

# 有色噪声模型下云南地区 GPS 基准站 速度与周期估计\*

张风霜

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 基于 2010~2014 年云南地区 25 个 GPS 连续观测站的三维站坐标时间序列结果, 通过不同噪声模型对其进行分析, 结果表明: 各坐标分量具有不同的噪声特性且最优噪声模型存在多样性, 闪烁噪声 + 白噪声和幂律噪声 + 白噪声为该区主要的噪声模型, 垂向分量最优噪声模型的分布表现出以 NW 向红河断裂带为分界的地域性。噪声模型与测站运动参数的定量分析表明, 噪声模型对测站速度不确定度和年周期振幅不确定度影响较大, 有色噪声模型下的速度不确定度和年周期振幅不确定度分别是白噪声模型下的 3~7 倍和 2~3 倍; 噪声模型对速度及年周期振幅产生少量影响, 有色噪声模型和白噪声模型下的线性速度估值偏差一般小于 1 mm/a, 少数测站垂向分量差异超过 1 mm/a, 年周期振幅估值偏差一般小于 0.5 mm/a, 且垂向分量偏差大于水平分量, 东向分量偏差大于北向分量。

**关键词:** 云南地区; GPS 基准站; 时间序列噪声分析; 极大似然估计; 最优噪声模型

**中图分类号:** P315.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)03-0410-11

## 0 引言

随着中国大陆构造环境监测网络工程的实施, GPS 连续观测站由 33 个增至 253 个, 新增的 220 个 GPS 连续观测站从 2010 年后开始连续观测, 至 2014 年已积累了约 4 年的观测资料。多位学者利用中国大陆 GPS 观测结果取得了丰富的研究成果 (江在森等, 2003; 王敏等, 2003, 2005; 李强等, 2012; Wu *et al.*, 2011, 2013; 梁洪宝等, 2015; 施发奇等, 2012)。由于各研究领域对大地测量成果所要求的精度越来越高, GPS 点位的非线性时变也越来越受到关注, 研究并处理测站的非线性变化特征, 对于毫米级地球参考框架的建立与维持及地球动力学研究具有十分重要的意义 (陈俊勇, 2007; Altamimi *et al.*, 2005)。除地球物理效应及 GPS 技术系统误差外, 各种随机因素的影响 (噪声) 同样会造成 GPS 测站的非线性变化。因此, 对于陆态网络工程二期新增的 GPS 连续观测站, 建立最优的随机噪声模型, 实现形变信号与噪声的有效分离, 对于构建正确的测站运动函数模型,

获取高精度的线性运动速度、周期变化振幅的估值及其不确定度至关重要。其结果可用于精化速度场求解, 并为板块运动引起的线性构造形变以及各种非线性形变信息的分离提供可靠的基础数据。

当前, 国内外一些学者采用多种噪声模型分析了不同地区 GPS 坐标时间序列的噪声性质, 并取得了显著进展 (黄立人, 符养, 2007; 黄立人, 2006; 田云锋等, 2010; Langbein, 2008)。比如, Langbein (2008) 对美国加利福尼亚南部及内华达南部地区 236 个连续 GPS 站的噪声模型进行了估计, 得出 15% 测站的噪声模型位于带通 + 幂律噪声 (BP + PL) 及一阶高斯马尔科夫 + 随机漫步噪声 (FOGM + RW) 之间, 约 30% 测站噪声为闪烁 + 随机漫步噪声 (FN + RW), 或者非整数谱指数幂律噪声 (PL), 而半数以上测站的最佳噪声模型为闪烁噪声 (FN) 或者随机漫步噪声 (RW)。袁林果等 (2008) 对香港 12 个基准站的噪声特性进行了分析, 认为经主成分空间滤波去除公共误差 (CME) 后的噪声特性可用可变白噪声 + 闪烁噪声 (VW + FN) 模型描述。蒋志浩等 (2009, 2010)

\* 收稿日期: 2015-11-26.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目丽江一小金河断裂带及周缘应力场动态变化与亚失稳识别 (41472180)、2015 年度震情跟踪定向工作任务 (2015020202) 和 2014 年度地震科技星火计划 (XH14068Y) 联合资助。

对我国国家 CORS 网 1999 ~ 2009 年的坐标时间序列进行主成分滤波得到其基本特征为白噪声、闪烁噪声及随机漫步噪声。姜卫平等 (2013) 和李昭等 (2012) 利用 11 个 IGS 基准站时间序列分析得到 3% 的测站分量的噪声模型为 FOGM + RW + WN, 而 PL + WN 和 FN + RW + WN 模型各占 9%, BP + PL + WN 模型占 24%, 剩余 55% 的测站分量采用 FN + WN 模型描述最为合适。上述研究说明, 基准站的噪声特性实际较为复杂, 单一的噪声模型不具有普遍适用性, 不同地区 GPS 观测站不同坐标分量的噪声性质并不一样。

本文在上述研究成果的基础上, 利用 ITRF2005 下中国大陆构造环境监测网络工程云南地区新增建的 25 个 GPS 连续观测站 2010 ~ 2014 年三维站坐标时间序列的最新结果, 采用多种噪声模型组合分析了云南地区 GPS 基准站坐标时间序列的随机特征, 给出云南地区各测站三分量的最优噪声模型。在此基础上进一步定量分析了不同噪声模型与测站速度、速度不确定度以及测站年周期振幅、振幅不确定度之间的关系。

## 1 GPS 数据处理

本文前期 GPS 解算使用的数据是中国大陆构造环境监测网络 (牛之俊等, 2002) 253 个基准站运行以来的连续观测资料, 观测数据截止到 2014 年 5 月, 参与解算的还有 90 个国际 IGS 基准站相应时间段内的观测数据。GPS 连续站观测值的数据处理采用 GAMIT/QOCA 软件完成 (Herring *et al.*, 2010)。数据处理的基本流程 (王敏等, 2005, 2007) 是首先利用 GAMIT 获得陆态网络 253 个连续站及 90 个国际 IGS 测站的单日松弛解, 同步观测的测站较多时, 采用分区处理。完成 GAMIT 计算之后, 利用 QOCA 软件将计算所得的各区单日松弛解进行综合平差, 在此基础上通过 IGS 核心站求解相对于全球参考框架 ITRF2005 的相似变换七参数, 从而获得 ITRF2005 下的单日解, 即 GLOBK 的 NEU 坐标值。在计算得到所有测站三维站坐标时间序列结果的基础上, 本文选取云南地区 25 个 GPS 连续站 (图 1) 的 NEU 三维站坐标时间序列进行后续的噪声模型计算和分析。

