

# 顾及非线性变化的地球参考框架 建立与维持的思考

姜卫平<sup>1</sup> 李 昭<sup>2</sup> 刘万科<sup>2</sup> 周晓慧<sup>2</sup>

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

**摘 要:**介绍了全球及区域参考框架(ITRF)的发展现状,探讨了国际地球参考框架(ITRF)的不足,给出了使用顾及非线性变化的速度模型建立和维持参考框架的思路,并分析了解决不同类型非线性变化的处理方法。在此基础上,探讨了区域参考框架建立与维持的方法。最后展望了全球大地观测系统背景下的未来 ITRF 发展趋势。

**关键词:**地球参考框架;地球物理负载;季节性 & 非线性变化;全球大地观测系统

**中图法分类号:**P227.1

目前,全球性参考框架主要有国际地球参考框架 ITRF、IGS 参考框架、世界大地测量系统 WGS84、俄罗斯 GLONASS 参考框架 PZ90,以及正在建设中的伽利略地球参考框架 GTRF 和中国拟建的北斗地球参考框架 CTRF<sup>[1]</sup>。尽管 ITRF 是国际公认的应用最为广泛、精度最高的地球参考框架,然而由于不同用户对测站网的分布、密度和现势性有不同的要求,ITRF 网测站数量有限,全球分布也不均匀,很难完全满足导航、测图等实际应用,各国或地区根据需&要建立和维持各自的区域参考框架是必需的。区域参考框架的实质是国家或者洲际范围内对 ITRF 的加密。近年来,许多国家都相继建成了区域地心参考框架<sup>[2-7]</sup>。

国际地球参考框架现状的不足表现在:

① IERS 协议的局限性以及&与 ITRF 之间的不一致<sup>[8]</sup>。未来版本的 ITRF 需考虑各种不一致,或修改补充协议,或修改数据处理策略,以实现模型的完整与统一。

② 天线相位中心模型造成&的不一致。2006 年 11 月(GPS 周 1 400)开始,IGS 启用绝对天线相位中心模型代替相对天线相位中心模型。IGS05 框架已经采用了绝对相位中心改正,然而 ITRF2005 的建立仍然采用的是相对天线相位中心改正模型。

③ ITRF 线性模型用于建

立区域参考框架的局限性。由于各种地球物理流体负载及系统误差等的作用,大部分 GPS 测站的瞬时位置存在明显的非线性变化(主要是高程方向的季节性变化)。目前最新版本的 ITRF2005 只定义了框架的线性变化,主要考虑了板块运动的影响,仅描述了测站的长期平均运动趋势,并未考虑季节性变化,因而具有一定的局限性。

## 1 顾及非线性变化的地球参考框架

### 1.1 顾及非线性变化的速度模型的建立

对于非线性变化的处理,有两种方法可供选择:① 按照 ITRS 实现的思想,去除速度的各种非线性变化,提供测站精确的位置及线性速度信息<sup>[8]</sup>。② 对现有的位置及长期线性速度模型进行改进<sup>[9]</sup>。

现有的数据处理软件(如 GAMIT、BERNESE、GIPSY)的观测模型里已经考虑了固体潮、海潮、极潮改正,为了避免对其进行修改,保持连贯性,将其余地球物理负载对测站位置的影响融入季节变化模型而非观测模型,作为线性 ITRF 模型的一阶季节改正,是更好的处理方法<sup>[9]</sup>。也就是说,季节变化模型必须包括水文负荷、非潮汐海洋负荷、大气负荷,以及冰后回弹的

影响。将经验季节变化模型与地球物理模型相结合,把地球物理模型求得的负荷形变作为先验值,从而获得更加准确的季节性变化模型,定量解释测站的季节性变化,这对 ITRF 速度的改进具有重要意义。不过,在季节变化模型中融入 ITRF 前还需在处理策略及特定模型上达成共识。

由此,可以建立任意时刻  $t$  的测站速度模型,作为现有 ITRF 的改进,以实现真正动态的 ITRF:

$$v_t = f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) + f_4(t) + f_5(t) + v \tag{1}$$

5 项分别表示  $t$  时刻的长期趋势项(主要是由板块运动引起的线性速度)、周期变化(地球物理效应引起的季节性变化)、其他的非线性变化(非年周期、半年周期变化)、异常变化(地震或者仪器变化等局部影响造成的不连续)以及地心运动; $v$  为噪声影响,纳入随机模型考虑。这样,仅需要通过修改速度模型更新基准,建立和维持参考框架。

