

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2021.06.002

文章编号:1672-3767(2021)06-0011-09

欧洲地区 GPS 站速度估计及地壳运动分析

李国伟¹, 周茂盛²

(1. 山东省国土测绘院 山东 济南 250102;

2. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590)

摘要:利用 GAMIT/GLOBK 10.7 获取欧洲约 70 个 GPS 站 2011—2016 年的高精度坐标时间序列。利用奇异谱分析(SSA)和最小二乘拟合相结合进行站速度估计,并将估计结果与最小二乘谱分析估计值及 SONEl 站速度对比,在此基础上对欧洲地壳运动规律进行分析。结果显示:站速度估计的中误差平均值均小于 0.45 mm/yr,优于常规最小二乘谱分析估计精度,说明在一定程度上避免了周期和噪声项的影响;与 SONEl 站速度平均差值小于 0.6 mm/yr,外附精度较好;水平方向,欧洲大部分地区以约 20 mm/yr 的速度向西北方向运动;垂直方向,北纬 45°以南的欧洲地区呈下沉的趋势,且大部分区域运动速度小于 5 mm/yr,北纬 45°以北则呈上升趋势,且上升速度随纬度的增高而增大,靠近北极圈的部分地区的上升速度达 20 mm/yr。

关键词:奇异谱分析;最小二乘拟合;站速度;地壳运动;全球定位系统(GPS)

中图分类号:P228.1

文献标志码:A

GPS station velocity estimation and crustal movement analysis in Europe

LI Guowei¹, ZHOU Maosheng²

(1. Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Jinan, Shandong 250102, China;

2. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: High-precision coordinate time series of about 70 global positioning system (GPS) stations in Europe from 2011 to 2016 was first obtained by using GAMIT/GLOBK10.7. The station velocity was then estimated by using singular spectrum analysis (SSA) and least square fitting. The estimated results were compared with the estimated value of least square spectrum analysis and the station velocity published by SONEl. On this basis, the law of European crustal movement was finally analyzed. The results show that the average value of mean square error in velocity estimation is less than 0.45 mm/yr, which is better than conventional least square spectral analysis, indicating that the method can avoid the influence of period and noise term to a certain extent. The mean difference of the station velocity from that published by SONEl is below 0.6 mm/yr, and the consistence is good. In horizontal direction, most of the European stations are moving northwest at a speed of about 20 mm/yr. In the vertical direction, the European stations south of 45°N latitude presents a downward movement trend and the movement velocity is largely below 5 mm/yr. However, the movement of European stations north of 45°N latitude presents largely an upward trend and the rising velocity increases with the increase of the latitude. The rising velocity of some regions near the Arctic Circle reaches 20 mm/yr.

Key words: singular spectrum analysis; least square fitting; station velocity; crustal movement; GPS

大地测量技术作为监测地壳运动的有效手段之一,其信息获取手段已由常规测量仪器发展为空间测量

收稿日期:2021-04-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41774001);国家测绘自主可控专项项目(816-517)

作者简介:李国伟(1986—),男,山东东营人,工程师,硕士,主要从事高精度 GNSS 数据处理相关研究。

E-mail: liguowei_2021@126.com

技术^[1]。由于全球定位系统(global positioning system, GPS)相对于其他空间观测技术具有成本低、相对测量精度高、观测方便等优势,已成为目前主要的形变观测手段,被广泛应用于区域地壳形变研究^[2]、强地震位移场检测^[3-4]、慢地震位移研究^[5-6]以及冰后期回弹分析^[7]等领域,并发挥了重要作用。

Altamimi 等^[1]利用多种空间大地测量技术,建立国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)ITRF2008 和全球板块运动模型^[8]。国内学者^[9-10]采用 GPS 观测资料,建立中国地壳运动速度场,并分析构造变形规律。Grenerczy 等^[11]利用 GPS 数据分析欧洲地壳运动规律。Santamaria-Gomez 等^[12]计算全球 GPS 测站的站速度,并利用垂直方向地壳形变规律,进行海平面绝对变化规律的研究。

要分析地壳运动规律,必须首先获取高精度的站速度。目前高精度全球导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)数据处理软件一般采用序贯平差或卡尔曼滤波方法进行线性站速度估计。坐标时间序列分析软件采用最小二乘谱分析拟合线性站速度,采用极大似然估计处理时间序列的随机部分^[13-14]。GPS 坐标时间序列呈闪烁噪声+白噪声+随机游走噪声的特性,站速度精度受噪声模型的影响较大,不恰当的随机模型可导致速度不确定度的有偏估计^[15-18]。站速度估计与坐标时间序列分析密不可分。

奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)^[19]作为一种数字信号处理技术,在气候学、测量学^[20]、海洋学^[21]等领域都有应用。郭金运等^[22]利用 SSA 实现了相对重力观测数据中固体潮的可靠提取。王鹏程等^[23]利用 SSA 分析了汶川地震震前地倾斜数据,发现了震前异常。史坤朋等^[24]利用 SSA 进行了电离层总电子含量预测,牛余朋等^[25]利用 SSA 进行近海海平面变化预测,都取得了良好效果。Zhou 等^[26-27]采用多通道奇异谱分析(multi-channel singular spectrum analysis, MSSA)分离了 GPS 坐标时间序列中的共模误差,改善了 GPS 坐标时间序列精度和站速度估计精度。

本研究提出奇异谱分析和最小二乘拟合相结合的方法估计测站速度,先利用奇异谱分析将坐标时间序列构成成分进行分离,再采用最小二乘拟合重构的趋势项估计 GPS 站速度,最后对 GPS 站速度估计结果进行精度评定,分析欧洲地区地壳运动规律。

1 数据及方法

1.1 GPS 数据

欧洲地区约 70 个测站的 GPS 数据由 <http://www.sonel.org>^[12]提供,采样率为 30 s,时间跨度为 6 年(2011—2016),点位如图 1 所示。

1.2 GPS 数据处理及时间序列预处理方法

GAMIT/GLOBK10.7 主要解算策略为^[28]:采用国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)最终星历,选择轨道及基站松弛约束,卫星截止高度角为 10° ,观测数据采样间隔为 30 s,采用无电离层组合(LC 组合),采用 Saastamoinen 模型及 VMF1 映射函数。网平差选取 ITRF2008 框架下稳定的 IGS 站作为起算点,采用最小约束方式进行解算。

坐标时间序列预处理主要工作是粗差数据剔除和缺失数据补全。

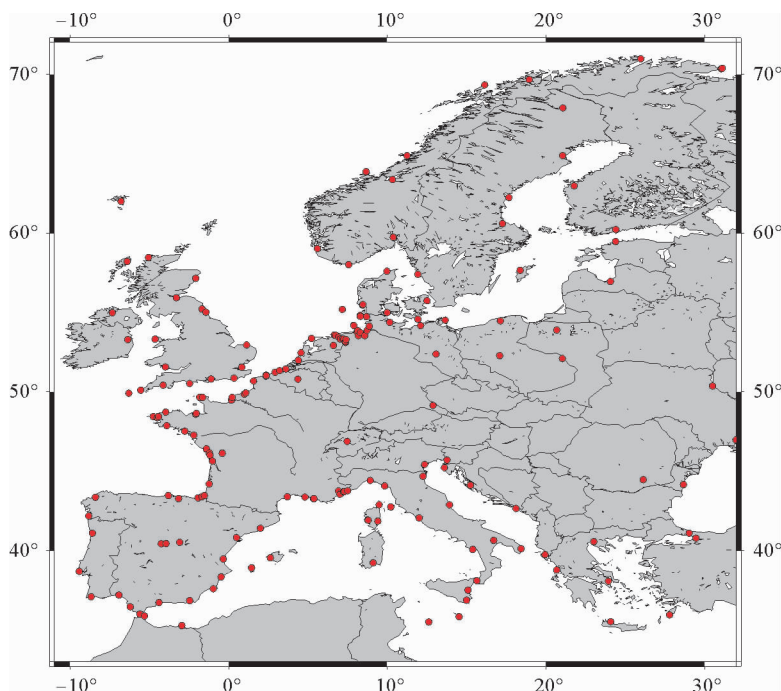


图 1 测站点位图

Fig. 1 GPS site distribution

对坐标时间序列进行拟合,以 3 倍标准差为阈值,进行粗差的识别和剔除。利用 SSA 插值来恢复缺失数据^[29-32],插值截止的中误差阈值为 0.01 mm。

1.3 站速度估计方法

1.3.1 坐标时间序列 SSA 分解

SSA 方法对构造的轨迹矩阵进行分解,提取时间序列不同成分^[19]。GPS 坐标时间序列的时滞轨迹矩阵 \mathbf{X} 为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{X}_K], \quad (1)$$

其中: N 为时间序列的长度; M 为窗口长度; $K = N - M + 1$ 。式(1)中 \mathbf{X}_i 可表示为:

$$\mathbf{X}_i = [x_i \quad x_{i+1} \quad \cdots \quad x_{i+M-1}]^T, 1 \leq i \leq K. \quad (2)$$

对矩阵 $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 进行奇异值分解,计算其特征值 $\lambda_1, \dots, \lambda_M$, 对应的特征向量为 $\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_M$ 。设 $d = \text{rank}(\mathbf{X})$, 则时滞矩阵 \mathbf{X} 可变换为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{c_1} + \mathbf{X}_{c_2} + \cdots + \mathbf{X}_{c_d}, \quad (3)$$