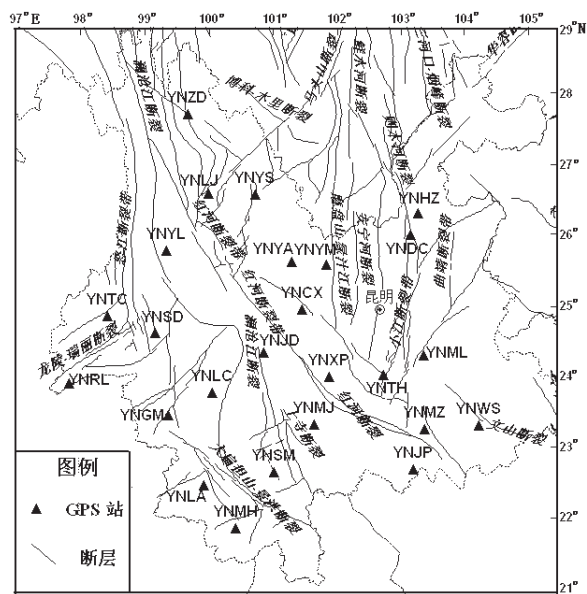


图 1 云南地区 GPS 连续观测站分布  
Fig. 1 Distribution of GPS continuous stations in Yunnan area

## 2 最优噪声模型计算

时间序列噪声分析可以选用频谱分析、极大似然估计 (MLE) 等方法完成。频谱分析相对 MLE 方法计算运行速度要快, 但要求数据均匀采样, 依赖于频谱平均, 可选择的噪声模型种类较少, 且频谱分析方法无法得到测站的函数模型, 而 MLE 方法可以同时估计噪声类型、周期性振幅、测站速度及不确定度, 不需要数据均匀采样, 被认为是目前最准确的噪声分析方法 (Zhang *et al.*, 1997), 其主要原理是对 GPS 日解坐标分量时间序列建立如式 (1) 所示的参数模型:

$$y(t_i) = a + bt_i + c\sin(2\pi t_i) + d\cos(2\pi t_i) + e\sin(4\pi t_i) + f\cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_j} g_j H(t_i - T_{g_j}) + v_i \quad (1)$$

式中,  $t_i$  为坐标序列日解历元, 以年为单位;  $a$  为对应于时间序列起始年份第一天的测站位置 (即横轴截距);  $b$  为线性速度;  $c$ 、 $d$  和  $e$ 、 $f$  分别为年周期项和半年周期项系数, 可根据设计方案需要判断是否求解;  $g_j$  为由于各种原因引起的阶跃式坐标突变,  $T_{g_j}$  为发生突变的历元;  $H$  为海维西特阶梯函数, 发生突变前  $H$  值为 0, 发生突变后  $H$  值为 1;  $v_i$  为观测噪声, 可表示成不同噪声模型的组合, 假设由振幅

分别为  $a_w$  和  $b_k$  的白噪声及幂律谱噪声组成, 则有

$$v_{t_i} = a_w \alpha(t_i) + b_k \beta(t_i). \quad (2)$$

观测值协方差阵可表示为

$$\mathbf{C} = a_w^2 \mathbf{I} + b_k^2 \mathbf{J}_k. \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位阵,  $\mathbf{J}_k$  对应谱指数为  $k$  的幂律谱噪声协方差阵, 其计算公式为

$$\mathbf{J}_k = \mathbf{T} \mathbf{T}^T. \quad (4)$$

转换矩阵  $\mathbf{T}$  的表达式为

$$\mathbf{T} = T^{-k/4} \begin{bmatrix} \varphi_0 & 0 & \cdots & 0 \\ \varphi_1 & \varphi_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_N & \varphi_{N-1} & \cdots & \varphi_0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中,  $N > 0$ ,  $\varphi_0 = 1$ ,  $T$  为采样间隔, 当数据采样不等间隔时, 对矩阵各列分别乘上相应系数。  $T_j = |t_j - t_{j-1}|$ 。  $k = -1$  时, 表示闪烁噪声,  $k = -2$  时, 表示随机漫步噪声。

按照极大似然估计准则可以同时确定  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$ 、 $g$  和噪声分量振幅, 即选择不同的噪声模型, 确定各噪声分量的大小, 使得坐标序列的残差  $v$  与其协方差的联合概率密度值, 即式 (6) 达到最大, 等价于联合概率密度函数值的对数, 即式 (7) 达到最大。

$$\text{lik}(v, \mathbf{C}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} (\det \mathbf{C})^{1/2}} \exp(-0.5 v^T \mathbf{C}^{-1} v). \quad (6)$$

$$\ln[\text{lik}(v, \mathbf{C})] = -0.5 [\ln(\det \mathbf{C}) + v^T \mathbf{C}^{-1} v + N \ln(2\pi)]. \quad (7)$$

对于振幅为  $a$ , 数据采样间隔为  $T$ , 观测数据个数为  $n$  的纯白噪声过程, 其估计速率的方差为

$$\sigma_r^2 = \frac{c^2}{T(n-1)}, \quad n > 1. \quad (8)$$

对于振幅为  $b$ , 数据采样间隔为  $T$ , 观测数据个数为  $n$  的闪烁噪声过程, 有

$$\sigma_r^2 = \frac{9b^2}{16T^2(n^2-1)}, \quad n > 1. \quad (9)$$

对于振幅为  $c$ , 数据采样间隔为  $T$ , 观测数据个数为  $n$  的随机漫步噪声过程, 有

$$\sigma_r^2 = \frac{c^2}{T(n-1)}, \quad n > 1. \quad (10)$$

可见, 速度估计的方差与噪声类型、振幅、采样频率及数据个数有关, 噪声类型在很大程度上影响了测站速度的不确定度 (估计误差)。

本文选取 FN + WN (闪烁 + 白), RW + WN (随机漫步 + 白), FN + RW + WN (闪烁 + 随机漫步 + 白), PL + WN (幂律 + 白), FOGM + RW + WN (一阶高斯马尔科夫 + 随机漫步 + 白) 以及 BP + PL + WN (带通 + 幂律 + 白) 共 6 种噪声模型, 采用 CATS 软件 (Williams, 2008) 对云南地区 2010 年新增建的 25 个陆态网络 GPS 基准站三维站坐标时间序列进行噪声分析。

根据极大似然估计原理, 不同的噪声模型组合将得到不同的极大似然对数值, 即式 (7), 该数值越大, 结果越可靠。应选择估值最大的模型作为最优噪声模型 (Langbein, Johnson, 1997; Mao et al, 1999; Nikolaidis, 2002)。然而, 噪声模型包含的未知参数越多, 其 MLE 值越大。蒙特卡罗模拟实验表明: 95% 的显著水平下, 当两种噪声模型的 MLE 之差大于 3.0 时, 2 种模型具有可区分性 (Langbein, 2008; Williams, Willis, 2006)。为了确保结果的可靠性, 不能简单选择 MLE 值较大的模型作为最优噪声模型。本文时间序列最优噪声模型的确定采用 Langbein (2004, 2008) 提出的保守估计准则。

