

DOI:10.13203/j.whugis20180333



文章编号:1671-8860(2018)12-2112-12

# GNSS 坐标时间序列分析理论与方法及展望

姜卫平<sup>1</sup> 王锴华<sup>1</sup> 李 昭<sup>2</sup> 周晓慧<sup>3</sup> 马一方<sup>1</sup> 马 俊<sup>3</sup>

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 香港理工大学土地测量及地理资讯学系,香港 九龙 红磡

3 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘 要:**长期累积的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)基准站坐标时间序列为大地测量学及地球动力学研究提供了基础数据。通过完善 GNSS 数据处理模型及策略,研究造成非线性运动的机制并进行有效建模,可以获得测站准确的位置和速度,不仅有助于合理解释板块构造运动,建立和维持动态地球参考框架,而且能更好地研究冰后回弹及海平面变化,反演冰雪质量变迁等地球动力学过程。首先从基准站坐标的精确获取、时间序列模型构建、时间序列信号分析等方面描述了 GNSS 坐标时间序列分析的理论及处理方法;其次,探讨了坐标时间序列噪声模型构建技术,给出了严密三维噪声模型构建方法;然后,梳理了坐标时间序列中非线性变化成因机制的研究进展;最后,总结了基于 GNSS 坐标时间序列的应用领域,并展望了其未来的发展方向。

**关键词:**GNSS 基准站坐标时间序列;非线性变化;噪声模型;坐标参考框架

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

GNSS 是重要的空间基础设施,给人类的科技和生活带来了深远的影响。1994 年,美国学者首次提出连续运行基准站的概念<sup>[1]</sup>。自此,很多国家和组织建立了大量的连续运行全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)基准站网,例如国际 GNSS 服务组织(international GNSS service,IGS)全球跟踪站网、美国连续运行参考站网、中国大陆构造环境监测网络(crustal movement observation network of China,CMONOC)等<sup>[2-3]</sup>。20 多年来,这些不断累积的 GNSS 连续运行基准站为大地测量学及地球动力学研究提供了宝贵的基础数据。

GNSS 坐标时间序列定义为一组按照时间顺序排列的基准站坐标。坐标时间序列中包含了丰富的信息,不仅能反映测站受同一区域构造应力场控制下的继承性构造运动,即长期线性变化趋势,同时也包含了地球物理效应等因素引起的非线性变化,主要表现为测站位置的周期性振荡;此外,还存在由地壳运动(如地震、火山喷发等)、更换仪器等因素引起的阶跃或震后弛豫位移。

如前所述,坐标时间序列中的线性趋势反映为构造运动。要确定精确的线性速度,就要精确分离时间序列中的非线性运动。造成坐标时间序列中非线性变化的来源主要有三大类<sup>[2]</sup>:一是虚假非线性变化,主要是由 GNSS 数据处理模型不完善或其他系统误差引起,如天线相位中心模型误差、对流层延迟误差、高阶电离层延迟误差、多路径效应等;二是真实的非线性变化,主要包括由于地球物理效应引起的基准站季节性位移,如海洋及大气潮汐、环境负载(包括大气负载、非潮汐海洋负载、水文负载等)、基岩及观测墩热膨胀效应等;三是由其他未模型化的因素引起的形变及观测噪声。因此,通过完善 GNSS 数据处理模型及策略,研究造成非线性运动的多种机制并进行有效建模,可以精确分离测站的线性和非线性运动,获得测站准确的位置和速度,不但有助于合理解释板块构造运动、建立和维持动态地球参考框架,而且还能更好地研究冰后回弹及海平面变化、反演冰雪质量变迁等地球动力学过程,具有重要的理论意义及应用价值。正因为如此,GNSS 基准站坐标时间

收稿日期:2018-09-05

项目资助:国家杰出青年科学基金(41525014);湖北省技术创新专项重大项目(2018AAA066);北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心项目(UDC 2018031321)。

第一作者:姜卫平,博士,教授,博士生导师,主要从事卫星大地测量学理论与方法及工程应用研究。wpjiang@whu.edu.cn

序列分析理论与方法及应用研究成为了当前大地测量学和地球物理学等领域的研究热点。

本文首先介绍了 GNSS 坐标时间序列分析的理论及处理方法,然后讨论了坐标时间序列噪声模型的构建,详细地阐述了坐标时间序列中非线性变化的成因,最后介绍了基于坐标时间序列的地学应用,并展望未来的发展方向。

## 1 GNSS 坐标时间序列分析理论与处理方法

### 1.1 基准站坐标的精确获取

基准站坐标的获取是建立时间序列的基础。目前在高精度 GNSS 数据处理中,影响解算结果精度的主要是不完善的 GNSS 数据处理模型及策略,包括卫星星历、地面起算点坐标误差、地面基准与星历框架/历元统一时归算方案的不同、基线解算方案与软件的不同、对流层折射的修正精度、周跳的修复与整周模糊度的固定等<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.1 解算策略

为了获得可靠的解算结果,需要采用高精度数据处理软件进行计算。目前大都采用美国麻省理工学院和 SCRIPPS 海洋研究所共同开发的 GAMIT、美国喷气动力实验室的 GIPSY、瑞士伯尔尼大学研制的 Bernese<sup>[1]</sup>、德国地学研究中心 GFZ 的 EPOS 和武汉大学的 PANDA 软件。不同的解算软件由于其采用的模型、数据处理方式等因素的不同,可能造成解算结果的系统性差异,由此得到的坐标时间序列也会存在不同的时变特性<sup>[2]</sup>。利用 GAMIT 和 GIPSY 分别处理的结果表明,虽然均方根误差在相同量级,但解算模式的不同仍会造成系统差。同样的系统差异也存在于 Bernese 和 GIPSY 的解算结果中<sup>[6]</sup>。

即使所用的软件一致,不同的解算及处理策略也会带来较大的系统误差,如电离层和对流层改正模型的选取方式、基准站坐标和卫星轨道的固定或松弛约束程度、力模型的选择、周跳修复的方法等等。这些因素的影响将造成基线解在尺度和方向上的系统误差<sup>[4,7]</sup>。例如,采用不同的 IGS 地面站和轨道约束处理 CMONOC 网中数据时<sup>[2]</sup>,将给 GNSS 网中基线向量带来  $1.5 \times 10^{-8}$  量级的尺度系统误差。即使在经过模型改正后,由于对流层延迟湿分量的改正精度只有 80%,未模型化的残余偏差依旧是影响 GPS 高程精度的主要因素之一<sup>[8]</sup>。

此外,为了确定在严格基准下的基准站地心

坐标,还需将 GNSS 网纳入到国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)中<sup>[9]</sup>,即应与 ITRF 参考框架中已知坐标的基准站数据一起处理,并应统一地面基准站坐标与卫星星历的框架及历元<sup>[10-12]</sup>。

