第 32 卷　第 6 期　　地　震　学　报　　Vol. 32, No. 6
2010 年 11 月　(696-704)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Nov., 2010

田云锋，沈正康，李鹏. 2010. 连续 GPS 观测中的相关噪声分析. 地震学报，**32**(6)：696-704.
Tian Yunfeng, Shen Zhengkang, Li Peng. 2010. Analysis on correlated noise in continuous GPS observations. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(6): 696-704.

连续 GPS 观测中的相关噪声分析*

田云锋[1,2),♣]　沈正康[2,3)]　李　鹏[2)]

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所
2) 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
3) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院

摘要　分析了中国地壳运动观测网络 GPS 基准站位置时间序列中相关噪声的特性. 利用最大似然估计反演了幂指数噪声的谱指数；考察了多种噪声模型，发现除闪烁噪声之外，约 50%台站的东分量中的相关噪声可用“随机漫步噪声＋一阶高斯-马尔可夫噪声”模型来描述，与其它分析机构产出的全球解并不一致，显示出处理策略的不同能够造成相关噪声的差异. 白噪声和闪烁噪声的大小存在明显的地理分异，东南沿海台站的噪声要大于西北内陆台站. 考虑相关噪声时，各站的速率估计方差要增大一个数量级以上，水平分量多在 1 mm/a 以内，而垂向分量则较大.

关键词　GPS　位置时间序列　相关噪声　最大似然估计
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2010.06.007　　**中图分类号**：P542　　**文献标识码**：A

Analysis on correlated noise in continuous GPS observations

Tian Yunfeng[1,2),♣]　Shen Zhengkang[2,3)]　Li Peng[2)]

1) *Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing* 100085, *China*
2) *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*
3) *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*

Abstract: We analyzed the characteristics of the correlated noise in position time series for fiducial GPS stations of the Crustal Motion Observation Network of China. The spectral index for power-law noise was derived using the maximum likelihood estimator. We took into account more types of noise models, and found that, besides flicker noise, about 50% east components can be described by a ‘random walk noise plus first-order Gauss-Markov noise’ model, which is inconsistent with the results from global solutions produced by other agencies. This reveals that the difference in processing strategy can induce varied correlated noise. The magnitudes of white noise and flicker noise are spatially correlated. The sites in southeastern coastal region have larger noise than inland

* **基金项目**　中国地震局地壳应力研究所所长基金项目(ZDJ2009-01)和国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418403)共同资助.
收稿日期　2009-06-30 收到初稿，2010-06-13 决定采用修改稿.
♣ **通讯作者**　e-mail：tianyunfeng@yahoo.com.cn

northwestern ones. When considering the correlated noise, the estimation errors of velocity will increase by over an order. The velocity uncertainties are usually less than 1 mm/a for horizontal components and larger for vertical ones.

Key words: GPS; positions time series; correlated noise; maximum likelihood estimator

引言

连续 GPS 测量是当前毫米级形变监测的主要手段之一，在活动地块划分、断层滑动速率估计、强震形变场分析等领域发挥着重要作用. 在估计台站运动速率时，常同时考虑线性趋势、周期项、阶跃、震后驰豫形变等.

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

式中，$y(t_i)$为单站、单分量位置序列；t_i 为时间，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 为阶跃，h 为震后速率变化，k 为震后对数衰减模型，v_i 为观测噪声，H 为阶梯(heaviside step)函数. 在这里，假设长期的地壳运动可完全用线性函数来描述，而未知的地壳运动则作为噪声处理.

GPS 位置残差序列中仍存在时域相关噪声(Zhang *et al*，1997；Mao *et al*，1999；符养，2002；朱文耀等，2003；Williams *et al*，2004；黄立人，2006；黄立人，符养，2007)，常使得人们对 GPS 所得结果的认识产生偏差. 这类相关噪声最早被认为是随机漫步噪声(random-walk noise，简写为 RWN)，后来证实 GPS 中普遍包含闪烁噪声(flicker noise，简写为 FN)，且单一类型不能适用于所有台站. 除 FN 和 RWN 之外，Langbein(2008)还检验了一阶高斯-马尔可夫(first-order Gauss-Markov，简写为 FOGM)噪声和带通滤波噪声(band-pass filtered noise，简写为 BP)，发现该模型适合于部分美国南加州等地的 GPS 数据.

