

田云峰, 沈正康. 2009. GPS坐标时间序列中非构造噪声的剔除方法研究进展. 地震学报, 31(1): 68-81.
Tian Yunfeng, Shen Zhengkang. 2009. Progress on reduction of non-tectonic noise in GPS position time series. *Acta Seismologica Sinica*, 31(1): 68-81.

GPS坐标时间序列中非构造噪声的 剔除方法研究进展^{*}

田云峰^{1,2),*} 沈正康^{1,3)}

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室
2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所
3) Department of Earth and Space Science, University of California,
Los Angeles, CA 90095-1567, USA

摘要 GPS台站坐标解算中包含多种地球物理参量造成的不确定性、系统误差和随机噪声。回顾了GPS台站坐标噪声分析的研究进展, 包括功率谱分析、最大似然估计、区域叠加滤波、主成分变换以及质量负荷下的地壳弹性形变模拟等, 并讨论了各种方法在分析噪声的类型和强度、共模误差(common-mode errors)的物理起源等方面的作用及局限性, 展望了下一阶段的研究思路。

关键词 GPS 最大似然估计 共模误差 区域叠加滤波 主成分分析 质量负荷

文章编号: 0253-3782(2009)01-0068-14 **中图分类号:** P315.3 **文献标识码:** A

Progress on reduction of non-tectonic noise in GPS position time series

Tian Yunfeng^{1,2),*} Shen Zhengkang^{1,3)}

1) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China
2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China
3) Department of Earth and Space Science, University of California, Los Angeles, CA 90095-1567, USA

Abstract: There are multiple noise origins for GPS position time series, including deformation due to geophysical phenomena, system errors, and random noises. In this paper, various currently used methods to analyze and reduce non-tectonic noises are presented, such as power spectrum analysis, maximum likelihood estimator, regional stacking, principal component analysis, and deformation modeling under the loading of surface water/atmosphere mass. These methods are useful in deriving the spectral indices and amplitudes of colored noises, and helping understand the physical sources of the common-mode errors.

* 基金项目 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418403), 基本科研业务费专项(ZDJ2007-13)资助.

收稿日期 2008-04-22 收到初稿, 2008-08-18 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: tianyf@eqicd.cn

The pros and cons of various techniques, as well as the future research directions, are also discussed.

Key words: GPS; maximum likelihood estimator; common-mode errors; regional stacking; principal component analysis; mass loading

引言

连续 GPS 测量是近年来兴起的形变监测手段, 已建成上百个全球站及数千个区域站, 被用于众多领域的研究。例如, 全球板块运动场观测(Larson *et al*, 1999; Sella *et al*, 2002), 强震形变场监测(Bock *et al*, 1993; Blewitt *et al*, 1993; Hudnut *et al*, 1996), 区域地壳运动特征分析(Miyazaki, Heki, 2001; Shen *et al*, 1996, 2000, 2005; 张培震等, 2002; Zhang *et al*, 2004; 沈正康等, 2003; 王敏等, 2003; Gan, Prescott, 2001; Gan *et al*, 2007), 以及慢滑移现象研究(Dragert *et al*, 2001; Miller *et al*, 2002; Ozawa *et al*, 2002; Lowry *et al*, 2001)等, 对于揭示其它手段难以认知的地球物理现象起到了重要作用。

GPS 坐标序列中包含时空相关的有色噪声已经成为共识。在分析地球动力学现象时如果仍采用白噪声(white noise, 即 WN)的假设就会造成形变场解算的偏差。形变监测各领域需要获取更真实地反映构造活动的 GPS 数据, 这就要求尽量降低噪声的影响。GPS 坐标序列中噪声的时空相关性已成为国内外的研究热点。

对流层湿延迟、海潮负荷、大气负荷、天线相位中心误差和卫星轨道误差等都是噪声的潜在来源。随着 GPS 数据的不断积累、算法和模型的改进, 去除 GPS 中的时空相关噪声逐渐成为可能。首先全球很多台站已有 10 余年的观测, 有利于随机漫步噪声(random walk noise, 即 RWN)的检测, 为准确分析噪声特性提供了数据基础; 其次 GPS 数据分析软件不断完善, 对流层延迟、天线相位中心误差、轨道误差等的影响逐渐降低; 另外, 大气质量负荷所引起的地壳形变的校正也逐渐纳入解算过程。

GPS 单站、单分量坐标序列 $y(t_i)$ 通常满足模型(Nikolaidis, 2002)

$$\begin{aligned} y(t_i) = & a + bt_i + c\sin(2\pi t_i) + d\cos(2\pi t_i) + e\sin(4\pi t_i) \\ & + f\cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j H(t_i - T_{hj})t_i \\ & + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \exp[-(t_i - T_{kj})/\tau_j] H(t_i - T_{kj}) + v_i \end{aligned} \quad (1)$$

其中, a 为初始位置; b 为速率; c, d, e 和 f 分别为年、半年周期项系数; g 为偏移; h 为震后速率变化; k 为震后速率衰减(指数模型); v 为误差; t_i 为时间; H 为阶梯(heaviside step)函数。上式常采用加权最小二乘法来求解, 所得残差坐标序列中仍可见周期性成分和不规则波动(图 1)。

Wdowinski 等(1997)的研究表明, 这类非构造噪声存在区域相关性, 可称为共模误差(common-mode error, 即 CME)。CME 的来源尚未确定, 可能源自卫星轨道误差、水体和大气质量负荷、参考框架定义的不确定性等(Dong *et al*, 2002, 2006)。此外, 还存在单站误差, 源于天线墩不稳定、多路径效应等。