### 3 云南地区 GPS 基准站最优噪声模型分析

通过上述方法, 计算得到了云南地区 25 个 GPS 连续观测站 N、E、U 三维坐标分量时间序列的最优噪声模型, 并给出了各测站噪声模型中所包含的不同噪声分量的大小 (表 1)。表 1 显示白噪声并不是云南地区 GPS 连续观测站噪声的主要成分, 云南地区 GPS 基准站坐标分量最优噪声模型存在多样性。

由图 2a 云南地区 GPS 连续观测站全部坐标分量最优噪声模型统计可知, 其中以闪烁噪声 + 白噪声模型为最优的观测站坐标分量占 53%; 幂律噪声 + 白噪声模型占 31%; 而闪烁 + 随机漫步 + 白噪声和带通 + 幂律 + 白噪声模型各占 8%。由图 2b ~ d 可以看出云南地区 25 个 GPS 连续观测站的 N、E、U 三维坐标分量分别具有不同的噪声特性。其中, 闪烁噪声 + 白噪声模型在北向分量中占绝对优势 (图 2b); 东向分量的幂律 + 白噪声模型和

表1 云南地区 GPS 连续观测站三维坐标分量的最优噪声模型

Tab. 1 Optimal noise models of 3D coordinate components of GPS continuous stations in Yunnan area

测站名/编码	最优噪声模型		
	北向分量/mm	东向分量/mm	垂向分量/mm
1. YNCX (楚雄)	FN + WN/4.73, 1.69	FN + RW + WN/4.32, 3.12, 1.41	PL + WN/10.20, 3.08
2. YNDC (东川)	PL + WN/4.65, 0.82	PL + WN/4.79, 0.33	FN + WN/16.68, 5.65
3. YNGM (耿马)	FN + WN/5.65, 2.24	PL + WN/8.64, 0	PL + WN/18.99, 0
4. YNHZ (会泽)	FN + WN/4.05, 1.76	PL + WN/3.71, 0.94	PL + WN/12.79, 2.40
5. YNJD (景东)	FN + WN/6.64, 1.89	FN + WN/10.81, 3.41	FN + WN/16.47, 5.40
6. YNJP (金平)	BP + PL + WN/0.478, 4.07, 0	FN + WN/3.83, 1.67	PL + WN/13.03, 0
7. YNLC (临沧)	FN + WN/4.58, 1.76	FN + WN/5.80, 2.31	FN + WN/10.99, 4.97
8. YNLJ (丽江)	FN + WN/4.49, 1.56	PL + WN/3.57, 0.30	FN + WN/11.61, 3.30
9. YNMH (勐海)	FN + WN/6.17, 1.76	FN + RW + WN/3.51, 2.41, 1.40	FN + WN/11.72, 4.71
10. YNMJ (墨江)	FN + WN/5.40, 1.75	FN + WN/4.07, 1.63	FN + WN/12.12, 4.60
11. YNML (弥勒)	FN + WN/5.58, 1.47	FN + WN/5.06, 1.30	PL + WN/10.63, 2.76
12. YNMZ (蒙自)	FN + WN/4.69, 2.06	PL + WN/5.75, 1.27	PL + WN/15.67, 0
13. YNRL (瑞丽)	FN + WN/5.10, 2.01	FN + RW + WN/3.30, 2.23, 1.91	FN + WN/10.97, 4.60
14. YNSD (施甸)	BP + PL + WN/0.10, 4.47, 0	FN + WN/4.34, 1.86	FN + WN/13.23, 4.61
15. YNTC (腾冲)	FN + WN/5.56, 1.72	FN + WN/8.10, 0.92	PL + WN/13.63, 1.97
16. YNTH (通海)	PL + WN/4.54, 1.20	FN + WN/4.04, 1.56	PL + WN/10.67, 1.24
17. YNWS (文山)	FN + WN/5.47, 1.64	PL + WN/4.51, 1.48	PL + WN/13.62, 0
18. YNYA (姚安)	BP + PL + WN/0.10, 4.15, 0	PL + WN/3.95, 0.63	FN + WN/12.86, 4.00
19. YNYL (玉林)	FN + WN/5.32, 1.74	BP + PL + WN/0.35, 3.01, 0	FN + WN/17.32, 5.00
20. YNYM (元谋)	FN + WN/4.74, 1.63	FN + WN/3.68, 1.48	PL + WN/12.36, 0
21. YNYS (永胜)	FN + WN/4.51, 1.60	FN + WN/3.47, 1.55	PL + WN/11.46, 1.53
22. YNZD (中甸)	FN + WN/4.62, 1.62	PL + WN/4.74, 0	FN + WN/13.58, 4.26
23. YNLA (澜沧)	BP + PL + WN/1.04, 0, 2.17	BP + PL + WN/0.31, 0.05, 2.10	FN + WN/14.99, 5.25
24. YNSM (思茅)	FN + RW + WN/4.48, 7.13, 1.86	PL + WN/5.87, 1.46	FN + WN/11.40, 4.41
25. YNXP (新平)	FN + RW + WN/5.85, 8.08, 1.86	FN + RW + WN/4.13, 8.38, 1.90	PL + WN/14.45, 2.97

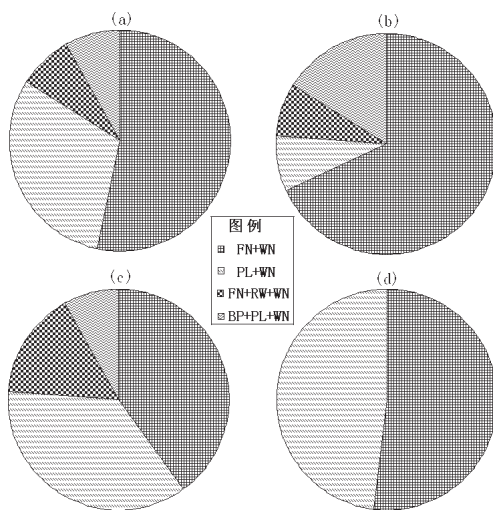


图2 云南地区 GPS 连续观测站最优噪声模型统计分布饼图

(a) 全部坐标分量; (b) 北向; (c) 东向; (d) 垂向

Fig. 2 Pie maps of optimal noise models of GPS continuous stations in Yunnan area

(a) all of coordinate components; (b) north direction (c) east direction; (d) vertical direction