针对中国地壳运动观测网络(Crustal Motion Observation Network of China，简写为 CMONOC)GPS 基准站位置时间序列，黄立人和符养(2007)利用最大似然估计(maximum likelihood estimator，简写为 MLE)分析了 FN 和 RWN 的特性，发现大部分序列的噪声可用“白噪声(white noise，简写为 WN)＋FN”描述，少部分可用“WN＋FN＋RWN”描述；与北(N)分量相比，东(E)分量具有较大的 FN 和 RWN；从地域上来说，南部台站的相关噪声相对较大. 相关噪声的来源尚未确定，其空间特征也有待更深入地分析. 从美国 SCIGN(Southern California Integrated GPS Network)连续台网的数据来看，GPS 中包含了某种公共噪声(Dong *et al*，2006)，经过空间滤波后相关噪声明显减小(Williams *et al*，2004). SCIGN 网络的空间范围约 300—400 km，而 CMONOC 基准站网络的基线较长，各站的相关噪声大小的空间分布为何？各分量中的噪声是否相关？相关噪声能够对 CMONOC 基准站速率估计产生多大的影响？弄清楚这些问题有利于揭示相关噪声的起源及正确地认识所得的 GPS 速率矢量场.

本文详细地分析了 CMONOC 基准站位置时间序列中相关噪声的特征. 与前人的研究

相比：① 采用了更长的位置时间序列，利于更准确的分析噪声特性；② 利用最大似然估计反演了各站幂指数噪声的谱指数，与周期图法相比结果更准确，且除 FN 和 RWN 之外，还考虑了其它噪声类型(FOGM，BP)，更能表达客观的噪声构成；③ 与其它分析机构产出的周边台站的解进行了对比分析.

1 数据

采用 CMONOC 等共 29 个 GPS 基准站的数据，时间跨度为 1999 年 3 月 1 日—2006 年 11 月 3 日. 其中部分地区建站较晚(chun：2000-06-04；whjf、zhnz：2002-01-01；hrbn：2003-01-01；kc01：2003-10-15). 位置时间序列由中国地壳运动观测网络数据中心常规解算所得，采用 GMAIT/GLOBK 软件进行处理：利用 GAMIT 获得 CMONOC 基准站及若干 IGS 站的单日松弛解，然后利用 GLOBK 与 SIO(Scripps Institution of Oceanography)产出的全球单日松弛解(igs1，igs2 和 igs3 子网)合并，并以若干 IGS 站作为约束，通过 7 参数变换转换到国际地球参考框架 ITRF(international terrestrial reference frame) 2000 下. GAMIT 解算中采用相对天线相位中心模型、GOT00.2 海潮模型、IERS92 标准的重力场和固体潮模型，大气映射函数为 Neill Mapping Function，每 2 小时估计 1 个大气天顶延迟参数，水平梯度各方向估计 3 个参数.

部分 CMONOC 基准站受到同震位移的影响(王敏等，2006). 目视还发现若干台站存在不明原因的阶跃，如 bjsh (2000-02-23)、dxin (2000-09-05)和 xnin(2001-04-07)等. 基于台站运动函数模型(式 1)，利用加权最小二乘法估计了线性速率、阶跃和周期项等参数. 对于奇异点，采用残差偏离 3 倍 IQR(interquartile range)的准则(黄立人，2006)加以剔除. 此外，还删去了各种原因(如 tain 站天线进水)导致的异常.

此外，还采用了 SIO 及 JPL(Jet Propulsion Laboratory)提供的 20 个周边 IGS 台的位置时间序列(数据更新日期为 2008 年 5 月 16 日)进行对比分析. 相关噪声分析基于各站在 SIO 和 JPL 解中的公共历元进行. SIO 采用 GAMIT/GLOBK，JPL 采用 GIPSY/OASIS-Ⅱ进行处理. 详细的处理策略和模型、参数设置可参阅相关网站.

