

地球参考框架建立的进展与 非线性维持的思考

王茹圆^{1,2,3} 陈俊平^{*,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 100043; 3. 上海科技大学, 上海 201210)

摘要:为实现毫米级地球参考框架,必须逐步完善高精度非线性维持技术。本文首先详细介绍了地球参考框架的建立进展,包括国际地球参考框架和历元参考框架的建立历程;然后对非线性维持技术的研究现状进行阐述,指出对地球参考框架非线性维持的两种思路,包括基准站非线性变化建模和历元参考框架建立。最后对构建毫米级地球参考框架提出展望,建议适当增加和完善地面监测网,特别是南半球欠发达地区,利用更长、更大范围的原始数据积累,完善现有框架;增加坐标非线性运动和地心运动的数据积累,并进行深入分析,从而建立精确的改正模型;尽可能准确识别坐标时间序列中的噪声,建立格网噪声模型,从而更加精准地分离真实信号和噪声。

关键词: ITRF; 非线性维持; 毫米级地球参考框架

DOI: 10. 16507/j. issn. 1006 - 6055. 2023. 05. 005

Progress in the Establishment of the Terrestrial Reference Frame and Consideration of Non-linear Maintenance

WANG Ruyuan^{1,2,3} CHEN Junping^{*,1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100043 China;

3. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: In order to a realize millimeter-scale terrestrial reference frame, high-precision non-linear maintenance technology must be gradually improved. Firstly, this paper introduces the progress of the establishment of the terrestrial reference frame including the establishment of the International Terrestrial Reference Frame and the epoch reference frames; Then, the research status of non-linear maintenance technology is described, and two ideas for non-linear maintenance of the terrestrial reference frame are pointed out, including the non-linear change modeling of the reference station and the establishment of the epoch reference frames. At last, the paper puts forward a prospect for the construction of the millimeter-scale terrestrial reference frame, and suggests that the ground monitoring network should be appropriately increased and improved, especially in the underdeveloped areas of the southern hemisphere, and the existing frame should be improved by using longer and broader original data accumulation; Increase the data accumulation of coordinate non-linear motion and geocentric motion, and conduct in-depth analysis, to establish an accurate correction model; Identify the noise factors in the coordinate time series as accurately as possible, and establish a grid noise model to more accurately separate the actual signal and noise.

* E-mail: jumping@shao. ac. cn

Keywords: ITRF; Non-linear Maintenance; Millimeter-scale Terrestrial Reference Frame

全球定位系统已渗透到了人类社会生产生活中的方方面面,无论是国家战略或战术层面,还是民用科技与生活方面都起到了决定性作用。地球参考框架是所有天基、地基测量的基础,其精度极大影响了测量的精度,从而影响定位精度。而最新、最具权威的国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)的精度仍然在厘米级,无法满足毫米级动态变化检测的需求^[1,2]。因此,地球参考框架的优化与更新,便成为了地球动力学领域学者们共同研究与探讨实践的重要课题。

地球参考框架可分为长期参考框架(Multi-year Reference Frame, MRF)和历元参考框架(Epoch Reference Frames, ERFs),前者通常是由基准站在参考历元的站坐标和速度来表示,后者是由基准站坐标时间序列来表示。长期参考框架的代表性框架是ITRF,它是目前国际公认的具有最高精度、最佳稳定性的全球性地球参考框架,可以为用户提供高精度的地面坐标参考基准,由国际地球自转与参考系统服务组织(International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS)建立。但由于基准站未建模的非线性运动等因素,采用速度推算的坐标精度会随着时间的推移而下降,因此,为实现毫米级地球参考框架,必须对其进行非线性维持。本文首先详细介绍了地球参考框架建立的进展,然后阐述了地球参考框架的非线性维持的关键技术研究现状,最后对构建毫米地球参考框架进行了展望。

1 地球参考框架建立进展

1.1 国际地球参考框架

ITRF由国际地球自转与参考系统服务组织

建立和维持,其实现基于四种空间大地测量技术的技术内综合和技术间综合,分别是甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、激光测卫(Satellite Laser Ranging, SLR)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)与多普勒定轨和无线电定位技术(Doppler Orbit Determination and Radio Positioning Intergrated on the Satellite, DORIS)。各个技术的观测数据首先由各自的技术中心进行多个分析中心解的综合处理得到一个当前研究水平下的最优解,接着提交到IERS分析中心进行多技术综合得到ITRF的最终解^[3]。ITRF的维持和精化是一个不断完善的过程。截至2022年4月,IERS已经发布了ITRF88~ITRF2020共14个版本的参考框架,由于数据质量、分析策略等不断改进,每个版本的精度都优于过去的版本^[4]。

2016年发布的ITRF2014在台站分布、数据跨度、观测质量和分析策略等方面都有所改进。ITRF2020于2022年4月正式发布,该版本是国际地球参考系统的最新实现。与之前ITRF的解决策略相同,ITRF2020使用台站位置和地球定向参数(Earth Orientation Parameter, EOP)的时间序列以及并址站间的本地联系作为输入数据。基于四种技术的完全再加工解决方案,ITRF2020有望得到相比ITRF2014更优化的解决方案。