闪烁 + 白噪声模型比例相当, 这 2 种模型占 76%,

是东向分量的主要噪声模型 (图 2c); 而在垂向分量中, 幂律 + 白噪声模型和闪烁 + 白噪声模型基本各占 50% (图 2d)。

图 3 给出了云南地区 GPS 连续观测站三维坐标分量最优噪声模型的地域分布。由图 3a、b 可以看出, 云南地区 GPS 连续观测站北向分量和东向分量的最优噪声模型在地域分布上没有明显的规律, 而垂向分量最优噪声模型的分布 (图 3c) 却表现出一定的地域性, 其主要特征是以 NW 向红河断裂带为界, 断裂带北东侧 GPS 测站的垂向分量以幂律 + 白噪声模型为主, 而断裂带南西侧测站垂向分量则以闪烁噪声 + 白噪声模型为主。研究表明, 闪烁噪声或白噪声的大小存在纬度依赖性, 靠近赤道的台站闪烁噪声要大, 且南半球比北半球稍大 (Mao *et al.*, 1999; Williams, Willis, 2006); 而 COMONOC 中闪烁噪声和白噪声的大小表现出更明显的海陆差异, 靠近海洋的台站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 (田云锋等, 2010); 此外, 区域气候能显著影响噪声大小 (Langbein, 2008), 各地气候条件的差异可能也是起因之一; 区域性



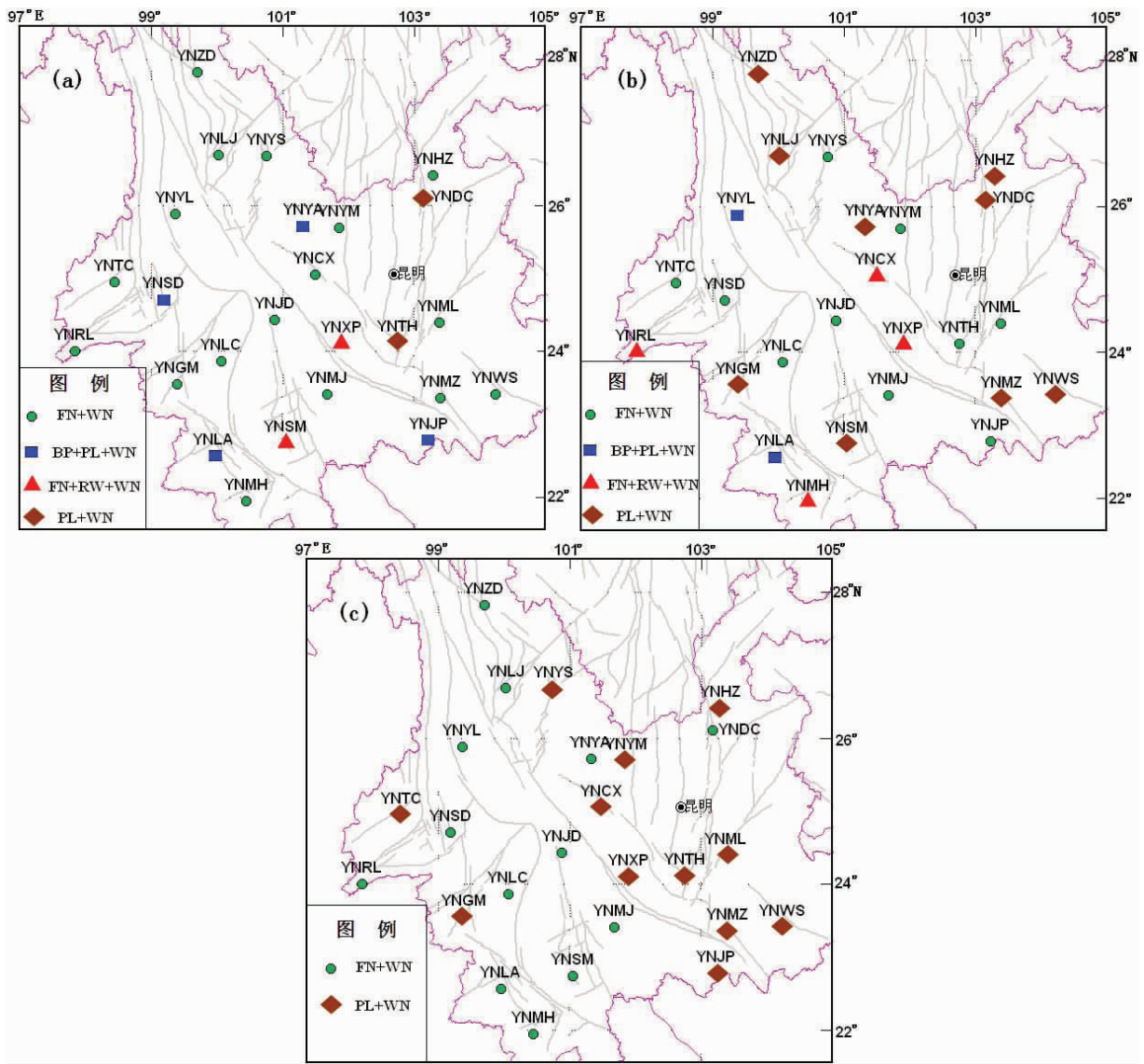


图3 云南地区 GPS 连续观测站三维坐标分量最优噪声模型的地域分布  
(a) 北向; (b) 东向; (c) 垂向

Fig. 3 Graphical distribution of optimal noise models of 3D coordinate components of GPS continuous stations in Yunnan area  
(a) north direction; (b) east direction; (c) vertical direction

物理背景场（地壳环境、大气环境、电离层二次残差项）的存在是幂律噪声的主要来源之一（廖华等，2013），GPS 测站有色噪声受区域性物理背景场的影响较大。红河断裂带是印支地块和华南地块 2 大地块的分界断裂，相关研究结果显示，以红河断裂带为界，地壳结构呈西薄东厚的特征，红河断裂带两侧速度结构具有明显的差异，断裂带西侧速度较低，东侧速度明显偏高，红河断裂带两侧块体地壳结构岩性具有巨大的差异（王夫运等，2014）。红河断裂带两侧地壳环境的差异，

反映了红河断裂带两侧区域性背景物理场的差异，而这可能是红河断裂带两侧有色噪声模型表现出地域差异性的主要原因。

以闪烁噪声 + 白噪声模型和幂律噪声 + 白噪声模型为最优噪声模型的 GPS 测站坐标分量占总数的 84%，这 2 种模型是云南地区 GPS 连续观测站最主要的噪声模型。为了更进一步地讨论这 2 种主要模型中所包含的闪烁噪声和幂律噪声的量值，图 4 给出了以这两种模型为最优噪声模型的观测站坐标分量所包含的闪烁噪声和幂律噪声大小的分