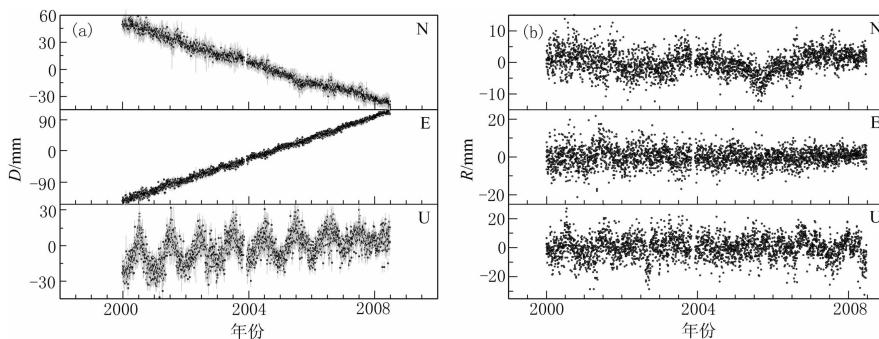


图 1 BJFS 站坐标时间序列(数据来自 SOPAC 网站^①)
(a) 原始坐标时间序列; (b) 残差坐标时间序列(按式(1)拟合而得)

Fig. 1 Position time series for site BJFS

(a) the raw time series; (b) the residual time series (after fitting using equation 1)

GPS 坐标中噪声的研究主要分为时频分析和空域分析两种技术。时频分析用来确定坐标序列在时间上的相关性特征, 其方法有谱分析和最大似然估计(maximum likelihood estimator, 即 MLE), 能够确定随时间相关噪声的类型和强度, 以及有色噪声对台站运动速率估计的影响。Johnson 和 Agnew(1995)率先分析了 RWN 对 GPS 坐标可能产生的影响; Zhang 等(1997)分析了区域台 19 个月的坐标序列, 认为相关噪声是分形白噪声或“WN + 闪烁噪声(flicker noise, 即 FN)”的组合。Mao 等(1999)分析了 3 年的坐标序列, 发现“WN + FN”为针对全球台站的最佳模型。这一结论后来被 Williams 等(2004)、黄立人(2006)等所证实。在空域分析中, Wdowinski 等(1997)率先利用区域叠加滤波(regional stacking)计算了区域网 CME 的大小并从坐标中去除, 提高了利用 GPS 检测强震形变场的能力。此后, Nikolaidis(2002)、Marquez-Azua 和 Demets(2003)考虑了 CME 空间分布的非均一性, 在计算 CME 时加入了权重因子。Dong 等(2006)利用主成分分析(principal component analysis, 即 PCA)提取了 CME 的时、空特征。此外, 从潜在的 CME 起因入手, 通过定量计算水体、大气等质量负荷造成地壳弹性变形, 能够从源头分析 GPS 坐标中的噪声(Dong *et al.*, 2002; 王敏等, 2005)。本文将回顾与总结上述噪声分析技术, 以期找到一种实用的去噪方法。

1 GPS 坐标序列的噪声谱分析

GPS 坐标序列中的噪声谱可以用指数定律(power-law)来描述(Agnew, 1992)

$$P_x(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^\kappa \quad (2)$$

其中, f 是频率; P_0 和 f_0 是常量; κ 是谱指数。自然界中的现象的 κ 多为 $-3 < \kappa < -1$, 是非平稳过程, 称为分形布朗运动, 其中包括 RWN($\kappa = -2$)。平稳过程的 κ 为 $-1 < \kappa < 1$, 称为分形白噪声, 其中包括 WN($\kappa = 0$)。此外, 当 $\kappa = -1$ 时称作 FN。除 WN 之外的噪声统称为有色噪声。

^① Scripps Orbit and Permanent Array Center. SOPAC Refined Model GPS Site Position Time Series (ITRF2005). <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/plotTimeSeriesServlet.cgi?site=bjfs&filter=unf&rmTJ=yes>. 2008-11-18.

在早期,由于大多采用流动式 GPS 测量,一般都假定各期观测之间是独立的。数据的迅速积累,使得检测 GPS 坐标序列中的有色噪声成为可能。地质条件、温压变化、风化等可能造成天线墩不稳定,从而使 GPS 坐标中包含 RWN。Johnson 和 Agnew(2000)证实了这一推测。然而,“WN+FN”模型后来被证实是最佳模型(Zhang *et al*, 1997; Mao *et al*, 1999; 朱文耀等, 2003; Williams *et al*, 2004; 黄立人, 2006; 黄立人, 符养, 2007)。

1.1 功率谱分析技术

1.1.1 功率谱模型

假设 GPS 坐标序列中的噪声由白噪声和有色噪声组成,则功率谱为(Langbein, Johnson, 1997)

$$P(f) = P_0(f^* + f_0^*) \quad (3)$$

其中, f_0 是交叉频率; P_0 , f_0 和 κ 是待求参数。

1.1.2 谱的计算方法

如果坐标序列 $x(t_j)$ 间隔均匀,则采用离散傅里叶变换可方便地计算其功率谱

$$P_x(\omega) = \frac{1}{N_0} \left| \sum_{j=1}^{N_0} x(t_j) \exp(-i\omega t_j) \right|^2 \quad (4)$$

当存在观测间隔时,需先进行数据插值,但有时会引入误差(Langbein, Johnson, 1997; Zhang *et al*, 1997),宜采用 Lomb 周期图(Scargle, 1982)来计算

$$\begin{aligned} P_x(\omega) &= \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{\left[\sum_j x_j \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_j x_j \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\} \\ \tan(2\omega\tau) &= \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j} \end{aligned} \quad (5)$$

上式被广泛用于 GPS 坐标序列噪声谱的计算(Zhang *et al*, 1997; Mao *et al*, 1999; 符养, 2002; 朱文耀等, 2003)。

1.1.3 谱指数的计算方法

可以采用多种方式由功率谱计算谱指数。对于较短的时间序列,在整个功率谱段拟合一条直线,有色噪声的谱指数即为双对数空间中拟合直线的斜率(Zhang *et al*, 1997)。对于较长的时间序列,可将功率谱分为若干子区,在各频率区间内估计谱指数。Langbein 和 Johnson(1997)、Mao 等(1999)则通过拟合一条符合式(3)的曲线来估计谱指数。