下面,将从基准定义和约束、输入数据、处理策略等方面详细介绍ITRF建立的演变。

1.1.1 ITRF的基准定义和约束

地球参考框架是由原点、尺度和方向三类参数表示,即其“基准定义”。国际地球参考系(International Terrestrial Reference System, ITRS)的定义如下:原点位于考虑海洋和大气的地球质量的中心;长度单位为米;方向与国际时间局给出

的 1984.0 时的方向一致,其随时间的变化定义为相对于整个地球表面的水平构造运动无整体旋转^[5]。以上条件定义的是一个理想的参考系,难以通过有限的观测资料实现。目前参与地球参考框架建立的四种空间大地测量技术都发挥各自的优势,使得所建立的地球参考框架的可靠性得到保证。

ITRF88-ITRF97 九个版本的原点由 SLR 确定或 SLR 与 GPS 共同确定,从 ITRF2000 起,原点仅由 SLR 确定,ITRF2014 原点长期稳定性优于 3 mm。ITRF2008、ITRF2014 由 VLBI 和 SLR 共同确定尺度,ITRF2014 尺度稳定性优于 1.4 ppb (在赤道面上约等于 8.7 mm)。ITRF 的方向最初是由 BIH (Bureau International de l'Heure) 地球参考系统 BTS87 给出。对于之后实现的 ITRF,其方向是根据前一个 ITRF 的方向在参考历元处应用无整体旋转条件实现的。表 1 给出了 ITRF 基准定义的演变情况^[5-7]。

1.1.2 ITRF 的输入数据

从 ITRF2005 起,以台站坐标和地球定向参数的时间序列作为输入数据,包括国际 GNSS 服

务 (International GNSS Service, IGS)、国际激光服务 (International Laser Ranging Service, ILRS) 和国际 DORIS 服务 (International DORIS Service, IDS) 提供的各技术的周解和国际 VLBI 服务 (International VLBI Service, IVS) 提供的 VLBI 日解时间序列。ITRF2008 所用技术解的观测时间跨度分别是 29 年、26 年、12.5 年和 16 年。ITRF2014 的输入数据与之前两个版本相同,但四种技术的观测时间跨度都有所增加,分别是 32 年、21.8 年、21 年和 35 年^[6]。同时,91 个并址站的本地联系可用数据与大气载荷数据一并作为 ITRF2014 的输入数据^[8]。ITRF2020 的输入数据又增加了最近六年的技术解。表 2 列出了最新两个版本 ITRF 所用输入数据的一些信息,包括各技术解的时间跨度及技术内施加的约束。另外,ILRS 与 IVS 从 80 年代开始提供 EOPs 参数,IDS 与 IGS 从 1994 年开始提供。

1.1.3 ITRF 的处理策略

本文仅介绍最近四个版本的分析策略。ITRF2008 与 ITRF2005 采用相同的分析策略^[5],具体包括:1) 对 SLR、GPS 和 DORIS 解施加最小约束,对 VLBI 解施加无整体平移和无整体旋转

表 1 ITRF 的基准定义^[5-7]

Tab. 1 Benchmark Definition of ITRF^[5-7]

框架版本	实现技术	参考历元	原点	尺度	定向	定向随时间演变
ITRF88	V/S/L	1988.0	S	S	BIH EOP	AM0-2
ITRF89	V/S/L	1988.0	S	S	BIH EOP	AM0-2
ITRF90	V/S/L	1988.0	S	S	BIH EOP	AM0-2
ITRF91	V/S/L/G	1988.0	S	S	BIH EOP	NNR-NUVEL1
ITRF92	V/S/L/G	1988.0	S	S	BIH EOP	NNR-NUVEL1A
ITRF93	V/S/G	1993.0	S	S	IERS EOP	IERS EOP
ITRF94	V/S/G	1993.0	SG	SG/V	ITRF92	NNR-NUVEL1A
ITRF96	V/S/G/D	1997.0	SG	SG/V	ITRF94	ITRF94
ITRF97	V/S/G/D	1997.0	SG	SG/V	ITRF96	ITRF96
ITRF2000	V/S/G/D	1997.0	S	S/V	ITRF97	NNR-NUVEL1A
ITRF2005	V/S/G/D	2000.0	S	V	ITRF2000	ITRF2000
ITRF2008	V/S/G/D	2005.0	S	S/V	ITRF2005	ITRF2005
ITRF2014	V/S/G/D	2010.0	S	S/V	ITRF2008	ITRF2008

表2 ITRF 2014、ITRF 2020 输入数据情况^[6]

Tab. 2 The Input Data of ITRF2014、ITRF2020^[6]