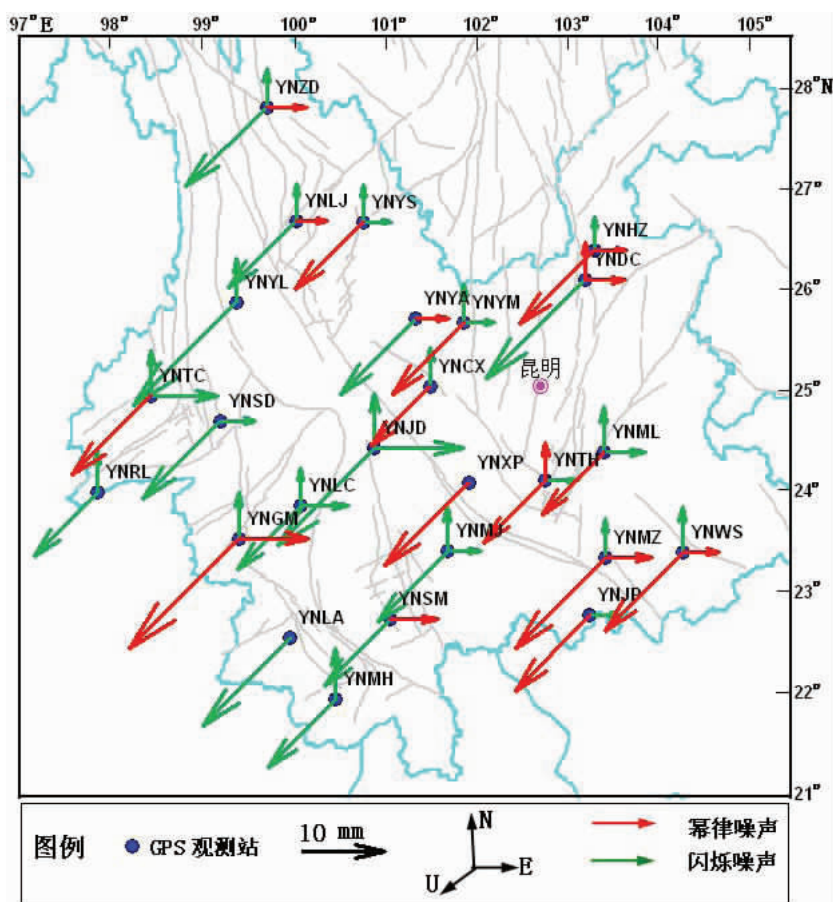


图4 云南地区 GPS 连续观测站闪烁噪声和幂律噪声分布

Fig. 4 Distribution of filcker noise and power law noise of GPS continuous stations in Yunnan area

布。图 4 中北、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的量值大小, 噪声的类型用颜色区分, 红色箭头表示幂律噪声, 绿色箭头代表闪烁噪声。由图 4 可知, 无论测站坐标分量的最优噪声模型是闪烁噪声 + 白噪声还是幂律噪声 + 白噪声, 垂向分量的闪烁噪声和幂律噪声量值都是最大的。云南地区 GPS 连续观测站北向、东向和垂向站坐标分量的闪烁噪声平均值分别为 5.14 mm、5.32 mm 和 13.38 mm, 其中最大的为云南云龙 (YNYL) 垂向分量, 其闪烁噪声量值达 17.32 mm; 云南地区 GPS 连续观测站北向、东向和垂向站坐标分量的幂律噪声平均值分别为 4.59 mm、5.06 mm、13.12 mm, 其中最大的为云南耿马 (YNGM) 垂向分量, 其幂律噪声量值达 18.98 mm。

GPS 坐标时间序列中通常包含有地壳构造形变信息、地壳非构造形变信息、观测误差信息和坐标参考框架点误差 4 类信息。其中,地壳构造形变信息直接反映了地质构造运动的结果,GPS 站水平

方向地壳构造形变可以通过线性拟合的方式进行近似估计。而引起地壳非构造形变的地球物理因素主要包括潮汐因素（固体潮、极潮、大气潮、海潮）和地表质量负荷变化（积雪、土壤水和海洋非潮汐等）。虽然在 GPS 数据处理中可以采用相应的改正模型进行校正（王敏，2007），但模型在我国区域的精确性和可靠性有待进一步验证，且模型本身是一种近似的、难以准确描述质量负荷参量的变化。以大气负荷引起的地壳形变为例，其振幅和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。所以，地表质量负荷变化引起的地壳非构造形变是 GPS 站垂向分量有色噪声的主要来源。另外，观测误差信息（GPS 技术本身的观测误差、站点墩标热胀冷缩、天线相位中心模型误差、高阶电离层误差、点位多路径效益影响）对垂向的影响也大于水平方向。而坐标参考框架点误差垂向也比水平向要大，全球坐标参考框架是通过全球 IGS

核心站实现的,但全球 IGS 核心站成果包含误差信息,特别是 IGS 站在垂向分量上的周期性特征,会不可避免地导致我国 GPS 站垂向的周期性变化,表现出有色噪声性质。因此,垂向分量有色噪声量值明显大于水平分量。

4 噪声模型对速度和年周期估值及不确定度的影响

为了讨论噪声模型对测站速度和年周期估值

及其不确定度的影响,本文通过比较 6 种不同的有色噪声模型之间以及最优有色噪声模型和白噪声模型之间这两个方面的结果进行定量的对比分析。

以云南施甸(YNSD)为例,在 6 种不同的有色噪声模型下计算得到的测站速度和速度不确定度以及年周期参数及其不确定度的结果见表 2,其中模型参数  $b$ 、 $c$ 、 $d$  见式(1), $b$  为线性速度,单位为  $\text{mm/a}$ , $c$ 、 $d$  为年周期项系数, $\text{sig}(b)$ 、 $\text{sig}(c)$ 、 $\text{sig}(d)$  为相应参数的不确定度,单位均为  $\text{mm}$ 。

表 2 YNSD 站不同有色噪声模型下的参数及其不确定度对比  
Tab. 2 Parameters under different colored noise models of YNSD Station and their uncertainties comparasion