#### 1.1.2 数据处理模型

GNSS 数据处理模型是影响坐标精度的重要因素。在采用国际地球自转服务(international earth rotation and reference system service, IERS)协议 2010 之前,GNSS 精密数据中并未考虑周日(S1)及半周日(S2)大气潮汐、高阶电离层延迟及未模型化的周期性海洋潮汐改正的影响<sup>[13-15]</sup>。这 3 个因素是造成基准站虚假非线性运动的主要因素。此外,目前的大气传播延迟、太阳辐射压、短周期(小于 24 h)地球定向参数潮汐、海洋极潮等模型还不完善,仍会造成至少毫米级精度的影响。

目前,基准单天解的精度在水平上已经达到 3~5 mm,高程上达到 6~8 mm<sup>[2]</sup>。未来通过发展空间大地测量技术数据处理方法,完善数据处理模型,有望将基准站单天解坐标水平精度提升至 2~3 mm,垂直精度提升至 5 mm 以内。

### 1.2 坐标时间序列模型的构建

#### 1.2.1 时间序列函数模型

坐标时间序列函数模型<sup>[12,16]</sup>可以表示为:

$$y(t_i) = D + v \cdot t_i + \sum_{j=1}^n A_j \cdot \cos(\omega_j t_i + \varphi_j) + \sum_{k=1}^{n_g} g_k \cdot H(t_i - T_k) + \varepsilon(t_i) \quad (1)$$

式中, $y(t_i)$ 为  $t_i$  时刻下的基准站位移; $D$ 为截距; $v$ 为线性速度; $A_j$ 、 $\omega_j$ 和  $\varphi_j$ 分别为第  $j$  个谐波对应的振幅、角频率(年周期为  $2\pi$ ,半年周期为  $4\pi$ )和相位; $n$ 为谐波个数; $g_k$ 为由于各种原因引起的阶跃; $T_k$ 为发生阶跃的时刻; $H$ 为海维西特阶梯函数,阶跃前为 0,阶跃后为 1; $\varepsilon(t_i)$ 为随机过程。

#### 1.2.2 时间序列随机模型

大量研究表明,GPS 坐标时间序列中包含有色噪声<sup>[17-19]</sup>。纯白噪声的假设会导致速率不确定度将被低估达一个数量级<sup>[18]</sup>。正确分类及量化噪声分量对于合理应用 GPS 坐标时间序列数据具有重要的意义。坐标时间序列中随机过程可以采用幂律过程来描述,其随时间变化的功率谱为<sup>[19]</sup>:

$$P(f) = P_0 (f/f_0)^\kappa \quad (2)$$

式中, $P(f)$ 为功率谱密度; $\kappa$ 为谱指数; $f$ 为频率; $P_0$ 、 $f_0$ 为常数。当谱指数为 -1 和 -2 时,幂律噪声分别对应为闪烁噪声(flicker noise, FN)和随

机游走噪声(random walk noise, RW)。

其他常见的有色噪声还包括一阶高斯马尔科夫模型(First-order Gauss Markov Model, FOGM)、带通模型(back propagation, BP)、自回归滑动平均(Auto-Regressive moving average model, ARMA)模型等<sup>[20-21]</sup>。坐标时间序列中的随机过程可以由上述任意有色噪声(colored noise, CN)和白噪声(white noise, WN)的组合描述,不同的最优噪声模型可能和不同的基准站观测条件、不同的观测墩固连模式、不同数据处理策略等因素有关<sup>[20]</sup>。

### 1.2.3 阶跃、震后形变的探测与估计

阶跃、同震及震后形变等因素也会影响线性速度和季节性信号的估计<sup>[21]</sup>,因此需先对其进行探测并有效建模。

引起时间序列中阶跃的原因各异。研究表明,约有2/3的阶跃是由地震、火山爆发等地球物理效应,或者仪器更换、固件及软件升级等非地球物理因素导致,剩下的阶跃可能由其他未知的人为因素引起<sup>[21]</sup>。较为明显的阶跃可以通过检查原始时间序列完成,如地震等引起的多个方向“断崖式”的跳变,其大小可通过将构造活动发生区域内测站震前及震后时间序列进行平均得到。对于量级较小的阶跃,可采用最大似然估计方法对式(1)中的阶跃参数进行估计<sup>[22]</sup>。部分学者提出了STARS方法探测时间序列中的不连续现象<sup>[23]</sup>,无需提供阶跃发生时刻和大小等先验信息。此外,也可以通过求解同时顾及构造速度和位移的非线性趋势项,跳过阶跃探测并得到线性趋势<sup>[24]</sup>。尽管目前很多软件中的方法都具备了阶跃探测和估计的功能,如TSOFT、iGPS和Hector等<sup>[25]</sup>,但仍然有相当一部分小量级的阶跃难以探测,可能会对速度估值产生最大0.2~0.3 mm/a的偏差<sup>[21]</sup>。

对位于地质构造运动较活跃区域的基准站,还需对同震及震后位移进行建模<sup>[26]</sup>。通常的处理方式是在地震发生时刻处分段,分别估计震前及震后的测站线性速度,但这样估计的线性速度并不准确。因此,在最新的ITRF2014版本中,采用了将对数函数和指数函数结合的模式对震后形变进行建模<sup>[10]</sup>:

$$\delta_{\text{PSD}}(t) = \sum_{i=1}^{n^l} A_i^l \log\left(1 + \frac{t - t_i^l}{\tau_i^l}\right) + \sum_{i=1}^{n^e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{t - t_i^e}{\tau_i^e}}\right) \quad (3)$$

式中, $n^l$ 和 $n^e$ 分别为参数模型中对数、指数函数

的数量; $A_i^l$ 和 $A_i^e$ 分别为第 $i$ 次对数、指数函数对应的振幅; $\tau_i^l$ 和 $\tau_i^e$ 分别为对应的弛豫时间; $t_i^l$ 和 $t_i^e$ 分别为第 $i$ 次对数、指数函数的地震时刻。

## 1.3 坐标时间序列信号分析方法

### 1.3.1 时域分析方法

常用的时域下参数估计方法包括极大似然估计(maximum likelihood estimate, MLE)和最小二乘估计,其中后者包括传统的最小二乘谐波估计和顾及方差协方差阵的最小二乘方差估计<sup>[27]</sup>。

假设式(1)中随机过程 $\epsilon(t_i)$ 由振幅分别为 $a_w$ 和 $b_\kappa$ 的白噪声及幂律噪声组成:

$$\epsilon(t_i) = a_w \cdot \alpha(t_i) + b_\kappa \cdot \beta(t_i) \quad (4)$$

其观测值协方差阵为:

$$\mathbf{C} = a_w^2 \cdot \mathbf{I} + b_\kappa^2 \cdot \mathbf{J}_\kappa \quad (5)$$

式中, $\mathbf{I}$ 为单位阵; $\mathbf{J}_\kappa$ 为对应谱指数为 $\kappa$ 的幂律噪声协方差阵。对于选定的噪声模型,最优参数估值为坐标序列残差 $\hat{\epsilon}(t_i)$ 与其协方差联合概率密度值最大的一组解,即联合概率函数值的对数达到最大:

$$\ln[\text{lik}(\hat{\boldsymbol{\epsilon}}, \mathbf{C})] = -0.5[\ln(\det \mathbf{C}) + N \ln(2\pi) + \hat{\boldsymbol{\epsilon}}^T \mathbf{C}^{-1} \hat{\boldsymbol{\epsilon}}] \quad (6)$$

