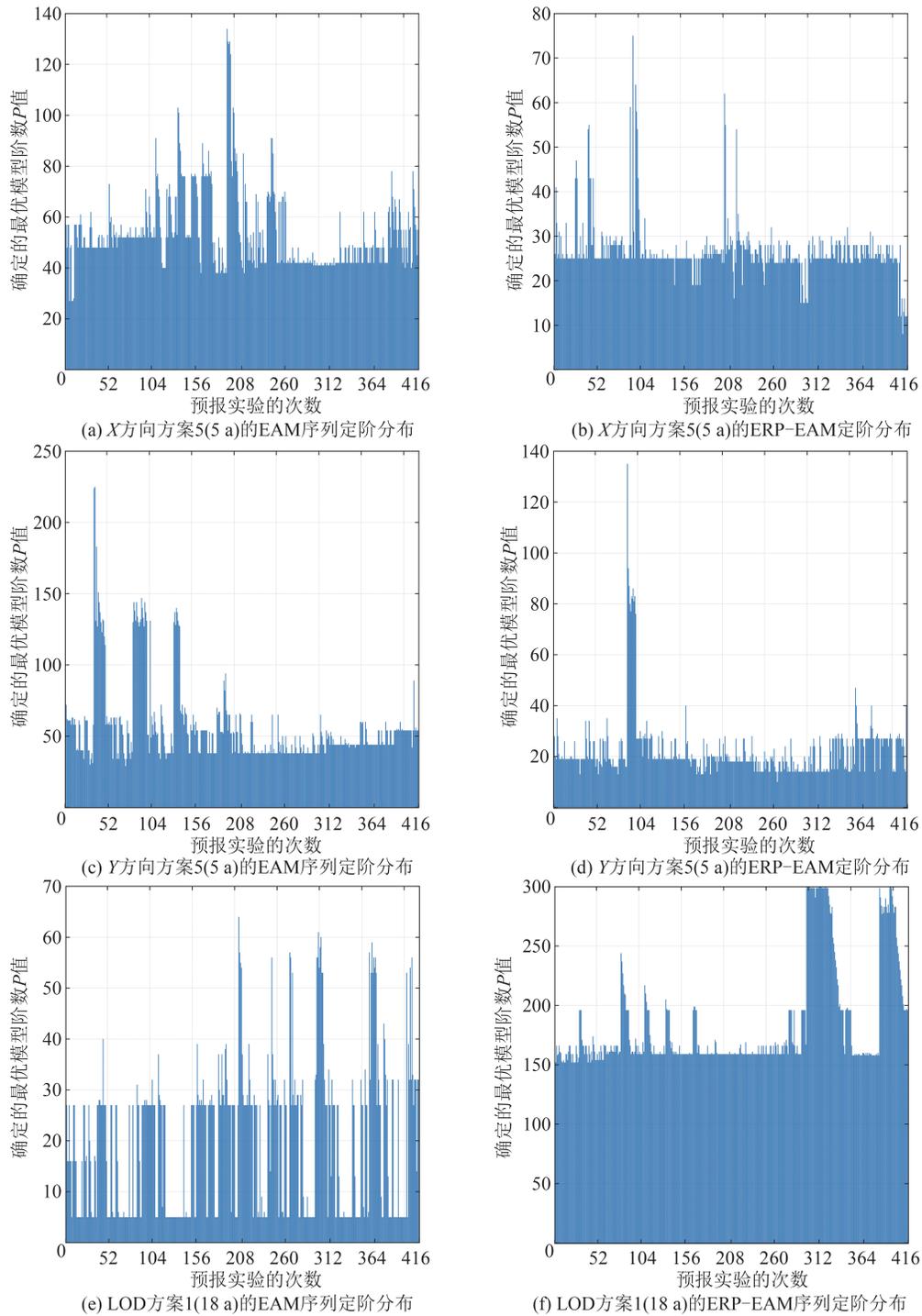


图3 本文方法的最佳阶数 P 图

Fig. 3 Optimum Order P Figure of the Proposed Method

2) 调节因子对 Y 方向的影响较大,这可能与 Y 轴的地理位置以及 EAM 对 Y 方向的激发贡献较小有关。当调节因子为 0.2 时,有助于极移的长期预报精度。