有色噪声模型		模型参数					
		$b/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$\text{sig} \left( b \right) / \text{mm}$	$c/\text{mm}$	$\text{sig} \left( c \right) / \text{mm}$	$d/\text{mm}$	$\text{sig} \left( d \right) / \text{mm}$
北向分量	FN + WN	- 13. 90	0. 49	0. 53	0. 37	1. 13	0. 36
	RW + WN	- 13. 52	3. 04	0. 42	0. 70	1. 09	0. 68
	PL + WN	- 13. 95	0. 30	0. 56	0. 28	1. 14	0. 28
	FN + RW + WN	- 13. 90	0. 49	0. 53	0. 37	1. 13	0. 36
	FOGM + RW + WN	- 13. 92	0. 54	0. 54	0. 32	1. 16	0. 32
	BP + PL + WN	- 13. 96	0. 29	0. 56	0. 27	1. 14	0. 27
东向分量	FN + WN	26. 10	0. 43	- 0. 86	0. 32	- 0. 54	0. 31
	RW + WN	26. 12	2. 53	- 0. 78	0. 58	- 0. 50	0. 57
	PL + WN	26. 07	0. 26	- 0. 90	0. 24	- 0. 54	0. 24
	FN + RW + WN	26. 10	0. 43	- 0. 86	0. 32	- 0. 54	0. 31
	FOGM + RW + WN	26. 08	0. 45	- 0. 87	0. 29	- 0. 60	0. 28
	BP + PL + WN	26. 07	0. 26	- 0. 90	0. 24	- 0. 54	0. 24
垂直分量	FN + WN	1. 46	1. 30	11. 92	0. 96	1. 13	0. 94
	RW + WN	2. 33	8. 71	11. 96	2. 00	1. 24	1. 95
	PL + WN	1. 36	1. 09	11. 90	0. 88	1. 13	0. 86
	FN + RW + WN	1. 46	1. 30	11. 92	0. 96	1. 13	0. 94
	FOGM + RW + WN	1. 25	1. 89	12. 02	0. 92	1. 19	0. 89
	BP + PL + WN	1. 36	1. 09	11. 90	0. 88	1. 13	0. 86

由表 2 可知,YNSD 站的北向分量和东向分量在 6 种不同的有色噪声模型下的线性速度差异很小,北向分量最大差异量为 0.44 mm/a,东向分量最大差异量为 0.05 mm/a,而垂向分量在 RW + WN 模型下的速度与采用其它有色噪声模型计算得到的速度差异较大,最大差异量约为 1.08 mm/a,且速度不确定度也远大于其它模型下的结果。YNSD 站北向分量和东向分量的速度不确定度在 RW + WN 模型下也为最大,而其它几种模型下差异较小。而对于年周期项系数  $c$ ,北向、东向和垂向坐标分量在不同有色噪声模型下计算得到的差

异量都较小,3 个方向最大差异量值分别为 0.14、0.12 和 0.12 mm。参数  $c$  的不确定度在 RW + WN 模型下明显大于其他模型下的结果,垂向分量表现得尤为显著。年周期项系数  $d$  及其不确定度具有与参数  $c$  类似的特征。表 2 说明不同有色噪声模型下的线性速度和年周期参数及其不确定度存在一定的差异。总体上来看,不同有色噪声模型对参数不确定度的影响大于对参数本身的影响,且对垂向分量的参数和参数不确定度的影响明显大于水平分量。

云南地区 GPS 连续观测站坐标分量在最优有

色噪声模型下的线性速度  $b$ 、速度不确定度  $\Delta b$  以及年周期振幅  $y$ 、振幅不确定度  $\Delta y$  与白噪声模型下的相应参数结果见表 3，限于篇幅，仅给出了 10 个测站三分量的结果。由表 3 可知，各测站坐标分量最优有色噪声模型和白噪声模型下的线性速度和年周期振幅差异较小，但白噪声模型下的线性速度不确定度和年周期振幅不确定度显著偏小，最优有色噪声模型下的线性速度不确定度是白噪声模型下的 3~7 倍，而年周期振幅不确定度是白噪声模型下的 2~3 倍。

将不同参数在最优有色噪声模型和白噪声模型下的差异量值进行对比分析，各参数在 2 种模型下的差值统计分布见图 5。图 5 横坐标表示测站编码（表 1），由图 5a 可见，除了云南楚雄站东向坐标分量在最优噪声模型下和白噪声模型下的线性速度差异量较大，约 1.5 mm/a，其他测站的东向、北向分量在 2 种模型下的线性速度差异量值都较小，基本都在 -0.5~0.5 mm/a 范围内波动，而垂

表 3 最优噪声模型与白噪声模型下的线性速度、年周期振幅及其不确定度的对比

Tab.3 Comparison of linear velocity, annual cycle amplitude and their uncertainties under optimal noise model and white noise model

测站分量	最优噪声模型				白噪声模型			
	$b/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$\Delta b$	$y/\text{mm}$	$\Delta y$	$b/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$\Delta b$	$y/\text{mm}$	$\Delta y$
YNDC-N	-12.18	0.23	1.42	0.25	-12.18	0.07	1.43	0.10
YNHZ-N	-10.89	0.40	1.12	0.29	-10.82	0.07	1.08	0.09
YNLC-N	-13.24	0.41	1.84	0.32	-13.48	0.07	1.84	0.10
YNLJ-N	-18.14	0.40	1.39	0.31	-18.15	0.05	1.41	0.08
YNMJ-N	-14.62	0.46	1.96	0.36	-14.66	0.06	1.81	0.10
YNSD-N	-13.96	0.29	1.27	0.27	-14.07	0.07	1.33	0.10
YNTH-N	-13.72	0.23	1.67	0.24	-13.75	0.06	1.71	0.10
YNYA-N	-16.50	0.27	1.80	0.25	-16.49	0.07	1.79	0.10
YNYL-N	-15.75	0.46	2.31	0.36	-16.24	0.06	2.51	0.10
YNYS-N	-16.88	0.39	1.98	0.30	-16.97	0.05	2.07	0.09
YNDC-E	34.21	0.22	1.42	0.24	34.29	0.07	1.46	0.11
YNHZ-E	34.44	0.21	0.45	0.21	34.54	0.06	0.44	0.09
YNLC-E	29.32	0.52	0.31	0.40	29.81	0.09	0.35	0.14
YNLJ-E	31.89	0.19	0.45	0.19	31.86	0.04	0.49	0.07
YNMJ-E	30.19	0.35	1.19	0.28	30.05	0.05	1.10	0.08
YNSD-E	26.10	0.43	1.02	0.32	26.08	0.07	1.10	0.10
YNTH-E	32.14	0.35	0.65	0.27	32.06	0.06	0.73	0.09
YNYA-E	32.33	0.22	0.73	0.22	32.37	0.06	0.76	0.08
YNYL-E	27.41	0.11	1.22	0.22	27.39	0.06	1.21	0.09
YNYS-E	35.16	0.30	0.90	0.24	35.18	0.05	0.93	0.08
YNDC-U	1.82	1.55	9.34	1.17	0.72	0.22	9.06	0.32
YNHZ-U	1.36	0.80	8.08	0.75	1.64	0.18	8.24	0.26
YNLC-U	-0.30	0.99	11.81	0.77	-0.31	0.18	11.68	0.27
YNLJ-U	0.82	1.02	9.95	0.78	0.41	0.13	10.09	0.20
YNMJ-U	-0.86	1.04	10.43	0.82	-0.23	0.15	10.22	0.24
YNSD-U	1.46	1.30	11.97	0.95	0.64	0.19	11.75	0.27
YNTH-U	0.65	0.47	8.28	0.53	0.64	0.14	8.31	0.22
YNYA-U	2.35	1.23	9.63	0.91	1.19	0.17	9.34	0.24
YNYL-U	-2.58	1.47	10.90	1.15	-1.43	0.21	10.41	0.34
YNYS-U	1.13	0.57	10.92	0.60	1.30	0.14	10.94	0.22