1.2 MLE

MLE 可用来定量地计算有色噪声的强度及其对速率估计的影响。

1.2.1 模型的建立

设单站、单分量坐标序列满足

$$x(t_i) = x_0 + r t_i + \epsilon \quad (6)$$

其中, x_0 是初始位置; r 是速率; ϵ 是误差。写成矩阵的形式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{Ax} + \epsilon \quad (7a)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 2 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_N \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} x(t_1) \\ x(t_2) \\ \vdots \\ x(t_N) \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_0 \\ r \end{bmatrix} \quad (7b)$$

假设误差项 ϵ 是白噪声 α 和有色噪声 β 的线性组合

$$\epsilon = a\alpha(t) + b_\kappa\beta(t) \quad (8)$$

其中, 系数 a 和 b_κ 分别是白噪声和有色噪声的强度. 通过最小二乘估计可得台站的初始位置和运动速率

$$\hat{x}(t_i) = \hat{x}_0 + \hat{r}t_i \quad (9)$$

最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{y}} = [\mathbf{A}^T \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{x} \quad \hat{\mathbf{C}}_{\hat{\mathbf{y}}} = [\mathbf{A}^T \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{A}]^{-1} \quad (10)$$

“WN+RWN”模型的协方差矩阵形式为(Johnson, Agnew, 1995; Langbein, Johnson, 1997)

$$\mathbf{C}_x = a^2 \mathbf{I} + b_{rw}^2 \mathbf{R} \quad (11)$$

其中, \mathbf{I} 是单位阵; \mathbf{R} 为 RWN 的协方差矩阵. 其具体形式为(Langbein, Johnson, 1997)

$$\mathbf{R} = \mathbf{Z} \mathbf{I} \mathbf{Z}^T \delta t \quad (12)$$

其中, δt 为采样间隔; \mathbf{Z} 的形式为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots \\ 0 & 1 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (13)$$

Zhang 等(1997)提出了“WN+FN”的混合模型

$$\mathbf{C}_x = a^2 \mathbf{I} + b_f^2 \mathbf{F} \quad (14)$$

FN 的协方差矩阵 \mathbf{F} 的形式为

$$\mathbf{F} = \left[\left(\frac{3}{4} \right)^2 \frac{(24\mathbf{I} - \mathbf{J}_0)}{12} \right]_{N \times N} \quad (15)$$

其中

$$\mathbf{J}_0 = \begin{cases} 0 & i = k \\ \frac{\lg(k-i)}{\lg 2} + 2 & i < k \end{cases} \quad (16)$$

对于其它有色噪声, Williams(2003)推导了协方差矩阵的广义形式 \mathbf{J}_κ .

$$\mathbf{J}_\kappa = \mathbf{T} \mathbf{T}^T \quad (17)$$

转换矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \Psi_0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \Psi_1 & \Psi_0 & 0 & \cdots & 0 \\ \Psi_2 & \Psi_1 & \Psi_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_n & \Psi_{n-1} & \Psi_{n-2} & \cdots & \Psi_0 \end{bmatrix}$$

$$\Psi_n = \frac{-\frac{\kappa}{2}(1-\frac{\kappa}{2})\cdots(n-1-\frac{\kappa}{2})}{n!} = \frac{\Gamma(n-\frac{\kappa}{2})}{n!\Gamma(-\frac{\kappa}{2})}$$

$$n \rightarrow \infty \quad \Psi_n \sim n^{-\frac{\kappa}{2}-1}/\Gamma(-\frac{\kappa}{2}) \quad (18)$$

在实际计算时, 可采用同时包含 RWN 和 FN 的混合模型(Mao *et al*, 1999; 朱文耀等, 2003; 黄立人, 2006; 黄立人, 符养, 2007)

$$C_x = a^2 \mathbf{I} + b_{rw}^2 \mathbf{R} + b_f^2 \mathbf{F} \quad (19)$$

1.2.2 模型求解

MLE 采用的概率函数为(Langbein, Johnson, 1997; Mao *et al*, 1999; Nikolaidis, 2002; Williams *et al*, 2004)

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{C}) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} (\det \mathbf{C})^{1/2}} \exp(-0.5 \mathbf{x}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{x}) \quad (20)$$

其中, \mathbf{x} 是单日残差坐标序列; \mathbf{C} 是数据协方差矩阵; n 是天数; \det 表示行列式. 通过调整 \mathbf{C} 使上式达到最大值. 为了简化计算, 先对上式等号两边同取自然对数

$$\ln[L(\mathbf{x}, \mathbf{C})] = -\frac{1}{2} [n \ln(2\pi) + \ln(\det \mathbf{C}) + \mathbf{x}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{x}] \quad (21)$$

一般采用单纯形法求解上式中的最大值问题, 得到相应的似然值及式(19)中的系数 a 和 b .

1.2.3 关于噪声特性的研究成果

一般认为 RWN 源自天线墩的运动, 由气候、土壤水分等的季节变化造成. 天线墩通常由混凝土浇铸而成, 在太阳的照射下可能产生日变化, 同时可能还受到外部温、压、湿度等环境因素的影响, RWN 难以检测, 需要长期的观测资料. 能否从坐标序列中检测出 RWN 与序列的长度有关系. 假设仅存在 WN 和 RWN, 则由二者的理论能量、频率关系可得交叉频率(Langbein, Johnson, 1997)为

$$f_0 = \frac{\sigma_{rw}}{\sigma_w} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{f_s}{c_1}} \quad (22)$$

其中, c_1 是常量; f_s 为采样频率(单位为 Hz). 要检测出 RWN, 观测时间至少为 $5/f_0$.

King 等(1995)从相距 8 km 的两个 GPS 站的基线变化中检测出了相关噪声, 但没有发现 RWN. Johnson 和 Agnew(1995)通过模拟数据研究了 RWN 的影响, 发现当相关噪声和 WN 的大小相当时, 增加观测次数无利于提高精度. Johnson 和 Agnew(2000)在 50 m 的基线中第一次确认了 GPS 坐标中存在 RWN. Calais 等(2006)在 CORS(continuously operating reference stations)网络, 黄立人和符养(2007)在中国地壳运动观测网络若干 GPS 连续站中也检测出了 RWN. 一般来说, 天线墩应建在基岩之上, 然而当地表为较厚的沉积层时这是不现实的. 美国加州等地采用了深锚式天线墩(Wyatt *et al*, 1989), 在很大程度上减小了周期性成分和有色噪声出现的概率(Langbein *et al*, 1995; Williams *et al*, 2004). 然而深锚式天线墩比较昂贵, Beavan(2005)发现新西兰 GPS 台站的水泥柱天线墩的噪声水平与深锚式天线墩的相当, 因此, 在经济条件有限时, 精心设计的水泥天线墩也

能满足要求.