其中:初等矩阵 $\mathbf{X}_{c_k} = \sqrt{\lambda_k} \mathbf{U}_k \mathbf{V}_k^T$; $\mathbf{V}_k = \mathbf{X}^T \mathbf{U}_k / \sqrt{\lambda_k}$, $k = 1, \dots, d$; $\sqrt{\lambda_k}$ 是 \mathbf{X}_{c_k} 的奇异值; $\{\sqrt{\lambda_k}\}$ 为奇异谱。

按信号类型将初等矩阵 \mathbf{X}_{c_k} 分为 m 个不相交的子集,即分组为 A_1, A_2, \dots, A_m , 若子集 A_i 包含 a_p 个初等矩阵,则分组 A_i 的合成矩阵可表示为:

$$\mathbf{X}_{A_i} = \mathbf{X}_{a_1} + \mathbf{X}_{a_2} + \cdots + \mathbf{X}_{a_p}. \quad (4)$$

对于 \mathbf{X} 用合成矩阵表示的公式为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{A_1} + \mathbf{X}_{A_2} + \cdots + \mathbf{X}_{A_m}. \quad (5)$$

将 \mathbf{X}_{A_i} 对角平均化,公式为:

$$z_i = \begin{cases} \frac{1}{i} \sum_{m=1}^k z_{m,i-m+1}^*, & 1 \leq i \leq M^*; \\ \frac{1}{M^*} \sum_{m=1}^{L^*} z_{m,i-m+1}^*, & M^* < i \leq K^*; \\ \frac{1}{N-i+1} \sum_{m=i-K^*+1}^{N-K^*+1} z_{m,i-m+1}^*, & K^* < i \leq N. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $z_i (i = 1, \dots, N)$ 为 \mathbf{X}_{A_i} 经过对角平均化得到的坐标时间序列; $M^* = \min(M, K)$, $K^* = \max(M, K)$; 若 $M < K$, 则 $z_{ij}^* = z_{ij}$, 否则 $z_{ij}^* = z_{ji}$ 。

完成对角化后,重构新的时间序列,对其进行信号分离,可得特征值大小不同信号。

1.3.2 站速度最小二乘拟合

常规采用最小二乘谱分析方法估计 GPS 站速度^[13-14],同时考虑趋势项、周年项、半年项进行估计,如式(7)所示:

$$y(t_i) = x_0 + v_x \cdot t_i + A_a(t_i) + A_{sa}(t_i) + \epsilon(t_i). \quad (7)$$

式中: $y(t_i)$ 为趋势项; x_0 为初始值; v_x 为速度值; $A_a(t_i)$ 为周年项; $A_{sa}(t_i)$ 为半年项; $\epsilon(t_i)$ 为声项; $t_i (i = 1, \dots, n)$ 为年积日。

本研究利用 SSA 分析 GPS 坐标时间序列,重构趋势项,实现了趋势项与周年项、半年项及噪声项的分离,趋势项表示为:

$$T(t_i) = x_0 + v_x \cdot t_i. \quad (8)$$

将分离后的趋势项作为观测值,按式(9)估计站速度:

$$\begin{cases} \mathbf{L} = \mathbf{B}\mathbf{X}, \\ \mathbf{X} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^T \mathbf{B} \mathbf{P} \mathbf{L}. \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\mathbf{L} = [T(t_1) \quad \cdots \quad T(t_n)]^T$ 为趋势项观测值, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ t_1 & \cdots & t_n \end{bmatrix}^T$ 为系数矩阵, $\mathbf{X} = [x_0 \quad v_x]^T$ 为待求量。

2 数据处理和结果

2.1 GPS 数据解算及时间序列预处理

GAMIT 基线解算精度如表 1 所示,双差数据处理的标准化均方差(normalized root mean square, NRMS)均优于 0.19,相对精度平均值在 10^{-9} 量级。GLOBK 网平差精度如表 2 所示,网平差各坐标分量精度平均值均优于 4.3 mm,标准差均优于 4.5 mm,极少数测站由于观测环境不理想,坐标精度为 cm 级,在后续数据处理时作为粗差被剔除。由上述分析可知,解算结果可用于高精度地壳运动规律分析。对欧洲区域 2011—2016 年单日解坐标时间序列(ITRF2008 框架),按 1.2 节中粗差剔除和缺失数据插值方法进行预处理,保证坐标时间序列的可靠性和完整性。

表 1 基线精度统计

Tab. 1 Baseline precision statistics m		
统计项	基线相对精度	NRMS
最大值	7.87×10^{-6}	0.189
最小值	4.53×10^{-10}	0.174
平均值	4.62×10^{-9}	0.183

表 2 网平差精度统计

Tab. 2 Precision statistics of network adjustment m			
统计项	X	Y	Z
最大值	0.024 1	0.018 2	0.021 4
最小值	0.000 7	0.000 5	0.000 9
平均值	0.004 3	0.003 7	0.004 3
标准差	0.004 5	0.003 6	0.003 9