1.2 不同非线性变化的处理

1.2.1 测站的不连续性变化

不连续性指的是由于异常的地球物理现象,例如地震或者仪器变化引起的测站位置时间序列的突变。对 GPS 技术来说这种现象非常普遍,通过周围环境的变化以及检测并置站的时间序列可以发现该类型的不连续性变化。对时间序列进行分段,估计事件前后不同的测站位置及速度可以消除不连续性的影响。此外,缺失的天线罩校正通常会引起虚假的时间序列不连续,从而影响地球参考框架的长期稳定性<sup>[10]</sup>。建立绝对天线相位中心改正模型时获得的雷达天线罩校正可以帮助减少测站坐标时间序列的不连续性,通过尽可能减少天线罩的使用,不再使用没有经过校正的天线罩(类型标记为 DOME)可以避免此种类型不连续性的出现。

1.2.2 噪声影响

由于各种随机因素的影响,GPS 测站的位置时间序列不可避免地包含噪声,主要表现为高频特性。可以根据 SOPAC 提供的日解,利用傅立叶变换作频谱分析分离噪声和信号:高频部分作为噪声去除,低频部分作为信号保留。或者首先使用带通滤波函数初步分离噪声,然后采用小波阈值(或者提升小波)去噪方法提取真实信号。研究表明,全球 GPS 测站噪声主要由近似遵循指数定律的高频白噪声+闪烁噪声组成。由于测站遍布全球,所处的地理环境大不相同,其噪声影响可能存在差异,应该在全球范围分析 GPS 测站的噪

声频谱特征,通过计算谱指数获得最适合各区域的噪声模型,然后采用极大似然估计确定噪声分量<sup>[11]</sup>,从而更加准确地分离噪声及真实信号。

1.2.3 地球物理效应引起的季节性变化

通常认为造成季节性变化的影响源包括地球物理效应及与技术有关的系统误差。

大气压、非潮汐海洋压力、大陆储水量的变化,以及冰期后回弹这 4 种地球物理负载是引起 GPS 谐波变化的主要因素。可以通过计算和比较不同地球物理源引起的测站位移序列以及 GPS 测站位置时间序列的频谱特征,提取时间序列里隐含的季节性地球物理信号,将经验季节性变化模型与地球物理模型相结合,建立准确的负载模型,作为 ITRF 线性速度的一阶改正。冰期后回弹主要影响测站的垂直速度,对水平速度的影响较小,可以采用冰后均衡调整模型(glacial isostatic adjustment,GIA)结合地球模型实现<sup>[12]</sup>。总的来说,地球物理效应对时间序列的贡献具有明显的地域性特征,应该在全球范围分析并确定适合于不同区域的地球物理模型。

估计大地测量时间序列的季节性分量时,通常采用经验正弦函数。然而,一些可能的季节性负荷并非完全表现为正弦函数形式,因此,将地球物理模型值作为先验值,使用非参数方法求解非线性系数更为合适,这样可以避免任何呈非年周期变化的负荷的假设。由于神经网络具有处理非线性序列的巨大优势,还可以尝试使用 3 层逆推神经网络模型建立非线性地球物理输入信号与 GPS 时间序列之间的相关联系,从而达到负荷改正的目的<sup>[13]</sup>。

1.2.4 技术系统误差引起的季节性变化

与技术相关的系统误差是造成测站季节性变化的另一个主要因素。迄今为止,学者发现的谐波周期  $1.04 \pm 0.008$  c/a(或者说  $351.2 \pm 2.8$  d)不能用已知的地球物理解释,大气压、非潮汐洋底压力或者陆地储水量引起的地球物理负载序列不存在该频率。同时,并置站的 VLBI 以及 SLR 时间序列也不存在该频率谐波。考虑到该频率代表的 350 d 异常周期与 GPS 星座重复周期接近,可初步判定该谐波是某种技术误差造成的结果。U. Hugentobler 推测该现象可能与“GPS 交点年”有联系,即 GPS 星座重复其相对于太阳的惯性定向之间的间隔<sup>[14]</sup>。可以尝试通过分离轨道模型误差或者局部测站与几何形状有关的误差影响,进一步研究确定  $1.04$  c/a 谐波的影响源,否则除非地球物理信号足够大,该频率谐波将覆盖