Zhang 等(1997)分析了 19 个月 10 个连续台的数据, 采用了 3 种噪声模型(WN, WN+FN 和 WN+RWN). 结果表明, “WN+FN”的模型或分形白噪声模型($\kappa = -0.4$)均能较好地描述数据, 且更倾向于后者, 但无法排除 RWN 的存在. 此后的研究证实了 GPS 数据更符合“WN+FN”的模型(Mao *et al*, 1999; Williams *et al*, 2004; 黄立人, 2006; 黄立人, 符养, 2007). 这一结论在高频坐标序列中也被证实(Bock *et al*, 2000; Genrich, Bock, 2006). 区域解的噪声强度要比全球解小, 且不同区域网络中的主导误差类型不尽相同, 经过区域叠加滤波(Wdowinski *et al*, 1997)的区域解的误差水平明显降低. 朱文耀等(2003)分析了 JPL 全球解中 178 个台站 U 分量 3 年的坐标序列, 发现有色噪声的强度比 WN 大, 且多为 FN. 他们采用了“WN+FN+RWN”的模型, 但并非所有的站都解得了全部的噪声分量, 当 FN 占主导地位时 RWN 易被掩盖, 故推荐同时估计各噪声的参数. 黄立人(2006)对中国 3 个 GPS 基准站的坐标序列进行了分析. 结果表明, 所有坐标分量中的噪声都具有“WN+FN”的特点. 此后, 黄立人和符养(2007)分析了中国地壳运动观测网络布设的 27 个 GPS 连续站 5 年多的数据, 发现 WN 并不占主导地位, 大部分台站(20 个)的坐标序列的噪声可以用“WN+FN”来描述, 少部分则可以用“WN+FN+RWN”来描述, 提出应根据台站的噪声特性采用相应的噪声模型. 此外, 他们还发现了 E 分量的 FN 和 RWN 较 N 分量要大, 北方台站的 FN 比南方的小, 而 RWN 也多出现在南方的台站上, 但造成这种现象的原因尚无法确定.

1.2.4 有色噪声对速率估计的影响

仅考虑 WN(强度为 a)时, 速率 r 估计的方差为(Zhang *et al*, 1997)

$$\sigma_r^2 = \frac{12a^2}{\Delta t^2(N^3 - N)} \quad (23)$$

其中, Δt 为时间间隔; N 为观测次数($N > 1$).

仅考虑 RWN(强度为 b_{rw})时

$$\sigma_r^2 = \frac{b_{rw}^2}{(N-1)\Delta t} \quad (24)$$

仅考虑 FN(强度为 b_f)时, 比较近似的数值解为(Mao *et al*, 1999)

$$\sigma_r^2 \approx \frac{\alpha b_f^2}{g^\beta t^2} \quad (25)$$

其中, g 为每年的观测次数; t 为时间序列长度; α 和 β 为常量.

对于任意谱指数的有色噪声, Williams(2003)给出了广义的协方差矩阵形式.

速率的估计方差与噪声的类型、强度和观测频率等因素有关. Johnson 和 Agnew(1995)通过模拟数据发现, 如果忽略有色噪声, 则速率估计的方差将变小. Zhang 等(1997)的研究表明, 分形白噪声模型的速率方差比 WN 模型大 2—4 倍, “WN+FN”模型速率方差要比 WN 模型大 3—6 倍. Mao 等(1999)发现, 采用纯 WN 模型时的速率方差也明显偏小. 噪声类型在很大程度上影响着台站运动速率的估计, 因此在应用 GPS 进行地球动力学分析时, 有必要弄清楚噪声的特性.

2 CME

CME 尚没有明确的定义, 其物理来源也有待确定, 但通过某种形式的空间滤波能部

分加以剔除(Wdowinski *et al*, 1997; Dong *et al*, 2006).

2.1 区域叠加滤波

区域叠加滤波由 Wdowinski 等(1997)提出. 从单日坐标残差 ϵ 计算 CME 校正值为

$$\dot{\epsilon}(d) = \frac{\sum_{s=1}^S \epsilon_s(d)}{S} \quad (26)$$

其中, d 为时间; S 为台站数目. 从原始坐标中减去 CME 校正值即得到滤波后的位置. 该方法明显增强了坐标序列的信噪比, 尤其在 N 和 U 分量.

Nikolaidis(2002)在计算 CME 时加入了权重

$$\epsilon_i = \frac{\sum_{s=1}^{S_i} \frac{\nu_{i,s}}{\sigma_{i,s}^2}}{\sum_{s=1}^{S_i} \frac{1}{\sigma_{i,s}^2}} \quad (27)$$

其中, ν 为残差坐标序列; $\sigma_{i,s}$ 为坐标解的误差; S 为台站数($S>2$).

Marquez-Azua 和 Demets(2003)将区域叠加滤波应用到整个北美大陆, 考虑 CME 存在区域分异, 并认为其是线性平滑过渡, 采用加权滤波法计算 CME 改正值: 仅考虑 2000 km 以内的台站, 权重为坐标间序列长度因子与距离因子之积. 区域叠加滤波被广泛采用(Zhang *et al*, 1997; Williams *et al*, 2004; Smith *et al*, 2004). Zhang 等(1997)在谱分析之前进行了区域叠加滤波, 从 GPS 坐标序列中去除了部分空间相关噪声. Williams 等(2004)发现滤波后 WN 和 FN 的强度都明显降低. IGS(International GNSS Service)分析中心 SIO (Scripps Institution of Oceanography)已经采用区域叠加滤波来处理加州等地的 GPS 单日坐标解.