2.2 站速度估计

2.2.1 坐标时间序列 SSA 分析

采用 SSA 方法(1.3.1 节)分析 GPS 坐标时间序列,由于篇幅限制,从实验数据中选取两个测站的 U 方向的分析结果进行成图展示,如图 2、图 3 所示。SSA 分解后的各个重构成分按照特征值的贡献率大小依次排列,GPS 坐标时间序列中特征值贡献率由大到小为趋势项、周年项、半年周项和噪声项,且除了趋势项之外,其他重构成分都是成对存在的。图 2 和图 3 中,(a)图为趋势项,(b)(c)图为周年周期项,(d)(e)图为半年周期项,其余视为噪声。

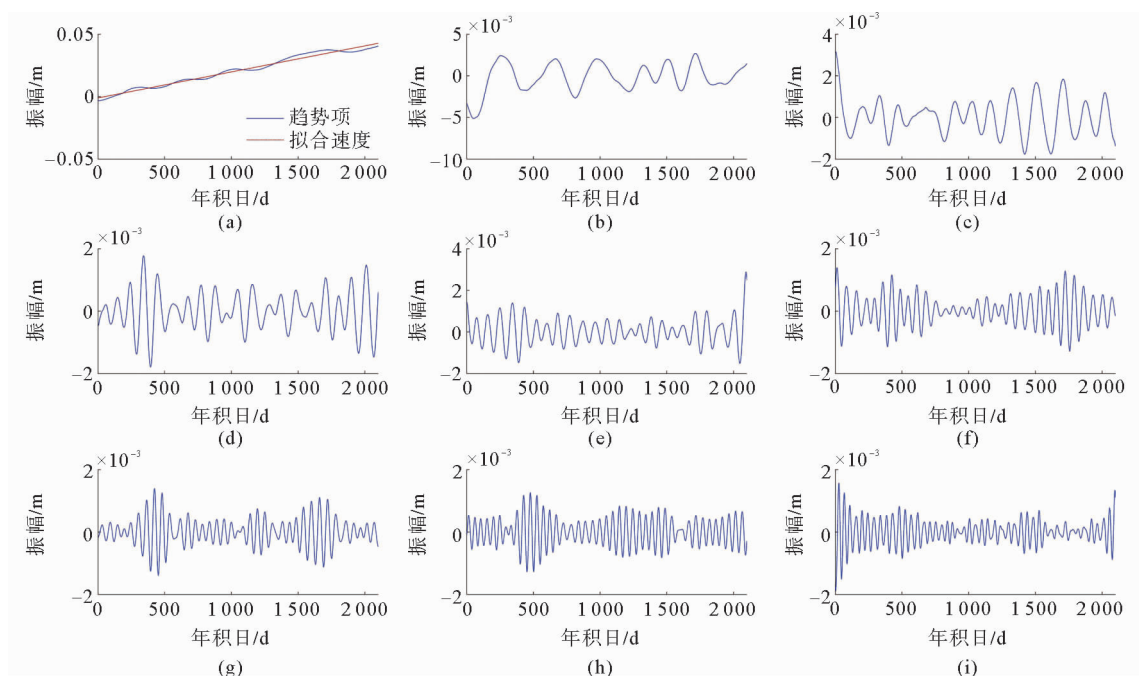


图 2 HONS 站 U 方向 SSA 和最小二乘拟合结果

Fig. 2 HONS station results of SSA and least squares fitting in U direction

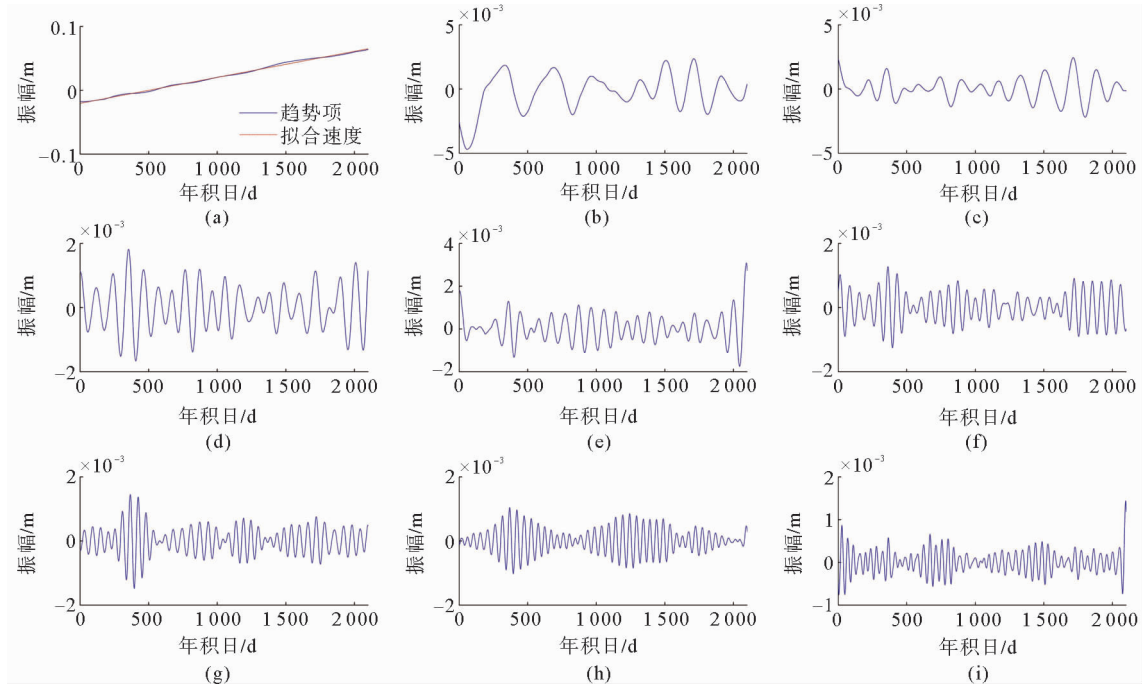


图 3 VIKC 站 U 方向 SSA 分析和最小二乘拟合结果

Fig. 3 VIKC station results of SSA and least squares fitting in U direction

2.2.2 站速度最小二乘拟合

利用 SSA 重构的趋势项,按 1.3.2 节中式(9)估计了 GPS 站速度,精度统计结果如表 3 所示,各方向速度估计的中误差平均值均优于 0.45 mm/yr,说明站速度估计精度较高,能够满足地壳运动研究的要求。采用最小二乘谱分析方法估计的 GPS 站速度中误差统计结果如表 4 所示。两种方法估计的 GPS 站速度差值统计如表 5 所示。由表 3~5 可见,SSA 和最小二乘拟合相结合的方法估计 GPS 站速度的精度优于最小二乘谱分析方法,说明先采用 SSA 将时间序列的趋势项进行分离重构,再对趋势项进行最小二乘拟合,一定程度上避免了周期项和噪声对站速度估计的影响。

表 3 SSA 结合最小二乘方法站速度估计中误差统计

Tab. 3 Statistical result of mean square error of station velocity based on SSA and least squares fitting

mm/yr			
统计项	N 方向	E 方向	U 方向
最大值	2.23	2.32	2.61
最小值	0.02	0.01	0.08
平均值	0.08	0.12	0.45
标准差	0.35	0.41	0.49

表 4 最小二乘谱分析方法站速度估计中误差统计

Tab. 4 Statistical result of mean square error of station velocity based on least squares spectral analysis