地球物理源的影响。

除此以外,数据处理策略的不完善及变更,包括模型误差(例如未模型化的对流层影响,近场多路径效应)会引起 GPS 测站位置的缓慢变形;日带及半日带潮汐频率段的未模型化分析误差则会造成长期影响,使得测站位置时间序列产生虚假的近两星期、半年以及周年变化信号<sup>[15]</sup>。天线相位中心改正模型、截止高度角、对流层模型的变化(包括新模型的使用以及分段线性估计时间间隔的变化)也都会引起测站坐标的偏移。

Ray 研究表明,许多 IGS 测站的高程变化与 GNSS 转换、编辑及质量检核软件 TEQC 生成的各种数据质量矩阵有明显的相关性,表明 IGS 测站普遍存在近场相位多路径效应。由此说明了多数测站设计和安装天线架时的基本问题,因为这些因素可能会造成虚假信号,远远覆盖掉大尺度的地球物理负载信号。为了能更准确地探测有效信号,在 IGS 基准网的建立过程中应该加强基础设施的升级,避免近场多路径误差源的影响<sup>[16]</sup>。

#### 1.2.5 地心运动的影响

根据 IERS 协议,地球参考系的原点定义为包括海洋和大气在内的地球质心(center of mass, CM),而基于空间大地测量技术建立的 ITRF 测量的是由固定在地壳上的台站确定的几何形状中心(center of figure, CF)。将地球作为一个系统,根据质量守恒定律,地球的质心是恒定不变的。然而,由于地表水、大气、海洋和地幔对流等质量迁移的影响,台站确定的几何形状中心在不断变化。CF 相对于 CM 的变化即为地心运动<sup>[17]</sup>。为了得到定义地球参考系下的测站坐标, IERS 协议规定 ITRF 应顾及地心运动的影响。可以选用两类基本方法估计地心变化:① 动力学方法,通过估计重力场的一阶项实现;② 几何法,通过估计相对于地心框架,如 ITRF 的 3 个平移参数实现。其中,第一种方法更为精确,因为几何法对网形和测站分布敏感。

与其他地球物理现象一样,地心运动同样存在长期性以及周期性、非周期性变化趋势。目前, IERS 协议尚未给出确定的地心运动模型。从造成地心运动的根本原因入手,研究地心运动的理论模型或观测模型用于地球参考架原点改正,对进一步提高空间大地测量精度,以及地球物理研究都有一定的现实意义<sup>[18]</sup>。

#### 1.3 区域参考框架的建立与维持

针对利用 ITRF 提供的线性模型建立区域参考框架的不足,可以首先通过在全球范围内分析

和研究框架点的非线性变化特征,建立适合不同区域的速度模型,然后用得到的改进的 ITRF 模型代替框架点原有的线性模型,求得框架转换参数,从而实现区域参考框架。关于季节性变化,可先通过频谱分析确定其变化形式,如果呈现年周期、半年周期变化模式,可以建立正弦函数表示其季节性变化。如果呈现非正弦变化,则采用非参数方法,通过迭代估计框架点的季节性变化<sup>[9]</sup>。

对于区域参考框架维持,同样可以采用两种方法实现:① 根据区域特有的变形特点,通过制定区域形变模型实现所谓的“半动力基准”。该方法的关键在于建立区域形变模型。建立模型时,需考虑长期的形变趋势以及由异常事件引发的变形(例如地震或者火山作用)。② 建立基于 GPS 技术的 CORS 网进行维持。建立 CORS 维持参考框架,意味着采用站点实测坐标时间序列方式,而不是采用欧拉模型方式来维持参考框架。

就中国地区而言,第二种方法是比较科学的选择,因为中国大陆的构造块体划分存在争议,青藏高原内部及边缘地区属于非刚性板块,中轴地震带等地区构造活动十分活跃。也就是说,中国很多地区的地壳运动都具有非线性特征。利用 CORS 维持参考框架,从组织结构、运行标准到数据处理策略方面都可以参考一些成功的区域框架(如 EUREF),与 IGS 等组织加强合作。事实上,中国地壳观测网络的建设已经与 IGS 建立了合作关系<sup>[19]</sup>。

