



毫米级地球参考框架动态维持技术研究进展

孙付平¹ 贾彦锋¹ 朱新慧¹ 肖凯¹ 刘婧¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450000

摘要:毫米级地球参考框架的实现需要毫米级的动态维持技术。目前的动态维持技术主要有基于线性速度的线性维持技术、综合考虑基准站非线性运动和地心运动的非线性维持技术以及历元参考框架技术。首先简要总结了线性维持技术的发展现状,从影响机制和坐标时间序列两个角度,围绕坐标非线性变化的建模方法,重点梳理了非线性维持技术的研究进展;然后对历元参考框架的实现过程及其在参考框架维持中的应用进行了介绍;最后基于对现状的分析,提出了实现毫米级地球参考框架动态维持需要解决的几个关键问题。

关键词:毫米级地球参考框架;线性维持;非线性维持;坐标时间序列;非线性运动;地心运动

中图分类号:P228

文献标志码:A

地球参考框架(terrestrial reference frame, TRF)是地球参考系(terrestrial reference system, TRS)的物理实现,由固连在地球表面的一系列基准站组成,具体表现为这些基准站在参考系统下某一历元的高精度坐标及其变化。高精度TRF是世界各国重要的空间基础设施,能够为地球上人类活动提供必不可少的空间参考基准。目前,常见的TRF有国际地球参考框架(international terrestrial reference framework, ITRF)和各个国家的国家大地坐标参考框架,如中国的CGCS2000(China geodetic coordinate system 2000)和美国的NSRS(national spatial reference system)。除此之外,各大卫星导航系统也建立了相应的坐标参考框架,如GPS(global positioning system)的WGS-84(world geosetic system)坐标参考框架、GLONASS(global navigation satellite system)的PZ-90坐标参考框架和北斗地球参考框架。

长期稳定的高精度TRF不仅可以为经济和国防建设提供高精度定位和定向基准,而且对于促进地球科学研究与减灾防灾也具有重大作用。但是地球是一个非刚体,其本身发生的变化会影响与其固连的站点,进而引起基准站坐标的变化,影响参考框架的稳定性。这些变化既包括由构造变化、板块运动和冰后回弹引起的线性变

化,也包含由地球物理效应引起的周期性变化以及地震等因素引起的突变。这些变化会使基准站发生微小的运动,也会引起地心运动,进而引起TRF原点的变化,从而影响以坐标为表达方式的基准站位置。

在任意历元 t ,基准站的地心坐标 $X(t)$ 可以表示为^[1-3]:

$$X(t) = X(t_0) + V(t - t_0) + \sum \Delta X(t) + \epsilon \quad (1)$$

式中, $X(t_0)$ 和 V 分别表示基准站在参考历元 t_0 的坐标和线性速度,其中线性速度用来描述由基准站自身和地心的长期运动引起的基准站坐标的长期性变化; $\sum \Delta X(t)$ 表示基准站和地心的非线性运动引起的坐标变化; ϵ 为残差。

长期稳定的毫米级TRF的实现离不开动态维持技术。目前对TRF进行动态维持主要有两个思路:一种是建立能够精确描述基准站坐标变化的模型,并基于该模型对参考框架进行动态维持,主要包括基于线性速度的线性维持技术和综合考虑基准站和地心非线性运动的非线性维持技术;另一种是定期对空间大地测量技术观测得到的数据进行堆栈和组合,建立短期的参考框架,进而实现参考框架的动态维持,这种短期的参考框架称为历元参考框架^[4](epoch reference frames, ERFs)。

收稿日期:2022-05-22

项目资助:国家自然科学基金(42174047)。

第一作者:孙付平,博士,教授,主要研究方向为大地测量与导航。sun.fp@163.com

通讯作者:朱新慧,博士,副教授。gnss_zzzxh@126.com

1 线性维持技术

线性维持指的是根据基准站位置的线性变化(或长期变化)规律,对参考框架进行维持。线性维持依赖的是基准站的线性速度。基准站线性速度的来源有两种,一种是地壳运动模型,主要包括板块运动模型和冰川均衡调整(glacial isostatic adjustment, GIA)模型,另一种是实测速度场。

1.1 地壳运动模型

根据板块运动模型计算基准站速度需要采用欧拉矢量模型。在板块内部框架点之间相对位置保持不变(即刚性板块)的假设下,板块运动的欧拉矢量 Ω 与基准站线性速度 V 的关系为:

$$V = \Omega \times R \quad (2)$$

式中, R 为基准站的地心位置矢量。将基准站坐标代入式(2)即可获取其线性速度。

常见的板块运动模型见表 1。ITRF 的速度场所使用的地学板块运动模型主要为 AM0-2、NNR-NUVEL-1 以及 NNR-NUVEL-1A 等绝对板块运动模型。在 ITRF 建立初期,由于没有建立实测速度场,因此基准站的速度完全由 AM0-2 地学板块运动模型提供。随着技术的发展和数据的积累,从 ITRF91 开始,实测速度场开始出现,并且在 ITRF2000 之前,其速度场由实测速度场和地学板块运动模型联合提供。因此,地学板块运动模型在早期 ITRF 版本的速度场建立过程中发挥了重要的作用。但这些模型的缺陷在于,它们是基于地质和地球物理 300 万年的资料建立的平均模型,无法准确地反映当下地球的板块运动^[15],其精度只能达到 3 mm/a。

随着全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)、甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)、激光测月(Lunar laser ranging, LLR)和卫星多普勒定轨与无线电定位系统(Doppler orbit determination and radio positioning integrated on satellite, DORIS)等空间大地测量技术的发展,基准站线性速度的计算精度能够达到 1 mm/a 以内,因此相关学者提出利用空间大地测量的结果建立现时板块运动模型(表 1),主要包括 APKIM 系列模型^[9,13]、SGPMM2 模型^[10]、REVEL 模型^[11]、PB2002 模型^[12]、ITRF 系列的运动模型^[14,16-17](ITRF96 之后)和 CGCS2000 板块运动模型等^[15]。其中

表 1 常用板块运动模型

Tab.1 Common Plate Motion Models

板块运动模型	数据来源	文献	精度 (mm·a ⁻¹)
AM0-2	地质和地球物理资料	[5]	—
NNR-NUVEL-1	地质和地球物理资料	[6]	3
NNR-NUVEL-1A	地质和地球物理资料	[7]	3
NNR-MORVEL56	地质和地球物理资料	[8]	3
APKIM	VLBI, SLR, GPS	[9]	—
SGPMM2	VLBI, SLR, GPS	[10]	—
REVEL	GPS	[11]	—
PB2002	GPS	[12]	—
APKIM2005	VLBI, SLR, GPS, DORIS	[13]	—
ITRF2008-PMM	VLBI, SLR, GPS, DORIS	[14]	0.3 (WRMS)
CPM-CGCS2000	GNSS	[15]	1.72
ITRF2014-PMM	VLBI, SLR, GPS, DORIS	[16]	优于 0.3 (WRMS)