mm/yr			
统计项	N 方向	E 方向	U 方向
最大值	2.45	2.51	2.89
最小值	0.06	0.05	0.10
平均值	0.10	0.15	0.49
标准差	0.38	0.49	0.54

SONEL 公布的 GPS 站速度参考框架为 ITRF2008,由平均 11 年的 GPS 数据估计得出(<http://www.sonel.org>)。将其作为参考进行对比,结果如表 6 所示。可见,本次估计的站速度和 SONEL 速度的差值较小,差值的平均值均小于 0.6 mm/yr,标准差均优于 1 mm/yr,外附精度较好。

综上所述,利用 SSA 和最小二乘拟合相结合的方法估计的站速度是可靠的,其站速度估计结果可以用于地壳运动研究。

表5 基于SSA方法与最小二乘谱分析的站速度差值统计

Tab. 5 Statistical result of station velocity difference between SSA method and least squares spectral analysis

统计项	mm/yr		
	N方向	E方向	U方向
最大值	0.94	0.91	1.05
最小值	-0.89	-0.95	-0.99
平均值	0.24	0.25	0.48
标准差	0.51	0.52	0.75

表6 本次估计的站速度与SONEL速度的差值统计

Tab. 6 Statistical result of difference between station velocity in this paper and SONEL velocity

统计项	mm/yr		
	N方向	E方向	U方向
最大值	1.13	1.78	2.04
最小值	-1.38	-1.65	-1.98
平均值	0.34	0.31	0.56
标准差	0.83	0.78	0.98

2.3 地壳运动分析

利用2.2节GPS站速度估计结果,进行欧洲区域地壳运动规律分析。由图4和图5可以看出,就水平运动而言,欧洲大部分地区以大约20 mm/yr的速度向西北方向运动,且高纬区域的运动速度略小于低纬区域。就垂直运动而言,北纬45°以南的欧洲地区呈下降的运动趋势,且大部分地区运动速度在5 mm/yr以下;北纬45°以北则呈上升的趋势,且随着纬度的增高,上升速度也在变大,靠近北极圈的部分地区的上升速度达20 mm/yr,越靠近北极圈的地区受到冰后回弹的影响越大,上升速率也会越大。本研究得到的欧洲地区水平和垂直地壳运动规律分析结果与Altamimi等^[1]、Grenerczy等^[11]及Santamaria-Gomez等^[12]的研究结果相吻合。