2008 年 7 月 1 日正式启用的中国大地坐标系 CGCS2000 是基于 GPS 静态会战观测实现的,不是一个动态的参考框架。刘经南等已提出了建立国家 CORS 实现与维持动态的 CGCS2000 参考框架的思想。考虑到大部分省市已建成了省/市级 CORS,但是这些网相互独立,缺乏统一的标准和管理。按照 IGS 标准组织和管理这些不同级别的 CORS 网,形成国家 CORS,并采用与建立 ITRF 相同的数据处理策略对 CORS 站观测数据进行统一处理,以实现和维持动态的 CGCS2000 框架,是 CGCS2000 的发展与应用要解决的一个主要问题<sup>[20]</sup>。为了维持框架的高精度,国家 CORS 网可以成立一个特殊项目,专门负责对 CORS 站坐标时间序列进行分析,维持坐标偏移及异常值数据库,生成测站的异常问题文件。结合各种地球物理模型以及经验季节性模型,建立准确的速度模型,向有关用户免费提供,以用于大地测量及地球动力学研究。

## 2 GGOS 影响下的 ITRF 发展趋势

目前,IERS 负责的 ITRS/ITRF 实现并非完全尽如人意。ITRF 的自治性及稳定性仍需得到改善,提供的线性速度并不能反映测站的短期变化,用于实现不同技术组合的并置站技术及其分布不均匀等。IAG 项目全球大地观测系统(global geodetic observing system,GGOS)旨在集合所有的空间大地测量技术,并将它们适当地组合,加强并置站维护的国际合作,以获取全球准确的地球参考框架,产生完全自治的 IAG 大地测量产品,为地球科学应用尤其是地球旋转、重力场以及地球物理学服务<sup>[21]</sup>。

除了已有空间大地测量技术,例如 GPS、VLBI、DORIS、SLR 以外,GGOS 计划在并置站考虑配置高质量重力仪(绝对或者超导重力仪)、时钟、水准、地球物理传感器以及验潮站等其他技术。并置站之间的联系也将得到增强,例如在所有 VLBI 站点配备 SLR,以提高 ITRF 尺度的长期稳定性;充分利用 GPS 低成本、易安装以及高精度的优良特性,在每一个 VLBI 和 SLR 站点配备 GPS 永久观测站等。

此外,除了建立并协调 TRF、CRF 及其它们之间的联系 EOP 以外,还需要考虑重力场的影响。如何将重力场纳入 ITRS 是研究的方向,该思想已得到有关组织的认可,但是其实施还需要做大量的工作。例如与 ITRF 一致的基本参考重力模型目前还并不明确。其他服务,如平均海平面永久服务 PSMSL 也将作为 GGOS 项目的一部分参与研究。随着新技术及产品的引入,如卫星测高、全球重力探测计划等,全球垂直基准(WVD)的实现也成为一个长期的话题。从用户的观点来看,同时提供具有 ITRS 下的垂直分量以及 WVD 下的高程值的全球大地网是 WVD 的首要任务。如何实现全球统一的垂直基准,也是未来的发展方向。

IERS 目前采用的方式仍然是将各种不同技术的产品(包括测站位置、速度以及地区定向参数)进行组合。GGOS 认为,对于所有的空间大地测量原始观测值使用统一的模型进行全球组合是保持不同产品之间一致性的理想严密方式,未来的 ITRF 将基于该方法建立。

## 3 结 语

ITRF 线性模型仅描述了测站的长期平均运动

趋势,并未考虑短期的季节性变化及非线性变化特征。ITRF2005 提供的站坐标残差时间序列使得探测各类非线性运动成为可能。从造成非线性运动的本质原因入手,研究和建立描述各种非线性运动的理论或者经验模型,对于动态地球参考框架的建立和维持具有十分重要的意义。就中国而言,顾及非线性变化的速度模型可以为北斗地球参考框架的建立与维持提供可靠的理论基础。未来的参考框架除了为用户提供测站在参考时刻的位置以及线性速度以外,还应该提供各种季节性变化及非线性变化模型,将其作为 ITRF 的一阶改正。

随着 GGOS 项目的实施,现有的 IERS 协议应扩充按照完全自治的方式处理与重力场以及各种地球物理现象相关的问题。例如,在 GGOS 应用背景下对 IERS 所属的全球地球物理流体中心 GGFC 提供的地球物理模型实现统一,消除 IAU 及 IERS 对于固体地球潮永久潮汐处理的不一致等。此外,卫星测高、全球重力探测计划的引入使得建立全球垂直基准成为可能,协议还应补充相关内容。