MLE作为一种无偏估计,能同时估计时间序列中函数模型和随机模型中各参数及其不确定度。但由于需要反复迭代及求逆,MLE方法的运算速度为时间序列观测值个数的三次方量级。例如,采用CATS软件分析单个测站一个方向10 a的数据需要6 h<sup>[28]</sup>。因此,Bos等提出了一种具有改进效果的MLE方法,利用可用于快速算法求逆的Toeplitz方差矩阵,将运算次数降低到了观测值平方量级<sup>[22]</sup>;在此基础上又提出了一种针对数据缺失情形下的快速MLE算法<sup>[25]</sup>,实现了多类参数的无偏同步快速估计。

方差/协方差分量验后估计方法可以通过对同种观测值的不同误差源进行定权,通过最小二乘的方法实现对坐标时间序列模型参数和噪声分量的最优估计<sup>[27]</sup>。但在处理实际观测数据时,随着测站数量和观测时间的线性增加,该方法的迭代过程也非常耗时。此外,其他学者还引入了Allen方差、M估计等参数估计方法<sup>[29]</sup>。

### 1.3.2 频谱分析

对信号进行频谱分析可以获得较时域分析更多的有用信息,如动态信号中的各频率成分和频率分布范围,再结合最小二乘方法估计谱指数,更好地认知时间序列中的谐波和噪声特性<sup>[30-31]</sup>。频谱分析通常采用快速傅里叶变换或者周期图法实现,前者适用于均匀采样的数据<sup>[17]</sup>,而后者可以

处理有数据间断和缺失的时间序列<sup>[28]</sup>。

### 1.3.3 时变信号的提取

利用式(1)估计的周年、半年振幅和相位均为常数。但事实上,部分时间序列季节性信号的振幅是随时间变化的,如水储量变化引起的季节性位移。为了估计时变季节性信号,有学者采用了非参数模型、分段连续线性多项式估计或者半参数模型等方法进行了研究<sup>[13,32-36]</sup>。

奇异值谱分析(singular spectral analysis, SSA)是一种非参数估计方法,可以在时间域内将时变的周期性信号从单一变量的坐标时间序列中有效地提取出来,而不需要任何其他的先验信息<sup>[35]</sup>。SSA 的基本思路是选定一个合适的窗口  $L$ ,将长度为  $N$  的坐标时间序列转换成  $N-L+1$  行、 $L$  列的轨迹矩阵,通过将轨迹矩阵进行奇异值分解,把原始的时间序列分解为多个不同周期的时变信号分量,并根据信号间相关性将分量组合,得到重构的坐标时间序列。由此引申了可处理不连续时间序列的 SSA 方法<sup>[37-38]</sup>和能处理多通道数据的 SSA 方法<sup>[36]</sup>。作为多通道 SSA 方法的特殊情况,主成分分析方法(principal component analysis, PCA)可通过对角化协方差阵并对多源时间序列降维,来识别并分离出数据中的多样化信息<sup>[32,39]</sup>。

此外,作为一种时间窗和频率窗都可改变的时频局域化分析方法,小波分析技术可在时、频域下表征信号的局部特征,也是时间序列变化特性分析的重要工具<sup>[40]</sup>。

## 2 GNSS 坐标时间序列噪声模型的构建

当前,普遍认为 GNSS 坐标时间序列噪声特性的最优随机模型为  $FN+WN$ <sup>[17-20]</sup>。但严格来说,基准站的实际噪声特性更为复杂,随着时间的推移和序列不断增长,噪声的长周期分量(例如随机游走噪声)将更加显著,为探测低频噪声的存在提供了有利的条件。

### 2.1 基准站最优噪声模型

根据不同的随机噪声模型假设,利用式(1)并采用 MLE 准则,可以估计确定模型和随机模型中各参数及其不确定度。不同的噪声模型组合将得到不同的极大似然对数值,数值越大,结果越可靠<sup>[19]</sup>。然而,噪声模型中未知参数的增加也会使 MLE 估值增大<sup>[20]</sup>。因此需选择一组最优的噪声模型,使得到的无偏参数估计更接近真实数值。

### 2.1.1 最优噪声模型判断准则

Langbein 提出了一种保守估计准则<sup>[20]</sup>,可判断不同噪声模型的优劣,其思路是:①分别计算  $FN+WN$  及  $RW+WN$  组合模型的 MLE 值,选取 MLE 值较大的模型作为零假设;②将非整数谱指数幂律噪声(power law noise, PL)+ $WN$  与  $FN+RW+WN$  模型的 MLE 值分别与零假设作比较,如果 MLE 差值大于 2.6 则拒绝零假设,认为该模型更优,否则接受零假设,认为所选的复杂模型无效。若两模型均优于零假设,则选择 MLE 值较大者作为最优模型;③将  $BP+PL+WN$  与  $FOGM+RW+WN$  模型计算得到的 MLE 值与前面得到的最优值比较,接受  $BP+PL+WN$  模型的阈值设为 2.6,接受  $FOGM+RW+WN$  模型的阈值设为 5.2。

此外,Bos 等提出利用 Akaike and Bayesian 准则,根据计算出的较小 Akaike 信息准则(Akaike information criterion, AIC)或 Bayesian 信息准则(Bayesian information criterion, BIC)值来选定相对较好的噪声模型<sup>[25]</sup>。Amiri-Simkooei 等提出 W-检验方法选择最优噪声模型<sup>[27]</sup>。

### 2.1.2 全球、区域基准站网最优噪声模型

已有研究成果表明,全球和区域基准站网的最优噪声模型存在显著差异。Mao 等采用谱分析和极大似然估计方法估计了 23 个全球 IGS 站的噪声特性,得出  $WN+FN$  是描述这些站的最佳模型<sup>[17]</sup>。Langbein 估计了加利福尼亚南部及内华达南部地区 236 个连续运行参考站(continuous operational reference system, CORS)站的噪声模型<sup>[20]</sup>,得出 50%~60%测站的最佳噪声模型为  $FN$  或者  $RW$ ,25%~30%表现为  $FN+RW$  或者  $PL$ ,剩余的 15%则位于最复杂的噪声模型  $BP+PL$  及  $FOGM+RW$  之间。

李昭等的研究表明,中国区域 IGS 基准站的噪声模型存在多样性,且各分量具有不同的噪声特性,主要表现为  $FN+WN$  和  $BP+PL+WN$ <sup>[41]</sup>。同时,噪声模型与地表质量负载及其测站速度、速度不确定度之间的定量分析表明地表质量负载会造成测站的噪声特性变化,主要表现为带通及随机漫步噪声特征,不同噪声模型对部分测站线性速度及不确定度影响差异甚至超过  $1\text{ mm/a}$ <sup>[41]</sup>。