2 相关噪声的类型

2.1 幂指数噪声的谱指数

假设 GPS 中的噪声由 WN 和幂指数噪声(power-law noise，简写为 PLN)组成，则功率谱为(Langbein，Johnson，1997)

$$P(f) = P_0(f^{\kappa} + f_0^{\kappa}) \tag{2}$$

式中，κ 是谱指数，f_0 是交叉频率，P_0 是常量. 基于时间序列的功率谱，通过拟合一条符合式(1)的曲线可得 κ，f_0 和 P_0 的值. 我们采用更为准确的 MLE 法来估计谱指数(表 1). 各分量的谱指数接近于－1，与 GPS 中的相关噪声广泛具有 FN(κ＝－1)的特点相符. 与采用周期图计算的结果(黄立人，符养，2007)相比：① 采用 MLE 反演得到的谱指数偏小；② MLE 反演得到的 E，N，U(垂向)分量的谱指数依次递增，水平分量的谱指数较垂向分量小. 周期图法仅通过拟合一条频率和功率谱密度双对数坐标系中的直线来估计谱指数，这种方法本身的特性可能是产生差别的原因. 从各分析中心结果的对比来看，CMONOC 与 JPL 解较相近，而 SIO 解中的幂指数噪声谱指数偏大.

表 1　GPS 中幂指数噪声谱指数均值及标准差

Table 1　Mean and standard deviation of spectral index of power-law noise in GPS observations

资料来源	N	E	U
CMONOC(本文)	−1.03±0.17	−1.27±0.19	−0.93±0.13
CMONOC(黄立人，符养，2007)	−0.9±0.34	−0.85±0.34	−0.95±0.35
SIO(本文)	−0.88±0.18	−0.96±0.33	−0.85±0.12
JPL(本文)	−1.07±0.17	−1.15±0.20	−0.93±0.24
全球解(Williams *et al*，2004)	−1.0±0.5	−0.9±0.4	−0.8±0.4

2.2　最佳噪声模型

Langbein(2004)发现电子测距数据中还包含 FOGM 和 BP 噪声，并在美国南加州等地的 GPS 中检测到了此类噪声(Langbein，2008)．针对 CMONOC 基准站位置时间序列，我们采用 MLE 法来判定最佳噪声模型．除 WN 之外，假设有 6 种相关噪声组合：FN，RWN，PLN，FNR＋WN，RWN＋FOGM 和 BP＋PLN．BP 噪声的频率设为1.58×10^{-8}—6.34×10^{-8} Hz［即每年周期数(cycles per year)为 0.5—2］．最优模型的判定依据为 MLE 似然函数值的相对大小，判别标准同 Langbein(2008)一文．所得的最佳模型统计结果见表 2．其中 N 和 U 分量中大多数台站可用 FN 来表示，而 E 分量有相当一部分可用“RWN＋FOGM”来表示．同时给出的还有 SIO 和 JPL 解的最佳噪声模型，而各分量并不存在较多的“RWN＋FOGM”噪声．

表 2　最佳噪声模型统计

Table 2　Statistics of best noise models

噪声模型	最优模型台站数								
	CMONOC			SIO			JPL		
	N	E	U	N	E	U	N	E	U
FN	21	11	22	16	15	12	18	12	7
RWN	0	0	0	0	2	0	0	0	0
PLN	5	3	5	2	0	3	0	2	6
FN＋RWN	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RWN＋FOGM	2	14	1	2	2	3	2	6	4
PLN＋BP	1	1	1	0	1	2	0	0	3

为了分析处理策略能够引起多大的噪声类型差异，我们比较了 SIO 和 JPL 解中 20 个公共台站的最佳噪声模型(表 3)．二者在N分量符合最好，在E和U分量仅约50%的分量一致．

3　噪声大小分布

CMONOC，SIO 和 JPL 解中 FN 和 WN 大小的均值和标准差估计如表 4 所示．N，E 和 U 分量的 WN 和 FN 大小依次递增，各分析机构解中的噪声大体相当．造成 E 分量较 N 分量噪声大的原因尚不清楚，可能部分原因是由 GPS 卫星的分布(轨道面与地球赤道面的倾角约为 55°)造成的，即台站观测到的卫星轨道南北向展布大于东西向展布，造成对二方向解的贡献不同．

噪声的大小空间分布可用于分析噪声的潜在起源．CMONOC 基准站中 WN 和 FN 的大小如图1所示．前人的研究发现FN或WN大小存在纬度依赖性(Mao *et al*，1999；Williams