3) 在 Y 方向的 2017 年和 2018 年,本文方法预报结果不理想。这期间钱德勒摆动处于恢复期,而本文使用的是固定周期值,考虑时变周期

项将有助于本文方法精度的提高。这将是未来的改进方向。

4) 本文给出的调节因子是所有实验的公用最优值,确定单独实验的最佳调节因子将有助于提升预报精度。这也将是未来的研究方向之一。

致谢:感谢 IERS 提供 ERP 数据,感谢 GFZ 地球系统建模小组提供 EAM 数据。

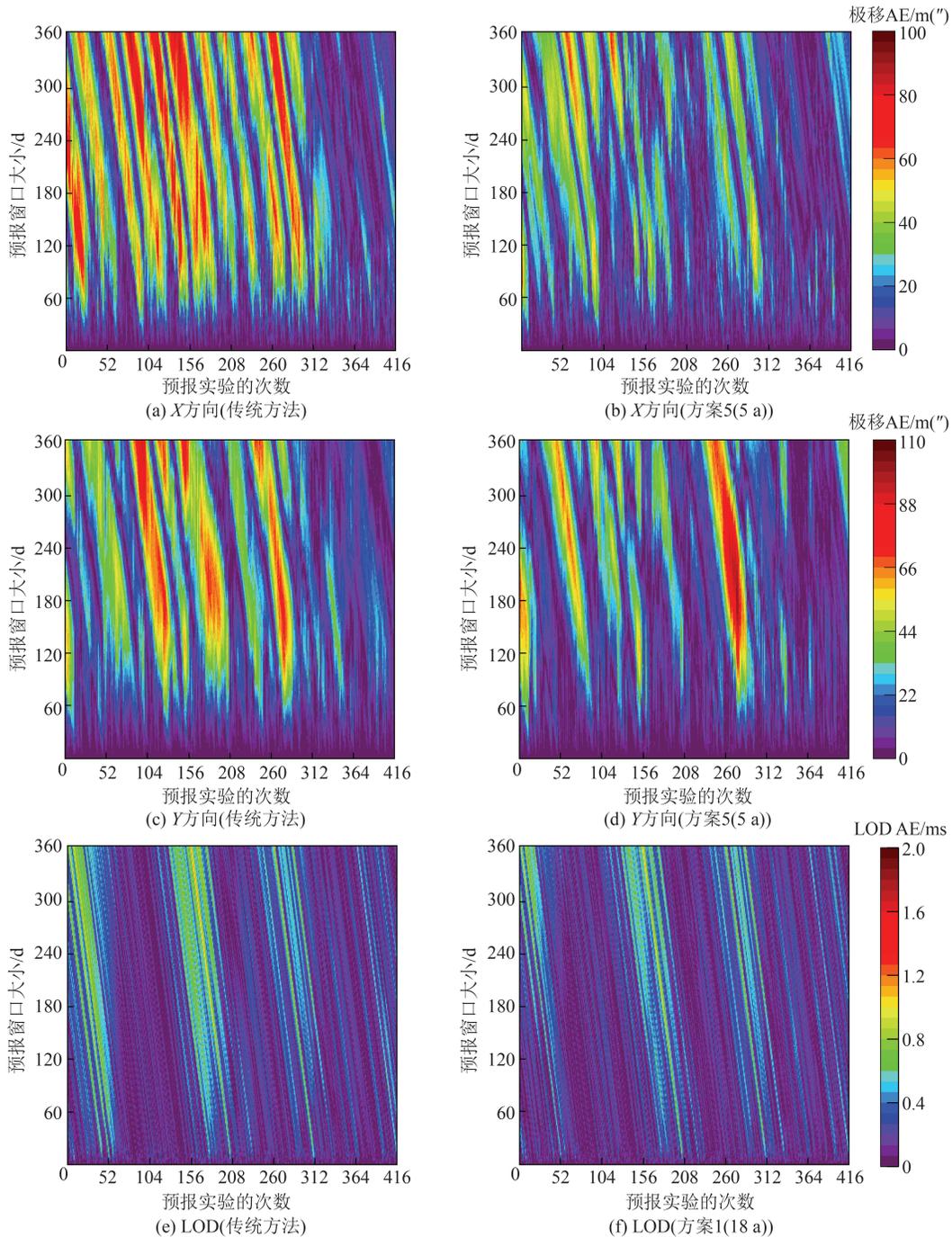


图4 本文方法和传统方法的AE图

Fig. 4 AE Figures of the Proposed Method and Traditional Method

参 考 文 献

[1] Bizouard C, Gambis D. The Combined Solution C04 for Earth Orientation Parameters Consistent with International Terrestrial Reference Frame 2005 [M]//Drewes H. Geodetic Reference Frames. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

[2] Schuh H, Behrend D. VLBI: A Fascinating Technique for Geodesy and Astrometry [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 61: 68-80.

[3] Kalarus M, Schuh H, Kosek W, et al. Achieve-

ments of the Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(10): 587-596.

[4] Xu X Q, Zhou Y H, Liao X H. Short-Term Earth Orientation Parameters Predictions by Combination of the Least-Squares, AR Model and Kalman Filter [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 62: 83-86.

[5] Choi K K, Ray J, Griffiths J, et al. Evaluation of GPS Orbit Prediction Strategies for the IGS Ultra-rapid Products [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(3): 403-412.

