

# 利用 GNSS 连续观测资料获取 高精度动态速度场的研究<sup>\*</sup>

张风霜, 占伟

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 基于计算获取的 ITRF2005 下中国地壳运动观测网络工程 GNSS 连续观测站 1999 ~ 2013 年的站坐标时间序列结果, 采用小波分析方法和加权最小二乘法评定顾及周期性非构造运动 and 不同噪声影响的 GNSS 连续观测站的月时段、半年时段、年时段速度估值和精度, 探讨利用 GNSS 连续观测时间序列获取稳定速度场与时间序列时段长度的关系。研究结果表明: 剔除年周期和半年周期运动后可得到更稳定且精度更高的年时段和半年时段速度场, 但月时段速度场结果离散度大; 采用小波滤波方法可提高 GNSS 连续观测结果的可靠性, 通过小波滤波分析逐步剔除白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声后计算得到的月时段速度的精度和离散度改进显著, 可得到较稳定的月时段速度场。

**关键词:** GNSS 站坐标时间序列; 速度场; 年周期; 小波分析; 噪声

**中图分类号:** P315.725

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)01-0075-09

## 0 引言

在研究地壳形变问题时, 常利用流动 GNSS 复测资料计算指定区域的位移场、速度场和应变场, 如利用 GNSS 流动资料研究中国大陆应变场及块体运动, 取得了丰硕的成果(江在森等, 2003; 王敏等, 2003; 杨国华等, 2002; 张培震等, 2003; 刘志广等, 2013)。但是流动 GNSS 资料复测周期长, 且其观测资料的质量、点位的稳定性等各方面都与连续观测资料存在较大的差距。随着《中国地壳运动观测网络》二期工程的实施, GNSS 连续观测站由 33 个增至 253 个, 由地方或其他部门建设的 GNSS 连续站也已超过千个, 这使得利用 GNSS 连续观测资料进行形变场的分析成为可能。若发挥 GNSS 连续观测资料时间上的优势, 计算并分析月、季度、半年和年各个时段尺度下的形变场的动态演变过程, 可使 GNSS 连续观测资料更有效地服务于震情会商和形变分析, 因此利用 GNSS 连续观测资料及时计算获取各个时段尺度下稳定可靠的速度场是非常必要的。GNSS 连续观测时间

序列中除了线性成分外, 还包含多种周期运动(江在森等, 2006; 王敏等, 2005a; 朱文耀等, 2003)。白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声的噪声性质是 GNSS 连续观测时间序列的基本特征(黄立人, 2006; 黄立人, 符养, 2007; 蒋志浩等, 2010; 夏峰等, 2014)。如何用 GNSS 时间序列计算不同时段下的高精度速度场, 获取稳定速度场与 GNSS 时间序列时段长度的关系是怎样的? 周期性非构造运动、随机漫步噪声和闪烁噪声等有色噪声对不同时段长度的 GNSS 时间序列速度场的影响有多大? 本文以上述问题为研究背景, 采用小波分析方法和加权最小二乘法评定顾及周期性非构造运动 and 不同噪声影响的中国 GNSS 连续观测网的月时段、半年时段、年时段的速度估值和精度, 计算不同时间尺度下稳定的 GNSS 连续观测速度场。

## 1 GNSS 数据处理

本文使用的 GNSS 数据是中国地壳运动观测网络 253 个基准站运行以来记录的连续观测资料, 其中一期网络基准站 33 个, 观测时间为 1999 年初至

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-07-19.

**基金项目:** 2014 年度地震科技星火计划利用 GNSS 连续观测资料获取高精度动态形变场(XH14068Y)、2013 年中国地震局地震研究所所长基金(IS201266112)、2013 年中国地震局行业专项地球物理场流动观测信息融合关键技术研究联合资助。

2013 年 4 月的数据,二期网络基准站 220 个,观测时间为 2010 年至 2013 年 4 月的数据,参与解算的还有 90 个 IGS 基准站在相应时间段内的观测数据。GNSS 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, 2005b; 王敏, 2007) 首先利用 GAMIT 获得网络工程 253 个连续站及 90 个 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 7 参数,从而获得 ITRF2005 下的单日解,即 GLOBK 的 NEU 坐标值,不同于通常的站心坐标,其具体含义可参阅黄立人等 (2006)。对计算得到的各测站坐标时间序列,在剔除粗差的基础上,我们进行了 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震、2004 年苏门答腊 9 级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2013 年庐山 7.0 级地震同震位移改正的处理。

## 2 周期性运动对不同时段长度 GNSS 时间序列速度场的影响

通过剔除 GNSS 站坐标时间序列的粗差,仅可以削弱观测值中的偶然成分,还需要对信息进一步分离。GNSS 连续观测时间序列中包含着多种有规律的、周期性成分,研究表明,在 GNSS 连续观测时间序列中比较显著且共性较好的周期成分是年周期和半年周期 (江在森等, 2006)。可采用谐波拟合法 (王敏等, 2005b; 韩鹏等, 2009; 谢凡等, 2011) 剔除 GNSS 连续观测时间序列中的年周期和半年周期成分。谐波拟合方法是在傅里叶级数及傅里叶变换的基础上,把满足一定条件的周期函数分解为组成它的各次谐波成分。对 GNSS 连续观测时间序列去线性趋势后得到的残差时间序列的拟合函数  $f(t)$  通过傅里叶级数表示成如下形式:

$$f(t) = \sum_{m=1}^N (A_m \cos 2^m \pi t + B_m \sin 2^m \pi t). \quad (1)$$

式中,  $f(t)$  可以看成是这些正弦函数和余弦函数的“加权和”,其中  $m$  为谐波的次数,系数  $A_m$ 、 $B_m$  是权重因子,表示各次谐波对总序列的贡献,可以通过最小二乘法计算得到。对 GNSS 连续观测时

间序列而言,  $m$  取 2,即用 2 次谐波拟合就可以较好的改正 GNSS 时间序列中的年周期和半年周期成分。

对 GNSS 连续观测时间序列中的年周期和半年周期成分用谐波拟合的方法进行改正后,笔者采用加权最小二乘法计算并评定未剔除和剔除周期性运动后的测站年速度及精度。最小二乘准则为 (武汉大学测绘学院测量平差学科组, 2009)

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} &= (v_1, v_2, \dots, v_n) \begin{pmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (2) \\ &= p_1 v_1^2 + p_2 v_2^2 + \cdots + p_n v_n^2 = [\mathbf{p} \mathbf{v} \mathbf{v}] = \min. \end{aligned}$$

式中,  $p_i$  为观测值的权,  $p_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ ,  $\sigma_i$  为站坐标的精度,  $v_i$  为观测值  $y_i$  的改正数,  $v_i = a + b t_i - y_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。由式 (2) 可求出参数  $a$ 、 $b$ ,  $b$  即为测站速度。表 1 给出了未剔除和剔除年、半年周期后计算得到的测站年速度精度对比,由表中可以发现,通过剔除 GNSS 连续观测站的年周期和半年周期运动,可得到更稳定且精度更高的测站年速度。在剔除年周期和半年周期后,计算得到的测站东向和北向年速度的平均精度比未剔除年、半年周期的结果分别提高约 26% 和 20%。

剔除年、半年周期后计算得到半年速度的精度和年速度一样也有较大幅度的提高。表 2 给出了 2003 ~ 2012 年 (共 10 年) 哈尔滨站和泰安站以每半年为一个时段计算所得的东向速度对比。由表中可见,2003 ~ 2012 年哈尔滨站每年上半年未剔除周期性运动的速度明显小于下半年速度,而剔除周期性运动后各年份半年速度间的差异明显减小。哈尔滨站和泰安站剔除年周期和半年周期后得到的半年时段速度的离散度相对未剔除的结果显著减小,说明剔除年周期和半年周期后的半年时段速度更稳定,可靠性更高。

剔除 GNSS 连续观测时间序列中的年、半年周期,并计算相对于区域无旋转参考基准 (杨国华等, 2005; 胡新康等, 2007) 的速度,笔者计算得到了 2010 ~ 2013 年中国大陆地壳运动观测网络 GNSS 连续观测站的背景速度场 (图 1 中蓝色箭头),其中一期网络 33 个、二期网络 220 个 GNSS 连续站计算所采用时间序列的长度分别为

1999 ~ 2013 年和 2010 ~ 2013 年。为了反映 GNSS 连续观测站速度场的年度差异运动，笔者利用 2011 年 4 月至 2012 年 4 月的 GNSS 连续观测资料，计算了 2011 ~ 2012 年中国大陆 GNSS 连续观测站速度场（图 1 中黄色箭头）。由图 1 可以发现，计算得到的 GNSS 连续观测站背景速度场与我国地质构造格局较为相关，基本反映了中国大陆的形变背景。2011 年日本 9.0 级地震后，2011 ~ 2012 年速度场相对背景速度场的差异变化在一定程度上说明了 GNSS 连续观测时间序列年速度场能够显示中国大陆地壳水平差异运动的空间分布信息。

由上述分析，剔除 GNSS 时间序列中的年周期

表 1 未剔除和剔除周期后计算得到的 GNSS 测站年速度精度对比

Tab. 1 Precision comparison of the calculated annual velocity of GNSS stations after rejecting the cycle motion or not

GNSS 点名	未去周期的 东向速度/mm	精度 /mm	去掉周期的 东向速度/mm	精度 /mm	未去周期的 北向速度/mm	精度 /mm	去掉周期的 北向速度/mm	精度 /mm	东向精度 提高（%）	北向精度 提高（%）
FJWY	32.82	1.10	33.01	0.81	-11.09	1.12	-11.16	0.97	27.0	13.3
FJXP	32.46	0.95	32.64	0.77	-9.99	1.19	-10.33	0.95	18.3	20.1
GDSG	33.33	0.98	33.64	0.77	-9.71	1.36	-10.21	0.86	21.2	36.5
GSDH	30.99	1.03	31.20	0.73	-0.71	1.21	-0.94	0.88	28.8	27.5
GSGL	34.49	0.82	34.65	0.60	-5.59	0.92	-5.76	0.76	26.5	17.3
GZGY	34.28	0.87	34.47	0.68	-9.08	1.16	-9.18	0.91	22.2	21.5
HAHB	33.91	1.13	33.96	0.92	-11.18	1.24	-11.39	0.93	18.3	25.2
HAJY	33.17	1.17	33.29	0.92	-10.95	1.18	-11.17	0.96	21.4	18.5
HAQS	34.75	1.30	34.97	0.79	-10.86	0.95	-10.81	0.90	39.2	5.5
HBXF	33.75	0.91	33.77	0.73	-10.63	1.05	-10.72	0.88	20.5	16.3
HBZG	34.56	1.05	34.62	0.75	-10.35	1.16	-10.43	0.90	28.8	22.4
HETS	23.63	0.97	23.46	0.73	-4.15	1.06	-4.24	0.81	25.1	22.9
HRBN	25.63	1.85	25.62	1.20	-11.74	1.24	-11.74	1.09	35.0	12.8
JSLY	32.51	1.16	32.69	0.92	-11.32	1.12	-11.29	1.10	20.5	1.8
LALX	28.73	1.32	28.60	1.02	-8.76	1.19	-8.79	1.13	22.7	5.0
NMAY	31.23	1.02	31.40	0.69	-6.87	1.23	-6.90	0.87	32.6	29.2
NXHY	34.34	0.90	34.46	0.69	-7.00	0.94	-7.11	0.82	23.0	12.8
QHLH	33.11	0.83	33.29	0.66	3.81	0.98	3.71	0.84	19.8	13.9
QHQL	33.06	0.78	33.43	0.58	-3.86	1.24	-4.58	0.72	25.4	41.8
SCXC	40.53	0.97	40.82	0.76	-17.28	1.18	-17.49	0.91	21.8	22.7
SDRC	32.17	1.11	32.31	0.90	-11.42	0.97	-11.63	0.86	19.1	10.7
SDYT	30.90	1.27	30.44	1.03	-10.52	1.36	-10.30	1.29	18.6	4.6
SXCZ	30.62	1.25	30.68	0.95	-9.90	0.91	-9.99	0.83	24.1	9.0
TASH	24.93	1.56	24.93	1.24	22.86	1.59	22.85	1.48	20.5	6.8
XJBE	29.13	1.14	29.31	0.79	1.60	1.01	1.55	0.82	31.2	18.7
XJHT	26.16	0.85	26.16	0.62	16.19	0.93	16.06	0.73	27.5	21.2
XJKL	32.09	1.23	31.87	0.78	0.66	1.33	0.80	0.81	36.6	39.1
XJQM	28.62	1.04	28.83	0.67	8.03	1.16	7.76	0.77	36.0	33.9
XJSH	31.30	0.99	31.59	0.72	3.05	0.92	2.94	0.80	27.0	12.8
XJWQ	28.98	1.07	29.30	0.74	2.38	1.00	2.20	0.82	30.8	17.8
XJWU	29.05	0.99	28.94	0.71	12.11	1.27	11.94	0.95	28.0	25.4
XZDX	46.19	0.81	46.27	0.62	12.48	1.25	12.26	0.86	24.4	31.2
XZGE	30.49	0.97	30.54	0.69	15.81	1.06	15.69	0.82	28.5	22.5
YNWS	29.70	1.32	30.30	0.97	-12.07	1.57	-11.74	1.06	26.8	32.7
ZJWZ	32.71	1.07	33.02	0.81	-10.99	1.30	-11.15	1.01	24.0	22.5
ZJZS	32.22	1.18	32.43	0.91	-9.54	0.98	-9.62	0.91	23.3	7.8

和半年周期成分，可以得到稳定且高精度的年时段和半年时段速度场。但是，用上述方法计算了2011年4月初至2013年3月底（共24个月）GNSS连续观测站各月时段的速度，却发现每个月

时段速度离散度大，很不稳定，不同年份相对应月份的速度差别也很大，因此要得到稳定的月时段速度，还需对GNSS连续观测时间序列进行更深入的信息分离。

表 2 哈尔滨和泰安站半年时段东向速度离散度比较

Tab. 2 Comparison of the dispersion of velocity in east recorded by Harbin and Taian Stations in the period of half a year

计算所用时段（年-月-日）	HRBN 东向速度 /mm（未去周期）	HRBN 东向速度 /mm（去周期）	TAIN 东向速度 /mm（未去周期）	TAIN 东向速度 /mm（去周期）
2003-01-01~2003-06-30	7.37	17.49	31.49	25.98
2003-07-01~2003-12-31	44.78	28.26	22.04	25.01
2004-01-01~2004-06-30	13.11	23.29	35.63	30.03
2004-07-01~2004-12-31	38.53	22.15	24.54	27.43
2005-01-01~2005-06-30	10.92	20.87	34.37	28.82
2005-07-01~2005-12-31	42.65	25.73	26.37	29.15
2006-01-01~2006-06-30	18.04	28.05	42.22	36.65
2006-07-01~2006-12-31	46.18	29.37	30.59	33.64
2007-01-01~2007-06-30	22.65	32.65	40.96	35.35
2007-07-01~2007-12-31	47.91	31.50	33.86	36.97
2008-01-01~2008-06-30	15.13	25.24	33.98	28.46
2008-07-01~2008-12-31	44.32	27.76	29.17	32.25
2009-01-01~2009-06-30	14.08	24.15	37.54	32.01
2009-07-01~2009-12-31	42.34	25.51	26.05	29.13
2010-01-01~2010-06-30	7.20	17.39	34.37	28.9
2010-07-01~2010-12-31	46.19	29.45	29.70	32.72
2011-01-01~2011-06-30	16.62	26.70	32.08	26.63
2011-07-01~2011-12-31	42.50	25.96	27.49	30.61
2012-01-01~2012-06-30	22.05	32.04	44.50	39.07
2012-07-01~2012-12-31	42.43	25.93	24.55	27.58
速度离散度	0.529	0.164	0.192	0.127

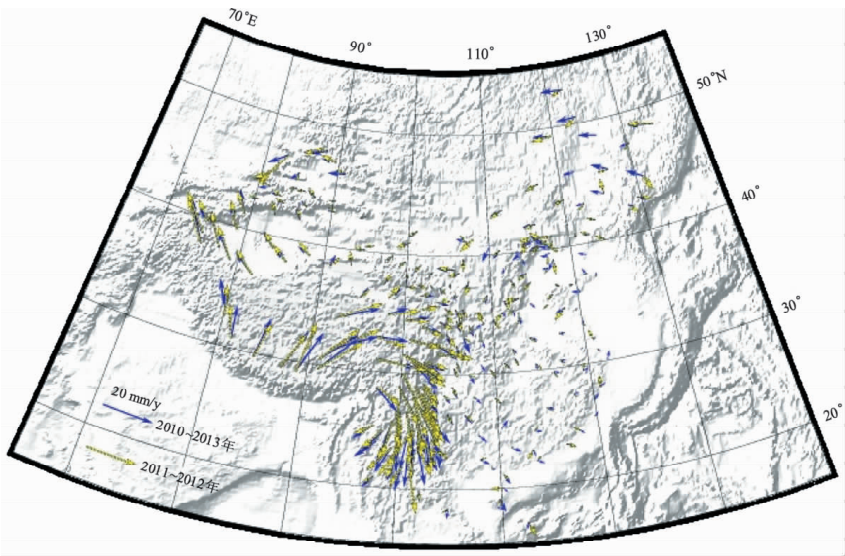


图 1 2011~2012 年中国大陆 GNSS 连续观测站速度场相对背景场的变化

Fig. 1 Variation of velocity field compared with background field of GNSS continuous observation stations in China Mainland from 2011 to 2012

### 3 小波分析剔除不同噪声影响的速度估值

为进一步分离 GNSS 站坐标时间序列所包含的有色噪声，我们采用小波变换的方法。小波分析可以提取时间序列的时频特征，具有分析信号的局部特征和多尺度分辨率的特点，借助小波方法可以将不同特性的噪声进行分离与估计（飞思科技产品研发中心，2005）。

设  $f(t)$  是观测点变形序列，采用 Mallat 算法，将信号分解成不同频率成分：

$$A_{j-1}f(x) = A_jf(x) + D_jf(x). \quad (3)$$

其中，信号在空间  $V_j$  上的投影为

$$A_jf(t) = \sum_{k \in Z} C_{j,k} \phi_{j,k}(x). \quad (4)$$

在空间  $W_j$  上的投影为

$$D_j(x) = \sum_{k \in Z} D_{j,k} \psi_{j,k}(x). \quad (5)$$

其中， $A_{j-1}f(x)$  和  $A_jf(x)$  分别是信号  $f(x)$  的频率不超过  $2^{-j+1}$  和  $2^{-j}$  的成分，而  $D_jf(x)$  是频率介于  $2^{-j}$  与  $2^{-j+1}$  之间的成分。

上述小波分解式实际可写成如下的矩阵形式：

$$\begin{aligned} C_{j+1} &= HC_j \\ D_{j+1} &= GC_j \end{aligned}, \quad (j=1, 2, \dots, J). \quad (6)$$

式中： $H$  是尺度函数对应的低通滤波器， $H = (h_{k-2n})$ ； $G$  是小波函数对应的带通滤波器， $G = (g_{k-2n})$ ； $C_j$  是  $2^j$  在分辨率下的离散逼近； $D_j$  是  $2^j$  在分辨率下的离散细节； $\{h_k\}_{k \in Z}$  和  $\{g_k\}_{k \in Z}$  是一对离散正交镜像滤波器（低通和高通）。式（6）即为 Mallat 塔式分解算法。

小波变换要求数据是等间隔采样的，而 GNSS 时间序列的日观测值中有一定的数据缺失，我们采用最小二乘配置方法对 GNSS 时间序列进行插值。由于最小二乘配置方法不像谱分析或是小波变换要求数据等间隔，其数据输入可以较为松散，而其输出可以根据需求决定是否等间隔（武艳强等，2007）。这就决定了该方法可以作为谱分析、小波变换等方法的预处理过程。即先由最小二乘配置输出滤波、插值后的等间隔值，然后再由其

它方法进行后继处理。

武汉大学测绘学院测量平差学科组（2009）详细论述了最小二乘配置，其误差方程为

$$\begin{cases} V = B_Z \hat{Z} + G\hat{Y} - L, \\ V_Z = \hat{Z} - L_Z. \end{cases} \quad (7)$$

式中， $B_Z$  为信号的系数阵（通常观测点部分为单位阵，推估点部分为零阵）， $\hat{Z}$  为随机信号估值（包括观测点和推估点）， $G$  为经典平差问题的系数阵， $\hat{Y}$  为经典平差问题需要求解的待定参数， $L$  为观测值， $L_Z$  为信号的虚拟观测值（一般为信号的数学期望）。

根据间接平差理论和矩阵反演理论对式（7）进行求解得到

$$\begin{cases} \hat{Y} = \{G^T(D_X + D_\Delta)^{-1}\}^{-1} G^T(D_X + D_\Delta)^{-1} L, \\ \hat{Z} = D_Z(D_X + D_\Delta)^{-1}(L - G\hat{Y}). \end{cases} \quad (8)$$

式中， $D_X$  为已测点信号的协方差阵， $D_\Delta$  为观测值的协方差阵。

应用最小二乘配置方法的前提是获取信号的协方差阵，推荐使用如式（9）的高斯经验协方差函数：

$$f(t) = Ae^{-k^2 t^2}. \quad (9)$$

式中， $t$  为时间间隔， $A$  和  $k$  为待定参数。采用赫尔默特方差估计方法获得参数  $A$ ，而对于参数  $k$ ，可以根据关注的信息频段人为设定。如果  $k$  值较大，得到的信息就接近于原始序列；如果  $k$  值较小，得到的信息就是相对低频的数据。

对最小二乘配置插值后的数据采用具有对称性和正则性的 sym8 小波进行小波分解（张风霜，杨国华，2011）。以 2011~2013 年哈尔滨站东向站坐标时间序列小波分解的结果为例（图 2），随着阶数的增加，信号的细节部分从最高频向低频分解，当阶数为 0 时，信号为采样频率；当阶数为 1 时，频率二等分，对于 GNSS 连续观测时间序列，1 阶信号的周期为 1~2 d，同样，2 阶信号的周期为 2~4 d，以此类推，当阶数为 8 时，8 阶信号的周期为 128~256 d。研究表明，GNSS 时间序列小波分解的 1~3 阶的高频信号主要是白噪声，4、5

阶的高频信号主要是闪烁噪声, 6、7 阶的高频信号主要是随机漫步噪声 (杨国华等, 2007; 杨博等, 2010)。

对哈尔滨站和泰安站已剔除年周期和半年周期的东向站坐标时间序列, 分别剔除白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声后再计算 2011 年 4 月初至 2013 年 3 月底 (共 24 个月) 各月时段速度, 结果见表 3、4 和图 3。由图 3 可见, 随着白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声的逐步剔除, 24 个月各月

的速度由离散逐步趋于稳定。由表 3、4 可知, 只剔除白噪声, 计算得到的哈尔滨站和泰安站 24 个月的各月速度离散度较大, 分别为 0.795 和 0.464, 说明各月速度并不稳定, 进一步剔除闪烁噪声后, 哈尔滨站和泰安站的月速度离散度分别减小至 0.307 和 0.247, 再进一步剔除随机漫步噪声后, 哈尔滨站和泰安站离散度分别进一步减小至 0.165 和 0.180, 说明剔除白噪声、闪烁噪声、随机漫步噪声后得到的月时段速度较稳定。

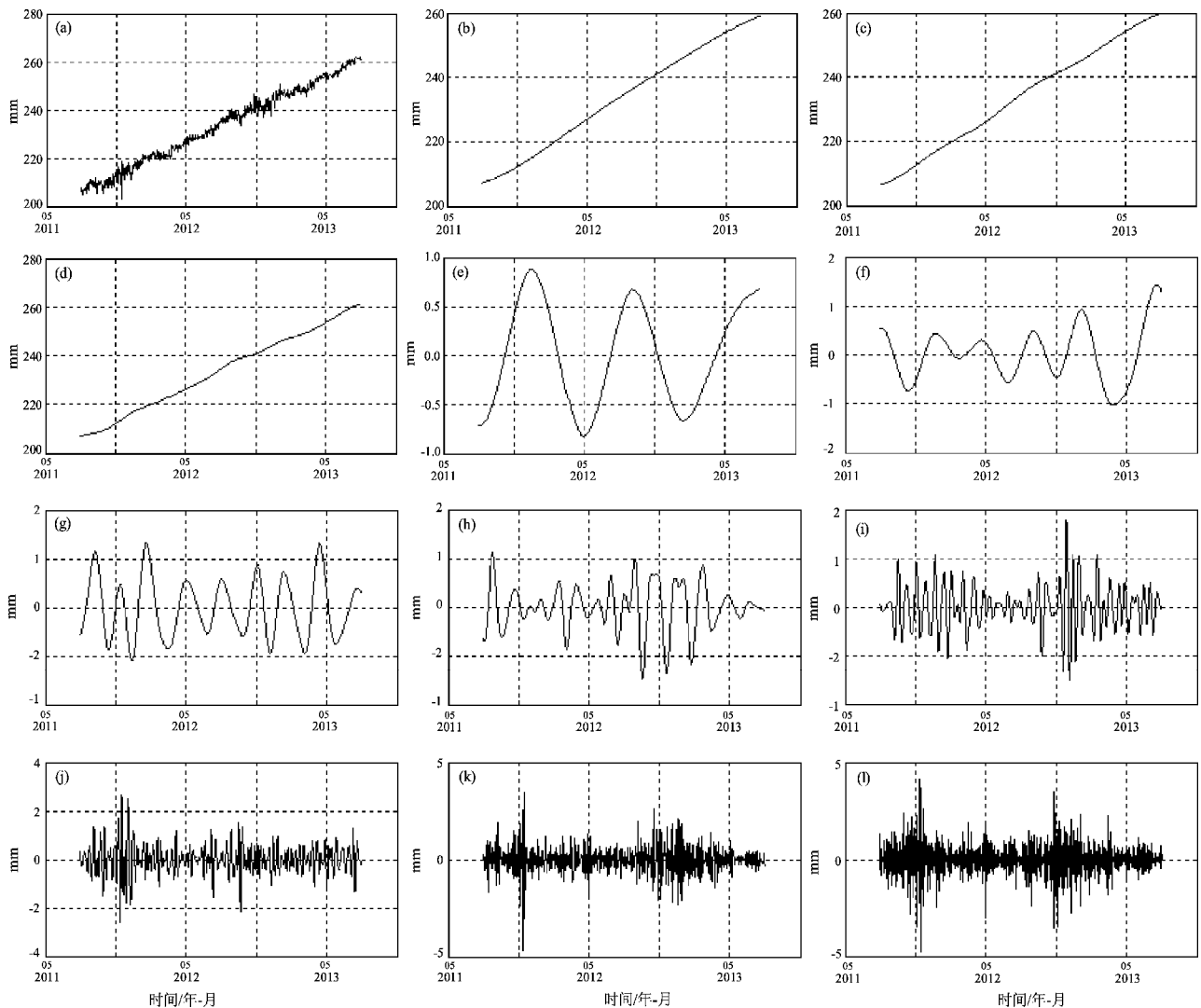


图 2 HRBN 站东向站坐标时间序列小波分析结果

(a) 原始信号; (b) 低频 A8; (c) 低频 A7; (d) 低频 A6; (e) 高频 D8; (f) 高频 D7;  
(g) 高频 D6; (h) 高频 D5; (i) 高频 D4; (j) 高频 D3; (k) 高频 D2; (l) 高频 D1

Fig. 2 Wavelet analysis result of time series of the eastward coordinate recorded by Harbin Station

(a) original signal; (b) low-frequency A8; (c) low-frequency A7; (d) low-frequency A6; (e) high-frequency D8;  
(f) high-frequency D7; (g) high-frequency D6; (h) high-frequency D5; (i) high-frequency D4;  
(j) high-frequency D3; (k) high-frequency D2; (l) high-frequency D1

表 3 哈尔滨站东向剔除不同频段噪声后月时段速度对比

Tab. 3 Comparison of monthly velocity in east after rejecting different noises recorded by Harbin Station

计算所用时段 /年-月	东向速度/mm (剔除白噪声)	精度/mm	东向速度/mm (剔除闪烁噪声)	精度/mm	东向速度/mm (剔除随机漫步噪声)	精度/mm
2011-04	59.574 6	0.264 3	11.302	0.008 6	14.422 2	0.024 6
2011-05	-12.3079	0.510 6	15.452 7	0.027 4	19.825 3	0.014 4
2011-06	32.476 9	0.303 6	30.671	0.06	23.576 2	0.01
2011-07	29.949	0.425 2	40.545 6	0.007 4	26.657 3	0.009 6
2011-08	46.648	0.607 4	32.263	0.056 1	29.131 9	0.006 6
2011-09	25.064 5	0.650 7	20.974 2	0.011 3	29.566 2	0.026 8
2011-10	-12.5832	0.196 3	23.228 8	0.025 2	31.760 7	0.003 2
2011-11	46.691 2	0.558 7	23.704 8	0.064	26.183 9	0.076 5
2011-12	33.652 3	0.309 4	29.655 8	0.008 6	31.536 4	0.004
2012-01	24.46	0.151 1	27.179 1	0.001 5	30.234 6	0.004 3
2012-02	37.783 3	0.366 9	30.449 9	0.026 6	29.180 1	0.002 8
2012-03	56.150 2	0.431 3	40.411 6	0.016 2	28.468 9	0.002 6
2012-04	42.538 9	0.277 6	38.461 9	0.036 2	27.684 1	0.002 2
2012-05	-9.580 7	0.489 9	20.460 3	0.046 1	27.064 6	0.001 8
2012-06	29.067	0.151 4	14.998 1	0.013 8	26.697 3	0.001 4
2012-07	-0.722	1.182 6	28.301 5	0.042 2	26.366 9	0.001
2012-08	65.901 6	0.827 6	32.103 3	0.013 9	26.365 8	0.001
2012-09	-6.809 6	0.181 1	20.453 3	0.039 9	26.804 2	0.001 6
2012-10	20.8301	0.718 1	17.198 3	0.012 3	26.802 5	0.001 6
2012-11	42.385 8	0.420 4	25.142 3	0.034 8	25.954 4	0.003 7
2012-12	37.620 4	0.459 3	31.593 4	0.009 1	24.749 1	0.004 3
2013-01	26.949 6	0.178 2	35.151 8	0.039 1	22.198 7	0.014 5
2013-02	54.231 9	0.332	36.041 3	0.014 8	21.217 2	0.007
2013-03	22.369	0.294 3	20.290 4	0.088 8	17.377 7	0.021 8
速度离散度	0.795		0.307		0.165	

表 4 泰安站东向剔除不同频段噪声后月时段速度对比

Tab. 4 Comparison of monthly period velocity of rejecting different noises of the east recorded by Taian Station

计算所用时段 /年-月	东向速度/mm (剔除白噪声)	精度/mm	东向速度/mm (剔除闪烁噪声)	精度/mm	东向速度/mm (剔除随机漫步噪声)	精度/mm
2011-04	27.960 5	0.603 5	16.910 7	0.014	16.084 1	0.016 6
2011-05	10.714	0.225 6	22.283 3	0.022 6	20.918 8	0.014 7
2011-06	19.669 1	0.746 3	31.952	0.032 6	24.831 2	0.010 8
2011-07	45.181 3	1.369 3	37.370 9	0.005	28.133 5	0.010 3
2011-08	37.333 5	0.514 1	30.536 4	0.041 3	30.811 6	0.007 3
2011-09	14.808 9	0.420 7	22.566 7	0.013 6	31.477 3	0.029 3
2011-10	22.262 9	0.500 3	28.361 3	0.041 2	34.2	0.004 7
2011-11	34.691 4	0.438 9	36.414 2	0.010 9	35.107 5	0.001 8
2011-12	17.99 2	0.352 7	32.617 6	0.039 5	35.113 8	0.001 9
2012-01	15.351 6	0.080 2	25.134 7	0.004	34.672 8	0.002
2012-02	53.104	0.118	32.008 8	0.046 4	34.256	0.001 5
2012-03	41.198 2	0.441 6	46.166 2	0.024	33.905 9	0.002
2012-04	68.072 3	0.473 5	46.117 5	0.021 5	33.376 9	0.001 8
2012-05	30.522 3	0.373	35.911 8	0.028 1	32.840 1	0.001 8
2012-06	55.918 7	0.430 6	30.087 3	0.014 9	32.388	0.002
2012-07	23.265 2	0.856 8	26.846 3	0.009 5	31.884 7	0.001 7
2012-08	47.144 4	0.772 3	24.092 1	0.006	31.496 8	0.001 2
2012-09	13.849 8	0.153	23.28 9	0.003 2	31.280 4	0.001 8
2012-10	33.570 7	0.345 2	26.176 4	0.011 9	30.546 6	0.003 8
2012-11	39.353 4	0.477 1	30.168 3	0.013 9	29.051 8	0.005 2
2012-12	21.443 9	0.527 2	33.540 2	0.013 5	27.376 5	0.005 9
2013-01	54.025 2	0.146 7	39.481 1	0.013 9	25.394 1	0.007 1
2013-02	41.335	0.255 8	37.166 8	0.023 8	22.899 5	0.008 1
2013-03	27.951	0.683 4	20.639	0.084 9	19.438 4	0.024 2
速度离散度	0.464		0.247		0.180	

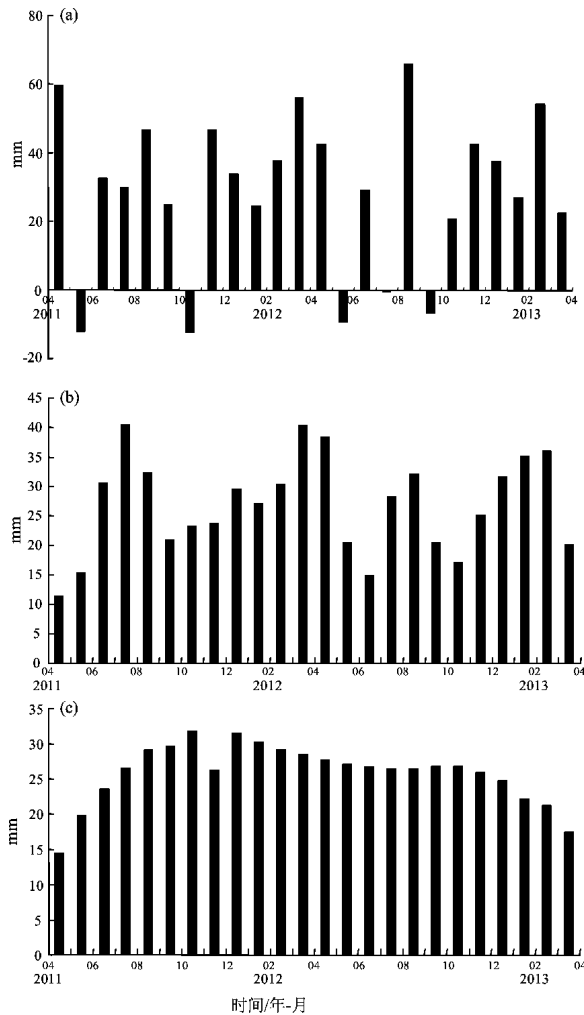


图3 剔除不同噪声的哈尔滨东向月时段速度统计直方图对比

(a) 剔除白噪声; (b) 剔除白噪声和闪烁噪声;  
(c) 剔除白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声

Fig 3 Statistical histogram comparison of monthly velocity after rejecting the different noises recorded by Harbin Station  
(a) rejecting white noise; (b) rejecting white and flicking noises; (c) rejecting white, flicking and random walking noises

## 4 认识与讨论

通过剔除 GNSS 连续观测时间序列的年周期和半年周期成分, 可得到稳定、高精度的年时段和半年时段速度场, 但由于 GNSS 连续观测时间序列的噪声性质, 短时段稳定速度场的获取需要对 GNSS 连续观测时间序列进行滤波剔除有色噪声。

本文采用小波分析方法分别剔除了 GNSS 连续观测时间序列中的白噪声、闪烁噪声和随机漫步噪声, 并比较了逐步剔除不同频段噪声后计算得到的各月时段速度的精度和离散度, 结果表明, 剔除白噪声、闪烁噪声、随机漫步噪声后得到的月时段速度更稳定可靠。利用本文的方法, 实时计算并分析月、半年和年各个时段尺度下的形变场的动态演变过程, 有利于发挥 GNSS 连续观测资料时间上的优势, 从而使 GNSS 连续观测资料更有效地服务于震情会商和形变分析。

### 参考文献:

- 飞思科技产品研发中心. 2005. 小波分析理论与实现 [M]. 北京: 电子工业出版社.
- 韩鹏, 黄清华, 修济刚. 2009. 地磁日变与地震活动关系的主成分分析 [J]. 地球物理学报, 52(6): 1556-1563.
- 胡新康, 王倩, 马青, 等. 2007. 区域无整体旋转基准的研究与应用 [J]. 大地测量与地球动力学, 27(2): 52-60.
- 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, 高砚龙, 任立生, 等. 2006. 关于 NEU(ENU) 坐标系统 [J]. 大地测量与地球动力学, 26(1): 97-99.
- 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.
- 江在森, 邓志辉, 丁鉴海, 等. 2006. GPS、卫星遥感及地球变化磁场地震短期预测方法研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- 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.
- 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.
- 刘志广, 杨博, 卢双印, 等. 2013. 青藏高原中南部近期地壳水平形变 [J]. 大地测量与地球动力学, 33(3): 16-20.
- 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型 [J]. 中国科学(D 辑), 33(增刊): 21-32.
- 王敏, 沈正康, 董大南. 2005a. 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, 张祖胜, 许明元. 2005b. 2000 国家 GPS 大地控制网的数据处理和精度评估 [J]. 地球物理学报, 48(4): 817-823.
- 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.
- 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 2009. 误差理论与测量平差基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社.
- 武艳强, 江在森, 杨国华. 2007. 最小二乘配置方法在提取 GPS 时间序列信息中的应用 [J]. 国际地震动态, (7): 99-103.
- 夏峰, 张锐, 冯胜涛, 等. 2014. GNSS 不同类型实验观测墩对不同类型噪声幅值影响 [J]. 华北地震科学, 32(2): 39-44.
- 谢凡, 滕云田, 胡星星. 2011. 数学形态滤波在地磁数据干扰抑制中的应用 [J]. 地球物理学进展, 26(1): 147-156.



- 杨博,张风霜,韩月萍. 2010. GPS 连续站水平分量时间序列共模误差识别的欧拉—小波法[J]. 大地测量与地球动力学,30(3): 100–104.
- 杨国华,江在森,武艳强,等. 2005. 中国大陆整体无净旋转基准及其应用[J]. 大地测量与地球动力学,25(4):6–10.
- 杨国华,李延兴,韩月萍,等. 2002. 由 GPS 观测结果推导中国大陆现今水平应变场[J]. 地震学报,24(4):337–347.
- 杨国华,张风霜,武艳强,等. 2007. GPS 基准站坐标分量噪声的时间序列与分类特征[J]. 国际地震动态,(7):80–85.
- 张风霜,杨国华. 2011. GPS 连续观测资料小波变换质量评价探讨[J]. 测绘科学,36(6):10–12.
- 张培震,邓启东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D 辑),33(增刊):12–20.
- 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,33(增刊):72–83.
- Herring T. A., King R. W., McClusky S. C.. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT. Release 10.4 [EB/OL]. (2010–01–01) [2014–07–19]. <http://www.doc88.com/p-31570247490.html>.

## Research on High Precision Dynamic Velocity Field Obtained by GNSS Continuous Observation Data

ZHANG Feng-shuang, ZHAN Wei

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

### Abstract

Based on the coordinate time series of GNSS continuous observation in China Crustal Movement Observation Network Program from 1999 to 2013 under the ITRF2005 frame, we evaluated the speed and precisions of monthly, half-yearly and yearly period of GNSS continuous observation stations considering the influences of periodic non-tectonic motion and different noises by wavelet analysis and weighted least square methods, and also discussed the relationship between the obtained reliable velocity field and the length of time series period by using GNSS continuous time series. The results show that the more reliable and higher precision velocity field in yearly and half-yearly period can be obtained by rejecting the motion of annual and semi-annual cycle motion, but the dispersion of velocity field in monthly period is large. The adoption of wavelet filtering method can promote the accuracy and reliability of the results of GNSS continuous observation. Through rejecting the white noise, flicker noise and random walk noise step by step with wavelet analysis, the precision and dispersion of monthly-period velocity improve significantly, so more stable and reliable velocity field in monthly period can be obtained.

**Key words:** GNSS coordinate time series; velocity field; annual cycle; wavelet analysis; noise