向分量在 2 种模型下的线性速度差异量相对较大, 云南东川 (YDNC)、姚安 (YNYA)、云龙 (YNYL) 站的垂向速度差异量值都超过 1 mm/a; 如图 5b 所示, 对速度不确定度而言, 北向分量在最优噪声模型和白噪声模型下的速度不确定度差异量值最小, 其次为东向分量, 而垂向分量在 2 种模型下的速度不确定度差异量最大; 如图 5c 所示, 年周期振幅在最优噪声模型和白噪声模型下的差异量值也以垂向最大, 达 0.5 mm, 而北向和东向

分量的年周期振幅在 2 种模型下的差异值基本相当; 如图 5d 所示, 北向分量的年周期振幅不确定度在 2 种模型下的差异量值最小, 东向分量次之, 垂向分量的差异量最大。

综上所述, 最优有色噪声模型和白噪声模型下的线性速度不确定度和年周期振幅不确定度的差异量要明显大于线性速度和年周期振幅本身在 2 种模型下的差异量, 且垂向坐标分量在 2 种模型下各参数的差异量值相对都是最大的。

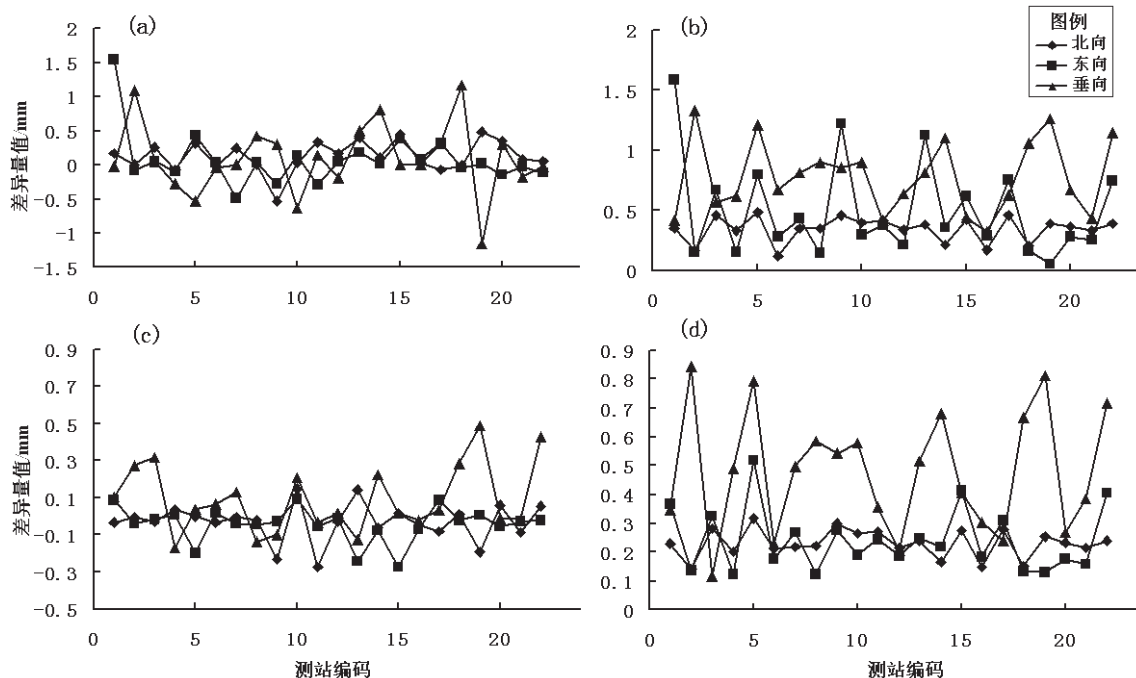


图 5 最优噪声模型和白噪声模型下不同参数差异值对比

(a) 线性速度; (b) 速度不确定度; (c) 年周期振幅; (d) 年周期振幅不确定度

Fig. 5 Comparison of deviations of different parameters under optimal noise model and white noise model (a) linear velocity; (b) velocity uncertainties; (c) annual cycle; (d) annual cycle amplitude uncertainties

## 5 认识与结论

本文计算得到了中国大陆构造环境监测网络工程云南地区新增建的 25 个 GPS 连续观测基准站三维坐标时序分量的最优噪声模型, 得出以下结论:

(1) 云南地区不同 GPS 基准站 N、E、U 3 方向坐标分量具有不同的噪声特性, 最优噪声模型存在多样性, 闪烁噪声 + 白噪声和幂律噪声 + 白噪声为云南地区最主要的噪声模型。对 N 方向坐标分量而言, FN + WN、PL + WN、FN + RW + WN、BP + PL + WN 噪声模型所占比重分别为

68%、8%、8%、16%; 对 E 方向坐标分量, 上述 4 种模型所占比重分别为 40%、36%、16%、8%; 而对 U 方向坐标分量, 以 FN + WN 和 PL + WN 为最优噪声模型的测站分别占 52% 和 48%。云南地区 GPS 连续观测站垂向分量最优噪声模型的分布表现出一定的地域性, 其主要特征是以 NW 向红河断裂带为界, 断裂带北东侧 GPS 测站的垂向分量以幂律 + 白噪声模型为主, 而断裂带南西侧测站垂向分量则以闪烁噪声 + 白噪声模型为主。红河断裂带两侧区域性背景物理场的差异可能是红河断裂带两侧有色噪声模型地域差异性的主要原因。

(2) 噪声模型与测站速度、速度不确定度以及

测站年周期变化振幅、振幅不确定度之间的定量分析表明,不同噪声模型对测站线性速度、速度不确定度、年周期振幅、振幅不确定度会产生一定影响。本文计算得到的各测站水平分量最优噪声模型下的速度与白噪声模型下的速度差异值小于  $0.5 \text{ mm/a}$ ,大部分测站的垂向分量在 2 种模型下的速度差异值小于  $1 \text{ mm/a}$ ,但也有少数测站垂向分量的速度差异超过  $1 \text{ mm/a}$ 。年周期振幅的差异量值也以垂向最大,达  $0.5 \text{ mm}$ 。速度不确定度和年周期振幅不确定度受噪声模型的影响比参数本身更大,最优有色噪声模型下的速度不确定度是白噪声模型下的 3~7 倍,而年周期振幅不确定度是白噪声模型下的 2~3 倍。