ITRF2014-PMM 精度能够优于 0.3 mm/a (WRMS)^[16],CGCS2000 的现时板块运动模型 CPM-CGCS2000 精度能够达到 1.72 mm/a^[15],精度相较于地质和地球物理学的方法有了较大的提升。

无论是地学板块运动模型还是现时板块运动模型都只针对水平方向上的基准站运动,无法描述高程方向上的运动,GIA 模型相较于板块运动模型的优势在于能够描述大尺度的地壳垂直运动。GIA 模型主要用来描述地球对全球冰川消融现象的响应,主要指冰川消融后所导致的地壳隆升,地壳隆升会导致基准站在垂直方向上发生长期性变化。目前的 GIA 模型主要有 ICE 系列模型^[18-21]、Paulson07 模型^[22]和 Geruo13 模型^[23]等,其中最新的 ICE-6G 模型的精度约为 3 mm/a^[24]。

1.2 实测速度场

TRF 在实现过程中会解算出各个基准站在参考历元下的速度,所有基准站的速度即组成了该参考框架的实测速度场。比如 ITRF (见表 2)和 CGCS2000 的实测速度场。其中,ITRF 系列的实测速度场最早从 ITRF91 开始,主要由部分 SLR 和 VLBI 基准站的速度组成,精度较差,因此需要采用地学板块运动模型进行调整,以获取最终的速度场。但随着技术进

步和数据积累,实测速度场的精度和可靠性得到不断提升,从ITRF2000开始,最终速度场均由实测速度场产生。ITRF2014的实测速度场

在考虑了周年项和半年项的影响后,垂向速度精度提升了10%,其水平和垂向速度精度均优于 $0.2 \text{ mm/a}^{[25]}$ 。

表2 ITRF系列实测速度场

Tab.2 Measured Velocity Fields of ITRF

名称	输入数据	精度
ITRF91	SLR, VLBI	水平精度 $<2.6 \text{ cm/a}$,垂直精度 $<2.1 \text{ cm/a}$
ITRF92	SLR, VLBI	水平方向: $\text{SLR} \leq 5 \text{ mm/a}$, $\text{VLBI} \leq 1 \text{ mm/a}$ 垂直方向: $\text{SLR} < 5 \text{ mm/a}$, $\text{VLBI} < 3 \text{ mm/a}$
ITRF93	SLR, VLBI, GPS	水平方向: $\text{SLR} \leq 3 \text{ mm/a}$, $\text{VLBI} < 1.5 \text{ mm/a}$, $\text{GPS} < 6 \text{ mm/a}$ 垂直方向: $\text{SLR} < 5.2 \text{ mm/a}$, $\text{VLBI} < 3.2 \text{ mm/a}$, $\text{GPS} < 1.1 \text{ cm/a}$
ITRF94	SLR, VLBI, GPS, DORIS	水平方向 $<2 \text{ cm/a}$ (相对于NNR-NUVEL-1A)
ITRF96	SLR, VLBI, GPS, DORIS	$\text{SLR} < 4 \text{ mm/a}$, $\text{VLBI} < 2 \text{ mm/a}$, $\text{GPS} < 1 \text{ cm/a}$, $\text{DORIS} < 1.3 \text{ cm/a}$ (球面误差)
ITRF97	SLR, VLBI, GPS, DORIS	$\text{SLR} < 3.5 \text{ mm/a}$, $\text{VLBI} < 1.5 \text{ mm/a}$, $\text{GPS} < 3 \text{ mm/a}$, $\text{DORIS} < 1.1 \text{ cm/a}$ (球面误差)
ITRF2000	SLR, VLBI, GPS, DORIS, LLR	$<1 \text{ mm/a}$ (100个基准站)
ITRF2005	SLR, VLBI, GNSS, DORIS	$<1.5 \text{ mm/a}$
ITRF2008	SLR, VLBI, GNSS, DORIS	$<0.2 \text{ mm/a}$
ITRF2014	SLR, VLBI, GNSS, DORIS	$<0.2 \text{ mm/a}$

CGCS2000在建立之初并没有计算实测速度场,在后期开展的精化与维持工作中,根据长期的观测数据计算了基准站的线性速度,其N、E、U三个方向上的平均精度分别为 0.124 mm/a 、 0.127 mm/a 、 $0.563 \text{ mm/a}^{[15]}$,其水平速度精度与ITRF2014相当,垂直速度精度稍差。

除此之外,基于实测速度场产生的格网速度场也可用于TRF的维持。格网速度场的计算方法主要有欧拉矢量法、有限元插值法、距离加权反比插值法^[26-27]等。由于高程变化在空域和时域的复杂性会引起的模型内插精度较差,所以在应用中往往只建立水平方向上的格网速度场。文献[27]以精化得到的CGCS2000基准站线性速度为数据源,建立了中国大陆的格网速度场,其在N、E两个方向上的精度分别为 0.78 mm/a 和 $0.95 \text{ mm/a}^{[27]}$,精度要低于实测速度场。文献[28]利用相同数据源建立的CGCS2000格网速度场($2^\circ \times 2^\circ$ 和 $3^\circ \times 3^\circ$)精度也能够达到毫米级。文献[29]基于中国地壳运动监测网络的数据,利用局部无缝Delaunay三角网反距离加权模型计算了中国大陆的格网速度场,其N、E方向的中误差(root mean square, RMS)分别为 1.35 mm/a 和 1.5 mm/a 。在得到格网速度场后,通过一定的内插方法即可得到指定基准站的线性速度,进而实现参考框架的线性维持。

综合来看,板块运动模型和格网速度场的方法只能在水平方向上对参考框架进行维持,GIA

模型虽然能提供基准站的垂向速度,但其精度较差,并且这3种方法的精度均低于实测速度场,因此,在实际应用过程中往往会采用实测速度场来对参考框架进行线性维持。同时,实测速度场能够综合考虑基准站线性运动和地心线性运动对坐标的影响,而板块运动模型只能考虑基准站线性运动的影响。但是实测速度场需要长期的数据积累,并且高精度基准站的数量有限且分布不均匀,因此,对部分区域参考框架和没有实测速度的参考站来讲,需要采用板块运动模型、格网速度场以及GIA模型提供的基准站速度进行参考框架的线性维持。