- [6] Zhu S Y. Prediction of Polar Motion [J]. *Bulletin Géodésique*, 1982, 56(3): 258-273.
- [7] Chao B F. Predictability of the Earth's Polar Motion [J]. *Bulletin Géodésique*, 1985, 59(1): 81-93.
- [8] Kosek W. Possible Excitation of the Chandler Wobble by Variable Geophysical Annual Cycle [J]. *Artificial Satellites*, 2004, 39(2): 135-145.
- [9] Kosek W, Kalarus M, Niedzielski T. Forecasting of the Earth Orientation Parameters: Comparison of Different Algorithms [J]. *Nagoya Journal of Medical Science*, 2007, 69(3/4): 133-137.
- [10] Sun Z Z, Xu T H. Prediction of Earth Rotation Parameters Based on Improved Weighted Least Squares and Autoregressive Model [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2012, 3(3): 57-64.
- [11] Wu F, Deng K Z, Chang G B, et al. The Application of a Combination of Weighted Least-Squares and Autoregressive Methods in Predictions of Polar Motion Parameters [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2018, 53(2): 247-257.
- [12] Xu X Q, Zhou Y H. EOP Prediction Using Least Square Fitting and Autoregressive Filter over Optimized Data Intervals [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(10): 2248-2253.
- [13] Wu F, Chang G B, Deng K Z, et al. Selecting Data for Autoregressive Modeling in Polar Motion Prediction [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2019, 54(4): 557-566.
- [14] Zhang Hao, Wang Qijie, Zhu Jianjun, et al. Application of CLS+AR Model Polar Motion to Prediction Based on Time-Varying Parameters Correction of Chandler Wobble [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 286-289. (张昊, 王琪洁, 朱建军, 等. 对钱德勒参数进行时变修正的CLS+AR模型在极移预测中的应用 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(3): 286-289.)
- [15] Sun Zhangzhen. Research on High-Precision Prediction Model and Algorithm of Earth Rotation Parameters [D]. Weihai: Shandong University (Weihai), 2020. (孙张振. 高精度地球自转参数预报模型与算法研究 [D]. 威海: 山东大学(威海), 2020.)
- [16] Sun Z Z, Xu T H, Jiang C H, et al. An Improved Prediction Algorithm for Earth's Polar Motion with Considering the Retrograde Annual and Semi-annual Wobbles Based on Least Squares and Autoregressive Model [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2019, 54(4): 499-511.
- [17] Wei Erhu, Yang Yali, Jin Shuanggen, et al. Improvement of LS_AR Model and Long-Term Forecast of Polar Motion [J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(4): 5-9. (魏二虎, 杨亚利, 金双根, 等. 利用LS_AR模型对极移参数的中长期预报 [J]. 测绘地理信息, 2014, 39(4): 5-9.)
- [18] Yao Yibin, Yue Shunqiang, Chen Peng. A New LS+AR Model with Additional Error Correction for Polar Motion Forecast [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(4): 665-676. (姚宜斌, 岳顺强, 陈鹏. 一种适用于极移预报的附加误差修正的LS+AR新模型 [J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(4): 665-676.)