技术	服务组织	时间序列跨度		技术内约束类型
		ITRF2014	ITRF2020	
GPS	IGS	1994.0 - 2015.1	1994.0 - 2021.0	最小约束
DORIS	IDS	1993.0 - 2015.0	1993.0 - 2021.0	最小约束
SLR	ILRS	1983.0 - 2015.0	1983.0 - 2021.0	松弛约束
VLBI	IVS	1980.0 - 2015.0	1980.0 - 2021.0	无约束正则化

条件;2)通过严格堆栈时间序列,得到单技术长期解;3)识别并剔除异常值,并使用分段线性函数方法处理不连续性;4)综合四种技术并顾及并址站之间的联系,生成长期解。ITRF2008的改进体现在:输入数据为再处理时间序列^[4]、使用最新模型^[5]、对并址站的本地联系适当加权^[4,9-10]。

ITRF2014的数据分析策略在原有基础上,还做了以下工作:1)叠加过程中,对于具有足够时间跨度的台站,估计周年和半年信号;2)对受地震影响的台站都进行了震后形变模型改正后再构建时间序列堆栈的方程;3)识别并剔除异常值,并使用分段线性函数和震后形变模型处理时间序列的不连续性^[6]。ITRF2020的分析策略与ITRF2014基本相同,特别是,在叠加各技术时间序列过程中,对于IGS时间序列的特定情况,除了周年和半年信号外,还估计了前8个高阶谐波的周期信号,然后从IGS时间系列中去除。

1.1.4 ITRF的最终解

ITRF2005之后的版本均提供框架点在参考历元时的位置和线性速度、以及地球定向参数^[5]。另外,ITRF2014提供了震后形变模型。最新参考框架ITRF2020除了提供常规产品外,还提供了震后形变模型以及分别在以质量中心为原点(the Center of Mass frame, CM)的框架下和以几何中心为原点(the Center of Figure frame, CF)的框架下的

周年、半年参数模型。

由于观测数据的增加、处理策略的改进等,ITRF2020产品精度较之前有所提高^[2],但由于发布时间短,版本普及滞后性等原因,目前国内普遍使用的参考框架仍然为ITRF2014。

1.2 历元参考框架

由历史观测数据可以知道,基准站的坐标时间序列中除线性信号外,非线性信号也很明显。而基准站的非线性运动在ITRF的基准站坐标中没有得到精确表达,这也意味着ITRF所指示的原点只是地球质心运动的线性近似。多数地球科学和大地测量应用都可以利用ITRF这一类线性参考框架实现。而卫星精密定轨等一些应用对地球参考框架提出了更高的要求。因此,非线性参考框架应运而生。历元参考框架就是一种非线性参考框架,与长期参考框架不同,它是基于坐标时间序列的框架。因为其更短的实现周期(7天、14天或28天),可以反映出地心运动和基准站的非线性运动,提供基准站准瞬时坐标。长期参考框架和历元参考框架下的坐标和基准站坐标之间的关系如图1所示^[11]。图中和分别为长期参考框架的两次更新,蓝色为长期参考框架下的参数化坐标(连续的),白色方框表示历元参考框架下的坐标(离散的)。通过对每周站点位置的估计,可以更准确地估计有规律的站点位置(红色,连续非线性),而不是通过时间上恒定速度的外推。其中,

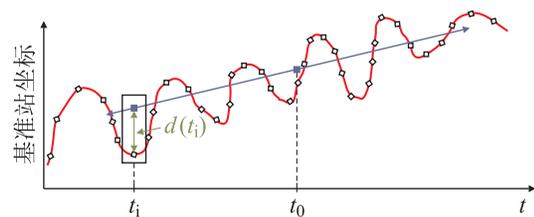


图1 基准站坐标变化^[11]

Fig. 1 Coordinate Change of Reference Station^[11]

MRF 下的坐标与 ERFs 下的坐标之间的差值主要受季节性因素影响,振幅可达几厘米^[12-15]。

IGS、斯克里普斯轨道和永久阵列中心 (Scripps Orbit and Permanent Array Center, SOPAC) 以及 ILRS 等发布的最终解可以认为是一种单技术历元参考框架。JTRF2014 是另一个最具代表性的多技术历元参考框架,其原点由 SLR 确定,尺度由 VLBI 和 SLR 测量结果所得出的准瞬时尺度的加权平均值确定^[2]。无整体旋转 (No Net Rotation, NNR) 约束应用于周分辨率的框架,使得框架的方向与 ITRF2008 对齐。其坐标时间序列的动态演变展现了基准站一个连续运动项以及年度、半年度的周期模式。截至 2005 年 1 月 1 日, JTRF2014 与 ITRF2014 之间的 Helmert 变换参数的偏移量均在 1mm 范围内 (因 VLBI/SLR 平均化所采用的不同策略而导致偏移量较大的标度除外)。Helmert 变换参数的漂移小于 0.18 mm/yr, 证明了两个框架的长期部分高度一致。另外, JTRF2014 极移和 ITRF2014 极移之间的 WRMS 小于 28 (30 对应于赤道处约 1 mm 的等效位移), 从而表明两者的极移时间序列在 1 mm 水平范围内是一致的。遗憾的是, 参与框架建立的四种空间大地测量技术的台站坐标时间序列中都包含了与技术本身相关的系统性误差。其中, GNSS 台站坐标的时间序列中的非线性运动包含真实的地球物理运动, 由模型误差导致的交点年信号^[16], 以及区域地面变形等未解释的变化。相比 GNSS, 其他三种技术的台站坐标时间序列的噪声较大, 因此非线性信号也更难刻画。与技术相关的系统性误差不仅包含在台站坐标时间序列中, 也体现在由相关技术确定的地心运动和尺度变化中。

部分学者也针对历元参考框架作了一定的研究。Bloßfeld M 等^[11]通过结合 GPS、SLR 和 VLBI

历元法向方程, 估计了周分辨率的历元参考框架。通过与每种技术周解的对比, 充分利用了每种技术的优势。并将两种参考框架的时间序列进行比较, 研究了基准实现的稳定性。研究发现, 单个非线性台站运动会影响长期参考框架方法的其他参数; 基准站常规运动导致了两种地球参考框架都存在系统偏差; 长期参考框架的方向受到偏移和漂移的影响, 而历元参考框架方向受到周偏移的影响。另外, ERF 可以提供几乎无偏的 EOP 和准瞬时站点坐标^[2,11]。姚向东等^[17]基于法方程的多源空间大地测量技术融合理论与方法构建了 ERFs, 结果也表明基准站的运动可以被 ERFs 更准确地反映。

2 非线性维持关键技术研究现状

研究发现, 参考站的非线性运动振幅可达 1 ~ 2 cm, 因此, 有必要逐步完善高精度非线性维持技术以实现毫米级地球参考框架。考虑非线性变化的地球参考框架建立主要有两种方法: 一是建立能准确描述基准站非线性变化的模型; 二是建立短期参考框架, 定期对各技术解进行堆栈组合, 生成基准站的坐标时间序列, 从而维持参考框架, 也就是上文提到的历元参考框架^[18,19]。

2.1 基准站非线性变化模型

基准站非线性变化的建模方法有两种, 一种是基于地球物理效应的非线性变化建模, 另一种是针对坐标时间序列的非线性变化建模^[19]。

2.1.1 基于地球物理效应的非线性变化建模

1) 环境负载建模。环境负载是基准站非线性变化的主要因素, 主要包括大气负载、土壤水负载、非潮汐海洋负载和积雪负载^[20,21]。ITRF2014 开始考虑非潮汐大气负载, 并对个体的大气载荷模型进行了改进^[6]。环境负载可以通过环境负载

模型进行改正,目前主要有以下几种:一是全球地球物理流体中心提供的两种框架(CM框架和CF框架)下的环境负载数据;二是QOCA软件采用的地表负载位移效应计算模型^[22,23];三是德国地学研究中心提供的由大气负载、水文负载和非潮汐海洋负载引起的地表位移的全球格网数据。国内姜卫平等人^[24]建立的精密环境负载模型,经验证,其结果也较为良好。

针对环境负载造成的地表位移,国内外学者做了大量的研究工作。Collilieux X等^[25]的研究结果表明环境负荷引起的变化可以解释部分高程分量的部分年、半年振幅。姜卫平等^[26]发现地表物质负荷改正能解释中国区域大多测站大部分的垂直和东方向台站位移非线性变化。其中,大气负载引起的位移是基准站垂向位移的重要组成部分,坐标时间序列经大气负载改正后,其均方根和周期性信号大幅减小^[27-31]。另一个对环境负载效应贡献较大的成分是土壤水负载,其引起的垂向地表位移可达到厘米级^[24]。非潮汐海洋负载位移对近海地区基准站的影响平均为5mm量级^[32],文献^[33,34]验证了经过非潮汐海洋负载改正,坐标时间序列中的非线性变化能够得到有效减小。

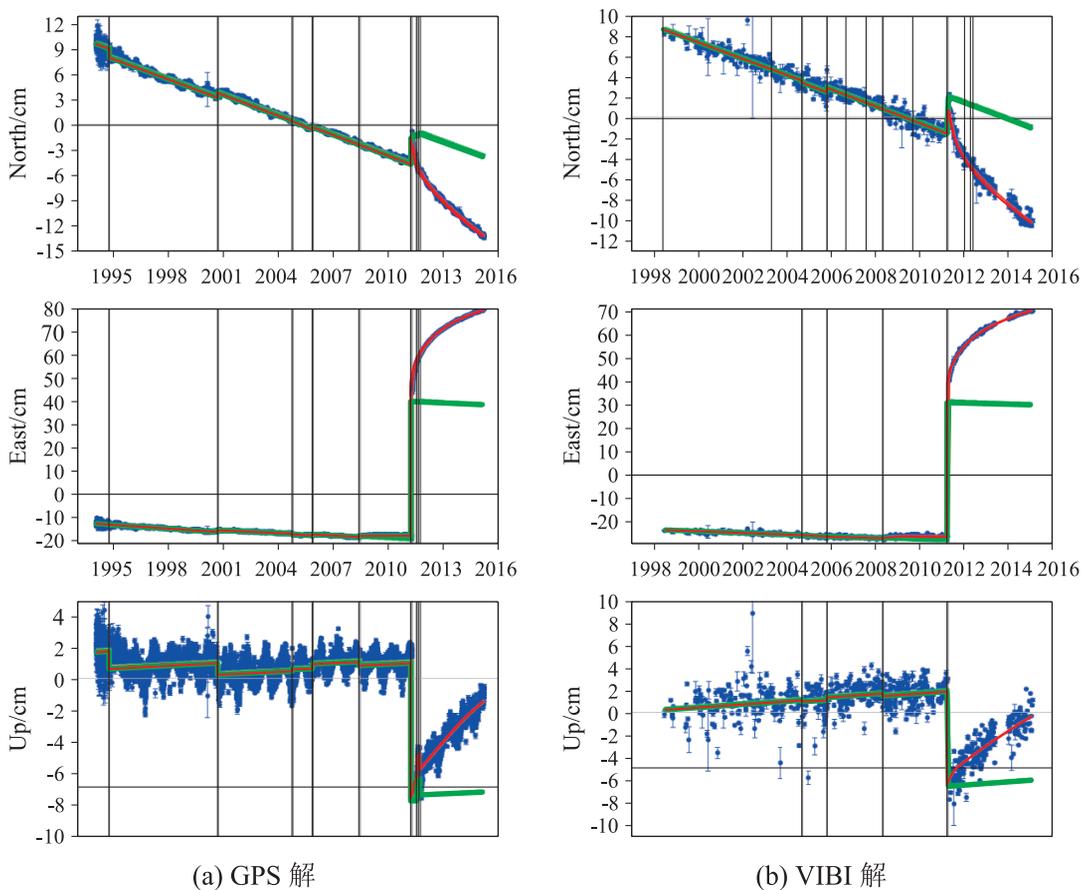
2) 热膨胀效应建模。热膨胀效应包括观测墩和基岩的热膨胀效应。基岩的热膨胀效应模型主要有两种,分别是由Dong等^[22]提出的半空间热膨胀模型和由Ming等^[35]提出的基于质心不变的统一球体热膨胀模型。不同学者,基于半空间热膨胀模型、统一球体热膨胀模型以及美国国家海洋和大气管理局提供的地表温度数据作了系列研究,均发现热膨胀效应对垂向位移的影响能达到几个毫米^[22,36-38],并且其中存在明显的周年和半年信号^[39]。

3) 潮汐形变建模。太阳和月球等天体引力

的作用下,地球的岩石圈、水圈和大气圈产生变形,其中,固体潮、极潮和海潮负荷形变对台站位置影响较大^[19]。国际地球自转服务推荐了固体潮、极潮和海潮的改正模型。另外,有学者也提出了新的全球潮汐模型,如FES2014b^[40]和GOT4.10c^[41]。针对不同潮汐形变,国内学者也做了大量研究。刘根友等^[42]发现固体潮影响最大,引起的高程方向的最大形变可达40cm。阮仁桂等人^[43]发现极潮引起的最大水平位移和垂直位移可达7mm和25mm,且对站点位移的影响周期约为1年。何金鑫等人^[44]实验表明海潮负荷对沿海台站影响较大,可接近5cm。

4) 震后形变建模。受地震影响的台站会发生同震和震后形变。ITRF2014和ITRF2020采用了震后形变模型,以基准站振幅的时间函数来描述地震引发的形变。图2显示了ITRF2014中GNSS和VLBI并址站TSKB的时间序列图,蓝色是原始数据,绿色是ITRF2014给出的分段线性时间序列,红色为应用PSD模型后的序列^[6]。

5) 地心非线性运动建模。地球系统中的质量迁移会引起CF的运动。但质量中心CM不变,因此CF会产生相对于CM的运动,定义为地心运动^[45],部分文献将CM相对CF的变化称为地心运动^[6,19]。引起地心运动的主要因素是地球系统内部的质量迁移,其主要包括地表水、大气和海洋质量迁移引起周期性变化和冰川均衡调整引起的长期性变化^[19,46-48],板块运动、地球液核震荡、全球生物量变化等也会引起地心运动^[45]。实验表明,地心的长期运动小于1mm/yr^[49],但X、Y、Z三个方向周期性运动的振幅可达3.72mm、3.06mm、8.95mm^[50]。ITRF2014的地心运动建模中,只使用了SLR技术进行建模,但SLR台站在全球分布不均匀,其精确度亦有限^[51]。因此,有必要更好地

图2 TSKB 的坐标时间序列^[6]Fig.2 Coordinate Time Series of TSKB^[6]