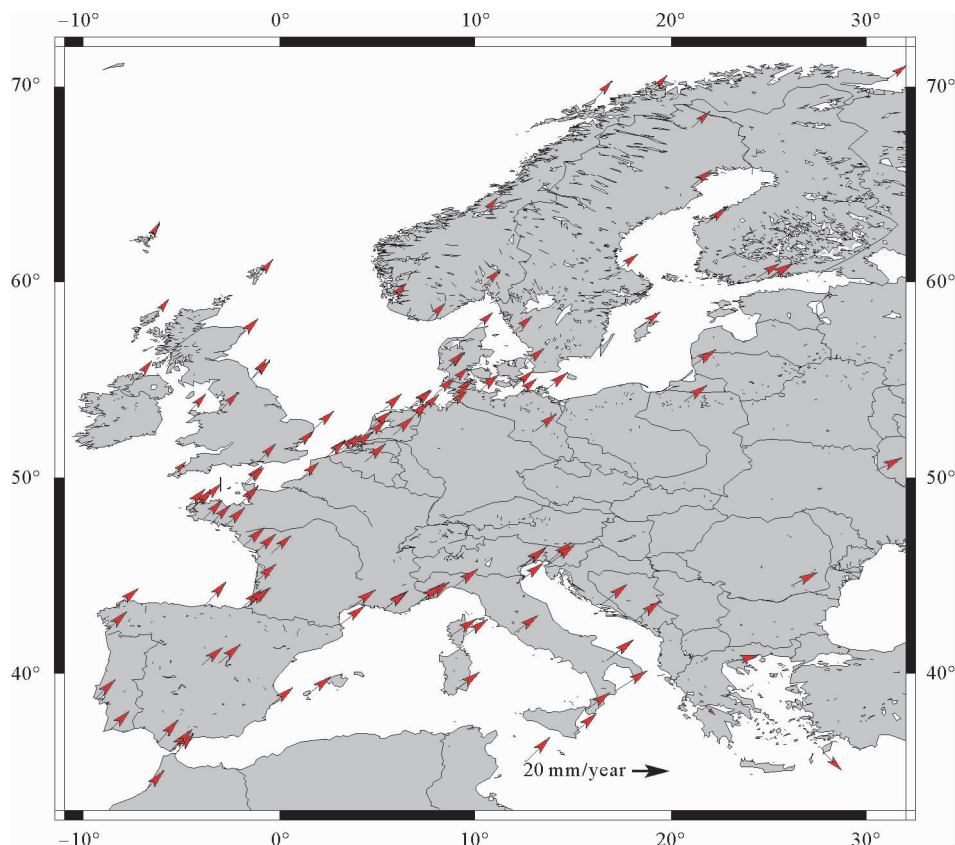


图4 欧洲地区水平速度

Fig. 4 Horizontal velocity in the European Region

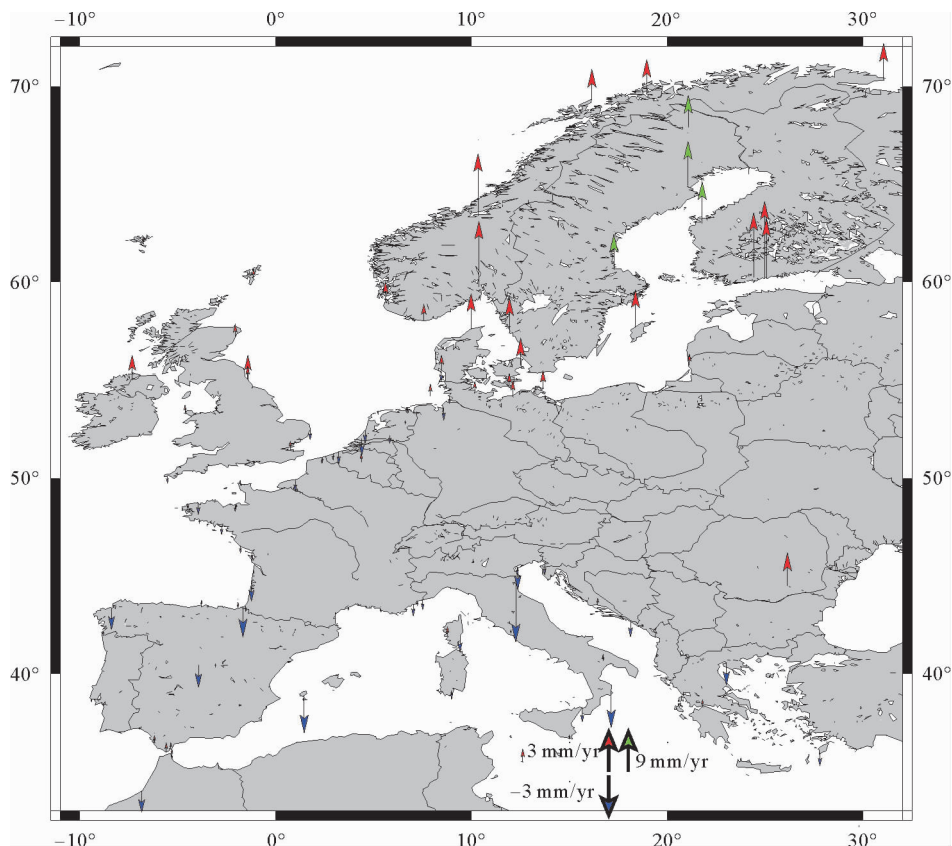


图 5 欧洲地区垂直速度

Fig. 5 Vertical velocity in the European Region

3 结论

利用 GAMIT/GLOBK10.7 对欧洲区域 GPS 观测数据进行解算,基线相对精度平均值在 10^{-9} 量级,解算结果满足高精度地壳运动规律分析的要求。在此基础上利用 SSA 和最小二乘拟合相结合的方法进行了 GPS 站速度估计,中误差的平均值均小于 0.45 mm/yr,优于常规最小二乘谱分析方法的估计精度,说明新方法一定程度上避免了周期项和噪声对站速度估计的影响。将估计结果与 SONEL 站速度对比,平均差值均小于 0.6 mm/yr,外附精度较好。基于以上数据,分析欧洲地区地壳运动:水平方向,欧洲大部分地区以大约 20 mm/yr 的速度向西北方向运动;垂直方向,北纬 45°以南的欧洲区域呈下沉的趋势,且大部分区域运动速度小于 5 mm/yr,北纬 45°以北则呈上升的趋势,且随着纬度的增高上升速度也在变大,靠近北极圈的部分地区的上升速度达 20 mm/yr。

参考文献:

- [1] ALTAMIMI Z, COLLILIEUX X, METIVIER L. ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(8): 457-473.
- [2] MAZZOTTI S, DRAGERT H, HENTON J, et al. Current tectonics of northern Cascadia from a decade of GPS measurements[J/OL]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B12): DOI: 10.1029/2003JB002653.
- [3] MELBOURNE T I, WEBB F H, STOCK J M, et al. Rapid postseismic transients in subduction zones from continuous GPS data[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B10): DOI: 10.1029/2001JB000555.
- [4] LIU G, LI G, TAN K, NIE Z S, et al. Improvement of instantaneous positioning by spatial stacking and modified sidereal filtering methods with application to the 2008 Ms8.0 Wenchuan earthquake[J]. Geodesy and Geodynamics, 2012, 3(1): 13-18.
- [5] SZELIGA W, MELBOURNE T I, MILLER M M, et al. Southern Cascadia episodic slow earthquakes[J/OL]. Geophysical