表 3 SIO 和 JPL 解的最佳噪声模型对比

Table 3 Comparison of best noise models for SIO and JPL solutions

台站	时间段	历元数	N		E		U	
			SIO	JPL	SIO	JPL	SIO	JPL
ban2	2002.941—2007.634	1342	FN	FN	RWN	RWN_FOGM	FN	FN
bjfs	1999.886—2007.648	2326	FN	FN	FN	RWN_FOGM	FN	PLN
daej	1999.218—2006.914	2372	FN	FN	FN	FN	RWN_FOGM	FN
guao	2003.193—2007.648	1153	RWN_FOGM	FN	RWN_FOGM	PLN	RWN_FOGM	PLN
hyde	2003.478—2007.648	1292	PLN	FN	RWN	PLN	FN	RWN_FOGM
iisc	1996.004—2007.640	2813	FN	FN	PLN_BP	RWN_FOGM	FN	RWN_FOGM
irkt	1996.007—2007.643	3262	FN	FN	FN	FN	PLN	PLN_BP
kit3	1996.081—2007.632	2144	PLN	FN	FN	FN	FN	FN
kstu	1997.686—2004.717	1300	FN	FN	FN	FN	FN	PLN
kunm	1999.300—2007.215	2425	FN	FN	FN	RWN_FOGM	FN	FN
lhas	1996.245—1999.985	591	FN	FN	FN	FN	FN	RWN_FOGM
nvsk	2000.988—2006.930	1743	FN	FN	RWN_FOGM	FN	FN	PLN
pol2	1996.029—2007.648	3234	FN	FN	FN	FN	PLN_BP	PLN_BP
sele	1997.495—2007.215	2990	FN	FN	FN	FN	PLN_BP	PLN_BP
shao	1996.004—2006.648	2199	FN	FN	FN	FN	FN	PLN
suwn	1998.116—2007.648	2460	FN	FN	FN	FN	PLN	PLN
tnml	2003.040—2007.648	1428	RWN_FOGM	RWN_FOGM	FN	RWN_FOGM	FN	FN
ulab	2001.593—2007.632	1630	FN	RWN_FOGM	FN	FN	RWN_FOGM	RWN_FOGM
urum	1999.103—2005.410	1736	FN	FN	FN	FN	FN	FN
wuhn	1999.374—2007.648	2626	FN	FN	FN	RWN_FOGM	PLN	FN
模型一致的台站百分比			80%		55%		45%	

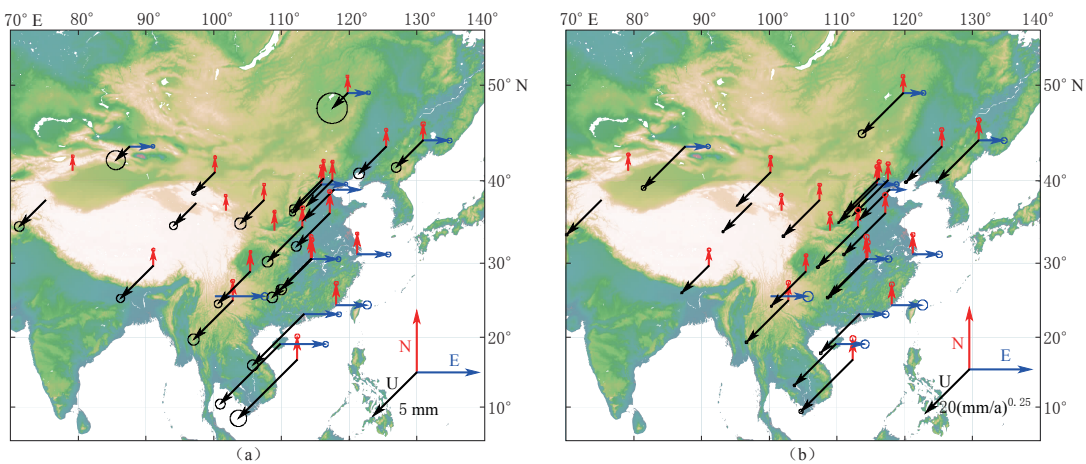

图 1 CMONOC GPS 基准站噪声大小分布(仅给出了最佳噪声模型为 FN 的分量)

(a) WN; (b) FN. 北、东和西南向箭头分别表示 N, E 和 U 分量;

箭头的长度代表噪声大小, 椭圆表示 95%的置信水平

Fig. 1 Spatial distribution of noise magnitudes for CMONOC GPS fiducial sites

(only those components whose best model is FN are shown)