1.3 地壳运动参考基准

TRF的线性维持依赖于基准站线性运动的速度,而地壳运动作为基准站线性运动的主要物理机制,地壳运动参考基准的选取会影响基准站线性速度的估计,进而对参考框架的线性维持产生影响。

目前TRF普遍采用的地壳运动参考基准为相对于地壳无整体旋转(no net rotation, NNR)基准,但是NNR基准只是水平方向上的地壳运动基准,而TRF在垂直方向上尚未有统一的地壳运动参考基准^[30]。理论上讲,地壳的垂直运动定义为相对于地球质心的运动,但是由于没有统一的地壳垂直运动基准,导致不同技术中心、不同地区计算的测站垂向运动数据存在较大差异,进而影响TRF线性维持的准确性。

有学者曾利用 GIA 模型初步研究了地壳垂直运动参考基准^[31],但是地壳均衡基准假说后期被证明不够准确。文献[32]针对这一现状分析了地壳垂直运动基准统一的必要性,提出采用 SLR 数据建立全球统一的地壳垂直运动参考基准,并且采用 ITRF2008 数据论证了方案的合理性,实现了各速度场与全球地壳垂直运动基准的统一。文献[33]采用了 ITRF2005 和 ITRF2008 两个框架下 SLR 的速度场数据建立了全球统一的地壳垂直运动参考基准,并且利用 GNSS 和 VLBI 的数据验证了该基准的可行性。除此之外,文献[30]还对以赤道附近测站垂向速度约束为零的垂直运动基准和以地壳均衡学说为约束准则的垂直运动基准进行了研究,但是发现目前两者都不适合作为全球地壳运动的参考基准。

2 非线性维持技术

目前,以 ITRF2014 为代表的 TRF 的速度场精度均能够达到 1 mm/a 以内,能够精确地对参考框架进行线性维持,保证参考框架在长期尺度上具有较好的稳定性。但研究表明,以周年性运动为主要成分的基准站的非线性运动的振幅可以达到 1~2 cm^[1],而地心运动的周年振幅在 Z 方向上也可以达到 6 mm^[25],这使得仅仅基于线性速度维持的参考框架在季节性尺度上的精度仅为厘米级^[2]。因此,如果要进一步提升参考框架的稳定性,就必须对 TRF 进行非线性维持,即需要对基准站坐标真实的非线性变化进行建模。目前坐标非线性变化的建模方式整体分为两类,一类是基于影响机制的非线性变化建模,另一类是基于坐标时间序列的非线性变化建模。

2.1 基于影响机制的非线性变化建模

基准站地心坐标非线性变化主要由基准站的非线性运动和地心的非线性运动造成。其中引起基准站非线性运动的主要因素有环境负载、热膨胀效应、潮汐形变和震后形变等。

2.1.1 环境负载及其建模

环境负载指的是地球表面大气和水随时间迁移引起的质量再分布所导致的弹性地球的负荷响应,主要包括大气负载、水文负载和非潮汐海洋负载。

研究表明,大气负载引起的基准站垂向位移可以达到厘米级,并且表现出明显的季节特性,经过大气负载改正垂向坐标时间序列的 RMS 值和周期性信号能够显著减小^[34-36]。水文负载引起

的垂向变化可达几十毫米^[37-38]。在 U 方向上,水文负载位移能够体现 GPS 坐标时间序列 50% 以上的周期特性^[39],并且 GPS 坐标时间序列和水文负载模型的结果具有很好的一致性^[40]。非潮汐海洋负载对基准站的影响最大能够达到 10 mm^[41],并且经过非潮汐海洋负载改正能够使坐标时间序列的方差和离散程度得到有效减小^[42-44]。

目前的环境负载数据及模型主要由全球地球物理流体中心(global geophysical fluids center, GGFC)和德国地学研究中心(German research centre for geosciences, GFZ)等机构提供,QOCA (quasi-observation combination analysis)软件也具有环境负载计算功能。除此之外,部分学者也提出了环境负载改正模型,比如精密环境负载模型(object model diagrams, OMD)等。GGFC 提供了不同参考框架下的全球负载位移的格网数据和单站负载位移数据,主要包括大气负载、水文负载和非潮汐海洋负载。QOCA 软件能够计算大气负载、非潮汐海洋负载、积雪负载和土壤湿度负载等 4 种负载引起的位移。GFZ 和 OMD 模型也可提供由环境负载引起的地表位移数据。从目前已有的研究来看,不同学者得到的环境负载位移不尽相同,可能与数据源之间的差异和模型性能的空间差异性有关^[45-47]。

2.1.2 热膨胀效应及其建模

热膨胀效应是基准站非线性运动的重要原因之一^[48],其影响机制主要分为两个方面,一是基准站所处基岩的热膨胀效应(thermal expansion of bedrock, TEB),另一个是基准站的观测墩的热膨胀效应(thermal expansion of monument, TEM),两者都会导致基准站在水平方向和垂直方向上产生位移。

温度变化引起的观测墩形变的计算式为:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (3)$$

式中, L 是观测墩的高度; ΔT 是空气温度变化; α 为线性热膨胀系数。在此基础上,文献[49]提出了一种能够同时顾及观测墩及其附属建筑物的改进 TEM 模型,该模型较原有模型的效果提升了 80% 以上。

而目前国内外学者使用的 TEB 模型主要有两个,一个是文献[50]提出的半空间热传导模型。文献[51]综合考虑了 TEB 和 TEM 的影响,对该模型进行了拓展,并利用改进后的模型对全球分布的 86 个 GPS 基准站进行了研究,发现热膨胀效应引起的位移振幅最大可达 3.9 mm;文献

[52]采用23个国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)基准站的数据分析了温度变化对中国区域测站垂向位移的影响,发现热膨胀效应引起的基准站垂向位移最大可达2.8 mm。另一个是基于质心不变的统一球体热传导模型^[53],在详细推导的基础上,利用仿真数据研究得出全球尺度上热膨胀效应引起的地表垂向位移和水平位移分别能够达到2 mm和1 mm。文献[54]根据该模型,利用IGS站的实测数据对热膨胀效应进行了研究,发现TEB引起的基准站垂向和水平位移的最大振幅能够达到3 mm和1.5 mm。

两种TEB模型相比,第一种模型只能得到热膨胀效应引起的基准站垂向位移,而基于第二种模型不仅能够得到垂向位移,还可以得到基准站的水平位移,但是该模型相较于第一种模型更加复杂。