- Research Letters, 2004, 31(16). DOI: 10.1029/2004GL020824.
- [6] MELBOURNE T I, SZELIGA W M, MILLER M M, et al. Extent and duration of the 2003 Cascadia slow earthquake [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(4). DOI: 10.1029/2004GL021790.
- [7] SELLA G F, STEIN S, DIXON T H, et al. Observation of glacial isostatic adjustment in "stable" North America with GPS [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(2). DOI: 10.1029/2006GL027081.
- [8] ALTAMIMI Z, METIVIER L, COLLILIEUX X. ITRF2008 plate motion model [J/OL]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2012, 117(B7). DOI: 10.1029/2011JB008930.
- [9] 刘经南, 姚宜斌, 施闯. 中国地壳运动整体速度场模型的建立方法研究 [J]. 武汉大学学报. 信息科学版, 2002, 27(4): 331-336.
LIU Jingnan, YAO Yibin, SHI Chuang. Method for establishing the speed field model of crustal movement in China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 331-336.
- [10] 杨少敏, 王琪, 游新兆. 中国现今地壳运动 GPS 速度场的连续变形分析 [J]. 地震学报, 2005, 27(2): 128-138.
YANG Shaomin, WANG Qi, YOU Xinzhaoh. Numerical analysis of contemporary horizontal tectonic deformation fields in China from GPS data [J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(2): 128-138.
- [11] GRENERCZY G, KENYERES A, FEJES I. Present crustal movement and strain distribution in Central Europe inferred from GPS measurements [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2000, 105(B9): 21835-21846.
- [12] SANTAMARIA-GOMEZ A, GRAVELLE M, DANGENDORF S, et al. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 473: 24-32.
- [13] KLOS A, BOGUSZ J, FIGURSKI M, et al. Uncertainties of geodetic velocities from permanent GPS observations: The Sudeten case study [J/OL]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2014, 11(3). DOI: 10.13168/AGG.2014.0005.
- [14] BOS M S, FERNANDES R, WILLIAMS S, et al. Fast error analysis of continuous GPS observations [J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(3): 157-166.
- [15] AGNEW D C. The time-domain behavior of power-law noises [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2013, 19(4). DOI: 10.1029/91GL02832.
- [16] NIKOLAIDIS R. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System [D]. San Diego: University of California, 2002.
- [17] 蒋志浩, 张鹏, 秘金钟, 等. 基于 CGCS2000 的中国地壳水平运动速度场模型研究 [J]. 测绘学报, 2009, 38(6): 471-476.
JIANG Zhihao, ZHANG Peng, BI Jinzhong, et al. The model of crustal horizontal movement based on CGCS2000 frame [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(6): 471-476.
- [18] 蒋志浩, 张鹏, 秘金钟, 等. 顾及有色噪声影响的 CGCS2000 下我国 CORS 站速度估计 [J]. 测绘学报, 2010, 39(4): 355-363.
JIANG Zhihao, ZHANG Peng, BI Jinzhong, et al. Velocity estimation on the colored noise properties of CORS network in China based on the CGCS2000 frame [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(4): 355-363.
- [19] VAUTARD R, YIOU P, GHIL M. Singular spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals [J]. Physical D Nonlinear Phenomena, 1992, 58: 95-126.
- [20] CHEN Q, DAM T V, SNEEUW N, et al. Singular spectrum analysis for modeling seasonal signals from GPS time series [J]. Journal of Geodynamics, 2013, 72: 25-35.
- [21] KONDRASHOV D, BERLOFF P. Stochastic modeling of decadal variability in ocean gyres [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(5): 1543-1553.
- [22] 郭金运, 高文宗, 于红娟, 等. 基于奇异谱分析的静态相对重力观测重力固体潮提取 [J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 3889-3902.
GUO Jinyun, GAO Wenzong, YU Hongjuan, et al. Gravity tides extracted from relative gravimetric data with singular spectrum analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 3889-3902.
- [23] 王鹏程, 郭金运, 王方建, 等. 基于奇异谱分析的汶川地震震前地倾斜数据分析 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 467-474.
WANG Pengcheng, GUO Jinyun, WANG Fangjian, et al. Singular spectrum analysis on ground tilt data before Wenchuan earthquake [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 467-474.
- [24] 史坤朋, 郭金运, 张永明, 等. 基于 CMONOC GPS 数据的 SSA 电离层预测模型研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(11): 1153-1158.
SHI Kunpeng, GUO Jinyun, ZHANG Yongming, et al. Ionospheric prediction of SSA model based on CMONOC GPS [J].

- Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(11): 1153-1158.
- [25] 牛余朋, 郭金运, 袁佳佳, 等. 集成奇异谱分析和自回归滑动平均预测日本近海海平面变化[J]. 地球物理学报, 2020, 63(9): 3263-3274.
- NIU Yupeng, GUO Jinyun, YUAN Jiajia, et al. Prediction of sea level change in Japanese coast using singular spectrum analysis and auto regression moving average[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(9): 3263-3274.
- [26] ZHOU M, GUO J, LIU X, et al. Crustal movement derived by GNSS technique considering common mode error with MSSA [J]. Advances in Space Research, 2020, 66(8): 1819-1828.
- [27] 周茂盛, 郭金运, 沈毅, 等. 基于多通道奇异谱分析的 GNSS 坐标时间序列共模误差的提取[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4383-4395.
- ZHOU Maosheng, GUO Jinyun, SHEN Yi, et al. Extraction of common mode errors of GNSS coordinate time series based on multi-channel singular spectrum analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4383-4395.
- [28] 侯睿, 郭金运, 周茂盛, 等. 北斗二号系统非核心区域定位精度影响因素分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 8-16.
- HOU Rui, GUO Jinyun, ZHOU Maosheng, et al. Analysis of influencing factors of positioning precision in non-core area of BeiDou II system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(1): 8-16.
- [29] BECKERS J M, RIXEN M. EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(12): 1839-1856.
- [30] KONDRASHOV D, GHIL M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2006, 13(2): 151-159.
- [31] KONDRASHOV D, SHPRITS Y, GHIL M. Gap filling of solar wind data by singular spectrum analysis[J/OL]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(15). DOI: 10.1029/2010GL044138.
- [32] 马超, 李斐, 张胜凯, 等. 顾及共性误差的南极半岛地区连续 GPS 站坐标时间序列分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2783-2795.
- MA Chao, LI Fei, ZHANG Shengkai, et al. The coordinate time series analysis of continuous GPS stations in the Antarctic Peninsula with consideration of common mode error[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2783-2795.

(责任编辑:高丽华)