优化基于 SLR 技术确定地心运动的算法和模型,并提高硬件质量,以精确模拟地心运动^[6,52,53]。

2.1.2 基于坐标时间序列的非线性变化建模

坐标的非线性变化包括地球物理效应引起的非线性运动和地震或天线更换引起的不连续变化、各种噪声造成的非线性变化等。因此,预先要对时间序列进行处理,才能基于坐标时间序列进行非线性建模,过程包括去趋势项、消除阶跃项、削弱噪声等,得到干净真实的非线性变化后,再进行建模。针对预处理后得到的非线性项,其建模方法主要有基于谐波模型的非线性变化建模、基于奇异谱分析的非线性变化建模和基于差分整合移动平均自回归模型的非线性变化建模等^[54]。

其中,谐波模型是目前常用的坐标时间序列

建模方法。该方法的主要思想是:首先检测出坐标时间序列中每个周期项对应的频率,然后用三角函数拟合。田亮^[55]采用谐波模型拟合方法,对 HOFN 站的坐标非线性变化进行建模。结果表明,拟合后残差中的周期项明显减小,但仍存在一些小周期项。傅彦博^[56]基于全球分布的 461 个 IGS 参考站的坐标时间序列,采用基于周期图法的频谱分析探测周年项,然后通过三角函数拟合方法计算周年项的振幅和相位,建立两者与纬度之间的函数表达式,进而构建 GPS 台站周年变化的全球统计模型。结果表明,所建立的模型对三维坐标时间序列的改正效果较为显著,可以弱化大部分台站在三个方向上 30% ~ 50% 的坐标残差,较好地模拟参考台站的非线性运动。此外,

ITRF2014 还利用谐波模型对坐标时间序列中的周期项进行估计,进一步提高了垂直速度场的估计精度。

2.2 历元参考框架关键技术

建立历元参考框架是基准站非线性维持的另一种方法。历元参考框架可以通过一种或多种空间大地测量技术组合的方式实现,实现多种技术的历元参考框架的主要步骤包括:1)重建无约束法方程;2)数据预处理和时间序列分析;3)法方程的叠加;4)单技术内组合;5)技术间组合^[19]。

JTRF2014 采用的是卡尔曼滤波器和平滑算法的组合方法^[57]。Mathis Bloßfeld^[18]和姚向东^[17]实现的历元参考框架是通过采用一定时段的观测数据进行高频的 ITRF 实现,其解算策略与 ITRF2014 整体相同。Mathis Bloßfeld 与姚向东的研究不同之处主要在于使用的数据和基准约束的方法上,姚向东在数据上相比前者增加了 DORIS 的数据,在基准约束方法上与前者不同。前者的原点由 SLR 实现,尺度由 SLR 和 VLBI 的平均尺度实现,定向由相对于稳定的 GPS 子网无整体旋转实现,而姚向东的原点、尺度和定向均约束到 ITRF2014 下。总体而言,历元参考框架的稳定性会随着实现周期的缩短而变差。

3 讨论与展望

大地测量参考框架是支撑社会发展建设和人类活动的重要基础设施,对我们的很多民用设施建设、国防军事、深空探测、地质及水文信息监测和防灾减灾等方面工作都有着重要意义,也意味着研究建立毫米级高精度大地测量坐标框架并维持其长期稳定精确的必要性。并且,在现今国际关系紧张、大国对弈频繁的状态下,加快此类“高、精、尖”技术研究进展并最大程度实现自主化,也

是我们学界面临的重大挑战。

目前我们能够对坐标站的线性运动进行精确地建模,但对基准站的非线性运动和地心运动模型精度仅达到厘米级^[19]。历元参考框架可以较准确地反映出基准站的非线性运动和地心运动,但其稳定性有限。因此,我们对于未来地球参考框架的研究有着以下几点展望。

1)完善空间大地测量技术,削弱系统误差的影响^[19]。加强四项技术的联系,对于四种空间大地测量技术的并址站,需要实现真正的联合。例如,在数据处理过程中,历元点应相同;并址站上的各项技术,时间间隔最好一致^[1]。

2)适当增加和完善地面监测网,特别是在南半球欠发达地区,利用更长、更大范围的原始数据积累完善现有框架。

3)增加低轨道卫星对地心运动的监测,以提高地心运动的观测质量^[49];优化地心算法与模型,以对地心运动进行精确建模。

4)尽可能准确识别坐标中的噪声,建立格网噪声模型,从而分离出噪声,得到更准确的坐标时间序列。

参考文献

- [1]戴海亮,孙付平,朱新慧,等. 国际地球参考框架的研究进展[C]. 第十届中国卫星导航年会论文集—S05 空间基准与精密定位. 北京:中国卫星导航学术年会组委会,2019:57-62.
- [2]姜卫平,李昭,魏娜,等. 大地测量坐标框架建立的进展与思考[J]. 测绘学报,2022,51(7): 1259-1270.
- [3]刘姣. 国际地球参考框架特性分析及区域地球参考框架建立[D]. 北京:中国科学院大学,2021.
- [4]王茹圆,陈俊平,曲伟菁,等. 国际地球参考框架 ITRF 精度退化分析[C]. 第十一届中国卫星导