(a) WN; (b) FN. North, east, and southwestern arrows denote north, east, and vertical components, respectively. The length of arrow denotes the magnitude of noise. The ellipses represent the 95% confidence level

http://www.dizhenxb.org.cn

表 4　FN 和 WN 的大小均值及标准差

Table 4　Mean and standard deviation of magnitudes of FN and WN

资料来源	FN/mm·a$^{-0.25}$			资料来源	WN/mm·a^{-1}		
	N	E	U		N	E	U
CMONOC	5.74±0.72	7.52±1.61	17.11±2.41	CMONOC	1.49±0.32	2.17±0.55	3.70±1.38
SIO	5.86±1.06	7.57±2.50	18.01±5.01	SIO	2.31±0.52	4.34±0.83	5.07±2.11
JPL	6.19±1.24	8.70±2.56	19.45±4.02	JPL	1.89±0.54	2.92±0.96	5.12±1.81

et al，2004)，靠近赤道的台站 FN 要大，且南半球比北半球稍大. 相比之下，CMONOC中FN 和 WN 的大小表现出更明显的海陆差异，靠近海洋的台站(yong，qion，shao，xiam，suiy，xiag 和 kmin 等)要明显比内陆台站具有更大的噪声. 这可能源于未完全模拟的海潮残差. 同时，IGS 跟踪站主要位于欧洲、北美，空间分布严重不均，从而导致的卫星定轨和参考框架在台站稀疏地区精度较差也可能是起因. 在 GPS 台站密集的地区 WN 和 FN 较小，台站稀疏的区域噪声相对要大，结合各站的地理位置，相关噪声的大小在全球的空间分布也可描述为统计意义上的纬度依赖性. 此外，区域气候能显著地影响噪声大小(Langbein，2008)，各地气候条件的差异可能也是起因之一. 同时，单站各分量的噪声大小存在正相关关系，表明各分量受到相同噪声起源的影响.

4　相关噪声对速率估计的影响

相关噪声的存在会使对速率方差的估计过于乐观(黄立人，2006). Zhang 等(1997)发现采用 WN＋FN 时，速率估计的方差较单纯采用 WN 时大 3—6 倍. 从 CMONOC 基准站的计算结果(表 5)来看，采用最佳噪声模型时速率估计的方差要较单纯白噪声假设下普遍大一个数量级以上. 尤其是在 U 分量，相关噪声的存在使得速率的估计存在较大的偏差.

Langbein 和 Johnson(1997)认为要准确地检测 RWN，观测时间序列的长度要 5 倍于其交叉频率(crossover frequency)对应的周期. PLN 的理论功率谱为(Williams，2003)

$$P(f)=\frac{2(2\pi)^{\kappa}(24\times 60\times 60\times 365.25)^{\kappa/2}\sigma_{\kappa}^{2}}{f_{s}^{\kappa/2+1}}f^{\kappa} \tag{3}$$

式中，f_s 为采样频率(单位：Hz)，κ 为谱指数，f 为频率，σ_κ 为噪声大小. 当 $\kappa=0$ 时为 WN，$\kappa=-1$时为 FN，$\kappa=-2$ 时为 RWN. 由式(2)可见，交叉频率与噪声的相对大小、采样频率和噪声类型相关. 仅考虑 WN＋RWN 时，取 CMONOC 中相对大小的平均值 1∶1.82，则交叉频率为 1.85×10^{-7} Hz(即每年周期数为 5.84)，按照 $5/f_0$ 准则，要准确地描述 RWN，至少需要312.71天的数据. 仅考虑 WN 和 FN 时，取相对大小为平均值 1∶3.98，则交叉频率为 1.53×10^{-6} Hz(即每年周期数为 48.18，周期约为 8 天). 然而上述假设过于简单，从最佳模型结果来看，存在复杂的组合模型(如 BP，PLN 和 FOGM)，现有的观测尚不能满足准确地检测各类噪声的要求. 从速率估计的方差统计来看，水平分量速率估计方差大部分在 1 mm/a 以内；kc01 台站的 N 分量和 yong，zhnz 的 E 分量异常，可能与未检测到的阶跃、地面沉降、位置时间序列较短等因素有关；U 分量约半数的速率方差大于 1 mm/a. 因此，在应用 GPS 速率进行断层活动分析等工作时，有必要考虑相关噪声对速率估计的影响.