2.2 主成分变换法

区域叠加滤波中用于计算 CME 的基准站数目及分布对 CME 校正值的影响较大. 假设均匀分布或采用某种权重因子都不是最佳方法, 有必要仅从数据本身来分析 CME 的空间分布特征. Dong 等(2006)采用 PCA 和 KLE(Karhunen-Loeve expansion)来分析 GPS 坐标序列, 将其分解为随时间变化的模式(mode)集合和它们的空间响应.

2.2.1 PCA 和 KLE 变换的原理

对数据矩阵 $\mathbf{X}(m \times n)$ (n 个站、 m 天), 协方差矩阵 \mathbf{B} 定义为

$$b_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \mathbf{X}(t_k, x_i) \mathbf{X}(t_k, x_j) \quad (28)$$

$\mathbf{B}(n \times n)$ 是实对称阵, 能够分解为

$$\mathbf{B} = \mathbf{V} \Lambda \mathbf{V}^T \quad (29)$$

其中, 特征向量矩阵 $\mathbf{V}^T(n \times n)$ 是一个行正交的矩阵. Λ 是有 k 个非零特征值 $\{\lambda_k\}$ ($n \geq k$) 的对角阵. 一般来说, 实际测量中 \mathbf{B} 是满秩的, 即 $k=n$. 由线性代数可知, 秩为 n 的矩阵能够分解为 n 个正交矢量. 因此可利用正交函数基 \mathbf{V} 来展开 \mathbf{X} :

$$\mathbf{X}(t_i, x_j) = \sum_{k=1}^n a_k(t_i) v_k(x_j) \quad a_k(t_i) = \sum_{j=1}^n \mathbf{X}(t_i, x_j) v_k(x_j) \quad (30)$$

这种分解叫做主成分分析. $a_k(t)$ 为第 k 个主成分, $v_k(x)$ 是相应的特征向量. 主成分

代表时间变化, 特征向量代表空间响应。如果把特征矢量按特征值大小排列, 则与前几个特征矢量对应的主成分代表对 \mathbf{X} 的方差具有最大贡献者, 可以认为是区域 CME。其它主成分代表局部或单站效应。

当协方差矩阵 \mathbf{B} 被方差矢量 $\boldsymbol{\sigma}$ 标准化后, 所得矩阵变成相关矩阵 \mathbf{C} , 即 $c_{ij} = b_{ij}/\sigma_i\sigma_j$ 。其中 $\boldsymbol{\sigma}$ 定义为

$$\sigma_j = \sqrt{b_{jj}} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m [\mathbf{X}(t_k, x_j)]^2} \quad (31)$$

相关矩阵 \mathbf{C} 能够分解为

$$\mathbf{C} = \mathbf{W}\Lambda_c \mathbf{W}^T \quad (32)$$

\mathbf{X} 也能用正交矢量基 \mathbf{W} 来展开

$$\mathbf{X}(t_i, x_j) = \sum_{k=1}^n a_k(t_i) w_k(x_j) \quad a_k(t_i) = \sum_{j=1}^n \mathbf{X}(t_i, x_j) w_k(x_j) \quad (33)$$

这种展开叫做 KLE 变换。

PCA 和 KLE 的区别在于前者使用协方差矩阵, 而后者则使用相关矩阵来计算正交矢量基。

2.2.2 数据分析步骤

数据矩阵 \mathbf{X} 由残差坐标序列构成, 分别对 \mathbf{X} 进行 PCA 和 KLE 变换。主成分 $a_k(t)$ 、特征向量 $v_k(x)$ 和 $w_k(x)$ 一起被称为模式。将每个特征向量标准化, 则“最大”元素的响应总是 100%, 其它的空间响应值在 (-100%, 100%) 内, 称为标准化特征矢量。

模拟分析表明, KLE 能够压制异常噪声, 但精度较低, 而 PCA 适合于局部效应很小的情况。Dong 等(2006)对美国 SCIGN(southern California integrated GPS network)网络中 148 个台站各分量的时间序列(2000—2004 年)作了 PCA/KLE 分析。结果表明, CME 是 GPS 单日解的主要误差来源, 各分量中 CME 的空间分布均一, 表明与 SCIGN 网络的空间尺度相比, CME 具有更大的地理波长。此外, CME 还表现出时间相关性。与区域叠加滤波相比, PCA/KLE 所得结果在各个分量均较一致。但在某些天, 区域叠加滤波得出的 CME 较大。其原因可能是部分点出现了较大的波动, 而 PCA/KLE 法对单站的反常变化较不敏感, 故能降低这种异常的影响。

2.2.3 CME 的定义

Dong 等(2006)用 PCA 法分析了 CME 的定义标准, 即大多数站(>50%)有明显的空间响应(25%), 且该模式的特征值超过特征值总和的 1%。依此标准, 排在前面的几个主成分构成了 CME 的主体。SCIGN 残差坐标序列的分析表明, 只有第一个模式满足条件。

CME 具有空间特征, 在区域内以同一方式影响各站点。由于不是构造活动造成的, 有必要从坐标序列中剔除。区域叠加滤波和 PCA/KLE 是基于统计的分析方法, 它忽略了 CME 的起源。空间相关分析表明, 在 1000 km 之内, 坐标序列具有较高的相关性, 并逐渐线性减小为 0; 空间滤波后相关性则明显降低(Marquez-Azua, Demets, 2003; Williams *et al.*, 2004)。

3 地球物理参量变化对 GPS 坐标的影响

GPS 坐标序列中包含有明显的周期性成分, 其成因分为重力激发、热效应和水文动力

学等因素(Dong *et al*, 2002; Prawirodirdjo *et al*, 2006). 重力激发是指由于极潮、固体潮、海潮、大气潮等产生的地壳形变; 热效应和水文动力学因素包括大气压力、非潮汐海洋质量变化、地表水、基岩的热膨胀、风剪切等。此外, 模型误差(卫星轨道、大气、相位中心)、天线热噪声、多路径效应等都可以造成周期性波动。