### 2.2 严密三维噪声模型的构建

当前,坐标时间序列中的噪声分析普遍基于单一分量分别进行,忽略了分量与分量间的相关性<sup>[20]</sup>。这不仅会使待估参数不确定度估计偏小,

而且会使周期振幅等参数出现偏差,使得构造解释和瞬时信号探测比较困难<sup>[27]</sup>。在顾及不同坐标分量间交互相关性的情况下,不同的噪声估计方法表现也有差异。建立顾及不同分量噪声之间相关性的严密三维噪声模型(描述 GPS 站坐标时间序列三分量噪声相互关系的函数模型),有助于获得准确的噪声方差,进而获得测站线性以及非线性运动参数估值更加真实的不确定度<sup>[27]</sup>。

GPS 基准站不同分量噪声之间存在相关性是建立三维噪声模型的必要条件,并且相关性的强弱会影响三维噪声模型的拟合效果。因此,在建立 GPS 基准站三维噪声模型之前,有必要分析不同分量噪声之间的相关性<sup>[42]</sup>。以往测站的空间相关性分析大多基于拟合不同测站相同坐标分量的时间序列得到的残差序列<sup>[19,43]</sup>,或根据单站不同分量的噪声方差以及协方差获得不同分量噪声的相关性,如 Amiri-Simkooei 在仅考虑 WN 的情况下发现单个测站不同分量噪声之间的相关性并不明显<sup>[44]</sup>。然而测站的空间相关性分析普遍基于单一分量,忽略了 GPS 站网不同分量噪声之间的相互关系。Jiang 等选取美国南加利福尼亚州 126 个测站的坐标时间序列,在 FN+RW+WN 噪声组合下分析了不同分量噪声向量之间的相关性<sup>[42]</sup>。结果表明,各分量 WN 向量之间存在中等程度以上的相关性,水平与垂直分量上 FN 向量相关性在去除共模误差后为中等程度。

Jiang 等提出利用主轴回归准则构建 GPS 坐标时间序列二维噪声模型<sup>[42]</sup>。在此基础上,马俊提出基于奇异值分解建立 GPS 站网的三维噪声模型,其基本思想是通过三分量噪声向量构成的矩阵进行奇异值分解,结合三分量噪声向量的均值建立噪声振幅估值的最佳空间拟合直线<sup>[45]</sup>。结果表明,三维噪声模型可以获得更加准确的噪声振幅,进而能够获得更加精确的速度估值及其不确定度,结果显著优于二维噪声模型。该模型仅可用于区域 GPS 网,因此在未来的研究中有必要构建不依赖于 GPS 站网的单个测站的三维噪声模型。

## 3 GNSS 坐标时间序列非线性变化成因研究

### 3.1 虚假周期性信号的来源

引起基准站坐标时间序列中虚假周期性信号的来源包括与卫星轨道有关的误差、接收机端信号的误差、信号传播过程中的误差以及潮汐等建

模误差,一般在时间序列中表现为周期性(如季节性)的振荡,需对其进行有效削弱<sup>[2]</sup>。

#### 3.1.1 GPS 轨道周期误差

目前,IGS 提供的轨道精度已优于 3 cm。尽管如此,轨道模型不完善依然会导致基准站位置解算出现误差,如地球辐射压影响等<sup>[46]</sup>。Rodriguez-Solano 等构建了地球反照辐射模型,并对 GNSS 卫星所受地球反照辐射影响进行了分析,发现其导致的卫星轨道径向分量影响可达 1~2 cm<sup>[47]</sup>。由于基准站位置与卫星轨道密切相关,轨道模型误差势必会影响基准站坐标的精度,在坐标时间序列中引入与空间、时间相关的噪声。

卫星轨道的重复周期(即交点年,周期为  $(351.2 \pm 2.8)$  d)也会通过基准站与卫星间的相对位置关系传递至基准站位置中,表现为虚假的周期性信号及其谐波(1.04 cpy,约 351.2 d),存在于几乎所有的 IGS 产品中<sup>[48]</sup>。Ray 等分析了亚周日地球旋转参数(earth orientation parameters, EOP)潮汐误差与 GPS 交点年误差间的耦合关系,认为该误差会导致多个轨道参数达 20% 量级的影响,这些影响同样会反映到由此得到的地面定位结果中<sup>[48]</sup>。

#### 3.1.2 不完善的数据处理模型

对于已在 GPS 精密数据处理阶段建模的过程,如海洋潮汐、对流层与电离层延迟误差等,由模型不完善或误模型化引起的误差同样会引起坐标时间序列中的虚假周期性信号。

长距离 GPS 精密数据处理必须计算海洋潮汐负载产生的测站位移,如 GAMIT 中通常默认仅考虑 11 个离散海潮主分量的影响<sup>[49]</sup>。研究发现,周日、半周日潮汐频段的未模型化误差会造成长期影响,使得时间序列产生虚假的近两周、半年以及周年变化信号,从而导致地球物理信号的错误解释<sup>[50-51]</sup>。完全忽略次潮汐及交点调节的影响也会造成高纬度地区 5 mm 的均方根误差,因此,IERS 协议 2010 中建议考虑其他小潮汐分量(minor ocean tides, MOT)的影响<sup>[52]</sup>。Li 等发现对于部分沿海测站,忽略 MOT 效应会使垂向速度产生 10% 左右的偏差,而经 MOT 改正后时间序列均方根误差可显著降低<sup>[49]</sup>。

高阶电离层延迟误差(high-order ionospheric delay, HID)也是时间序列中虚假非线性信号的来源之一<sup>[53-54]</sup>。研究发现,未模型化的二、三阶电离层延迟可能是造成 IGS 基准站南北方向较强的半年振荡<sup>[53]</sup>。HID 改正也可以有效削弱区域网 CMONOC 基准站北方向和垂向时间序列半

周年周期信号<sup>[54]</sup>。目前,IGS 发布的全球 IGS 基准站数据第二次重新处理计划已将二阶电离层改正纳入最新数据处理策略。然而,迄今为止大多数 GPS 数据处理仅考虑了一阶电离层延迟改正,例如中国地心坐标系 CGCS2000 的建立。

大气的昼夜加热使得地表压呈现周日(S1)、半周日(S2)及更高谐波频率的振荡,这种大气潮汐会造成基准站的周期性运动,振幅与海洋潮汐负载中某些分量影响级相同<sup>[52]</sup>。研究发现,忽略 S1-S2 大气潮改正将导致虚假周年及半年信号的产生。Li 等的研究也表明,S1-S2 大气潮汐引起的虚假周年信号振幅可超过 1 mm,尤其是对赤道附近测站<sup>[55]</sup>。

除此之外,天线相位中心模型、对流层投影函数模型误差、多路径效应等也会引起坐标时间序列的虚假周期性信号。例如,Steigenberger 等指出,相对天线位中心模型到绝对天线相位中心模型的转换对地球参考框架及坐标时间序列具有重要的影响<sup>[56]</sup>;选择不适当的先验对流层延迟及投影函数也会在时间序列中引入时间相关的噪声,不同模型在垂直方向引起的坐标差异可达 4 mm<sup>[8,55]</sup>,误模型化误差导致的时间序列虚假周年及半年信号最大振幅可达 5 mm<sup>[57]</sup>。此外,基准转换时忽略框架点的周期性变化会导致转换参数的扭曲,并渗透至所有测站的坐标时间序列造成虚假的运动趋势<sup>[13]</sup>。