表 5　CMONOC GPS 基准站运动速率估计

Table 5　Velocity estimation for CMONOC fiducial GPS sites

单位：mm/a

台站	N			E			U		
	WN	相关噪声		WN	相关噪声		WN	相关噪声	
bjfs	−13.17±0.02	−13.15±0.34	FN	28.40±0.02	28.18±0.38	FN	0.24±0.02	0.45±1.02	FN
bjsh	−12.80±0.02	−12.87±0.32	FN	28.54±0.02	28.36±0.24	RWN_FOGM	−3.42±0.02	−2.56±0.90	FN
chun	−13.22±0.03	−13.11±0.38	FN	25.28±0.03	24.62±0.34	RWN_FOGM	−3.11±0.03	−5.38±1.10	FN
dlha	−1.87±0.03	−2.14±0.43	PLN_BP	34.27±0.03	33.15±0.38	RWN_FOGM	−2.38±0.03	−2.30±0.82	FN
dxin	−7.36±0.02	−7.37±0.27	FN	29.81±0.02	29.10±0.31	RWN_FOGM	−2.30±0.02	−1.83±0.80	FN
guan	−14.83±0.03	−14.46±0.30	FN	31.00±0.03	30.87±0.57	FN	−6.18±0.03	−5.96±1.20	FN
hlar	−13.16±0.02	−13.24±0.26	RWN_FOGM	24.63±0.02	24.54±0.32	FN	−1.71±0.02	−0.79±0.84	FN
hrbn	−13.08±0.03	−12.94±0.26	RWN_FOGM	25.09±0.03	24.97±0.26	RWN_FOGM	−6.75±0.03	−4.81±1.29	PLN
jixn	−12.14±0.02	−12.17±0.26	FN	27.79±0.02	27.54±0.19	RWN_FOGM	−1.21±0.02	−1.66±0.76	FN
kc01	−15.04±0.04	−16.00±1.45	PLN	28.24±0.04	28.77±0.56	FN	−19.20±0.04	−18.46±1.45	FN
kmin	−20.18±0.02	−20.56±0.35	FN	32.69±0.02	32.12±0.48	RWN_FOGM	−7.91±0.02	−6.57±1.12	FN
lhas	12.87±0.02	13.08±0.27	FN	44.17±0.02	43.86±0.30	RWN_FOGM	−0.39±0.02	0.72±0.65	FN
luzh	−12.16±0.02	−11.96±0.30	FN	33.21±0.02	32.79±0.30	RWN_FOGM	−2.64±0.02	−1.92±0.87	FN
qion	−11.79±0.03	−12.32±0.34	FN	29.06±0.03	28.53±0.59	FN	−2.49±0.03	−1.59±1.17	FN
shao	−15.82±0.02	−16.01±0.32	FN	30.26±0.02	29.58±0.43	FN	−2.74±0.02	−3.81±0.67	PLN_BP
suiy	−14.91±0.03	−14.52±0.48	FN	23.29±0.03	23.64±0.61	FN	−1.87±0.03	−0.57±1.36	FN
tain	−14.31±0.02	−14.96±0.38	FN	29.87±0.02	29.57±0.68	PLN	−2.27±0.02	0.09±1.15	FN
tash	20.76±0.02	21.90±0.43	PLN	24.93±0.02	24.62±0.26	RWN_FOGM	−3.91±0.02	−2.44±0.87	FN
urum	5.00±0.02	5.17±0.21	PLN_BP	29.80±0.02	30.15±0.39	FN	0.94±0.02	−0.67±0.92	FN
whjf	−14.85±0.03	−14.79±0.51	FN	29.49±0.03	28.85±0.64	FN	−2.59±0.03	−2.24±1.56	FN
wuhn	−13.41±0.03	−12.79±0.43	PLN_BP	32.10±0.03	30.75±0.53	RWN_FOGM	−5.13±0.03	−3.51±1.07	FN
wush	13.09±0.02	13.25±0.24	FN	29.47±0.02	29.28±0.22	RWN_FOGM	−3.35±0.02	−3.24±0.52	PLN
xiaa	−8.56±0.02	−8.56±0.33	FN	27.81±0.02	26.99±0.59	PLN	−6.86±0.02	−7.43±0.81	PLN
xiag	−19.25±0.02	−19.48±0.29	PLN	26.46±0.02	26.30±0.73	FN	−5.69±0.02	−3.72±1.45	PLN
xiam	−15.65±0.02	−15.43±0.33	FN	31.53±0.02	31.55±0.48	FN	−1.91±0.02	−2.46±0.70	PLN
xnin	−5.45±0.04	−5.63±0.31	RWN_FOGM	36.67±0.04	35.39±0.40	RWN_FOGM	−3.06±0.04	−3.02±0.44	RWN_FOGM
yanc	−12.32±0.02	−12.38±0.23	FN	30.46±0.02	29.91±0.23	RWN_FOGM	−2.83±0.02	−2.45±0.76	FN
yong	−13.96±0.05	−13.77±0.57	FN	24.23±0.05	27.37±1.11	PLN_BP	−8.07±0.05	−6.12±2.00	FN
zhnz	−14.39±0.07	−13.45±0.56	FN	29.50±0.07	29.08±1.21	PLN	−0.42±0.07	−4.32±1.80	FN