固体潮、极潮和海潮改正已为多数 IGS 分析中心所采用。极潮校正可采用 IERS(International Earth Rotation Service)提供的公式(McCarthy, Petit, 2004)来计算, 在水平方向可达 7 mm, 垂向可达 25 mm, 其中振幅最大的是周年项和 Chandler 摆动(Dong *et al*, 2002)。目前 IGS 分析中心采用的海潮模型不尽相同, 包括 Scherneck 和 FES02 等。此外, 还有多种模型可供选择, 如 NAO99.b, GOT00.2 和 TPXO.5 等(<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>)。海潮主要有 11 个潮波类型, 一般认为半日潮、日潮在解算时大部分已经被平均掉了, 因此可仅计算半月、月和半年潮的影响。然而, Penna 等(Penna, Stewart, 2003; Penna *et al*, 2007)的研究表明, 这种假设是错误的。这些未纳入模型的半日、日周期信号能够扩散到更长周期的成分中去。

当前的研究热点集中在海潮、大气负荷、地表水负荷对 GPS 坐标的影响。由于 U 分量受周期性载荷的影响最大, 常被选为研究对象。针对某一质量负荷, 可据格林函数(Farrell, 1972)定量地计算其造成的位移量。

3.1 大气质量负荷

大气环流引起的质量再分配过程能够造成地壳形变, 垂向可达 20 mm, 水平分量可达 3 mm。地表压力数据可从 NCEP(National Center for Environmental Prediction)获取, 通过格林函数计算由于大气负荷造成的位移量(vanDam *et al*, 1994)。反变气压计(inverted barometer)模型用来表征海洋对表面压力变化的响应, 海陆分布可采用 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecast)的模型。

3.2 海洋非潮汐质量负荷

海洋非潮汐质量负荷变化由海风、大气压力变化及热交换等引起。海平面数据可采用 TOPEX/Poseidon 的观测资料。温越层以上由于盐度和温度变化引起的海面变化并不造成海洋质量的变化, 需要先进行校正。然后, 再基于格林函数进行 GPS 坐标的改正(Dong *et al*, 2002; 王敏等, 2005)。

3.3 陆地水体质量负荷

陆地上的土壤水、冰川和积雪等质量载体也能够使地壳产生弹性形变。King 等(2007)研究了 2004—2005 年美国加州 LONG 站的数据, 发现强降水使得 LONG 站的 U 分量上升了 47 mm, 且其周边台站的水平分量向外远离了约 10 mm。由于没有检测到非震滑移, 他们把这种变化归结为强降雨导致的含水层水位上升引起的地壳变形, 地下井水位观测证实同期水位上升了 16 m。用于负荷弹性变形计算的土壤水分数据可由 NCEP 再分析资料获取, 时间分辨率为 6 h。

对 GPS 坐标序列 U 分量的研究表明, 大气压力负荷、非潮汐海洋负荷、雪和地表水的质量负荷引起的地壳周期性弹性形变可以解释 U 分量中的部分周期性噪声(Dong *et al*, 2002; 张飞鹏等, 2002; 王敏等, 2005)。但由于 GPS 的估计结果与质量负荷模型结果之间存在系统偏差, 合理的解释有待进一步分析。此外, 还存在很多潜在的影响因素, 如大气湿延迟模型、多路径效应等, 而这些因素的贡献难以定量地分析。

另一方面,可以从 GPS 坐标序列来反推各种地球物理因子。Khan 和 Scherneck(2003)成功利用 GPS 基线数据计算了 M_2 潮的负荷效应。Allinson 等(2004)通过单日 GPS 坐标序列计算了半日、日潮所引起的负荷效应,其结果与海潮模型的预测结果比较吻合。King 等(2005)利用 GPS 反演了南极附近半日、日潮造成的地壳位移量,并与全球海潮模型的结果进行了对比。在南极洲东部,二者计算出的结果在 N_2 和 Q_1 分量仅存在亚毫米级的偏差。

4 讨论

综上所述,时间相关噪声分析从统计学的角度出发,研究有色噪声的类型、强度、及其分布规律,对于 GPS 观测成果的解释与应用具有指导意义。同时,还有助于分析有色噪声的起源。然而,这种方法只以单站、单分量的坐标序列为研究对象,忽略了多种因素(如气候、卫星轨道误差)造成 的空间相关性。

区域叠加滤波能够较好地去除小尺度网络的 CME 噪声,但只能单独地计算单日 CME 改正值,无法考虑噪声的时间相关性。同时,在滤波权重的选择上,无论采用均质假设、随距离平滑变化等都可能与实际不符,且计算 CME 时台站的选择(分布、数量)也是一个关键因素。因此区域叠加滤波很难扩展到更大尺度的网络。

Dong 等(2006)提出的 PCA/KLE 法同时考虑了 GPS 台站间坐标序列的时、空相关性,对 CME 的计算不作人为的限制,并能处理存在异常点的情况。但需要先对数据缺失部分进行插值。这可能引入误差,无法处理具有较长间隔的坐标序列。同时,这种方法没有考虑台站的地理位置,也没有顾及 CME 的影响尺度。

上述时、空相关分析技术都未对 CME 的地球物理起源作出解释。目前在 GPS 处理软件中已经包含了大气负荷、海潮负荷的校正模型。Tregoning 和 vanDam(2005)的研究表明,加入大气负荷校正明显地改善了大多数台站 U 分量的精度,但有些时候可能会带来误差。针对时空相关噪声的地球物理起源,地表质量负荷虽然能解释部分残差变化,但仍存在局限:模型本身是一种近似,难以准确地描述质量负荷参量的变化,以大气负荷引起地壳形变为例,其振幅与相位在不同年份有着较大差别,而且还有高频变化和异常变化;模型计算所依赖的物理量(如降水、气压)在观测过程中本身存在误差。

此外, GPS 技术本身也能造成非构造噪声,如卫星轨道误差、参考框架误差、天线相位中心偏差、多路径效应等。

GPS 坐标序列中构造运动与非构造信息交叉在一起很难分离。地球物理因素的模型不确定性和 GPS 技术本身的局限使问题复杂化。随着 IGS 采用绝对天线相位中心模型和 ITRF05(IGS Mail # 5438),采用基于数值天气预报的 GMF(global mapping function)(Boehm *et al.*, 2006)映射函数代替 NMF(Niell mapping function)(Niell, 1996),以及处理算法的改进等, GPS 单日坐标解的精度有望进一步提高,对于分析其中的时、空相关噪声将大有裨益。