2.1.3 潮汐形变模型

潮汐形变指的是在日月等天体的引力作用下固体地球产生的形变,主要包括固体潮、极潮和海潮负荷形变。在万有引力的作用下,宇宙中的天体(主要是太阳和月球)会对地球产生吸引力,这种引力的大小会随着它们与地球之间的相对位置的变化而变化,由于地球是一个非刚体,所以引力的变化会使固体地球产生周期性的形变,这种形变称作固体潮。日月等天体的引力不仅会引发固体潮,还会使海洋出现潮汐变化,引起海水质量的重新分布,进而使固体地球产生形变,这种形变称为海潮负荷形变。在极移的影响下,固体地球表面受到的离心力会发生变化,进而使地面站点出现弹性形变,这种形变称作极潮。

在上述3种潮汐形变中,固体潮的影响最大,其在高程方向上引起的形变最大可达40 cm^[55];而海潮负荷对沿海测站的影响较大,量级能够接近5 cm^[56]。固体潮和海潮具有很强的日周期性,因此在采用24 h的观测方案后,很大程度上可以消除固体潮和海潮的影响。极潮在一天当中对测站位移的影响几乎不变,周期近似为1 a,其引起的测站水平位移最大可达7 mm,垂直位移最大可达25 mm^[57]。

目前对于潮汐形变模型的研究已相对完善,国际地球自转服务(international earth rotation service, IERS)推荐了固体潮、极潮和海潮的改正模型。此外,近几年来也有学者提出了新的全球

海潮模型,如FES2014b^[58]和GOT4.10c^[59]等。

2.1.4 震后形变模型

地震会引起基准站的弛豫位移。ITRF2014和ITRF2020采用了震后形变模型(postseismic deformation, PSD)来描述地震引发的形变:

$$\delta_{\text{PSD}}(t) = \sum_{i=1}^{n'} A_i^l \log\left(1 + \frac{t - t_i^l}{\tau_i^l}\right) + \sum_{i=1}^{n''} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{\tau_i^e}}\right) \quad (4)$$

式中, $\delta_{\text{PSD}}(t)$ 为地震引起的弛豫位移; n' 和 n'' 分别为模型中对数和指数函数的数量; A_i^l 和 A_i^e 分别是第*i*个对数函数和指数函数对应的振幅; τ_i^l 和 τ_i^e 分别为对应的弛豫时间; t_i^l 和 t_i^e 分别为对应的地震时刻。

2.1.5 地心非线性运动建模

根据质量守恒定律,地球系统的质心(center of mass, CM)在不受外力时是恒定不变的,但是地球系统内部的质量迁徙会使固体地球产生形变,这种变化会导致固体地球的形状中心(center of figure, CF)产生相对于CM的运动,学界将其定义为地心运动^[60],部分文献考虑各种地球物理流体形变,将地心运动定义为CM相对于CF的变化^[25],本文采用前者的定义。

IERS协议将TRS的原点定义为CM,而在实际实现过程中,TRF的原点为由一系列基准站组成的观测网的中心(center of network, CN),近似等于CF。CF和CM之间存在着数百米的偏移量^[61],为解决这一问题,ITRF在实现过程中将其原点约束到SLR的长期解^[25,62-63],即该原点为CM的长期平均值。但是在短时间尺度上,地心运动会使ITRF的原点相对于CM产生随时间变化的偏移^[64-65]。因此,ITRF在长期尺度上可视为CM参考框架,但在季节性尺度上则表现为CF参考框架(此处忽略ITRF原点和CF之间固有的偏移)。

为了维持符合IERS协议的毫米级TRF,满足卫星精密定轨等应用对于瞬时CM坐标的需求,需要对地心运动进行建模。需要注意的是,本文讨论的地心运动是扣除CF和CM之间固有偏移后随时间变化的部分。

地心运动既包括由地表水、大气、海洋等季节性质量迁移引起的周期性运动,也包含由冰川均衡调整、板块运动等引起的长期性运动^[66-68]。研究表明,地心的长期运动小于1 mm/a^[69],但是其周期性运动的振幅可以达到5~10 mm^[25,70]。

ITRF 在实现过程中其原点采用了 CM 的长期解,考虑了地心的线性运动,但并未考虑非线性运动,即 ITRF 的原点与 CM 之间在季节性尺度上还存在差异。

目前季节性地心运动的监测方法主要有 4 种^[60],分别是网平移法、动力学法、运动学法和一阶形变法,其中前 3 种方法为直接法,最后一种为间接法。

在得到地心运动后,需要建立相应的模型对其进行描述。文献[25]在 ITRF2014 的实现过程中,利用网平移法提取了地心运动时间序列,并采用谐波函数建立了模型;文献[71]采用奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)+差分整合移动平均自回归(autoregressive integrated moving average, ARIMA)算法对基于 IGS 周解获取的地心运动进行了预测,结果显示中期和长期的预测精度分别可以达到 1 mm 和 1.5 mm。在得到地心运动后,通过改正获得以 CM 为原点的坐标,改正公式为:

$$X_{CM} = X_{ITRF2014} + \delta X_{CM} \quad (5)$$

式中, X_{CM} 为 CM 框架下的基准站坐标; $X_{ITRF2014}$ 为 ITRF2014 框架下的坐标; δX_{CM} 为地心运动。

2.2 基于坐标时间序列的非线性变化建模

基准站坐标时间序列作为建立 TRF 的关键基础数据,主要包含趋势项、非线性项和阶跃项。趋势项主要反映基准站和地心的线性运动;非线性项主要表现为周期性的变化,反映基准站和地心的非线性运动引起的坐标周期性变化,另外还包含一些由系统误差和不完善的数据处理模型造成的虚假周期信号以及噪声;阶跃项主要指的是由地震、设备更换等因素引起的坐标跳变。因此,坐标时间序列经过处理得到真实的非线性变化之后,可以用于基准站坐标非线性变化的建模,进而对 TRF 进行非线性维持。

目前,对坐标非线性变化进行建模的方式包括谐波模型、SSA、ARIMA 模型以及全球统计改正模型等。

2.2.1 谐波模型

利用谐波模型进行建模的主要思路是将包含坐标真实非线性变化的时间序列看作由若干个正余弦函数构成的时间函数,首先通过功率谱分析得到时间序列中潜在周期项对应的频率,然后利用最小二乘方法求取函数模型的待估参数,即可得到基准站的非线性运动模型。基准站非线性运动的谐波模型可表示为:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^k (a_i \cos(2\pi f_i t) + b_i (\sin 2\pi f_i t)) + \epsilon \quad (6)$$

式中, $Y(t)$ 表示基准站的非线性运动; a_i 和 b_i 是待估参数; k 是时间序列中周期项的个数; f_i 是第 $i(1 \leq i \leq k)$ 个周期项对应的频率。利用最小二乘即可求得待估参数,进而得到基准站非线性运动的谐波模型。