### 3.2 基准站的季节性运动信号来源

尽管大部分地球物理效应已在数据处理过程中有效建模,如固体、海洋、大气潮汐等。然而,残差时间序列中的绝大部分季节性(非线性)信号仍由未模型化的地球物理效应导致,主要是环境负载、基岩和观测墩标的热膨胀效应等两个因素造成<sup>[58-59]</sup>。

#### 3.2.1 环境负载效应

地球表面大气和水的质量变化会导致弹性地球的负荷响应,表现为季节性的地表位移。已知的环境负载包括大气压、洋底压和陆地水储量产生的负载。

大气质量负荷包含潮汐大气负荷和非潮汐大气负荷,前者由太阳、月球引力和热力引起,表现为半周日和周日两个周期分量。已有研究表明,大气压变化引起的测站位移可占时间序列高程位移总方差的 24%,造成的最大峰值位移可达 18 mm,改正后时间序列的 RMS 值减小 2 mm<sup>[58]</sup>,且顾及地形影响的大气负荷改正效果更为显著<sup>[60]</sup>。大气负荷可在数据处理的观测值层面进

行改正,也可通过现有模型对时间序列位移进行改正<sup>[61]</sup>。虽然两种策略对时间序列的改正效果并无太大差异,然而大气潮汐负荷的有效建模可以显著削弱时间序列中虚假的交点年和半年周期信号<sup>[55, 61]</sup>。

海洋周期性运动引起的质量荷载变化会造成高达分米级的垂直方向地表位移。海洋潮汐已在数据处理过程中采用海潮模型改正<sup>[52]</sup>,如目前整体精度最好的 FES2004 模型。由地表风、气压、热量、湿度变化等因素驱动的海水质量迁移也会造成海水质量的变化,引起的地表形变称为非潮汐海洋负载位移(non-tidal ocean loading, NTOL)。研究表明,NTOL 造成的基准站位移最大可达 10 mm,尤其是对于沿海地区或海岛基准站<sup>[62]</sup>;利用洋底气压数据计算的 NTOL 改正可将 70%的测站高程时间序列离散度削弱,可使部分沿海区域时间序列方差减小 44%<sup>[49,63]</sup>。

季节性的海洋、陆地和大气变化引起的大陆水储量季节性变化会造成地表水文负载(continental water storage loading, CWSL),引起的地表垂向位移可达几十毫米<sup>[15]</sup>。目前,主要通过两种思路研究 CWSL 引起的地表形变对时间序列的影响:一是采用各机构提供的最新全球陆地水模型对时间序列的季节性位移进行修正,如欧洲中尺度天气预报中心的再分析模型、全球陆面数据同化系统模型、MERRA2 模型等;二是基于 GRACE (gravity recovery and climate experiment)时变重力场反演大尺度的水质量变化引起的地表位移,比较其与时间序列季节性信号<sup>[64-66]</sup>。大量的研究成果均证实:无论是全球尺度下还是区域尺度下的基准站网<sup>[67-68]</sup>,GPS 位移时间序列、水文模型和 GRACE 反演结果具有一致性。研究表明:CMONOC 网基准站 GPS、GRACE 观测值与实际降水量间在时间尺度上具有一致性。除此之外,地下水位变化等区域效应也是引起 GPS 时间序列季节性信号变化的潜在贡献因素之一<sup>[69-70]</sup>。

许多学者根据以上 3 种环境负载证实了其引起的地表位移对于 IGS 基准站产生季节性运动<sup>[15, 34, 58]</sup>。环境负载也对全球、区域坐标框架参数估计有显著影响<sup>[11,13]</sup>。例如,经环境负载模型改正后,坐标时间序列的单位平方根方差因子减小 3.1%,且几乎所有与框架相关的转换和尺度参数时间序列中的周年信号被削弱了 50%以上<sup>[14]</sup>。虽然 GPS 和环境负载模型间的一致性较好,但不同学者得到的环境负载对时间序列的贡

献呈现显著的差异,这主要和地球物理数据来源、GPS时间序列、参考框架间的差异有关。例如, Jiang等构建了精密环境负载模型(object model diagrams, OMD),发现全球约74%的IGS站时间序列经OMD模型改正后均方根误差减小,效果优于已有的全球地球物理流体中心(Global Geophysical Fluids Center, GGFC)模型和QLM模型<sup>[15]</sup>。比较根据不同数据源获得的环境负载效应的精度及差异十分必要,其结果有利于确定最优环境负载模型,以期合理解释、精确量化并有效修正坐标时间序列中的季节性信号<sup>[3,15]</sup>。

### 3.2.2 热膨胀效应

GPS天线观测墩和基岩由温度周期性变化引起的位移也是时间序列中季节性信号的主要来源之一,造成的最大周年振幅可超过5 mm,在温度季节性变化较为显著的北半球中、高纬度地区影响尤为剧烈<sup>[58, 71-73]</sup>。

在地表温度的变化下,基准站所处基岩表层与内部受热不均,产生的季节性膨胀与收缩称为基岩热膨胀效应(thermal expansion of bedrock, TEB)位移。Dong等利用半空间热传导TEB模型,估计其引起的垂向周年振幅不超过0.5 mm<sup>[58]</sup>; Yan等将该模型扩展至谐波形式,发现在北半球部分区域TEB周年振幅可达1.3 mm<sup>[71]</sup>。将无限半空间模型拓展至水平方向的结果表明<sup>[69-70]</sup>,TEB最多可以解释25%的GPS坐标时间序列周年振幅。根据Fang等提出的统一球体热传导模型<sup>[74]</sup>, Xu等计算了TEB引起的全球范围内的水平和垂向位移<sup>[74]</sup>,最大周年振幅分别可达1.5 mm和3 mm,联合当前的环境负载模型在全球范围内平均可以解释N、E、U三方向29%、27%和50%的周年振幅。

不同高度、材质、结构的GPS天线观测墩也会由于环境温度的变化产生周期性的位移,称为观测墩热膨胀效应(thermal expansion of monument, TEM)。已有研究表明,TEM不仅具有季节性变化特征<sup>[71]</sup>,而且由日照等因素引起的观测墩表面温度日夜温差也会在时间序列中产生周日、半周日变化,其最大水平方向日变化位移可达3 mm<sup>[75]</sup>。此外,TEM也是短基线时间序列中周年振幅的主要贡献因素,最高可解释90%以上的垂向周年振幅<sup>[76]</sup>。

### 3.3 其他未知来源

坐标时间序列中还存在着一种时空相关的公共误差,称为共模误差,是区域范围基准站网(几百千米)日解时间序列中的最主要误差源之

一<sup>[32, 77]</sup>。由于难以通过已知地球物理效应进行建模、改正,通常采用PCA或Karhunen-Loeve展开(Karhunen-Loeve expansion, KLE)等时空滤波方法对这部分误差进行消除、削弱<sup>[39]</sup>,在此基础上发展了其他滤波方法<sup>[77-78]</sup>。

## 4 坐标时间序列的应用

当前,坐标时间序列及其产品的应用涵盖了大地测量、地球科学、大气科学等诸多领域。结合其他空间大地测量手段(VLBI、SLR、DORIS等),GNSS坐标时间序列可用于建立并维持全球或区域坐标参考框架,提供大地测量的空间基准<sup>[10, 12]</sup>;根据坐标时间序列估计的水平及垂直方向线性速度可用于研究板块运动、冰后回弹等地球动力学现象<sup>[26]</sup>;联合测高卫星及验潮站观测数据,用于全球海平面高变化的监测<sup>[78]</sup>;基于坐标时间序列的电离层和对流层产品<sup>[53]</sup>,可用于大气水汽监测等气象领域;联合基准站垂向位移和可降水量数据,研究季风气候及干旱间的耦合关系<sup>[79]</sup>;联合坐标时间序列中季节性信号和地球物理模型,研究大尺度的大气和水文质量负荷对弹性地球的作用及影响机制等<sup>[64]</sup>。

### 4.1 地球、区域坐标参考框架的建立与维持

地球参考框架是地球参考系统的实现。地球参考框架不仅能够给测绘和工程提供几何和物理基准,而且可以为全球变化在气象和地球物理方面的监测信息提供基准,如海平面变化、冰质量的平衡、地表水的变迁、地球动力学、地壳运动、大气降水、电离层变化等<sup>[9]</sup>。

目前,基准站坐标时间序列产品是维持现代、三维、动态坐标参考框架的主要手段<sup>[10, 12]</sup>。随着GNSS基准站数目的不断增多,GNSS坐标时间序列的精度很大程度上决定了ITRF的精度<sup>[10-12]</sup>。传统坐标参考框架通常只考虑了基准站的线性速度。基于基准站的线性速度来维持参考框架,其精度仅能达到厘米级。在2016年发布的最新的参考框架版本ITRF2014中,首次提出叠加时间序列时应采用时间跨度足够长的数据估计周年、半年周期项<sup>[10]</sup>。即便如此,目前不同机构由不同地球物理数据来源提供的环境负载改正模型仍存在较大差异<sup>[15]</sup>,使得ITRF2014的整体精度仍难以达到毫米级。

利用坐标时间序列数据来构建顾及非线性变化的地球参考框架,首先应去除或者削弱时间序列中的虚假信号特征,获取“干净”、可靠的时间序

列;然后分析、建模、解释时间序列中的非线性变化;最终获得合理可靠的基准站运动结果。在此基础上,新一代地球参考框架的整体精度有望达到毫米级<sup>[2,12]</sup>。

#### 4.2 地壳运动与大型构筑物变形及地质灾害监测

目前,坐标时间序列产品已成为理解地球动力学过程以及大型构筑物变形机制的重要手段。例如,全球尺度的板块构造、中等尺度的板块内部地块运动、较小尺度的块体内部变形、更小范围和尺度的建筑物变形(水库、大坝、高速铁路等大型结构体)以及滑坡等地质灾害的监测等<sup>[3,26,33]</sup>。

可以预见,随着多系统星座(GPS、BDS、Galileo、GLONASS)的逐步完善以及变形监测理论的发展,多 GNSS 坐标时间序列将会在形变监测领域发挥更重要的作用<sup>[3]</sup>。

#### 4.3 气候变化研究

利用 GPS 得到的地表形变并联合卫星测高、验潮站数据,可在 ITRF 框架下实现毫米级的全球海平面变化监测<sup>[80]</sup>。同时,GPS 技术能够观测可降水量和水文负载引起的垂向位移,具备监测季风变化和气象及水文干旱的潜力,已被用于我国云南等地干旱机制的研究<sup>[79]</sup>。目前,GRACE 重力场模型反演结果的精度足以揭示平均小于 1 cm 的地表水变化或小于 1 mbar 的海底压强变化。因此,结合 GRACE 反演的地表质量迁移特征和 GPS 监测的地表位移,可广泛应用于全球或区域水迁徙引起的气候变化研究<sup>[64,67]</sup>。

## 5 结 语

随着我国北斗导航定位系统二代的全面运行、欧洲 Galileo 和俄罗斯 GLONASS 系统的不断发展,GNSS 已从单系统发展为多系统、多频率服务并存的局面<sup>[3]</sup>。联合不同系统的定位结果和时间序列进行对比分析,将有助于进一步明确单个误差的来源,从而为进一步削弱乃至消除时间序列中与技术类相关的未模型化误差提供基础。从产生形变的本质出发,定量分析不同因素造成的测站坐标对时间序列的贡献已成为目前 GNSS 技术应用领域的发展新方向<sup>[2]</sup>。

从这个意义上讲,坐标时间序列分析中仍有三大问题亟待解决:

1) 如何得到更为“干净”的坐标时间序列。与 GPS 技术相关的系统误差引起的虚假非线性变化可能“淹没”真实的地球物理信号,使线性速

度及其不确定度的估值产生显著偏差,尤其是对跨度较短的时间序列。未来的研究工作中,需进一步完善 GNSS 精密数据处理方法,以 IERS 协议 2010 为基础,深入研究由于大气传播延迟、太阳辐射压、短周期(小于 24 h)地球定向参数潮汐、海洋极潮等模型,获得更高精度的基准站单天解,并有效探测、处理时间序列中存在的阶跃,构建更为精密的测站运动模型和随机模型,准确分离测站虚假非线性位移。

2) 坐标时间序列中非线性变化的成因机制及其影响量化。当前,对于坐标时间序列中不同因素引起的非线性变化的精确量化、分离及物理机制解释还不够。例如,环境负载效应仅能解释时间序列的部分垂直周年、半年变化,其模型的不确定性同样可能导致基准站非线性运动的错误解释;同时,谐波频率信号及水平分量的季节性变化机制尚需进一步研究。对于热膨胀效应水平方向的影响研究尚不完善,且仍需构建顾及不同观测墩类型和结构的精密热膨胀模型。因此,下一步要做的工作是:联合 GNSS、InSAR、GRACE 等多源观测数据,并引入区域降雨量、河流水位变化等环境数据,建立高时空分辨率环境负载模型;研究基于基准站的格林函数创建方法及已有的地球物理模型建立最优的环境负载位移时间序列,并提供全球及区域 GNSS 基准站实时环境负载计算服务;同时,精化温度变化造成的基准站观测墩和基岩位移,研究基于统一球体模性下模拟区域地表形变的方法,进一步解释造成基准站非线性形变的物理机制。

3) 顾及坐标时间序列时变特性的单站严密三维噪声模型的构建。在构建确定性模型之后,还需顾及基准站坐标的时变特性,对随机过程进行有效建模。目前三维噪声模型一般是基于区域 GPS 站网的坐标时间序列构建的,而且有一定的使用时间范围<sup>[45]</sup>,因此,还不能建立单个测站的三维噪声模型。为扩大三维噪声模型的适用范围,在未来的研究中有必要分析 GPS 单站不同分量噪声之间的相互关系,构建不依赖于 GPS 站网的单个测站的严密三维噪声模型。

## 参 考 文 献

- [1] Strange W E, Weston N D. The Establishment of a GPS Continuously Operating Reference Station System as a Framework for the National Spatial Reference System[C]. ION Nat Tech Meeting, Fairfax, VA, USA, 1995

- [2] Jiang Weiping. Data Processing Methods and Applications of the GNSS Reference Station Network [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017 (姜卫平. GNSS基准站网数据处理方法与应用[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2017)
- [3] Jiang Weiping. Challenges and Opportunities of GNSS Reference Stations Network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 379-1 388 (姜卫平. 卫星导航定位基准站网的发展现状, 机遇与挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 379-1 388)
- [4] Jiang Weiping, Liu Jingnan, Ye Shirong. The Systematical Error Analysis of Baseline Processing in GPS Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(3): 196-199 (姜卫平, 刘经南, 叶世榕. GPS形变监测网基线处理中系统误差的分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(3): 196-199)
- [5] Dach R, Lutz S, Walser P, et al. Bernese GNSS Software Version 5. 2 (User Manual) [M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2015
- [6] He X, Montillet J P, Fernandes R, et al. Review of Current GPS Methodologies for Producing Accurate Time Series and Their Error Sources[J]. *Journal of Geodynamics*, 2017, 106: 12-29
- [7] Shi Chuang, Liu Jingnan, Yao Yibin. The Systematical Error Analysis of High Precision GPS Network Adjustment [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(2): 148-152 (施闯, 刘经南, 姚宜斌. 高精度 GPS 网数据处理中的系统误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(2): 148-152)
- [8] Tregoning P, Herring T A. Impact of a Priori Zenith Hydrostatic Delay Errors on GPS Estimates of Station Heights and Zenith Total Delays[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): 160-176
- [9] Chen Junyong. Progress in Theory and Practice for Geodetic Reference Coordinate Frame[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(1): 1-6 (陈俊勇. 大地坐标框架理论和实践的进展[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 1-6)
- [10] 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): 6 109-6 131
- [11] Collilieux X, Altamimi Z, Coulot D, et al. Impact of Loading Effects on Determination of the International Terrestrial Reference Frame[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(1): 144-154
- [12] 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)
- [13] Freymueller J T. Seasonal Position Variations and Regional Reference Frame Realization[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [14] 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
- [15] 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
- [16] Blewitt G, Lavallée D. Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B7): 2 145
- [17] Mao A, Harrison C G A, Dixon T H. Noise in GPS Coordinate Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1999, 104(B2): 2 797-2 816
- [18] Zhang J, Bock Y, Johnson H, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error Analysis of Daily Position Estimates and Site Velocities [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 18 035-18 055
- [19] Williams S D P, Bock Y, Fang P, et al. Error Analysis of Continuous GPS Position Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2004, 109(B3): B03412
- [20] Langbein J. Noise in GPS Displacement Measurements from Southern California and Southern Nevada [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B5): 1-12
- [21] Gazeaux J, Williams S, King M, et al. Detecting Offsets in GPS Time Series: First Results from the Detection of Offsets in GPS Experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(5): 2 397-2 407
- [22] Bos M S, Fernandes R M S, Williams S D P, et al. Fast Error Analysis of Continuous GPS Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(3): 157-166
- [23] Bruni S, Zerbini S, Raicich F, et al. Detecting Discontinuities in GNSS Coordinate Time Series with STARS: Case Study, the Bologna and Medicina GPS Sites[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(12): 1 203-1 214
- [24] Blewitt G, Kreemer C, Hammond W C, et al. Mi-

- das Robust Trend Estimator for Accurate GPS Station Velocities Without Step Detection[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 2 054-2 068
- [25] Bos M S, Fernandes R M S, Williams S D P, et al. Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4): 351-360
- [26] Trubienko O, Fleitout L, Garaud J D, et al. Interpretation of Interseismic Deformations and the Seismic Cycle Associated with Large Subduction Earthquakes[J]. *Tectonophysics*, 2013, 589(2): 126-141
- [27] Amiri-Simkooei A R, Tiberius C C J M, Teunissen P J G. Assessment of Noise in GPS Coordinate Time Series: Methodology and Results[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B7): B07412
- [28] Williams S D P. CATS: GPS Coordinate Time Series Analysis Software[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(2): 147-153
- [29] Khodabandeh A. GPS Position Time-Series Analysis Based on Asymptotic Normality of  $M$ -Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(1): 15-33
- [30] 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
- [31] Collilieux X, Altamimi Z, Coulot D, et al. Comparison of very Long Baseline Interferometry, GPS, and Satellite Laser Ranging Height Residuals from ITRF2005 Using Spectral and Correlation Methods [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B12): B12403
- [32] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Spatiotemporal Filtering Using Principal Component Analysis and Karhunen-Loeve Expansion Approaches for Regional GPS Network Analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B3): B03405
- [33] Davis J L, Wernicke B P, Bisnath S, et al. Subcontinental-Scale Crustal Velocity Changes Along the Pacific-North America Plate Boundary[J]. *Nature*, 2006, 441(7 097): 1 131
- [34] Tesmer V, Steigenberger P, Rothacher M, et al. Annual Deformation Signals from Homogeneously Reprocessed VLBI and GPS Height Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(10): 973-988
- [35] 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(12): 25-35
- [36] 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(2): 64-78
- [37] Shen Y, Peng F, Li B. Improved Singular Spectrum Analysis for Time Series with Missing Data[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2015, 22(4): 371-376
- [38] Klos A, Bos M S, Bogusz J. Detecting Time-Varying Seasonal Signal in GPS Position Time Series with Different Noise Levels[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 21
- [39] Shen Y, Li W, Xu G, et al. Spatiotemporal Filtering of Regional GNSS Network's Position Time Series with Missing Data Using Principle Component Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(1): 1-12
- [40] Didova O, Gunter B, Riva R, et al. An Approach for Estimating Time-Variable Rates from Geodetic Time Series [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11): 1 207-1 221
- [41] Li Zhao, Jiang Weiping, Liu Hongfei, et al. Noise Model Establishment and Analysis of IGS Reference Station Coordinate Time Series Inside China [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4): 496-503 (李昭, 姜卫平, 刘鸿飞, 等. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列噪声模型建立与分析 [J]. *测绘学报*, 2012, 41(4): 496-503)
- [42] Jiang W, Ma J, Li Z, et al. Effect of Removing the Common Mode Errors on Linear Regression Analysis of Noise Amplitudes in Position Time Series of a Regional GPS Network & a Case Study of GPS Stations in Southern California[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(10): 2 521-2 530
- [43] Li Y, Xu C, Yi L, et al. A Data-Driven Approach for Denoising GNSS Position Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(8): 905-922
- [44] Amiri-Simkooei A. Noise in Multivariate GPS Position Time-Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(2): 175-187
- [45] Ma Jun. The Establishment of Strict 3-D Noise Model in GPS Coordinate Time Series[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (马俊. GPS 坐标时间序列严密三维噪声模型建立方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2018)
- [46] Griffiths J, Ray J R. Sub-Daily Alias and Draconitic Errors in the IGS Orbits[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(3): 413-422
- [47] Rodriguez-Solano C, Hugentobler U, Steigenberger P, et al. Impact of Earth Radiation Pressure on GPS Position Estimates[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(5): 309-317
- [48] Ray J, Griffiths J, Collilieux X, et al. Subseasonal

- GNSS Positioning Errors[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(22): 5 854-5 860
- [49] Li Z, Jiang W, Ding W, et al. Estimates of Minor Ocean Tide Loading Displacement and Its Impact on Continuous GPS Coordinate Time Series[J]. *Sensors*, 2014, 14(3): 5 552-5 572
- [50] Penna N, Stewart M. Aliased Tidal Signatures in Continuous GPS Height Time Series[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(23): 2 184
- [51] Penna N T, King M A, Stewart M P. GPS Height Time Series; Short-Period Origins of Spurious Long-Period Signals[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2007, 112(B2): B02402
- [52] Petit G, Luzum B. IERS Conventions 2010. International Earth Rotation and Reference Systems Service[R]. IERS Technical Note, Germany, 2010
- [53] Petrie E J, King M A, Moore P, et al. Higher-Order Ionospheric Effects on the GPS Reference Frame and Velocities [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2010, 115(B3): B03417
- [54] Deng L, Jiang W, Li Z, et al. Assessment of Second and Third-Order Ionospheric Effects on Regional Networks: Case Study in China with Longer CMONOC GPS Coordinate Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(2): 207-227
- [55] Li Z, Chen W, Jiang W, et al. The Magnitude of Diurnal/Semidiurnal Atmospheric Tides (S1/S2) and Their Impacts on the Continuous GPS Coordinate Time Series[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10: 1 125
- [56] Steigenberger P, Rothacher M, Schmid R, et al. Effects of Different Antenna Phase Center Models on GPS-Derived Reference Frames [M]. Berlin, Heidelberg:Springer, 2009
- [57] van Dam 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): 23 939-23 950
- [58] 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): 2 075
- [59] van Dam T, Altamimi Z, Collilieux X, et al. Topographically Induced Height Errors in Predicted Atmospheric Loading Effects[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2010, 115(B7): B07415
- [60] Tregoning P, Dam T V. Atmospheric Pressure Loading Corrections Applied to GPS Data at the Observation Level[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 322(322): 312-329
- [61] Tregoning P, Watson C. Correction to “Atmospheric Effects and Spurious Signals in GPS Analyses” [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2011, 116(B2): B02412
- [62] 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): 1 043-1 057
- [63] Williams S D P, Penna N T. Non-Tidal Ocean Loading Effects on Geodetic GPS Heights[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(9): 159-164
- [64] Davis J L, Elósegui P, Mitrovica J X, et al. Climate-Driven Deformation of the Solid Earth from GRACE and GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(24): 357-370
- [65] Tregoning P, Watson C, Ramillien G, et al. Detecting Hydrologic Deformation Using GRACE and GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36 (36): 139-156
- [66] Fu Y, Freymueller J T. Seasonal and Long-Term Vertical Deformation in the Nepal Himalaya Constrained by GPS and GRACE Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2012, 117(B3): B03407
- [67] Tesmer V, Steigenberger P, van Dam T, et al. Vertical Deformations from Homogeneously Processed GRACE and Global GPS Long-Term Series [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(5): 291-310
- [68] Yuan P, Li Z, Jiang W, et al. Influences of Environmental Loading Corrections on the Nonlinear Variations and Velocity Uncertainties for the Reprocessed Global Positioning System Height Time Series of the Crustal Movement Observation Network of China[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 1-19
- [69] Prawirodirdjo L, Ben-Zion Y, Bock Y. Observation and Modeling of Thermoelastic Strain in Southern California Integrated GPS Network Daily Position Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2006, 111(B2): B02408
- [70] Tsai V C. A Model for Seasonal Changes in GPS Positions and Seismic Wave Speeds Due to Thermoelastic and Hydrologic Variations[J]. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 2011, 116 (B4): B04404
- [71] 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): 88-97
- [72] 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
- [73] Wang K, Chen H, Jiang W, 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 & Engineering*, 2018, 15(2): 554
- [74] Fang M, Dong D, Hager B H. Displacements Due to Surface Temperature Variation on a Uniform Elastic Sphere with Its Centre of Mass Stationary[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(1): 194-203
- [75] Munekane H. Sub-Daily Noise in Horizontal GPS Kinematic Time Series Due to Thermal Tilt of GPS Monuments[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4): 393-401
- [76] Wang K, Jiang W, Chen H, et al. Analysis of Seasonal Signal in GPS Short-Baseline Time Series[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2018, 175(10): 3 485-3 509
- [77] Tian Y, Shen Z K. Extracting the Regional Common-Mode Component of GPS Station Position Time Series from Dense Continuous Network[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(2): 1 080-1 096
- [78] Ming F, Yang Y, Zeng A, et al. Spatiotemporal Filtering for Regional GPS Network in China Using Independent Component Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(4): 1-22
- [79] Jiang W, Peng Y, Hua C, et al. Annual Variations of Monsoon and Drought Detected by GPS: A Case Study in Yunnan, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5 874
- [80] Wöppelmann G, Letetrel C, Santamaria A, et al. Rates of Sea-Level Change over the Past Century in a Geocentric Reference Frame[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(12): 91-100

## Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis

JIANG Weiping<sup>1</sup> WANG Kaihua<sup>1</sup> LI Zhao<sup>2</sup> ZHOU Xiaohui<sup>3</sup> MA Yifang<sup>1</sup> MA Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

<sup>2</sup> Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hung Hom, Hong Kong, China

<sup>3</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** The long-term accumulated coordinate time series of Global Navigation Satellite System (GNSS) reference stations provide basic data for geodesy and geodynamic studies. Through improving precise GNSS data processing models and strategies, together with investigating physical mechanism and properly modeling of the non-linear variations, the precise position and velocity of GNSS stations can be estimated. This will not only help interpret the plate tectonics reasonably, establish and maintain the terrestrial reference frame, but also contribute to investigating the geodynamic processes, such as post-glacial rebound, sea level change, as well as snow and ice redistribution inversion, et al. In this paper, the basic theory and methodology of GNSS coordinate time series analysis is reviewed by introducing the model estimation of station coordinates time series and the signal analysis. Then, noise modeling technique for GNSS coordinate time series is outlined. Particularly, a rigorous 3-D noise modeling method is proposed to best describe the stochastic process. After that, the advances in investigating physical mechanism of the non-linear variations in GNSS coordinate time series are summarized. Finally, we outline the scientific and engineering applications of GNSS coordinate time series, and discuss the prospect of future research.

**Key words:** GNSS coordinate time series; non-linear variation; noise model; reference frame

**First author:** JIANG Weiping, PhD, professor, specializes in the theories, methodologies, and engineering application of satellite geodesy. E-mail: wpjiang@whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China, No. 41525014; the Key Project for Technological Innovation in Hubei Province, No. 2018AAA066; the Major Project of Beijing Future Urban Design Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, UDC 2018031321.