在前人开展的工作基础上,根据当前 GPS 观测的特点和需求,我们认为今后应在以下几个方面进一步开展研究:

1) 采用再分析资料进行处理。目前可获取的 GPS 坐标序列大多是常规单日解处理结果,处理软件、海潮模型、大气映射函数、参考框架等的变更,能够产生阶跃等非线性变

化。IGS 正在对全球 GPS 历史数据进行再分析, 其结果将有益于揭示噪声的本质。

2) 考虑其它噪声模型。GPS 坐标中包含多种噪声, 每个台站的主导因素不尽相同, 除了幂指数噪声之外, 可能存在其它形式的噪声, 如高斯-马尔可夫噪声、带通滤波噪声等。因此, 应同时考虑不同的模型组合, 以期得到最接近真实的结果。

3) 区域网络与全球网络相结合。目前已公开的 GPS 资料主要集中在北美和欧洲, 对于研究 CME 的全球特征来说极为不利。全球站之间的基线过长, 台站间的空间相关性已较弱。随着中国大陆构造环境监测网络中连续 GPS 台网和北京、天津、上海等区域网络的建设和数据积累, 中国及周边区域 GPS 坐标的噪声特性分析研究将得到深化。

4) 多种观测数据的融合处理。不少 GPS 台站同时还配备有 VLBI 和 SLR 等测量设备。不同测量技术结果之间的对比能够揭示 GPS 坐标中非构造信息是否是 GPS 的独有特性, 同时有利于分析其物理来源。

感谢中国地震局地震预测研究所王敏研究员给予的宝贵建议和审稿专家对本文提出的重要修改意见。

参 考 文 献

- 符养. 2002. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析[D]. 上海: 中国科学院上海天文台: 120.
- 黄立人. 2006. GPS 基准站时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, **26**(2): 31–33, 38.
- 黄立人, 符养. 2007. GPS 连续观测站的噪声分析[J]. 地震学报, **29**(2): 197–202.
- 沈正康, 王敏, 甘卫军, 张祖胜. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. 地学前缘, **10**(特刊): 93–100.
- 王敏, 沈正康, 牛之俊, 张祖胜, 孙汉荣, 甘卫军, 王琪, 任群. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 21–32.
- 王敏, 沈正康, 董大南. 2005. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正[J]. 地球物理学报, **48**(5): 1045–1052.
- 张飞鹏, 董大南, 程宗颐, 程明康, 黄诚. 2002. 利用 GPS 监测中国地壳的垂向季节性变化[J]. 科学通报, **47**(18): 1370–1377.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘, **9**(2): 430–441.
- 朱文耀, 符养, 李彦. 2003. GPS 高程导出的全球高程振荡运动及季节变化[J]. 中国科学(D辑), **33**(5): 470–481.
- Agnew D C. 1992. The time-domain behavior of power-law noises [J]. *Geophys Res Lett*, **19** (4): 333–336.
- Allinson C R, Clarke P J, Edwards S J, King M A, Baker T F, Crudee P R. 2004. Stability of direct GPS estimates of ocean tide loading [J]. *Geophys Res Lett*, **31**: L15603.
- Beavan J. 2005. Noise properties of continuous GPS data from concrete pillar geodetic monuments in New Zealand and comparison with data from U. S. deep drilled braced monuments [J]. *J Geophys Res*, **110**: B08410.
- Blewitt G, Heflin M B, Hurst K J, Jefferson D C, Webb F H, Zumberge J F. 1993. Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence [J]. *Nature*, **361**: 340–342.
- Boehm J, Niell A, Tregoning P, Schuh H. 2006. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data [J]. *Geophys Res Lett*, **33**: L07304.
- Bock Y, Agnew D C, Fang P, Genrich J F, Hager B H, Herring T A, Hudnut K W, King R W, Larsen S, Minster J B, Stark K, Wdowinski S, Wyatt F K. 1993. Detection of crustal deformation from the Landers earthquake sequence using continuous geodetic measurements [J]. *Nature*, **361**: 337–340.
- Bock Y, Nikolaidis R M, Bevis M. 2000. Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System [J]. *J Geophys Res*, **105**(B12): 28223–28253.
- Calais E, Han J Y, DeMets C, Nocquet J M. 2006. Deformation of the North American plate interior from a decade of