## 参 考 文 献

- [1] 魏娜. 国际地球自转及参考系统服务(IERS)协议研究及应用[D]. 武汉:武汉大学,2008
- [2] Torres J A, Altamimi Z, Boucher C, et al. Status of the European Reference Frame(EUREF)[C]. International Association of Geodesy Symposia, Perugia, Italy, 2007
- [3] Sanchez L, Brunini C. Achievements and Challenges of SIRGAS. Geodetic Reference Frames[C]. International Association of Geodesy Symposia, Munich, Germany, 2006
- [4] Craymer M R, Piraszewski M, Henton J A. The North America Reference Frame(NAREF) Project to Densify the ITRF in North America[C]. ION GNSS 2007, Fort Worth, Texas, 2007
- [5] Blewitt G, Argus D, Bock Y, et al. SNARF 1.0, An Regional Reference Frame for North America[C]. International IAG/FIG Symposium, Munich, 2006
- [6] Kamamia M. AFREF Establishment of a Common and Modern African Reference Frame[C]. The 5th AARSE International Conference, Nairobi, Kenya, 2004
- [7] 陈俊勇. 邻近国家大地基准的现代化[J]. 测绘通报, 2003(9):1-4
- [8] McCarthy D D, Petit G. IERS Conventions[OL]. <http://www.iers.org/iers/publications/tn/tn32/>, 2003

[9] Freymueller J T. Seasonal Position Variations and Regional Reference Frame Realization[C]. International Association of Geodesy Symposia, Munich, Germany, 2006

[10] Steigenberger P,Rothacher M. Effects of Different Antenna Phase Center Models on GPS-Derived Reference Fames[C]. International Association of Geodesy Symposia, Munich, Germany, 2006

[11] 李洁圆. GPS 基准站坐标时间序列特征分析方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2009

[12] Arnadottir T,Lund B,Jiang W, et al. Glacial Rebound and Plate Spreading: Results from the First Countrywide GPS Observations in Lceland[J]. Geophys J Int, 2009,177:691-716

[13] Ogaja C. A Neural Network Relation of GPS Results with Continental Hydrology[J]. Artificial Satellites,2006, 41(1):23-32

[14] Ray J, Altamimi Z, Collilieus X, et al. Anomalous Harmonics in the Spectra of GPS Position Estimates [J]. GPS Solution, 2008, 12:55-64

[15] Penna N T,Stewart M P. Aliased Tidal Signatures in Continuous GPS Height Time Series[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(23):2 184-2 187

[16] Ray J. Systematic Errors in GPS Position Estimates [C]. Presentation at IGS 2006 Workshop, Darms-tadt, Germany, 2006

[17] Dong D, Dinkey J O,Chao Y,et al. Geocenter Variations Caused by Atmosphere, Ocean and Surface Ground Water [J]. Geophys Res Lett, 1997, 24: 1 867-1 870

[18] 周旭华,高布锡. 地心的变化及其原因[J]. 地球物理学报,2000,43(2):160-165

[19] 张西光,吕志平. 论地球参考框架的维持[J]. 测绘通报,2009(5):1-4

[20] 刘经南,刘晖,邹蓉,等. 建立全国 CORS 更新国家地心动态参考框架的几点思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(11):1 261-1 265

[21] Altamimi Z,Boucher C,Willis P. Terrestrial Reference Frame Requirements within GGOS Perspective [J]. Journal of Geodynamics,2005,40:363-374

第一作者简介:姜卫平,博士,教授,博士生导师,主要从事空间大地测量和地球动力学研究。  
E-mail:wpjiang@whu.edu.cn

Some Thoughts on Establishment and Maintenance of Terrestrial Reference Frame Considering Non-linear Variation

JIANG Weiping<sup>1</sup> LI Zhao<sup>2</sup> LIU Wanke<sup>2</sup> ZHOU Xiaohui<sup>2</sup>

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

**Abstract:** Because of the mass redistribution of the geophysical fluid loading, obvious non-linear variation exists in most of the global GPS sites(mainly seasonal variations of the vertical component). And its transient motion with respect to the reference frame can not be completely described by a linear velocity. We consider and deal with the non-linear and seasonal variation characteristics of frame sites appropriately, together with combination of the linear velocity model are of great importance in the establishment and maintenance of the dynamic terrestrial reference frame. Firstly, the current status of the global and regional reference frames have been briefly introduced. Then, the disadvantages of the linear ITRF model has been investigated, leading to the thoughts of building velocity model considering different types of non-linear variation, so as to establish and maintain a dynamical reference frame. Based on this, method of regional reference frame establishment and maitenance has been discussed. Finally, we look into the future developments of ITRF under the GGOS background.

**Key words:** terrestrial reference frame; geophysical loading; seasonal and non-linear variation; GGOS