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

5　讨论与结论

通过本文的分析，我们得到以下结论：

1）GPS 广泛受到闪烁噪声的影响，CMONOC GPS 基准站东分量中检测到的“随机漫步噪声＋一阶高斯-马尔可夫噪声”可能源于处理策略.

2）与纬度依赖性相比，白噪声和闪烁噪声的大小表现出更明显的东南部沿海与西北部内陆的差异，这可能源于海潮残差、卫星定轨误差或参考框架定义误差.

3）各分析机构产出的位置时间序列中相关噪声的类型、大小存在差别，说明相关噪声的产生与采用的软件、模型和参数设置等密切相关.

4）考虑相关噪声时，水平分量速率估计值变化不大，速率方差则明显变大，而垂向分量速率和速率方差估计值变化均较大，表明现有的观测还不足以准确地检测垂向分量中的相关噪声. 在估计台站的线性速率时应考虑各类噪声的组合，采用最佳组合模型下的估计结果.

本文的分析是基于全球参考框架下的解，与采用区域参考框架相比，部分时空相关噪声虽未被消除，但有益于噪声的全球对比分析和探索噪声的起源. 今后，我们认为应在以下几个方面继续开展研究：

1）采用再分析资料进行分析. IGS 分析中心已经完成了全球 IGS 网络所有历史数据的重新分析，由于通常的做法是将 CMONOC 单日松弛解与国际 IGS 网络的单日解合并，通过 ITRF 台站来定义参考框架，这将在很大程度上降低我们重新进行数据解算时的计算负担. 采用同一软件、模型和参数设置所得的位置时间序列中将包含更少的非构造运动，利于更准确地进行噪声分析.

2）研究区域参考框架下相关噪声的变化. 在小尺度区域框架下，时空相关的公共噪声在很大程度上通过坐标转换被消除掉了，所得位置时间序列更准确地反映了单站噪声.

噪声分析的用途是降低其对形变研究的影响. 随着中国大陆构造环境监测网络 260 个连续 GPS 台站的建成，我们对各地 GPS 中噪声的认识将进一步深化，对于研究噪声的起源，并最终将其在观测数据解算阶段剔除等将大有裨益.

中国地震局地质研究所王敏研究员对本文提出了宝贵建议，审稿专家对本文的改进提出了重要意见. CMONOC GPS 基准站的位置时间序列由 CMONOC 数据分析中心提供，中国周边 IGS 站的位置时间序列取自 SIO(ftp://garner.ucsd.edu/pub/timeseries/)和 JPL(http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html)网站. 文中相关噪声分析采用了 Langbein 的 est_noise 程序(ftp://ehzftp.wr.usgs.gov/langbein/)，插图采用 Generic Mapping Tools(http://gmt.soest.hawaii.edu/)软件绘制. 在此一并表示感谢.

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.

王敏，张培震，沈正康，刘杰，孙汉荣，甘卫军，李鹏. 2006. 全球定位系统(GPS)测定的印尼苏门达腊巨震的远场同震地表位移[J]. 科学通报，**51**(3)：365-368.

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.

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.

Langbein J, Johnson H. 1997. Correlated error in geodetic time series: implications for time-dependent deformation [J]. *J Geophys Res*, **102**(B1): 591-604.

Langbein J. 2004. Noise in two-color electronic distance meter measurements revisited[J]. *J Geophys Res*, **109**: B04406.

Langbein J. 2008. Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada[J]. *J Geophys Res*, **113**: B05405.

Mao A, Harrison C G A, Dixon T H. 1999. Noise in GPS coordinate time series [J]. *J Geophys Res*, **104**(B2): 2797-2816.

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*, **9**: B03412.

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.

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA