

DOI:10.13203/j.whugis20150731



文章编号:1671-8860(2018)04-0629-08

联合小波和方差分量估计方法分析 中国IGS测站时间序列变化特征

马俊¹ 姜卫平² 周晓慧¹ 邓连生^{1,3} 周伯烨²

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

3 安徽省基础测绘信息中心,安徽 合肥,230000

摘要:利用小波谱分析了中国区域IGS(International GNSS Service)站坐标时间序列中周期信号成分及其随时间的变化,根据小波谱中小波系数的能量在时域上的变化对时间序列进行分段,然后采用方差-协方差验后估计法分析了白噪声+闪烁噪声组合模型下测站在不同时间段的运动特征及变化规律。结果表明,中国区域的IGS站运动特征在不同时间段内是变化的,其中URUM站垂直速度变化大于4 mm,BJFS以及CHAN站水平速度变化大于2 mm,其余站速度变化均在2 mm以内;周年、半周年信号的振幅也均有差异,其中BJFS站垂直分量周年振幅变化最大,超过5 mm;此外,强度较弱的其他周期项存在于分段时间序列中,但其对速度、周期振幅以及噪声分量估计结果影响较小;对时间序列进行分段估计,所得的参数不同,其相差程度可反映出不同时间段内的板块运动等地球物理因素变化的差异。

关键词:GPS坐标时间序列;小波谱;周期特征;速度估计

中图法分类号:P228

文献标志码:A

准确分析GPS测站坐标时间序列的变化特征,对于合理解释地壳形变特征,维护和更新地球参考框架以及探求和揭示大地构造变形运动过程具有重要的意义。小波方法对信号时频局部化分析具有较好的效果,而最小二乘方差分量估计法能够较为准确地估计测站的运动参数,这两种方法都已应用于GPS坐标时间序列分析。Amiri-Simkooei^[1]基于白噪声+闪烁噪声组合模型,采用最小二乘方差分量估计法同时估计了多个IGS(International GNSS Service)测站的运动参数。Wu等^[2]人结合小波熵和小波阈值同时去除了GPS坐标时间序列中的白噪声和闪烁噪声。范玉磊、田亮等^[3-4]人分别利用小波多分辨率分析和小波去噪从GPS测站坐标和坐标残差时间序列中提取出一些非线性周期运动信息。李尊建等^[5-6]人结合小波变换和傅里叶变换法在时域中记录大地测量信号序列的突变时间,在频域中提取信号突变的频段。

上述研究的不足主要表现在,一方面,利用小

波方法去噪时忽略了其他有色噪声的影响,且小波分析无法对测站的速度、周期振幅以及噪声分量进行估计;另一方面,以往参数估计结果只反映测站的整体运动特征,不足以反映测站运动的实际变化情况。因此,在顾及有色噪声影响的情况下对IGS测站的运动特征进行分段研究,对于获得测站更加准确的运动趋势具有较大的意义。本文利用小波谱分析中国区域IGS测站坐标时间序列周期项成分及其随时间的变化,并采用最小二乘方差分量估计法估计不同时间段内的运动参数,分析站点的运动特征。

1 时间序列分析方法

1.1 小波谱分析

小波谱把连续频谱划分为离散的频带分量,每个分量代表特定尺度下信号的频谱信息。信号 f 的小波谱 W_f 可用小波系数 f_{cwt} 的模确定:

$$W_f = |f_{\text{cwt}}|^2 \quad (1)$$

收稿日期:2016-07-24

项目资助:国家杰出青年科学基金(41525014);国家自然科学基金(41374033, L1422027)。

第一作者:马俊,博士生,主要从事GPS坐标时间序列噪声分析研究。yangzhiquo.student@sina.com

通讯作者:邓连生,博士。dlseng_2000@whu.edu.cn

小波变换时尺度与频率的关系为:

$$f_a = \frac{f_0}{a} T_s \quad (2)$$

式中, W_f 为小波谱; f_{cwt} 为对信号 f 进行连续小波变换的系数; f_0 是小波母函数的频窗中心频率; T_s 为采样周期; f_a 为小波系数在尺度 a 下的频率。结合式(1)~式(2)便可以得到在某一特定频率(尺度)下小波系数能量随时间的变化,进而可以获得相应的周期信号随时间的变化。

1.2 最小二乘方差分量估计

利用 GPS 坐标时间序列估计测站的运动参数,需要已知噪声的最佳组合模型。当前公认的 GPS 坐标时间序列噪声特性的最优随机模型为白噪声+闪烁噪声。本文基于该模型,采用最小二乘方差分量估计法分析 GPS 坐标时间序列,根据获得的噪声方差分量估值准确定权,进而估计出速度、周期振幅、噪声分量等参数。

GPS 单站、单分量的运动模型为^[1]:

$$\mathbf{y}(t)_i = \mathbf{x}^{(1)} + \mathbf{x}^{(2)} t_i + \sum_{k=2}^q \mathbf{x}^{(2k-1)} \cos \omega_k t_i + \mathbf{x}^{(2k)} \sin \omega_k t_i + v_i \quad (3)$$

式中, $\mathbf{y}(t)_i$ 为 GPS 单站单分量的坐标时间序列; $\mathbf{x}^{(1)}$ 和 $\mathbf{x}^{(2)}$ 分别为初始位置和速率; $q-1$ 为时间序列中包含的周期信号数; $2\pi\omega_k^{-1}$ 为信号的周期; $\mathbf{x}^{(2k)}$ 是调和函数的系数, 用于描述周期信号的振幅; v_i 为误差。式(3)的矩阵形式及随机模型为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Ax} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{y}) = \mathbf{Q}_y = \delta^w \mathbf{I} + \delta^f \mathbf{Q}_f \quad (5)$$

式中, \mathbf{A} 是设计矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是误差; $\mathbf{D}(\mathbf{y})$ 为协方差矩阵; δ^w 和 δ^f 分别为白噪声和闪烁噪声的方差; \mathbf{I} 为单位阵; \mathbf{Q}_f 为闪烁噪声的协方差矩阵。若仅考虑周年和半周年信号, 则 $q=3$ 。未知噪声方差 $\delta = [\delta^w \ \delta^f]$ 可以通过式(6)~(8)迭代获得^[1]:

$$\hat{\delta} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{l} \quad (6)$$

$$n_{kl} = \frac{1}{2} \text{tr} \left(\mathbf{Q}_y^{-1} p \frac{1}{\mathbf{A}} \mathbf{Q}_k \mathbf{Q}_y^{-1} p \frac{1}{\mathbf{A}} \mathbf{Q}_l \right) \quad (7)$$

$$l_k = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{e}}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{Q}_k \mathbf{Q}_y^{-1} \hat{\mathbf{e}}, l, k = 1, 2 \quad (8)$$

式中, $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{l}$; $\mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_f$; $\hat{\mathbf{e}} = p \frac{1}{\mathbf{A}} \mathbf{y}$; n_{kl} 和 l_k 分别为矩阵 \mathbf{N} 和 \mathbf{L} 的元素。第一次迭代需要赋给 δ 初值, 得到收敛的方差分量后, $\sqrt{\delta^w}$ 和 $\sqrt{\delta^f}$ 分别为白噪声和闪烁噪声的振幅, 参数 x 的估值为:

$$\hat{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{y} \quad (9)$$

2 时间序列分析结果

同时段内的测站坐标时间序列能够反映出地

球物理因素不同的变化特征。在进行连续小波变换以及小波谱分析时, 周期信号的变化会引起小波谱中相应小波系数能量的变化。据此对 GPS 坐标时间序列进行分段:首先, 对时间序列进行多个尺度下的连续小波变换, 根据式(1)~式(2)求出相应频率下的小波系数能量并绘制小波谱;其次, 分析小波谱中主要周期信号及其他频段信号小波系数能量的变化特征, 包括强度变化以及持续时间;最后, 根据小波系数能量的变化选择合适的时间节点对时间序列分段, 获得不同时间段具有不同变化特征的时间序列。由此可知, 小波谱分析无需获取测站所在地区的地球物理环境资料, 在时域和频域上更为便捷、直观, 能够为时间序列分段提供有利的参考。

采用 SOPAC(Scripps Orbit and Permanent Array Center)提供的中国区域 9 个 IGS 站的单天 GPS 坐标时间序列(<ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/timeseries/measures/ats/Global/>),首先对其进行小波谱分析和多分辨率分析,根据小波系数能量的变化对时间序列进行分段。然后采用小波谱分析和快速傅里叶变换对分段时间序列进行详细分析,并根据其频率(周期)成分建立运动模型。最后采用最小二乘方差分量估计法估计分段时间序列中的参数。以 URUM 站为例,选取 1999 年—2015 年 6 月的数据,按照前述步骤进行时间序列分析。

图 1 为 URUM 站坐标时间序列图, 图 2 为其实小波谱分析, 其中右侧的色标表示小波系数能量的大小。从图 2 可以看出, 在 1999—2014 年间 URUM 站 U(天顶)方向年周期频率(0.002 7/d)带上的小波系数能量最明显且在时间轴上分布最均匀,说明该方向周年信号振幅较大且在整个时间段内变化较为平稳。N(北)方向时间轴上分布不均匀,存在一个大于年周期的频率带。从整体上看,3 个方向的半年周期频率(0.005 5/d)带上的小波系数能量弱到几乎无法识别,在 2006—2009 年内 3 个方向的小波谱均存在连续且相似的异常频率(0~0.015/d),其小波系数能量随着频率的增加减弱且持续时间逐渐缩短,其中 N 方向的异常频率最明显。

由此可将 URUM 站 3 个方向的时间序列统一分为 3 段:1999—2005 年、2006—2009 年、2010—2015 年。利用小波谱分析和傅里叶谱分析确定每段时间序列的周期成分。图 3(a)、图 3(b)分别为对 URUM 站 U 方向时间序列进行分段分析的小波谱图和对应的功率谱图。通常把频谱中周

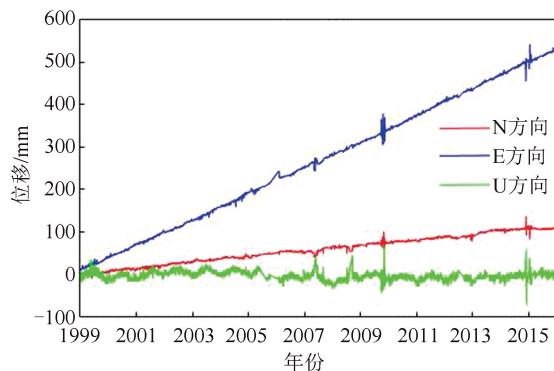


图 1 URUM 站坐标时间序列图

Fig.1 Coordinate Time Series Diagram of URUM Station

年信号的幅值下降到最大幅值的 1/10 时所对应的频率间频带(图 3 中红线所对应的频带)作为周年信号的频宽。由图 3 可以看出,第一段时间序列中,周年信号在小波谱中的小波系数能量分布均匀,其在功率谱中所占的频带宽度最窄,说明该时间段周年信号变化最为平稳、有效性最好。第二段小波谱中除周年信号外,还出现了较多小波系数能量较弱且持续时间随着频率升高而逐渐缩短的信号,其周年信号在功率谱中所占频带宽度最宽,说明在该时间段内噪声较多且周年信号变化最大、有效性最差。此外,第二段的功率谱中出现较弱的半年信号,而其他时间段的功率谱中

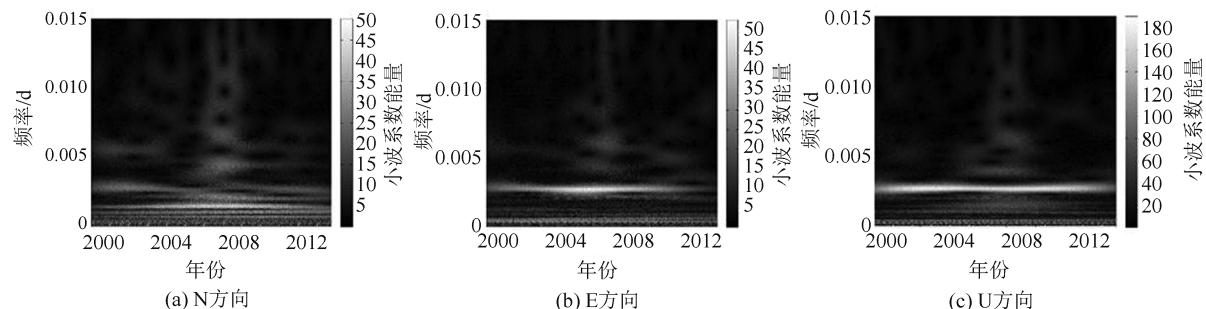


图 2 URUM 站小波谱分析

Fig.2 URUM Station Wavelet Spectral Analysis

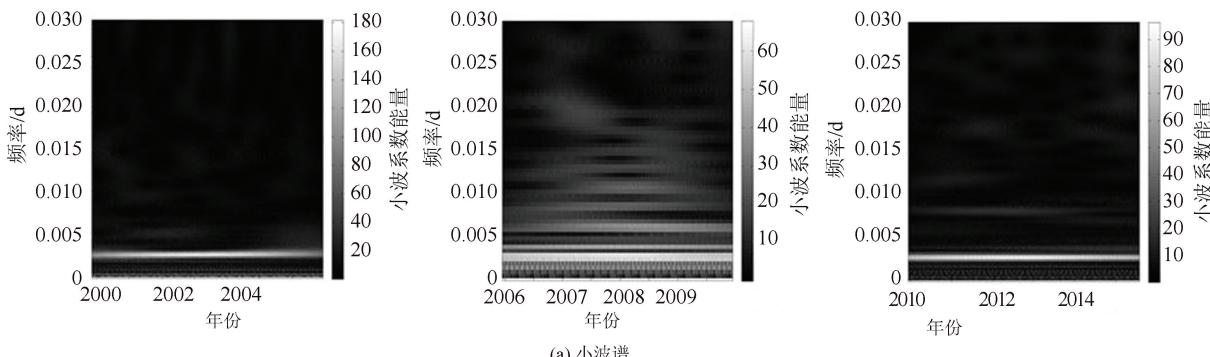


图 3 URUM 站 U 方向坐标时间序列小波谱和功率谱的分段分析

Fig.3 Segmentation Analysis of URUM Station U Direction Coordinate Time Series Using Wavelet Spectrum and Power Spectrum

并未出现。第二段中还存在特别弱的 150 d、240 d 周期信号,第三段存在非常弱的几乎可以忽略的 120 d 周期信号。

基于以上分析,采用方差-协方差分量估计对 URUM 站 U 方向时间序列分段估计。表 1 将

URUM 站 U 方向时间序列分段估计的结果分为两类:*a* 类表示除了年周期和半年周期,还考虑了傅里叶变换探测到的其他周期信号;*b* 类表示仅考虑年周期和半年周期信号。

表 1 URUM 站 U 方向分段估计结果

Tab.1 Results of URUM Station Segmented Analysis in U-component

| 结果 | 1999—2005 | | 2006—2009 | | 2010—2015 | | 1999—2015 |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>b</i> |
| 速度/(mm·a ⁻¹) | -2.07 | -2.17 | -3.73 | -3.26 | 0.45 | 0.90 | -1.71 |
| 年周期振幅/mm | 11.33 | 11.48 | 7.25 | 7.46 | 7.50 | 7.82 | 9.79 |
| 半年周期振幅/mm | 1.78 | 2.10 | 0.87 | 1.57 | 1.25 | 1.27 | 0.36 |
| 白噪声振幅/mm | 3.51 | 3.53 | 2.20 | 2.36 | 0.20 | 0.35 | 1.90 |
| 闪烁噪声振幅/mm | 5.16 | 5.14 | 6.77 | 6.85 | 4.95 | 4.97 | 5.67 |