(3) 本文的结果表明,有色噪声模型对垂向分量的参数和参数不确定度的影响明显大于水平分量,这与有色噪声的主要来源有关,如 GPS 相关的技术性误差,天线相位中心模型误差、高阶电离层延迟、未模型化周期性海洋潮汐负载的影响、对流层延迟模型的选择、地表质量负荷变化,以及与地球物理模型相关的因素,如温度变化造成的热膨胀效应及热弹性应变作用。目前 ITRF2005 参考框架下的陆态网络 GPS 站速度是在白噪声的假定下估计的,而用于分析噪声特性的序列是在白噪声的假定下由观测序列的模拟残差产生的,建立模型的完善性和白噪声假定的合理性常使分析结果受到质疑,因此正确分类及量化噪声分量有利于合理应用 GPS 坐标时间序列数据,准确分析基准站坐标时间序列的噪声特性有助于获取测站模型参数估值及其实际的不确定度。

### 参考文献:

- 陈俊勇. 2007. 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, 27(1): 1-6.
- 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.
- 黄立人. 2006. GPS 基准站坐标分量时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 26(2): 31-38.
- 江在森, 马宗晋, 张希等. 2003. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 46(3): 352-358.
- 姜卫平, 李昭, 刘鸿飞等. 2013. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J]. 地球物理学报, 56(7): 2228-2237.
- 蒋志浩, 张鹏, 秘金钟等. 2009. 基于 CGCS2000 的中国地壳水平运动速度场模型研究[J]. 测绘学报, 38(6): 471-476.
- 蒋志浩, 张鹏, 秘金钟等. 2010. 顾及有色噪声影响的 CGCS2000 下我国 CORS 站速度估计[J]. 测绘学报, 39(4): 355-363.
- 李强, 游新兆, 杨少敏等. 2012. 中国大陆构造变形高精度大密度 GPS 监测—现今速度场[J]. 中国科学: 地球科学, 42(5): 629-632.
- 李昭, 姜卫平, 刘鸿飞等. 2012. 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, 41(4): 496-503.
- 梁洪宝, 刘志广, 黄立人等. 2015. 非构造形变对中国大陆 GNSS 基准站垂向周期运动的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 35(4): 46-50.
- 廖华, 徐锐, 陈维锋等. 2013. 汶川地震前后四川区域 GPS 时序特征演变及统计分析[J]. 地球物理学报, 56(4): 1237-1245.
- 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连等. 2002. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, 22(3): 88-93.
- 施发奇, 尤伟, 付云文. 2012. GPS 资料揭示的小江断裂近期运动特征[J]. 地震研究, 35(2): 207-212.
- 田云锋, 沈正康, 李鹏. 2010. 连续 GPS 观测中的相关噪声分析[J]. 地震学报, 32(6): 696-704.
- 王夫运, 潘素贞, 刘兰等. 2014. 玉溪—临沧剖面宽角地震探测——红河断裂带及滇南地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 57(10): 3247-3258.
- 王敏, 沈振康, 牛之俊等. 2003. 现今中国大陆的地壳运动与活动块体[J]. 中国科学: 地球科学, 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.
- 王敏. 2007. GPS 数据处理方面的最新进展及其对定位结果的影响[J]. 国际地震动态, (7): 3-8.
- 袁林果, 丁晓利, 陈武等. 2008. 香港 GPS 基准站坐标序列特征分析[J]. 地球物理学报, 51(5): 1372-1384.
- Altamimi Z, Boucher C, Willis P. 2005. Terrestrial reference frame requirements within GGOS perspective [J]. Journal of Geodynamics, 40(4-5): 363-374.
- Herring T A, King R W, McClusky S C. 2010. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT. Release 10.4 [M]. Cambridge MA: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology.
- Langbein J, Johnson H. 1997. Correlated errors in geodetic time series: Implications for time dependent deformation [J]. J Geophys Res, 102(B1): 591-603.
- Langbein J. 2004. Noise in two-color electronic distance meter measurements revisited [J]. Journal of Geophysical Research, 109(4): B04406, doi:10.1029/2003JB002819.
- Langbein J. 2008. Noise in GPS displacement measurements from Southern California and Southern Nevada [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(5): B620-628.
- Mao A, Harrison C G A, Dixon T H. 1999. Noise in GPS coordinate time series [J]. Journal of Geophysical Research, 104(B2): 2797-2816.
- Nikolaïdis R. 2002. Observation of Geodetic and Seismic Deformation with the Global Positioning System [D]. San Diego: University of California, 1-116.
- Williams S D P, Willis P. 2006. Error analysis of weekly station coordinates in the DORIS network [J]. J Geodesy, 80(8): 525-539.
- Willian S D P. 2008. CATS: GPS Coordinate Time Series Analysis Software [J]. GPS Solution, 12(2): 147-153.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Wang M, et al. 2013. Preliminary results of the co-seismic displacement and pre-seismic strain accumulation of the Lus-

- han  $M_s 7.0$  earthquake reflected by the GPS surveying[J]. Chin Sci Bulletin, 58(2): 3460 – 3466. doi: 10. 1007/s11434 – 013 – 5998 – 5.
- Wu Y Q, Jiang Z S, Yang G H, *et al.* 2011. Comparison of GPS strain rate computing methods and their reliability. [J] Geophys J Int, 185 (2): 703 – 717.
- Zhang J, Bock Y, Johnson H, *et al.* 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 102(B8): 18035 – 18055.

## Estimation on Velocity and Cycle of GPS Reference Stations in Yunnan Area Based on the Colored Noise Models

ZHANG Fengshuang

(First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China)

### Abstract

Based on the calculation result of time series of the 3D coordinate recorded by 25 GPS continue observation stations in Yunnan Area from 2010 to 2014, we implemented the noise analysis on it by using different noise model combinations. The results suggest that the component of different station coordinate has the different noise feature, and the optimal noise models represent the characteristic of diversity, the model of flicker noise plus white noise and power law noise plus white noise is the main noise models in Yunnan. The distribution of optimal noise models of vertical components represents regional characteristics on both sides along the Red River Fault with NE. The quantitative analysis of the noise model and the movement parameters of observation station show that the influence of the noise model on the linear velocity uncertainty and annual cycle uncertainty is large, the velocity uncertainty and annual cycle uncertainty under colored noise model are 3 ~ 7 and 2 ~ 3 times of that under white noise model respectively. The noise model has a little influence on the velocity and the amplitude of the annual cycle, under colored noise model and white noise model, the linear velocity deviations of vertical component are less than 1 mm/a generally at majority stations, and they are more than 1 mm/a at minority stations. The deviations of annual cycle amplitude are less than 0.5 mm, and the deviations of vertical component are bigger than that of horizontal component, as well as the deviations of EW component are bigger than that of north component.

**Key words:** Yunnan Area; GPS reference station; noise analysis of time-series; maximum likelihood estimate; optimal noise model