- [19] Jia Song, Xu Tianhe, Yang Honglei. Two Improved Algorithms for LS+AR Prediction Model of the Polar Motion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(S0): 71-77. (加松, 徐天河, 杨红雷. LS+AR极移预报模型的两种修正算法 [J]. 测绘学报, 2018, 47(S0): 71-77.)
- [20] 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.
- [21] Brzeziński A. Polar Motion Excitation by Variations of the Effective Angular Momentum Function: Considerations Concerning Deconvolution Problem [J]. *Manuscr Geod*, 1992, 17(1): 3-20.
- [22] Gross R S, Fukumori I, Menemenlis D, et al. Atmospheric and Oceanic Excitation of Length-of-Day Variations During 1980-2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B1): 7914.
- [23] Chen J L, Wilson C R. Hydrological Excitations of Polar Motion, 1993-2002 [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 160(3): 833-839.
- [24] Zhou Y H, Chen J L, Liao X H, et al. Oceanic Excitations on Polar Motion: A Cross Comparison Among Models [J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 162(2): 390-398.
- [25] Brzeziński A, Nastula J, Kołaczek B. Seasonal Excitation of Polar Motion Estimated from Recent Geophysical Models and Observations [J]. *Journal of Geodynamics*, 2009, 48(3-5): 235-240.
- [26] Chen J L, Wilson C R, Zhou Y H. Seasonal Excitation of Polar Motion [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 62: 8-15.
- [27] Nastula J, Gross R, Salstein D A. Oceanic Excitation of Polar Motion: Identification of Specific Oceanic Areas Important for Polar Motion Excitation [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 62: 16-23.
- [28] Gu Zhennian. The Semi-annual Oscillation of Pole

- Motion and Contribution of Atmospheric Excitation [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 1995, 16:27-34. (顾震年. 极移的半年振荡和大气激发的贡献[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1995, 16:27-34.)
- [29] Xie Boquan, Zheng Dawei. High Frequency Excitation of Earth Rotation Parameters (ERP) from Atmosphere [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1996(2): 113-123. (谢伯全, 郑大伟. 大气对地球自转参数(ERP)的高频激发[J]. 天文学报, 1996(2): 113-123.)
- [30] Chandler S C. On the Variation of Latitude, I [J]. *Astronomical Journal*, 1891, 11: 59-61.
- [31] Sadanori K, Genshiro K. Information Criteria and Statistical Modeling [M]. Tokyo, Japan: Springer Science & Business Media, 2008.
- [32] Wilson C R. Discrete Polar Motion Equations [J]. *Geophysical Journal International*, 1985, 80(2): 551-554.
- [33] Zhang Zhi. Prediction of Earth Orientation Parameters and Its Effect Research on Orbit Computation of Navigation Satellite [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (张志. 地球定向参数的预报及其对导航卫星轨道计算的影响研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.)
- [34] Gross R S, Fukumori I, Menemenlis D. Atmospheric and Oceanic Excitation of Decadal-Scale Earth Orientation Variations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110: B09405.