- 航年会论文集——S05 空间基准与精密定位. 北京:中国卫星导航学术年会组委会,2020:122-126.
- [5] 刘经南,魏娜,施闯. 国际地球参考框架(ITRF)的研究现状及展望[J]. 自然杂志,2013,35(4):243-250.
- [6] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, METIVIER L, et al. ITRF2014:A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2016,121(8):6109-6131.
- [7] 邹蓉,孙付平,王啸,等. 地球参考框架的发展现状和未来展望[J]. 中国地震,2020,36(4):684-692.
- [8] SEITZ M, ANGERMANN D, NGERMANN D, et al. 2014 ITRS Realization of DGFI:DTRF2014[C]. EGU General Assembly Conference. Vienna:EGU, 2015.
- [9] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, METIVIER L. ITRF2008:An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame [J]. Journal of Geodesy,2011,85(8):457-473
- [10] 成英燕. ITRF2008 框架简介[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(1):47-50,75.
- [11] BLOßFELD M, SEITZ M, ANGERMANN D. Non-Linear Station Motions in Epoch and Multi-Year Reference Frames [J]. Journal of Geodesy,2014,88(1):45-63.
- [12] PETROV L, BOY J P. Study of the Atmospheric Pressure Loading Signal in Very Long Baseline Interferometry Observations [J]. Journal of Geophysical Research,2004,109(B3):1-14.
- [13] BEVIS M, ALSDORF D, KENDRICK E, et al. Seasonal Fluctuations in the Mass of the Amazon River System and Earth's Elastic Response [J]. Geophysical Research Letters,2005,32(16):1-4.
- [14] TREGONING P, WATSO. Atmospheric Effects and Spurious Signals in GPS Analyses [J]. Journal of Geophysical Research,2009,114(B9):3-17.
- [15] DAVIS J L, WERNICKE B P, TAMISIEA M E. On Seasonal Signals in Geodetic Time Series [J]. J Geophys Res. ,2012,117(B1):B01403
- [16] RAY J, ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, et al. Anomalous Harmonics in the Spectra of GPS Position Estimates [J]. GPS Solutions,2008,12(1):55-64.
- [17] 姚向东. GNSS/VLBI/SLR/DORIS多源数据融合历元地球参考框架实现方法研究[D]. 青岛:山东科技大学,2018.
- [18] BLOßFELD M, SEITZ M, ANGERMANN D. Epoch Reference Frames as Short-Term Realizations of the ITRS [C]. IAG 150 Years. Cham, Switzerland:Springer International Publishing, 2015,143:27-32.
- [19] 孙付平,贾彦锋,朱新慧,等. 毫米级地球参考框架动态维持技术研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1688-1700.
- [20] 李丰翔. 环境负载对香港地区GNSS站非线性运动及噪声特性的影响[J]. 北京测绘,2022,36(8):1036-1039.
- [21] SUN H P, DUCARME B, DEHANT V. Effect of the Atmospheric Pressure on Surface Displacements [J]. Journal of Geodesy,1995,70(3):131-139.
- [22] DONG D, FANG P, BOCK Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS-derived Site Position Time Series [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2002,107(B4):ETG 9-1-ETG 9-16.
- [23] HE X, MONTILLET J P, HUA X, et al. Noise Analysis for Environmental Loading Effect on GPS Position Time Series [J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia,2017,14(1):131-142.
- [24] JIANG W, LI Z, VAN DAM T, et al. Comparative Analysis of Different Environmental Loading Methods and Their Impacts on the GPS Height Time Series [J]. Journal of Geodesy,2013,87

- (7):687-703.
- [25] COLLILIEUX X, VAN DAM T, RAY J, et al. Strategies to Mitigate Aliasing of Loading Signals While Estimating GPS Frame Parameters [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(1):1-14.
- [26] 姜卫平, 夏传义, 李昭, 等. 环境负载对区域GPS基准站时间序列的影响分析[J]. *测绘学报*, 2014, 43(12):1217-1223.
- [27] 张诗玉, 钟敏, 唐诗华. 我国GPS基准站地壳垂直形变的大气负荷效应[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2006(12):1090-1093.
- [28] VANDAM T M, BLEWITT G, HEFLIN M B. Atmospheric Pressure Loading Effects on Global Positioning System Coordinate Determinations [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1994, 99(B12):23939-23950.
- [29] TREGONING P, VAN DAM T. Atmospheric Pressure Loading Corrections Applied to GPS Data at the Observation Level [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(22):L22310.
- [30] LI Z, CHEN W, VAN DAM T, et al. Comparative Analysis of Different Atmospheric Surface Pressure Models and Their Impacts on Daily ITRF2014 GNSS Residual Time Series [J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(4):1-20.
- [31] 姜卫平, 周伯焯, 李昭. 大气负载效应对不同纬度IGS测站的影响[J]. *测绘科学*, 2016, 41(4):28-32.
- [32] 周伯焯, 姜卫平, 李昭. 非潮汐海洋负载效应对近海岸IGS测站坐标时间序列的影响[J]. *大地测量与地球动力学*, 2016(36):1008-1013.
- [33] ZERBINI S, MATONTI F, RAICICH F, et al. Observing and Assessing Nontidal Ocean Loading Using Ocean, Continuous GPS and Gravity Data in the Adriatic Area [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23):275-295.
- [34] WILLIAMS S D P, PENNA N T. Non-Tidal Ocean Loading Effects on Geodetic GPS Heights [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(9):1-5.
- [35] FANG M, DONG D, HAGER B H. Displacements Due to Surface Temperature Variation on a Uniform Elastic Sphere with its Center of Mass Stationary [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(1):194-203.
- [36] YAN H, CHEN W, ZHU Y, et al. Contributions of Thermal Expansion of Monuments and Nearby Bedrock to Observed GPS Height Changes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(13):1-5.
- [37] 闫昊明, 陈武, 朱耀仲, 等. 温度变化对我国GPS台站垂直位移的影响[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4):825-832.
- [38] XU X, DONG D, FANG M, et al. Contributions of Thermoelastic Deformation to Seasonal Variations in GPS Station Position [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3):1-10.
- [39] 姜卫平, 王锴华, 邓连生, 等. 热膨胀效应对GNSS基准站垂向位移非线性变化的影响[J]. *测绘学报*, 2015, 44(5):473-480.
- [40] CARRERE L, LYARD F, CANCET M, et al. FES 2014, A New Tidal Model—Validation Results and Perspectives for Improvements [C]. *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*. Prague, Czech Republic:[S. n.], 2016.
- [41] RAY R D. Precise Comparisons of Bottom-Pressure and Altimetric Ocean Tides [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2013, 118(9):4570-4584.
- [42] 刘根友. 高精度GPS测量中的潮汐改正[C]. 《大地测量与地球动力学进展》论文集. 武汉:湖北科学技术出版社, 2004.
- [43] 阮仁桂. 高精度GNSS网数据处理关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2018.
- [44] 何金鑫, 章浙涛, 何秀凤. FES2004和GOT4.7海潮模型改正对全球PPP的影响特征及差异分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(6):612-617.

- [45] 谢苏锐,李斐,鄢建国. 基于空间大地测量与地球物理方法的地心运动研究与监测进展[J]. 地球物理学进展,2014,29(1):15-24.
- [46] 郭海荣,杨元喜,焦文海. 地心运动时间序列的抗差谱分析[J]. 测绘学报,2003,32(4):308-312.
- [47] 秦显平,杨元喜. 用SLR数据导出的地心运动结果[J]. 测绘学报,2003,32(2):120-124.
- [48] KANG Z G, TAPLEY B, CHEN J L, et al. Geocenter Motion Time Series Derived from GRACE GPS and LAGEOS Observations [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(10):1931-1942.
- [49] MÉTIVIER L, GREFF-LEFFTZ M, ALTAMIMI Z. On Secular Geocenter Motion: The Impact of Climate Changes [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 296(3/4):360-366.
- [50] 魏娜,施闯,刘经南. 利用GPS数据反演地心运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36(4):441-445.
- [51] 傅彦博,朱新慧,孙付平,等. ITRF2014 框架简介[J]. 大地测量与地球动力学,2017,37(5):446-461.
- [52] SPATAR C B, MOOKE P, CLARKE P J. Collinearity Assessment of Geocenter Coordinates Derived from Multi-satellite SLR Data [J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(12):1197-1216.
- [53] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, COLLILIEUX X, et al. ITRF 2014 Status, data Analysis and Results [C]. EGU General Assembly [S.l.]:EGU, 2015.
- [54] 姜卫平,李昭,刘万科,等. 顾及非线性变化的地球参考框架建立与维持的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2010,35(6):665-669.
- [55] 田亮. GPS测站坐标非线性变化规律分析与机制研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学,2011.
- [56] 傅彦博. GPS测站坐标非线性变化的统计改正模型与作用机制研究[D]. 郑州:战略支援部队信息工程大学,2018.
- [57] ABBONDANZA C, CHIN T M, GROSS R S, et al. ITRF2014, the JPL Kalman Filter and Smoother Realization of the International Terrestrial Reference System [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 2017, 122(10):8474-8510.

作者贡献说明

王茹圆:文章框架设计,收集、整理资料,文章撰写;
陈俊平:指导文章撰写,参与讨论文章框架。

作者简介



王茹圆:在读博士生;主要研究方向:地球参考框架精度维持。



陈俊平:研究员,博导;中国科学院上海天文台天文地球动力学中心副主任;高精度GNSS数据分析与应用课题组组长;主要研究方向:卫星导航数据处理技术、北斗地面运控信息处理技术。