文献[72]利用傅里叶变换对坐标时间序列中的周期项进行了探测,并结合三角函数对 HOFN 测站的坐标时间序列进行了建模。ITRF2014 在实现过程中也采用谐波模型估计了时间序列中的周年和半年信号,并且发现加入谐波模型使得垂向速度场的形式误差降低了 10%,同时能够提高站点坐标的估计精度^[25]。

2.2.2 奇异谱分析

SSA 是一种数据驱动的非参数估计方法,其可以通过分解和重构的方式,在噪声的影响下从时间序列中提取出有用信息。文献[73]利用 SSA 对坐标时间序列中的季节性信号进行建模,并且证明了 SSA 能够提取出其中的时变周期性信号,提高了非线性变化的建模精度。针对 SSA 存在相移的问题,文献[74]提出了一种改进的 SSA 方法,即 SSA-PD(SSA with pseudo data),同时提出了相应的预报模型 SSA-P。文献[75]提出了一种小波多尺度分解和 SSA 相结合的非线性运动建模方法,并证明了其相对于 SSA 方法的建模精度能够提升约 26%。此外,在 SSA 的基础上,相关学者还引申出了多通道奇异谱分析^[76]和主成分分析的方法^[77]来对时间序列中的周期性变化进行建模。

2.2.3 全球统计改正模型

文献[78]通过研究全球测站非线性变化的振幅和相位的分布规律,基于谐波函数建立了坐标非线性变化的全球统计改正模型。通过对全球分布的 461 个 GPS 测站坐标时间序列中周期项的统计,发现了周年项振幅和初始相位随纬度的分布规律,得到了分布规律函数;在此基础上,利用谐波模型建立了 GPS 测站坐标非线性变化的全球统计改正模型。实验结果表明,该模型具有显著且稳定的性能,能够削弱多数测站坐标非线性变化的幅度,使坐标时间序列的 RMS 降低了 30%~50%,并且能够提高大规模数据处理的效率。

文献[79]建立了一个能够描述时变季节性信号的模型,该模型将去趋势项后的坐标时间序列分解为常振幅周年项和零均值随机季节性过

程,并利用线性卡尔曼滤波对时间跨度为16年的GPS坐标时间序列进行了求解,发现其剩余残差的功率相比于传统的常振幅模型减小了约30 dB。还有学者成功利用ARIMA模型^[72]、独立分量分析^[80-81]和原子范数最小化^[82]等方法对坐标时间序列中的季节性信号进行了提取和建模。

3 历元参考框架技术

目前,全球性的TRF多数是长期参考框架(multi-year reference frame, MRF),其代表是IERS发布的ITRF系列。与MRF相对应的是ERFs,ERFs的优势在于其更高的更新频率(7 d、14 d或者28 d),在这样的更新频率下,基准站的坐标隐含地考虑了所有线性运动、非线性运动以及地心运动,能够提供准实时的基准站坐标,如图1所示。其中 t_i 和 t_{i+1} 分别代表MRF的第 i 次和第 $i+1$ 次更新,如ITRF2014和ITRF2020。

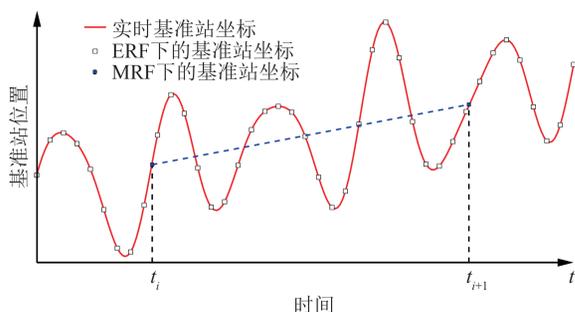


图1 基准站坐标变化

Fig.1 Variations of Station Coordinate

ERFs作为ITRS的短期实现,隐含地考虑了基准站的运动,因此,ERFs并没有计算基准站的速度参数。另外,ERFs的输入数据理论上与以ITRF为代表的长期地球参考框架一致,即GNSS、VLBI、SLR、LLR和DORIS等空间大地测量数据解算得到的SINEX(solution independent exchange)文件。ERFs可以通过一种空间大地测量技术或者多种空间大地测量技术组合的方式实现,4种技术的ERFs实现过程如图2所示^[83],其步骤如下:

1) 重构无约束法方程。利用GNSS、SLR和DORIS的SINEX文件提供的协方差信息进行法方程(normal equation, NEQ)的重构,获得自由的法方程,而VLBI直接提供自由的法方程,直接读取即可。

2) 数据预处理和时间序列分析。得到各个技术的无约束法方程后,需要对输入数据进行预

处理和时序分析。首先对输入数据进行阶跃探测,需要注意的是,由于ERFs采样间隔短,其阶跃探测往往要比MRF容易;由于ERFs单技术的法方程中包含的观测数据远远小于MRF,因此残留的异常值的影响更大,必须进行异常值的探测和剔除;在剔除异常值后,需要对各个技术法方程中的参数表达方式进行统一,由于VLBI技术的地球定向参数(earth orientation parameter, EOP)采用测段对应的中间时刻的偏差值和漂移值进行表示,与其他技术的表达方式不同,因此,必须将其转换为测段两端的偏差值。

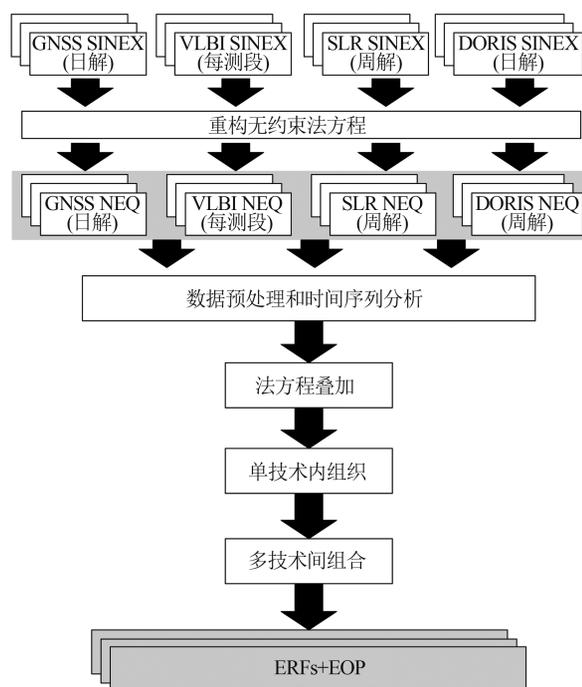


图2 4种技术的ERFs实现过程

Fig.2 Processing Scheme for ERFs Using GNSS, VLBI, SLR, DORIS

3) 法方程叠加。在对输入数据进行预处理后,根据ERFs的实现周期对法方程进行叠加,得到实现周期内的法方程。

4) 单技术内组合。对于某一技术,若采用了多个数据中心的数据,则需要将不同数据中心得到的实现周期内的法方程进行技术内组合,重构得到单技术法方程。此时,通过施加一定的约束进行基准实现,即可得到单技术ERFs。