由表 1 可知,对于同一时间段,*a* 类和*b* 类参数估计结果的差异均较小,因此可以忽略除了年周期和半年周期以外的周期信号。对于不同的时间段,该方向周期振幅变化较大:年周期振幅相差 0.25~4.08 mm,其中第一段与第二段相差最大;半年周期振幅相差 0.3~1.74 mm;白噪声振幅相差 0.45~2.00 mm,闪烁噪声相差 0.53~1.88 mm,其中第二段与第三段相差最大。

从长期来看,URUM 站在垂直方向呈下降趋势。但从分段时间来看,URUM 站在前两段内下降,而在第三段内缓慢上升,其中第二段的下降速度大于第一段,后两段的速度相差达到 4 mm/a。这说明在整个时间段内 URUM 站在垂直方向随着时间的变化存在两种相反的运动趋势。因此,分段分析较整体分析更为可靠准确。

URUM 站垂向运动速度及周期信号振幅在不同时间段的变化与其所在地区特殊的地理位置及气候环境有关。URUM 站位于北天山褶皱带北部边缘、准噶尔盆地南缘,该地区属于典型的温带大陆型干旱气候,特点是干旱多风,降雨稀少而蒸发十分强烈。孙倩等^[7]人分别利用 GRACE 和 GLDAS 反演了该地区 2003—2013 年间陆地水储量和土壤水量的变化特征,并据此获得该地区地下水位的变化:该地区 2003—2005 年间土壤水含量除有较明显的季节性变化外,表现较为平稳,但在 2006—2013 年间总体呈缓慢下降趋势且在 2006—2007 年间下降较为显著;另外该地区地下水位在 2003—2005 年间除季节性变化特征外具有较为缓慢的上升趋势,但在 2006—2009 年间呈现出较为剧烈的下降趋势,在 2010 年间呈现短期显著的增加趋势之后开始缓慢下降。由于地表流体质量(大气、海洋、陆地水)的变化是对 GPS 坐标时间序列中垂直方向周期信号振幅影响较大的

因素,因此该地区土壤水含量以及地下水位在不同时间段的变化可能会引起垂向周期信号振幅的改变;另外该地区地下水位 2006—2009 年间较为剧烈的下降趋势也可能是引起该时间段内 URUM 站下降速度比 1999—2005 年间大的因素之一。

采用相同方法对中国 9 个 IGS 站进行分析,限于篇幅,表 2~表 4 只列出了各站 3 个方向时间序列分段估计参数之差,表中 *c* 类为相邻时间段参数之差, *d* 类为分段与总时间段参数之差。

由表 2~表 4 可知,除 URUM 站垂直速度变化大于 4 mm 外,其余测站速度在水平方向的变化大于垂直方向,其中 BJFS 以及 CHAN 站在 E 方向的变化均超过 2 mm。而周期振幅在垂直向的变化远大于水平方向,其中周年振幅变化最大的 BJFS 站超过 5 mm。噪声振幅在 E 方向变化最大,N 方向最小,其中闪烁噪声振幅的变化总体上比白噪声小。在同一方向上,白噪声振幅的变化均远大于闪烁噪声,大部分周年振幅的变化大于半周年振幅,其中垂直方向周年与半周年振幅相差最大。以上分析说明,白噪声振幅、水平方向的速度、垂直向的周年振幅与其他参数相比在不同时间段变化较大,这与不同时间段的地球物理环境以及地壳构造运动更加密切相关。

比较垂直向参数估计结果发现,CHAN、LHAZ 和 KUNM 站在整个时间段内存在两种相反的运动趋势,其余 IGS 站的运动方向则保持不变。这说明中国 IGS 站在垂直方向速度变化表现出明显的区域性。同时,GUAO 站与 URUM 站虽相距较近,但其坐标时间序列中的频率随时间变化不同,据此分段估计所得参数及其变化存在较大差异。这表明造成周期性运动的因素比较复杂,需深入进行分析。

表 2 中国 IGS 站 N 方向时间序列分段估计参数之差

Tab.2 Difference of Time Series Segmentation Estimate for Chinese IGS Station in North

| 站点 | 时间段 | 速度差/(mm·a ⁻¹) | | 周年振幅差/mm | | 半周年振幅差/mm | | 白噪声振幅差/mm | | 闪烁噪声振幅差/mm | |
|------|-----------|---------------------------|-------|----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|------------|-------|
| | | c | d | c | d | c | d | c | d | c | d |
| BJFS | 2000—2005 | 0.85 | —0.33 | —0.16 | —0.16 | —0.16 | —0.19 | —0.96 | —0.46 | —0.28 | —0.11 |
| | 2006—2012 | 1.17 | —0.33 | —0.16 | —0.16 | —0.03 | —0.03 | 0.50 | 0.50 | 0.17 | 0.17 |
| WUHN | 2000—2002 | —0.68 | —0.48 | —0.14 | —0.34 | —0.77 | —0.68 | —1.23 | —0.88 | —0.65 | —0.44 |
| | 2003—2012 | 0.09 | 1.48 | —0.14 | —0.34 | 0.09 | 0.09 | 0.35 | 0.35 | 0.20 | 0.20 |
| KUNM | 2000—2009 | 0.23 | —0.80 | —0.50 | 0.18 | 1.02 | 0.23 | —1.34 | —0.29 | 0.27 | 0.16 |
| | 2010—2012 | 1.66 | —0.12 | —0.52 | 0.23 | —0.09 | —0.12 | —0.28 | —0.15 | —0.14 | —0.12 |
| SHAO | 2008—2010 | 0.84 | —0.02 | —0.52 | 0.23 | —0.09 | —0.02 | 0.13 | —0.15 | —0.14 | 0.08 |
| | 2011—2014 | —0.39 | 0.06 | —0.29 | —0.08 | 0.19 | 0.06 | —0.91 | —0.38 | —0.10 | 0.00 |
| LHAZ | 1999—2008 | —0.13 | —0.37 | —0.37 | —0.08 | 0.19 | —0.13 | 0.53 | 0.53 | 0.11 | 0.11 |
| | 2009—2015 | 1.18 | 0.02 | —0.05 | 0.44 | —0.25 | 0.02 | —0.76 | —0.48 | 0.05 | —0.04 |
| TNML | 2007—2010 | 0.28 | —0.25 | 1.61 | —1.12 | 0.53 | —0.25 | —0.26 | 0.54 | —0.34 | 0.26 |
| | 2011—2015 | —0.23 | —0.25 | —0.05 | 0.49 | —0.25 | 0.02 | —0.76 | —0.48 | 0.27 | —0.08 |
| CHAN | 2005—2010 | 0.25 | —0.77 | 1.28 | —1.60 | 1.02 | 0.25 | —0.95 | —0.39 | 0.50 | 0.31 |
| | 2011—2015 | —1.35 | —0.77 | —0.33 | —1.60 | —0.77 | —0.77 | 0.56 | 0.56 | —0.19 | —0.19 |
| GUAO | 2002—2009 | 0.04 | —0.22 | —0.45 | —0.40 | 0.26 | 0.04 | —0.66 | —0.25 | —0.09 | 0.05 |
| | 2010—2014 | —0.78 | —0.22 | —0.45 | —0.40 | —0.22 | —0.22 | 0.41 | 0.41 | 0.15 | 0.15 |
| URUM | 1999—2005 | 1.36 | —0.59 | 0.98 | —0.61 | 0.07 | —0.21 | —1.20 | —0.53 | 1.00 | 0.29 |
| | 2006—2009 | —1.95 | —1.0 | —0.59 | —0.59 | —0.25 | —0.03 | 0.13 | 0.54 | —1.17 | 0.46 |
| URUM | 2010—2015 | —1.93 | —0.02 | —1.0 | —0.59 | —0.25 | —0.03 | 0.13 | 0.54 | —1.17 | 0.46 |

表 3 中国 IGS 站 E 方向时间序列分段估计参数之差

Tab.3 Difference of Time Series Segmentation Estimate for Chinese IGS Station in East

| 站点 | 时间段 | 速度差/(mm·a ⁻¹) | | 周年振幅差/mm | | 半周年振幅差/mm | | 白噪声振幅差/mm | | 闪烁噪声振幅差/mm | |
|------|-----------|---------------------------|-------|----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|------------|-------|
| | | c | d | c | d | c | d | c | d | c | d |
| BJFS | 2000—2005 | 2.19 | 0.03 | —0.46 | —0.15 | 0.81 | 0.06 | —2.23 | —0.23 | —0.42 | —0.02 |
| | 2006—2012 | —1.97 | —0.32 | —0.28 | —0.14 | —1.20 | —1.68 | —2.23 | 2.01 | 0.40 | 0.40 |
| WUHN | 2000—2002 | —2.00 | —1.68 | —0.28 | —1.14 | —1.20 | —1.68 | —2.23 | —1.65 | —1.88 | —1.06 |
| | 2003—2012 | —0.49 | —0.86 | —0.45 | —0.40 | —0.26 | —0.22 | 0.58 | 0.58 | 0.82 | 0.82 |
| KUNM | 2000—2009 | 1.69 | 0.10 | —0.96 | —0.23 | 0.41 | 0.10 | —4.16 | —0.66 | —0.86 | —0.11 |
| | 2010—2012 | —0.31 | —0.73 | —0.31 | —0.27 | 0.32 | 0.12 | —0.31 | 3.50 | 0.75 | 0.75 |
| SHAO | 2008—2010 | —1.27 | 0.12 | —0.37 | —0.27 | 0.32 | 0.12 | —0.33 | —0.15 | —0.48 | —0.25 |
| | 2011—2014 | —0.20 | —0.10 | —0.20 | —0.10 | —0.20 | —0.20 | 0.18 | 0.18 | 0.24 | 0.24 |
| LHAZ | 1999—2008 | —0.11 | 0.00 | —0.78 | —0.46 | 0.22 | 0.00 | —3.38 | —1.13 | —0.67 | —0.24 |
| | 2009—2015 | —0.22 | —0.32 | —0.22 | —0.31 | —1.32 | —0.99 | —2.01 | 2.25 | 0.43 | 0.43 |
| TNML | 2002—2006 | 0.79 | —0.99 | 0.12 | —0.31 | —0.31 | —0.99 | —2.01 | —1.09 | —0.02 | —0.11 |
| | 2007—2010 | 0.33 | —0.43 | —1.06 | 0.63 | 0.27 | 0.07 | —0.52 | 1.43 | —0.55 | 0.47 |
| CHAN | 2005—2010 | 2.18 | —0.36 | 0.14 | —0.09 | —0.50 | —0.36 | —1.54 | —0.56 | 0.21 | 0.16 |
| | 2011—2015 | 0.14 | —0.24 | —0.24 | —0.24 | 0.14 | 0.14 | 0.99 | 0.99 | —0.06 | —0.06 |
| GUAO | 2002—2009 | 0.35 | —0.31 | —1.10 | —0.56 | 0.43 | —0.31 | —2.25 | —0.59 | —0.28 | —0.04 |
| | 2010—2014 | —0.74 | —0.55 | —0.74 | —0.74 | —0.74 | —0.74 | 1.65 | 1.65 | 0.24 | 0.24 |
| URUM | 1999—2005 | —1.61 | —0.29 | —0.34 | —0.96 | 1.07 | 0.17 | —1.75 | —1.06 | 1.18 | 0.26 |
| | 2006—2009 | 1.32 | —0.62 | —0.62 | —0.90 | —0.90 | 0.23 | —1.87 | 2.56 | —1.51 | 0.59 |
| URUM | 2010—2015 | 1.80 | —0.48 | —1.67 | 1.05 | —1.13 | 0.23 | —1.87 | 2.56 | —1.51 | 0.59 |

表 5 为本文估计的测站运动参数与 SOPAC 发布的运动参数之差。可以看出,各测站参数分段估值与 SOPAC 给出的估值均有差异,且在不同的时间段差异程度不同,如 BJFS 站在 E 方向 2000—2005 年内速度估值与 SOPAC 差异几乎为 0,但其在 2006—2012 年内与 SOPAC 相差 2

mm。此外,WUHN 站第一时间段以及 CHAN 站第二时间段 E 方向的速度估值与 SOPAC 的差异均超过 2 mm,N 方向 URUM 站 2006—2015 年间速度估值与 SOPAC 相差最大,为 1.84 mm;另外,水平方向周年以及半周年振幅的分段估值与 SOPAC 估值差异的最大值均超过 1.5 mm。

总体来看, E 方向参数的分段估值与 SOPAC 估 值的差异程度大于 N 方向。

表 4 中国 IGS 站 U 方向时间序列分段估计参数之差

Tab.4 Difference of Time Series Segmentation Estimate for Chinese IGS Station in U-Component

| 站点 | 时间段 | 速度差/(mm·a ⁻¹) | | 周年振幅差/mm | | 半周年振幅差/mm | | 白噪声振幅差/mm | | 闪烁噪声振幅差/mm | |
|------|-----------|---------------------------|-------|----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|------------|-------|
| | | c | d | c | d | c | d | c | d | c | d |
| BJFS | 2000—2002 | 0.09 | -3.08 | -2.13 | -4.06 | -2.16 | -3.08 | -0.23 | -0.86 | -0.74 | -0.22 |
| | 2003—2006 | | -0.92 | | -1.93 | | -0.92 | | -0.63 | | 0.52 |
| WUHN | 2007—2012 | 0.51 | -0.34 | -5.34 | 3.41 | -0.58 | -0.34 | -1.49 | -0.63 | 0.44 | 0.52 |
| | 2000—2005 | 0.19 | 1.16 | 4.15 | 2.40 | 0.10 | 1.16 | -3.01 | -1.40 | 1.36 | 0.86 |
| KUNM | 2006—2012 | | 1.27 | | 1.75 | | 1.27 | | 1.61 | | -0.50 |
| | 2000—2009 | 0.93 | -0.84 | 0.31 | -0.06 | -0.42 | -0.84 | -4.13 | -0.78 | -0.60 | -0.04 |
| SHAO | 2010—2012 | | -0.41 | | -0.37 | | -0.41 | | 3.35 | | 0.56 |
| | 2008—2010 | -0.05 | -0.79 | 1.77 | 0.94 | -0.63 | -0.79 | 0.09 | 0.05 | -0.17 | -0.09 |
| LHAZ | 2011—2014 | | -0.15 | | -0.83 | | -0.15 | | -0.04 | | 0.08 |
| | 1999—2006 | -1.51 | -0.10 | 0.98 | -0.44 | -0.84 | -0.10 | -2.70 | -1.60 | -0.18 | 0.22 |
| TNML | 2007—2010 | | 0.74 | | -1.41 | | 0.74 | | 1.10 | | 0.40 |
| | 2011—2015 | 0.70 | -0.83 | 0.19 | -1.61 | 1.57 | -0.83 | -0.62 | 1.71 | 0.31 | 0.09 |
| CHAN | 2002—2007 | -0.42 | -0.73 | -1.82 | -1.16 | -1.14 | -0.73 | -1.74 | -0.78 | 0.49 | 0.25 |
| | 2008—2010 | | 0.40 | | 0.66 | | 0.40 | | 0.97 | | -0.24 |
| GUAO | 2005—2010 | 0.78 | -0.24 | -1.89 | -1.61 | -0.41 | -0.24 | -0.90 | -0.41 | 0.00 | 0.05 |
| | 2011—2015 | | 0.16 | | 0.28 | | 0.16 | | 0.49 | | 0.05 |
| URUM | 2002—2009 | -0.79 | -3.95 | 1.81 | 2.95 | -3.74 | -3.95 | -0.47 | -0.14 | 0.22 | 0.06 |
| | 2010—2014 | | -0.21 | | 1.14 | | -0.21 | | 0.34 | | -0.15 |
| URUM | 1999—2005 | -1.09 | 0.46 | -4.02 | -1.69 | -0.53 | -1.74 | -1.17 | -1.63 | 1.71 | 0.53 |
| | 2006—2009 | | 1.55 | | 2.33 | | -1.21 | | -0.46 | | -1.18 |
| | 2010—2015 | 4.16 | -2.61 | 0.36 | 1.97 | -0.30 | -0.91 | -2.01 | 1.55 | -1.88 | 0.70 |

表 5 中国 IGS 站水平方向时间序列参数分段估值与 SOPAC 之差

Tab.5 Difference Between the Values from SOPAC and the Estimation Obtained by the Time Series Segmentation Analysis for Chinese IGS Station in Horizontal Direction

| 站点 | 时间跨度 | | N 方向 | | | E 方向 | | |
|------|-----------|------------------|------------------------------|--------------|---------------|------------------------------|--------------|---------------|
| | 分段时间 | SOPAC 时间 序列跨度 | 速度差 (mm·a ⁻¹) | 周年振幅差 /mm | 半周年振幅 差/mm | 速度差 (mm·a ⁻¹) | 周年振幅差 /mm | 半周年振幅 差/mm |
| BJFS | 2000—2005 | 2000—2014 | -1.03 | 0.25 | 0.16 | 0.00 | 0.10 | -0.01 |
| | 2006—2012 | | 0.15 | 0.09 | 0.00 | 2.00 | -0.36 | 0.79 |
| WUHN | 2000—2002 | 1993—2014 | 0.19 | 0.40 | 0.74 | 2.14 | 1.43 | 1.82 |
| | 2003—2012 | | -0.18 | 0.26 | -0.03 | -0.23 | 1.15 | 0.62 |
| KUNM | 2000—2009 | 1999—2013 | -0.94 | 0.28 | -0.03 | -1.03 | 0.25 | -0.02 |
| | 2010—2012 | | 0.80 | -0.22 | 0.99 | 0.72 | -0.71 | 0.39 |
| SHAO | 2008—2010 | 1995—2014 | 0.73 | 0.64 | 0.05 | 1.47 | 1.19 | 0.14 |
| | 2011—2014 | | 1.53 | 0.12 | -0.04 | 0.10 | 0.82 | 0.47 |
| LHAZ | 1999—2008 | 1999—2015 | 0.25 | 0.25 | -0.09 | 0.15 | 0.21 | 0.06 |
| | 2009—2015 | | -0.16 | -0.05 | 0.10 | 0.08 | -0.57 | 0.28 |
| TNML | 2002—2006 | 2002—2015 | -0.77 | -0.43 | -0.01 | -0.56 | 0.53 | 0.98 |
| | 2007—2010 | | 0.35 | -0.48 | -0.26 | 0.28 | 0.65 | -0.35 |
| CHAN | 2011—2015 | | 0.12 | 1.13 | 0.27 | 0.81 | -0.41 | -0.08 |
| | 2005—2010 | 2004—2015 | 0.18 | 0.53 | -0.17 | 0.16 | 0.19 | 0.17 |
| GUAO | 2011—2015 | | -1.28 | 1.81 | 0.85 | 2.40 | 0.33 | -0.34 |
| | 2002—2009 | 2002—2014 | 0.11 | 0.27 | 0.03 | -0.12 | 0.32 | 0.20 |
| URUM | 2010—2014 | | -0.68 | -0.18 | 0.29 | 0.24 | -0.78 | 0.63 |
| | 1999—2005 | 1998—2015 | 0.51 | 0.84 | 0.15 | 0.12 | 0.81 | -0.40 |
| URUM | 2006—2009 | | 1.84 | 1.56 | 0.20 | -0.44 | 0.28 | 0.80 |
| | 2010—2015 | | 0.01 | 0.63 | -0.06 | 0.55 | -1.19 | -0.39 |

3 结语

本文利用小波谱分析了中国 IGS 站坐标时

间序列周期成分及其随时间的变化,并在白噪声+闪烁噪声组合模型下采用最小二乘方差分量估计法估计各分段时间序列 IGS 站的运动参数,分析站点的运动特征。结果表明,中国区域 IGS 站

坐标时间序列时频特征具有明显的区域特性,不同 IGS 站周期项的振幅、规律性及其变化不同,且同一 IGS 站 3 个方向坐标时间序列频率随时间的变化也不同。IGS 站坐标时间序列的年周期和半年周期项在不同的时间段有不同的特点。除周年和半周年之外,有些分段时间序列中还存在较弱的其他周期项,但对参数估计结果影响不大,可不予考虑。白噪声振幅、水平方向的速度、垂直向的周年振幅与其他参数相比,在不同时间段变化较大。

IGS 站的运动特征与不同时间段的地球物理环境以及地壳构造运动密切相关,有必要对其坐标时间序列进行分段分析。一方面可利用小波谱分析坐标时间序列中的周期信号,根据其小波系数能量强度在时域或者频域上的变化进行分段分析。另一方面如果事先获得测站所在地区的地球物理环境资料,可根据其随时间的变化进行分段分析。由于地球物理因素对测站的非线性运动影响因地而异,应根据测站的地理环境选择重点分析的地球物理因素。

参 考 文 献

- [1] Amiri-Simkooei A R. Noise in Multivariate GPS Position Time-Series [J]. *J. Geodesy*, 2009, 83(2): 175-187
- [2] Wu Hao, Li Kui, Shi Wenzhong, et al. A Wavelet-Based Hybrid Approach to Remove the Flicker Noise and the White Noise from GPS Coordinate Time-Series [J]. *GPS Solut.*, 2015, 19(4): 511-523
- [3] Fan Yulei, Wang He, Huang Shengxiang, et al.
- [4] Tian Liang, Sun Fuping. Application and Analysis of Wavelet Tools Based on GPS Coordinate Residuals [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2013, 22(1): 44-47(田亮, 孙付平. 基于 GPS 测站坐标残差序列的小波工具应用与分析[J]. 测绘工程, 2013, 22(1): 44-47)
- [5] Li Junjian, Zang Bin. Feature Information Identification of Non-stationary Geodetic Signal with Wavelet [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 23(4): 58-61(李尊建, 臧斌. 非平稳大地测量信号特征信息小波识别[J]. 山东理工大学学报自然科学版, 2009, 23(4): 58-61)
- [6] Guo Aizhi, Wang Yong, Su Xiaoqing, et al. Resolving Static Offset from High-Rate GPS Data by Wavelet Decomposition-Reconstruction Algorithm [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 192-195(郭爱智, 王勇, 苏晓庆, 等. 利用小波分解重构提取高频 GPS 数据静态永久性变形[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(10): 192-195)
- [7] Sun Qian. GRACE and GLDAS Date-Based Estimation of Spatial Variations in Terrestrial Water Variations over Xinjiang [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2015(孙倩. 基于 GRACE 和 GLDAS 的新疆水资源时空变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015)

Coordinate Time Series of IGS Station in China Based on the Combination of Wavelet Spectral and Variance Component Estimation

MA Jun¹ JIANG Weiping² ZHOU Xiaohui¹ DENG Liansheng^{1,3} ZHOU Boye²

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Basic Surveying and Mapping Information Center of Anhui Province, Hefei 230000, China

Abstract: Wavelet spectral analysis is employed in this paper to determine the frequency components and their variations over time in coordinating time series of IGS stations in China. Then least-squares variance component estimation (LS-VCE) is adopted to analyze motion characteristics of stations in China in different periods under the assumed model of white and flicker noise. The results indicate that motion characteristics of IGS station in China are seasonally varied in different periods. The variation of the vertical velocity of URUM station is greater than 4 mm, while velocity changes more than 2

Wavelet Approach to Studying the Nonlinear Motional Characteristics of IGS Stations [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2014, 23(9): 5-8(范玉磊, 王贺, 黄声享, 等. 利用小波分析 IGS 跟踪站的非线性运动特征[J]. 测绘工程, 2014, 23(9): 5-8)

mm for horizontal component of BJFS and CHAN. And the rest are no more than 2 mm. There are also differences in the amplitude of the annual and semi-annual signals. Among them, BJFS has the largest change in vertical component, which is more than 5 mm; In addition, weaker periodic items are discovered in some segment of the time series. Though, due to their little impact on the result of parameter estimation, they are discarded along the process. Moreover, the fact that the estimations of the parameters for one station are not consistent in different segments of the time series may reflect patterns of geophysical effects on certain stations over time such as plate motion.

Key words: GPS coordinates time series; wavelet spectral; periodic characteristics; velocity estimation

First author: MA Jun, PhD candidate, specializes in the noise analysis of GPS coordinates time-series. E-mail: yangzhiquo.student@sina.com

Corresponding author: DENG Liansheng, PhD. E-mail: dlseng_2000@whu.edu.cn

Foundation support: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars, No. 41525014; National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374033, L1422027.

(上接第 577 页)

2003 to 2012. And then, the effects of El Niño-Southern Oscillation (ENSO), net freshwater flux, water volume transport and runoff on the ocean mass in the South China Sea during the period are discussed by using oceanographic and meteorological data. The results show that ocean mass variations in the South China Sea was dominated by sea surface net freshwater flux and sea water volume transport between the South China Sea and its adjacent seas, and the role of runoff from rivers nearby was limited. Oceanic mass variations in the South China Sea have significant seasonal characteristics with the annual cycle and a long-term increasing trend. ENSO made the ocean mass in the South China Sea change with a significant inter-annual characteristic through controlling precipitation and Kuroshio water volume transport though the Luzon Strait. The ocean mass in the South China Sea decreased during El Niño and increased during La Niña, and the size of changes were closely related to the intensity of ENSO event.

Key words: South China Sea; ocean mass variations; ENSO; net freshwater flux; water volume transport

First author: WANG Zemin, PhD, professor, specializes in polar surveying, mapping and remote sensing. E-mail: zmwang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41531069; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation and Assessment Program, No. CHINARE2016-02-02.