- continuous GPS measurements [J]. *J Geophys Res*, **111**: B06402.
- Dong D N, Fang P, Bock Y, Cheng M K, Miyazaki S. 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series [J]. *J Geophys Res*, **107**(B4): 2075.
- Dong D N, Fang P, Bock Y, Webb F, Prawirodirdjo L, Kedar S, Jamason P. 2006. Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis [J]. *J Geophys Res*, **111**: B03405.
- Dragert H, Wang K, James T S. 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface [J]. *Science*, **292**(5521): 1525–1528.
- Farrell W E. 1972. Deformation of the Earth by surface loads [J]. *Rev Geophys Space Phys*, **10**: 761–797.
- Gan W J, Prescott W H. 2001. Crustal deformation rates in central and eastern U. S. inferred from GPS [J]. *Geophys Res Lett*, **28**(19): 3733–3736.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, Niu Z J, Wang M, Wan Y G, Zhou D M, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion with the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements [J]. *J Geophys Res*, **112**: B08426.
- Genrich J F, Bock Y. 2006. Instantaneous geodetic positioning with 10—50 Hz GPS measurements: Noise characteristics and implications for monitoring networks [J]. *J Geophys Res*, **111**: B03403.
- Hudnut K W, Shen Z K, Murray M, McClusky S, King R, Herring T, Hager B, Feng Y, Fang P, Donnellan A, Bock Y. 1996. Co-seismic displacements of the 1994 Northridge, California, earthquake [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**(1B): S19–S36.
- Johnson H O, Agnew D C. 1995. Monument motion and measurements of crustal velocities [J]. *Geophys Res Lett*, **22**(21): 2905–2908.
- Johnson H O, Agnew D C. 2000. *Correlated Noise in Geodetic Time Series* [M]. La Jolla: University of California, San Diego, 11.
- Khan S A, Scherneck H G. 2003. The M2 ocean tide loading wave in Alaska: Vertical and horizontal displacements, modeled and observed [J]. *J Geod*, **77**(3–4): 117–127.
- King M A, Penna N T, Clarke P J, King E C. 2005. Validation of ocean tide models around Antarctica using onshore GPS and gravity data [J]. *J Geophys Res*, **110**: B08401.
- King N E, Svart J L, Fogelman E B, Gross W K, Clark K W, Hamilton G D, Stiffler C H, Sutton J M. 1995. Continuous GPS observations across the Hayward fault, California, 1991–1994 [J]. *J Geophys Res*, **100**(B10): 20271–20284.
- King N E, Argus D, Langbein J, Agnew D C, Bawden G, Dollar R S, Liu Z, Galloway D, Reichard E, Yong A, Webb F H, Bock Y, Stark K, Barseghian D. 2007. Space geodetic observation of expansion of the San Gabriel Valley, California, aquifer system, during heavy rainfall in winter 2004–2005 [J]. *J Geophys Res*, **112**: B03409.
- Langbein J, Wyatt F, Johnson H, Hdmann D, Zimmrr P. 1995. Improved stability of a deeply anchored geodetic monument for deformation monitoring [J]. *J Geophys Res*, **22**(24): 3533–3536.
- Langbein J, Johnson H. 1997. Correlated error in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation [J]. *J Geophys Res*, **102**(B1): 591–604.
- Larson K M, Bürgmann R, Bilham R, Freymueller J T. 1999. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements [J]. *J Geophys Res*, **104**(B1): 1077–1094.
- Lowry A R, Larson K M, Kostoglodov V, Bilham R. 2001. Transient fault slip in Guerrero, southern Mexico [J]. *Geophys Res Lett*, **28**(19): 3753–3756.
- Mao A, Harrison C G A, Dixon T H. 1999. Noise in GPS coordinate time series [J]. *J Geophys Res*, **104**(B2): 2797–2816.
- Marquez-Azua B, Demets C. 2003. Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for the neotectonics of Mexico [J]. *J Geophys Res*, **108**(B9): 2450.
- McCarthy D D, Petit G. 2004. *IERS Conventions (2003)* [M]. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 127.

- Miller M M, Melbourne T, Johnson D J, Sumner W Q. 2002. Periodic slow earthquakes from the Cascadia subduction zone [J]. *Science*, **295**(5564): 2423.
- Miyazaki S, Heki K. 2001. Crustal velocity field of southwest Japan: Subduction and arc-arc collision [J]. *J Geophys Res*, **106**(B3): 4305–4326.
- Niell A E. 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths [J]. *J Geophys Res*, **101**(B2): 3227–3246.
- Nikolaidis R. 2002. Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System[D]. San Diego: University of California: 249.
- Ozawa S, Murakami M, Kaidzu M, Tada T, Sagiya T, Hatanaka Y, Yarai H, Nishimura T. 2002. Detection and monitoring of ongoing aseismic slip in the Tokai region, central Japan [J]. *Science*, **298**(5595): 1009–1012.
- Penna N T, Stewart M P. 2003. Aliased tidal signatures in continuous GPS height time series [J]. *Geophys Res Lett*, **30**(23): 2184.
- Penna N T, King M A, Stewart M P. 2007. GPS height time series: Short-period origins of spurious long-period signals [J]. *J Geophys Res*, **112**: B02402.
- Prawirodirdjo L, Ben-Zion Y, Bock Y. 2006. Observation and modeling of thermoelastic strain in Southern California Integrated GPS Network daily position time series [J]. *J Geophys Res*, **111**: B02408.
- Scargle J D. 1982. Studies in astronomical time series analysis: II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced points [J]. *Astrophys J*, **263**: 835–853.
- Sella G F, Dixon T H, Mao A. 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy [J]. *J Geophys Res*, **107**(B4): 2081.
- Shen Z K, Jackson D D, Ge B X. 1996. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements [J]. *J Geophys Res*, **101**(B12): 27957–27980.
- Shen Z K, Zhao C K, Yin A, Li Y X, Jackson D D, Fang P, Dong D N. 2000. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurements [J]. *J Geophys Res*, **105**(B3): 5721–5734.
- Shen Z K, Lu J N, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau [J]. *J Geophys Res*, **110**: B11409.
- Smith K D, Seggern D, Blewitt G, Preston L, Anderson J G, Wernicke B P, Davis J L. 2004. Evidence for deep magma injection beneath Lake Tahoe, Nevada-California [J]. *Science*, **305**: 1277–1280.
- Tregoning P, vanDam T M. 2005. Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level [J]. *Geophys Res Lett*, **32**: L22310.
- vanDam T M, Blewitt G, Heflin M B. 1994. Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations [J]. *J Geophys Res*, **99**(B12): 23939–23950.
- Wdowinski S, Bock Y, Zhang J, Fang P, Genrich J. 1997. Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake [J]. *J Geophys Res*, **102**(B8): 18057–18070.
- Williams S D P. 2003. The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series [J]. *J Geod*, **76**: 483–494.
- Williams S D P, Bock Y, Fang P, Jamason P, Nikolaidis R M, Prawirodirdjo L, Miller M, Johnson D J. 2004. Error analysis of continuous GPS position time series [J]. *J Geophys Res*, **109**: B03412.
- Wyatt F K, Bolton H, Bralla S, Agnew D C. 1989. New designs of geodetic monuments for use with GPS [J]. *Eos Trans AGU*, **70**: 1054–1055.
- Zhang J, Bock Y, Johnson H, Fang P, Williams S, Genrich J, Wdowinski S, Behr J. 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities [J]. *J Geophys Res*, **102**(B8): 18035–18055.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, Gan W J, Bürgmann R, Molnar P. 2004. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data [J]. *Geology*, **32**(9): 809–812.