5) 技术间组合。在进行组合之前,需要根据先验方差信息对各个技术得到的法方程进行定权,然后筛选并引入并址站局部连接向量。由于组合后的法方程存在秩亏,因此还要通过基准约束的方法来消除秩亏,进而得到多技术ERFs

的解。

目前对于 ERFs 的研究还比较少,而且其实现方法不统一,但已有研究均表明 ERFs 能够有效地解决基准站的非线性运动的影响。在国际上,主要由 IAG/IERS 联合工作组 JWG1.4 (strategies for epoch reference frames) 进行 ERFs 解算的研究。在国外,文献[4,84]利用 GPS、VLBI 和 SLR 的数据计算了周期为 7 d、14 d 和 28 d 的 ERFs,并与传统 ITRS 实现的 MRF 进行了对比。结果表明,ERFs 能够成功地监测大部分的基准站运动,只是受限于时间跨度,无法监测部分短期的运动。在国内,文献[83]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 ERFs,结果同样表明 ERFs 能够更加真实地反映基准站的运动。

4 结 语

毫米级 TRF 的实现离不开毫米级的动态维持技术。目前 TRF 实测速度场的精度已经能够达到 1 mm/a 以内,能够对参考框架进行精确的线性维持,保证其在长期尺度上具有毫米级的精度。但是在基准站非线性运动和地心运动的影响下,仅仅基于线性速度的维持方式使得参考框架在季节性尺度上的精度仅为厘米级,无法满足毫米级地球变化监测及研究的需求。因此综合考虑基准站的线性运动、非线性运动以及地心运动,对参考框架进行综合性维持是毫米级 TRF 动态维持技术的发展趋势。

目前来看,实现毫米级 TRF 的动态维持仍需要考虑以下问题:①进一步完善空间观测数据处理技术,削弱系统误差的影响,获得更加精确的基准站坐标,这是提升 TRF 动态维持精度的基础;②基于影响机制和坐标时间序列的基准站非线性运动建模精度需要进一步提升;③要进一步提高 ERFs 的实现精度和稳定性。

参 考 文 献

- [1] Jiang Weiping, Ma Yifang, Deng Liansheng, et al. Establishment of mm-Level Terrestrial Reference Frame and Its Prospect[J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(4): 1-6 (姜卫平, 马一方, 邓连生, 等. 毫米级地球参考框架的建立方法与展望[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(4): 1-6)
- [2] Song Shuli, Zhu Wenyao, Xiong Fuwen, et al. Construction of mm-Level Terrestrial Reference Frame[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(11): 2704-2711 (宋淑丽, 朱文耀, 熊福文, 等. 毫米级地球参考框架的构建[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2704-2711)
- [3] Jiang Weiping, Li Zhao, Liu Wanke, et al. Some Thoughts on Establishment and Maintenance of Terrestrial Reference Frame Considering Non-Linear Variation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 665-669 (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)
- [4] Bloßfeld M, Seitz M, Angermann D. Epoch Reference Frames as Short-Term Realizations of the ITRS [M]//International Association of Geodesy Symposia. Cham: Springer, 2015: 27-32
- [5] Minster J B, Jordan T H. Present-Day Plate Motions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(B11): 5331-5354
- [6] DeMets C, Gordon R G, Argus D F, et al. Current Plate Motions[J]. *Geophysical Journal International*, 1990, 101(2): 425-478
- [7] DeMets C. Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions [J]. *Geophysic Research Letter*, 1994, 21: 2191-2194
- [8] Argus D F, Gordon R G, DeMets C. Geologically Current Motion of 56 Plates Relative to the No-Net-Rotation Reference Frame [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(11): 1-13
- [9] Drewes H. Combination of VLBI, SLR and GPS Determined Station Velocities for Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Models [M]//Geodesy on the Move. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998: 377-382
- [10] Sun Fuping, Zhao Ming, Ning Jinsheng, et al. A Instantaneous Plate Motion Model Based up on VLBI, SLR and GPS Measurements [J]. *Journal of the PLA Institute of Surveying and Mapping*, 1998, 15(4): 250-254 (孙付平, 赵铭, 宁津生, 等. 基于 VLBI、SLR 和 GPS 实测数据的现时板块运动模型 [J]. 解放军测绘学院学报, 1998, 15(4): 250-254)
- [11] Sella G F, Dixon T H, Mao A L. REVEL: A Model for Recent Plate Velocities from Space Geodesy [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B4): ETG11
- [12] Bird P. An Updated Digital Model of Plate Boundaries [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(3): 1-52
- [13] Drewes H. The Actual Plate Kinematic and Crustal

- Deformation Model APKIM2005 as Basis for a Non-Rotating ITRF [M]//Geodetic Reference Frames. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 95-99
- [14] Altamimi Z, Métivier L, Collilieux X. ITRF2008 Plate Motion Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B7): 07402
- [15] Cheng Pengfei, Cheng Yingyan, Bei Jinzhong, et al. CGCS2000 Plate Motion Model[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2): 159-167 (程鹏飞, 成英燕, 秘金钟, 等. CGCS2000 板块模型构建[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 159-167)
- [16] Altamimi Z, Métivier L, Rebischung P, et al. ITRF2014 Plate Motion Model [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 209(3): 1906-1912
- [17] Zhu Xinhui, Sun Fuping, Wang Ren. Development and Comparison of Current Plate Motion[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2010, 27(3): 184-188 (朱新慧, 孙付平, 王刃. 现今板块运动模型的发展及其比较[J]. 测绘科学技术学报, 2010, 27(3): 184-188)
- [18] Tushingham A M, Peltier W R. ICE-3G: A New Global Model of Late Pleistocene Deglaciation Based upon Geophysical Predictions of Post-Glacial Relative Sea Level Change[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B3): 4497-4523
- [19] Peltier W. Global Glacial Isostatic Adjustment: Palaeogeodetic and Space-Geodetic Tests of the ICE-4G (VM2) Model[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2002, 17(5-6): 491-510
- [20] Peltier W R. Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G (VM2) Model and GRACE [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32: 111-149
- [21] Peltier W R, Argus D F, Drummond R. Space Geodesy Constrains Ice Age Terminal Deglaciation: the Global ICE-6G_C (VM5a) Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(1): 450-487
- [22] Paulson A, Zhong S J, Wahr J. Inference of Mantle Viscosity from GRACE and Relative Sea Level Data [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 171(2): 497-508
- [23] Geruo A, Wahr J, Zhong S J. Computations of the Viscoelastic Response of a 3-D Compressible Earth to Surface Loading: An Application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 192(2): 557-572
- [24] Ma Chao, Li Fei, Zhang Shengkai, et al. Progress of Glacial Isostatic Adjustment (GIA) Models[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(5): 1965-1972 (马超, 李斐, 张胜凯, 等. 冰川均衡调整(GIA)模型研究进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 1965-1972)
- [25] Altamimi Z, Rebischung P, Métivier 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
- [26] Jiang Zhihao. The Research on the Theory and Method of Maintenance and Renewal of CGCS2000 Reference Frame [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (蒋志浩. CGCS2000参考框架维护、更新理论与方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018)
- [27] Ning Jinsheng, Wang Hua, Cheng Pengfei, et al. System Construction and Its Progress of China Geodetic Coordinate System 2000[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5): 569-573 (宁津生, 王华, 程鹏飞, 等. 2000国家大地坐标系框架体系建设及其进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(5): 569-573)
- [28] Wei Ziqing, Liu Guangming, Wu Fumei. China Geodetic Coordinate System 2000: Velocity Field in China's Mainland [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(4): 403-410 (魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2000中国大地坐标系: 中国大陆速度场[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 403-410)
- [29] Ren Yingying, Wang Jiexian, Wang Hu, et al. Construction of Velocity Field in Chinese Mainland Based on Local Seamless Delaunay Triangulation with Inverse Distance Weighting Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1071-1080 (任营营, 王解先, 王虎, 等. 基于局部无缝Delaunay三角网反距离加权法构建中国大陆速度场[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 1071-1080)
- [30] Zhu Xinhui, Sun Fuping. Establishment Methods of Modern Crustal Motion Reference Datum [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2014 (朱新慧, 孙付平. 现代地壳运动参考基准建立方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2014)
- [31] Rong Min, Sun Fuping, Jia Xiaolin, et al. Research on Vertical Benchmark of Crustal Motion with ICE-4G [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(2): 43-44 (荣敏, 孙付平, 贾小林, 等. 以ICE-4G模型为地壳垂直运动基准的研究[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 43-44)
- [32] Zhu Xinhui, Yang Li, Sun Fuping, et al. Study on

- Reference Datum of Global Vertical Crustal Motion by SLR Techniques[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(3): 240-247 (朱新慧, 杨力, 孙付平, 等. 利用卫星激光测距技术研究全球垂直地壳运动的参考基准[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 240-247)
- [33] Dong Wenliang, Sun Fuping, Zhu Xinhui, et al. A Method of Unifying the Global Crustal Vertical Motion Reference Datum [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 358-361 (董文亮, 孙付平, 朱新慧, 等. 统一全球地壳垂直运动参考基准的方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(3): 358-361)
- [34] Klos A, Dobsław H, Dill R, et al. Identifying the Sensitivity of GPS to Non-Tidal Loadings at Various Time Resolutions: Examining Vertical Displacements from Continental Eurasia[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(3): 89
- [35] 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): 42
- [36] van Dam T, 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
- [37] Jiang W P, 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
- [38] Nicolas J, Verdun J, Boy J P, et al. Improved Hydrological Loading Models in South America: Analysis of GPS Displacements Using M-SSA [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1605
- [39] van Dam T, Wahr J, Milly P C D, et al. Crustal Displacements due to Continental Water Loading [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(4): 651-654
- [40] Tregoning P, Watson C, Ramillien G, et al. Detecting Hydrologic Deformation Using GRACE and GPS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): 15401
- [41] van Dam T, Collilieux X, Wuite J, et al. Nontidal Ocean Loading: Amplitudes and Potential Effects in GPS Height Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1043-1057
- [42] Zhou Boye, Jiang Weiping, Li Zhao. Effects of Non-Tidal Ocean Loading on IGS Stations in Coastal Areas [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(11): 1008-1013 (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(11): 1008-1013)
- [43] Wang L, Thaller D, Susnik A. Improving the Products of Global GNSS Data Analysis by Correcting for Loading Displacements at the Observation Level [C]//EGU General Assembly Conference, Vienna, Austria, 2021
- [44] Williams S D P, Penna N T. Non-Tidal Ocean Loading Effects on Geodetic GPS Heights [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(9): 2011GL046940
- [45] Ma Fuxun. The Research of the Influence of Environmental Loading on Non-Linear Motion of European GPS Stations [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017 (马符讯. 欧洲区域测站非线性运动中环境负载的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017)
- [46] Chang Hang. Research on Environmental Loading Effect in GPS Vertical Time Series [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019 (常航. GPS 垂向时序中环境负载效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2019)
- [47] Li C F, Huang S X, Chen Q, et al. Quantitative Evaluation of Environmental Loading Induced Displacement Products for Correcting GNSS Time Series in CMONOC [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 594
- [48] Sun Fuping, Tian Liang, Men Baohong, et al. Study on Correlation of Temperature Changes with GPS Station's Non-Linear Movement [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 723-728 (孙付平, 田亮, 门葆红, 等. GPS 测站周年运动与温度变化的相关性研究[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 723-728)
- [49] Wang K H, Chen H, Jiang W P, et al. Improved Vertical Displacements Induced by a Refined Thermal Expansion Model and Its Quantitative Analysis in GPS Height Time Series [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(2): 554-567
- [50] 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): ETG9-1
- [51] Yan H M, Chen W, Zhu Y Z, et al. Contributions of Thermal Expansion of Monuments and Nearby Bedrock to Observed GPS Height Changes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(13): L13301
- [52] Yan Haoming, Chen Wu, Zhu Yaozhong, et al. Thermal Effects on Vertical Displacement of GPS Stations in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*,

- 2010, 53(4): 825-832 (闫昊明, 陈武, 朱耀仲, 等. 温度变化对中国 GPS 台站垂直位移的影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 825-832)
- [53] Fang M, Dong D N, Hager B H. Displacements due to Surface Temperature Variation on a Uniform Elastic Sphere with Its Centre of Mass Stationary [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 196(1): 194-203
- [54] Xu X Q, Dong D N, Fang M, et al. Contributions of Thermoelastic Deformation to Seasonal Variations in GPS Station Position [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1265-1274
- [55] Liu Genyou. Tidal Correction to High Precision GPS Surveying [M]//Proceedings of Progress in Geodesy and Geodynamics, Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2004 (刘根友. 高精度 GPS 测量中的潮汐改正 [M]//《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)
- [56] He Jinxin, Zhang Zhetao, He Xiufeng. Characteristics and Differences Analysis of the Effect of FES2004 and GOT4.7 Ocean Tide Model Corrections on Worldwide PPP [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(6): 612-617 (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)
- [57] Ruan Rengui. Research on Key Technologies of Precise Data Processing for GNSS Networks [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018 (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)
- [58] Carrère 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, 2016
- [59] Ray R D. Precise Comparisons of Bottom-Pressure and Altimetric Ocean Tides [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4570-4584
- [60] Xie Surui, Li Fei, Yan Jianguo. Research and Development of the Geocenter Motion Estimation Based on Space Geodesy and Geophysical Methods [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(1): 15-24 (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)
- [61] Greff-Lefftz M, Métivier L, Besse J. Dynamic Mantle Density Heterogeneities and Global Geodetic Observables [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 180(3): 1080-1094
- [62] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J. ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B9): 401
- [63] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8): 457-473
- [64] Zhu Wenyao, Song Shuli. Origin and no Net Rotation of the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Progress in Astronomy*, 2010, 28(4): 321-332 (朱文耀, 宋淑丽. 国际地球参考框架 (ITRF) 的原点和无整体旋转 [J]. 天文学进展, 2010, 28(4): 321-332)
- [65] Wu X P, Ray J, van Dam T. Geocenter Motion and Its Geodetic and Geophysical Implications [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 58: 44-61
- [66] Guo Hairong, Yang Yuanxi, Jiao Wenhui. Robust Spectral Analysis on Time Series of Geocenter Motion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(4): 308-312 (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)
- [67] Qin Xianping, Yang Yuanxi. Geocenter Variations Derived from the Data of SLR to LAGEOS2 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(2): 120-124 (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)
- [68] 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
- [69] 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
- [70] Wei Na, Shi Chuang, Liu Jingnan. Geocenter Motion from GPS Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 441-445 (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)
- [71] Zhao C, Qiao L, Ma T. Estimation and Prediction of Geocenter Motion Based on GNSS Weekly Solutions of IGS [C]//AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2019
- [72] Tian Liang. Studies on GPS Station's Coordinate

- Non-Linear Movement and Its Causes[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011 (田亮. GPS 测站坐标非线性变化规律分析与机制研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011)
- [73] Chen Q, Dam T V, Sneeuw N, et al. Singular Spectrum Analysis for Modeling Seasonal Signals from GPS Time Series[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 72: 25-35
- [74] Wang X M, Cheng Y Y, Wu S Q, et al. An Enhanced Singular Spectrum Analysis Method for Constructing Nonsecular Model of GPS Site Movement [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 2193-2211
- [75] Dai Hailiang, Sun Fuping, Jiang Weiping, et al. Application of Wavelet Decomposition and Singular Spectrum Analysis to GNSS Station Coordinate Time Series[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 371-380 (戴海亮, 孙付平, 姜卫平, 等. 小波多尺度分解和奇异谱分析在 GNSS 站坐标时间序列分析中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(3): 371-380)
- [76] Rangelova E, Sideris M G, Kim J W. On the Capabilities of the Multi-Channel Singular Spectrum Method for Extracting the Main Periodic and Non-Periodic Variability from Weekly GRACE Data [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 54: 64-78
- [77] Zhang Jing, Wang Xiaoya, Hu Xiaogong. Analysis of GPS Stations' Time Series Based on PCA Method [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(6): 613-619 (张晶, 王小亚, 胡小工. 基于 PCA 方法的 GPS 台站时间序列分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(6): 613-619)
- [78] Fu Yanbo. Study on the Statistical Correction Model and the Mechanisms for Nonlinear Variations of GPS Stations' Coordinates [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018 (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:信息工程大学, 2018)
- [79] Davis J L, Wernicke B P, Tamisiea M E. On Seasonal Signals in Geodetic Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117 (B1): 403
- [80] Feng T F, Shen Y Z, Wang F W. Independent Component Extraction from the Incomplete Coordinate Time Series of Regional GNSS Networks [J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1569
- [81] Liu B, Xing X M, Tan J B, et al. Modeling Seasonal Variations in Vertical GPS Coordinate Time Series Using Independent Component Analysis and Varying Coefficient Regression [J]. *Sensors*, 2020, 20(19): 5627
- [82] Li Z, Cao L H, Jiang S Y. Comprehensive Analysis of Mass Loading Effects on GPS Station Coordinate Time Series Using Different Hydrological Loading Models [J]. *IEEE Access*, 2021 (99): 1-8
- [83] Yao Xiangdong. Research on Realization Method of Epoch Terrestrial Reference Frame for GNSS/VLBI/SLR/DORIS Multi-Source Data Fusion [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018 (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)
- [84] 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

Advances in Dynamic Maintenance Technology of mm-Level Terrestrial Reference Frame

SUN Fuping¹ JIA Yanfeng¹ ZHU Xinhui¹ XIAO Kai¹ LIU Jing¹

¹ Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China

Abstract: The mm-level dynamic maintenance technology is essential to the realization of mm-level terrestrial reference frames. The current dynamic maintenance technology mainly includes the linear maintenance based on linear velocity, the nonlinear maintenance technology that comprehensively considers the nonlinear motion of stations and geocentric motion, and the epoch reference frame. Firstly, the development status of the linear maintenance technology is summarized. The nonlinear maintenance technology and its research progress are discussed by reviewing the modelling method of coordinate nonlinear variation from the influ-

ence mechanism and data. Then, the realization process of the epoch reference frame and its application in the maintenance of the reference frames are introduced. Finally, based on the analysis of status quo, several key issues that need to be solved are proposed to achieve the dynamic maintenance of the mm-level terrestrial reference frame.

Key words: mm-level terrestrial reference frame; linear maintenance; nonlinear maintenance; coordinate time series; nonlinear motion; geocentric motion

First author: SUN Fuping, PhD, professor, specializes in geodesy and navigation. E-mail: sun.fp@163.com

Corresponding author: ZHU Xinhui, PhD, associate professor. E-mail: gnss_zzzxh@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42174047).

引文格式: SUN Fuping, JIA Yanfeng, ZHU Xinhui, et al. Advances in Dynamic Maintenance Technology of mm-Level Terrestrial Reference Frame[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1688-1700. DOI: 10.13203/j.whugis20220126 (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. DOI:10.13203/j.whugis20220126)